

### MODELAREA, SIMULAREA ȘI CONDUCEREA UNUI SISTEM DE POMPARE IZOLAT ALIMENTAT DE SURSE DE ENERGIE REGENERABILE

**Teză de doctorat – Rezumat** pentru obținerea titlului științific de doctor la Universitatea Politehnica Timișoara în domeniul de doctorat INGINERIA SISTEMELOR

# autor ing. Dorin Bordeașu conducător științific Prof.univ.dr.ing. Octavian Proștean luna: Februarie anul:2023

Sistemele de pompare (SP) au evoluat semnificativ în ultimele decenii, prin modernizare progresivă și folosire de metode eficiente în utilizarea și exploatarea rezervelor de apă. Exemple în acest sens sunt sistemele de irigare cu aspersoare și instalații de picurare, care au înlocuit irigarea tradițională prin gravitație. În acest caz sistemele utilizate determină o creștere semnificativă a consumului de energie electrică. Din acest motiv, în prezent, consumul de energie al stației de pompare reprezintă cel mai mare cost în operarea sistemului, indiferent dacă acesta este destinat alimentării cu apă sau irigării. Pornind de la aceste precizări, teza de doctorat are ca obiectiv principal investigarea sistemelor de pompare alimentate de surse de energie regenerabile (SPASER), cu scopul reducerii cheltuielilor de exploatare. Acest obiectiv se aliniază la strategia Uniunii Europene pentru anul 2030, care prevede creșterea ponderii consumului de energie regenerabilă și a eficienței energetice, simultan cu reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră [4]. Prin tema de cercetare abordată și prin realizarea obiectivelor propuse și anume: modelarea și conducerea unui SP de mare putere și izolat, alimentat de surse de energie regenerabile (SER), s-au adus contribuții în acest domeniu atât de important în contextul crizei energetice actuale, respectiv a încălzirii globale.

**Capitolul 1 - INTRODUCERE -** prezintă motivația și obiective tezei precum și stadiul actual al cercetărilor în problematica abordată.

În prezent SP pentru irigarea câmpurilor agricole sunt alimentate cu energie electrică din rețeaua națională sau de la generatoare electrice pe benzină sau motorină (zone montane sau agricole greu accesibile). Deoarece majoritatea acestor sisteme sunt utilizate în timpul verii, cu solicitare maximă în cele mai însorite zile ale anului, soluția de alimentare cu energie electrică o pot constitui *generatoarele fotovoltaice* (GF), rezultând astfel o bună integrare a GF în SP pentru irigare. O altă soluție pentru sistemul de pompare o reprezintă energia furnizată de *generatoare eoliene* (GE) pentru zonele și perioadele cu vânt. Acesta, în funcție de caracteristicile vântului poate asigura la locul de pompare disponibilitatea energiei atât în timpul nopții cât și în zilele înnorate, când folosirea GF nu este eficientă sau posibilă.

Ca urmare a rentabilității economice oferită prin alimentarea instalațiilor de pompare cu energie fotovoltaică, eoliană sau hibridă (fotovoltaică+eoliană) și a creșterii cerinței pe piață, se impune o modernizare tehnologică pentru realizarea unor instalații robuste, durabile, fiabile și eficiente (în special pentru instalațiile de mare putere).

Un SP performant alimentat cu energie regenerabilă are o complexitate deosebită întru-cât necesită integrarea perfectă într-un singur sistem, a 4 subsisteme din domenii tehnice diferite: sistemul de conversie al energiei regenerabile (energie fotovoltaică, eoliană sau hibridă fotovoltaică-eoliană); sistemul electric; sistemul hidraulic și sistemul de conducere.

Ieftinirea continuă a panourilor fotovoltaice din ultimii ani a făcut ca irigarea utilizând energie fotovoltaică să devină tot mai atractivă, determinând intensificarea cercetărilor pentru dezvoltarea SP alimentate de SER, problema utilizatorilor rămânând identificarea unor tehnologii care să conducă la instalații robuste și fiabile. Payback-ul investiției în retehnologizarea unui sistem de irigație cu un GF este de aproximativ 6 sau 7 ani, în ipoteza unui sistem fiabil (cu o durata de viață de peste 20 de ani) [54].

*Sistemele de pompare alimentate fotovoltaic* (SPAF) devin complexe atunci când puterea crește (>> 25KW), când sunt conectate direct la sistemul de irigații (fără bazin intermediar, funcționând la o presiune constantă), când sunt izolate (fără sprijin de la o rețea electrică) sau când sistemele hidraulice conțin mai multe pompe conectate în serie și/sau paralel.

Un sistem este complex din punct de vedere tehnologic atunci când efectele fluctuațiilor energiei electrice disponibile nu pot fi reduse prin tipologia instalațiilor și când presiunea lichidului pompat trebuie să fie constantă. Exemple de astfel de sisteme sunt SPAF de mare putere izolate de rețeaua electrică pentru care supradimensionarea GF este nefezabilă, problema variației (intermitenței și fluctuațiilor) energiei disponibile în GF trebuind realizată prin mijloace tehnologice adecvate (sisteme de conducere performante). Un alt exemplu o constituie irigarea prin aspersoare cu un sistem multi-pompă (mai multe pompe conectate în serie și/sau paralel), deoarece pomparea directă în rețeaua hidraulică se face la o presiune ridicată și constantă și poate fi corelată cu variația (intermitențe și fluctuațiilor) energiei disponibile în GF doar prin mijloace tehnologice performante.

Unele dintre problemele tehnologice ale pompării utilizând energia fotovoltaică, au fost abordate prin implementarea proiectului european de cercetare în domeniu MASLOWATEN, coordonat de Universitatea Politehnică din Madrid [21]. Proiectul a făcut parte din Programul european Orizont 2020 și a beneficiat de un buget de 5 milioane de euro [21]. Prin acest proiect, pentru o parte din problemele prezentate, s-au căutat soluții tehnologice prin implementarea a 5 astfel de sisteme și prin dezvoltarea unui instrument de simulare, numit **Sisifo** [22], folosit pentru proiectarea sistemelor de pompare alimentate de un GF. Acest instrument are limitări prin faptul că se pot simula doar SP simple din punct de vedere al sistemului hidraulic (o singură pompă care poate pompa apă într-un bazin la presiune și debit variabile, sau într-o rețea de irigații la presiune și debit constante) și doar pentru sistemele alimentate de un GF.

Cercetările *sistemelor de pompare alimentate de generatoare eoliene* (SPAGE) au rămas în urma cercetărilor privind SPAF, chiar dacă, la fel ca și în cazul energiei fotovoltaice, prețul energiei eoliene a scăzut substanțial în ultimii ani, deși există zone unde resursele de energie eoliene sunt net superioare celor fotovoltaice.

Slaba dezvoltare a sistemelor de irigații alimentate cu energie eoliană se poate datora ofertei reduse de GE cu puteri mici și medii (puteri cuprinse intre 5kW si 1 MW) și dificultății oferirii unei game variate de puteri, în comparație cu modularitatea oferită de GF.

Justificarea cercetărilor privind alimentarea SP, în special în domeniul irigațiilor, este dată de faptul că în aceste sisteme alimentate doar de GF, umbra norilor reprezintă o problemă în sine. GF poate fi acoperit de umbra unui nor în câteva secunde, iar puterea generatorului poate scădea brusc (de exemplu, de la 700 W/m2 la 150 W/m2) cea ce poate provoca șocuri electrice (care afectează și semiconductorii de putere, din cauza variației mari de tensiune) și șocuri hidraulice (cavitație și lovituri de berbec în sistemul hidraulic). De asemenea, în multe zone, un SP alimentat cu energie fotovoltaică poate funcționa aproximativ 1700 ore pe an, în timp ce unul alimentat cu energie eoliană poate funcționa 3500 ... 4000 de ore, punându-se problema utilizării energiei eoliene în combinație cu energia fotovoltaică.

Deși vântul prezintă turbulențe și variază mai frecvent, datorită inerției rotorului și generatorului *turbinelor de vânt* (TV), aceste variații nu sunt atât de bruște, evitând majoritatea șocurilor hidraulice și electrice.

Lucrare de doctorat elaborată își propune să dezvolte și să implementeze soluții robuste și fiabile pentru alimentarea SP de mare putere cu GF sau GE.

Principalele obiective fixate în cadrul tezei de doctorat sunt:

- modelarea și conducerea unui SP de mare putere;
- modelarea și conducerea unor GF și GE destinate unui SP de mare putere;
- analiza, sinteza și implementarea unor structuri de conducere ale unui SP de mare putere alimentat de GF sau GE.

**Capitolul 2 - SISTEME DE POMPARE -** demarează cu descrierea unui SP de mare putere și a componentelor sale principale: unitatea de acționare a motorului, motorul de inducție, pompa centrifugă și rețeaua hidraulică. În subcapitolul *2.2 Modelarea sistemului de pompare*, se propune un *model matematic* (MM) dinamic pentru SP de mare putere, care poate fi utilizat atât pentru dimensionare cât și pentru simulare. Contribuția personală la modelarea SP constă în dezvoltarea unui model capabil să simuleze și regimuri tranzitorii specifice SP, nu doar regimuri nominale, așa cum sunt prezentate în general în literatura de specialitate [45, 49, 50, 52]. Modelul propus adaptat pentru conducerea unui sistem multi-pompa, a fost valorificat și prin publicarea în revistă ISI-Q1 [54].

În secțiunea 2.3 Strategia de conducere a sistemului de pompare, sunt dezvoltate cinci strategii de conducere pentru antrenarea motorului cu inducție al pompei, una la turație fixă (nominală), folosind un soft starter și patru pentru antrenarea la turație variabilă, debit variabil, presiune (înălțime de pompare) variabilă sau putere absorbită variabilă, folosind un variator de *frecvență* (VF). După cum se poate observa în figurile 2.27 și 2.30, ambele unități de acționare ale motorului (cu soft starter și cu variator de frecvență) conțin, pe lângă structurile de conducere, și elementele de execuție. Soft-starterul conține și convertorul, iar VF conține atât redresorul cât și invertorul.

Soluția uzuală pentru acționarea pompelor centrifuge de mare putere la turație fixă (nominală) constă în utilizarea unui soft starter, care acționează doar accelerația la turație nominală (prin variație frecvenței de la 0 la 50 Hz) și decelerația de la turația nominală (prin variația frecvențe de la 50 Hz la 0 Hz). În Figura 2.27 este prezentată structura SP în care unitate pompă-motor de inducție este acționată de un soft strater la turație nominală.



Figura 2.27. Sistemul pompă-motor de inducție acționat de un soft strater la turație nominală

După cum se poate observa în figurile 2.27 și 2.28, conducerea motorului de inducție al pompei la turație fixă (reprezentată cu linia punctată-verde în Figura 2.28) se bazează pe soluția clasică de reglare a curentului în convertizoarele de curent alternativ cu conducere vectorială, denumite regulatoare de curent. Această soluție se bazează pe două regulatoare de tip **proporțional-integral** (PI) acordate identic, unul pentru curenții de pe axa "d" (componenta reală) și unul pentru curenții de pe axa "q" (componenta imaginară). Aceste regulatoare de curent sunt acordate folosind un sistem echivalent de ordinul doi al curenților motorului cu inducție [40].



Figura 2.28. Structurile de conducere ale motorului de inducție al pompei la turație fixă (linia punctată-verde), respectiv la turație variabilă (linia punctată-albastră) [35]

Soluția uzuală pentru acționarea pompelor centrifuge de mare putere la turație variabilă constă în utilizarea unui VF (Figura 2.30), care pe lângă accelerarea și decelerarea motorului de inducție, reglează și turația care poate diferi de cea nominală. Din acest motiv, structura de conducere (reprezentată cu linia punctată-albastră în Figura 2.28) și reglarea parametrilor pompei (debit, presiune sau putere absorbită) la turație variabilă utilizează aceleași sisteme în buclă închisă ca și structura de conducere propusă pentru acționarea la turație nominală (reprezentată cu linia punctată-verde), la care se adaugă în cascadă un regulator pentru variația turației (Figura 2.28). În paralel cu bucla regulatorului pentru variația turației, se introduce în mod similar o buclă suplimentară pentru regulatorul de flux [35].



Figura 2.30. Sistemul pompă-motor de inducție acționat de un variator de frecvență la turație variabilă

Printre contribuțiile aduse la dezvoltarea strategiei de conducere propuse pentru acționarea SP se numără și determinarea expresiilor matematice pentru obținerea abaterii frecvenței electrice față de valoarea de referință  $\Delta f = (fm^*-fm)$ , în funcție de abaterea debitului pompat  $\Delta Q = (Q^* - Q)$ , de abaterea înălțimii de pompare (presiunii)  $\Delta H = (H^*-H)$  sau de abaterea puterii absorbite  $\Delta P_{pump} = (P_{pump}^*-P_{pump})$ , necesare atât pentru acționarea pompei cu un VF la debitul sau presiunea dorită, cât și pentru acționarea SP, astfel încât puterea absorbită de acesta să urmărească puterea dezvoltată de o sursă de alimentare fluctuantă și intermitentă.

$$\Delta Q = \frac{2 \cdot \pi}{p_{motor}} \cdot \Delta f \cdot (\dot{Q})_{fm^*} = \frac{2 \cdot \pi \cdot Q^*}{p_{motor} \cdot fm^*} \cdot \Delta f \quad \text{si} \quad \Delta f = \frac{p_{motor} \cdot fm^*}{2 \cdot \pi \cdot H^*} \cdot \Delta Q \tag{2.70}$$

$$\Delta H = \frac{2 \cdot \pi}{p_{motor}} \cdot \Delta f \cdot \left(\dot{H}\right)_{fm^*} = \frac{4 \cdot \pi \cdot H^*}{p_{motor} \cdot fm^*} \cdot \Delta f \quad \text{si} \quad \Delta f = \frac{p_{motor} \cdot fm^*}{4 \cdot \pi \cdot H^*} \cdot \Delta H \tag{2.72}$$

unde:

 $\dot{Q}$ ,  $\dot{H}$  și  $P_{pump}$  s-au obținut derivând legile de similitudine, *fin* fiind frecvența electrică curentă,  $Q^*$  referința debitului pompei,  $H^*$  referința înălțimii de pompare și  $P_{pump}^*$  referința puterii absorbite de către pompă.

În ultimul subcapitol, *2.4. Simularea sistemului de pompare*, modelul SP și strategiile de conducere propuse sunt validate prin realizarea a cinci simulări în care SP este antrenat la turație fixă, turație variabilă, debit variabil, presiune variabilă și putere disponibilă variabilă. Performanța strategiilor de conducere propuse s-a determinat prin analiza mai multor indicatori de performanță cum ar fi: turația și cuplul motorului de inducție și ale pompei, puterea absorbită de motorul de inducție din rețeaua electrică incluzând variațiile tensiunilor și curenților trifazici, precum și a debitului și a înălțimii de pompare.

**Capitolul 3** – **SISTEME DE CONVERSIE A ENERGIEI FOTOVOLTAICE (SCEF)** – debutează cu o succintă descriere a unui *sistem de conversie a energiei fotovoltaice* (SCEF) existent în cadrul unui SP în Aragon, Spania [94], unde autorul tezei a participat direct de etapa de proiectare până la punerea în funcțiune. În cadrul SP menționat, s-au realizat experimentele de validarea a MM și a sistemelor de conducere propuse. Puterea instalată a SCEF este de 56,95 kW având ca și componente principale: un ansamblu format din 170 de panouri fotovoltaice de 335 W, combinate în 10 serii conectate în paralel de câte 17 *panouri fotovoltaice* (PV) (5.695 kW) legate în serie, distribuite pe 3 trackere orizontale cu o singură axă, descentralizate și autonome (57 PV pe fiecare tracker). Trackerele au o orientare N-S (nord-sud) și un orizont de mișcare de 110° în jurul axei.

În subcapitolul, *3.2 Modelarea SCEF*, este dezvoltat un model static utilizat pentru dimensionare și simularea funcționării nominale a SCEF pe perioada unui an, respectiv un model dinamic utilizat în dezvoltarea structurii de conducere și pentru simularea regimurilor de funcționare parțiale și de tranziție ale SCEF.

În cadrul secțiunii, *3.3 Structura de conducerea a SCEF*, se consideră *urmărirea punctului de maximă putere* (UPMP), bazată pe algoritmul de *perturbare și observare* (P&O) [41, 55, 71], la care s-au făcut modificările necesare pentru integrarea ulterioară într-un SP de mare putere rezultând pseudocodul algoritmului P&O prezentat în Figura 3.12.



Figura 3.12. Pseudocodul algoritmului P&O

Ca și principale contribuții aduse prin acest capitol menționez: MM dinamic și structura de conducere ale SCEF (implementate în Simulink), utilizând ca intrări radiația și temperatura celulelor fotovoltaice măsurate pe SCEF existent menționat. Validarea experimentală a simulărilor a fost realizată pentru patru scenarii diferite: o zi cu cer senin, o zi cu un singur nor mare și dens care acoperă cerul pentru o perioadă a zilei, o zi cu mulți nori mici și rapizi și o zi complet înnorată.

În prima parte a **Capitolului 4** – **SISTEM DE CONVERSIE A ENERGIEI EOLIENE** (SCEE) este realizată o descriere generală a unui *sistem de conversie a energiei eoliene* (SCEE) și a componentelor sale principale (rotor, nacelă și turn). În secțiunea, *4.2. Modelarea SCEE*, este dezvoltat un MM dinamic al SCEE, rezultat din compatibilizarea și combinarea modelelor neliniare ale componentelor SCEE prezentate în [84] (turbina de vânt, turnul și paleta turbinei) respectiv [87] (arborele, *generatorul de inducție cu dublă alimentarea* - GIDA și sistemul de acționare a pasului paletelor). Modelul dinamic astfel obținut este capabil să simuleze funcționarea dinamică a unui SCEE (regimurilor tranzitorii), inclusiv decuplarea TV.

În 4.3 Strategia de conducere a SCEE, este dezvoltat un sistem de conducere care combină un prim nivel de structuri de conducere (ale convertoarelor rotorului și statorului GIDA, [87]) și un al doilea nivel de structuri de conducere (ale cuplul generatorului și ale pasului paletelor [88]). Primul nivel de structuri de conducere (denumit structura de conducere a GIDA) reglează lățimea benzii de modulare a două impulsuri (atât al rotorului cât și al statorului GIDA) care reglează impulsurile comutatoarelor convertizoarelor. Al doilea nivel de structuri de conducere, denumit structura de conducerea a TV, conține două regulatoare (regulatorul de cuplu al generatorului și cel al pasului paletelor TV) care reglează atât cuplul și turația rotorului TV cât și ale generatorului. S-a proiectat un regulator de cuplu al generatorului, bazat pe cel considerat în [86], care a fost îmbunătățit prin capabilitățile de a adapta puterea produsă la cea solicitată (reducerea puterii produse de SCEE conform cererii de putere când aceasta este mai mică decât cea nominală). Prin soluția propusă, cuplul generatorului este redus atunci când vântul atinge viteza maximă de functionare sau când puterea produsă atinge puterea solicitată. Simultan, este actionat sistemul de actionare al pasului paletelor TV.

Pentru sinteză regulatorului de tip PI utilizat pentru reglarea pasului paletei este propusă o variantă îmbunătățită, în care constanta de proporționalitate  $(K_p)$  și timpul de integrare  $(K_i)$ sunt programabile utilizând o funcției  $GK(\beta)$ :

$$K_{p}(\beta) = K_{prated} \cdot GK(\beta)$$

$$K_{i}(\beta) = K_{irated} \cdot GK(\beta)$$

$$(4.146)$$

$$(4.147)$$

$$\beta) = K_{irated} \cdot GK(\beta) \tag{4.147}$$

unde:  $K_{prated}$  și  $K_{irated}$  sunt valorile nominale ale parametrilor regulatorului PI;  $GK(\beta)$ este funcția programării parametrilor K<sub>p</sub> și K<sub>i</sub>, obținută pe baza valorii curente a pasului paletelor TV,  $(\beta)$  și a valorii pasului paletelor TV pentru care cuplul rotorului TV s-a dublat  $(\beta_k)$ :

$$GK(\beta) = \frac{1}{1 + \frac{\beta}{\beta_k}}$$
(4.148)

Pentru determinarea lui  $\beta_k$  s-a liniarizat variația cuplul rotorului din modelul neliniar al SCEE folosind aproximarea seriei Taylor conform relatiei 4.26 [89]:

$$\Delta M_{rot} = \frac{\partial M_{rot}}{\partial v_{rot}} \Big|_{(v_{rot0},\Omega_0,\beta_0)} \cdot \Delta v_{rot} + \frac{\partial M_{rot}}{\partial \Omega} \Big|_{(v_{rot0},\Omega_0,\beta_0)} \cdot \Delta \Omega + \frac{\partial M_{rot}}{\partial \beta} \Big|_{(v_{rot0},\Omega_0,\beta_0)} \cdot \Delta \beta$$
(4.26)

unde:

 $\Omega_0$  [rad/s] este turația a rotorului în punctul de liniarizare;

 $v_{rot0}$  [m/s] este variația vitezei vântului în punctul de liniarizare;

 $\beta_0$  [rad] este pasul paletei în punctul de liniarizare;

Mroto [Nm] este cuplul rotorului în punctul de liniarizare;

 $\Delta \Omega$  este variația turației rotorului;

 $\Delta v_{rot}$  este variația vitezei vântului;

 $\Delta\beta$  este variația pasului paletei

și  $\Delta M_{rot}$  este variația cuplului rotorului.

Pentru determinare pasului paletelor pentru care se dublează cuplul rotorului TV se consideră relație 4.26, în care se ignoră variația vitezei vântului considerând că turația rotorului se menține constantă în punctul nominal, obținându-se [89]:

$$2 \cdot M_{rot0} = M_{rot0} + \frac{\partial M_{rot}}{\partial \beta} \Big|_{(v_{rot0}, \Omega_0, \beta_0)} \cdot (\beta_0 - \beta_k)$$
(4.149)

unde:

 $M_{rot0}$  [Nm] este cuplul rotorului în punctul de liniarizare;

 $\beta_0$  [rad] este pasul nominal al paletelor;

 $\beta k$  [rad] este pasul paletelor pentru care variația s-a dublat;

∂M<sub>rot</sub> [Nm/°] este variația cuplului rotorului în funcție de pasul paletelor.  $\frac{\partial \beta}{\partial \beta} |_{(v_{rot0},\Omega_0,\beta_0)}$ 

Rezultând astfel că pasul paletei pentru care se dublează cuplul rotorului TV este [89]:

$$\beta_k = \beta_0 - \frac{M_{rot0}}{\frac{\partial M_{rot}}{\partial \beta}\Big|_{(\nu_{rot0}, \Omega_0, \beta_0)}}$$
(4.150)

Îmbunătățirile aduse considerând  $K_p$  și  $K_i$  programabile au fost confirmate de rezultatele simulărilor prezentate în secțiunea 4.4. Simulări SCEE, în care se poate observa că răspunsul sistemului de acționare al pasului paletei TV este mai rapid, conducând la o stabilizare mai rapidă a energie produse, cu mai puține fluctuații și pierderi în timpul funcționării la solicitări maxime la un vânt turbulent.

Capitolul 5 – SISTEME DE POMPARE ALIMENTATE DE SISTEME DE CONVERSIE A ENERGIEI FOTOVOLTAICE (SPASCEF) - debutează cu descrierea unui sistem de pompare alimentat de un sistem de conversie a energie fotovoltaice (SPASCEF) și a componentelor sale principale (SCEF, SP și un PLC-*Programmable logic controller*).

În cadrul subcapitolul *5.2 Modelarea SPASCEF*, pe baza modelul SP și a SCEF dezvoltate și validate în capitolele *2* respectiv *3*, s-a obținut un MM dinamic al SPASCEF capabil să simuleze funcționarea regimurilor nominale și tranzitorii.

În **5.3** Strategia de conducere a SPASCEF, s-a dezvoltat o strategie de conducere a unui SPASCEF formată din 3 structuri de conducere conectate în cascadă, prezentată în Figura 5.3 La structura de conducere a pompei cu turație variabilă (dezvoltată în secțiunea **2.3**) s-a adăugat structura de conducere a SPASCEF, căreia i s-a adăugat ulterior structura de conducere a SCEF (dezvoltată în secțiunea **3.3**).

Structura de conducere a pompei la o turație variabilă este necesară pentru acționarea motorului de inducție al pompei printr-un VF la diferite turații de referință. Aceasta conține două regulatoare PI, unul pentru turație și unul pentru flux, conectate în cascadă cu două regulatoare de curent PI acordate identic, unul pentru reglarea curenților de pe axa "d" (componenta reală) și unul pentru curenții de pe axa "q" (componenta imaginară). Abaterea frecvenței electrice  $\Delta f = (fm^*-fm)$ , (diferența dintre frecvența de referință și cea curentă), furnizată de strategia de conducere a SPASCEF (relația 5.1) este preluată de regulatorul de turație PI din structura de conducere a pompei la turație variabilă:

$$\Delta f = \begin{cases} \frac{-p_{motor} \cdot \omega_{pss}}{2 \cdot \pi} & P_{PECS} < P_{psmin} \\ \frac{p_{motor} \cdot fm^*}{6 \cdot \pi \cdot (P_{pump})^*} \cdot (P_{PECS} - P_{pump}) & P_{PECS} \ge P_{psmin} \\ \frac{p_{motor} \cdot fm^*}{4 \cdot \pi \cdot H^*} \cdot \Delta H & H \ge H^* \end{cases}$$
(5.1)

unde:

 $P_{psmin}$  reprezintă puterea minimă necesară motorului de inducției al pompei submersibile (pentru asigurarea unui debit minim necesar răcirii motorului);

 $P_{PECS}$  este puterea generată de SCEF;

 $P_{pump}$  este puterea pompei;

fm și fm\* sunt frecvențele electrice ale motorului (valoarea curentă și referința acesteia);

*p<sub>motor</sub>* reprezintă numărul perechilor de poli ai motorului cu inducție;

 $\omega_{pss}$  reprezintă turația pompei;

și  $\Delta H = (H^* - H)$  este abaterea înălțimii de pompare (presiune) (diferența dintre înălțimea de pompare și referința acesteia).



Figura 5.3. Structura sistemului de conducere SPASCEF

Structura de conducere a SPASCEF asigura conducerea în 3 cazuri specifice:

- 1. când înălțimea de pompare este mai mare decât cea de referință ( $H \ge H^*$ ), sistemul de conducere reglează înălțimea de pompare;
- 2. când înălțimea de pompare este mai mică decât cea de referință ( $H < H^*$ ) și puterea produsă de un SCEF este mai mică decât puterea minimă necesară funcționarii SP ( $P_{PECS} < P_{psmin}$ ), sistemul de conducere decelerează SP;
- când înălțimea de pompare este mai mică decât cea de referință (H<H\*) și puterea produsă de un SCEF este mai mare decât puterea minimă necesară funcționarii SP (P<sub>PECS</sub>≥ P<sub>psmin</sub>), sistemul de conducere acționează SP astfel încât puterea absorbită de acesta urmărește puterea produsă de SCEF.

Structura de conducere a SCEF este necesară pentru operarea SCEF în *punctul de putere maximă* (PPM) care devine referință pentru structura de conducere a SPASCEF.

În cadrul secțiunii 5.4. Sistem de monitorizare, s-a conceput și implementat un sistem de monitorizare pentru determinarea performanței sistemelor de pompare fotovoltaice, sistem mai performant decât cele utilizate în momentul de față (care aplică metodologia IEC 62253 [96]), oferind capabilități de evaluare a regimurilor tranzitorii și de asemenea de detectare a șocurilor electrice și hidraulice. Sistemul de monitorizare propus utilizează un sistem de achiziție și stocare a datelor (data logger) neintruziv (structura sa fiind prezentată în Figura 5.4) care măsoară și stochează valorilor furnizate de traductoare la fiecare secundă. Traductoarele utilizate în sistemul de monitorizare sunt: o celulă fotovoltaică calibrată (utilizată la măsurarea radiației și a temperaturii), un traductor de tensiune de *curent continuu* (CC) (necesar măsurării tensiunii magistralei generatorului fotovoltaic, capabil să detecteze șocurile electrice), un traductor de presiune (pentru măsurarea presiunii în rețeaua hidraulică, capabil să detecteze și șocurile hidraulice), un traductor de debit (pentru măsurarea temperaturii lichidului pompat), și respectiv un traductor de temperatură (pentru măsurarea temperaturii lichidului pompat).

În subcapitolul 5.5. Simularea SPASCEF, s-au validat experimental acuratețea modelului SPASCEF și performanța strategiei de conducere propuse, prin comparația rezultatelor simulate în Matlab/Simulink (puterea produsă de SCEF; puterile absorbite de VF, de motorul de inducție și de pompă; turațiile și cuplul motorului de inducție și ale pompei; debitul și înălțimea de pompare) cu cele obținute experimental pe SPASCEF existent în Aragon, Spania (Figura 5.1) utilizând sistemul de monitorizare propus considerând cinci zile reprezentative (o zi cu cer senin, o zi cu un singur nor mare și dens care acoperă cerul pentru o perioadă a zilei, o zi cu mulți nori mici și rapizi și o zi complet înnorată).



Figura 5.1. Instalație existentă a SPASCEF Aragon Spania



Figura 5.4. Sistemul de monitorizare propus pentru determinarea performanței SPASCEF

Capitolul 6, intitulat – SISTEME DE POMPARE ALIMENTATE DE SISTEME DE CONVERSIE A ENERGIEI EOLIENE (SPASCEE) - prezintă modelarea, simularea și conducerea *sistemului de pompare alimentat de un sistem de conversie a energiei eoliene* (SPASCEE) prin dezvoltarea unui MM dinamic adecvat și a unei strategii de conducere eficiente, robuste și fiabile. La sfârșitul capitolului sunt analizate rezultatele simulărilor obținute.

MM dinamic al SPASCEE, dezvoltat în secțiunea *6.2 Modelarea SPASCEE*, consideră conectarea unui SCEE (o turbină de vânt cu pasul paletelor variabil, sistemul de acționare al acestora, arborele de transmisie, turnul turbinei și un GIDA împreună cu electronica de putere aferentă), cu un SP destinat irigațiilor (o pompă centrifugă, un motor de inducție acționat de un VF și o rețea de irigare cu un traductor de presiune).

Strategia de conducere a SPASCEE dezvoltată și propusă în 6.3 Strategia de conducere a SPASCEE, (PSPWECS Control Strategy în Figura 6.1), conține trei niveluri de structuri de conducere: trei structuri de conducere la nivelul întâi (două necesare pentru convertoarele de putere ale rotorului și statorului generatorului SCEE și unul pentru motorul pompei), trei structuri de conducere la nivelul al doilea (două necesare pentru SCEE și unul pentru SP) și o structură de conducere la nivelul al treilea (necesară pentru conducerea întregului sistem SPASCEE).

Nivelul întâi de structuri de conducere reglează formele de undă ale tensiunii și curentului produse de generatorul SCEE (structuri de conducere ale rotorului și statorului GIDA propuse în secțiunile 4.3.4 și 4.3.5), respectiv pe cele absorbite de motorul de inducție al pompei (structură de conducere propusă în secțiunea 2.3.1).

Al doilea nivel de structuri de conducere conține două regulatoare atât pentru cuplul cât și pentru turația rotorului TV cuplate cu generatorul (regulatorul de cuplu al generatorului și cel al pasului paletelor TV, propuse în secțiunile 4.3.2 și 4.3.3), respectiv structura de conducere a motorului de inducție al pompei la turație variabilă (regulatorul pentru variația turației, respectiv cel de flux propuse în secțiunea 2.3.2).

Al treilea nivel conține structura de conducerea a SPASCEE (*PSPWECS Controller* în Figura 6.1), generează mărimea de prescriere a SCEE ( $P_{WECSdem}^*$ ) în funcție de presiunea de pompare (exprimată în înălțime de pompare *H*) și referința acesteia, conform relației 6.1 [48]:

$$P_{WECSdem}^{*} = \begin{cases} P_{ps0} \cdot \eta_{0} & H < H^{*} \\ \left(\frac{3 \cdot P_{ps0}}{2 \cdot H_{0}} \cdot \Delta H + P_{ps0}\right) \cdot \eta_{s} & H \ge H^{*} \end{cases}$$
(6.1)

și calculează abaterea frecvenței electrice  $\Delta f = (fm^*-fm)$  (diferența dintre referință și valoarea curentă) a regulatorului de turație al motorului pompei în funcție de puterea produsă de SCEE,  $P_{WECS}$ , conform relației 6.2 [48]:

$$\Delta f = \begin{cases} \frac{-p_{motor} \cdot \omega_{pss}}{2 \cdot \pi} & P_{WECS} < P_{psmin} \\ \frac{p_{motor} \cdot fm^*}{6 \cdot \pi \cdot (P_{pump})^*} \cdot (P_{WECS} - P_{pump}) & P_{WECS} \ge P_{psmin} \end{cases}$$
(6.2)

unde  $P_{psmin}$  reprezintă puterea minimă necesară motorului de inducției al pompei submersibile (pentru asigurarea unui debit minim necesar răcirii motorului).

Structura de conducere a SPASCEE asigura conducerea în 4 cazuri specifice:

- 1. când puterea produsă de un SCEE este mai mică decât puterea minimă necesară funcționarii SP ( $P_{WECS} < P_{psmin}$ ), sistemul de conducere decelerează SP;
- când puterea produsă de un SCEE este mai mare decât puterea minimă necesară funcționarii SP (*P<sub>WECS</sub>≥P<sub>psmin</sub>*), sistemul de conducere acționează SP astfel încât puterea absorbită de acesta urmărește puterea produsă de SCEE;

- 3. când înălțimea de pompare este mai mică decât cea de referință ( $H < H^*$ ), sistemul de conducere solicită SCEE producerea puterii necesare funcționarii nominale SP;
- când înălțimea de pompare este mai mare decât cea de referință (H≥H\*), sistemul de conducere reglează puterea produsă de SCEE conform necesarului de putere astfel încât presiunea SP să fie egală cu cea de referință.



Figura 6.1. Structura sistemului de conducere SPASCEE [48]

Simulările realizate și prezentate în secțiunea *6.4 Simularea SPASCEE*, acoperă toată gama de regimuri de funcționare considerate reprezentative ale SPASCEE. Rezultatele simulărilor validează corectitudinea, performanța și eficacitatea strategiei de conducere propuse.

Una dintre principalele caracteristici ale SPASCEE propus, comparativ cu preocupările existente în domeniu [118, 119], constă în faptul că poate integra un SCEE comercial într-un SP existent, fără a-i modifica structura sau sistemul de conducere, putând fi implementată fără costuri adiționale.

**Capitolul 7 - CONCLUZII FINALE, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI PERSPECTIVE DE DEZVOLTARE -** conține concluziile finale corelate cu obiectivele principale ale tezei, contribuțiile autorului și posibilele direcții de dezvoltare a cercetării. Contribuția cercetărilor efectuate în teză au fost focusate spre dezvoltarea și propunerea unor modele și structuri de conducere adecvate pentru SP complexe și izolate alimentate de SER (SCEF sau SCEE).

#### Concluzii finale

Rezolvând problemele ridicate în această teza de doctorat, se pot trage următoarele concluzii principale.

Analiza prin simulare a funcționării SP în diverse regimuri specifice (turație fixă, turație variabilă, debit variabil, presiune variabilă și putere disponibilă variabilă) necesită dezvoltarea unor MM pentru principalele componente (subsisteme) ale acestor tipuri de sisteme și anume: unitatea de acționare a motorului, motorul de inducție, pompa centrifugă și rețeaua hidraulică. MM dinamic al SP dezvoltat și propus a fost implementat și validat atât utilizând mediul de simulare Matlab/Simulink, cât și experimental pe un SP existent, putând fi utilizat pentru dimensionare (proiectare) și simulare a funcționarii SP, precum și în sinteza și dezvoltarea diverselor strategiei de conducere ale SP.

Conducerea SP a fost abordată pentru două tipuri de unități de acționare (disponibile comercial) ale motorului de inducție al pompelor de mare putere: varianta cu soft starter pentru acționarea motorului de inducție la turație fixă și varianta cu VF cu cel puțin un regulator PI integrat pentru acționarea motorului de inducție la turație variabilă, debit variabil, presiune variabilă sau putere disponibilă variabilă.

Studiile de caz, realizate prin simulare și experiment pe un sistem industrial de pompare de mare putere, au condus la concluzia că utilizarea MM determinate pentru componentele SP și strategiile de conducere propuse asigură performanțe bune, fiind recomandate pentru configurații de SP cu motoare de inducție acționate de soft starter-uri sau de VF cu cel puțin un regulator PI integrat.

Pentru dimensionarea (proiectarea) și simularea în regim permanent al SCEF s-a dezvoltat un model static, iar pentru simularea regimurilor tranzitorii, sinteza și dezvoltarea strategiilor de conducere s-a considerat un model dinamic cu o singură diodă al SCEF.

Pentru conducerea SCEF s-a dezvoltat o structură de conducere pentru UPMP a unui SCEF pe baza algoritmului P&O, adaptat pentru integrarea acestuia într-o strategie de conducere a unui SP.

Studiile de caz realizate prin simulare și experiment pe un SCEF, confirmă că prin utilizarea MM determinate pentru subsistemele sistemului de conversie, strategia de conducere asigură performanțe bune fiind recomandată pentru configurații de SCEF care alimentează SP de mare putere.

În prezenta lucrare s-a dezvoltat un MM dinamic neliniar utilizat în simularea regimurilor tranzitorii ale unui SCEE și a variantei lui liniarizate utilizată în sinteza strategiei de conducere.

Conducerea SCEE, cu pas și turație variabile, a fost abordată pe două niveluri de structuri de conducere: structurile de conducere ale convertoarelor rotorului și statorului GIDA pe primul nivel și structurile de conducere ale cuplului generatorului și ale pasului paletelor pe al doilea

nivel. Pentru a adapta puterea produsă la o puterea de referință variabilă acționând pasul paletelor TV și pentru decuplarea rotorului TV atunci când vântul atinge viteza de întrerupere au fost necesare modificări în structurile de conducere pentru cuplul GIDA. De asemenea, îmbunătățiri semnificate au fost aduse prin programarea constantei de proporționalitate ( $K_p$ ) și a timpului de integrare ( $K_i$ ) ale regulatorului PI din cadrul structurii de conducere al pasului paletelor; valorile  $K_p$  și  $K_i$  programate fiind obținute pe baza liniarizării modelului SCEE, prin utilizarea aproximării prin serii Taylor și prin determinarea unei expresii matematice care permite calcularea valorilor programate ale lui  $K_p$  și  $K_i$  în funcție de valoarea curentă a pasului paletelor TV ( $\beta$ ) și de valoarea pasului paletelor pentru care cuplul rotorului TV s-a dublat, ( $\beta k$ ).

Studiile de caz realizate confirmă că utilizarea modelului dinamic neliniar determinat pentru SCEE, structura de conducere dezvoltată și propusă asigură performanțe bune, fiind recomandate pentru configurații de SCEE care alimentează SP de mare putere.

MM dinamic al SPASCEF dezvoltat și propus în cadrul lucrării a fost implementat și validat atât în mediul de simularea Matlab/Simulink cât și experimental și poate fi utilizat pentru dimensionare (proiectare), simularea funcționării, precum și în sinteza și dezvoltarea diverselor strategii de conducere.

Conducerea SPASCEF a fost abordată pentru 3 cazuri distincte: când sistemul de conducere reglează înălțimea de pompare (situație în care înălțimea de pompare este mai mare decât cea de referință), când sistemul de conducere decelerează funcționarea sistemului (situație în care înălțimea de pompare este mai mică decât cea de referință și puterea produsă de un SCEF este mai mică decât puterea minimă necesară funcționarii SP) și când sistemul de conducere acționează SP astfel încât puterea absorbită de acesta urmărește puterea produsă de SCEF (situație în care înălțimea de pompare este mai mică decât cea de referință și puterea produsă de SCEF (situație în care înălțimea de pompare este mai mică decât cea de referință și puterea produsă de SCEF (situație în care înălțimea de pompare este mai mică decât cea de referință și puterea produsă de SCEF (situație în care înălțimea de pompare este mai mică decât cea de referință și puterea produsă de un SCEF este mai mare decât puterea minimă necesară funcționarii SP).

Studiile de caz, realizate prin simulare și experiment pe instalația industrială a unui SPASCEF existent, confirmă că MM determinate pentru componentele SPASCEF, precum și strategiile de conducere dezvoltate asigură performanțe bune, o creștere a robusteții și fiabilității (prin reducerea numărul șocurilor hidraulice și electrice din SPASCEF).

Conducerea SPASCEE a fost abordată pentru 4 cazuri distincte: (i) sistemul de conducere decelerează funcționarea sistemului (când puterea produsă de SCEE este mai mică decât puterea minimă necesară funcționarii SP); (ii) sistemul de conducere acționează SP astfel încât puterea absorbită de acesta urmărește puterea produsă de SCEE (când puterea produsă de SCEE este mai mare decât puterea minimă necesară funcționarii SP); (iii) sistemul de conducere apterea produsă de SCEE este mai mare decât puterea minimă necesară funcționarii SP); (iii) sistemul de conducere, prin intermediul unui referințe, solicită SCEE producerea puterii necesare funcționarii nominale a SP (când înălțimea de pompare este mai mică decât cea de referință); (iv) sistemul de conducere reglează puterea produsă de SCEE conform necesarului de putere, cu scopul ca presiunea SP să fie egală cu cea de referință (când înălțimea de pompare este mai mare decât cea de referință).

Studiile de caz realizate confirmă că prin utilizarea MM determinate pentru componentele SPASCEE, strategiile de conducere dezvoltate și propuse asigură performanțe bune și reduc încărcarea componentelor mecanice ale SCEE, precum și a numărului șocurilor hidraulice și electrice din SPASCEE.

Pentru elaborarea prezentei teze, s-a parcurs o bibliografie care conține **123** de referințe din literatura de specialitate, majoritatea fiind de date recente. De asemenea, bibliografia include **13** referințe al căror autor principal sau coautor este autorul acestei teze: **1** articol științific publicat într-o revistă indexată ISI Web of Science (WoS) cu quartila **Q1** și *factor de impact* (IF) egal cu **2.592**; **1** articol științific publicat într-o revistă indexată ISI WoS cu quartila **Q3** și IF egal cu **3.252**; **2** articole științifice publicate în reviste indexate ISI WoS cu quartila **Q4**, una cu IF egal cu **0.782**, și una fără factor de impact; **6** lucrări științifice publicate în volumele conferințelor internaționale indexate ISI WoS; **2** publicate în reviste de specialitate indexate BDI și **1** carte în calitate de coautor.

# Contribuții personale

Prezenta teză cuprinde, din punctul de vedere al autorului, următoarele contribuții semnificative:

- dezvoltarea și validarea experimentală (pe o instalație existentă a unui SPASCEF din Aragon, Spania, secțiunea 3.5, 5.1 și 5.5) a unui MM de SP utilizabil atât pentru dimensionare cât și pentru simularea funcționării sistemelor de pompare (secțiunea 2.2);
- determinarea unor expresii matematice care exprimă: abaterea frecvenței electrice față de valoarea de referință în funcție de abaterea debitului pompat (*relația 2.70*), de abaterea înălțimii de pompare (presiune) (*relația 2.72*), respectiv de abaterea puterii absorbite de către motorul de inducție al pompei (*relația 2.74*). Expresiile sunt utilizate ulterior la dezvoltarea strategiei de conducere a pompei centrifuge prin intermediul unui VF, considerând debitul/presiunea ca mărime de referință, sau pentru urmărirea puterii produse de către o sursă de energie fluctuantă și intermitentă (secțiunea 2.3.2);
- dezvoltarea și implementarea unei strategii de conducere pentru operarea unui SP (bazată pe conducerea vectorială a unei mașini de inducție, ale cărei referințe pentru reglarea curenților sunt furnizate de două regulatoare de tip PI în cascadă, unul pentru turație și unul pentru flux) la: turație variabilă, debit variabil, presiune variabilă sau putere absorbită variabilă (secțiunea 2.3);
- realizarea unui scenariu constând din cinci simulări în Matlab/Simulink care au servit la determinarea performanței MM dinamic propus pentru SP, respectiv a performanței strategiilor de conducere dezvoltate pentru turație fixă, turație variabilă, debit variabil, presiune variabilă și putere disponibilă variabilă (secțiunea 2.4);
- dezvoltarea unui model static, respectiv unui model dinamic utilizabile pentru simularea regimului permanent, respectiv regimurilor tranzitorii într-un SCEF (secțiunea 3.2);
- dezvoltarea unei structuri de conducere pentru UPMP a unui SCEF pe baza algoritmului P&O, adaptat pentru integrarea lui într-o strategie de conducere a unui SP (secțiunea *3.3*);
- implementarea modelului și structurii de conducere propuse pentru SCEF și validarea experimentală a acestora pentru patru scenarii diferite: o zi cu cer senin, o zi cu un singur nor mare și dens care acoperă cerul pentru o perioadă a zilei, o zi cu mulți nori mici și rapizi și o zi complet înnorată; (secțiunea *3.4*);
- dezvoltarea unui MM dinamic neliniar utilizat în simularea regimurilor tranzitorii ale unui SCEE și a unei variante liniarizate a lui utilizată în sinteza strategiei de conducere (secțiunea 4.2);
- analiza, sinteza și implementarea unei structuri de conducere pentru cuplul GIDA, capabil să adapteze puterea produsă la o puterea de referință variabilă, acționând pasul paletelor TV și care decuplează rotorul TV atunci când vântul atinge viteza de întrerupere (secțiunea 4.3);
- analiza și sinteza unei structuri de conducere de tip PI cu constanta de proporționalitate  $(K_p)$  și timpul de integrare  $(K_i)$  programabile. Valorile  $K_p$  și  $K_i$  sunt obținute pe baza liniarizării modelului SCEE, utilizând aproximarea prin serii Taylor și prin determinarea unei expresii matematice care permite calcularea valorilor programate ale lui  $K_p$  și  $K_i$  în funcție de valoarea curentă a pasului paletelor TV  $(\beta)$  și valoarea pasului paletelor pentru care cuplul rotorului TV s-a dublat  $(\beta k)$  (*Ecuațiile 4.149* și *4.150*);
- implementarea MM neliniar și a structurii de conducere propuse pentru SCEE și validarea acestora prin simularea a patru scenarii diferite: funcționarea în regim nominal și parțial (puterea de referință fiind <sup>1</sup>/<sub>3</sub>, <sup>1</sup>/<sub>2</sub> și <sup>2</sup>/<sub>3</sub> din puterea nominală) la o viteză a vântului care acoperă tot intervalul de funcționare (variație rampă de la 0 la 30 m/s), respectiv la viteza unui vânt foarte turbulent (valori eșantionate cu un pas de 0,0125 s) (secțiunea 4.4);
- dezvoltarea și validarea experimentală unui MM al SPASCEF, capabil să simuleze

regimurile tranzitorii a tuturor subsistemelor componente (pompă centrifugă, motor de inducție, sistemul de acționare al motorului și SCEF), în secțiunea *5.2*;

- dezvoltarea, implementarea și validarea experimentală unei strategii de conducere a SPASCEF capabilă să asigure conducerea în 3 cazuri specifice (secțiunea 5.3):
  - 1. când înălțimea de pompare este mai mare decât cea de referință, sistemul de conducere reglează înălțimea de pompare;
  - 2. când înălțimea de pompare este mai mică decât cea de referință și puterea produsă de un SCEF este mai mică decât puterea minimă necesară funcționarii SP, sistemul de conducere decelerează sistemul de pompare;
  - 3. când înălțimea de pompare este mai mică decât cea de referință și puterea produsă de un SCEF este mai mare decât puterea minimă necesară funcționarii SP, sistemul de conducere acționează SP astfel încât puterea absorbită de acesta urmărește puterea produsă de SCEF.
- conceperea și implementarea unui sistem de monitorizare mai complex și mai precis decât cele existente (care aplică metodologia IEC 62253 [96]), prin utilizarea unui sistem de achiziție și stocare neintruziv, care măsoară și stochează valorilor furnizate de traductoare la fiecare secundă (secțiunea 5.4);
- implementarea, simularea și validarea experimentală a MM și a strategiei de conducere propuse pentru SPASCEF (secțiunea 5.5);
- dezvoltarea unui MM al SPASCEE capabil să simuleze regimuri tranzitorii specifice pentru toate subsistemele componente (pompa centrifugă, motor de inducție, sistemul de acționare al motorului și SCEE) (secțiunea 6.2);
- analiza, sinteza și implementarea unei strategii de conducere pentru un SPASCEE, capabilă să asigure conducerea în 4 cazuri specifice (secțiunea 6.3):
  - 1. când puterea produsă de un SCEE este mai mică decât puterea minimă necesară funcționarii SP, sistemul de conducere decelerează sistemul de pompare;
  - 2. când puterea produsă de un SCEE este mai mare decât puterea minimă necesară funcționarii SP, sistemul de conducere acționează SP astfel încât puterea absorbită de acesta urmărește puterea produsă de SCEE;
  - 3. când înălțimea de pompare este mai mică decât cea de referință, sistemul de conducere solicită SCEE producerea puterii necesare funcționarii nominale SP;
  - 4. când înălțimea de pompare este mai mare decât cea de referință, sistemul de conducere reglează puterea produsă de SCEE conform necesarului de putere astfel încât presiunea SP să fie egală cu cea de referință.
- implementarea modelului și structurii de conducere propuse pentru SPASCEE și validarea acestora prin simularea funcționării întregului sistem la o viteză a vântului care acoperă tot intervalul de funcționare (variație rampă de la 0 la 30 m/s) (secțiunea 6.4).

## Perspective de dezvoltare

Problemele prezentate, precum rezultatele și soluțiile obținute, arată aplicabilitatea industrială a lucrării curente, deschizând noi perspective pentru cercetările viitoare privind SPASER. Ca viitoare direcții de cercetare care pot fi abordate în viitorul imediat, extinzând dezvoltările curente ale tezei, se pot menționa:

- dezvoltarea, implementarea, simularea și validarea experimentală a unui sistem de pompare alimentat cu un sistem de conversie a energiei hibride fotovoltaice-eoliene;
- analiza, sinteza și implementarea unor strategii de conducere mai avansate, cum ar fi: conducerea robustă, predictivă, de logică fuzzy sau cele bazate pe rețele neuronale etc.

# PRINCIPALELE ABREVIERI

Abrevieri română	Abrevieri engleză	Semnificație
SP	PS	Sistem de pompare;
SPASER	PSPRES	Sistem de pompare alimentat de surse de energie regenerabile;
SER	RES	Surse de energie regenerabile;
GF	PVG	Generator fotovoltaic;
GE	-	Generator eolian;
SPAF	-	Sistem de pompare alimentat fotovoltaic;
MASLOWATEN	MASLOWATEN	Market uptake of an innovative irrigation Solution based on LOW WATer-Energy consumption;
SPAGE	-	Sistem de pompare alimentat de generator eolian;
TV	WT	Turbină de vânt;
MM	MM	Model matematic;
VF	VFD	Variator de frecvență;
PI	PI	Proporțional-integral;
SCEF	PECS	Sistem de conversie a energie fotovoltaice;
PV	PV	Panouri fotovoltaice;
UPMP	MPPT	Urmărire a punctului de maximă putere;
P&O	P&O	Perturbație și observare;
SCEE	WECS	Sistem de conversie a energiei eoliene;
GIDA	DFIG	Generator de inducție cu dublă alimentarea;
$K_p$	$K_p$	Constanta de proporționalitate;
$\dot{K_i}$	$\hat{K_i}$	Constanta de timp de integrare;
GK(β)	GK(β)	Funcția programării constantelor de proporționalitate și de timp de integrare;
β	β	Valoarea curentă a pasului paletelor turbinei de vânt;
βk	βk	Valoarea pasului paletelor turbinei de vând pentru care cuplul rotorului turbinei de vânt s-a dublat.
SPASCEF	PSPPECS	Sistem de pompare alimentat de un sistem de conversie a energie fotovoltaice;
PLC	PLC	Programmable logic controller;
PPM	MPP	Punctul de putere maximă;
CC	DC	Curent continuu;
SPASCEE	PSPWECS	Sistem de pompare alimentat de un sistem de conversie a energiei eoliene.

## **Bibliografie:**

- [4] European Commission, "2030\_En @ Ec.Europa.Eu," 2030 Climate and Energy Framework. 2019, [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030 en.
- [21] MASLOWATEN, Technical Specifications for PV irrigation systems, 2007. [Online]. Available: http://maslowaten.eu/?page\_id=57&lang=es.
- [22] "default @ www.sisifo.info." [Online]. Available: https://www.sisifo.info/en/default.
- [35] Bordeasu, D.; Prostean, O.; Filip, I.; Dragan, F.; Vasar, C. Modelling, Simulation and Controlling of a Multi-Pump System with Water Storage Powered by a Fluctuating and Intermittent Power Source. Mathematics 2022, 10(21), 4019. https://doi.org/10.3390/math10214019
- [40] G. Abad, Power Electronics and Electric Drives for Traction Applications. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd., 2016. doi: 10.1002/9781118954454.
- [41] H. Abu-Rub, M. Malinowski, and K. Al-Haddad, POWER ELECTRONICS FOR RENEWABLE ENERGY SYSTEMS, TRANSPORTATION AND INDUSTRIAL APPLICATIONS. West Sussex, United Kingdom: IEEE Press and John Wiley & Sons Ltd, 2014.
- [45] Sarasúa, J.I.; Martínez-Lucas, G.; Platero, C.A.; Sánchez-Fernández, J.Á. Dual Frequency Regulation in Pumping Mode in a Wind–Hydro Isolated System. Energies 2018, 11, 2865.
- [48] Bordeaşu, D.; Proştean, O.; Hatiegan, C. Contributions to Modeling, Simulation and Controlling of a Pumping System Powered by a Wind Energy Conversion System, Energies 2021 14, 7696. https://doi.org/10.3390/en14227696
- [50] Oshurbekov, S.; Kazakbaev, V.; Prakht, V.; Dmitrievskii, V. Improving Reliability and Energy Efficiency of Three Parallel Pumps by Selecting Trade-Off Operating Points. Mathematics 2021, 9, 1297. https://doi.org/10.3390/math9111297
- [52] Li, W.; Ji, L.; Shi, W.; Zhou, L.; Chang, H.; Agarwal, R.K. Expansion of High Efficiency Region of Wind Energy Centrifugal Pump Based on Factorial Experiment Design and Computational Fluid Dynamics. Energies 2020, 13, 483.
- [54] **D. Bordeaşu,** "Study on the implementation of an alternative solution to the current irrigation system". In Proceedings of the ErgoWork 2022 International Conference on Ergonomics and Workplace Management, Timişoara, Romania, 16 June 2022, that will be published in special issue of ACTA TECHNICA NAPOCENSIS SERIES-APPLIED MATHEMATICS, MECHANICS AND ENGINEERING journal
- [55] S. Khadidja, M. Mountassar, and B. Mohamed, "Comparative study of incremental conductance and perturb & observe MPPT methods for photovoltaic system," IEEE, vol. pp. 1-6, 2017, doi: 10.1109/GECS.2017.8066230.
- [71] A. Fatah et al., "A Modified Perturbe and Observe MPPT Technique for Standalone Hybrid PV-Wind with Power Management," 2021. doi: 10.1109/ICCAD52417.2021.9638740.
- [84] K. Hammerum, P. Brath, and N. K. Poulsen, "A fatigue approach to wind turbine control," J. Phys. Conf. Ser., vol. 75, no. 1, p. 012081, Jul. 2007, doi: 10.1088/1742-6596/75/1/012081.
- [86] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial, and G. Scott, Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2009.
- [87] G. Abad, J. López, M. A. Rodríguez, L. Marroyo, and G. Iwanski, Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation. 2011.

- [88] J. D. Grunnet, M. Soltani, T. Knudsen, M. Kragelund, and T. Bak, "Aeolus toolbox for dynamics wind farm model, simulation and control," Eur. Wind Energy Conf. Exhib. 2010, EWEC 2010, vol. 4, pp. 3119–3129, 2010.
- [89] Bordeaşu, D.; Proştean, O.; Vaşar, C.; Debeş, A. Load Comparison Between Two Controlling Strategies for Wind Energy Conversion System Power-Boosting. In Proceedings of the IEEE 16th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI 2022), Timişoara, Romania, 25 May 2022.
- [94] Direct solar irrigation in an orchard. Available online: https://bombeatec.com/en/casosde-exito/direct-solar-irrigation-in-an-orchard/ (accessed on 5 June 2022).
- [96] IEC. IEC 62253 International Standard Photovoltaic pumping systems Design qualification and performance, 2011 measurements (Edition 1.0, 2011-07). Geneva, Switzerland: IEC Central Office.
- [111] B. Said, T. Mohamed and B. Belkacem, "On Robust Control of Induction Motor with Multicell Inverter for PV Pumping Applications," 2019 International Conference on Applied Automation and Industrial Diagnostics (ICAAID), 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICAAID.2019.8934968.
- [112] F. Mehazzem and A. Reama, "Integral Backstepping Control for Water Pumping System FED by MPPT Fuzzy-Logic PV Source," 2020 2nd International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES), 2020, pp. 111-115, doi: 10.1109/SPIES48661.2020.9243002.
- [113] B. N. Kar, P. Samuel and A. Naik, "Solar PV Array Fed Fuzzy Logic Controlled PMSM Drive for Water Pumping System," 2021 International Conference in Advances in Power, Signal, and Information Technology (APSIT), 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/APSIT52773.2021.9641332.
- [118] Ouchbel, T.; Zouggar, S.;Elhafyani, M.L.; Seddik, M.; Oukili, M.; Aziz, A.; Kadda, F.Z. Power maximization of an asynchronous wind turbine with a variable speed feeding a centrifugal pump. Energy Convers. Manag. 2014, 78, 976–984.
- [119] Barara, M.; Bennassar, A.; Abbou, A.; Akherraz, M.; Bossoufi, B. Advanced Control of Wind Electric Pumping System for Isolated Areas Application. Int. J. Power Electron. Drive Syst. 2014, 4, 567–577.