

UNIVERSITATEA “DUNĂREA DE JOS” DIN GALAȚI



TEZĂ DE DOCTORAT

— REZUMAT —

CONTRIBUȚII PRIVIND CONDUCEREA OPTIMALĂ A SISTEMELOR DE CONVERSIE A ENERGIEI EOLIENE

ing. Iulian MUNTEANU

sub conducerea științifică a

Prof. Dr. Ing. Emil CEANGĂ



— 2006 —

Prefață

Fiind consistentă cu efortul susținut de a impune sursele de energie regenerabilă în peisajul energetic al viitorului, această teză se focalizează pe abordarea sistemelor de conversie a energiei eoliene (SCEE) din perspectiva unei optimizări dinamice globale. Ideea centrală este coerentă cu scopul final de a asigura cele mai bune condiții de exploatare în termeni de eficiență energetică, fiabilitate, cost redus și respectare a cerințelor integrării în rețea. Aceasta implică utilizarea pe scară largă a metodelor avansate de automată, dintre care cele mai promițătoare au constituit punctele de plecare ale contribuțiilor originale raportate aici.

Conținutul tezei se împarte în opt capitole după cum urmează.

În primul capitol se prezintă o vedere generală asupra procesului de conversie eoliană și a evoluției SCEE în contextul politico-economic actual al pieței energiei; sunt de asemenea detaliate câteva concepte de bază privind structura și principiile operării turbinelor eoliene, precum și obiectivele generale ale conducerii lor automate. Se formulează obiectivul demersului și se fixează tipul de sistem care va fi studiat: SCEE de viteză variabilă, cu unghi de calare fix, bazat pe generator asincron.

Al doilea capitol prezintă stadiul actual în modelarea și conducerea optimă a tipului fixat de SCEE în regiunea de sarcină parțială și specifică mai precis din punct de vedere tehnic scopul tezei. În al treilea capitol sunt descrise câteva elemente metodologice și practice utile construirii pe baza conceptului de simulare *hardware-in-the-loop* a unui stand experimental dedicat SCEE de viteză variabilă. Al patrulea și al cincilea capitol prezintă abordări de conducere neliniară robustă, vizând captarea maximului de energie disponibilă în vânt atunci când informația despre sistem este săracă, și anume urmărirea maximului de putere (*Maximum Power Point Tracking* – MPPT) și conducerea în regim alunecător.

Capitolul al șaselea este dedicat introducerii unei noi structuri de conducere optimă a SCEE, derivată din principiul separării în frecvență și constând în două bucle pentru procesarea separată a celor două componente ale vitezei vântului, ca o alternativă mai eficientă la abordările de optimizare liniar pătratică (LQ) anterioare; în acest caz, informația disponibilă este mai bogată. Aplicarea acestei structuri la SCEE de viteză variabilă cu transmisie mecanică rigidă și flexibilă este prezentată în al șaptelea și respectiv al optulea capitol.

Ultimul capitol, al nouălea, conchide lucrarea prin enumerarea concluziilor, contribuțiilor și a direcțiilor de dezvoltare ulterioară. Cele opt anexe, de la A la H, conțin detalii tehnice referitoare la abordările dezvoltate în fiecare din primele opt capitole ale lucrării.

Pe parcursul lecturii acestui rezumat extins pot fi întâlnite anumite denumiri sau acronime, provenite din limba engleză (în care a fost scrisă disertația); corespondența cu abrevierile din limba română este dată în lista de notații.

CUPRINS

Lista celor mai utilizate acronime și abrevieri	1
I Poziționarea subiectului	3
Noțiuni de bază	3
Randamentul conversiei eoliene. Aspecte de eficiență economică	3
Comanda automată a SCEE	5
II Necesitatea, justificarea și obiectivele lucrării	6
Delimitarea clasei de SCEE abordată	6
Ipoteze generale și cadrul de modelare al SCEE	6
Stadiul actual în comanda optimă a SCEE	8
Aspecte privind fiabilitatea SCEE	12
Simulatoare fizice de SCEE	13
Justificarea tehnică a demersului științific	13
III Simularea <i>hardware-in-the-loop</i> (SHIL) a sistemelor de conversie a energiei eoliene	14
Concepte de bază și principii	14
Metodologia de proiectare a structurilor HIL	16
Aplicație: simulator de SCEE	17
IV Maximum Power Point Tracking (MPPT) – o abordare bazată pe informație minimală	18
V Conducerea optimă în regim alunecător a sistemelor de conversie a energiei eoliene	23
VI O structură de comandă optimă bazată pe principiul separării în frecvență (2LFSP)	28
Principiul separării în frecvență	28
Modelarea dinamicii lente	31
Modelarea dinamicii turbulente	31
Soluția propusă	33
2LFSP aplicată SCEE cu transmisie mecanică rigidă	35
2LFSP aplicată SCEE cu transmisie mecanică flexibilă	40
Concluzii	43
VII Concluzii generale, contribuții și dezvoltări viitoare	44
Concluzii generale	44
Contribuții	47
Dezvoltări viitoare	48
Bibliografie selectivă	49
Lista publicațiilor autorului	52

Lista celor mai utilizate acronime și abrevieri

AL (LSS)	– arbore lent (<i>low speed shaft</i>)
AR (HSS)	– arbore rapid (<i>high speed shaft</i>)
BÎF (HFL)	– bucla de înaltă frecvență (<i>high frequency loop</i>)
BJF (LFL)	– bucla de joasă frecvență (<i>low frequency loop</i>)
CRO (ORC)	– caracteristica regimurilor optimale (<i>optimal regimes characteristic</i>)
CVR (TSC)	– controller de viteză relativă (<i>tip speed controller</i>)
FTJ (LPF)	– filtru trece-jos (<i>low-pass filter</i>)
FTS (HPF)	– filtru trece-sus (<i>high-pass filter</i>)
GADA (DFIG)	– generator asincron dublu alimentat (<i>doubly-fed induction generator</i>)
GASC (SCIG)	– generator asincron cu rotor în scurtcircuit (<i>squirrel cage induction generator</i>)
H/V AWT	– turbină cu ax orizontal/vertical (<i>horizontal/vertical axis wind turbine</i>)
HIL	– <i>hardware-in-the-loop</i>
PF (OP)	– punct de funcționare (<i>operating point</i>)
PFO (OOP)	– punct de funcționare optimal (<i>optimal operating point</i>)
SCEE (WECS)	– sistem de conversie a energiei eoliene (<i>wind energy conversion system</i>)
SEM (EMS)	– subsistem electromagnetic (<i>electromagnetic subsystem</i>)
SFB (BPS)	– sistem fizic de bază (<i>basic physical system</i>)
SFE (EPS)	– sistem fizic emulat (<i>emulated physical system</i>)
SFI (IPS)	– sistem fizic investigat (<i>investigated physical system</i>)
SFTR (RTPS)	– simulator fizic de timp real (<i>real time physical simulator</i>)
SHIL (HILS)	– simulare <i>hardware-in-the-loop</i> (<i>hardware-in-the-loop simulation</i>)
SSTR (RTSS)	– simulator software de timp real (<i>real time software simulator</i>)
TFD (DFT)	– transformată Fourier discretă (<i>Discrete Fourier Transform</i>)
TFR (FFT)	– transformată Fourier rapidă (<i>Fast Fourier Transform</i>)
VR (TSR)	– viteză relativă (<i>tip speed ratio</i>)

I. Poziționarea subiectului

Noțiuni de bază

Strategiile actuale de dezvoltare durabilă în domeniul energiei au ca obiectiv principal înlocuirea treptată a surselor de energie bazate pe combustibil fosil prin surse de energie regenerabilă. Printre sursele „curate” de energie, sistemele de conversie a energiei eoliene (SCEE) dețin la ora actuală o pondere semnificativă în multe țări dezvoltate. Urmând eforturile continue ale comunității internaționale de cercetare, încurajate de programele europene din ultimul deceniu, tehnologia conversiei energiei eoliene a evoluat pentru susținerea dinamicii rapide a programelor de investiții din domeniu. Principala provocare o constituie discrepanța majoră dintre caracterul neregulat al sursei primare de energie (vântul este un proces aleatoriu, puternic nestaționar, cu turbulențe și variații extreme, de exemplu rafale) și cerințele exigente cu privire la calitatea energiei electrice furnizate: putere reactivă, conținut de armonici, fenomenul de *flicker*, etc. Astfel, conversia energiei eoliene la parametrii impuși de piață și de standardele tehnice nu este posibilă fără contribuția esențială a automatizării. O mare parte a eforturilor de cercetare s-au îndreptat spre rezolvarea problemei de cuplare a turbinelor eoliene la rețea. Natura stocastică a sursei primare de energie reprezintă un factor de risc pentru viabilitatea structurii mecanice. Literatura de specialitate subliniază importanța criteriilor de fiabilitate, uneori mai importante decât randamentul conversiei (de exemplu, în cazul fermelor eoliene *off-shore*), în evaluarea eficienței economice globale. Acest aspect trebuie luat în considerare în proiectarea strategiilor de comandă. Multe dintre lucrările prezentate la conferințe sau publicate în reviste tratează problema comenzii automate a SCEE, având drept obiective optimizarea conversiei energetice, interfațarea turbinelor la rețea și reducerea solicitărilor la oboseală care uzează structura mecanică.

Integrarea sistemelor eoliene în sisteme energetice la costuri optime necesită **creșterea eficienței** primelor, și anume reducerea costurilor de instalare, operare și întreținere, precum și creșterea cantității de energie captate din vânt. Studii recente arată că energia produsă din vânt are deja un cost per kWh mai scăzut decât cel al energiei nucleare. Privitor la aceasta, se pot identifica două direcții principale în dezvoltarea tehnologică a SCEE din anii 1970 până astăzi:

- creșterea puterii lor nominale [QUAR 98] și
- creșterea flexibilității lor prin aplicarea unor **noi paradigme de control** pentru îmbunătățirea operării SCEE – e.g. *operarea la viteză variabilă* [THRE 98].

Există trei moduri principale de operare a SCEE – viteză constantă, viteză semi-variabilă și viteză variabilă – depinzând de configurația subsistemului electric. Dintre acestea, un interes special îl prezintă regimul de operare la **viteză variabilă**, care permite controlul complet al SCEE; el corespunde situației când viteza de rotație a rotorului turbinei depinde de viteza vântului și variază într-un domeniu larg ($\pm 50\%$ din viteza nominală). Acest regim poate fi implementat fie prin comanda (electrică/hidraulică) a unghiului de calare a palelor sau prin comanda (în viteză / în cuplu a) generatorului electric. În cazul SCEE cu unghi de calare fix, operarea la viteză variabilă presupune utilizarea unui sistem de electronică de putere, ale cărui obiective principale sunt reglarea nivelului și condiționarea puterii transferate rețelei, maximizarea cantității de putere captate și reducerea sarcinilor mecanice intense.

Randamentul conversiei eoliene. Aspecte de eficiență economică

Când se evaluează costul energiei produse de SCEE de obicei se ține cont de gratuitatea energiei primare. Principalele elemente care influențează acest cost sunt: cantitatea puterii captate din vânt, disponibilitatea, costurile

de operare și întreținere, precum și cele de producere și instalare.

Creșterea puterii captate din vânt se poate obține prin maximizarea randamentului aerodinamic de-a lungul unui domeniu larg de variație a vitezei de rotație, lucru posibil prin operarea la viteză variabilă [LEIT 91] (randamentele transmisiei mecanice și al generatorului sunt suficient de înalte – între 0.7 și 0.9 – față de randamentul aerodinamic, având un maxim în jurul valorii de 0.5). **Randamentul aerodinamic** se exprimă prin **coeficientul de putere** al SCEE, C_p , care depinde de așa-numita **viteză relativă**, λ , definită ca raportul dintre viteza periferică a palelor și viteza vântului:

$$(1) \quad \lambda = \frac{\Omega_l \cdot R}{v},$$

unde Ω_l este viteza de rotație a arborelui lent și R este lungimea palelor. Pentru unghi de calare fix, randamentul aerodinamic, $C_p(\lambda)$, prezintă un maxim la o valoare bine determinată a vitezei relative, notată cu λ_{opt} (figura 1a)), care reprezintă o caracteristică constructivă a unei turbine date [BURT 01]. Din cauza variațiilor de frecvență relativ înaltă ale vitezei vântului, menținerea valorii maxime a lui C_p , notată $C_{p_{max}} = C_{p_{opt}} = C_p(\lambda_{opt})$ fără a afecta fiabilitatea SCEE este la ora actuală o provocare în domeniul conducerii automate a SCEE.

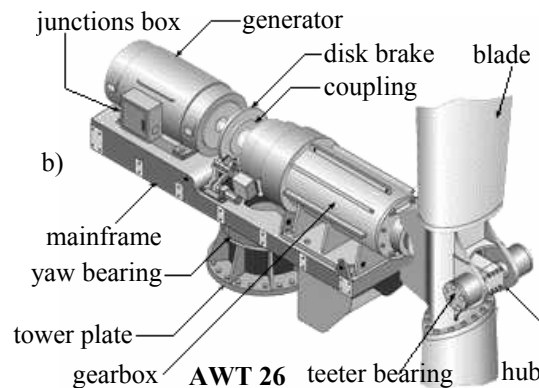
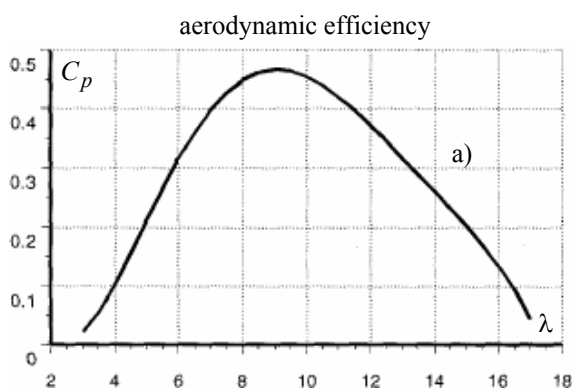


Fig. 1 a) Exemplu de variație $C_p(\lambda)$ (turbină bipală, 100 kW); b) Nacela unei turbine bipale HAWT [LARW 98]

Disponibilitatea unei turbine eoliene este definită ca raportul dintre durata de timp de operare în bune condiții și durata totală de timp de operare; această noțiune este în mod evident legată de cea de **fiabilitate**. Prin creșterea fiabilității, constând în reducerea eforturilor mecanice – posibilă prin operarea la viteză variabilă [LEIT 91], [THRE 98], [CARL 01] – costul total al energiei furnizate poate fi redus, pentru că se reduc costurile de operare și întreținere, iar disponibilitatea crește. Necesitatea reducerii costurilor de operare a turbinelor implică funcționarea automată și telecomandată a acestora. O strategie de comandă adecvată nu permite numai îmbunătățirea (maximizarea) randamentului conversiei energetice, dar și creșterea siguranței în funcționare și a fiabilității, ceea ce se reflectă parțial în reducerea costurilor de întreținere și, pe de altă parte, în creșterea energiei captate din vânt (prin creșterea numărului de ore de funcționare).

În concluzie, operarea la **viteză variabilă** a SCEE, asociată cu o **strategie de comandă adecvată**, fac posibilă reducerea costului energiei produse la un minim. Randamentul energetic al generatorului electric poate fi și el maximizat prin comanda specifică a acestuia, evident dependentă de configurația generatorului [LEIT 91], în timp ce eficiența transmisiei mecanice depinde în special de tehnologia de realizare.

Un SCEE bazat pe turbină eoliană cu ax orizontal (HAWT) este în general structurat după cum se arată în figura 1b).

Comanda automată a SCEE

Ținând cont de ideile enunțate mai sus, se pot acum formula rolul și obiectivele comenzii automate a SCEE [SALL 90], [LEIT 91], și anume:

- demarajul eolienei la viteza v_D (*cut-in speed*) și oprirea la viteza maximă v_M (*cut-out speed*) – figura 1.2;
- limitarea puterii captate din vânt pentru viteze mai mari decât cea nominală, v_n (figura 1.2); în caz contrar ar fi necesară supradimensionarea turbinelor în scopul extragerii întregii energii disponibile, având în vedere că viteze mari ale vântului nu se întâlnesc des (distribuția Rayleigh); această abordare este neeconomică;
- maximizarea energiei captate din vânt la funcționarea normală – zona II din figura 1.2; obiectivul este de a conduce rotorul la λ_{opt} atât timp cât restricțiile asupra turației și puterii captate sunt îndeplinite;
- furnizarea puterii electrice în rețea la o valoare impusă, indiferent de viteza vântului;
- diminuarea mediului de încărcări variabile, pentru a garanta o anumită longevitate la solicitări de oboseală a părților mecanice;
- garantarea răspunsului dorit la rafale de vânt izolate;
- încadrarea în anumite standarde de calitate ale puterii furnizate (factor de putere, conținut de armonici, fluctuații de putere etc.).

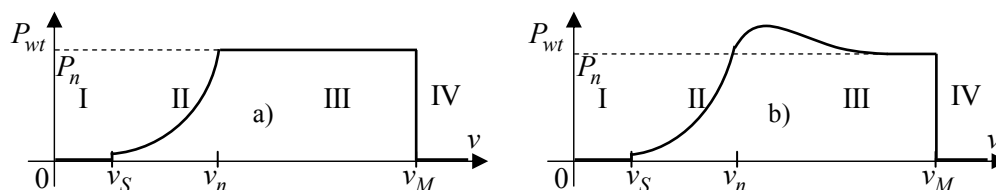


Fig. 2 Puterea captată, P_{wt} , de către o turbină HAWT în funcție de viteza (medie) a vântului: a) reglarea unghiului de calare, b) desprindere aerodinamică provocată

Subsistemul de control rezultă din definirea unuia sau a mai multor din obiectivele de mai sus, formulate în legătură cu un anumit model matematic al sistemului eolian. Controlerul determină comportamentul dinamic global dorit al sistemului, conținutul de armonici al semnalului de ieșire (puterea electrică) și reduce efectul perturbațiilor. Există mai multe tipuri de comenzi: unele acționează asupra unghiului de calare a palelor pentru limitarea puterii în regiunea de sarcină completă, altele urmăresc varierea cuplului/vitezei de rotație a generatorului electric pentru a realiza regimul de viteză variabilă în zona de încărcare parțială. În literatură se întâlnesc diferite tipuri de controlere, de la cele mai simple (de tip PID) la controlere adaptive sau optimale, necesitând eventual estimatoare de stare [BOSS 00].

Studiul din lucrare este orientat către acele metode de control care permit dimensionarea unui *compromis* între *eficiența energetică* a turbinei eoliene și *fiabilitatea* acesteia.

II. Necesitatea, justificarea și obiectivele lucrării

Delimitarea clasei de SCEE abordată

Această lucrare vizează studiul și dezvoltarea de legi de conducere optimală a SCEE care funcționează la viteză variabilă în zona de încărcare parțială, folosind diverse abordări întâlnite în teoria sistemelor automate, în anumite ipoteze de modelare.

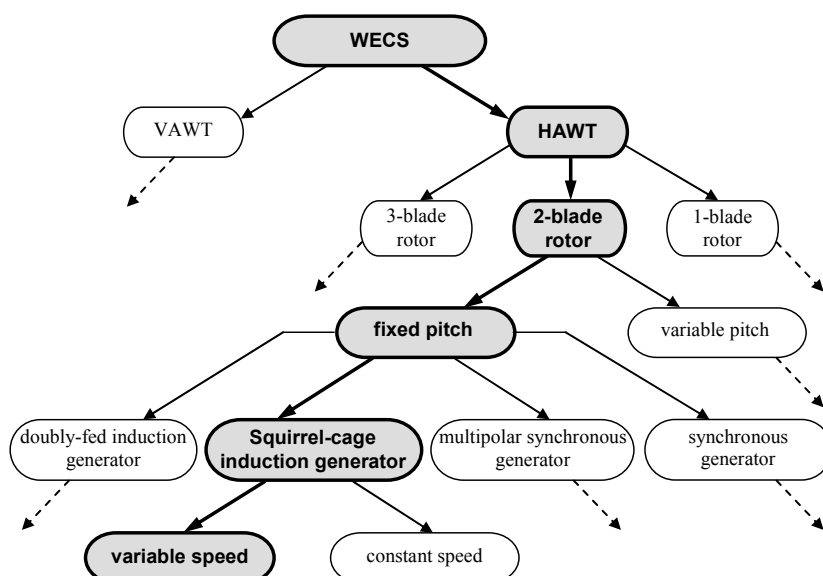


Fig. 3 O taxonomie a SCEE – identificarea tipului care va fi studiat

Sistemul eolian care face obiectul abordărilor de conducere automată prezentate în continuare face parte din clasa celor de putere mică/medie având rotor orizontal cu două pale și unghi de calare fix. Transmisia mecanică este în esență un multiplicator de viteză cu un singur etaj (pas fix), cu cuplaj rigid/flexibil. Subsistemul de producere a energiei electrice conține un generator asincron trifazat cu rotor în scurtcircuit (GASC, *squirrel cage induction generator* – SCIG), remarcant prin fiabilitatea sa, conectat la rețeaua electrică prin intermediul unui convertor de electronică de putere AC/AC. SCEE funcționează la viteză variabilă pe baza controlului vectorial (în cuplu) al generatorului asincron; convertorul de electronică de putere este echipat cu sistemele de control corespunzătoare. Se consideră că funcționarea turbinei eoliene în diverse regimuri este supervizată de către un nivel superior de control; în lucrarea de față interesul este focalizat asupra zonei (regimului) de încărcare parțială. Obiectivul principal al lucrării de față îl reprezintă studiul strategiilor de comandă incluse în controllerele care gestionează funcționarea SCEE în acest regim. Figura 3 identifică tipul de sistem eolian abordat, utilizând o taxonomie cvasi-generală.

Ipoteze generale și cadrul de modelare al SCEE

Configurația tipului de SCEE studiat se consideră a fi conformă cu următoarele specificații generale:

- turbină bipală cu ax orizontal cu unghi de calare fix,
- GASC echipat cu convertor de electronică de putere *back-to back* AC/AC,
- conexiune la rețeaua locală,
- două versiuni de transmisie mecanică (cu raport fix): cu cuplaj rigid și respectiv cu cuplaj flexibil,
- control vectorial al generatorului electric, asigurând un domeniu larg de variație a turației sistemului

(funcționare la viteză variabilă).

Structura sistemului eolian, vizibilă în figura 4, conține trei componente principale care interacționează între ele, controlate de către un al patrulea (S_4): subsistemul aerodinamic (AS) – S_1 , subsistemul electromagnetic (EMS) – S_2 și subsistemul de transmisie mecanică (DT) – S_3 , care vor fi modelate separat. Subsistemul S_4 realizează controlul SCEE (CS). Sunt notate cu LSS și HSS axul lent și respectiv axul rapid al sistemului eolian. Pentru clasa de SCEE considerată pot fi adoptate anumite ipoteze (rezonabile) de modelare:

- SCEE este de putere redusă (până în 10 kW), rotorul are butuc cu lagăr de balans și diametrul rotorului este suficient de mic pentru a se putea neglija efectul „de umbră a turnului” și dinamicile structurale,
- frecările statice și dinamice sunt neglijate,
- caracteristica coeficientului de putere este fixă, se neglijează orice efect indus de către variațiile numărului Reynolds și densității aerului,
- nacela este echipată cu giruetă, astfel încât se poate considera că viteza vântului este întotdeauna normală pe rotorul turbinei,
- sistemul funcționează numai în regiunea de încărcare parțială (între viteza de demaraj și cea nominală), regimurile de funcționare extremă nu sunt abordate în această lucrare,
- transmisia mecanică are raport fix, i , și randament constant în întreg domeniul de viteze, η ; influența caracteristicilor constructive (e.g., vibrații, tipul angrenajului, jocul în angrenaje etc.) asupra comportamentului acesteia va fi considerată parazită și va fi neglijată,
- influența parametrilor constructivi ai generatorului electric asupra dinamicii sale (e.g., influența armonicilor superioare, asimetrii ale rotorului etc.) este neglijată și parametrii săi sunt invarianți în timp,
- SCEE se poate roti într-un domeniu larg de viteze; turația este ajustabilă, gradientul acesteia este limitat la o valoare care depinde de inerția sistemului,
- convertoarele de electronică de putere au randament unitar, armonicile de ordin superior sunt neglijate; rețeaua electrică locală este ideală și de putere infinită;
- sunt disponibile măsuri ale vitezei vântului, vitezei de rotație a generatorului (HSS), Ω_h , și puterii electrice generate.

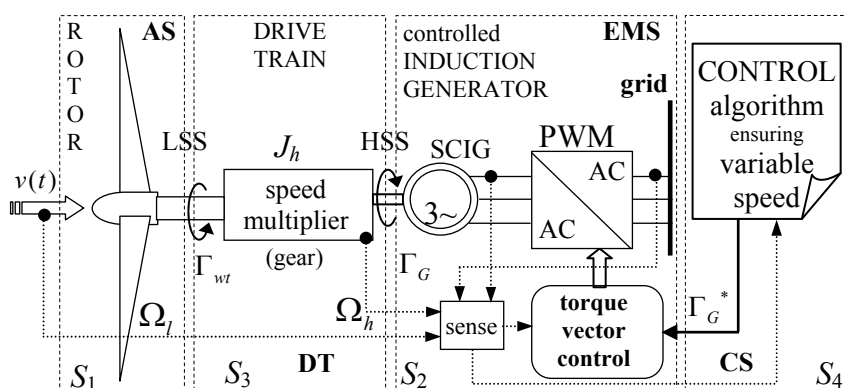


Fig. 4 SCEE cu viteză variabilă – un punct de vedere sistemic

Un model dinamic global al SCEE poate fi obținut prin cuplarea modelelor matematice ale subsistemelor sale și modelului vitezei vântului (principalul exogen).

Pe baza relației fundamentale din dinamica statistică a sistemelor liniare [DAMP 95], viteza vântului poate fi sintetizată (ca semnal unidimensional) prin trecerea unui semnal de tip zgomot alb printr-un filtru de formare adecvat. Au fost considerate două tipuri de modele ale vitezei vântului, și anume unul nestaționar (cu parametri statistici variabili în timp) [WELF 97], [NICH 02], și unul staționar (simplificat) [EKEL 97]; utilizarea unuia sau a

celuilalt model depinde de metoda de control concretă ce se aplică într-un caz sau în altul. În cazul general, viteza vântului este obținută prin suprapunerea a două componente [NICH 02]:

$$(2) \quad v(t) = v_s(t) + v_t(t),$$

unde $v_s(t)$ este **componenta de joasă frecvență** (care descrie variațiile pe termen lung lent variabile) și $v_t(t)$ este **componenta de turbulență** (care corespunde variațiilor rapide, de frecvență ridicată).

Modelul subsistemului aerodinamic (S_1) rezultă din interacțiunea curenților de aer cu rotorul turbinei și este reprezentat în principiu de caracteristica de cuplu sau de putere captată (trasată în raport cu turația axului lent, Ω_l):

$$(3) \quad \Gamma_{wt} = \frac{P_{wt}}{\Omega_l} = 0.5 \cdot \pi \cdot \rho \cdot v^2 \cdot R^3 \cdot C_\Gamma(\lambda),$$

unde $C_\Gamma = C_p / \lambda$ reprezintă **coeficientul de cuplu** [WILK 90], [NICH 95], [MILL 03].

Subsistemul electromagnetic (S_2) este construit în jurul generatorului asincron (GASC controlat în cuplu), care furnizează cuplul electromagnetic, Γ_G . În ipotezele de modelare adoptate, pentru GASC s-a considerat binecunoscutul model matematic de ordinul 4 exprimat în coordonate (d, q) [LEON 86].

Subsistemele S_1 și S_2 interacționează prin intermediul transmisiei mecanice (S_3); această interacțiune este descrisă matematic printr-o ecuație de mișcare [WILK 90], scrisă fie la axul lent, fie la cel rapid:

$$(4) \quad J_h \cdot \frac{d\Omega_h}{dt} = \frac{\eta}{i} \cdot \Gamma_{wt}(\Omega_l, v) - \Gamma_G(\Omega_h),$$

unde J_h este inerția sistemului raportată la axul rapid. Această ecuație este de obicei referită ca fiind modelul *cu o singură masă* al sistemului eolian (și este folosit pentru SCEE cu cuplaj rigid).

GASC este comandat în cuplu prin intermediul unui invertor *back-to-back* alimentat în tensiune utilizând o structură de control vectorial. Această schemă de control permite obținerea unui foarte rapid și precis răspuns în cuplu al generatorului, fără a introduce oscilații nedorite (solicitări mecanice / variații de putere suplimentare), deci fiind adecvat aplicațiilor pe sisteme eoliene. Deci, un model I/O al GASC controlat (SEM în abordarea de față) – de la referința de cuplu până la realizarea fizică (cuplul mecanic la axul rapid) – poate fi asimilată cu o dinamică de ordinul 1 foarte rapidă (având constanta de timp notată cu T_G). Pe scurt, o alegere adecvată a parametrilor reguletoarelor PI din schema de control vectorial permite neglijarea dinamicii subsistemului S_2 în raport cu dinamica totală a sistemului, atunci când se dorește acest lucru.

În concluzie, modelul SCEE cu cuplaj rigid folosit în această lucrare este definit în principal de ecuația de mișcare (4) – unde cuplul eolian este dat de expresia neliniară (3) – și de ecuația SEM.

Liniarizarea modelului SCEE privește subsistemul mecanic și presupune liniarizarea caracteristicii cuplului eolian. Au fost obținute două tipuri de modele liniare în variații normalizate în jurul unui punct static de funcționare, convenabil ales, folosindu-se abordări distincte [NICH 95], [EKEL 97].

Stadiul actual în comanda optimală a SCEE

Conducerea SCEE cu viteză variabilă în regiunea de încărcare parțială vizează în general reglarea/gestionarea puterii captate din vânt prin modificarea parametrilor (e.g., a vitezei) generatorului electric; în particular, scopul conducerii poate să fie captarea puterii maxime disponibile în vânt. Pentru fiecare valoare a vitezei vântului există o anumită viteză de rotație la care curba de putere a unei turbine date prezintă un maxim (C_p atinge valoarea maximă). Toate aceste maxime formează ceea ce numește în literatura de specialitate **caracteristica regimurilor**

optimale (CRO, *optimal regimes characteristic* – ORC, vezi figura 5) [NICH 95].

Menținerea în jurul punctului static de funcționare al turbinei în jurul CRO asigură un regim staționar optimal, adică puterea captată este cea maximă disponibilă. Această acțiune este echivalentă cu menținerea vitezei relative la valoarea sa optimă [CONN 93] și poate fi realizată prin acționarea turbinei la viteză variabilă, corespunzătoare vitezei instantanee a vântului.

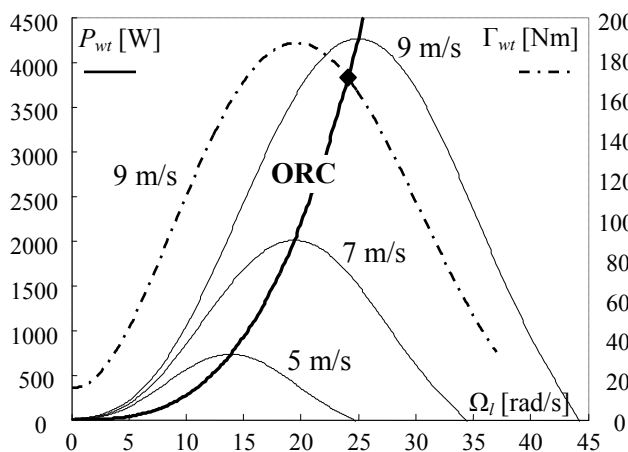


Fig. 5 Caracteristica regimurilor optimale, CRO

Datorită inerției destul de mari a turbinei eoliene, variațiile vitezei vântului nu pot fi precis urmărite decât cu eforturi mecanice inadmisibil de intense. Deci, optimizarea regimurilor dinamice devine de asemenea necesară. În literatura de profil se regăsesc diverse metode utilizate în realizarea sistemelor de conducere a SCEE cu viteză variabilă, nu numai pentru sistemul eolian abordat în această lucrare, dar și pentru multe altele (având sisteme de generare bazate pe mașini sincrone cu magneți permanenți sau multipolare, pe generatoare asincrone cu dublă ieșire etc.).

Această multitudinea de metode de conducere a rezultat datorită naturii aleatoare a vântului și a reducerii fiabilității asociate cu eforturile mecanice induse [CARL 01], comportamentului neliniar, cu parametri varianți în timp ai turbinelor, inconsistenței unor măsuri ale variabilelor necesare sistemului de conducere, parametrilor/caracteristicilor incomplet cunoscute etc. În principiu, abordările întâlnite în controlul sistemelor eoliene variază în funcție de ipotezele privind parametrii de modelare cunoscuți, variabilele măsurabile, metoda de control efectiv folosită și tipul modelului utilizat pentru descrierea comportamentului dinamic al SCEE.

Tehnica de conducere numită *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) are drept scop menținerea funcționării sistemului eolian în jurul puterii maxime captate (în limite de siguranță), folosind informație minimă din sistem. Caracteristica de putere a rotorului turbinei este complet necunoscută, dar caracteristicile generale (cum sunt puterea nominală, numărul și raza palelor, inerția totală a axului lent etc.) sunt considerate cunoscute. Turația axului rapid și puterea activă debitată de generator sunt singurele informații de măsură disponibile din sistem.

În principiu, abordarea se bazează pe calculul gradientelor de putere și de turație, utilizate apoi într-o metodă de tip *hill-climbing* pentru maximizarea puterii captate [SCHI 00], [BHOW 98], [DATT 03]. Metoda este robustă la incertitudini parametrice ale SCEE, și nu necesită cantitate mare de informație (care este deseori inaccesibilă), dar are inconvenientul principal de a utiliza estimări ale gradientelor unor variabile din sistem, în condițiile în care sistemul prezintă un comportament puternic „agitat”.

O extensie a metodei de control prezentate mai sus poate fi obținută prin utilizarea *conducerii bazată pe logică fuzzy* pentru maximizarea puterii captate, în aceleași ipoteze de modelare. Baza de reguli folosită este o extensie a algoritmului MPPT, controllerul rezultat este mai flexibil și răspunsul dinamic este îmbunătățit

[SIMO 97]; cel mai important inconvenient al acestei metode este puternica dependență de context (caracteristicile sitului eolian, tipul turbinei etc.), necesitând o destul de consistentă informație a priori.

Conducerea prin moduri alunecătoare sau conducerea cu **structură variabilă** (*sliding mode control – SMC*) este o metodă de control vibrațional, care se pretează la sisteme neliniare; controllerul obținut este un sistem cu structură variabilă care comută cu frecvență mare între câteva legi de control; în particular, ieșirea sa poate fi un semnal bipozițional (*on-off*).

Conform rezultatelor fundamentale din teoria sistemelor de conducere cu structură variabilă [UTKI 71], controllerul implementează o lege de conducere neliniară (comutată), pentru a menține traiectoria de stare a sistemului pe o anumită hipersuprafață (suprafață de comutație) impusă. Datorită robusteții la perturbații și la incertitudini parametrice, legile de conducere în mod alunecător nu necesită informații precise despre sistem; de asemenea, comanda cu structură variabilă poate fi implementată cu ușurință utilizând convertoarele de electronică de putere deja existente în sistemul eolian.

Comanda prin moduri alunecătoare a fost utilizată pentru diverse configurații de SCCE, pentru reglarea puterii generate [BATT 04] sau pentru optimizarea randamentului de conversie în condițiile limitării torsiunii transmisiei mecanice [BATT 00]. Flexibilitatea metodelor de tip SMC poate fi crescută prin adoptarea de suprafețe de comutație combinate, pentru a permite definirea unor probleme de optimizare multicriterială (i.e., maximizarea puterii captate și minimizarea variațiilor de cuplu electromagnetic).

Metodele de tip SMC sunt eficiente și intrinsec robuste, necesitând relativ puține informații despre sistem, și sunt insensibile la variații parametrice. *Chattering*-ul, specific sistemelor cu structură variabilă, este principalul neajuns, influențând negativ subsistemul mecanic prin inducerea de eforturi mecanice (la oboseală) suplimentare care pot excita dinamici nemodelate (e.g., modurile oscilante ale subsistemului aerodinamic sau ale transmisiei mecanice), conducând astfel la apariția de oscilații distructive.

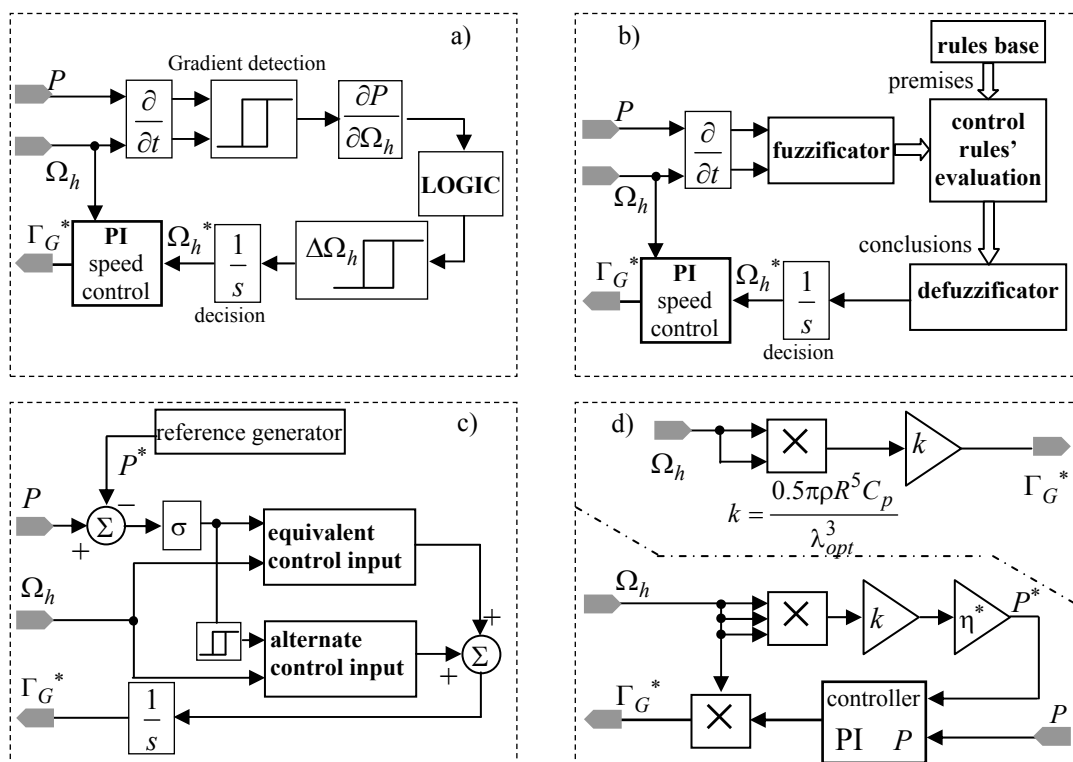


Fig. 6 Metode neliniare și liniare în conducerea SCCE: a) MPPT, b) logică fuzzy, c) SMC, d) controllere asigurând PFO

Din punct de vedere static, creșterea/maximizarea energiei captate în zona de încărcare parțială (sub puterea

nominală a sistemului eolian) poate fi asigurată prin forțarea funcționării rotorului turbinei la puterea sa maximă, P_{opt} , corespunzătoare vitezei instantanee a vântului; această metodă este denumită în această lucrare **impunerea directă a poziției punctului de funcționare optimal** (PFO, *optimal operating point – OOP*) și implică funcționarea turbinei la eficiență energetică maximă. Aceasta implică de fapt impunerea cuplului electromagnetic corespunzător cuplului eolian care determină captarea puterii maxime (notat cu Γ_{opt}). Deoarece PFO corespunde unei funcționări a rotorului turbinei la viteză specifică optimală, λ_{opt} , valoarea puterii maxime captate este

$$P_{opt} = \Gamma_{opt} \cdot \Omega_l = 0.5\pi\rho R^5 C_p / \lambda_{opt}^3 \cdot \Omega_l^3.$$

Referința cuplului generatorului este obținută folosind o măsură a vitezei de rotație. Dacă este preferată o referință de putere, atunci poate fi utilizat un regulator de tip PI pentru a ajusta caracteristica mecanică a GASC și pentru a obține referința de cuplu. Deoarece structura de control a SCEE permite urmărirea vitezei vântului în limite admisibile ale încărcărilor mecanice, această metodă poate fi utilizată ca atare numai în cazul variațiilor lente ale vitezei vântului (se implementează o **optimizare statică**). În cazul în care vântul este turbulent, este necesară filtrarea variabilelor care alimentează legea de control și utilizarea unor parametri ai reguletoarelor care să asigure o dinamică lentă a sistemului în buclă închisă. Această metodă este foarte sensibilă la variații parametriche.

Figura 6 rezumă structurile subsistemelor de conducere folosite în abordările privind controlul SCEE listate mai sus.

Anumite modele liniarizate ale SCEE pot fi utilizate pentru conducerea optimală a acestora. În cazul optimizării staționare, scopul conducerii este formulat în sensul menținerii vitezei specifice la valoarea ei optimală, λ_{opt} . Pentru îndeplinirea lui se concepe un sistem de urmărire a vitezei de rotație a turbinei [MILL 97], a cărui referință $\Omega_{h_{opt}}(t)$ depinde de valoarea instantanee a vitezei vântului, $v(t)$, și este dedusă conform relației $\Omega_{h_{opt}}(t) = i \cdot \Omega_{l_{opt}}(t) = i \cdot \lambda_{opt} / R \cdot v(t)$. Sistemul de urmărire a vitezei vântului este deseori bazat pe un regulator clasic de tip PI. Anumite dezavantaje legate de inerția mare a SCEE (vântul turbulent implică eforturi mecanice intense etc.) și de variațiile parametriche ale turbinei cu viteza vântului fac această metodă aproape inutilizabilă în condiții reale.

Conducerea SCEE prin **optimizare dinamică liniar pătratică** (LQ) poate rezolva o problemă optimală construită pe un criteriu pătratic care exprimă un compromis între maximizarea puterii captate și minimizarea variațiilor cuplului electromagnetic (generate de subsistemul de conducere), variații care afectează fiabilitatea sistemului eolian (i.e., comanda induce eforturi mecanice la oboseală care pot distruge subsistemul mecanic). Anumiți autori [NOVA 94], [EKEL 97] au folosit un astfel de criteriu, punând în evidență faptul că maximizarea energiei captate și minimizarea variațiilor de cuplu sunt două cerințe antagoniste; un compromis între cele două se poate exprima folosind un criteriu de optimizare combinat, de tipul:

$$(5) \quad I = E \left\{ \alpha \cdot [\lambda(t) - \lambda_{opt}]^2 \right\} + E \left\{ \Delta \Gamma_G^2(t) \right\} \rightarrow \min ,$$

cu $E\{\cdot\}$ fiind simbolul de medie statistică. Problema de optimizare este deci definită ca fiind **liniar pătratică Gaussiană (stocastică) – LQG** [LEVI 96], folosind un model liniarizat al SCEE.

Funcționarea în jurul punctului de randament maximal este asigurată de minimizarea numai a primei componente din (5), dar sunt admise variații importante ale cuplului (al doilea termen din criteriul anterior). Coeficientul pozitiv α permite ajustarea compromisului între cele două cerințe menționate anterior. Comanda optimă este obținută ca o reacție după stare, iar vectorul de reacție după stare, \mathbf{K} , rezultă în urma rezolvării

problemei de optimizare liniar-pătratică (exprimată de criteriul (5)), definită pe modelul liniarizat (în jurul PFO) al SCEE.

Parametrii sistemului dinamic depind de poziția punctului de funcționare pe caracteristica mecanică a turbinei (și de viteza media a vântului); de aceea, pentru îmbunătățirea performanțelor legii de conducere optimale LQ a fost propusă o structură de control adaptivă care să comute vectorul de reacție, \mathbf{K} , în funcție de viteza vântului [EKEL 97]. Mai mult, starea sistemului (așa cum este definită în modelul liniarizat) nu este complet măsurabilă, și este necesară folosirea unui filtru Kalman pentru reconstrucția variabilelor inaccesibile măsurării. În concluzie, desensibilizarea legii de conducere LQ a SCEE (construită conform observațiilor de mai sus) în raport cu variațiile parametrice se poate obține folosind o structură adițională de conducere, destul de complicată (și dificil de implementat).

Figura 7 listează structurile subsistemelor de control al SCEE care folosesc abordările de mai sus.

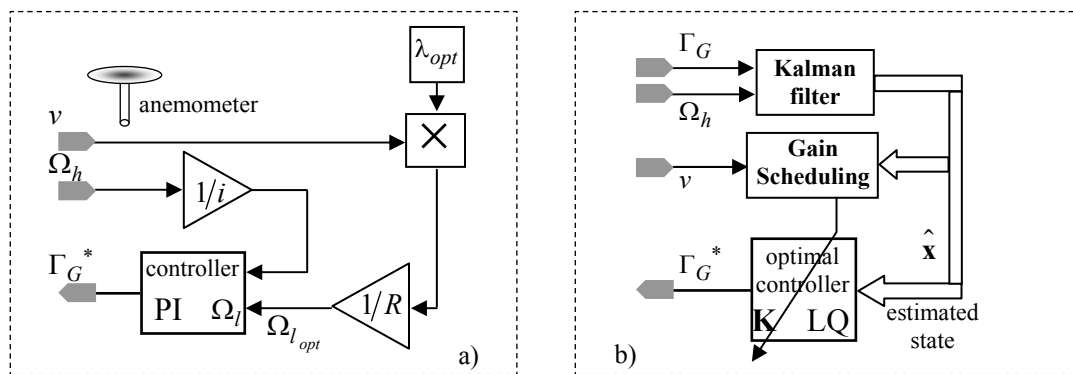


Fig. 7 Metode liniare de conducere a SCEE: a) optimizare staționară, b) optimizare LQG

Aspecte privind fiabilitatea SCEE

Din observațiile anterioare se poate concluziona că optimizarea conversiei SCEE prin operarea acestuia la viteză variabilă ar putea induce eforturi de comandă semnificative, mai ales dacă vântul depășește un anumit grad de turbulență. Încărcările mecanice asociate comenzii au influență negativă asupra fiabilității SCEE și a duratei de bună funcționare, și conducând astfel la scăderea disponibilității sistemului. Aceasta înseamnă costuri de funcționare și întreținere suplimentare, implicând reducerea eficienței economice a SCEE.

Proiectarea transmisiei mecanice include o analiză a solicitărilor mecanice la oboseală, de exemplu cea asociată abordării denumite *time-at-level* [SUTH 95]. În principiu, aceasta implică trasarea unei histogramme prin calculul timpului total în care transmisia este supusă la o anumită valoare a cuplului mecanic.

O analiză a figurilor 8b), 8c) și 8d) arată că, dacă s-ar trasa histograma pentru cazul cu SCEE care funcționează la viteză fixă (cuplaj direct la rețea), aceasta ar diferi semnificativ de cea pentru cazul cu viteză variabilă, trasată pentru aceeași secvență a vitezei vântului. Aceasta implică faptul că limita de duranță asigurată prin proiectarea transmisiei în condițiile funcționării la viteză fixă poate fi depășită dacă același sistem funcționează la viteză variabilă (în aceleași condiții).

În concluzie, fiind date particularitățile funcționării SCEE (legate de supervizarea de la distanță și de amplasarea în zone deseori greu accesibile, de disponibilitatea turbinei eoliene și în final de aspecte economice), este crucial ca *optimizarea energetică să se realizeze cu variații ale cuplului (solicitări mecanice la oboseală) cât se poate de mici*, pentru minimizarea implicațiilor asupra duratei de bună funcționare a turbinei.

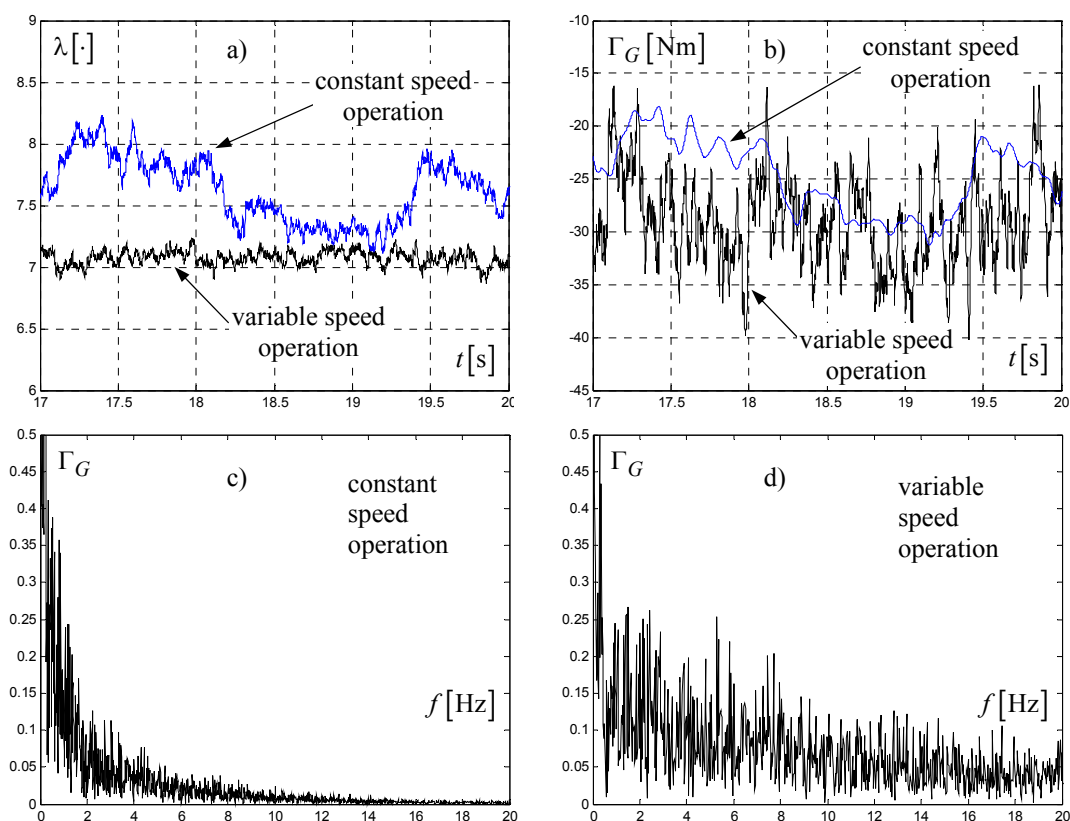


Fig. 8 Comparație între regimul de funcționare a SCEE la viteză fixă și cel la viteză variabilă

Simulatoare fizice de SCEE

Motivele care stau la baza construcției unor astfel de simulatoare rezultă natural din necesitatea validării experimentale a legilor de conducere a SCEE. În cazul SCEE cu viteză variabilă, testarea legilor de conducere pe sisteme eoliene care funcționează în condiții reale este dificilă și nu se recomandă, datorită caracterului aleatoriu al vitezei vântului, imposibil de influențat, și a costurilor asociate destul de importante. Simulatoarele electromecanice în timp real, la scară redusă, devin astfel necesare, ele permițând reproducerea caracteristicilor unei turbine date și testarea turbinei emulate într-un mediu controlat (în condiții de laborator), adică pentru diverse regimuri de vânt, indiferent de condițiile meteorologice locale.

Așa cum se deduce din literatura de profil, validările experimentale preliminare au loc întotdeauna pe simulatoare de turbine eoliene [BATT 96], [RODR 98], [RABE 02], [STEU 04]. Simulatoarele fizice de SCEE încorporează modele ale vitezei vântului corespunzătoare unor situri eoliene date, modele și elemente fizice ale unei turbine eoliene cunoscute, precum și structurile de conducere asociate sistemului eolian, facilitând mult experimentarea (în timp real a) funcționării sistemului în diverse tipuri de situri eoliene, operarea la viteză variabilă sau studiul sistemelor de interfață cu rețeaua electrică.

Aceste simulatoare sunt în prezent realizate folosind conceptul modern de *hardware-in-the-loop simulation* (HILS), a cărui bază tehnologică a evoluat mai repede decât conceptualizarea sa. În ciuda faptului că sunt folosite extensiv, proiectarea acestor structuri de simulare în timp real suferă de anumite carențe metodologice.

Justificarea tehnică a demersului științific

Este unanim recunoscută distanța dintre dezvoltarea de algoritmi avansați de control și aplicarea lor efectivă în cele mai multe din domeniile practicii ingineresti. În particular, un punct de vedere general în conducerea SCEE

este imposibil de susținut, fiind dată diversitatea și specificitatea metodelor de conducere întâlnite în literatura de specialitate. De fapt, niciuna din tehnicile actuale nu a devenit clasică astfel încât să fie utilizată pe scară largă de către integratorii de sisteme eoliene. Dezavantajele acestora, precum și anumite dificultăți inerente rezultate din natura aleatoare a vântului, împiedică implementarea cu ușurință a acestor tehnici în practică.

Utilizarea uneia sau alteia din metodele de conducere expuse mai sus depinde de scopul conducerii, de informația de reacție disponibilă și de cea privind parametrii sistemului. Astfel, metoda de conducere folosită va fi cu atât mai sofisticată cu cât scopul conducerii este mai complex și informația este mai săracă. Metoda de conducere care se alege într-un anumit caz dat ar trebui să asigure cel mai bun compromis între diverse cerințe contradictorii, care ar putea fi în esență o eficiență ridicată a legii de conducere în contextul adoptării unui set (restrictiv) de ipoteze de modelare, care să asigure în același timp solicitări mecanice suplimentare suficient de reduse. Aparent, logica fuzzy ar putea asigura un nivel satisfăcător în acest sens, dar în realitate controllerele rezultate sunt dependente de context, necesitând cunoștințe a priori de la un utilizator cvasi-omniscient. Metoda impunerii directe a punctului de funcționare optimal este foarte sensibilă la variații ale parametrilor sistemului și exogenului. Optimizarea staționară practic nu permite atenuarea eforturilor mecanice suplimentare induse de către subsistemul de conducere. Mai mult, deoarece nu se poate defini un criteriu energetic, niciuna din aceste metode nu permite ajustarea controlată a randamentului de conversie al turbinei.

Abordarea prezentată în această lucrare exploatează avantajele metodelor MPPT, mod alunecător și LQG, având în vedere că inconveniente ale acestora pot fi atenuate într-o oarecare măsură. Astfel, metoda MPPT are imensul avantaj de a utiliza foarte puțină informație din sistemul eolian la construcția controllerului. Metoda de conducere prin moduri alunecătoare este foarte robustă la incertitudini parametrice și adecvată controlului sistemelor neliniare. Metoda LQG asigură atenuarea solicitărilor mecanice prin impunerea unui criteriu de optimizare integral care să asigure un compromis energie captată – fiabilitate. Ideea principală susținută de-a lungul acestei lucrări este de a utiliza beneficiile unei **abordări globale de conducere optimală (multicriterială) dedicată sistemelor eoliene**. Versiuni ale acestor tehnici de conducere consistente cu această abordare au fost evaluate prin simulări numerice, realizate în mediul integrat Matlab/Simulink™ și prin experimentări în timp real. Acestea din urmă au fost posibile în condiții de laborator, într-un mediu controlat, folosind simulatoare electromecanice dedicate, construite pe baza conceptului HILS, conform unei metodologii originale de proiectare.

III. Simularea *hardware-in-the-loop* (SHIL) a sistemelor de conversie a energiei eoliene

Concepte de bază și principii

Simulatoarele de tip *hardware-in-the-loop* (HIL) sunt formate din părți software și hardware conectate în buclă închisă și sunt folosite pentru a reproduce în condiții de laborator comportamentul dinamic al unui anumit proces industrial. Subsistemul software derivă din modelul matematic al sistemului fizic respectiv, iar partea fizică este preluată ca atare din sistemul real. Inserarea de elemente fizice în sistemul HIL contribuie la o mai bună reproducere a fenomenelor reale și la reducerea timpului de procesare a informației în simulator. În această lucrare

se propune o metodologie sistematică de proiectare a acestor simulatoare, apoi se arată cum se aplică această procedură la construcția unei platforme de dezvoltare bazate pe un simulator de timp real al unui SCEE de mică putere, cu viteză variabilă și cu generator asincron dublu alimentat (sau cu dublă ieșire, GADA). Structura, performanțele și posibilitățile acestei platforme – printre care cea mai importantă din punctul de vedere al scopului lucrării de față, este validarea în timp real a diverselor legi de conducere – sunt ilustrate prin cele mai semnificative rezultate experimentale.

Utilizarea conceptului HILS corespunde în mod natural necesității validării experimentale pentru legile de conducere asociate diverselor sisteme fizice, în condiții de laborator. Se consideră un *sistem fizic de bază* (SFB, *basic physical system* – BPS), pentru care se formulează o anumită problemă de comandă. Modelul matematic asociat se poate scrie astfel:

$$(6) \quad \begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \\ \mathbf{y} = \mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \end{cases},$$

unde \mathbf{u} , \mathbf{x} și \mathbf{y} sunt vectorii de intrare, stare și respectiv ieșire, \mathbf{F} și \mathbf{G} fiind câmpuri vectoriale în general neliniare.

În general, un simulator HIL este construit astfel încât să reproducă cu costuri minime comportamentul dinamic al SFB în scopul realizării de experimente deterministe și repetabile în buclă închisă, în condiții de laborator. Ideea care stă la baza structurilor HIL presupune că SFB poate fi în mod natural împărțit în două subsisteme care interacționează unul cu celălalt: primul sistem oferă energia primară regăsită în SFB, iar al doilea sistem servește la realizarea conducerii SFB. Natura primului subsistem este astfel încât experimentările în buclă închisă se fac cu costuri importante, neputându-se realiza experimente deterministe/repetabile. De aceea, acest subsistem va fi cel al cărui comportament trebuie emulat, deci el va fi înlocuit de un simulator fizic denumit *sistem fizic emulat* (SFE, *emulated physical system* – EPS). Cel de-al doilea subsistem este preluat în simulatorul HIL exact așa cum este în SFB. Deoarece el reprezintă obiectul unei operații de cercetare-dezvoltare, el va fi denumit *sistem fizic investigat* (SFI, *investigated physical system* – IPS).

SFE și SFI furnizează ieșiri care au o aceeași natură și care se consideră că interacționează prin intermediul unui așa-numit *mediu de interacțiune* (*interaction environment* – IER). În general, la nivelul acestui din urmă subsistem are loc un transfer de putere. Astfel, din punct de vedere sistemic, ieșirile lui SFE și SFI sunt intrări (variabile-*cauză*) pentru IER, în timp ce ieșirea (variabila-*efect*) lui IER derivă dintr-o ecuație diferențială care descrie o lege de conservare a energiei.

Referitor la construcția sistemului HIL, SFI rămâne exact cu aceeași structură ca în SFB (studiul său reprezintă unul din scopurile construcției simulatorului HIL), iar IER este înlocuit de către un mediu de interacțiune mai ieftin și mai simplu, adecvat simulării SFB, denumit prin acronimul IES. SFE este înlocuit de către un așa-numit *simulator fizic de timp real* (SFTR, *real time physical simulator* – RTPS), care include de asemenea diferențele dintre IER și IES. Elementele de mai sus trebuie alese astfel încât simulatorul HIL rezultat să aproximeze (în anumite ipoteze) comportamentul dinamic al SFB.

În SFB, interacțiunea SFE-SFI ia loc la nivelul IER, și determină biunivoc natura seturilor de variabile cauză-efect asociate (de exemplu, interacțiunea dintre două sisteme rotative este reprezentată de către perechea cuplu mecanic – turație). Prin urmare, același tip de interacțiune (SFTR-SFI) trebuie să existe în interiorul sistemului HILS. Urmărindu-se un punct de vedere sistemic, se alege o așa-numită *pereche de interacțiune*, formată dintr-o variabilă cauză și dintr-una de tip efect. În simulatorul HIL se regăsește aceeași pereche (de aceeași natură fizică), compusă dintr-o variabilă din SFTR și una din SFI. De fapt, interacțiunea dintre SFTR și SFI trebuie controlată astfel încât HILS să aproximeze SFB; aceasta se realizează prin aservirea variabilei de interacțiune din SFTR, pe

2) *Delimitarea SFI și a sistemului fizic emulat (SFE) în schema structurală a SFB și alegerea variabilelor de interacțiune.* Acest pas este ghidat de cerințele impuse structurilor HIL în legătură cu SFI, care este luat ca atare din SFB. SFI este punctul de plecare, deoarece mediul său real trebuie „transpus” în condiții de laborator. SFE rezultă prin detașarea SFI din SFB; natura interacțiunii dintre aceste două subsisteme determină complet alegerea perechii de interacțiune, precum și frontierele mediului de interacțiune.

3) *Configurarea SFTR, privitoare la două operații, și anume stabilirea părții fizice a efectorului, care trebuie să fie cuplat direct la SFI și, respectiv, alegerea variabilei de pilotaj și a celei de răspuns.*

4) *Dezvoltarea modelului detaliat al SFE (EPSM), care va fi implementat în simulatorul software de timp real (SSTR).* Acest pas depinde de alegerea variabilei de pilotaj și de cum este realizat SSTR. Modelul căutat poate fi implementat fie în formă directă, dacă există posibilitatea / dorința ca variabila de pilotaj să fie în mod natural definită ca variabilă de ieșire (efect), fie în formă inversă, dacă se consideră o cauză drept variabilă de pilotaj.

5) *Implementarea practică a SSTR, realizat cu ajutorul modelului SFE dedus la pasul 4).* O problemă dificilă este de a asigura simultan operarea în timp real a SSTR și imunitatea lui la perturbații, cu atât mai mult cu cât acest model descrie o dinamică rapidă și că modul de pilotaj adoptat în SFTR implică necauzalitatea modelului SFE.

6) *Proiectarea sistemului de urmărire conținut în partea fizică a SFTR (efectorul – EFT).* Dificultatea sintezei unei legi de comandă pentru această buclă este în general datorată neliniarității procesului și variațiilor rapide ale parametrilor săi dinamici. În consecință trebuie garantat ca timpul tranzitoriu al EFT să fie mult mai mic decât cel al SFE.

7) *Construirea SFI, care este puternic dependentă de context.*

Aplicație: simulator de SCEE

Metodologia expusă mai sus este utilizată în lucrarea de față pentru construirea unei platforme (simulator de timp real) pentru clasa considerată de SCEE, cu excepția faptului că structura de generare este bazată pe un generator asincron dublu alimentat (GADA, *doubly-fed induction generator* – DFIG). Astfel, SFTR a fost identificat ca fiind subsistemul aerodinamic al turbinei (rotorul), iar SFI este GADA comandat în cuplu. Modelele privitoare la SCEE au fost înglobate în partea software a simulatorului, în timp ce partea hardware constă în principal într-un sistem de comandă a unei mașini de curent continuu (DCM în figura 10). SFI a fost proiectat și construit exact așa cum este în SCEE.

Deoarece folosește viteza vântului sintetizată, un astfel de simulator poate fi utilizat la analiza performanțelor unei turbine eoliene, precum și la testarea ei în diferite regimuri de funcționare (sau de avarie), la validarea diferitelor strategii de comandă ale generatorului și la studiul transferului de putere către rețea. Rezultatele experimentale ilustrează funcționarea părților principale ale simulatorului, precum și operarea globală a acestuia în diferite regimuri. Aceste rezultate arată comportarea perfect realistă a simulatorului în raport cu sistemul original, date fiind ipotezele de modelare adoptate. Ca o concluzie a demersului întreprins, se prezintă în continuare diagrama funcțională completă a simulatorului de timp real de SCEE, proiectat conform metodologiei HILS propuse (figura 10).

În SFI (partea dreaptă a figurii 10), structurile de comandă care realizează transferul puterii de la rotorul GADA către rețea au fost implementate în Matlab/Simulink™ (pe calculatorul PC1) și translate pentru procesorul țintă DS1005 cu ajutorul pachetului *Real Time Interface*. Această componentă software include de asemenea și un controller al modului de operare, responsabil pentru comportamentul de ansamblu al SCEE. Codul rezultat rulează pe procesorul DS1005 Power PC, împreună cu simulatorul software de timp real (SSTR). Fluxul bidirecțional de informație – care conține informația de măsură (A/N), ieșirile PWM, semnalele binare de configurare pentru

sistemul de putere, ieșiri N/A pentru vizualizarea rapidă a semnalelor rapid variabile – este suportat de un sistem complex de intrare/ieșire al procesorului de semnal. Variabilele de interes sunt monitorizate prin intermediul interfeței ControlDesk™. Partea stângă a figurii 10 conține structura SFTR descrisă anterior, monitorizată cu ajutorul pachetului software TestPoint™ pe calculatorul PC2.

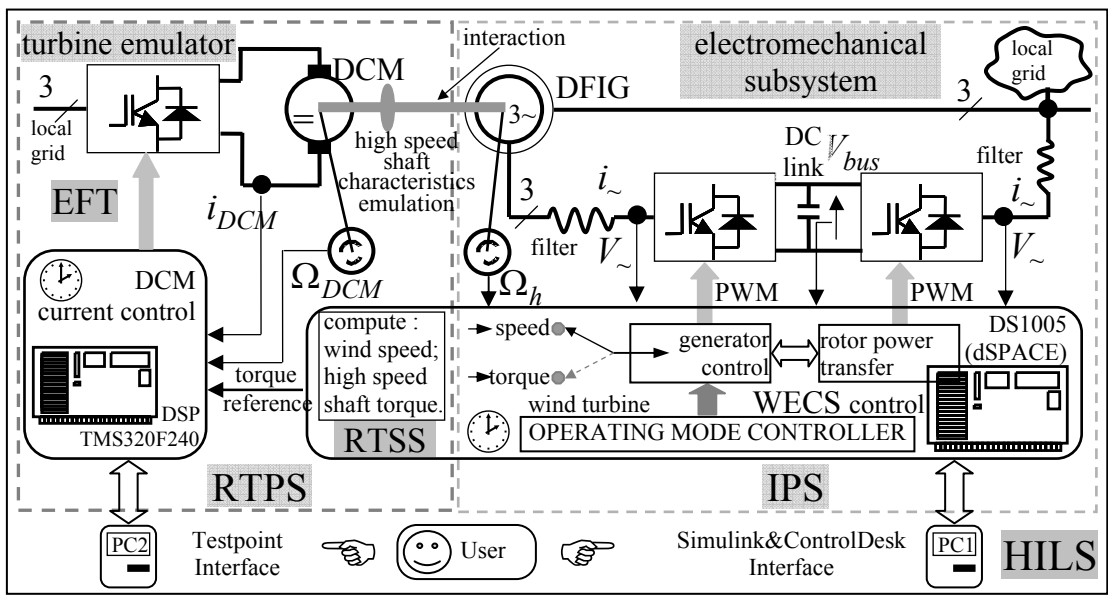


Fig. 10 Diagrama funcțională a simulatorului de timp real de SCEE, conform metodologiei HILS

Eforturile viitoare vor fi îndreptate spre extinderea capacității platformei de dezvoltare de a implementa diferite modele ale vitezei vântului, diferite tipuri de rotor (de exemplu, pentru turbine cu ax vertical și unghi de calare variabil, *vertical axis wind turbines* – VAWT) și diferite tipuri de transmisii mecanice (de exemplu, flexibile sau cu mai multe raporturi de transmisie) și, de asemenea, diferite legi de comandă care asigură operarea la viteză variabilă.

IV. Maximum Power Point Tracking (MPPT) – o abordare bazată pe informație minimală

Problema de a menține punctul de funcționare în jurul celui care asigură conversia optimală a energiei vântului este rezolvată aici în condițiile în care nu se cunosc parametrii subsistemului aerodinamic. Se dezvoltă o nouă metodă de obținere a informației de poziție a punctului de funcționare a turbinei pe caracteristica de putere, bazată pe teoria controlului extremal, (*extremum seeking control* – ESC), în care sistemul este adus la optimalitate folosind o comandă obținută din răspunsul sistemului la injecția unor semnale de probă. **În cazul de față, în loc să se injecteze semnale de căutare armonice, legea de control folosește turbulența vântului ca perturbație de căutare.** Viteza de rotație a turbinei este ajustată (suficient de lent) pe baza transformatorilor Fourier ale unor măsuri din sistem. Demersul întreprins este validat prin simulări numerice.

Metodele de control extremal constau în căutarea punctelor de extrem ale unei dinamici modelate printr-o

funcție unimodală prin excitarea acesteia cu semnale sinusoidale de probă [ASTR 95a], [KRST 00], [ARIY 03]. Schema bloc principală este dată în figura 11a) [KRST 00], unde se vede că regulatorul realizează o operație de modulare/demodulare, iar ieșirea lui este o componentă armonică numită *semnal de probă* (căutare). Schema conține în mod uzual un filtru *washout* (pentru separarea componentelor de înaltă frecvență ale ieșirii părții fixate), un demodulator, un filtru trece jos și un integrator pentru obținerea componentei medii a comenzii, precum și un sumator cu semnalul de probă.

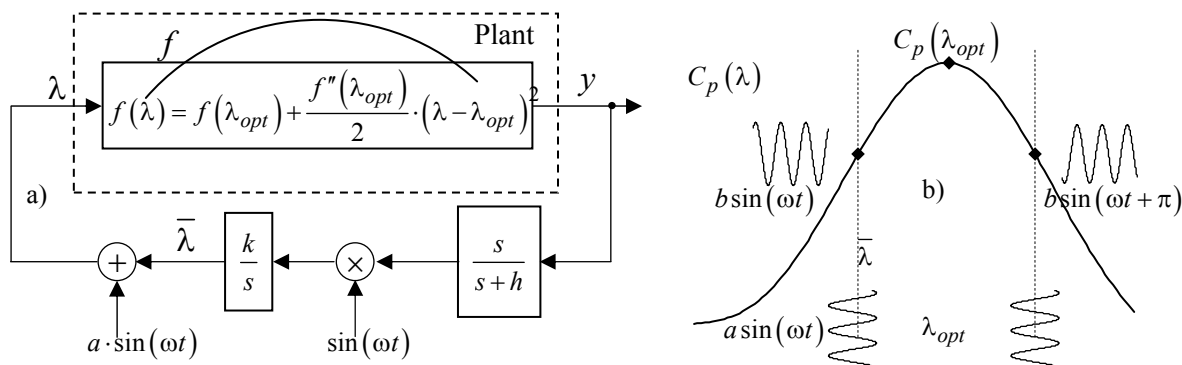


Fig. 11 Principiul căutării extremale [ARIY 03]

Se consideră o parte fixată conținând o dinamică descrisă de o funcție unimodală generică notată cu $f(\lambda)$, având maximum la λ_{opt} . În această abordare, argumentul funcției f are două componente: una medie, $\bar{\lambda}$, și o componentă armonică, de amplitudine a , utilizată ca semnal de probă (figura 11a)). Se consideră apoi dezvoltarea în serie Taylor a acestei funcții în jurul maximumului, $f(\lambda_{opt})$, cu $\tilde{\lambda} = \lambda_{opt} - \bar{\lambda}$ fiind eroarea de căutare. Deoarece constanta de integrare, k , și amplitudinea excitației, a , sunt pozitive și $f''(\lambda_{opt})$ este negativă, din schema bloc anterior descrisă se poate deduce că gradientul erorii de căutare este negativ [ARIY 03]:

$$(7) \quad \dot{\tilde{\lambda}} = \frac{k \cdot a^2 \cdot f''(\lambda_{opt})}{4} \cdot \tilde{\lambda} \leq 0,$$

și, deci, procesul de căutare este convergent. Frecvența excitației, ω , trebuie să fie suficient de mare ca să asigure stabilitatea sistemului în buclă închisă; parametrul filtrului trece sus (*washout filter*), h , depinde de această frecvență [ARIY 03].

Să considerăm acum cazul unei turbine eoliene a cărei eficiență aerodinamică este descrisă de coeficientul de putere C_p , ca în figura 11b), și să presupunem o variație sinusoidală de frecvență ω și amplitudine a suficient de mică a vitezei relative, λ . În funcție de poziția punctului de operare pe curba coeficientului de putere, variația acestuia va rezulta sinusoidală, în fază cu variația lui λ dacă este vorba de partea ascendentă și, respectiv, defazată cu π pentru poziționarea pe partea descendentă (componentele de intermodulație sunt neglijate pentru valori mici ale lui a). Calcule simple arată că intrarea integratorului, $d\bar{\lambda}/dt$, își va schimba semnul ca răspuns la deplasarea punctului de operare (PO) de o parte și de alta a maximumului curbei C_p (a se vedea figura 11b)); presupunând pante egale ale curbei $C_p - \lambda$, intrarea integratorului – și, deci, direcția de căutare – variază ca în relația (8):

$$(8) \quad d\bar{\lambda}/dt = \pm k \cdot b \cdot \sin^2(\omega t)$$

În consecință, PO se va deplasa către optim; viteza de convergență depinde proporțional de k , a și $1/\omega$ [ARIY 03].

Cum se utilizează acest principiu la comanda sistemelor de conversie eoliană abordate? **În loc de a aplica sistemului un semnal sinusoidal de probă, se intenționează utilizarea unei perturbații deja existente, și anume componenta de turbulență a vitezei vântului.** În acest caz, procesul de modulație se realizează în mod natural prin intermediul variațiilor (nearmonice) de înaltă frecvență ale vitezei vântului. Această nouă formă a algoritmului MPPT este rezumată în cele ce urmează.

Viteza relativă, $\lambda(t)$, poate fi calculată folosind măsuri ale vitezei vântului și ale turației, conform cu relația sa de definiție (1). În ipotezele menționate anterior, coeficientul de putere poate fi estimat din informația de putere electrică, $P(t)$, și din viteza vântului, folosind următoarea relație:

$$(9) \quad C_p(t) = \frac{P(t)}{0.5\pi \cdot \rho \cdot \eta \cdot R^2 \cdot v(t)^3},$$

cu η fiind randamentul neunitar al conversiei din putere mecanică în putere electrică.

În cele ce urmează, vor fi utilizate variațiile normalizate în raport cu valorile maxime ale acestor două semnale. Considerând descompunerile în serie Fourier ale semnalelor $\lambda(t)$ și $C_p(t)$, evident, fiecare componentă armonică a lui $\lambda(t)$ va genera un răspuns armonic care este parte din $C_p(t)$. Metoda expusă în secțiunea anterioară poate fi extinsă acestei noi situații luând componentele seriilor Fourier și compunându-le/mediindu-le efectele. Această idee conduce la două abordări de obținere a poziției PO pe curba C_p , care este de fapt obiectivul demodulării:

a) folosirea transformatei Fourier discrete (TFD) pentru extragerea informației de fază a fiecărei componente armonice a semnalelor $\lambda(t)$ și $C_p(t)$. O medie a acestor valori trebuie să dea defazajul dintre cele două semnale – notat în continuare cu $\theta(t)$ – care conține informația de poziție medie a PO. Valorile lui $\theta(t)$ se vor situa mai aproape de 0 dacă PO se află la stânga maximumului curbei C_p (pe partea ascendentă) și mai aproape de π dacă PO se află la dreapta maximumului curbei C_p (pe partea descendentă);

b) demodularea poate fi realizată și prin convoluția semnalelor $\lambda(t)$ și $C_p(t)$, întrucât produsul componentelor armonice (obținute prin TFD) este echivalent cu operația de convoluție în domeniul timp [OPEN 97].

Metoda propusă în continuare se bazează pe prima abordare de obținere a informației despre poziția PO curent. Deci, în loc de a calcula gradientele *instantanee* – care nu e o sarcină trivială în condițiile unui mediu rapid variabil – se propune deducerea *decalajului de fază mediu*, notat cu θ , între coeficientul de putere și viteza relativă, pe baza calculului TFD al celor două semnale pe o fereastră de timp convenabil dimensionată. Astfel, zona de la stânga maximumului este caracterizată de $\theta < \pi/2$, iar cealaltă zonă 2) de $\theta \geq \pi/2$.

Legea de comandă se bazează pe următoarea idee. Obiectivul este ca poziția medie a PO să fie menținută într-o anumită vecinătate în jurul maximumului curbei de eficiență aerodinamică, $C_p - \lambda$. Prin acțiunea de comandă se intenționează deplasarea lentă a PO (în comparație cu dinamica turbinei) spre maxim, prin reglarea valorii medii a vitezei relative, calculate pe o fereastră de timp relativ largă. De aceea valoarea instantanee a vitezei relative se va abate destul de mult de la valoarea ei optimală, λ_{opt} , dar în medie se va menține aproape de aceasta.

Dacă punctul de operare de pe caracteristica $C_p - \lambda$ se află pe partea ascendentă a acesteia, atunci cele două semnale sunt în fază, altfel (dacă se află pe partea descendentă), atunci cele două semnale sunt în antifază (defazajul

dintre ele este în jur de π). Pentru a decide poziția curentă a punctului de operare în raport cu cel optimal, s-a realizat un discriminator de fază pe baza calculului transformatelor Fourier ale celor două semnale, extragerea informației de fază și deducerea defazajului mediu, $\theta(t)$.

Structura de comandă, prezentată în figura 12, este compusă din două părți principale, și anume un bloc de procesare a informației și un bloc de generare a referinței de turație. Din decelarea poziției PO pe partea ascendentă a curbei C_p integratorul va procesa o valoare pozitivă, furnizând mărirea referinței de viteză relativă. Dimpotrivă, dacă PO se află pe partea descendentă a curbei C_p , atunci referința de viteză relativă trebuie diminuată. Aceasta se poate realiza prin integrarea unei funcții neliniare având ca argument informația de defazaj mediu, $\text{sgn}(\theta - \pi/2)$.

În interiorul primului bloc se obțin semnalele normalizate $C_p(t)$ și $\lambda(t)$ folosind măsuri ale puterii electrice și vitezei vântului. Aceste semnale – trecute printr-o fereastră Blackman pentru a evita efectul Gibbs – sunt date de intrare pentru un algoritm TFR, pentru calculul spectrelor lor de fază și, în final, pentru deducerea informației de poziție medie, $\theta(t)$, după cum s-a menționat în secțiunea precedentă. Pentru consistența informației trebuie aleasă o fereastră de timp suficient de largă, $T_C = 2^n \cdot T_S$, $n \in \mathbb{N}$, în raport cu dinamica turbulenței.

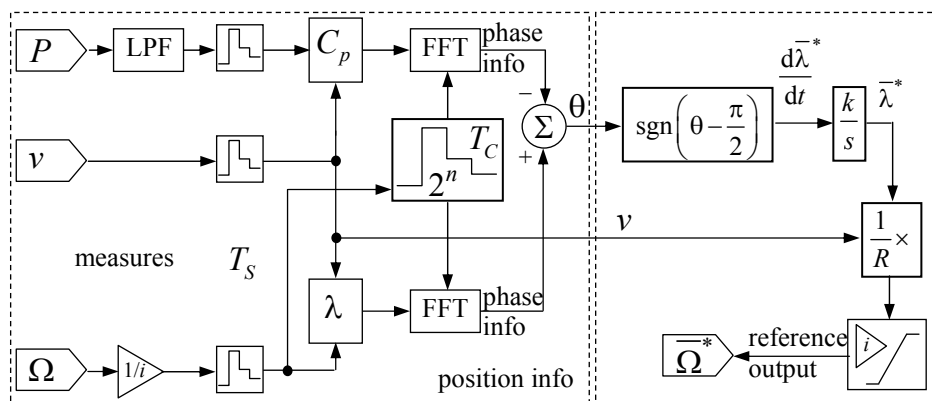


Fig. 12 Structura de comandă MPPT propusă

Deoarece poziția PO variază în mod continuu în jurul PO optimal (panta eficienței aerodinamice se schimbă în mod continuu), în interiorul celui de-al doilea bloc al structurii de comandă se implementează o prelucrare preliminară a semnalului $\theta(t)$, prin aproximarea funcției (discontinue) *signum* printr-o funcție continuă (e.g. liniară sau tangentă hiperbolică). Rezultatul acestei operații, aplicat integratorului, produce o referință de viteză relativă, actualizată la fiecare T_C secunde după calculul defazajului θ . Ieșirea structurii de comandă o constituie referința de turație, obținută din referința de viteză relativă, filtrarea trece-jos și limitarea vitezei de creștere din rațiuni tehnice ce țin de comanda generatorului.

Odată stabilită durata calculelor, T_C , din rațiuni legate de dinamica turbulenței, parametrul cheie este **coeficientul integratorului**, k , care depinde de T_C și de viteza maximă de căutare dorită. Se poate considera că o performanță relativ bună a acestei structurii de comandă o reprezintă o deviație standard (dispersie) suficient de mică a vitezei relative. Deci coeficientul k poate fi ales astfel încât turbina să compenseze această deviație pe durata calculelor, T_C .

Pentru validarea soluției propuse pentru sisteme eoliene de mică putere bazate pe turbine cu ax orizontal s-au realizat simulări în mediul integrat Matlab&Simulink™. Dat fiind că informația disponibilă este săracă, simulările au demonstrat că se obțin performanțe suficient de bune cu un efort al comenzii rezonabil (a se vedea figura 13). Punctul de operare curent se mișcă în jurul celui optimal pentru tot domeniul de variație a vitezei vântului în

regiunea de sarcină parțială. Intrarea de comandă se obține din poziția medie a punctului de operare, dată de defazajul mediu, $\theta(t)$, deci variațiile ei sunt de joasă frecvență, reprezentând stres mecanic suplimentar redus.

Metoda propusă nu poate impune suprapunerea perfectă a valorii vitezei relative medii peste cea optimală, dispersia primei depinzând de intensitatea turbulenței vântului. Această metodă poate deveni inaplicabilă dacă intensitatea turbulenței se găsește sub o anumită limită, altfel informația obținută poate deveni inconsistentă. Dar aceasta este o situație destul de puțin probabilă; dimpotrivă, nivelul turbulenței crește odată cu viteza medie a vântului, de aceea ne așteptăm ca eficiența metodei să crească și ea, conducând la un randament energetic total crescut al sistemului. Cel mai important avantaj al metodei prezentate este **independența de parametrii sistemului**, ca rezultat al utilizării unei cantități minime de informație din sistem.

Aceste concluzii permit considerarea abordării de conducere propuse ca fiind promițătoare pentru dezvoltări ulterioare.

Printre viitoare puncte de interes se numără obținerea informației de poziție a punctului de operare prin convoluția semnalelor de viteză relativă și coeficient de putere, precum și implementarea unei căutări cu viteză adaptată în funcție de intensitatea turbulenței vântului. Aceeași informație de măsură se poate obține prin calculul transformatelor Fourier sau al convoluției semnalelor de putere activă și turație a arborelui rapid, măsurarea vitezei vântului ne mai fiind necesară.

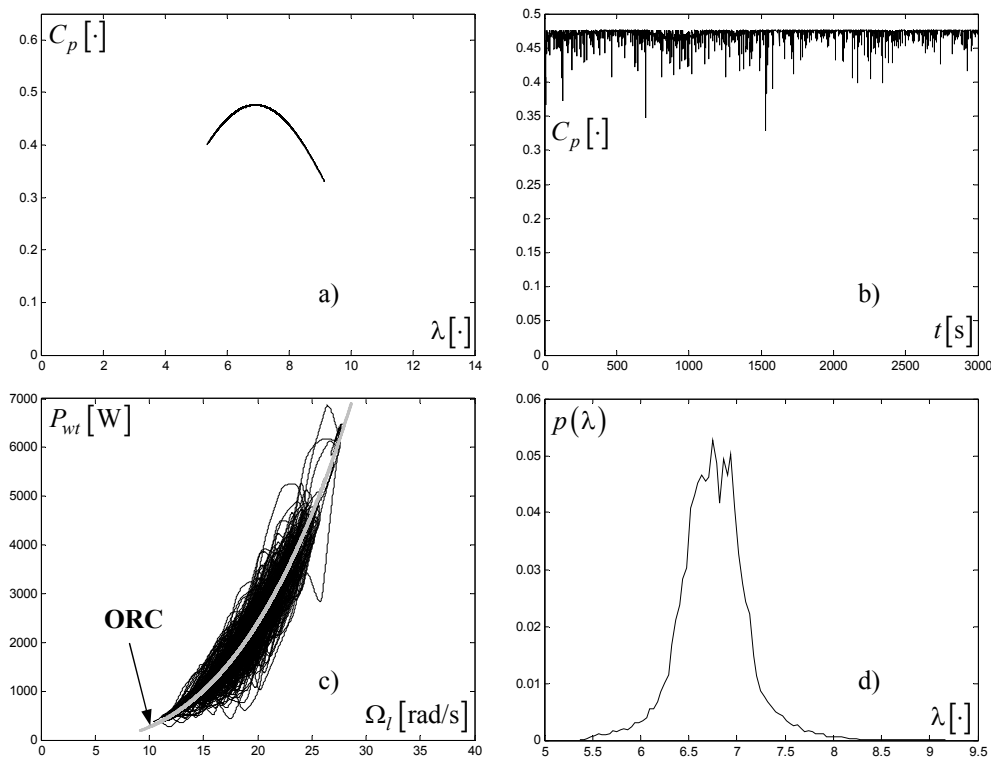


Fig. 13 Performanța legii de comandă în termeni de randament energetic obținut

Conform cu [ARIY 03], în afară de parametrul k , amplitudinea și perioada semnalului de probă determină viteza de convergență a procesului de căutare. Dar, după cum se afirmă în [NICH 02], creșterea turbulenței vântului implică amplitudini și frecvențe crescute. Aceasta sugerează că influențele acestor doi parametri asupra vitezei de convergență se compensează una pe cealaltă într-un mod care merită studiat în viitor.

V. Conducerea optimală în regim alunecător a sistemelor de conversie a energiei eoliene

Această parte a lucrării descrie o manieră de realizare a optimizării energie-fiabilitate a SCEE prin intermediul conducerii în regim alunecător. Abordarea propusă vizează proiectarea unui compromis ajustabil între maximizarea puterii captate din vânt de un SCEE de viteză variabilă bazat pe turbină cu ax orizontal și echipat cu generator asincron dublu alimentat (GADA – *doubly-fed induction generator* – DFIG) și minimizarea solicitărilor mecanice.

Optimizarea dinamicii SCEE din acest punct de vedere este aici realizată prin intermediul comenzii în cuplu a generatorului. Astfel, trebuie găsită o suprafață de comutație adecvată în planul viteză de rotație – putere care să permită diminuarea variațiilor de cuplu când se renunță la precizia de urmărire a optimului energetic și viceversa. Aceasta este echivalent cu a opera SCEE oricât de aproape se dorește de caracteristica regimurilor optime (CRO), prin ajustarea parametrilor legii de comandă propuse.

Această lege este validată atât prin simulare numerică (*off-line*), cât și prin simulare în timp real pe un stand experimental dedicat, construit pe baza conceptului de simulare *hardware-in-the-loop*; rezultatele ilustrează îndeplinirea obiectivului de conducere.

Prin comanda în regim alunecător punctul static de operare al sistemului poate fi forțat să evolueze pe o suprafață de comutație adecvat aleasă, $\sigma(\mathbf{x}, u, t)$, care corespunde unei traiectorii de stare „mediu” [LEVI 96], [YOUN 99]. Această suprafață de comutație trebuie să permită operarea turbinei mai aproape sau mai departe de CRO, necesitând în mod implicit o dimensionare antagonistă a efortului de comandă.

Rezultă că suprafața de comutație trebuie să depindă de viteza vântului; cerințele de fiabilitate impun necesitatea unei anumite „libertăți” de mișcare a punctului de operare în jurul CRO, deci suprafața de comutație trebuie poziționată în vecinătatea CRO. Imaginea ei în planul (Ω_r, P_{wr}) trebuie să aibă o intersecție nevidă cu CRO pentru fiecare valoare a vitezei vântului, precum și o pantă ajustabilă pentru impunerea unei anumite dinamici în regim alunecător, conform cu o valoare dorită a compromisului energie-fiabilitate.

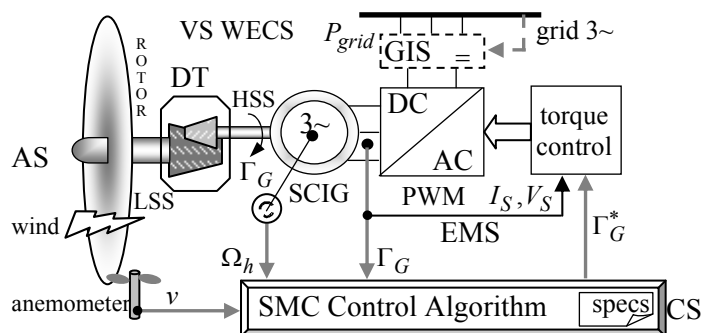


Fig. 14 Schema bloc a SCEE comandat în regim alunecător

Figura 14 prezintă diagrama bloc a SCEE comandat în regim alunecător, unde notația Ω_h este înlocuită pentru simplitate cu Ω (și în tot restul acestui capitol), AS este subsistemul aerodinamic, DT este transmisia mecanică, LSS este arborele lent, HSS este arborele rapid și GIS reprezintă subsistemul de interfață cu rețeaua. Modelul sistemului se compune din ecuația de mișcare adusă la arborele rapid și dinamica de ordinul întâi a subsistemului electromagnetic (EMS):

$$(10) \quad \begin{cases} \dot{\Omega}(t) = \Gamma_{wt}(\Omega/i, v)/(i \cdot J_h) - \Gamma_G/J_h \\ \dot{\Gamma}_G(t) = -\Gamma_G/T_G + u/T_G \end{cases}$$

Date fiind variațiile puternice de cuplu datorate efortului de urmărire a vitezei relative optimale, alegerea unei suprafețe de comutație adecvate nu este o sarcină trivială. O astfel de suprafață, care depinde de viteza vântului și de un anumit nivel dorit al compromisului energie-fiabilitate, a rezultat dintr-un demers sistematic [LEVI 96]:

$$(11) \quad \sigma = a_1 \cdot J_h \cdot \Omega + \Gamma_G \cdot a_2 \cdot J_h - \underbrace{(\Gamma_{wt}/i - \Gamma_G)}_{J_h \cdot \dot{\Omega}} = a_1 \cdot J_h \cdot \Omega + a_2 \cdot J_h \cdot \Gamma_G - J_h \cdot \dot{\Omega},$$

unde parametrul a_1 este inversul negativ al constantei de timp în regim alunecător (performanță care se impune). Regimul staționar se impune prin intermediul parametrului a_2 ; în acest fel se poate caracterizat echilibrul pe suprafața de comutație. În cazul de față, ținând cont că interesul este îndreptat spre optimizarea energetică, punctul de echilibru este stabilit ca fiind cel de *operare optimală* (adică pe CRO). Se dorește asigurarea unei anumite „libertăți” de mișcare a punctului de operare în jurul CRO, prin impunerea unei dinamici dorite de ordin redus în regim alunecător. Se observă că suprafața de comutație depinde de derivata unei variabile de stare (și anume, a vitezei de rotație), ceea ce este un inconvenient pentru implementarea în timp real. Pentru estimarea acestei derivate se folosește un filtru trece-sus de ordinul întâi, cu funcția de transfer $\frac{s}{T_f \cdot s + 1}$, cu $T_f = 0.1$ s.

Legea de comandă în regim alunecător se obține ca [LEVI 96]:

$$(12) \quad u = u_{eq} + u_N,$$

unde u_{eq} este **comanda echivalentă**, având dimensiuni de cuplu:

$$(13) \quad u_{eq} = \Gamma_G - \frac{T_G}{1 + a_2 \cdot J_h} (a_1 \cdot J_h \cdot \Omega + a_2 \cdot J_h \cdot \Gamma_G) (a_1 - A(\lambda, v)),$$

unde $A(\lambda, v) = (0.5 \cdot \pi \cdot \rho \cdot v \cdot R^4) / i \cdot (C_p'(\lambda) \cdot \lambda - C_p(\lambda)) / \lambda^2$, cu $C_p'(\lambda) = dC_p(\lambda)/d\lambda$, iar u_N , **componenta alternantă a comenzii**, rezultă din alegerea pătratului suprafeței de comutație ca funcție (de energie) Lyapunov:

$$(14) \quad u_N = -\alpha \cdot \text{sgn}_h(\sigma),$$

unde $\alpha > 0$ și $\text{sgn}_h(\cdot)$ reprezintă funcția *signum* cu histerezis de lățime h .

Parametrul a_1 se alege ca $a_1 = -1/T_{sm}$, unde constanta de timp $T_{sm} > 0$. Valoarea lui a_2 rezultă din impunerea unui regim staționar “țintă”, și anume punctul de funcționare optimal (PFO), corespunzător valorii λ_{opt} :

$\dot{\Omega} = a_1 \cdot \Omega_{opt} + a_2 \cdot \Gamma_{opt} = 0$, cu $(\Omega_{opt}, \Gamma_{opt})$ fiind imaginea PFO la arborele rapid. De aici rezultă că $a_2 = -a_1 \cdot \Omega_{opt} / \Gamma_{opt}$. Se propune ca acest parametru să se modifice *dinamic* conform următoarei expresii:

$$(15) \quad a_2 = -a_1 \cdot \frac{\Omega_{opt}}{\Gamma_{opt} \left(1 + k \cdot \frac{(\Omega - \Omega_{opt})}{\Omega_{opt}} \right)},$$

unde $k \geq 0$. Această modificare conduce la reducerea variațiilor punctului de operare în jurul PFO, după cum arată rezultatele de simulare. Expresia (15) este valabilă numai în jurul PFO, altfel parametrul a_2 poate lua valori suficient de mari ca sistemul să părăsească regimul normal de operare. În continuare se arată că valori mari ale parametrului k

asigură atingerea mai rapidă a regimului staționar (optimal), $(\Omega_{opt}, \Gamma_{opt})$, deci o urmărire mai bună a CRO. Sistemul este forțat astfel să urmărească mai precis obiectivul conducerii, i.e. optimizarea conversiei, dar variațiile comenzii sunt mai semnificative, cu consecințe negative asupra fiabilității. Acest parametru oferă posibilitatea limitării efortului comenzii și poate fi utilizat pentru dimensionarea echilibrului energie-fiabilitate. În consecință, când k crește, panta imaginii suprafeței de comutație în planul (Ω, P) se mărește și ea pentru a urmări mai bine CRO. Deoarece perechea $(\Omega_{opt}, \Gamma_{opt})$ depinde de viteza vântului, rezultă că și suprafața de comutație variază cu viteza vântului.

Pornind de la rezultatele de mai sus, $u = u_{eq} + u_N$ poate fi calculată conform următorului algoritm.

Parametri de intrare: $R, \rho, i, J_h, T_G, \lambda_{opt}$, curba coeficientului de putere, $C_p(\lambda)$.

Prelucrări off-line:

1. Impunerea dinamicii în regim alunecător, T_{sm} , și calculul parametrului $a_1 = -1/T_{sm}$.
2. Alegerea parametrilor α, k și h .

Prelucrări on-line:

0. Se măsoară v, Ω, Γ_G și se calculează $\lambda = \Omega \cdot R / (v \cdot i)$, $(\Omega_{opt}, \Gamma_{opt})$.
1. Se calculează $\delta(\lambda) = (C'_p(\lambda) \cdot \lambda - C_p(\lambda)) / \lambda^2$ și $A(\lambda, v) = (0.5 \cdot \pi \cdot \rho \cdot v \cdot R^4) / i \cdot \delta(\lambda)$.
2. Se calculează $a_2 = -a_1 \cdot \frac{\Omega_{opt}}{\Gamma_{opt} (1 + k \cdot (\Omega - \Omega_{opt}) / \Omega_{opt})}$.
3. Se obține $\dot{\Omega}$ și se determină suprafața de comutație, $\sigma = a_1 \cdot J_t \cdot \Omega + a_2 \cdot J_t \cdot \Gamma_G - J_t \cdot \dot{\Omega}$.
4. Se calculează intrarea de comandă echivalentă:

$$u_{eq} = \Gamma_G - \frac{T_g}{1 + a_2 \cdot J_t} \cdot (a_1 \cdot J_t \cdot \Omega + a_2 \cdot J_t \cdot \Gamma_G) \cdot (a_1 - A(\lambda, v))$$
5. Se calculează componenta comutată a intrării de comandă, $u_N = -\alpha \cdot \text{sgn}_h(\sigma)$.
6. Se obține valoarea intrării de comandă totale, $u = u_{eq} + u_N$.

Observație:

$\delta(\lambda)$ este practic constant într-o vecinătate a CRO, având o valoare apriori determinată. a_1 și a_2 sunt principalii parametri ai legii de comandă, ultimul depinzând de un parametru prin care se reglează compromisul energie-fiabilitate, k . Există și alți parametri ajustabili, care intră în calculul componentei alternante, u_N , și care contribuie la flexibilitatea legii de comandă.

Simulările numerice (*off-line*) au fost realizate în mediul integrat Matlab/Simulink™, cu ajutorul unei diagrame Simulink construite pentru implementarea algoritmului de mai sus pentru comanda unui SCEE de mică putere (6 kW) cu **transmisie mecanică rigidă echipat cu generator asincron cu rotor în scurtcircuit (GASC)**.

Experimentele de validare în timp real s-au realizat pe un simulator 1:1 care implementează același sistem ca în §III (figura 10) – și anume **SCEE cu GADA și transmisie mecanică rigidă** – construit pe baza conceptului de simulare *hardware-in-the-loop*, conform metodologiei detaliate în același capitol. Algoritmul prezentat anterior, care implementează legea de comandă în regim alunecător, a fost translat pentru procesorul țintă DS1005 cu ajutorul pachetului Real Time Workshop (RTW) din Matlab/Simulink™.

Din punctul de vedere al algoritmului de mai sus, diferențele în operarea celor două configurații de SCEE

(GADA și GASC) pot fi neglijate pentru următorul motiv. Aceste diferențe constau în două structuri diferite de subsisteme electromagnetice (SME), dar care sunt ambele comandate în cuplu. Rezultatul comenzii este același, și anume cele două SME sunt echivalente din punct de vedere dinamic în contextul global al comenzii în regim alunecător.

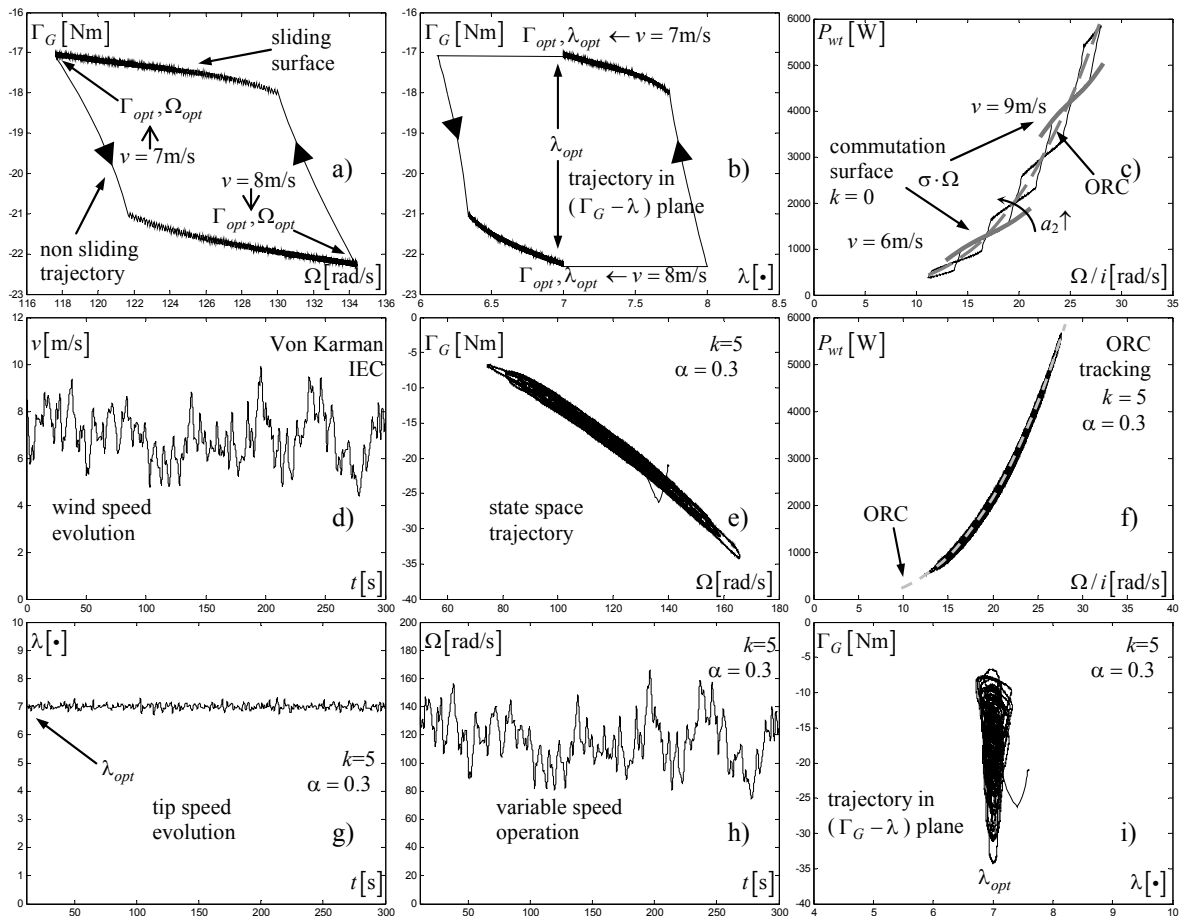


Fig. 15 Rezultate de simulare *off-line* ($\alpha=0.3$)

Figura 15 prezintă două tipuri de rezultate de simulare *off-line*, și anume răspunsul la modificarea în treaptă a vitezei vântului (figurile 15a÷15c)) pentru cazul în care parametrul k ia valoarea 0, și răspunsul la o secvență pseudoaleatoare a vitezei vântului (figurile 15d÷15i)). Figurile 15a) și 15b) arată că punctul de funcționare este atras spre noua suprafață de comutație, evoluând apoi în regim alunecător către optim. Figura 15c) arată poziția suprafeței de comutație în raport cu CRO în planul celei din urmă, pentru diferite viteze ale vântului. În a doua și a treia linie de figuri simulările s-au făcut pentru un orizont de timp de un minut și pentru turbulențe medii ale vitezei vântului, modelate prin parametrul $I=0.17$ (conform spectrului von Karman în standardul IEC – figura 15d) și $k=5$.

Figurile 15e) și 15h) prezintă regimul de funcționare la viteză variabilă al SCEE, iar figurile 15g) și 15f) arată eficiența legii de comandă în ceea ce privește regimul de conversie optim. Această eficiență depinde în mod direct de viteza vântului (figura 15i)), sugerând utilitatea unei legi de ajustare adaptive a parametrului k .

Legea de comandă, calculată cu ajutorul algoritmului de mai sus prezintă următoarele dezavantaje:

- a) coordonatele punctului optim de funcționare în funcție de viteza arborelui rapid, $(\Omega_{opt}, \Gamma_{opt})$, trebuie calculate folosind parametrii turbinei, ai transmisiei mecanice și randamentul generatorului electric;
- b) variațiile parametrului $A(\lambda, v)$ în jurul punctului optimal de funcționare trebuie calculate;
- c) intrările de comandă se bazează pe măsurarea derivatei vitezei de rotație a arborelui lent;

- d) randamentul legii de comandă optimale nu este constant pentru tot domeniul de funcționare;
 e) folosirea unei funcții de tip releu pentru a modifica intrarea de comandă produce variații importante de cuplu și curent pentru generator.

De aceea, forma originală a legii de comandă în regim alunecător – relațiile (13) și (14) înlocuite în relația (12) – necesită anumite modificări pentru a putea fi testată în timp real, pe standul experimental. Toate aceste inconveniente au fost depășite cu succes prin aducerea unor modificări adecvate asupra parametrilor legii de comandă.

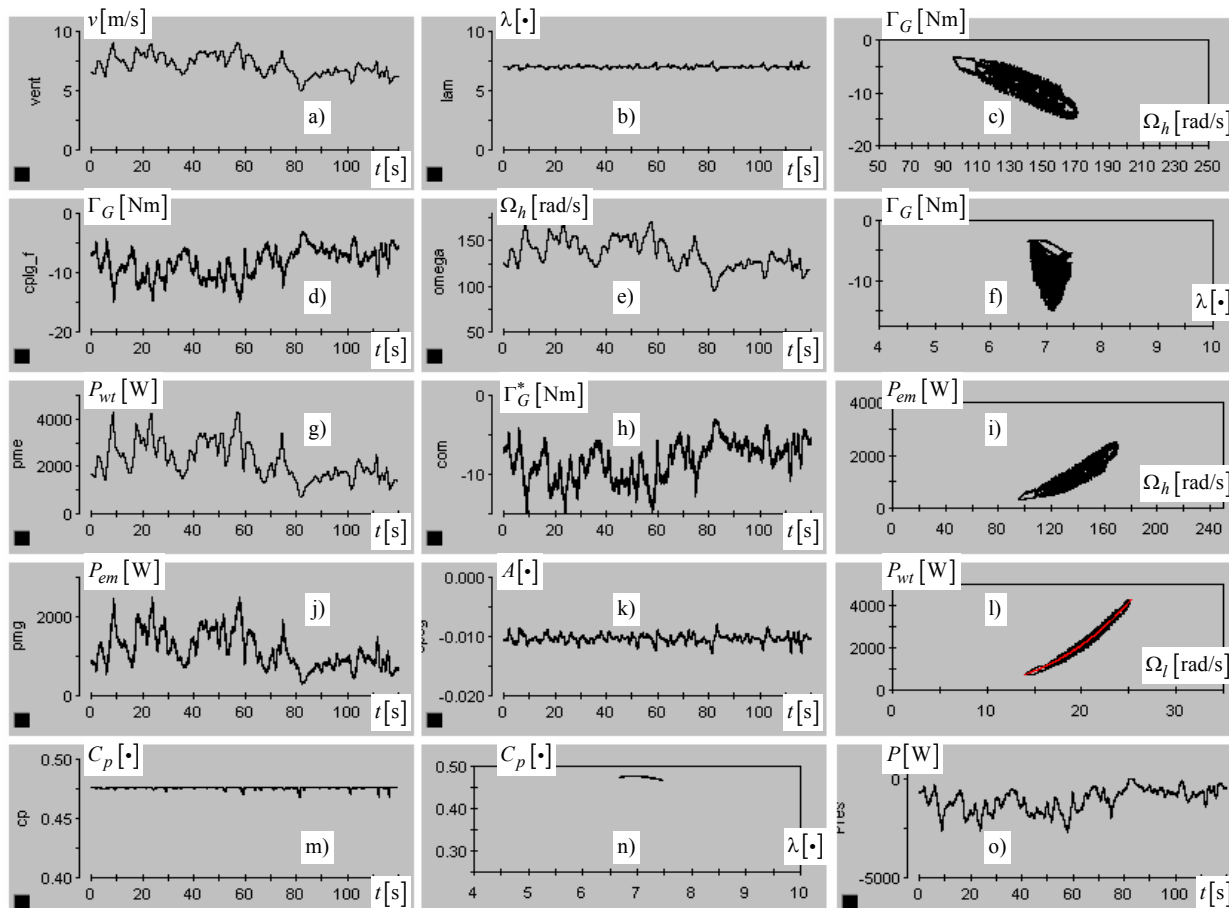


Fig. 16 Capturi ControlDesk™ pentru ilustrarea comportamentului global al SCEE în buclă închisă simulat HIL ($k=12$, $\alpha=0.3$)

Setul de capturi ControlDesk™ din figura 16 ilustrează evoluția principalelor variabile când se implementează operarea la viteză variabilă prin strategia de comandă în regim alunecător propusă. Coeficientul cu influență asupra balansului energie-fiabilitate a fost setat la o valoare medie, $k=5$, iar amplitudinea comenzii alternante, u_N , este $\alpha=0.3$. Secvența de vânt pseudoaleatoare de 2 minute din figura 16a) este de medie turbulență și a fost obținută utilizând spectrul von Karman în standardul IEC. Ca răspuns la această secvență de vânt, sistemul SCEE în buclă închisă funcționează la viteză variabilă (figura 16e)), pentru a-și menține punctul de operare în jurul regimului optimal de conversie, conform unui nivel dorit al compromisului energie-fiabilitate. Acest obiectiv de comandă este îndeplinit, după cum o arată evoluția temporală a vitezei relative (precizia de urmărire a valorii $\lambda_{opt}=7$ se poate estima din figura 16b) și evoluția coeficientului de putere (figura 16m)). Traectoria de stare corespunzătoare este vizibilă în figura 16c), iar evoluțiile variabilelor de stare sunt prezentate în figurile 16d) și 16e). Figura 16f) arată că legea de comandă nu are o eficiență uniformă de-a lungul întregului domeniu de operare. Efortul de comandă se poate observa pe figura 16h). Diferențele dintre puterea la arborele rapid, P_{em} – figura 16j) –

și puterea captată din vânt (la arborele lent), P_{wt} – figura 16g) – se datorează randamentului subunitar al conversiei. Se poate vedea – în figura 16k) – că parametrul $\delta(\lambda)$ prezintă variații mici în jurul valorii lui optimale (aceea care corespunde PFO). Această din urmă valoare intervine în calculul comenzii echivalente. Precizia de urmărire a CRO este sugerată în figura 16l) și evoluția corespunzătoare a randamentului aerodinamic apare în figurile 16m) și 16l), aceasta din urmă în raport cu viteza relativă, λ . Evoluția puterii active livrate rețelei electrice este prezentată în figura 16o), ilustrând rezultatul final al conversiei.

În concluzie, în acest capitol s-a propus sintetizarea unei legi de comandă optimală în regim alunecător pentru SCEE. Pentru aceasta, s-a dedus în mod sistematic o suprafață de comutație având o intersecție nevidă cu CRO și depinzând de un anumit nivel al compromisului dorit între energie și fiabilitate. Punctului de operare i se lasă o anumită „libertate” de mișcare în jurul CRO, impusă printr-o dinamică de ordin redus dorită în regim alunecător. Astfel se asigură posibilitatea dirijării punctului de operare într-o vecinătate a CRO convenabil dimensionată, ceea ce permite în mod implicit limitarea variațiilor de înaltă frecvență ale cuplului. Solicitarea mecanică a transmisiei mecanice poate fi redusă pe această cale, iar numărul de ore de bună funcționare al SCEE crește. Posibilitatea ajustării coeficientului k conferă flexibilitate structurii de comandă, deci randamentul conversiei poate fi semnificativ crescut când condițiile particulare ale sitului eolian permit acest lucru (i.e., când stresul mecanic indus de turbulență nu este foarte ridicat).

Trei aspecte pot fi considerate importante pe viitor. Primele două privesc studiul robusteții sistemului în buclă închisă și respectiv sinteza unei legi de comandă în regim alunecător (în același cadru teoretic) pentru reglarea nivelului puterii furnizate de un SCEE. De asemenea, trebuie căutată o expresie cantitativă a nivelului compromisului realizabil: cât de mult se pot reduce încărcările mecanice când se renunță într-o anumită măsură la performanțele de urmărire a optimului energetic.

VI. O structură de comandă optimală bazată pe principiul separării în frecvență (2LFSP)

Principiul separării în frecvență

Acest capitol prezintă o nouă structură de comandă optimală a SCEE, care permite dimensionarea unui compromis între maximizarea eficienței energetice și minimizarea efortului comenzii. Această structură se bazează pe ceea ce a fost numit *principiul separării în frecvență* în analiza dinamicii SCEE. Conform acestuia, dinamica SCEE prezintă două scări de timp, respectiv corespunzând celor două intervale spectrale identificate în dinamica vitezei vântului [BURT 01]: o *dinamică de joasă frecvență* (dinamică lentă), impusă de componenta de joasă frecvență a vitezei vântului, și o *dinamică de înaltă frecvență*, rezultată din acțiunea componentei de turbulență a vitezei vântului. Proiectarea structurii de comandă tratează separat aceste două dinamici, utilizând rezultate de modelare obținute anterior pentru clasa de SCEE studiată (a se vedea capitolul II din acest rezumat).

În [NOVA 94], [EKEL 97] se afirmă că menținerea valorii optimale a vitezei relative, λ_{opt} , (maximizarea energetică a SCEE) în condiții de vânt turbulent este posibilă numai cu variații mari ale cuplului generatorului

(echivalent cu stres mecanic important). De aceea este necesară o strategie de comandă care să determine captarea maximului de putere din vânt (operarea în apropierea valorii λ_{opt}), în același timp menținând nivelul de fiabilitate al sistemului. Oboseala suplimentară indusă transmisiei mecanice poate fi în principiu redusă prin impunerea minimizării variațiilor cuplului electromagnetic, $\Delta\Gamma_G(t)$, folosit ca intrare de comandă, în jurul punctului optimal de operare, așa cum Ekelund [EKEL 97] a exprimat prin criteriul combinat de optimizare (5):

$$(16) \quad I = E \underbrace{\left\{ \alpha \cdot [\lambda(t) - \lambda_{opt}]^2 \right\}}_{I_1} + E \underbrace{\left\{ \Delta\Gamma_G^2(t) \right\}}_{I_2} \rightarrow \min ,$$

unde $E\{\cdot\}$ este simbolul mediei statistice. Primul termen ilustrează maximizarea randamentului conversiei, iar cel de-al doilea minimizarea variațiilor comenzii. Compromisul dintre cele două este ajustat prin intermediul coeficientului de ponderare, α . **Problema de comandă optimală asociată utilizează criteriul (16) împreună cu un model liniarizat în variații al SCEE** (conform celor prezentate în capitolul II).

Plecând de la ideea separării în frecvență aplicată vitezei vântului – relația (2), [MUNT 05a] – în această lucrare se dezvoltă o structură de comandă optimală originală, care optimizează criteriul combinat (16) **fără a necesita structuri adaptive**. Această abordare – numită **principiul separării în frecvență** – se sprijină pe separarea prin filtrare trece-jos a componentei de turbulență (de înaltă frecvență) și a componentei de joasă frecvență, așa cum sunt ele modelate prin modelul de bandă largă al lui Van der Hoven [NICH 02]. Cele două componente – conform relației (2) – excită dinamica sistemului în două domenii spectrale distincte, după cum se arată în continuare. Astfel, structura propusă, referită mai jos după acronimul ei englezesc, 2LFSP, este formată din două bucle, separat conduse de către cele două componente ale vitezei vântului; problema de optimizare formulată și rezolvată aici este stocastică. 2LFSP desensibilizează sistemul în buclă închisă în raport cu variabilitatea punctului de operare (a cărui poziție depinde de viteza vântului). Ideea de bază a demersului propus este tratarea distinctă a efectelor induse de cele două componente asupra dinamicii SCEE. Acestea determină comportamentul dinamic în două intervale spectrale distincte: componenta de joasă frecvență, v_s , determină *poziția medie* a punctului de operare pe caracteristica turbinei (aceasta este o dinamică lentă, presupunând că spectrul acestei componente este în întregime cuprins înăuntrul benzii de trecere a turbinei), iar $\Delta v(t) = v - v_s \equiv v_l$ (turbulența) excită dinamica de *întăltă frecvență* și generează variațiile în jurul punctului mediu de operare.

Deci dinamica globală a SCEE, exprimată prin evoluția variabilelor măsurabile (i.e., viteza de rotație a arborelui generatorului, Ω_h), rezultă din suprapunerea unei *dinamici lente*, indusă de componenta de joasă frecvență, și a unei *dinamici turbulente*, datorată componentei de turbulență, așa cum se sugerează în figura 17. Astfel a apărut ideea compensării separate a celor două dinamici prin proiectarea unei structuri de comandă cu două bucle, în care fiecare din bucle utilizează valori estimate ale variabilelor v_s și respectiv v_l , calculate pornind de la viteza (totală a) vântului măsurată, v . Ieșirea sistemului, Ω_h , servește la estimarea informației de reacție necesare.

SCEE este aici comandat în cuplu; se presupune că subsistemul electromagnetic este un element de ordinul întâi care furnizează valoarea staționară a cuplului electromagnetic într-un interval de timp mult mai mic decât constanta de timp a transmisiei mecanice.

Problema de comandă optimală formulată mai sus este împărțită în două subprobleme disjuncte, respectiv asociate celor două dinamici ale SCEE. Deoarece stresul indus de componenta de joasă frecvență a vitezei vântului este neglijabil, problema de optimizare legată de dinamica lentă este una de impunere a unui anumit regim staționar (i.e., urmărirea valorii λ_{opt}). Dimpotrivă, oboseala mecanică indusă de componenta de turbulență este

semnificativă, de aceea problema de optimizare asociată dinamicii turbulente poate fi formulată în termeni de optimizare liniar pătratică stocastică (Gaussiană – LQG).

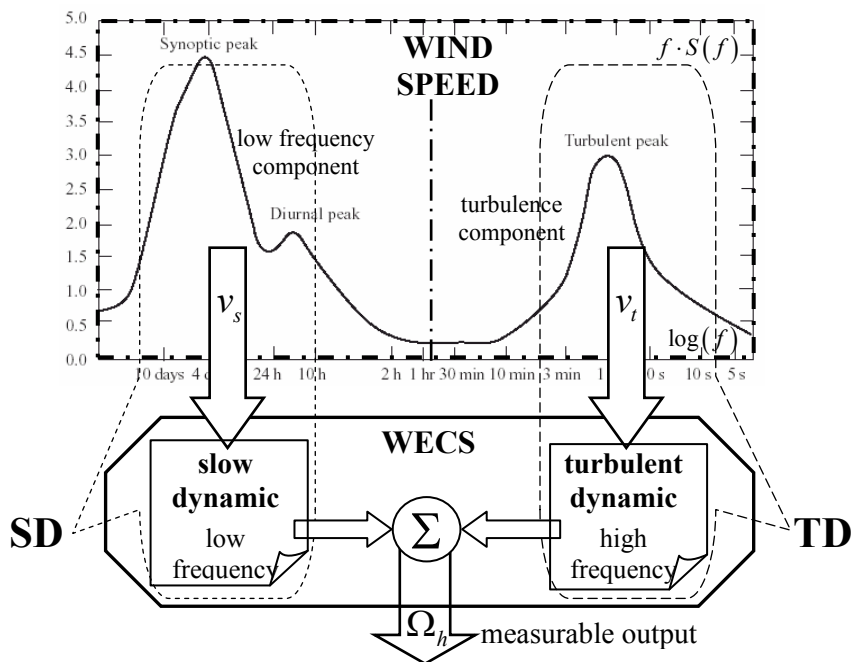


Fig. 17 Principiul separării în frecvență aplicat în analiza dinamicii SCEE

În concluzie, cele două componente ale vitezei vântului acționează separat în cadrul celor două bucle ale structurii de comandă propuse (figura 18): o **buclă de joasă frecvență** (referită în continuare ca B_{JF}), care folosește v_s la calculul unui regulator de viteză relativă (CVR) pentru a conduce și menține sistemul **la** punctul de operare staționar pe CRO, și o **buclă de înaltă frecvență** (referită în continuare ca B_{ÎF}), în care v_t este utilizată pentru calculul unui regulator LQG, pentru optimizarea dinamică a comportamentului sistemului liniarizat **în jurul** acestui punct. **În acest fel este posibilă atât optimizarea energetică relativă la componenta de joasă frecvență a vitezei vântului, cât și diminuarea solicitărilor mecanice datorate turbulenței vântului.**

Conform principiului separării în frecvență, orice variabilă din sistem este descompusă în două componente: una staționară, de joasă frecvență, și una de înaltă frecvență, reprezentând variații în jurul valorii staționare. Aceste două tipuri de valori descriu respectiv cele două tipuri de dinamici și intervin în cele două bucle corespunzătoare de comandă. Pentru o variabilă generică din sistemul eolian, x , se fac următoarele notații:

$$(17) \quad \bar{x} = x|_{\text{static operating point}}; \Delta x = x - \bar{x}; \overline{\Delta x} = \Delta x / \bar{x}$$

Au fost dezvoltate două categorii de modele liniarizate ale SCEE, unul pentru B_{JF}, celălalt pentru B_{ÎF}. Primul rezultă din liniarizarea în jurul punctului static de operare, după cum o impune componenta de joasă frecvență a vitezei vântului. Al doilea este în variații normalizate în jurul punctului static de operare stabilit în modelul de joasă frecvență, astfel încât să exprime comportamentul de înaltă frecvență al SCEE.

Valoarea staționară, \bar{x} , aparține B_{JF}, iar variația sa normalizată, $\overline{\Delta x}$, este tratată în cadrul B_{ÎF}. Fiecare din aceste două bucle primește ca informație de reacție $\overline{\Omega_h}$ și $\overline{\Delta \Omega_h}$ respectiv și furnizează componentele referinței de cuplu electromagnetic, $\overline{\Gamma_G}$ și respectiv $\Delta \Gamma_G$, astfel încât referința totală de cuplu furnizată subsistemului electromagnetic este suma celor două, $\Gamma_G^* = \overline{\Gamma_G} + \Delta \Gamma_G$. Dinamica lentă înglobează și dinamica exogenului, v_s ; aceeași observație este valabilă și în cazul dinamicii turbulente.

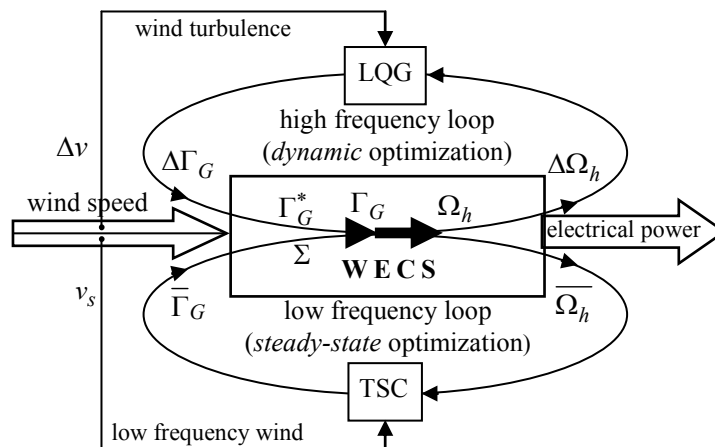


Fig. 18 Schema bloc a structurii de comandă optimă cu două bucle bazată pe principiul separării în frecvență (2LFSP)

Modelarea dinamicii lente

Dinamica lentă a SCEE este cea a cuplajului dintre rotorul turbinei și poate fi descrisă printr-un model liniarizat, presupunând că dinamica subsistemului electromagnetic este neglijabilă în raport cu cea a subsistemului mecanic. Acest demers de modelare se bazează pe modelul liniarizat dezvoltat în [NICH 95]. Punctele de operare stabilă a SCEE se găsesc pe partea descendentă a caracteristicii statice de cuplu aerodinamic a turbinei; aceasta se liniarizează în jurul unui astfel de punct, luând în considerare primii doi termeni ai seriei Taylor. Se obține astfel funcția de transfer de la cuplul electromagnetic, Γ_G , la viteza de rotație a arborelui lent, Ω_l :

$$(18) \quad H_{lin}(s) = -\frac{K_1}{s + K_2},$$

unde parametrii K_1 și K_2 depind de componenta de joasă frecvență a vitezei vântului, v_s , și invers proporțional cu J_h .

În concluzie, presupunând că Γ_G se obține instantaneu (dinamica lui este de sute de ori mai lentă decât $1/K_2$), rezultă că **dinamica lentă a SCEE se poate aproxima ca fiind de ordinul întâi**; parametrii ei depind de poziția punctului de operare pe caracteristica aerodinamică a rotorului. Regulatorul de urmărire (a componentei de joasă frecvență a vitezei vântului) se poate proiecta utilizând fie modelul neliniar (3) sau modelul liniarizat (18).

Având în vedere că în cazul transmisiei mecanice flexibile dinamicile suplimentare se întâlnesc în domeniul frecvențelor relativ înalte, modelul dinamicii lente de mai sus este valabil atât pentru cazul transmisiei rigide, cât și în cel al transmisiei flexibile.

Modelarea dinamicii turbulente

În **cazul transmisiei mecanice rigide**, modelul liniarizat în variații se obține considerând ca variabile de stare variația normalizată a vitezei de rotație a arborelui lent în jurul valorii ei staționare, $\overline{\Delta\Omega_l}$, și variația normalizată a cuplului aerodinamic în jurul valorii ei medii (adică în jurul componentei corespunzătoare componentei de joasă frecvență a vitezei vântului), $\overline{\Delta\Gamma_{wt}}$ (analog cu [EKEL 97]).

Vectorul de stare și intrarea de comandă sunt definite astfel:

$$(19) \quad \mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} \overline{\Delta\Omega_l}(t) \\ \overline{\Delta\Gamma_{wt}}(t) \end{bmatrix}, \quad u(t) = \overline{\Delta\Gamma_G}(t),$$

iar ecuația de stare rezultă în forma:

$$(20) \quad \dot{\mathbf{x}}(t) = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{\gamma}{T_w} & \frac{\gamma}{J_T} - \frac{1}{T_w} \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}} \cdot \mathbf{x}(t) + \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{1}{J_T} \\ -\frac{\gamma}{J_T} \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}} \cdot u(t) + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2-\gamma}{T_w} \end{bmatrix}}_{\mathbf{L}} \cdot e(t),$$

introducând matricea de stare, \mathbf{A} , matricea de intrare, \mathbf{B} și matricea exogenului, \mathbf{L} .

Modelul rezultat este stocastic, fiind excitat de zgomotul alb $e(t)$; T_w este constanta de timp a filtrului de formare a turbulenței, $J_T = \overline{\Omega_l} \cdot J_l / \overline{\Gamma_{wt}} = \overline{\Omega_h} \cdot J_h / \overline{\Gamma_{wt}}$ este constanta de timp a turbinei și γ este **parametrul de cuplu** ([EKEL 97], [MUNT 05a]).

Ieșirea este variația normalizată a vitezei relative:

$$(21) \quad z(t) \equiv \overline{\Delta\lambda}(t) = \underbrace{\begin{bmatrix} 2 & 1 \\ (2-\gamma) & (2-\gamma) \end{bmatrix}}_{\mathbf{C}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \overline{\Delta\Omega_l}(t) \\ \overline{\Delta\Gamma_{wt}}(t) \end{bmatrix}}_{\mathbf{x}(t)},$$

introducând matricea de ieșire, \mathbf{C} .

Se poate arăta că perechea matricială (\mathbf{A}, \mathbf{B}) este controlabilă. Parametrii modelului de stare (20) – γ , T_w și J_T – depind de punctul de operare, adică de componenta de joasă frecvență a vitezei vântului, v_s (sistemul este variant). J_T se definește ca moment de inerție normalizat (având dimensiuni de constantă de timp), iar constanta de timp T_w depinde invers de v_s și direct de lungimea de turbulență.

Stresul mecanic și armonicile puterii electrice, datorate turbulenței vântului, sunt de obicei diminuate dacă rotorul turbinei interacționează cu subsistemul electromagnetic (SME) prin intermediul unei **transmisii mecanice bazate pe cuplaj elastic**. Și în acest caz, modelarea dinamicii turbulente conduce la un model liniarizat în variații normalizate în jurul punctului de operare stabilit de BJF [MUNT 05b], care include aici și dinamica torsională.

Alegând $\mathbf{x}(t) = \left[\begin{array}{c} \dot{\overline{\Delta\Omega_l}} \\ \dot{\overline{\Delta\Omega_h}} \\ \dot{\overline{\Delta\Gamma}} \\ \dot{\overline{\Delta\Gamma_{wt}}} \end{array} \right]^T$ ca vector de stare, $u(t) = \overline{\Delta\Gamma_G}$ ca intrare de comandă și variația

normalizată a vitezei relative, $z(t) = \overline{\Delta\lambda}(t)$, ca variabilă de ieșire (de măsură), se obține ecuația matricială de stare:

$$(22) \quad \begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \cdot u(t) + \mathbf{L} \cdot e(t), \\ z(t) = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}(t) \end{cases}$$

cu:

$$(23) \quad \begin{cases} \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1/J_T & 1/J_T \\ 0 & 0 & 1/J_G & 0 \\ K_A & -K_A & -B_S(1/J_B + 1/J_g) & B_S/J_B \\ \gamma/T_w & 0 & -\gamma/J_T & \gamma/J_T - 1/T_w \end{bmatrix}, \\ \mathbf{B} = [0 \quad -1/J_G \quad B_S/J_g \quad 0]^T, \\ \mathbf{L} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad (2-\gamma)/T_w]^T, \\ \mathbf{C} = [2/(2-\gamma) \quad 0 \quad 0 \quad -1/(2-\gamma)], \end{cases}$$

unde J_g și J_{wt} sunt momentele de inerție respectiv ale generatorului și rotorului turbinei; $J_B = \eta/i^2 \cdot J_{wt}$, K_s și B_s sunt respectiv coeficienții de rigiditate și de amortizare ai resortului cuplajului, J_T și $J_G = \overline{\Omega_l} \cdot i^2 \cdot J_g / \overline{\Gamma_{wt}}$ sunt

constante de timp, iar $K_A = \overline{\Omega}_l \cdot K_s \cdot i^2 / \overline{\Gamma}_{wt}$ este inversul unei constante de timp. J_T , J_G și K_A depind de punctul static de operare, $(\overline{\Omega}_l, \overline{\Gamma}_{wt})$. Relațiile (22) și (23) reprezintă modelul liniarizat al SCEE cu transmisie mecanică flexibilă, care descrie dinamica de înaltă frecvență indusă de componenta de turbulență a vitezei vântului, $\Delta v(t)$, în jurul punctului de operare ales. Parametrii modelului depind de punctul static de operare (stabilit prin funcționarea BJF), deci de viteza vântului.

Parametrul de cuplu, γ , prezintă cea mai puternică variabilitate în raport cu componenta e joasă frecvență a vitezei vântului prin intermediul vitezei relative:

$$(24) \quad \gamma = \gamma(\bar{\lambda}) = \frac{C_p'(\bar{\lambda}) \cdot \bar{\lambda} - C_p(\bar{\lambda})}{C_p(\bar{\lambda})}$$

Adesea, deoarece informația despre $C_p(\lambda)$ este imprecisă sau dificil de obținut, practic este imposibil să se calculeze valoarea lui γ .

Observație:

Acțiunea combinată a celor două bucle din interiorul structurii 2LFSP practic desensibilizează dinamica de înaltă frecvență în raport cu variațiile punctului de operare, anulând variația lui γ în raport cu viteza relativă, λ , așa cum se arată în continuare.

Soluția propusă

Considerând că bucla de joasă frecvență își îndeplinește rolul de a menține punctul de operare pe CRO, rezultă că dinamica turbulentă este invariantă [MUNT 05a], deoarece cel mai variabil parametru al sistemului, parametrul de cuplu (24), γ , este menținut la $\gamma(\lambda_{opt}) = -1$, corespunzător punctului optimal de operare. Aceasta permite rezolvarea problemei de optimizare asociate buclei de înaltă frecvență (adică dinamicii turbulente) printr-o procedură de sinteză LQG pentru cazul **invariant** și elimină necesitatea utilizării vreunei structuri adaptive.

Problema globală de optimizare inițială a fost divizată în două subprobleme, fiecare din ele fiind rezolvată la optimalitate; soluția totală obținută prin agregarea celor două soluții parțiale este în general suboptimală. Se poate observa că soluția optimală (ideală) depinde în cele din urmă de cât de precis pot fi decelate cele două tipuri de dinamici ale vântului.

Deoarece variațiile de joasă frecvență ale vitezei vântului induc solicitări mecanice ne semnificative, obiectivul buclei de joasă frecvență este exclusiv acela de a maximiza randamentul energetic al SCEE. Aceasta cere operarea la viteză variabilă, astfel încât punctul (static) de operare să rămână pe CRO. Aceasta este echivalent cu menținerea coeficientului de putere, C_p , la valoarea lui maximă și se numește **optimizare de regim staționar**. Ea se realizează prin impunerea ca referință și urmărirea vitezei de rotație a arborelui lent corespunzătoare valorii optime a vitezei relative, λ_{opt} , $\Omega_{l\ opt} = v_s \cdot \lambda_{opt} / R$. În acest scop se utilizează un controller de viteză relativă (*tip speed controller* – TSC în figura 18), a cărui referință este calculată pe baza componentei de joasă frecvență a vitezei vântului, v_s , întrucât aceasta determină variația (lentă) a punctului de operare.

Datorită inerției mari a turbinei în raport cu variațiile vitezei vântului, o strategie de comandă bazată exclusiv pe optimizarea staționară generează variații mari ale cuplului la arborele generatorului, ceea ce dăunează subsistemului mecanic (transmisia mecanică în special). Încărcările mecanice pot fi diminuate prin acțiunea buclei de înaltă frecvență, care realizează o **optimizare dinamică** a comportamentului turbulent al SCEE, prin formularea și rezolvarea unei probleme de optimizare liniar pătratică stocastică (Gaussiană – LQG). Indicele de performanță

asociat descrie un compromis ajustabil energie-fiabilitate de forma (16), și anume între minimizarea variațiilor variabilei de ieșire și minimizarea celor ale intrării de comandă. Prima componentă a indicelui rezultă ca o formă pătratică în variabila de stare:

$$I_1 = E \left\{ \alpha \cdot \overline{\Delta \lambda}^2(t) \right\} \rightarrow \min \Leftrightarrow I_1 = E \left\{ \mathbf{x}^T(t) \cdot \mathbf{C}_\alpha^T \mathbf{C}_\alpha \cdot \mathbf{x}(t) \right\} \rightarrow \min ,$$

unde $\mathbf{C}_\alpha = \sqrt{\alpha} \cdot \mathbf{C}$.

Cerința privind fiabilitatea este rezolvată prin minimizarea variațiilor efortului comenzii (*Maximization of Energy with minimization of control input – MEMci*). Astfel, cea de a doua componentă a indicelui de minimizat este:

$$I_2 = E \left\{ \overline{\Delta \Gamma_G}^2(t) \right\} = E \left\{ \mathbf{u}^T(t) \cdot \mathbf{N} \cdot \mathbf{u}(t) \right\} \rightarrow \min ,$$

unde $\mathbf{N} = 1$ (notația vectorială pentru $u(t)$ este folosită pentru conformitate formală). Deci indicele global este:

$$(25) \quad I = E \left\{ \mathbf{x}^T(t) \cdot \left(\mathbf{C}_\alpha^T \cdot \mathbf{C}_\alpha \right) \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{u}^T(t) \cdot \mathbf{N} \cdot \mathbf{u}(t) \right\} \rightarrow \min$$

În cazul SCEE cu transmisie mecanică flexibilă se poate utiliza o altă formă a indicelui de performanță, a cărei a doua componentă este dată de:

$$I_2 = E \left\{ \left(\overline{\Delta \Gamma_{wt}}(t) + \overline{\Delta \Gamma_G}(t) \right)^2 \right\} \rightarrow \min$$

Aici, cerința legată de fiabilitate este satisfăcută prin urmărirea cuplului aerodinamic, minimizând astfel efortul total resimțit de transmisia mecanică (*Maximization of Energy with wind torque tracking – MEwtt*). Indicele global de minimizat este, deci:

$$(26) \quad I = E \left\{ \mathbf{x}^T(t) \cdot \left[\underbrace{\left(\mathbf{M}^T \cdot \mathbf{M} \right) + \left(\mathbf{C}_\alpha^T \cdot \mathbf{C}_\alpha \right)}_{\mathbf{R}_{xx}} \right] \cdot \mathbf{x}(t) + 2 \cdot \mathbf{x}^T(t) \cdot \underbrace{\mathbf{M}^T}_{\mathbf{R}_{xu}} \cdot \mathbf{u}(t) + \mathbf{u}^T(t) \cdot \mathbf{R}_{uu} \cdot \mathbf{u}(t) \right\} \rightarrow \min$$

unde $\mathbf{M} = [0 \ 1]$ și $\mathbf{R}_{uu} = 1$.

În concluzie, **procedura de proiectare** propusă se compune din următorii pași majori:

Pas 1. Se măsoară viteza vântului, v , ca fiind semnalul de ieșire al unui anemometru, și viteza de rotație a arborelui rapid, Ω_h , de la encoder.

Pas 2. Se obține componenta de joasă frecvență a vitezei vântului, v_s , prin filtrarea trece-jos a semnalului v .

Pas 3. Se obține componenta de turbulență a vitezei vântului: $\Delta v \equiv v_t = v - v_s$ și variația ei normalizată, $\overline{\Delta v} \equiv \Delta v / v_s$.

Pas 4. Se obține componenta de joasă frecvență a vitezei de rotație a arborelui rapid, $\overline{\Omega_h}$, prin filtrarea trece-jos a semnalului Ω_h .

Pas 5. Se obține valoarea normalizată a componente de înaltă frecvență a vitezei arborelui rapid, $\overline{\Delta \Omega_h} = (\Omega_h - \overline{\Omega_h}) / \overline{\Omega_h}$.

Pas 6. v_s și $\overline{\Omega_h}$ sunt furnizate buclei de joasă frecvență, a cărei proiectare poate urma o procedură liniară sau una neliniară. Componenta staționară a comenzii, $\overline{\Gamma_G}$, rezultă ca ieșire a controllerului de viteză relativă.

Pas 7. Δv și $\overline{\Delta \Omega_h}$ sunt furnizate buclei de înaltă frecvență, a cărei proiectare se bazează pe procedura

clasică de sinteză LQG. Rezultă componenta dinamică a comenzii, $\Delta\Gamma_G$.

Pas 8. Intrarea totală de comandă (cuplul electromagnetic), Γ_G , se obține prin însumarea componentei staționare și a celei dinamice: $\Gamma_G = \overline{\Gamma}_G + \Delta\Gamma_G$.

2LFSP aplicată SCEE cu transmisie mecanică rigidă

Strategia de comandă detaliată mai sus, 2LFSP, se poate aplica SCEE cu transmisie mecanică rigidă echipate cu generatoare asincrone comandate în cuplu, cu scopul realizării unei optimizări multicriteriale, privite ca un „balans” între performanță energetică și menținerea indicatorilor de fiabilitate ai sistemului eolian.

Se detaliază două versiuni de implementare a **nuclei de joasă frecvență (BJF)**: cea bazată pe regulator PI și respectiv cea bazată pe regulator bipozițional (figura 19).

Componenta de joasă frecvență a vitezei vântului, v_s , se obține prin filtrarea trece-jos a semnalului $v(t)$ furnizat de anemometru. Pentru aceasta se utilizează un filtru trece-jos Butterworth de ordinul patru având frecvența de tăiere cel mult egală cu banda de trecere a SCEE [MUNT 05a]. Componenta de joasă frecvență (staționară) a vitezei de rotație a arborelui lent, $\overline{\Omega}_l$, se obține de asemenea prin filtrare și variația ei normalizată rezultă ca $\overline{\Delta\Omega}_l = (\Omega_l - \overline{\Omega}_l) / \overline{\Omega}_l$ și se aplică nucleii de înaltă frecvență (BJF) (a se vedea pașii procedurii de mai sus).

Ieșirea regulatorului, u , reprezintă componenta de joasă frecvență a referinței de cuplu aplicată generatorului electric, practic identică cuplului electromagnetic furnizat de acesta (subsistemul electromagnetic, SME, fiind considerat ideal).

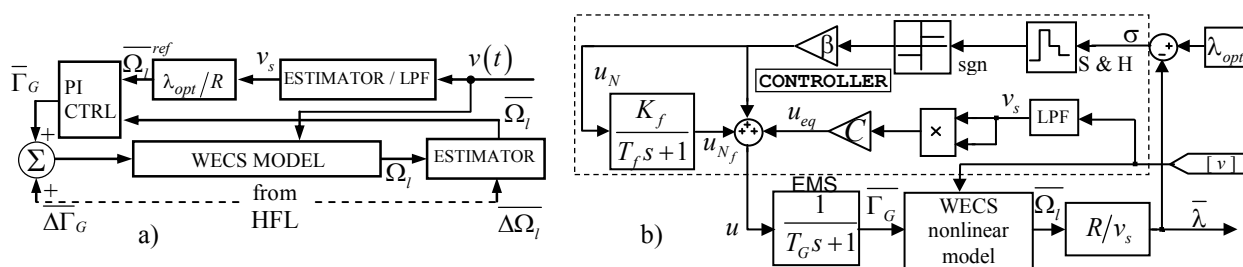


Fig. 19 Schema bloc a BJT: a) cu regulator PI, b) cu regulator bipozițional (on-off)

În cazul în care BJT se bazează pe regulator PI (figura 19a)), obiectivul este atins prin urmărirea componenta de joasă frecvență a vitezei arborelui lent care corespunde valorii λ_{opt} , $\Omega_{l\ opt} = \frac{v_s \cdot \lambda_{opt}}{R}$. Pentru acordarea parametrilor acestui regulator se poate folosi procedura empirică Ziegler-Nichols [ZIEG 42], [HAUT 97]. În orice caz, alegerea acestor parametri nu este critică, întrucât componenta de joasă frecvență variază mult mai lent în comparație cu dinamica SCEE.

În cazul construirii BJT în jurul unui regulator bipozițional, intrarea de comandă are un spectru larg, astfel încât constanta de timp a SME, T_G , nu mai poate fi neglijată. Schema bloc asociată acestui caz (figura 19b) furnizează componenta staționară a referinței de cuplu, u , având trei componente:

$$(27) \quad u = u_{eq} + u_N + u_{N_f},$$

unde comanda echivalentă, u_{eq} , este o componentă „netedă”, care corespunde punctului de operare optimal (la λ_{opt}), și care depinde proporțional de pătratul componentei de joasă frecvență a vitezei vântului, $v_s(t)^2$:

$$(28) \quad u_{eq} = 0.5 \cdot \pi \cdot \rho \cdot R^3 \cdot v_s^2 \cdot \frac{C_p(\lambda_{opt})}{i \cdot \lambda_{opt}} = C \cdot v_s^2,$$

u_N este o componentă alternantă, de înaltă frecvență, care comută între două valori, $+\beta$ și $-\beta$, $\beta > 0$:

$$(29) \quad u_N = \beta \cdot \text{sgn}(\lambda_{opt} - \bar{\lambda}(t))$$

și u_{N_f} este o componentă suplimentară de joasă frecvență, obținută prin filtrarea trece-jos a componentei alternante, u_N .

Componenta u_{eq} trebuie să conducă sistemul către optimul energetic, u_N are rolul de a stabiliza comportamentul sistemului în jurul acestui punct, odată ajuns acolo, iar u_{N_f} asigură robustețea la incertitudini parametrice, odată cu limitarea variațiilor de cuplu datorate comutării componentei alternante a comenzii.

Parametrii legii de comandă sunt calculați astfel încât BJB să prezinte auto-oscilații (stabile) de frecvență relativ înaltă și joasă amplitudine, care au fost analizate cu ajutorul metodei funcției de descriere [VOIC 86].

Bucula de înaltă frecvență (BÎF) vizează realizarea optimizării dinamice, care înseamnă extragerea maximumului de putere din componenta de turbulență, în același timp menținând solicitările mecanice între limite rezonabile. Matematic, aceste două cerințe contradictorii se pot exprima prin impunerea prin minimizarea unui indice combinat energie-fiabilitate, după cum s-a arătat mai sus. Utilizând modelul de stare al dinamicii turbulente liniarizat având ca variabile de stare viteza de rotație a rotorului turbinei și cuplul aerodinamic (ambele în variații normalizate)– relațiile (20) și (21) – scopul proiectării compromisului descris anterior se atinge prin adoptarea unui indice de performanță de tip MEMci – forma (25) – unde $C_\alpha = \sqrt{\alpha} \cdot C = \begin{bmatrix} 2 \cdot \sqrt{\alpha} / (2 - \gamma) & -\sqrt{\alpha} / (2 - \gamma) \end{bmatrix}$, $R=1$, α fiind coeficientul de ponderare care permite dimensionarea echilibrului între cele două cerințe. În acest fel se formulează o problemă de optimizare liniar pătratică Gaussiană (LQG).

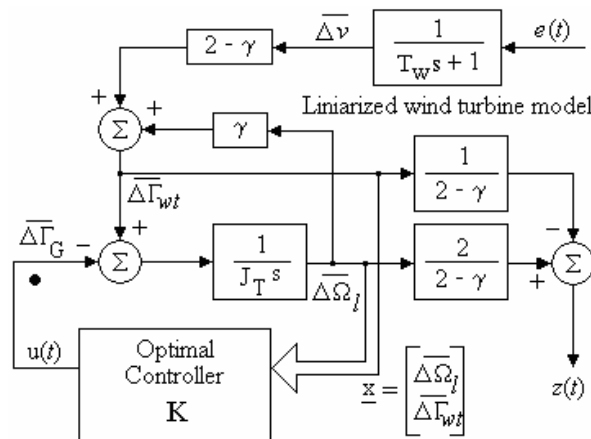


Fig. 20 Structura BÎF

Soluția acestei probleme este comanda în cuplu în variație normalizată obținută ca reacție completă după starea sistemului:

$$(30) \quad u(t) \equiv \overline{\Delta \Gamma_G} = -\mathbf{K} \cdot \mathbf{x}(t),$$

(a se vedea figura 20), cu \mathbf{K} fiind matricea (amplificărilor) reacției după stare:

$$\mathbf{K} = \mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{S},$$

unde \mathbf{S} este matricea unică simetrică și pozitiv semidefinită care satisface ecuația matricială algebrică Riccati:

$$\mathbf{S} \cdot \mathbf{A} + \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{S} + \mathbf{C}_\alpha^T \cdot \mathbf{C}_\alpha - \mathbf{S} \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{S} = 0$$

Stabilitatea asimptotică a sistemului în buclă închisă din figura 20, descrisă de ecuația $\dot{\mathbf{x}}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{B} \cdot \mathbf{K}) \cdot \mathbf{x}(t)$ (ale cărei elemente au fost introduse anterior), este garantată [LEVI 96].

Acțiunea separată a fiecăreia dintre cele două bucle ale structurii 2LFSP, precum și funcționarea lor împreună, sunt ilustrate atât prin simulare numerică (în mediul integrat Matlab/SimulinkTM – *off-line*), cât și prin simulare în timp real (*on-line*). Se prezintă structura și operarea standului experimental folosit pentru simulare în timp real, constând dintr-un simulator electromecanic de SCEE; cele mai relevante rezultate de simulare sunt trecute în revistă în scopul evaluării performanței globale de comandă.

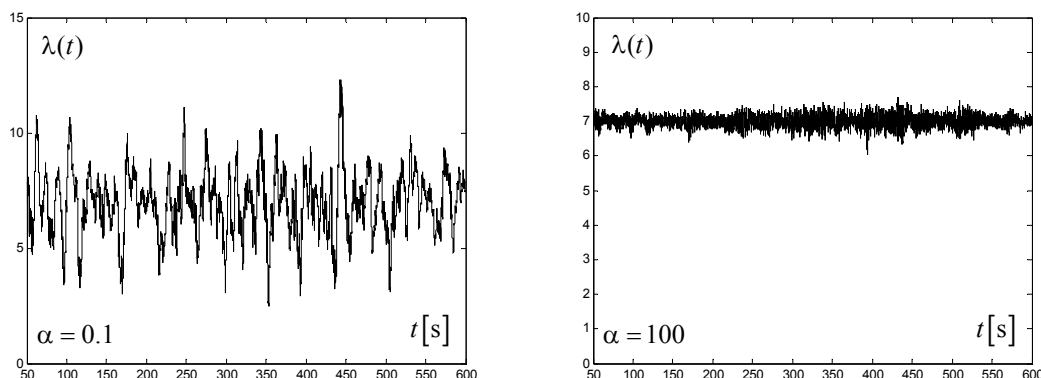


Fig. 21 Operarea globală a 2LFSP ilustrată prin evoluția vitezei relative (cazul transmisiei mecanice rigide)

Rezultatele numerice din figura 21 prezintă evoluțiile temporale ale vitezei relative pentru o valoare mică (stânga) și respectiv mare (dreapta) a coeficientului de ponderare α ; regimul de conversie este cu atât mai departe de optimalitate cu cât acest coeficient este mai mic. Pe de altă parte, utilizarea unui coeficient α mic asigură variații reduse de cuplu, după cum arată evoluțiile corespunzătoare ale cuplului electromagnetic pentru aceleași două valori ale lui α (figura 22).

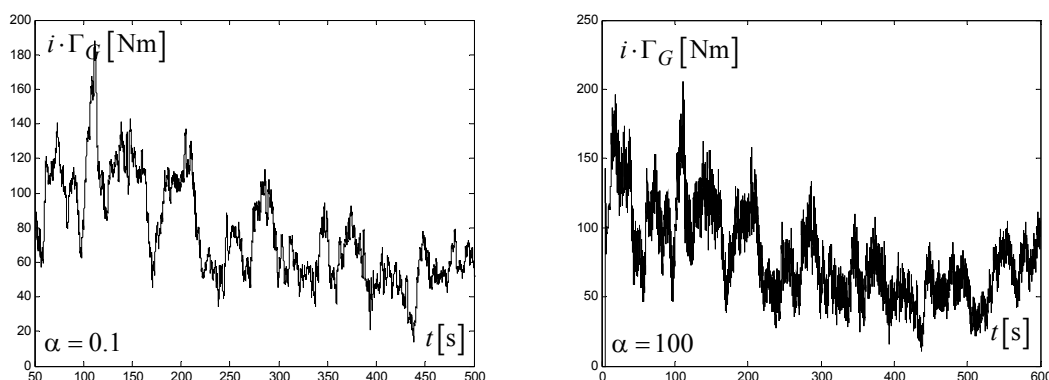


Fig. 22 Operarea globală a 2LFSP ilustrată prin evoluția cuplului electromagnetic (cazul transmisiei mecanice rigide)

Domeniul de variație al coeficientului de ponderare trebuie limitat pentru următoarele motive. Pentru valori mici ale lui α punctul de operare al SCEE are variații largi în jurul CRO (partea stângă a figurii 23), regimul de conversie este departe de a fi optimal. Mai mult, sistemul este în pericol de operare incorectă, adică variațiile prea slabe ale comenzii pot induce regimuri de motor ale generatorului. Pe de altă parte, valori excesiv de mari ale lui α nu cresc în mod semnificativ cantitatea de energie captată, dar pot induce stres mecanic suplimentar destul de

însemnat.

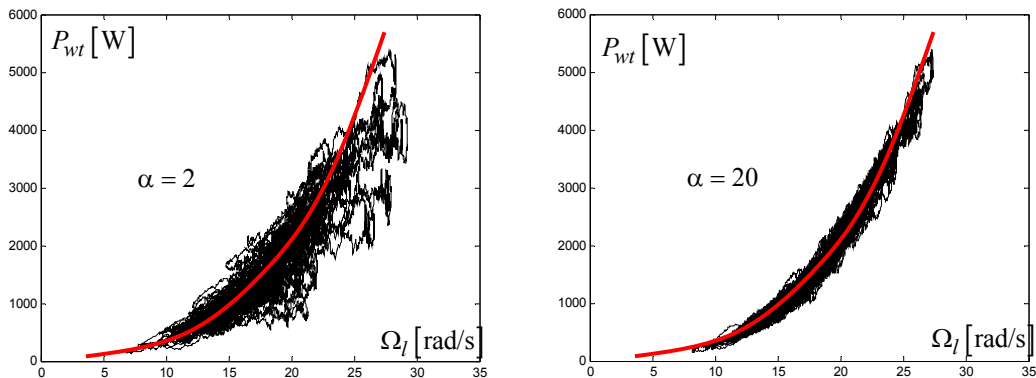


Fig. 23 Operarea globală a 2LFSP ilustrată prin evoluția punctului de operare: urmărirea CRO

Aplicarea strategiei de comandă 2LFSP la cazul SCEE cu transmisie mecanică rigidă după cum s-a expus mai sus în acest capitol este de asemenea validată prin simulare în timp real pe un simulator electromecanic de SCEE de scară redusă (figura 24). Acest simulator are la bază conceptul de simulare *hardware-in-the-loop*; în acest caz s-a ales ca variabilă de pilotaj viteza de rotație a arborelui rapid (o variabilă-efect) [DIOP 99], [CUTU 05].

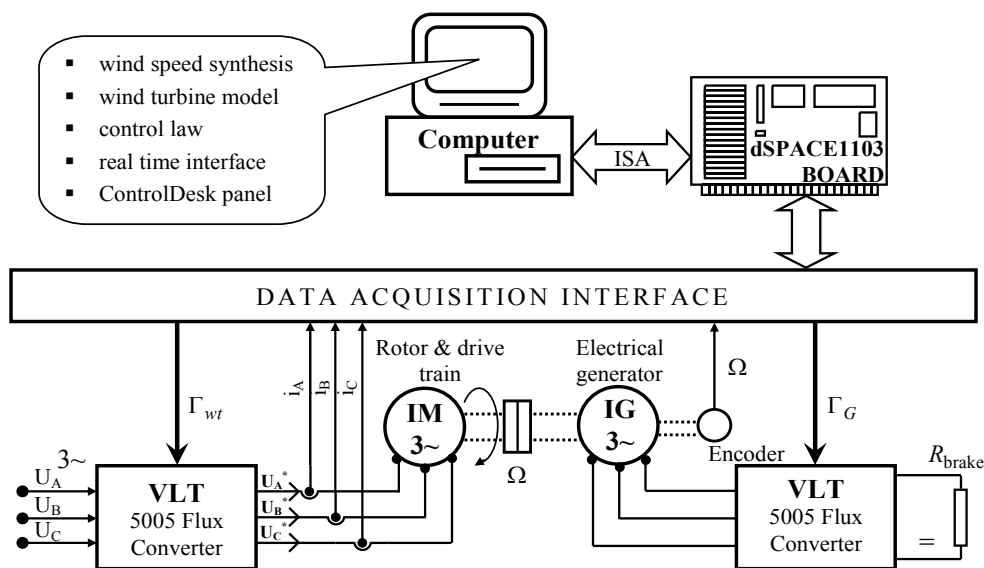


Fig. 24 Structura fizică a standului experimental dedicat validării în timp real a structurii 2LFSP

Simulatorul constă în cuplajul mecanic rigid a două mașini electrice asincrone cu rotor în scurtcircuit identice. Una dintre ele, notată cu IM (*induction motor*), emulează subsistemul aerodinamic și transmisia mecanică a SCEE; cea de a doua, notată cu IG (*induction generator*), este un generator comandat în cuplu. Viteza vântului este sintetizată de calculator și impune viteza de rotație a cuplajului celor două mașini electrice. Acestea sunt comandate prin intermediul convertoarelor electronice de putere VLT 5005 Flux. Calculatorul implementează modelul turbinei, folosit pentru generarea referinței de cuplu aerodinamic, Γ_{wt} (adus la arborele rapid), pe baza vitezei sintetizate a vântului și a vitezei de rotație a arborelui rapid măsurate, Ω_r ; legea de comandă furnizează referința de cuplu, Γ_G^* .

Fluxul bidirecțional de informații între partea fizică și calculator este suportat de o interfață de achiziție de date. Pentru a vizualiza parametrii funcționali ai SCEE simulat și pentru a introduce date în timp real se folosește o interfață (panou) ControlDesk™.

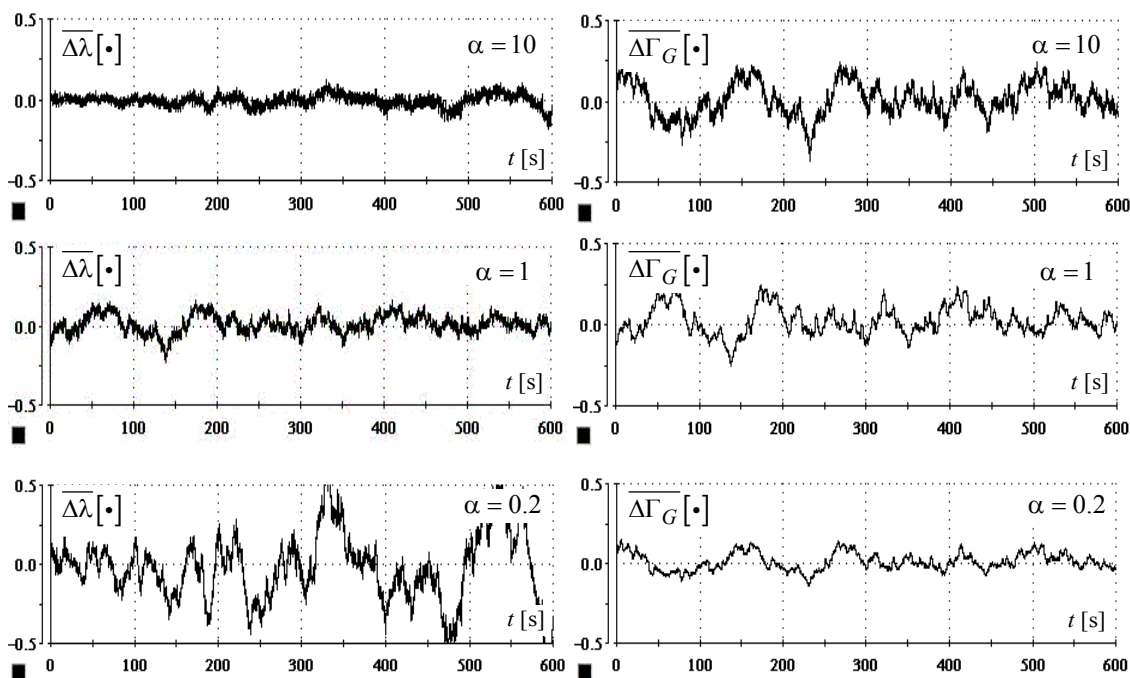


Fig. 25 Evoluția variațiilor normalizate ale vitezei relative (stânga) și ale cuplului generator (dreapta) pentru trei valori ale coeficientului de ponderare, α

Simulările în timp real au fost realizate pe standul experimental descris mai sus pentru câteva valori ale coeficientului de ponderare, α . Pentru fiecare astfel de valoare, s-a calculat matricea reacției după stare, \mathbf{K} , pe baza valorilor parametrilor modelului calculați pentru v_s în mijlocul domeniului ei de variație.

Figura 25 sugerează o interpretare calitativă a rezultatelor de simulare și arată felul cum variațiile normalizate ale vitezei relative și cuplului electromagnetic depind de α . Într-adevăr, după cum era de așteptat, amplitudinea variației normalizate a vitezei relative, $\overline{\Delta\lambda}$, descrește cu creșterea valorii lui α , în timp ce aceea a cuplului electromagnetic, $\overline{\Delta\Gamma_G}$, crește.

Figura 26 ilustrează funcționarea combinată a celor două bucle, și anume variația punctului de operare în jurul CRO pentru patru valori ale lui α . Cum era de așteptat, pentru α mic (partea de sus a figurii), aceste variații sunt semnificativ mai largi decât celea pentru α mare (partea de jos a figurii). De asemenea, se poate observa că aceste variații cresc odată cu creșterea vitezei vântului.

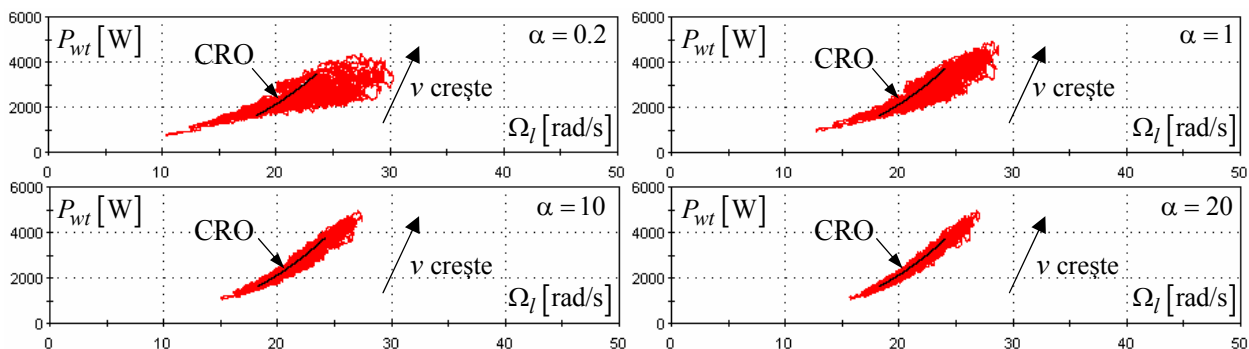


Fig. 26 Evoluția punctului de operare: urmărirea CRO – cazul BJB bazată pe regulator PI

Rezultate similare au fost obținute pentru cazul când BJB se bazează pe regulator bipozițional (*on-off*).

2LFSP aplicată SCEE cu transmisie mecanică flexibilă

2LFSP poate de asemenea fi aplicată SCEE de viteză variabilă cu transmisie mecanică *flexibilă*, echipate cu generator asincron, în același scop al asigurării unui echilibru între cerințele de optimizare energetică și cele de fiabilitate. În acest caz, variabilele BÎF nu mai sunt disponibile pentru măsurare, deci este imperativ necesară o metodă de estimare a lor (de exemplu, utilizând o procedură clasică de alocare a polilor în buclă închisă). Rămâne valabil cadrul de modelare expus anterior în cazul transmisiei mecanice flexibile. Principalele diferențe ale demersului din acest caz constau în adoptarea unei forme diferite a indicelui de performanță asociat optimizării dinamice LQG din BÎF, în utilizarea unui estimator de stare (*observer*) la obținerea informației de măsură și în folosirea unei metode de predicție pentru estimarea componentei de joasă frecvență a vitezei vântului (în BJF), în locul unei simple filtrări trece-jos pornind de la viteza totală (măsurată) a vântului (a se vedea figura 27) [MUNT 05b].

BJF este în acest caz construită în jurul unui regulator PI de viteză relativă (*tip speed controller* – TSC), acordat pe baza dinamicii lente analog cazului transmisiei mecanice rigide. Problema de comandă asociată BJF privește optimizarea regimului staționar, care constă în operarea turbinei la viteză variabilă astfel încât punctul ei static de operare să fie adus și menținut pe CRO. Ca și în cazul anterior, acest scop este atins prin urmărirea acelei viteze a rotorului care corespunde unei estimări (obținute prin predicție) a lui λ_{opt} , cu ajutorul unui regulator PI (figura 27), acordat conform metodei empirice Ziegler-Nichols [ZIEG 42], [HAUT 97] pentru a compensa neliniaritățile (slabe) din jurul unui punct de operare uzual. Practica sugerează că alegerea acest regulator nu este critică, cu atât mai mult în BJF, unde componenta de joasă frecvență variază suficient de lent în raport cu dinamica turbinei. Cum s-a arătat mai sus, o proprietate generală a BJF este aceea că cel mai variabil parametru al sistemului liniarizat, γ , este menținut constant în raport cu componenta de joasă frecvență a vitezei vântului, și în acest fel sistemul descris de relațiile (22) și (23) este invariant în raport cu acest parametru [MUNT 05a]. BJF generează componenta staționară a cuplului electromagnetic, $\overline{\Gamma_G}$ (aplicată arborelui rapid), necesară pentru aducerea punctului de operare pe CRO.

Presupunând că BJF își îndeplinește rolul, **BÎF** se proiectează plecând de la forma (26) a indicelui de optimizare și rezultă, și în acest caz, din rezolvarea unei *probleme de optimizare liniar pătratică Gaussiene invariante*. Existența și unicitatea soluției acestei probleme sunt garantate dacă sunt îndeplinite anumite condiții privitoare la proprietățile structurale ale sistemului comandat [LEVI 96]. Comanda optimală unică care minimizează indicele combinat exprimat de (26) pentru sistemul dinamic dat de relațiile (22) și (23) este reacția completă după stare $u(t) = -\mathbf{K} \cdot \mathbf{x}(t)$, cu $\mathbf{K} = \mathbf{R}_{uu}^{-1} \cdot (\mathbf{R}_{xu}^T + \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{S})$, unde \mathbf{S} este matricea unică simetrică și pozitiv semidefinită care satisface ecuația matricială Riccati:

$$\mathbf{S} \cdot \mathbf{A}_r + \mathbf{A}_r^T \cdot \mathbf{S} + (\mathbf{R}_{xx} - \mathbf{R}_{xu} \cdot \mathbf{R}_{uu}^{-1} \cdot \mathbf{R}_{xu}^T) - \mathbf{S} \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{R}_{uu}^{-1} \cdot \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{S} = 0,$$

unde $\mathbf{A}_r = \mathbf{A} - \mathbf{B} \cdot \mathbf{R}_{uu}^{-1} \cdot \mathbf{R}_{xu}^T$. Stabilitatea asimptotică a buclei închise, descrise de $\dot{\mathbf{x}}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{B} \cdot \mathbf{K}) \cdot \mathbf{x}(t)$, este garantată.

Demersul teoretic presupune că toate variabilele de stare sunt accesibile măsurării, ceea ce nu este cazul aici. De fapt, numai $\overline{\Delta\Omega_h}$ din variabilele de stare este măsurabilă cu costuri rezonabile. De aceea se utilizează un estimator de stare pentru calculul celorlalte variabile de stare, inaccesibile măsurării. Proiectarea acestui *observer* urmează o procedură clasică de alocare a polilor în buclă închisă, similară calculului unui regulator LQ: se calculează un vector al amplificărilor, \mathbf{L}_o , astfel încât răspunsul tranzitoriu al estimatorului să fie mai rapid decât

cel al buclei închise (BÎF), pentru a furniza o estimare rapidă a vectorului de stare. Acest vector s-a obținut pe baza formei canonice observabile folosită în procedura de alocare [NISE 00].

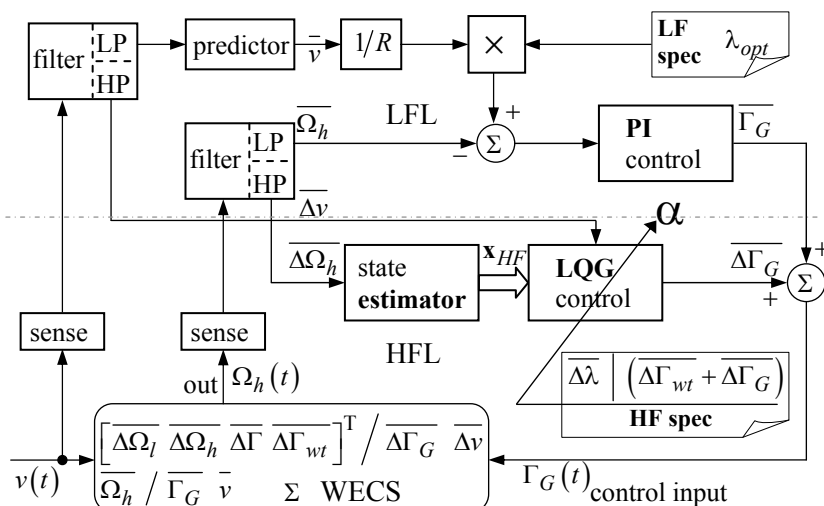


Fig. 27 Structura bloc a 2LFSP pentru SCEE cu transmisie mecanică flexibilă

O imagine sugestivă a configurației 2LFSP utilizate în cazul SCEE cu transmisie mecanică flexibilă este prezentată în figura 27. Atât BIF, cât și BÎF sunt construite în jurul reguletoarelor corespunzătoare calculate pe baza specificațiilor de λ_{opt} și coeficientului de ponderare, α .

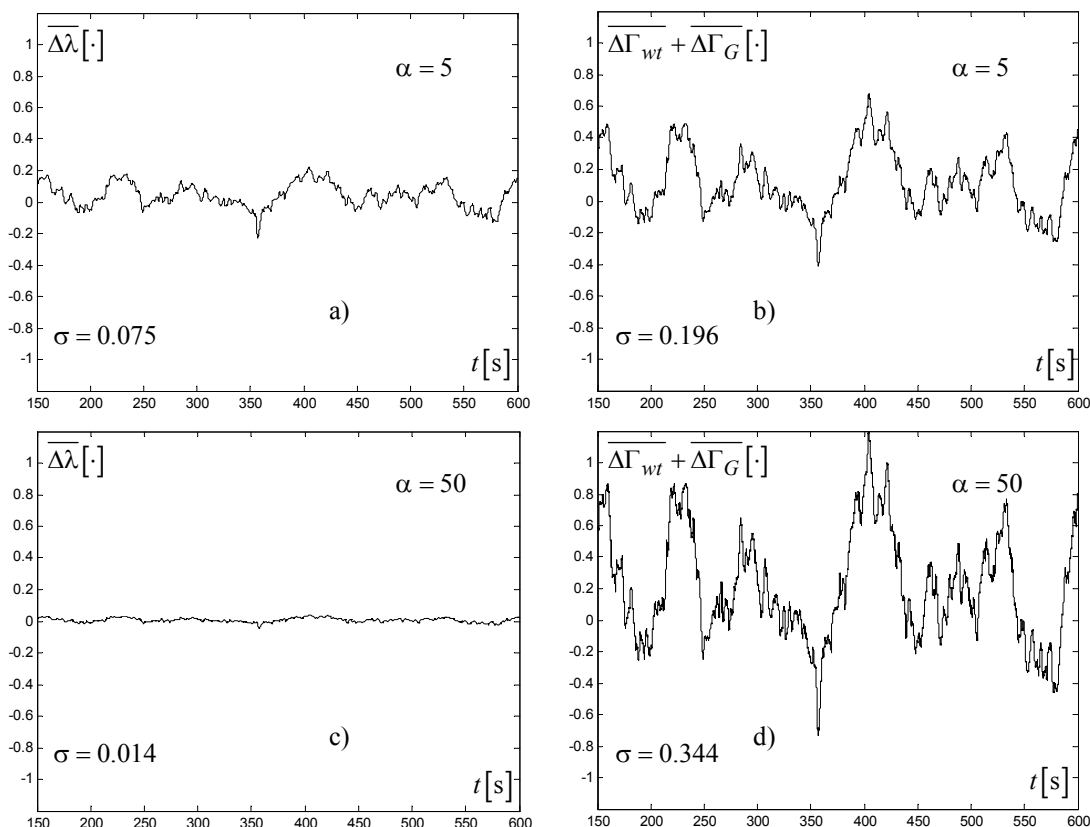


Fig. 28 Operarea BÎF în cazul SCEE cu transmisie mecanică flexibilă; coloana stângă: evoluția variațiilor vitezei relative; coloana dreaptă: evoluția sumei variațiilor cuplurilor

Structura din figura 27, care asigură funcționarea combinată a BIF și BÎF, a fost implementată în

Matlab/Simulink™. Sub sistemele aerodinamic și electromagnetic au același modele ca în cazul SCEE cu transmisie mecanică rigidă. În cele ce urmează sunt prezentate cele mai reprezentative rezultate de simulare privind funcționarea celor două bucle.

Figura 28 arată felul în care variațiile normalizate ale vitezei relative, $\overline{\Delta\lambda}$ (partea stângă), și suma variațiilor cuplurilor, $\overline{\Delta\Gamma_{wt}(t)} + \overline{\Delta\Gamma_G(t)}$ (partea dreaptă), depind de α sub aceeași secvență de vânt. După cum era de așteptat, deviația standard a variațiilor normalizate ale vitezei relative, notată cu $\sigma(\cdot)$, care este o măsură a eficienței energetice, scade cu α , în timp ce deviația standard a sumei cuplurilor crește (ceea ce se întâmplă și cu stresul mecanic total resimțit de către transmisia mecanică). Se poate observa că, atunci când α crește de la 0.1 la 10, deviația standard a lui $\overline{\Delta\lambda}$ scade de la $\sigma_\lambda = 0.23$ la 0.01, iar deviația standard a cantității $\overline{\Delta\Gamma_{wt}(t)} + \overline{\Delta\Gamma_G(t)}$ crește de la $\sigma_\Gamma = 0.03$ la 0.53.

Figura 29 arată evoluțiile randamentului aerodinamic (partea stângă) excursia punctului de operare în jurul CRO (partea dreaptă) pentru aceleași valori ale lui α ca în figura 28. Valori mici ale lui α (partea de sus) corespund unor deviații largi de la regimul conversiei optimale, deci unui randament energetic slab; un randament bun se obține pentru valori mari ale lui α (partea de jos), unde deviațiile față de $C_{p\max}$ și de punctul optimal de operare devin nesemnificative. De asemenea, se poate observa că performanța legii de comandă depinde de viteza vântului, traiectoria punctului de operare în planul (Ω_l, P_{wt}) nu este „centrată” pe CRO. Pentru viteze mari ale vântului controllerul devine inoperant.

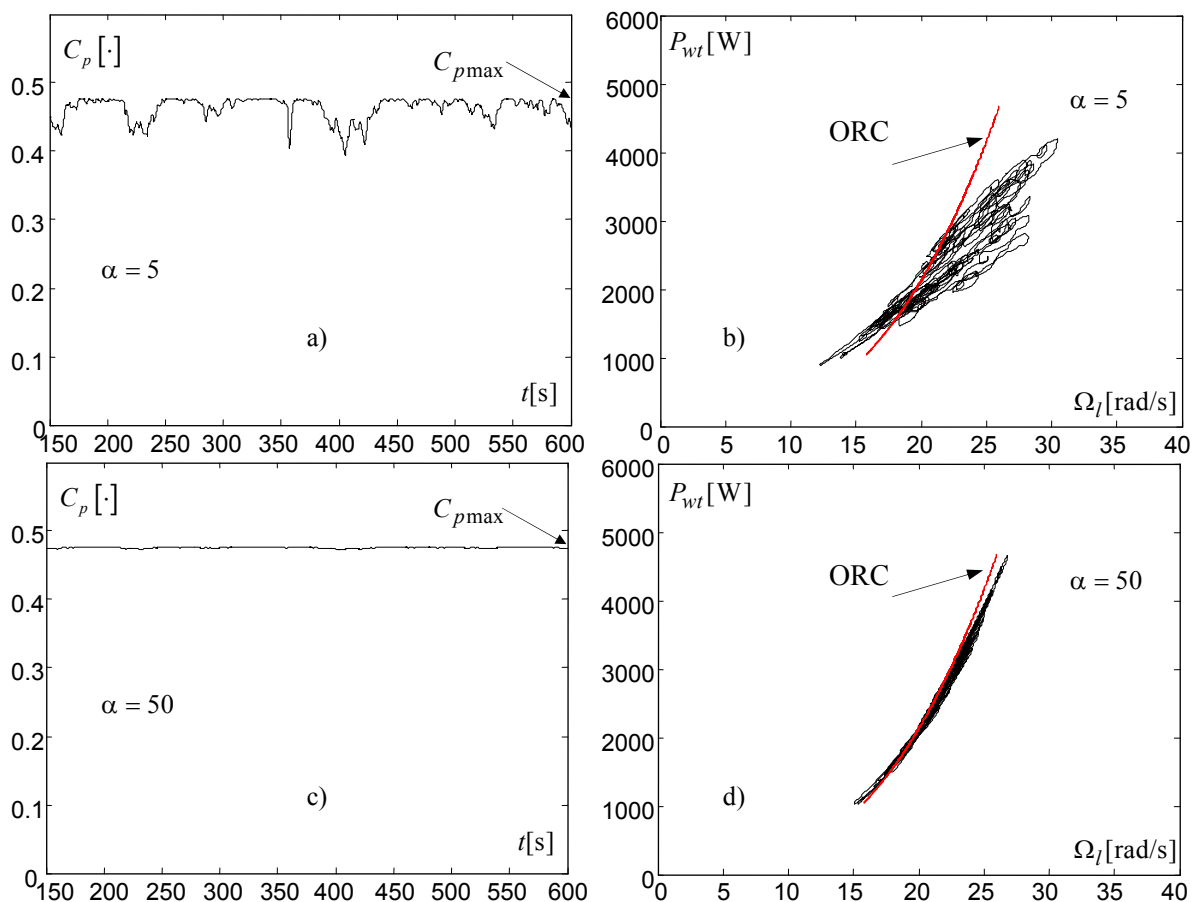


Fig. 29 Funcționarea 2LFSP: urmărirea regimului optimal (cazul transmisiei mecanice flexibile)

Concluzii

Structura de comandă cu două bucle propusă pentru optimizarea comportamentului dinamic al unui SCEE de viteză variabilă cu unghi de calare fix în regiunea de sarcină parțială poate fi aplicată atât în cazul transmisiei mecanice rigide, cât și în acela al transmisiei flexibile. Scopul optimizării a fost definit sub forma unui **compromis ajustabil între maximizarea puterii captate din vânt și menținerea încărcărilor mecanice induse de mărimea de comandă (cuplul electromagnetic) sub anumite limite rezonabile**. Această structură este operațională numai în regiunea de sarcină parțială, adică pentru viteze ale vântului mai mici decât cea nominală și pentru regimuri staționare de vânt (nu au fost considerate regimuri extreme, ca, de exemplu, rafalele).

Structura de comandă propusă, referită prin acronimul său englezesc 2LFSP (*two loop optimal control structure based upon the frequency separation principle*), se bazează pe **principiul separării în frecvență**, conform căruia SCEE prezintă o dinamică globală cu două scări de timp, excitată respectiv de cele două componente ale vitezei vântului, componenta de joasă frecvență și componenta de turbulență. Astfel, există două bucle de comandă în cuplu în cadrul structurii propuse: o *buclă de joasă frecvență* (BJF), guvernată de componenta de joasă frecvență, care vizează captarea maximului de putere din vânt, și o *buclă de înaltă frecvență* (BÎF), excitată de componenta de turbulență a vântului, urmărind dimensionarea unui compromis între captarea maximului de energie din turbulență și minimizarea stresului mecanic datorat variațiilor de cuplu (comenzii).

BJF este un sistem de urmărire a vitezei relative. În cazul *transmisiei mecanice rigide* aceasta s-a realizat prin două tipuri de regulatoare: un *regulator clasic de tip PI*, a cărui referință se calculează pe baza relației de definiție a vitezei relative, și respectiv un *regulator bipozițional*, care tinde să anuleze diferența dintre valoarea reală a vitezei relative și valoarea dorită (optimală) a acesteia. În cazul *transmisiei mecanice flexibile*, BJF captează maximul de energie din componenta de joasă frecvență a vitezei vântului cu ajutorul unui regulator PI, a cărui referință depinde de estimatul prin predicție al valorii acestei componente. Cum această componentă nu induce solicitări mecanice, aspectele legate de fiabilitate nu sunt luate în considerare în BJF; astfel, aici se realizează o optimizare de regim staționar.

BÎF se bazează pe un *regulator LQG*, soluție a unei probleme de optimizare a SCEE liniarizat în jurul punctului de operare optimal (efectiv stabilit prin acțiunea BJF). În acest fel, energia disponibilă în componenta de turbulență este captată mai mult sau mai puțin, în funcție de nivelul considerat admisibil pentru stresul mecanic. Posibilitatea ajustării coeficientului de ponderare α conferă flexibilitate sistemului de conducere, astfel încât energia captată să fie semnificativ crescută dacă se dorește și dacă nivelul turbulenței nu este prea mare.

2LFSP permite combinarea avantajelor robusteții BJF cu cele ale flexibilității optimizării dinamice din BÎF. Întra-adevăr, coeficientul α este cel care conferă flexibilitate sistemului în buclă închisă, astfel încât puterea captată să crească (prin alegerea unei valori mari a lui α), atunci când condițiile particulare ale sitului eolian permit acest lucru, adică atunci când solicitările datorate turbulenței nu sunt mari. Pe de altă parte, dacă turbulența vântului este ridicată, atunci se poate îmbunătăți protecția transmisiei mecanice prin intermediul aceluiași coeficient (și anume, prin alegerea unei valori mici a lui α), dar aceasta înseamnă să se admită o reducere a energiei captate. Domeniul de variație al lui α trebuie să fie totuși limitat. Astfel, în operarea BÎF se poate observa o limită de saturație a creșterii valorii lui α , în timp ce pentru valori mici ale acestui coeficient generatorul poate intra în regimuri anormale de motor.

În cazul transmisiei mecanice rigide, 2LFSP a fost **validată atât prin simulare numerică, cât și prin simulare în timp real**, aceasta din urmă pe un simulator electromecanic de SCEE de viteză variabilă. Aplicarea 2LFSP cazului de SCEE cu transmisie mecanică flexibilă a fost validată numai prin simulare numerică. În ambele cazuri, simulările au arătat că încărcările mecanice datorate variațiilor comenzii pot fi drastic reduse, ceea ce este

benefic din punctul de vedere al fiabilității și disponibilității SCEE.

Cât privește BJB, realizarea ei cu regulator bipozițional induce mai mult stres mecanic decât realizarea cu regulator PI, și aceasta din cauza componentei alternante a intrării de comandă. Pe de altă parte, prima variantă oferă o robustețe mai bună la incertitudini parametrice, dată fiind neliniaritatea dinamicii lente, dependente de punctul de operare.

Aplicarea abordării propuse în cazul SCEE cu *transmisie mecanică rigidă* poate continua în următoarele direcții. Estimarea componentei de joasă frecvență este mai degrabă grosieră, furnizând o versiune nerealist de întârziată a acestei componente. Acest inconvenient se poate corecta prin utilizarea unei metode de predicție (așa cum s-a realizat deja în cazul transmisiei flexibile), combinate cu o alegere mai bine aprofundată a frecvenței de tăiere a filtrului de separare. Se poate îmbunătăți de asemenea estimarea componentei staționare a vitezei de rotație.

Plecând de la cerințele generale de fiabilitate impuse unui SCEE dat, ar trebui să se poată indica nivelul maxim admisibil de stres mecanic resimțit de transmisia mecanică în timpul duratei prevăzute de bună funcționare. Aceasta ar trebui să conducă la alegerea adecvată a domeniului de variație al coeficientului de ponderare care intervine în comanda LQG. Rezolvarea acestei probleme este un subiect interesant de investigat în continuare.

În cazul *transmisiei mecanice flexibile*, se pot menționa trei aspecte de interes pentru viitor. În primul rând, abordarea propusă trebuie testată pe un SCEE având o aerodinamică mai complexă. În al doilea rând, merită investigată natura deviațiilor destul de importante ale punctului de operare de la CRO în condiții de vânt puternic, ceea ce se poate datora unor erori neneglijabile de predicție, pierderii calității de robustețe a regulatorului PI sau poate fi o disfuncție combinată a celor două bucle. În al treilea rând, trebuie mereu avută în vedere validarea în timp real pe simulatoare eoliene dedicate.

VII. Concluzii generale, contribuții și dezvoltări viitoare

Concluzii generale

Conceptul de operare la viteză variabilă este considerat un avans semnificativ în tehnologia SCEE. Aplicarea acestui concept s-a generalizat în ultimii ani, având în vedere impactul său pozitiv asupra eficienței SCEE. Necesitatea de a avea SCEE eficiente rezultă din competiția cu alte surse de energie și se exprimă prin două aspecte principale: cantitatea de energie furnizată (respectând anumite cerințe de calitate) și costurile implicate. Studii recente arată că creșterea energiei captate fără a afecta durata operării în condiții normale nu este o sarcină trivială, ținând cont de natura aleatoare a vântului. Din punct de vedere tehnic, o turbină eoliană este un sistem neliniar invariant excitat de intrări stocastice care îi afectează în mod semnificativ fiabilitatea. Deci domeniul comenzii automate a SCEE de viteză variabilă se află încă în faza dezvoltării de soluții tehnice, de vreme ce niciuna din tehnicile experimentate nu a devenit „clasică” încât să fie larg utilizată de integratorii de sisteme eoliene.

În acest context se dovedește necesară utilizarea tehnicilor moderne de automată pentru maximizarea eficienței energetice a SCEE. Date fiind multiplele aspecte legate de eficiența globală a turbinelor eoliene (precum fiabilitatea, disponibilitatea, teleoperarea, costurile de întreținere, regimurile generatorului electric, puterea captată

etc.), comanda lor automată se pretează formulării de probleme de optimizare multicriterială.

Lucrarea de față este consistentă cu o astfel de abordare, al cărei scop este conducerea optimală a SCEE în regiune de sarcină parțială (la viteze ale vântului mai mici decât viteza nominală), utilizând posibilitatea de operare la viteză variabilă. Clasa de SCEE abordată este larg răspândită, dată fiind fiabilitatea sa crescută și multitudinea aplicațiilor. Comanda vectorială a generatorului asigură un răspuns „neted” în cuplu, cel mai adecvat operării la viteză variabilă.

Abordările dezvoltate în această lucrare folosesc modele de turbine eoliene simple într-un cadru format din ipoteze de modelare rezonabile, cu scopul sintezei de legi de comandă (regulatoare) dedicate SCEE. Pentru a contracara posibilele inconveniente induse de o modelare prea simplificată, s-a propus utilizarea unor tehnici avansate de comandă, care conferă robustețe SCEE în buclă închisă. Optimizarea globală realizată prin aceste tehnici urmărește două direcții: *captarea maximului de putere din vânt, în condițiile limitării oboselii mecanice induse de efortul comenzii (cuplul electromagnetic) sau de variațiile vitezei vântului*. Studiul prezentat în această lucrare se plasează în fiecare din ipotezele următoare: când parametrii SCEE sunt suficient cunoscuți și, respectiv, când acești parametri sunt insuficient de precis cunoscuți sau total necunoscuți.

În literatura de specialitate validarea experimentală preliminară a legilor de comandă a SCEE este întotdeauna realizată pe simulatoare construite pe baza conceptului *hardware-in-the-loop* (HIL), aceasta întrucât turbinele eoliene reale nu permit teste deterministe în mediul lor natural; și aici a fost urmată această idee. S-a propus o metodologie sistematică de proiectare a sistemelor HIL și s-a descris aplicarea ei la construirea de simulatoare de timp real pentru SCEE de viteză variabilă de mică putere.

Având în vedere observațiile de mai sus, această lucrare detaliază trei abordări principale în conducerea automată a SCEE.

Prima dintre abordări se referă la propunerea unei noi versiuni a **Maximum Power Point Tracking (MPPT)**, o metodă de control optimal care necesită un minim de informație din sistem. *Bazându-se pe principiul căutării extreme, această metodă urmărește să dirijeze punctul de operare mediu al SCEE către optimul energetic, folosind componenta de turbulență a vitezei vântului ca semnal de căutare (de probă), asigurându-se astfel optimizarea conversiei.*

Poziția punctului de operare este estimată utilizând decalajul de fază mediu dintre variația coeficientului de putere și cea a vitezei relative. Transformata Fourier discretă (TFD) a fost aplicată acestor două semnale pentru extragerea fazei fiecărei componente armonice. Apoi se calculează defazajele între componentele spectrale omologe și se calculează media acestor defazaje. Această medie conține informația de poziție a punctului de operare pe caracteristica de putere și se integrează pentru a furniza referința de viteză de rotație a cărei urmărire determină deplasarea lentă a punctului de operare curent către cel optimal. Întrucât comanda se sintetizează pe baza valorilor medii ale informației de reacție, stresul mecanic suplimentar indus este neglijabil. De asemenea, această metodă devine mai eficientă odată cu creșterea vitezei vântului, deoarece nivelul turbulenței (semnalul de căutare) crește și el, conducând la un randament mai bun al conversiei SCEE.

O a doua abordare propusă este **conducerea în regim alunecător**, având drept scop menținerea punctului de operare într-o anumită vecinătate a caracteristicii regimurilor optimale (CRO). Traectoria de stare a sistemului este restricționată în acest caz la suprafața de comutație. *Pentru motive legate de efortul comenzii, această suprafață nu se poate suprapune peste CRO, dar poate fi proiectată astfel încât să aibă o intersecție nevidă cu CRO. În acest mod, punctului de funcționare i se asigură o anumită libertate de mișcare în jurul CRO, permițând implicit posibilitatea limitării efortului de comandă.* Comanda echivalentă asigură o pantă ajustabilă a suprafeței de

comutație, astfel încât aceasta să se poată apropia mai mult sau mai puțin de CRO. În această manieră, SCEE poate fi făcut să urmărească regimul optimal de conversie cât de precis se dorește, în acord cu un nivel prescris al compromisului energie-fiabilitate.

Componenta alternantă a comenzii, care adaugă robustețe sistemului în buclă închisă, a fost calculată pe baza unui histerezis sigmoidal pentru a limita și mai mult variațiile nedorite de înaltă frecvență ale cuplului (*chattering*). S-au pus în evidență niște inconveniente ale legii de comandă, care pot fi ușor depășite în practică adoptând anumite ipoteze simplificatoare realiste.

O a treia abordare dezvoltată se bazează pe **principiul separării în frecvență, care implică procesarea separată a celor două componente identificate în spectrul vitezei vântului în cadrul unei structuri de comandă cu două bucle (identificată prin acronimul său englezesc 2LFSP)**. Această structură se vrea a fi o alternativă mai bună la structurile optimale adaptive dezvoltate anterior pe baza de reglatoare LQG.

Pe baza componentei de joasă frecvență a vitezei vântului – obținută prin filtrare trece-jos – se poate realiza optimizarea staționară prin menținerea punctului static de operare pe CRO; stresul mecanic indus este nesemnificativ pentru că nu sunt implicate variații de înaltă frecvență ale cuplului. Acest tip de optimizare este implementat fie printr-un regulator PI sau printr-unul bipozițional, cu misiunea de a menține viteza relativă medie la valoarea ei optimală; astfel, se realizează o structură de urmărire a vitezei de rotație. Bucla de joasă frecvență are un dublu rol: în afară de cel precizat mai sus, ea menține constant cel mai variabil parametru al modelului liniarizat în variații ce descrie dinamica de înaltă frecvență a SCEE, și anume parametrul de cuplu. Componenta de turbulență a vitezei vântului este folosită în bucla de înaltă frecvență (BÎF) bazată pe un regulator LQG. Acesta asigură optimizarea dinamică în jurul punctului static de operare stabilit de BIF. Parametrii BÎF rezultă din rezolvarea problemei de optimizare LQG asociate modelului liniarizat ce descrie dinamica de înaltă frecvență a SCEE, având drept indice de performanță compromisul ajustabil dintre maximizarea energiei captate din vânt și minimizarea încărcărilor mecanice (date de comandă sau/și de variațiile vitezei vântului).

Definirea indicelui pătratic de performanță depinde de tipul transmisiei mecanice, care poate fi fie rigidă, fie flexibilă. În primul caz, scopul este limitarea variațiilor cuplului electromagnetic, în condițiile optimizării regimului de conversie. Problema LQG asociată a fost dezvoltată pe un model liniarizat adecvat al SCEE cu transmisie mecanică rigidă. În al doilea caz, indicele de minimizat exprimă obiectivul de a limita variațiile cumulate ale cuplului generatorului și cuplului eolian – aceste variații constituie cauza oboselii globale experimentate de transmisia mecanică – în aceleași condiții ale optimizării conversiei. Problema LQG astfel formulată a fost asociată modelului liniarizat al SCEE cu transmisie mecanică flexibilă.

Toate cele trei abordări descrise mai sus prezintă potențial pentru a fi utilizate în aplicații reale, după cum arată validările preliminare prin simulare numerică. În ce privește comanda în regim alunecător și structura 2LFSP aplicată SCEE cu transmisie rigidă s-au realizat de asemenea și experimentări în timp real (care sunt consistente cu simulările numerice) pe simulatoare electromecanice de SCEE.

Comanda în regim alunecător și structura 2LFSP conferă flexibilitate operării SCEE, deoarece parametrii care permit dimensionarea compromisului energie-fiabilitate pot fi schimbați de către operatorul uman când condițiile de vânt variază puternic (în caz de turbulență crescută coeficientul de ponderare a acestui compromis va avea o valoare mică). De exemplu, în cazul 2LFSP, aceasta se realizează prin comutarea parametrilor regulatorului LQG – a priori calculați *off-line* – astfel încât variațiile de cuplu să rămână sub anumite limite admisibile furnizate de producătorul turbinei.

Structura 2LFSP este mai sensibilă la incertitudini parametrice sau de modelare decât este comanda în regim

alunecător, dar soluția de comandă furnizată este mai flexibilă. Separarea celor două componente ale vitezei vântului reprezintă un inconvenient din cauza întârzierilor induse de filtrare. Structura de comandă în regim alunecător este robustă la incertitudini, iar inevitabilul fenomen de *chattering* poate fi convenabil redus, în schimb implementarea acestei legi necesită un efort de calcul mai mare.

În ce privește structura de comandă bazată pe MPPT, lipsa ei de flexibilitate este compensată de robustețe și simplitate. Ea reprezintă o alegere rezonabilă de comandă optimală, mai ales atunci când informația disponibilă despre sistem este săracă.

Ca o concluzie generală, soluția de comandă a SCEE de ales la un moment dat pentru implementare într-o aplicație reală nu este în mod necesar cea optimală (în sens absolut), ci ea trebuie să reprezinte cel mai bun compromis între apropierea de optimul-țintă pe de o parte, și simplitate și robustețe, pe de altă parte.

Contribuții

Contribuțiile generale ale autorului (dintre care majoritatea au fost publicate în reviste internaționale și în volumele unor conferințe internaționale) se pot enumera după cum urmează:

- Dezvoltarea unei legi de comandă optimală aparținând metodelor de tip MPPT, dedicată unei clase de SCEE. Această abordare are la bază principiul căutării extreme și folosește o metodă originală de obținere a informației asupra poziției punctului de operare pe curba eficienței aerodinamice, și anume prin utilizarea transformatei Fourier discrete (TFD) pentru calculul defazaajului mediu dintre semnalele de viteză relativă și coeficient de putere.

- Dezvoltarea unei legi de comandă în regim alunecător pentru optimizarea comportamentului dinamic al unei clase de SCEE, exprimată prin posibilitatea de a controla excursia punctului de operare în jurul aceluia care reprezintă conversia optimală. Aspectul cel mai important este aici alegerea adecvată a unei suprafețe de comutație care să aibă o intersecție nevidă cu caracteristica regimurilor optimale (CRO) pentru fiecare viteză a vântului situată în regiunea de sarcină parțială. Poziția acestei suprafețe poate fi ajustată astfel încât ea să se situeze mai aproape sau mai departe de CRO prin intermediul unui coeficient de ponderare a compromisului energie-fiabilitate.

- Propunerea unei structuri de comandă optimală cu două bucle – o buclă de joasă frecvență (BJF) și una de înaltă frecvență (BÎF) – bazată pe principiul separării în frecvență aplicat la modelarea atât a vitezei vântului, cât și a dinamicii SCEE (2LFSP). BJF realizează optimizarea staționară și desensibilizează modelul de înaltă frecvență în raport cu variațiile vitezei vântului. BÎF optimizează dinamica SCEE în jurul punctului de operare (optimal) stabilit prin acțiunea BJF. Optimizarea la acest nivel privește compromisul ajustabil între eficiența energetică și eforturile mecanice la oboseală.

- Aplicarea structurii 2LFSP la SCEE cu transmisie mecanică rigidă. Prin aplicarea principiului separării în frecvență se optimizează comportamentul în înaltă frecvență al SCEE în jurul punctului optimal, în timp ce regimul staționar optimal este și el asigurat. Limitarea încărcărilor mecanice care provoacă oboseala transmisiei mecanice se referă la intrarea de comandă, adică la cuplul electromagnetic aplicat arborelui rapid al sistemului. Pentru formularea și rezolvarea problemei liniar pătratică de optimizare s-a folosit o formă controlabilă a modelului de înaltă frecvență al SCEE cu transmisie rigidă.

- Aplicarea structurii 2LFSP la SCEE cu transmisie mecanică flexibilă. Și în acest caz, prin aplicarea principiului separării în frecvență se optimizează comportamentul în înaltă frecvență al SCEE în jurul punctului optimal, menținând în același timp regimul staționar optimal de conversie. Dar aici încărcările mecanice se exprimă prin stresul total experimentat de către transmisie, datorat atât intrării de comandă (cuplul generatorului) aplicate arborelui rapid, cât și cuplului aerodinamic aplicat arborelui lent al sistemului (mai ales în condiții de turbulență).

Problema LQG de optimizare a fost asociată unui model adecvat de înaltă frecvență al SCEE cu transmisie flexibilă, iar variabilele indisponibile pentru măsurare au fost estimate cu ajutorul unui *observer* de stare.

- Propunerea unei metodologii sistematice de proiectare a simulatoarelor fizice generice bazate pe conceptul *hardware-in-the-loop* (HIL). Această procedură folosește terminologia și elemente introduse în lucrări anterioare, convertite într-o nouă viziune metodologică a construirii sistemelor HIL, aplicabilă oricărui sistem industrial. Etapele acestei proceduri au fost parcurși pentru a ilustra construirea unui simulator fizic de timp real de SCEE de viteză variabilă.

Dezvoltări viitoare

Întrucât, după cum s-a arătat, abordările de comandă a SCEE propuse prezintă și unele inconveniente sau au fost incomplet dezvoltate, se arată mai jos direcțiile în care poate fi continuat demersul întreprins.

În ce privește *abordarea MPPT*, efortul merită orientat către obținerea vitezei de căutare conform unei legi adaptive, care să ia în considerare intensitatea turbulenței, și către testarea experimentală a metodei propuse pe un simulator electromecanic de timp real de SCEE (care eventual să implementeze un model mai complex al aerodinamicii). De asemenea, merită de testat obținerea informației asupra poziției punctului de operare prin convoluția semnalelor de viteză relativă și coeficient de putere. În egală măsură este util un studiu asupra vitezei de convergență a punctului de operare către regimul conversiei optimale a sistemului în buclă închisă în diferite condiții de vânt.

Privitor la *comanda în regim alunecător a SCEE*, este interesantă elaborarea unui studiu al robusteții sistemului în buclă închisă în diferite condiții de operare. Atenția trebuie de asemenea îndreptată înspre găsirea unei expresii cantitative a compromisului care poate fi efectiv obținut, și anume cât de mult se reduce stresul atunci când se renunță într-o măsură bine definită la performanța de urmărire. Proiectarea unei legi de comandă în regim alunecător pentru reglarea nivelului puterii, folosind același cadru teoretic este și ea de interes, deoarece poate fi utilă pentru comanda SCEE în regiunea de sarcină completă.

Referitor la *structura de comandă 2LFSP*, există câteva aspecte de îmbunătățit după cum urmează. Separarea prin filtrare a celor două componente ale vitezei vântului este mai degrabă brută, furnizând o versiune întârziată în mod nerealist a componentei de joasă frecvență și, în consecință o componentă de turbulență ușor deformată. Acest inconvenient poate fi corectat prin utilizarea unei metode de predicție mai curând decât a unui filtru tece-jos în BKF, împreună cu o alegere mai bine fondată a frecvenței de tăiere a filtrului de separare. Estimarea componentei staționare (de joasă frecvență) a vitezei de rotație trebuie îmbunătățită. Trebuie de asemenea studiat mai atent modul de alegere a coeficientului de ponderare care intervine în dimensionarea compromisului energie-fiabilitate. Pentru garantarea unei anumite durate de funcționare fără defecțiuni, valorile acestui coeficient trebuie puse în legătură cu valorile admisibile ale variațiilor de înaltă frecvență ale cuplului, valori furnizate de producătorul transmisiei mecanice (sau de integratorul de SCEE) pentru un sistem dat. Un alt aspect interesant de investigat este exprimarea matematică a optimizării randamentului generatorului electric ca și componentă a sub-criteriului energetic. Aceste observații sunt valabile atât în cazul SCEE cu transmisie mecanică rigidă, cât și în cazul celor cu transmisie mecanică flexibilă.

În cazul aplicării *structurii 2LFSP la SCEE cu transmisie mecanică flexibilă*, se investighează natura deviațiilor destul de importante ale punctului de operare de la caracteristica regimurilor optimale în condiții de vânt puternic, care se poate datora unor erori semnificative de predicție, pierderii robusteții regulatorului PI sau poate fi o disfuncție combinată a celor două bucle. Dacă variațiile parametrice ale modelului de înaltă frecvență al SCEE se

dovedesc a fi cauza efectului menționat, atunci aceasta se poate rezolva printr-o abordare de tip *gain scheduling*. Structura 2LFSP trebuie și în acest caz, al transmisiei flexibile, validată în timp real pe simulatoare, eventual implementând modele aerodinamice mai complexe.

În fine, dar nu în cele din urmă, trebuie avută în vedere testarea tuturor abordărilor propuse pe SCEE funcționând în condiții reale.

Bibliografie selectivă

- [ARIY 03] Ariyur, K.B. and Krstič, M. (2003). *Real-Time Optimisation by Extremum Seeking Control*. Wiley-Interscience.
- [ASTR 95] Åström, K.J. and Wittenmark, B. (1995). *Adaptive Control – 2nd edition*. Addison-Wesley Publ Co.
- [BATT 96] Battaioto, P.E., Mantz, R.J., & Puleston, P.F. (1996). A wind turbine emulator based on a dual DSP processor system. *Control Engineering Practice* 4(9), 1261-1266.
- [BATT 00] De Battista, H., Puleston, P.F., Mantz, R.J. and Christiansen, C.F. (2000, May). Sliding Mode Control of Wind Systems with DOIG – Power Efficiency and Torsional Dynamics Optimization. *IEEE Transactions on Power Systems* 15(2), 728-734.
- [BATT 04] De Battista, H. and Mantz, R.J. (2004, December). Dynamical variable structure controller for power regulation of wind energy conversion systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 19(4), 756-763.
- [BHOW 98] Bhowmik, S. and Spée, R. (1998). Wind Speed Estimation Based Variable Speed Wind Power Generation. *Proceedings of the Annual IEEE Conference of the Industrial Electronics Society – IECON'98*, Aachen, Germany, 596-601.
- [BOSS 00] Bossanyi, E.A. (2000). The Design of Closed Loop Controllers for Wind Turbines. *Wind Energy* 3 (John Wiley & Sons), 149–163.
- [BURT 01] Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N. and Bossanyi, E. (2001). *Wind Energy Handbook*. John Wiley & Sons, New-York.
- [CARL 01] Carlin, P.W., Laxson, S., Muljadi, E.B. (2001). *The History and State of the Art of Variable-Speed Wind Turbine Technology*. Technical Report NREL/TP-500-28607, National Renewable Energy Laboratory, U.S.A.
- [CONN 93] Connor, B. and Leithead, W.E. (1993). Investigation of Fundamental Trade-off in Tracking the Cpmax Curve of a Variable Speed Wind Turbine. *Proceedings of the 12th British Wind Energy Conference*, 313-319.
- [CUTU 05] Cutululis, N.A. (2005). *Contributions to control laws synthesis of renewable power systems with hybrid structures* (in Romanian). Ph.D. Thesis, “Dunărea de Jos” University of Galați, 2005.
- [DAMP 95] Damper, R.I. (1995). *Introduction to Discrete – Time Signals and Systems*. Chapman and Hall.
- [DATT 03] Datta, R. and Ranganathan, V.T. (2003). A Method of Tracking the Peak Power Points for a Variable

- Speed Wind Energy Conversion System. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 18(1), 163–168.
- [DIOP 99] Diop, A.D. (1999). *Contribution au développement d'un simulateur électromécanique d'aérogénérateur: simulation et commande en temps réel d'une turbine éolienne de puissance moyenne à angle de calage variable*. Ph.D. Thesis, Université du Havre, France.
- [EKEL 97] Ekelund, T. (1997). *Modeling and Linear Quadratic Optimal Control of Wind Turbines*. Ph.D. Thesis, Chalmers University of Göteborg, Sweden.
- [HAUT 97] Hautier, J.P. et Caron, J.P. (1997). *Systèmes automatiques, tome 2, Commande des processus*. Ellipses, Paris.
- [KRST 00] Krstić, M. and Wang, H.-H. (2000). Stability of Extremum Seeking Feedback for General Nonlinear Dynamic Systems. *Automatica* 36, 595-601.
- [LARW 98] Larwood, S. M. (1998, July). *Dynamic Characterization of the AWT-26 Turbine for Variable Speed Operation*. Research Report, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Colorado, U.S.A.
- [LEIT 91] Leithead, W.E., De la Salle, S. and Reardon, D. (1991, March). Role and objectives of control for wind turbines. *IEE Proceedings-C* 138(2), 135-148.
- [LEON 86] Leonhard, W. (1986). *Control of Electrical Drives*. Springer-Verlag.
- [LEVI 96] Levine, W.S. (1996). *The Control Handbook*. CRC Press, 941-951.
- [MILL 97] Miller, A., Muljadi, E. and Zinger, D.S. (1997). A Variable Speed Wind Turbine Power Control. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 12(2), 451-457.
- [MILL 03] Miller, N.W., Price, W.W., Sanchez-Gasca, J.J. (2003). *Dynamic Modeling of GE 1.5 and 3.6 Wind Turbine-Generators*. Technical Report, Power Systems Energy Consulting, General Electric International, Shenectady (NY), U.S.A.
- [MUNT 05a] Munteanu, I., Cutululis, N.A., Bratcu, A.I. and Ceangă, E. (2005). Optimization of variable speed wind power systems based on a LQG approach. *Control Engineering Practice* 13(7), 903-912.
- [MUNT 05b] Munteanu, I., Bratcu, A., Cutululis, N.A. and Ceangă, E. (2005). A two loop optimal control of flexible drive train variable speed wind power systems. *Preprints of the 16th IFAC World Congress* (CD-ROM), July 4-8 2005, Prague, Czech Republic, 6 pages.
- [NICH 95] Nichita, C. (1995). *Study and development of structures and numerical control laws for building up of a 3 kW wind turbine simulator (Étude et développement de structures et lois de commande numériques pour la réalisation d'un simulateur de turbine éolienne de 3 kW)*. Ph.D. Thesis, Université du Havre, France.
- [NICH 02] Nichita, C., Luca, D., Dakyo, B. and Ceangă, E. (2002). Large Band Simulation of the Wind Speed for Real Time Wind Turbine Simulators. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 17(4), 523-529.
- [NISE 00] Nise, N. (2000). *Control Systems Engineering*. WileyText Books.
- [NOVA 94] Novak, P. and Ekelund, T. (1994). Modeling, Identification and Control of a Variable Speed HAWT. *Proceedings of the European Wind Energy Conference*, Thessaloniki, Greece, 441-446.
- [OPEN 97] Oppenheim, A.V., Willsky, A.S. and Nawab S.H. (1996). *Signals and Systems* (2nd Edition). Prentice Hall.
- [QUAR 98] Quarton, D.C. (1998). The Evolution of Wind Turbine Design Analysis – A Twenty Year Progress Review. *Wind Energy* 1, 5-24.
- [RABE 02] Rabelo, B. and Hofmann, W. (2002). DSP-based Experimental Rig with the Doubly-Fed Induction Generator for Wind-turbines. *Proceedings of the 10th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2002* (CD ROM), September 9-11 2002, Cavtat & Dubrovnik, Croatia.
- [RODR 98] Rodriguez-Amenedo, J.L., Rodriguez-Garcia, F., Burgos, J.C., Chincilla, M., Arnalte, S. and

- Veganzones, C. (1998). Experimental rig to emulate wind turbines. *Proceedings of the ICEM Conference, vol. 3/3*. Istanbul, Turkey, 2033-2038.
- [SALL 90] De la Salle, S.A., Reardon, D., Leithead, W.E. and Grimble, M.J. (1990). Review of Wind Turbine Control. *International Journal of Control* 52(6), 1295-1310.
- [SCHI 00] Schiemenz, I. and Stiebler, M. (2000). Maximum Power Point Tracker of a Wind Energy System With a Permanent – Magnet Synchronous Generator. *Proceedings of ICEM 2000*, August 28-30 2000, Espoo, Finland, 1083-1086.
- [SIMO 97] Simoes, M.G., Bose, B.K. and Spiegel, R.J. (1997). Fuzzy Logic Based Intelligent Control of a Variable Speed Cage Machine Wind Generation System. *IEEE Transactions on Power Electronics* 12(1), 87-95.
- [STEU 04] Steurer, M., Li, H., Woodruff, S., Shi, K. and Zhang, D. (2004). Development of a Unified Design, Test, and Research Platform for Wind Energy Systems based on Hardware-In-the-Loop Real Time Simulation. *The 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Aachen, Germany, 3604-3608.
- [SUTH 95] Sutherland, H.J. and Burke, D. (1995). The spectral content of the torque loads on a turbine gear tooth. *Wind Energy*, 16, ASME, 91-97.
- [THRE 98] Thresher, R.W. and Dodge, D.M. (1998). Trends in the Evolution of Wind Turbine Generator Configurations and Systems. *Wind Energy* 1, 70-85.
- [UTKI 71] Utkin, V.A. (1971). Equations of sliding mode in discontinuous systems. *Automation and Remote Control* 1(12), 1897-1907.
- [VOIC 86] Voicu, M. (1986). *Analysis techniques of control systems' stability* (in Romanian). Technical Publishing House, Bucharest, Romania.
- [WELF 97] Welfonder, E., Neifer, R. and Spanner, M. (1997). Development and Experimental Identification of Dynamic Models for Wind Turbines. *Control Engineering Practice* 5(1), 63-73.
- [WILK 90] Wilkie, J., Leithead, W.E. and Anderson, C. (1990). Modeling of Wind Turbines by Simple Models. *Wind Engineering* 4, 247-274.
- [YOUN 99] Young, K.D., Utkin, V.I. and Ozguner, U. (1999). A control engineer's guide to sliding mode control. *IEEE Transactions on Control System Technology* 7(3), 328-342.
- [ZIEG 42] Ziegler, J.G. and Nichols, N.B. (1942). Optimum Settings for Automatic Controllers. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers* 64, 759-768.

Lista de publicații a autorului

ARTICOLE

• articole în reviste internaționale indexate ISI

I. Munteanu, N.A. Cutululis, A.I. Bratcu and E. Ceangă (2005). Optimization of variable speed wind power systems based on a LQG approach. *Control Engineering Practice*, 13(7), Elsevier, pp. 903-912.

• articole în reviste neindexate în baze de date

1) A.I. Bratcu, D. Dulman, **I. Munteanu**, C. Chiculiță, M. Măzărel, L. Beldiman – Strategii optime de conducere a sistemelor dinamice hibride – aplicație la sistemele de roboți cooperative, Raport de grant CNCSIS, tip AT, cod 80, *Revista de Politica Științei și Scientometrie*, număr special 2005, ISSN 1582-1218.

2) N.A. Cutululis, **I. Munteanu**, E. Ceangă, M. Culea – Optimal Control Structure for Variable Speed Wind Power System, *The Annals of “Dunărea de Jos” University of Galați, Fascicle III – “Electrotechnics, Electronics, Automatic Control, Informatics”*, 2002, pp. 90-96, ISSN 1221-454X.

3) **I. Munteanu**, D. Roye – Opération a vitesse variable d’un système éolien muni d’une machine asynchrone classique, *Bulletin Informatif No. 3 sur le Projet Tempus M-PEC-12018/97 – Perspectives de l’Utilisation Rationnelle de l’Énergie (PURE)*, Universitatea Politehnica București, 2001, pp. 164-171, ISSN 1221-454X.

4) C. Nichita, E. Ceangă, I. Bivol, **I. Munteanu** – Hardware In the Loop Simulation in the Renewable Energy Conversion, *The Annals of “Dunărea de Jos” University of Galați, Fascicle III – “Electrotechnics, Electronics, Automatic Control, Informatics”*, 1998, pp. 83-87, ISSN 1221-454X.

• articole în volumele conferințelor internaționale organizate de forurile științifice internaționale recunoscute în domeniu

- manifestări IFAC

1) A.I. Bratcu, D.C. Cernega, **I. Munteanu** – Supervisory control of grid connected wind power systems to guarantee safe operation, *Proceedings of the 3rd IFAC Workshop on Discrete-Event System Design – DESDes '06*, September 26-28 2006, Rydzyna, Poland, pp. 117-122, ISBN 83-7481-035-1.

2) **I. Munteanu**, A.I. Bratcu, N.A. Cutululis and E. Ceangă – A Two Loop Optimal Control of Flexible Drive Train Variable Speed Wind Power Systems, *Proceedings of the 16th IFAC World Congress 2005* (CD-ROM), July 4-8 2005, Prague, ISBN: 0-08-045108-X.

3) A.I. Bratcu, D. Dulman, **I. Munteanu** and A. Dolgui – Optimal motion planning of cooperative mobile robots in 2D environments, *Preprints of the 3rd IFAC Conference on Management and Control of Production and Logistics – MCPL 2004*, November 3-5 2004, Santiago, CHILE, pp. 223-228.

4) **I. Munteanu**, A.I. Bratcu and L. Frangu – Nonlinear control for stationary optimization of wind power systems, *Preprints of the IFAC Workshop DECOM 2004*, Bansko, Bulgaria, October 3-5 2004, pp. 195-200.

5) **I. Munteanu**, E. Ceangă, N.A. Cutululis, A. Bratcu – Linear Quadratic Optimization of Variable Speed Wind Power Systems, *Preprints of the IFAC Workshop on Control Application of Optimization – CAO '03*, June 30 – July 2 2003, Visegrád, Hungary, pp. 162-167.

- manifestări IEEE

6) **I. Munteanu**, J. Guiraud, D. Roye, S. Bacha, A.I. Bratcu – Sliding Mode Energy-Reliability Optimization of a Variable Speed Wind Power System, *Proceedings of the 9th IEEE Workshop on Variable Structure Systems – VSS'06*, June 5-7 2006, Alghero Italy, pp. 92-97, ISBN 1-4244-0208-5.

- alte manifestări sub egida forurilor științifice internaționale recunoscute

7) A.I. Bratcu, **I. Munteanu**, D.C. Cernega – Modélisation à évènements discrets d'un système éolien à vitesse variable en vue de la commande supervisée, *Actes de la 6ième Conférence Francophone de Modélisation et Simulation – MOSIM'06*, Lavoisier (Eds.: M. Gourgand, F. Riane), 3-5 avril, Rabat, Maroc, CD-ROM, ISBN 2-7430-0893-8.

8) **I. Munteanu**, J. Guiraud, S. Bacha, D. Roye, A.I. Bratcu – Méthodologie de simulation temps reel hardware-in-the-loop – application aux systèmes éoliens, *Actes de la 6ième Conférence Francophone de Modélisation et Simulation – MOSIM'06*, Lavoisier (Eds.: M. Gourgand, F. Riane), 3-5 avril, Rabat, Maroc, CD-ROM, ISBN 2-7430-0893-8.

9) **I. Munteanu**, N. Laverdure, S. Bacha, D. Roye – Sliding Mode Control Laws for Variable Speed Wind Power Systems, *Proceedings of the 10th European Conference on Power Electronics and Applications – EPE 2003*, September 2-4 2003, Toulouse, France (CD-ROM), ISBN 90-75815-07-7.

• **articole în volumele altor conferințe internaționale**

1) A.I. Bratcu, **I. Munteanu** and D. Dulman – Maximum power point tracking for wind power systems: a minimal knowledge approach, *Proceedings of the 15th International Conference on Control Systems and Computer Science – CSCS15* (CD-ROM), May 25-27 2005, Bucharest, Romania, ISBN 973-8449-89-8.

2) A.I. Bratcu, D. Dulman and **I. Munteanu** – A two level optimal control structure for cooperative robot systems, *Proceedings of the 14th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region – RAAD'05*, May 26-28 2005, Bucharest, Romania, pp. 268-273, ISBN 973-718-241-3.

3) **I. Munteanu**, N.A. Cutululis, A. Bratcu and E. Ceangă – Using a nonlinear controller to optimize a variable speed wind power system, *Proceedings of the 9th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipments (IEEE sponsored) – OPTIM 2004* (vol. II), Braşov, Romania, May 20-23 2004, pp. 303-311, ISBN 973-635-287-0.

• **articole în volumele conferințelor naționale**

1) S. Epure, **I. Munteanu**, A.I. Bratcu – An Experimental Platform for Low Power DC Drives – Application to Sliding Mode Motion Control, *Proceedings of the 1st International Symposium on Electrical and Electronics Engineering – ISEEE 2006*, October 13-14 2006, Galați, Romania, pp. 193-198, ISBN 978-973-627-325-4.

2) **I. Munteanu**, A.I. Bratcu and E. Ceangă – A Two Loops Control Structure for Wind Power Systems, *The 8th International Symposium on Automatic Control and Computer Science – SACCS 2004* (CD-ROM), October 22-23 2004, Iași, Romania, ISBN 973-621-086-3.

3) N.A. Cutululis, M. Ciobotaru, **I. Munteanu**, E. Ceangă – Sistem experimental de dezvoltare pentru sisteme eoliene, *Conferința națională de surse noi și regenerabile de energie CNSNRE '03*, 11-14 septembrie 2003, Târgoviște, România.

4) **I. Munteanu**, N.A. Cutululis, A. Bratcu, E. Ceangă – Algoritmi și structuri de comandă optimală a sistemelor de conversie a energiei eoliene, *Conferința națională de surse noi și regenerabile de energie CNSNRE '03*, 11-14 septembrie 2003, Târgoviște, România.

5) N.A. Cutululis, **I. Munteanu**, E. Ceangă, M. Culea – Optimal Control Structure for Variable Speed Wind Power System, *Proceedings of the 11th National Conference on Electric Drives – CNAE '02*, Galați, October 10-12 2002, pp. 121-128.

CĂRȚI

E. Ceangă, **I. Munteanu**, A. Bratcu și M. Culea – *Semnale, circuite și sisteme. Partea I: Analiza semnalelor*, Editura Academica, Galați, 2001, ISBN 973-8316-16-2, 201 pagini.

RAPOARTE DE CERCETARE

• rapoarte de stagiu în străinătate

- 1) **I. Munteanu** – *Commande optimale non lineaire des aérogénérateurs à base de machine asynchrone*, Rapport de stage, Laboratoire d'Électrotechnique de Grenoble, I.N.P.G., France, 2005.
- 2) **I. Munteanu** – *Étude des méthodes de commande optimale pour un système éolien. Application à un générateur éolien ayant une hélice à pas fixe et génératrice asynchrone*, Rapport de stage, Laboratoire d'Électrotechnique de Grenoble, I.N.P.G., France, 2002.
- 3) **I. Munteanu** – *Étude de cas : Opération à vitesse variable d'un système éolien muni d'une machine asynchrone classique*, Rapport de stage, Laboratoire d'Électrotechnique de Grenoble, I.N.P.G., France, 2000.
- 4) **I. Munteanu** – *Étude et simulation des aérogénérateurs. Application à un aérogénérateur à courant continu*, Rapport de Diplôme d'Études Approfondies, Université du Havre, France, 1997.

• referate de doctorat

- 1) **I. Munteanu** – *Contribuții privind conducerea automată a sistemelor de conversie a energiilor neconvenționale*, Referat de doctorat nr. III, Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați, România, 2004.
- 2) **I. Munteanu** – *Modelarea și simularea sistemelor de conversie a energiilor neconvenționale*, Referat de doctorat nr. II, Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați, România, 2004.
- 3) **I. Munteanu** – *Stadiul actual al sistemelor de conducere în conversia energiilor neconvenționale*, Referat de doctorat nr. I, Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați, România, 2003.

Contribuții privind conducerea optimală a sistemelor de conversie a energiei eoliene

REZUMAT

Fiind consistentă cu efortul susținut de a impune sursele de energie regenerabilă în peisajul energetic al viitorului, această teză se focalizează pe abordarea sistemelor de conversie a energiei eoliene (SCEE) din perspectiva unei **optimizări dinamice globale**. Ideea centrală este coerentă cu scopul final de a asigura cele mai bune condiții de exploatare în termeni de **eficiență energetică, fiabilitate, cost redus și respectare a cerințelor integrării în rețea**. Aceasta implică utilizarea pe scară largă a metodelor avansate de automată, dintre care cele mai promițătoare au constituit punctele de plecare ale contribuțiilor originale raportate aici.

Conținutul tezei se împarte în opt capitole după cum urmează.

În primul capitol se prezintă o vedere generală asupra procesului de conversie eoliană și a evoluției SCEE în contextul politico-economic actual al pieței energiei; sunt de asemenea detaliate câteva concepte de bază privind structura și principiile operării turbinelor eoliene, precum și obiectivele generale ale conducerii lor automate. Se formulează obiectivul demersului și se fixează tipul de sistem care va fi studiat: *SCEE de viteză variabilă, cu unghi de calare fix, bazat pe generator asincron*.

Al doilea capitol prezintă stadiul actual în modelarea și conducerea optimală a tipului fixat de SCEE în regiunea de sarcină parțială și specifică mai precis din

punct de vedere tehnic scopul tezei. În al treilea capitol sunt descrise câteva elemente metodologice și practice utile construirii pe baza conceptului de simulare *hardware-in-the-loop* a unui stand experimental dedicat SCEE de viteză variabilă. Al patrulea și al cincilea capitol prezintă abordări de conducere neliniară robustă, vizând captarea maximumului de energie disponibilă în vânt atunci când informația despre sistem este săracă, și anume urmărirea maximumului de putere (*Maximum Power Point Tracking* – MPPT) și conducerea în regim alunecător.

Capitolul al șaselea este dedicat introducerii unei noi structuri de conducere optimală a SCEE, derivată din principiul separării în frecvență și constând în două bucle pentru procesarea separată a celor două componente ale vitezei vântului, ca o alternativă mai eficientă la abordările de optimizare liniar pătratică (LQ) anterioare; în acest caz, informația disponibilă este mai bogată. Aplicarea acestei structuri la SCEE de viteză variabilă cu transmisie mecanică rigidă și flexibilă este prezentată în al șaptelea și respectiv al optulea capitol.

Ultimul capitol, al nouălea, conchide lucrarea prin enumerarea concluziilor, contribuțiilor și a direcțiilor de dezvoltare ulterioară.

Cele opt anexe, de la A la H, conțin detalii tehnice referitoare la abordările dezvoltate în fiecare din primele opt capitole ale lucrării.

CUVINTE CHEIE: sisteme de conversie a energiei eoliene, conducere optimală, indici integrali de performanță, conducere în regim alunecător, *Maximum Power Point Tracking*, *hardware-in-the-loop*

ABSTRACT

Consistent with the sustained effort of imposing the renewable energy sources in the future's energy landscape, this doctoral dissertation focuses on approaching the wind energy conversion systems (WECS) from a **global dynamic optimization** point of view. Its central idea is coherent with the final scope of ensuring the most suitable service operation in terms of **energetic efficiency, reliability, cost-effectiveness and grid integration compliance**. This involves an extensive use of advanced control methods, the most promising of which have constituted the starting point of the original contributions reported here.

The content of the doctoral dissertation is divided in eight chapters as follows.

In the first chapter a general view on the wind energy conversion and on WECS evolution in the current political and economical context of the market energy is presented; some of the very basic concepts about the wind turbines structures and operating principles and some general objectives concerning their control have also been outlined. The scope of the work is stated and the approached type of systems is fixed: *variable speed fixed pitch horizontal axis asynchronous generator based WECS*.

The second chapter presents the state of the art in

modelling and optimal control of the studied type of WECS in the partial load region and specifies more accurately and more technically the scope of the thesis. Some methodological and practical elements used for a variable speed WECS test rig construction, using hardware-in-the-loop simulation technique, are described in the third chapter. The fourth and fifth chapters present nonlinear robust control approaches used for harvesting the maximum power available in the wind when disposing of poor information about the system, namely the maximum power point tracking and the sliding mode control.

A novel optimal control structure derived from the frequency separation principle and consisting in two loops for separately processing the wind speed components is introduced in the sixth chapter; it needs rich information about the system and constitutes a better alternative to previously developed LQ control. Its applications for variable speed WECS having rigid and flexible drive train are presented in the seventh and the eighth chapter respectively.

The final chapter, the ninth, concludes the work by listing conclusions, contributions and future developments.

The eight accompanying appendices, from A to H, contain technical details about the approaches developed in each of the first eight chapters.

KEYWORDS: wind energy conversion systems, optimal control, integral performance indices, sliding mode control, Maximum Power Point Tracking, hardware-in-the-loop