

**UNIVERSITATEA POLITEHNICA TIMIȘOARA
FACULTATEA DE AUTOMATICĂ ȘI CALCULATOARE**

Ing. RADU BORACI

**CONTRIBUȚII LA DEZVOLTAREA UNOR
STRUCTURI DE SISTEME PENTRU CONVERSIA
ENERGIEI EOLIENE ÎN ENERGIE ELECTRICĂ**

- Rezumatul tezei de doctorat -

**Conducător științific:
Prof.dr.ing. OCTAVIAN PROȘTEAN**

**TIMIȘOARA
2015**

Cuvânt înainte

Prezenta lucrare este rezultatul activității de cercetare întreprinse în calitate de cadru didactic și în același timp doctorand la Facultatea de Automatică și Calculatoare din Timișoara, Departamentul de Automatică și Informatică Aplicată.

În cadrul acestei teze au fost studiate sisteme de conversie a energiei eoliene, modelarea și conducerea acestora, cu focalizare pe conducerea generatoarelor electrice cu care acestea sunt echipate.

Doresc să îmi exprim profunda recunoștință față de toți cei care, prin sprijinul moral și în special științific acordat de-a lungul ultimilor ani m-au ajutat efectiv la finalizarea acestei lucrări. Cu toate că numele tuturor nu este amintit explicit, le adresez calde mulțumiri.

Pentru realizarea acestei lucrări doresc să aduc alese și distinse mulțumiri conducătorului științific, Domnului Prof.univ.dr.ing. Octavian Proștean, pentru sprijinul și îndrumarea deosebită acordată pe întreagă perioadă a elaborării tezei.

De asemenea, doresc să îmi exprim întreaga considerație față de Domnul Prof.univ.emerit dr.ing. Nicolae Budișan, al cărui exemplu de dăruire profesională și didactică, a constituit un adevărat model profesional pentru mine. Îi aduc mulțumiri sincere pentru observațiile critice și pentru timpul acordat analizei lucrării.

Nu în ultimul rând, doresc să le aduc mulțumiri colectivului B027, în special domnilor Prof.univ.dr.ing. Ioan Filip, Conf.univ.dr.ing. Iosif Szeidert-Șubert și Șl.univ.dr.ing. Cristian Vașar, respectiv, colegiilor mei de la Departamentul de Automatică și Informatică Aplicată, dar și celor de la Facultatea de Electrotehnică - domnilor Prof.univ.dr.ing. Nicolae Muntean, Prof.univ.dr.ing. Marius Babescu, și nu numai.

Trebuie să aduc, adâncă mea recunoștință și mulțumire soției și familiei, pentru sprijinul și înțelegerea necondiționată acordată pe durata elaborării acestei lucrări.

Această teză a fost parțial suportată prin programul "Parteneriate în domenii prioritare – PN II, derulat cu sprijinul ANCS, CNDI – UEFISCDI, proiect nr. PN-II-PT-PCCA-2011-3.2-1519".

Timișoara, iulie 2015

Cu deosebită considerație,
Radu Boraci

CUPRINS

Cuprins	5
Notații, abrevieri, acronime	8
Lista de tabele	11
Lista de figuri	13
1. Introducere	21
1.1. Oportunitatea și obiectivele lucrării	21
1.2. Prezentarea conținutului lucrării	21
2. Energia eoliană - istorie, starea actuală, perspective, actualitatea tezei	24
2.1. Istorie și actualitate	24
2.1.1. Evoluția în timp a cercetărilor IPT / UPT în domeniul agregatelor aeroelectrice	25
2.2. Reglementările UE	27
2.3. Agregate aeroelectrice din România	28
2.4. Analiza critică comparativă a tipurilor de structuri	35
2.4.1. WECS cu viteză de rotație constantă	37
2.4.2. WECS cu viteză de rotație variabilă	38
2.4.2.1. WECS cu un generator de inducție cu rotor bobinat (WRIG) cu rezistență rotorică externă	38
2.4.2.2. WECS cu generator de inducție cu dublă alimentare DFIG cu convertor cu capacitate limitată de putere în circuitul rotoric	38
2.4.2.3. WECS cu generator de inducție cu rotor în scurtcircuit în colivie SCIG cu convertor de putere de capacitate totală	39
2.4.2.4. WECS cu generatoare sincrone WRSG și PMSG cu viteză de rotație variabilă	40
2.4.2.5. Configurații WECS cu generatoare sincrone SG cu multiple înfășurări cu convertoare distribuite	42
2.4.2.6. Configurație WECS cu generator PMSG multiplu	43
2.4.2.7. Filtrele armonice	44
2.5. Concluzii	49
3. Vântul și turbine eoliene. Caracteristici	50
3.1. Necesitatea unor sisteme eoliene de mică putere	50
3.1.1. Caracteristici funcționale ale turbinei eoliene din WECS	52
3.2. Vântul. Caracteristici. Modelare	58
3.2.1. Caracteristici ale profilelor vitezei vântului	59
3.2.2. Blocul de generare a vitezei vântului în Matlab - Simulink	70
3.3. Turbina eoliană WT1-UPT. Caracteristici. Modelare	71
3.3.1. Turbina eoliană WT1-UPT cu palete fixe. Conversia energiei eoliene	69
3.3.2. Estimarea prin regresie a mărimilor specifice turbinei eoliene	81
3.4. Turbina eoliană WT2-UPT. Caracteristici. Modelare	89
3.4.1. Turbina eoliană WT2-UPT cu protecție la supraturaj	89
3.4.2. Estimarea prin regresie a mărimilor caracteristice pentru WT2-UPT.....	91
3.4.3. Sistemul de protecție la supraturaj	94
3.5. Concluzii	104
4. Sisteme WECS bazate pe generatorul DSWIG	105
4.1. Modelarea generatorului de inducție cu două înfășurări statorice (DSWIG)	105
4.1.1. Modelul matematic al DSWIG cu două înfășurări statorice trifazate ortogonale	105
4.1.2. Rezultate în regimul staționar al generatorului de inducție cu două înfășurări statorice trifazate ortogonale (DSWIG)	110
4.2. Regimurile dinamice ale generatorului de inducție cu două înfășurări statorice trifazate ortogonale (DSWIG)	113
4.2.1. Rezultatele simulării. Regimul dinamic al DSWIG - pentru Cazul 1, respectiv Cazul 2	116
4.3. Rezultate experimentale, probleme și soluții privind DSWIG pentru sisteme de conversie a energiei regenerabile	119
4.3.1. Caracteristica de regim staționar al DSWIG cu autoexcitație	120
4.3.2. Problema armonicilor DSWIG în sistemul WECS	122
4.3.3. Rejecția armonicilor curentului și a tensiunii înfășurărilor generatorului datorate conectării directe la redresor	124
4.3.4. Măsurători ale armonicilor de frecvență pentru configurațiile și regimurile considerate ...	127
4.4. Algoritm de proiectare, a unui DSWIG dintr-un motor de inducție convențional	129
4.4.1. Proiectarea înfășurărilor statorice ale DSWIG obținabil din motoare de inducție convenționale	131
4.4.2. Aplicarea metodei propuse de proiectare pentru sisteme WECS de putere mică	135
4.5. Strategii pentru WECS cu DSWIG	136
4.5.1. Stare actuală	136

4.5.2. Strategie de conducere cu orientare după fluxul din înfășurarea de excitație W2	140
4.6. Concluzii	152
5. Sisteme WECS bazate pe generatorul PMSG	155
5.1. Modelarea generatorului sincron cu magneti permanenți (PMSG)	155
5.1.1. Preliminarii. Principiul de funcționare al PMSG	155
5.1.2. Modelarea PMSG în sistemul de referință staționar abc	156
5.1.3. Modelarea PMSG în sistemul de referință rotativ sincron d-q	157
5.1.4. Calculul randamentului generatorului PMSG.....	162
5.1.5. Caracteristicile PMSG	164
5.1.6. Metodă de determinare a $P_G=F(I_G, n_G)$, $M_G=F(I_G, n_G)$, $U_G=F(I_G, n_G)$	168
5.1.7. Caracteristici estimate pentru WT1 și PMSG - rezultate prin simulare în Matlab	170
5.2. Variante de conducere pentru PMSG, fără MPPT	172
5.2.1. Strategii bazate pe măsurarea mărimilor în circuitul intermediar de c.c.	175
5.2.1.1. Controlul HDC pentru extracția de putere maximă	175
5.2.1.2. Strategie de control bazată pe estimarea vitezei vântului	180
5.2.1.3. Strategia de control al turației pentru WECS	181
5.2.2. Strategii de conducere în regim de frânare	189
5.2.2.1. Frânare în cazul WT1-UPT cu palete fixe	190
5.2.2.2. Frânare în cazul WT2-UPT cu sistem SPAST	198
5.3. Metode de conducere cu MPPT a WECS	217
5.3.1. Metode de urmărire a maximului de putere (MPPT)	218
5.3.2. Implementarea metodelor de tip MPPT la sisteme WECS	225
5.4. Concluzii	230
6. Aspecte Hardware de realizare a sistemului de conversie	232
6.1. Convertor c.c.-c.c. hibrid (HDC)	232
6.1.1. Funcționarea HDC	233
6.1.1.1. Regimul de curent continuu (CCM)	234
6.1.1.2. Regimul de curent întrerupt (DCM)	237
6.1.1.3. Dimensionarea HDC	239
6.1.2. Simularea funcționării HDC în MATLAB și PSIM	239
6.1.3. Concluzii privind convertorul HDC	246
6.2. Sistemul de achiziție	247
6.2.1. Structura Sistemul de achiziție	248
6.2.2. Modulele de achiziție analogice (MA) ale SAPS	251
6.2.3. Module pentru sistemul de comenzi logice ale SAPS	253
6.2.4. Concluzii privind Sistemul de achiziție	255
6.3. Emulator de laborator pentru turbina eoliană. Modelare și realizare experimentală	255
6.3.1. Emulatorul de turbină eoliană. Rezultate experimentale pentru WT1-UPT și WT2-UPT	255
6.3.2. Concluzii privind emulator de laborator	262
6.4. Concluzii	263
7. Concluzii finale și contribuții. Perspective de dezvoltare	264
7.1. Concluzii finale	264
7.2. Contribuții personale	264
7.3. Perspective de dezvoltare	266
Anexa A	267
Anexa B	268
Bibliografie	270

Notatii, abrevieri, acronime

A	- aria expusă a turbinei
AAE	- agregat aeroelectric
abc	- axele sistemului de referință staționar sincron cu statorul
BVI	- inverter sursă de tensiune ridicător (boost voltage inverter)
c.a., a.c.	- curent alternativ (alternative current)
c.c.,d.c.	- curent continuu (direct current)
$C_M, C_{M arb}$	- coeficient de cuplu
$C_P, C_{P arb}$	- coeficient de putere
$C_{Pmax Betz}$	- coeficient de putere maxim "limita lui Betz"
C_{Pmaxr}	- coeficient de putere maxim
CSC	- convertor sursă de curent (current source converter)
CSCF	- viteză de rotație și frecvență constante (constant speed, constant frequency)
CSI	- inverter sursă de curent (current source inverter)
CSR	- redresor sursă de curent (current source rectifier)

DFIG	- generator de inducție cu dublă alimentare (doubly-fed induction generator)
dq	- axele sistemului de referință rotativ sincron cu rotorul
DSWIG	- generator de inducție cu două înfășurări statorice (dual stator windings induction generator)
EWEA	- Asociația Europeană pentru Energia Vântului (European Wind Energy Association)
f_1	- frecvența statorică
GI, IG	- generator de inducție (asincron) (induction generator)
GS, SG	- generator sincron (synchronous generator)
HDC	- convertor c.c.-c.c. hibrid (hybrid dc-dc convertor)
i_{1r}, i_{2r}, i_{3r}	- curenții înfășurărilor statorice W1, W2 și din rotor W3
i_{d1r}, i_{q1r}	- componentele curentului înfășurării W1 în sistemul de axe dq
i_{d2r}, i_{q2r}	- componentele curentului înfășurării W2 în sistemul de axe dq
i_{d3r}, i_{q3r}	- componentele curentului rotorului W3 în sistemul de axe dq
MEPT	- urmărirea punctului de randament maxim (maximum efficiency point tracking)
MM	- model matematic
MPPT	- urmărirea maximumului de putere extrasă (maximum power point tracking)
$M_{WT arb max}, M_{arb max}$	- cuplul turbinei eoliene la arbore maxim
$M_{WT arb}, M_{arb}$	- cuplul turbinei eoliene la arbore
n	- turația turbinei
n_{EXTREM}	- turația turbinei extremă
n_{max}	- turația turbinei maximă de lucru
n_N	- turația turbinei nominală
$n_{P max}$	- turația turbinei corespunzătoare puterii maxime u
n_{START}	- turația turbinei de intrare în funcțiune a WECS
PC	- proces condus
PMSG	- generatorul sincron cu magneți permanenți (permanent magnet synchronous generator)
P_W	- puterea cinetică a vântului
PWM	- modularea impulsului în durată (pulse width modulation)
$P_{WT arb}, P_{arb}$	- puterea turbinei eoliene la arbore
$P_{WT arb max}, P_{arb max}$	- puterea turbinei eoliene la arbore maximă
R	- raza circumferinței paletelor
R_1, R_2, R_3	- rezistențele echivalente ale înfășurărilor W1, W2, W3
RD,DB	- redresor în punte trifazat cu diode (diode bridge)
REN21	- Politica pentru rețeaua energetică regenerabilă pentru secolul 21 (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century)
s	- alunecarea DSWIG
SCIG	- generator de inducție cu rotor în scurtcircuit în colivie (squirrel cage induction generator)
SEPL	- sistem energetic de putere limitată (finită)
SPAST	- sistemului de protecție automată la supraturație centrifugal al WT2-UPT
SRAC	- sistem de reglare automat convențional
u_{1r}, u_{2r}, u_{3r}	- tensiunile înfășurărilor statorice W1, W2 și din rotor W3
u_{d1r}, u_{q1r}	- componentele tensiunii înfășurării W1 în sistemul de axe dq
u_{d2r}, u_{q2r}	- componentele tensiunii înfășurării W2 în sistemul de axe dq
u_{d3r}, u_{q3r}	- componentele tensiunii rotorului W3 în sistemul de axe dq
UE	- Uniunea Europeană
UPT	- Universitatea Politehnica Timișoara
u_R	- viteza periferică a vârfului paletei turbinei eoliene
v	- viteza vântului
V_{EXTREM}	- viteza extremă a vântului
V_{max}	- viteza maximă de lucru a vântului
V_N	- viteza nominală a vântului
VSC	- convertor sursă de tensiune (voltage source converter)
VSCF	- viteză de rotație variabilă și frecvență constantă (variable speed, constant frequency)
VSI	- invertor sursă de tensiune (voltage source inverter)
VSR	- redresor sursă de tensiune (voltage source rectifier)
V_{START}	- viteza vântului de intrare în funcțiune a WECS
VSVF	- viteză de rotație și frecvență variabile (variable speed, variable frequency)
W1,W2	- înfășurările statorice trifazate de sarcină și de excitație ale DSWIG
W3	- înfășurările rotorice trifazate ale DSWIG
WECS	- sistem de conversie a energiei eoliene (wind energy conversion system)
WRIG	- generator de inducție cu rotor bobinat (wound rotor induction generator)
WRSG	- generator sincron cu rotor bobinat (wound rotor synchronous generator)

WT	- turbină eoliană (wind turbine)
WT1-UPT	- turbina eoliană cu palete fixe, proiectat și realizat la UPT
WT2-UPT	- turbina eoliană cu palete rotative, cu sistem automat de protecție la supraturare centrifugal, proiectat și realizat la UPT
β	- unghiul de atac al paletelor
β_0	- unghiul de atac inițial al paletelor (numit și "unghi de instalare")
β_{max}	- unghiul de atac maxim al paletelor
$\Delta\beta$	- variația unghiului de atac al paletelor
θ_1, θ_2	- unghiul de poziție al câmpurilor electromagnetice ale înfășurărilor W1, W2
λ	- rapiditatea turbinei, ("tip speed ratio"- TSR)
λ_0	- rapiditatea turbinei la C_{Pmax}
ρ	- densitatea masică de aer
ψ_{d1}, ψ_{q1}	- componentele fluxurilor înfășurării W1 în sistemul de axe dq
ψ_{d2}, ψ_{q2}	- componentele fluxurilor înfășurării W2 în sistemul de axe dq
ψ_{d3}, ψ_{q3}	- componentele fluxurilor rotorului W3 în sistemul de axe dq
ω	- viteza unghiulară a rotorului
ω_1	- pulsația statorică

Observație: În rezumat este utilizată numerotarea folosită în teză pentru figuri, tabele și formule.

1. Introducere

1.1. Oportunitatea și obiectivele lucrării.

În lucrarea de față se abordează un domeniu de mare actualitate al energiei resurselor eoliene - cel al sistemelor de conversie a energiei eoliene echipate cu generatoare de inducție și sincrone..

Oportunitatea acestor cercetări este dată de utilizarea pe o scară din ce în ce mai largă, a resurselor energetice regenerabile, în special a celor eoliene, în vederea producerii de energie electrică nepoluantă. Expansiunea energiei eoliene a fost posibilă datorită scăderii continue a prețurilor de cost ale sistemelor de conversie a energiei eoliene, corelată cu politici coerente de promovare a acestor energii ale unor organizații internaționale de profil și ale statelor interesate. În plus, rezultatele cercetărilor efectuate în acest domeniu au condus la creșterea fiabilității componentelor, la îmbunătățirea performanțelor dinamice ale sistemelor de conversie a energiei eoliene.

În cadrul tezei sunt studiate problematici importante ale sistemelor de conversie cum ar fi:

- modelarea și validarea prin simulare a modelelor identificate ale componentelor sistemului de conversie;
- studiul unor structuri de conducere a sistemelor de conversie a energiei eoliene.

Principalele obiective propuse în lucrarea de față sunt:

- O analiza critică a structurilor, configurațiilor, tehnologiilor specifice liniilor de conversie a energiei eoliene în energie electrică, precum și integrarea acestora în sistemele energetice de putere.
- Identificarea de modele matematice ale principalelor elemente componente ale sistemului de conversie în vederea analizei structurilor de conducere propuse.
- Analiza unor metode indirecte de determinare a valorilor unor mărimi specifice sistemului de conversie, în vederea dezvoltării unor metode de conducere, cu urmărirea maximului de putere extrasă din energia vântului.
- Dezvoltarea unor structuri de conducere pentru comanda excitației unui generator de inducție cu două înfășurări statorice separate de sarcină și excitație, în vederea reglării tensiunii la bornele acestuia.
- Analiza funcționării sistemului de conversie în regimuri de funcționare la depășirea limitelor nominale și în caz de avarie.
- Implementarea unor metode de conducere cu urmărirea punctului de putere maximă a agregatelor aeroelectrice.

1.2. Prezentarea conținutului lucrării

Conținutul lucrării este dezvoltat pe parcursul a 7 capitole, 279 pagini, cu o listă de 161 titluri bibliografice și 2 anexe.

În primul capitol sunt prezentate obiectivele principale ale lucrării și modul de structurare al acesteia, funcție de obiectivele tezei și problematica abordată.

În urma analizei domeniului energiei eoliene, în capitolul doi s-a realizat o clasificare a principalelor tipuri constructive ale agregatelor aeroelectrice după mai multe criterii: poziția axului turbinei, tip de generator, tip de convertor de putere, etc. În cadrul acestui capitol, s-a realizat o amplă analiză critică a domeniului, conturându-se stadiul actual în domeniul utilizării energiilor regenerabile, atât pe plan național, cât și pe plan internațional.

Capitolul trei tratează problematica modelării matematice a turbinelor eoliene, principalele componente ale agregatelor aeroelectrice și a diferitelor profile de variație a vitezei vântului necesare pentru simulare și utilizabile în implementarea și testarea unor strategii de conducere. Astfel, au fost dezvoltate modele pentru două tipuri de turbine eoliene de 5kW, proiectate și realizate la UPT: turbina eoliană cu palete fixe WT1-UPT și turbina eoliană cu palete rotative, cu sistem automat de protecție la supraturaj centrifugal WT2-UPT. Se dezvoltă și se implementează prin metode de regresie determinarea expresiilor unor mărimi specifice turbinelor. Aceste mărimi sunt necesare în vederea implementării unei strategii propuse de conducere. Rezultatele obținute sunt validate prin simulare: în regim normal de funcționare, în regim de frânare la depășirea limitelor nominale sau în caz de avarie a unor componente.

În cadrul capitolului patru, cercetările au fost orientate preponderent pe studiul mașinii electrice de inducție cu înfășurări statorice separate - de sarcină și de excitație în regim de generator (DSWIG). Se tratează problematica: modelării matematice a DSWIG în sistemul de referință d-q; a simulării regimurilor statice și dinamice. Se prezintă rezultate experimentale, problema armonicilor și soluții pentru rejecția acestora privind DSWIG pentru sisteme de conversie a energiei eoliene. Se stabilește un algoritm de proiectare pentru obținerea unui generator DSWIG, prin rebobinarea statorului, dintr-o mașină de inducție din producția de serie. În acest capitol se abordează strategii de conducere a WECS bazate pe DSWIG.

În capitolul cinci, cercetarea a fost orientată spre generatorul sincron cu magneți permanenți (PMSG). Se dezvoltă și se implementează metode de determinare a mărimilor specifice PMSG. Se prezintă: modelarea PMSG în sistemul de referință rotativ d-q, stabilirea unei metode originale de extindere a caracteristicilor PMSG de la un număr limitat de experimente, la întreg domeniul nominal de funcționare. Aceste mărimi sunt necesare în vederea implementării unor strategii de conducere prin utilizarea unor mărimi din circuitul intermediar de c.c. de la intrarea convertorului c.c.-c.c. hibrid - HDC, prin eliminarea traductoarelor de turație și a anemometrelor. Se prezintă conducerea sistemului WECS cu PMSG în regim de conducere nominal cu extragerea puterii maxime disponibile din energia vântului și în regim de frânare, în cazul utilizării celor două tipuri de turbine eoliene WT1-UPT și WT2-UPT. S-au studiat și dezvoltat metode de conducere bazate pe urmărirea obținerii unui maxim de putere (MPPT). Testarea strategiei de conducere, cu urmărirea punctului de maxim, s-a realizat pentru diverse regimuri de funcționare (la diverse variații ale vitezei vântului), obținându-se performanțe bune ale acesteia.

Capitolul șase tratează problematica funcționării unor componente ale WECS, pentru care s-au dezvoltat și sintetizat modelele utilizabile în implementarea și testarea unor strategii de conducere. Se prezintă realizarea convertorului c.c.-c.c. hibrid HDC, a sistemului de achiziție multifuncțional și a unui emulator al sistemului de conversie, stand de laborator realizat la UPT, util pentru studiul și testarea echipamentelor reale și a algoritmilor de conducere pentru sisteme WECS, fără o turbină eoliană reală.

În capitolul final al lucrării sunt prezentate concluziile, contribuțiile personale și posibile direcții de cercetare ulterioare în opinia autorului. Teza se întinde pe 279 pagini și conține 211 figuri, 52 tabele și 161 titluri bibliografice. O mare parte din contribuții au fost validate prin publicarea a 21 de lucrări științifice, la care autorul tezei este prim-autor/coautor, acestea fiind în marea majoritate: lucrări publicate în volumele unor conferințe indexate ISI Proceedings; lucrări publicate în volumul unei conferințe indexate Inspec și IEEEExplore; lucrări publicate în volumele unor conferințe internaționale neindexate; lucrări publicate la alte conferințe naționale cu participare internațională; lucrări la conferințe/manifestări științifice naționale.

2. Energia eoliană - istorie, starea actuală, perspective, actualitatea tezei

Obiectivele tezei se încadrează în preocupările generale, pe plan mondial, european și național, de reducere / renunțare, în perspectivă, a utilizării, în energetică

- a combustibililor fosili responsabili de încălzirea globală și schimbările climatice ce amenință întreaga planetă, cât și, pe de altă parte, de epuizarea acestor combustibili (zeci de ani la gazele naturale și sute de ani la cărbune),

- a energiilor nucleare, responsabile de posibile catastrofe de iradiere a unor mari suprafețe ale pământului și a apei oceanelor, cât și soluționarea nesatisfăcătoare a depozitării deșeurilor radioactive, ce rezultă în cadrul tehnologiilor nucleare.

Pentru soluționarea problemelor energeticii specialiștii și-au îndreptat atenția, în special, asupra unor resurse energetice neconvenționale, cunoscute și ca "energii regenerabile", ce provin de la surse din natură, care se refac pe cale naturală: vânt, lumină solară, ploaie, valuri, curenții maritimi, căldura și mările mărilor și oceanelor.

2.1. Istorie și actualitate

2.1.1. Evoluția în timp a cercetărilor IPT/UPT în domeniul agregatelor aeroelectrice

În cele ce urmează se folosește atât denumirea, propusă la UPT, de "agregate aeroelectrice" - AAE, (prin analogie cu denumirea consacrată în hidroenergetică de "agregate hidroelectrice"), pentru agregatele electrogeneratoare ce folosesc ca sursă primară energia vântului pentru care, în prezent, se

folosesc denumiri diverse: turbine de vânt, agregate eoliene, cât și WECS (Wind Energy Conversion System) (în limba engleză: se mai utilizează windgenerators, windpower generators, windmills, etc.).

Începând cu anul 1982, Universitatea „Politehnica” din Timișoara desfășoară cercetări sistematice pentru promovarea în România a sursei de energie eoliană [Bej 2007].

În ceea ce privește valorificarea energiei eoliene, există preocupări pentru două domenii distincte:

- domeniul agregatelor de medie/mare putere destinate centralelor (fermelor) aeroelectrice pe amplasamente performante ca potențial aeroenergetic;
- domeniul agregatelor de putere mică, destinate unor aplicații locale pentru amplasamente cu potențial, aeroenergetic mai redus

2.2. Reglementările UE

Având în vedere imperativul actual al diminuării și, în final, al eliminării surselor de energie poluante și în curs de epuizare, în prezent dezvoltarea noilor capacități energetice este strict reglementată pe plan internațional. În țările UE reglementarea problemei considerate este prevăzută în "Directiva 2009/28/CE a Parlamentului European și a Consiliului privind promovarea utilizării energiei din surse regenerabile" [DIR-2009]. Directiva stabilește un cadru comun pentru promovarea energiei din surse regenerabile. Aceasta stabilește obiective naționale obligatorii privind ponderea globală a energiei din surse regenerabile în cadrul consumului final brut de energie și ponderea energiei din surse regenerabile utilizată în transporturi. Reglementările UE au fost particularizate pentru România de factorii de decizie la nivel național, fiind cuprinse, detaliat, în "Planul Național de Acțiune în Domeniul Energiilor din Surse Regenerabile (PNAER) " [PNA-2010], elaborat de către Institutul Național de Cercetare - Dezvoltare pentru Energetică (ICEMENERG- București).

2.3. Agregate aeroelectrice din România

Agregate aeroelectrice de mică putere

(i) Considerații generale

AWEA (American Wind Energy Association) definește turbine mici acele turbine care au o capacitate de generare de până la 100kW și un diametru al rotorului de până la 18m.

Un studiu al AWEA arată o creștere foarte mare a interesului comercial pentru turbinele mici. Situație demonstrată în numărul mare de variante de turbine de vânt mici (400) produse de 191 de firme din întreaga lume [ALL-2014].

Se poate concluziona că piața de desfacere a agregatelor aeroelectrice de putere mică a cunoscut o creștere semnificativă în ultima decadă și se așteaptă ca acestea să joace un rol important în generarea distribuită a energiei electrice în viitor.

(ii) Cercetări la UPT

Cele mai recente rezultate ale cercetărilor de la UPT, în colaborare cu unități de fabricație și montaj, privind îmbunătățirea structurilor și a randamentului AAE de mică putere și a sistemelor hibride vânt - solare au fost obținute în cadrul a 3 proiecte de cercetare (inclusiv cu finanțare europeană) la care a contribuit și autorul prezentei teze de doctorat, proiecte coordonate de conducătorul științific al acestei teze (în calitate de director de proiect):

- EEA European Economic Area Grant of Iceland, Lichtenstein, Norway: Project Nr. RD-0018 "Improvement of Structures and Efficiency of Small Horizontal Axis Wind Generators with Non-Regulated Blades", 2009-2011 [EEA-2009],
- Proiect Nr.127/ICER-TM, Sectorial Operational Programme Increase of Economic RD&I: Operation 2.2.1, National PROGRAMME "CAPACITIES", MODULE I: Large investment projects, 2009-2011 [PRO-2009].
- Proiect: "Sisteme Hibride de Conversie a Energiei Regenerabile de Mică Putere Integrate într-o Rețea (MICROREN)", Proiect Tip 2, Contract: 36, Autoritate contractantă:UEFISCDI, 2012-2015 [PRO-2012].

În figurile Fig.2.3.5a,b este redată instalația experimentală de laborator realizată la UPT în vederea cercetării a agregatelor WT-UPT cu modelare analogică, cu motor electric a turbinei eoliene și cu elementele reale ale lanțului de conversie a.c.-c.c.-a.c. ale agregatelor.

Contribuțiile autorului prezentei teze de doctorat, în cercetarea menționată, sunt prezentate în 21 de lucrări publicate la manifestări științifice din țară și străinătate, cât și în prezenta teză de doctorat.

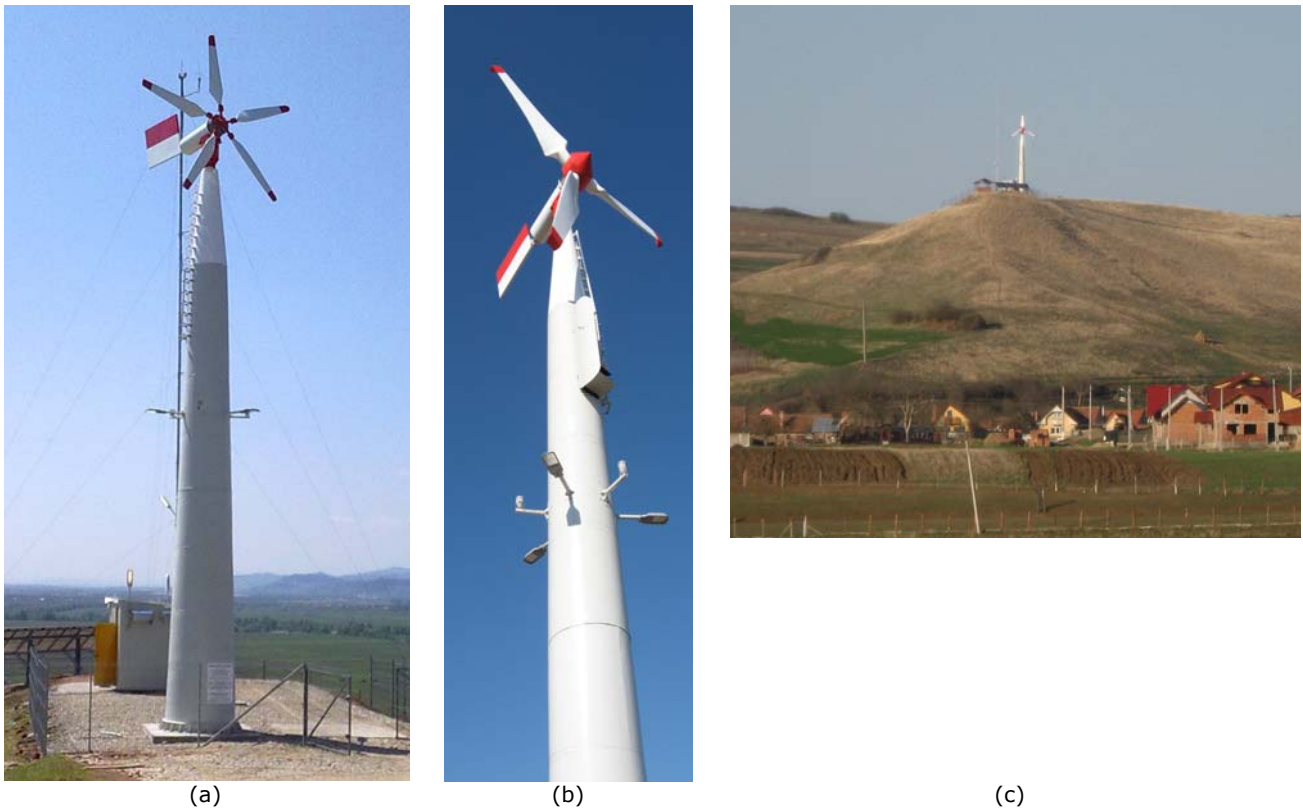
În Fig.2.3.6, sunt prezentate câteva vederi ale agregatelor WT-UPT instalate pe amplasamentul comunei Ciugud, jud.Alba, România.

O precizare ce se impune în legătură cu cele prezentate mai sus este aceea că toate componentele - turbinele de vânt, generatorul electric PMSG, sistemele electronice de măsurare, conversie (a.c.-c.c.-a.c.) și conducere (PLC, DSP, DSPACE) au fost concepute, realizate, studiate și experimentate la UPT pe modelul experimental de laborator la care s-a făcut referire.

Având în vedere oportunitatea extinderii utilizării agregatelor aeroelectrice de mică putere, semnalată de cercetătorii din întreaga lume, în prezent pe plan mondial se desfășoară, în continuare, cercetări de îmbunătățire a tuturor componentelor acestor agregate:



(a) (b)
Fig.2.3.5. Standul experimental de modelare a AAE cu PMSG:
(a) vedere de ansamblu; (b) grupul motor de inducție - generatorul PMSG. [EEA-2009]



(a) (b) (c)
Fig.2.3.6. Agregatele aeroelectrice cu turbinele de vânt WT1-UPT (a) și WT2-UPT (b) cuplate direct cu generatorul PMSG având amplasamentul situat în comuna Ciugud, jud. Alba (c) [EEA-2009].

- sistemele de susținere a AAE mari și mici, pe amplasamente (sisteme plutitoare pe mări și oceane, în cazul agregatelor de putere mare, sisteme multirotor, sisteme de susținere pe acoperișul clădirilor, respectiv de amplasare a AAE pe stâlpii pentru iluminatul șoselelor, sisteme cu levitație magnetică a turbinelor de vânt, etc., în cazul agregatelor de mică putere),

- noi tipuri de rotoare ale turbinelor de vânt, - noi tipuri de generatoare electrice, respective de îmbunătățiri constructive și de configurare a înfășurărilor acestora,
- noi tipuri de convertoare electronice de putere în linia de conversie turbină de vânt-rețea/consumatori,
- noi tipuri de sisteme de acumulare a energiei excedentare, în cazul AAE autonome,
- etc.

Considerațiile de mai sus motivează și cercetările din prezenta teză, rezultate ale acestor cercetări constituind părți ale tezei.

Una din preocupările actuale de la UPT este și elaborarea unor structuri de conversie cu generatoare de inducție cu două sisteme de înfășurări statorice. În Fig.2.3.7 se prezintă aspecte ale standului de modelare experimentală a AAE cu generator de inducție cu două înfășurări statorice (DSWIG).



Fig.2.3.7. Stand experimental pentru agregate aeroelectrice cu generator DSWIG [PRO-2012], unde: (1) motor de inducție pentru antrenare ; (2) generator DSWIG; (3) convertor electronic de putere cu tensiune și frecvență variabilă pentru alimentarea motorului de inducție; (4) sarcina rezistivă ; (5) aparate de măsură.

În paragrafele următoare din acest capitol se vor considera următoarele variante de configurații WECS studiate în teză, sintetizate în Tabelul 2.4.2:

Tabel 2.4.2. Configurațiile de sisteme WECS, de mică putere, considerate în teză.

Caz WECS	Tip turbină eoliană	Turația de antrenare a generatorului	Tip generator	Domeniul de variație a turației de antrenare	Amplificator de turație	Tipul de control aerodinamic al puterii	Compensarea puterii reactive externe	Controlul puterii active și MPTT
Realizare WECS cu WT1-UPT [EEA-2009]	WT1-UPT	Cu turație variabilă	PMSG	Tot domeniul	Fără	- stall	Nu	Da
Realizare WECS cu WT2-UPT [EEA-2009]	WT2-UPT	Cu turație variabilă	PMSG	Tot domeniul	Fără	- active stall	Nu	Da
Stand emulator experimental WECS WT1-UPT [EEA-2009]	Emulator 1 WT1-UPT	Model cu turație variabilă	PMSG	Tot domeniul	Da	- stall	Nu	Da
Stand emulator experimental WECS WT2-UPT [EEA-2009]	Emulator 1 WT2-UPT	Model cu turație variabilă	PMSG	Tot domeniul	Da	- active stall	Nu	Da
Stand emulator experimental WECS WT1-UPT [PRO-2012]	Emulator 2 WT1-UPT	Cu turație variabilă	DSWIG	Tot domeniul	Fără	- stall	Da	Da

- WECS cu generator PMSG cu convertoare de putere de capacitate totală echipate cu două tipuri de turbine, WT1-UPT cu palete fixe și WT2-UPT cu sistem de protecție automat la supraturaj, în variantele realizate în cadrul grantului din spațiul economic european [EEA-2009, PRO-2009] și pe standul experimental de la Universitatea Politehnica Timișoara cu emulator al sistemelor WECS cu generator și convertoare la scară reală.

- WECS cu generator de inducție cu două înfășurări statorice (DSWIG) cu convertoare de putere de capacitate totală [PRO-2012], studiat pe standul experimental de la UPT cu emulator de turbină WT1-UPT și generator DSWIG și convertoare la scară reală.

Printr-o combinație de diferite tipuri de generatoare și transformatoare, au fost dezvoltate o varietate de configurații WECS. S-au prezentat cele mai comune configurații practice de sisteme WECS și configurații în curs de dezvoltare. S-au discutat diverse aspecte tehnice legate de aceste configurații în funcție de tipurile de generatoare, topologii de convertoare de putere, de control al puterii active, eficiența de conversie a energiei și de compensare a puterii reactive pe partea de rețea. Au fost analizate pentru fiecare dintre configurații caracteristicile, avantaje și dezavantaje.

3. Vântul și turbine eoliene. Caracteristici

Examinarea funcționalității și comportării sistemelor WECS, o atenție deosebită trebuie acordată generatoarelor electrice, modalității de cuplare a acestora cu rotorul turbinei și modalitatea de conectare / deconectare la rețea.

Sistemele de conversie a energiei eoliene comparativ cu alte surse de producere a electricității, cum ar fi hidrogeneratoarele sau grupurile diesel, prezintă unele avantaje cum ar fi: (i) simplitate în utilizare; (ii) durată mare de funcționare în exploatare; (iii) posibilității de eșalonare în timp a implementării sistemelor WECS care urmează să formeze o fermă eoliană; (iv) costuri inițiale reduse; (v) au o întreținere ușoară; (vi) sunt ecologice prin impactul cu mediu fiind foarte redus.

Pentru sisteme de conversie a energiei eoliene de putere mică, până la 5kW, s-au considerat două tipuri de turbine eoliene, realizate la UPT [EEA-2009]:

- turbina eoliană cu palete fixe WT1-UPT;
- turbina eoliană cu protecție automată la supraturație WT2-UPT.

Pentru cele două variante de turbine eoliene, realizate la UPT, s-au stabilit modele matematice, simularea și analiza funcționării lor în diferite regimuri (regim nominal, regim de frânare la depășirea limitelor nominale sau în caz de avarie, etc.)

Prin metode de regresie numerică s-au stabilit relații care simplifică procesul de simulare și de conducere a sistemelor de conversie eoliene.

3.1. Necesitatea unor sisteme eoliene de mică putere

Turbinele eoliene convertesc energia cinetică a vântului în energie mecanică la arbore și, în final în energie electrică prin generatoare electrice.

Tendința actuală este de a grupa sistemele de conversie a energiei eoliene în ferme eoliene terestre ("onshore"), care beneficiază de o construcție simplă, o funcționare și costuri de exploatare mai reduse, respectiv o conectare mai simplă la sistemele de transport terestre existente, sau în ferme eoliene marine ("offshore") viteză vântului, de regulă mai mare și mai constantă, dar pot întâmpina condiții de mediu mult mai ostile (de exemplu, salinitatea apei și furtunile puternice)

Turbinele de putere mică sunt destinate utilizării în locuri izolate, cu un număr mic de consumatori, uneori departe de rețeaua electrică generală. Ele pot funcționa în regim de izolare de rețeaua electrică generală sau conectate la rețea.

3.1.1. Caracteristici funcționale ale turbinei eoliene din WECS

Turbinele eoliene au două configurații de bază, turbine eoliene cu ax orizontal și turbine eoliene cu ax vertical, rotorul turbinei eoliene putând fi propulsat fie de forțele aerodinamice portante sau de tracțiune.

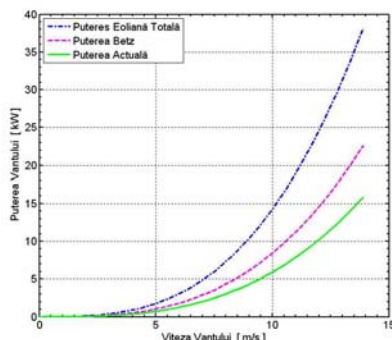


Fig.3.1.4. Puterea totală a vântului, puterea maxim teoretică a lui Betz și puterea actuală pentru 70% din eficiența Betz pentru o WT cu diametrul de 5.5m.

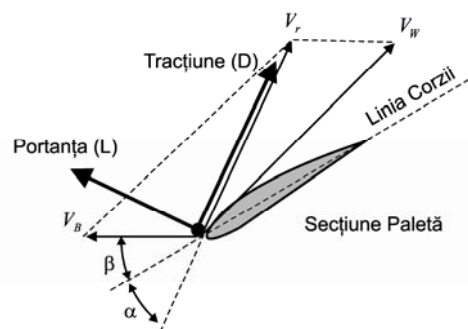


Fig.3.1.5. Forța de portanță și de tracțiune al unei turbine eoliene.

Fig.3.1.5 prezintă o secțiune transversală a paletei rotorului și forțele care acționează asupra ei într-o reprezentare aerodinamică plană. Forța portantă (L) este produsă perpendicular pe direcția vitezei relative a vântului (V_r), în timp ce forța de tracțiune (D) este aliniată cu aceasta. Viteza relativă a vântului este vectorul rezultat sumă a vectorului vitezei mișcării paletelor (V_B) și vectorului vitezei vântului (V_w). Forța portantă împinge paletele de-a lungul căii de rotație, cauzând o împingere, care produce un cuplu la axul rotorului turbinei. Forța portantă crește pe măsura creșterii unghiului de atac (α) în domeniul normal de funcționare, de exemplu înainte ca paleta să atingă regimul de funcționare turbulentă. În regimul turbulent de funcționare forța portantă rămâne practic constantă, independentă de unghiul de atac. Este important de menționat că este neeconomic să se construiască turbine robuste care să funcționeze în tot domeniul de vitezele a vântului.

Reglarea limitării pasive a turației și reglarea unghiului de atac sunt cele mai folosite metode pentru sisteme WECS medii și mari, în timp ce metoda de reglare a frânării și opririi este utilizată pentru sistemele WECS mici [Mar 2003].

Caracteristica de putere a unei turbine eoliene

Caracteristicile de putere ale turbinei eoliene sunt definite prin curbele de putere, care fac legătura dintre puterea mecanică a turbinei și viteza vântului.

O curbă tipică de putere este caracterizată de trei viteze ale vântului: viteza vântului de start (intrare în funcțiune), viteza vântului nominală și viteza vântului de oprire, așa cum sunt reprezentate în Fig.3.1.6, unde P_T este puterea mecanică generată de turbina eoliană și v_w este viteza vântului.

Așa cum poate fi văzut din Fig.3.1.6, WECS începe să captureze energie de la viteza de start a vântului. Puterea capturată de paletele turbinei este o funcție cubică a vitezei vântului, conform ecuației

(3.1.1), până când viteza vântului atinge valoarea nominală. Pentru a furniza energia capturată rețelei pentru diferite viteze ale vântului, WECS trebuie să fie controlat corespunzător funcționării la turație variabilă. Odată cu creșterea vitezei vântului peste viteza nominală, se cere un control al puterii aerodinamice al paletelor, care să mențină puterea la valoarea nominală.

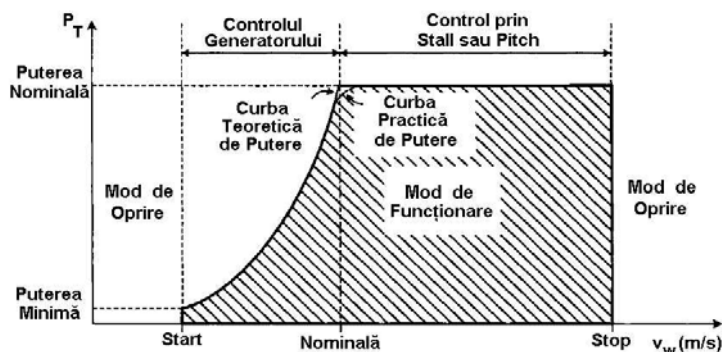


Fig.3.1.6. Curba calitativă a puterii mecanice a turbinei eoliene în funcție de viteza vântului.

Când viteza vântului este superioară vitezei de oprire turbina eoliană trebuie să fie oprită, încetând furnizarea energiei electrice.

Configurații cu turație variabilă (avantaje, dezavantaje)

Configurațiile cu turație variabilă asigură posibilitatea de control al turației rotorului turbinei eoliene. Aceasta permite sistemului de conversie a energiei eoliene (WECS) să funcționeze constant în apropierea valorii optime a rapidității turbinei, valoare care corespunde punctului de putere maximă la o viteză dată a vântului.

Se pot pune în evidență următoarele avantaje ale sistemelor WECS cu turație variabilă comparativ cu sistemele cu turație constantă [Bur 2001, Car 2011, Kar 2013]:

- Producția anuală de energie crește datorită faptului că turația turbinei eoliene poate fi ajustată în funcție de viteza vântului pentru a maximiza puterea de ieșire. Dependent de aerodinamica turbinei și de regimul de vânt, sistemele WECS asigură până la 10% din energia anuală.

- Stresul mecanic este mai mic datorită adaptării la puterea de antrenare. Turbulența și forfecarea vântului pot fi atenuate de energia înmagazinată în inerția mecanică a turbinei, creând o adaptabilitate, care reduce pulsațiile cuplului.

- Variația puterii de ieșire este decuplată de condițiile instantanee prezente în viteza vântului și în sistemul mecanic. Când apare o rafală de vânt la turbină, sistemul electric poate continua să furnizeze putere constantă rețelei în timp ce inerția sistemului mecanic absoarbe surplusul de energie prin creșterea turației rotorului.

- Calitatea puterii poate fi crescută prin reducerea pulsațiilor energiei. Reducerea pulsațiilor energiei se manifestă prin scăderea abaterii tensiunii de la valoare nominală în punctul comun de cuplare (PCC), ceea ce permite creșterea penetrării energiei eoliene în rețea.

- Complexitatea controlului unghiului de atac poate fi redusă. Aceasta se datorează faptului că se poate adopta o constantă de timp mai mare a reglajului unghiului de atac al paletelor, la turație variabilă.

- Reducerea zgomotului acustic. Zgomotul acustic poate fi un factor important când locația fermelor eoliene este în apropierea unei arii populate.

Contrar principalului dezavantaj al configurațiilor cu turație variabile, constând în costurile suplimentare și complexitatea convertoarelor necesare pentru a interfața generatorul electric cu rețeaua, utilizarea acestora a crescut datorită avantajelor menționate.

3.2. Vântul. Caracteristici. Modelare

Viteza, direcția și intensitatea vântului constituie o problemă de importanță deosebită în sistemele de conversie a energiei eoliene. Distribuția vitezelor vântului pentru intervale de timp mai lungi permit alegerea locațiilor de amplasare a unui astfel de sistem de conversie [IEC-2006, Bej 2003].

Pentru funcționarea în timp real, sistemul de conversie se confruntă cu variații imprevizibile ale vitezei vântului, ceea ce face ca sistemul de conducere să asigure, în condiții de bună funcționare a instalației, extragerea de putere maximă din puterea disponibilă la un moment dat la arborele turbinei eoliene [Mil 2008, Mil 2010].

În continuare se vor considera mai multe tipuri de profile de variație a vitezei vântului, de la profile simple necesare pentru acordarea și definitivarea sistemului de conducere și protecție, până la profile complicate cu distribuții cvasi-aleatoare sau care reproduc profile reale înregistrate în locațiile de amplasare a sistemului de conversie a energiei eoliene.

Profilele de vânt vor fi utilizate în cadrul simulatorului de turbină eoliană experimental, de laborator, pentru crearea condițiilor cât mai apropiate de cele reale [Koc 2011a, Koc 2011b, Bor 2011].

Caracteristicile profilelor vitezei vântului și profilele de variație a vitezei vântului sunt definite prin: ecuația vitezei vântului ca funcție de timp; parametrii (valoare inițială, valoare finală, durata, panta de variație, amplitudine, etc.); diagrama de variație în timp; modelul în Matlab – Simulink. Variantele de profile considerate sunt: Viteză constantă, Viteză variabilă în treaptă, Viteză variabilă în trepte succesive,

Viteză variabilă în rampă cu palier inițial și final, Viteză variabilă trapezoidală, Viteză variabilă triunghiular, fără palier, Viteză variabilă impuls, Viteză variabilă în rafală de scurtă durată [IEC 2006] (Fig.3.2.8), Viteză variabilă în rafală de lungă durată [IEC-2006] (Fig.3.2.9), Viteză variabilă cvasi-aleatoare, Viteză variabilă conform unui fișier de înregistrare Viteză variabilă clopot.

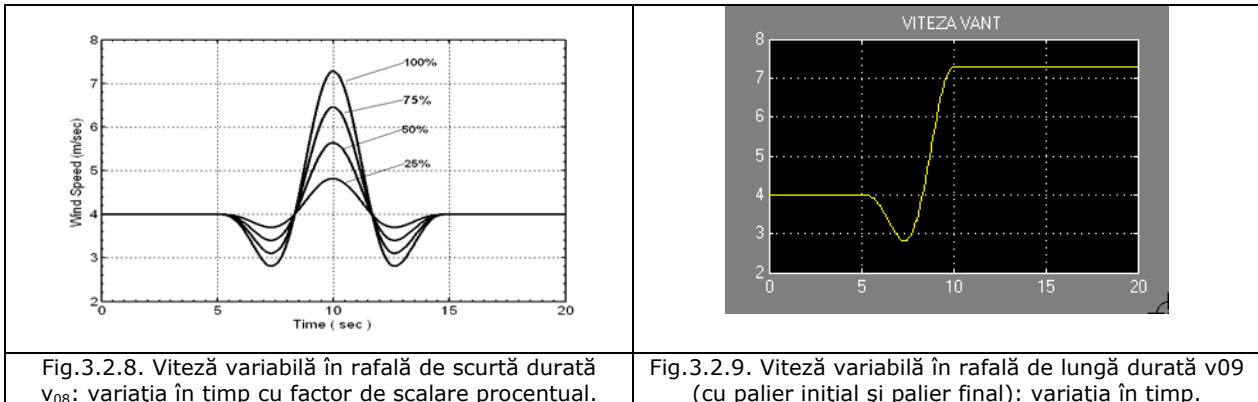


Fig.3.2.8. Viteză variabilă în rafală de scurtă durată v_{08} : variația în timp cu factor de scalare procentual.

Fig.3.2.9. Viteză variabilă în rafală de lungă durată v_{09} (cu palier inițial și palier final): variația în timp.

Blocul de generare a vitezei vântului în MATLAB - SIMULINK permite selecția profilului formei de variație a vitezei vântului care va fi utilizată la simularea comportării turbinei eoliene.

3.3. Turbina eoliană WT1-UPT. Caracteristici. Modelare

3.3.1. Turbina eoliană WT1-UPT cu palete fixe. Conversia Energiei Eoliene.

Puterea mecanică la arborele turbinei

Puterea mecanică la arbore pe care turbina o extrage de la vânt, P_{arb} , este inferioară puterii vântului P_w . Aceasta se datorează faptului că viteza vântului după turbină nu este nulă. Astfel, se definește coeficientul de putere al turbinei C_p , ca:

$$C_p = \frac{P_{arb}}{P_w}; \quad C_p < 1 \quad (3.3.4)$$

În aceste condiții puterea mecanică recuperată la arborele turbinei P_{arb} este dată prin:

$$P_{arb} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (3.3.5)$$

unde:

R - raza circumferinței paletelor.

β - unghiul de atac al paletelor (numit și "unghi de instalare").

λ - rapiditatea turbinei, ("tip speed ratio"- TSR), parametrul de formă al turbinei (raportul vitezei

periferice u_R și viteza vântului v) exprimat prin relația [Mil 2008]: $\lambda = \frac{u_R}{v} = \frac{\omega R}{v} = \frac{\pi R n}{30 v}$; (3.3.7)

unde:

$$u_R - \text{viteza periferică a vârfului paletei turbinei eoliene: } u_R = \omega R = \frac{\pi}{30} n R \quad (3.3.8)$$

ω - este viteza unghiulară a rotorului.

Maximul C_{pmax} al acestei funcții fost determinat de Albert Betz în 1919 și este cunoscut ca "limita lui Betz", [Bet 1966, Bur 2001, Gij 2007, Man 2012, Whi 1988, Gor 2001]:

$$C_{pmax, Betz} = \frac{16}{27} = 0.593. \quad (3.3.9)$$

La viteze mari ale vântului, unde turbinele eoliene ar putea să funcționeze la puterea nominală, din motive de autoprotecție, existând riscul apariției de defecțiuni grave, paletelile turbinelor sunt rotite în jurul axei lor, pentru a micșora C_p . Puterea poate crește de 8 ori la o dublare a vitezei vântului.

Cuplul turbinei de vânt la arborele turbinei

Cuplul turbinei de vânt la arbore M_{arb} poate fi calculat din puterea la arbore P_{arb} :

$$M_{arb} = \frac{P_{arb}}{\omega} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 \frac{v^3}{\omega} C_p(\lambda, \beta) \quad (3.3.30)$$

Adesea se utilizează coeficientul de cuplu la arbore C_M :

$$C_M(\lambda, \beta) = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \quad (3.3.32)$$

Se obține astfel pentru cuplul la arbore:

$$M_{arb} = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v^2 C_M(\lambda, \beta) \quad (3.3.33)$$

Pentru unghiul de atac β constant, expresia lui C_M devine:

$$C_M(\lambda) = \frac{C_P(\lambda)}{\lambda} \quad (3.3.34)$$

Curbele adimensionale sunt o caracteristică a tipului de turbină eoliană, valabilă pentru o familie de turbine asemănătoare geometric și cinematic. Curbele adimensionale pentru $C_{P\ arb}$ și $C_{M\ arb}$ pot fi exprimate prin relațiile următoare:

- Coeficientul de putere $C_{P\ arb}$ la arborele turbinei WT1-UPT [EEA-2009, Mil 2008]:

$$C_{P\ arb}(\lambda) = C_{M0} \lambda + a \lambda^\alpha - b \lambda^\beta \quad (3.3.36)$$

$$C_{P\ arb}(n, v) = C_{M0} \frac{\pi R}{30} n v^{-1} + a \left(\frac{\pi R}{30} \right)^\alpha n^\alpha v^{-\alpha} - b \left(\frac{\pi R}{30} \right)^\beta n^\beta v^{-\beta} \quad (3.3.38)$$

- Coeficientul de cuplu $C_{M\ arb}$ la arborele turbinei:

$$C_{M\ arb}(\lambda) = C_{P\ arb}(\lambda) / \lambda = C_{M0} + a \lambda^{\alpha-1} - b \lambda^{\beta-1} \quad (3.3.39)$$

$$C_{M\ arb}(n, v) = C_{M0} \frac{\pi R}{30} + a \left(\frac{\pi R}{30} \right)^{\alpha-1} n^{\alpha-1} v^{1-\alpha} - b \left(\frac{\pi R}{30} \right)^{\beta-1} n^{\beta-1} v^{1-\beta} \quad (3.3.41)$$

- Relația dintre coeficienți $C_{P\ arb}$ și $C_{M\ arb}$

$$C_{P\ arb}(\lambda) = \lambda C_{M\ arb}(\lambda) \quad (3.3.42)$$

Determinarea constantelor C_{M0} , a , b , α , β , se face prin programul de proiectare al turbinei eoliene susținut prin date experimentale [EEA-2009, Mil 2008, Mil 2010].

Pentru două valori ale rapidității turbinei, constantele au valorile din Tabelul 3.3.1, cele două curbe adimensionale $C_P(\lambda)$ și $C_M(\lambda)$ ale turbinei fiind redată în Fig.3.3.3. [Mil 2010, EEA-2009]

Tabel 3.3.1. Valorile constantelor turbinei WT1-UPT pentru $\lambda_0 = 3$ și $\lambda_0 = 4$.

TSR ₀ , λ_0	C_{M0}	C_{Pmax}	a	b	α	β
4	0.0125	0.4650	0.0626	0.0046	2.0	3.5
3	0.0222	0.4281	0.0986	0.0113	2.0	3.5

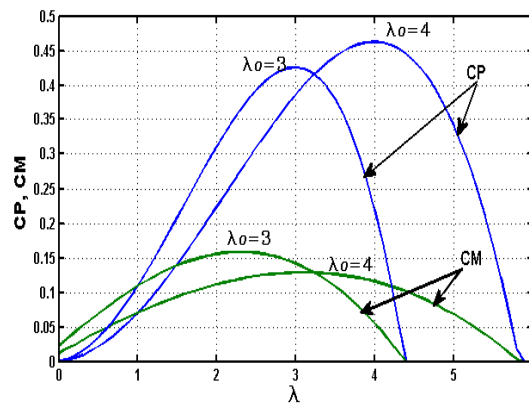


Fig.3.3.3. Curbele adimensionale $C_P(\lambda)$ și $C_M(\lambda)$ pentru $\lambda_0 = 3$ și $\lambda_0 = 4$.

- Expresia puterii la arborele turbinei pentru modelul WT1-UPT

$$P_{arb}(\lambda, v, \rho) = \frac{\rho S}{2} v^3 \left[C_{M0} \lambda + a \lambda^\alpha - b \lambda^\beta \right] \quad (3.3.49)$$

Considerând expresia lui λ din (3.3.7) se obține:

$$P_{arb}(n, v, \rho) = \rho \left[c_2 n v^2 + a_2 n^\alpha v^{3-\alpha} - b_2 n^\beta v^{3-\beta} \right] \quad (3.3.51)$$

unde coeficienții a_2 , b_2 , c_2 sunt dați de :

$$a_2 = a \frac{S}{2} \left(\frac{\pi R}{30} \right)^\alpha ; \quad b_2 = b \frac{S}{2} \left(\frac{\pi R}{30} \right)^\beta ; \quad c_2 = \frac{S}{2} C_{M0} . \quad (3.3.52)$$

- Determinarea turației n_{Pmax} pentru obținerea $P_{arb\ Max}$

Dacă se cunoaște expresia puterii la arborele turbinei, determinarea turației turbinei n_{Pmax} , la care se obține puterea maximă, se face anulând derivata puterii în raport cu turația:

$$\frac{\partial P_{arb}(n, v, \rho)}{\partial n} = 0 \quad (3.3.55)$$

Pentru o valoare a vitezei vântului v constantă dată, se rezolvă ecuația:

$$b_3 \beta v^{1-\beta} n^{\beta-1} - a_3 \alpha v^{1-\alpha} n^{\alpha-1} = c_3 \quad (3.3.60)$$

unde coeficienții a_3 , b_3 , c_3 au expresiile:

$$b_3 = \beta b v^{1-\beta} \left(\frac{\pi R}{30}\right)^\beta, \quad a_3 = \alpha a v^{1-\alpha} \left(\frac{\pi R}{30}\right)^\alpha, \quad c_3 = C_{M0}. \quad (3.3.61)$$

Valorile parametrilor turbinei pentru modelul WT1-UPT, prezentați în Tabelul 3.3.1, permit calculul coeficienților.

- Expresia cuplului la arborele turbinei pentru modelul WT1-UPT

$$M_{arb}(\lambda, v) = M_T(\lambda, v) = C_{M_{arb}T}(\lambda) \cdot \rho S \frac{v^2}{2} \quad (3.3.62)$$

$$M_{arb}(n, v, \rho) = \rho \left[c_1 v^2 + a_1 n^{\alpha-1} v^{3-\alpha} - b_1 n^{\beta-1} v^{3-\beta} \right] \quad (3.3.65)$$

unde s-a notat:

$$a_1 = a \frac{S}{2} \left(\frac{\pi R}{30}\right)^{\alpha-1}; \quad b_1 = b \frac{S}{2} \left(\frac{\pi R}{30}\right)^{\beta-1}; \quad c_1 = \frac{C_{M0} S}{2}. \quad (3.3.66)$$

- Determinarea turației n_{Mmax} pentru obținerea M_{arbmax}

Pentru determinarea turației turbinei, n_{Mmax} , la care se obține cuplul la arborele turbinei maxim, M_{arbmax} , se pune condiția anulării derivatei cuplului la arborele turbinei în raport cu turația n :

$$\frac{\partial M_{arb}(n, v, \rho)}{\partial n} = 0 \quad (3.3.67)$$

Aplicând derivata cuplului la arborele turbinei M_{arb} , (3.3.65), în raport cu turația n , și efectuând calculele, din care, considerând anularea derivatei (3.3.66) rezultă ecuația:

$$\rho \left[(\alpha-1) a_1 n^{\alpha-2} v^{3-\alpha} - (\beta-1) b_1 n^{\beta-2} v^{3-\beta} \right] = 0 \quad (3.3.69)$$

Se obține relația:

$$n_{Mmax}(v) = K_{Mmax} \cdot v, \quad (3.3.71)$$

unde constanta K_{Mmax} este:

$$K_{Mmax} = \frac{1}{\left[\frac{(\alpha-1) a_1}{(\beta-1) b_1} \right]^{\beta-\alpha}}. \quad (3.3.72)$$

Se observă că turația corespunzătoare unui cuplu maxim este proporțională cu viteza vântului v , și nu depinde de densitatea de masă ρ a aerului.

3.3.2. Estimarea prin regresie a mărimilor specifice turbinei eoliene

În cadrul funcției de conducere a WECS, se presupune cunoașterea caracteristicilor componentelor (turbina eoliană, generator, convertoare, etc.), care sunt modelate în formă analitică prin expresii de o mare complexitate, care conduc la un volum mare de calcule și corespunzător un interval mare de timp. Pentru implementarea algoritmilor de conducere cu acțiune în timp real, rezolvarea acestor expresii complexe nu se poate efectua practic în timpii reduși alocați. Simularea în aceste condiții necesită de asemenea un timp mare de lucru.

În vederea reducerii acestui volum de calcul, se pune problema găsirii unor relații echivalente, cu un număr mai mic de calcule și cu operații matematice mai simple, care pot fi implementate în sistemul de conducere bazate pe sisteme cu DSP-uri.

Metodele de regresie reprezintă o soluție posibilă, în acest caz constând în utilizarea unui set de valori ale dependenței căutate se determinat experimental, prin măsurători, sau analitic, prin calculul expresiilor complexe pentru un set discret de valori, și găsirea unor funcții care să aibă o abatere standard cât mai mică posibil și un coeficient de corelație cât mai aproape de unu. Funcțiile determinate trebuie să fie funcții polinomiale sau funcții bazate pe operații matematice cât mai simple, ușor de implementat într-un sistem numeric de conducere.

Setul de valori ce stă la baza procedurii de regresie trebuie să acopere domeniul maxim de variație a mărimilor considerate, pentru a garanta abaterea standard minimă acceptată, în caz contrar pot să apară erori semnificative.

Relațiile de calcul echivalente pot fi utilizate la implementarea algoritmilor de conducere sau la simularea funcționării sistemelor de conversie a energiei eoliene în diferite regimuri de funcționare sau structuri. Simularea se poate face în Matlab-Simulink, Mathematica, PSIM, Simnon, etc.

În continuare se prezintă relațiile echivalente obținute prin metodele de regresie, pentru mărimile caracteristice ale turbinei de tip WT1-UPT, cu palete cu unghi de atac fix, pentru două valori ale rapidității λ_0 .

Tabel 3.3.3. Caracteristici estimate prin metodele de regresie.

Relația pentru caracteristicile estimate	Notația	Notația estimată
Curba adimensională de putere	C_P	C_{PX}
Curba adimensională de cuplu	C_M	C_{MX}
Puterea la arbore	P_{arb}	P_{arbX}
Cuplul la arbore	M_{arb}	M_{arbX}
Caracteristica puterii maxime	$P_{arb\ max}$	$P_{arb\ max\ x}$
Caracteristica cuplului maxim	$M_{arb\ max}$	$M_{arb\ max\ x}$
Caracteristica turației optime	n_{Pmax}	$n_{Pmax\ x}$

Caracteristicile turbinei WT1-UPT, având expresiile stabilite anterior, care se estimează prin metode de regresie sunt sintetizate în Tabelul 3.3.3, expresiile estimate prin regresie sunt marcate prin indicele inferior "x":

- Estimarea coeficientului de putere $C_{P\ arb}$

Coeficientul de putere al turbinei WT1-UPT are expresia din (3.3.36), se obține expresia polinomială de aproximare C_{PX} :

$$C_{PX}(\lambda) = a_{CPX} + b_{CPX}\lambda + c_{CPX}\lambda^2 + d_{CPX}\lambda^3 + e_{CPX}\lambda^4, \quad (3.3.74)$$

- Estimarea coeficientului de cuplu $C_{M\ arb}$

Coeficientul de cuplu al turbinei WT1-UPT este dat de relația din (3.3.39) putând fi determinat aplicând relația de definiție (3.3.42) cunoscând expresia estimată pentru C_{PX} , sau prin aplicarea procedurii de regresie expresiei coeficientului de cuplu C_M dat de (3.3.39), se obține expresia polinomială de aproximare C_{MX} :

$$C_{MX}(\lambda) = a_{CMX} + b_{CMX}\lambda + c_{CMX}\lambda^2 + d_{CMX}\lambda^3 + e_{CMX}\lambda^4 \quad (3.3.75)$$

- Estimarea puterii la arborele turbinei P_{arb}

Puterea obținută la arborele turbinei $P_{arb}(\lambda, v, \rho, \beta)$ este dată prin (3.3.55).

Considerând expresia de aproximare determinată prin regresie polinomială (3.3.74) a coeficientului de putere $C_{PX}(\lambda)$ și expresia de definiție a rapidității turbinei λ , (3.3.7), se obține din (3.3.76), expresia $P_{arbX}(n, v)$ de aproximare a puterii la arborele turbinei:

$$P_{arbX}(n, v) = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_{PX} \left(\frac{\pi R n}{30 v} \right) = a_{PX} v^3 + b_{PX} v^2 n + c_{PX} v n^2 + d_{PX} n^3 + e_{PX} v^{-1} n^4 \quad (3.3.76)$$

- Estimarea cuplului la arborele turbinei

Procedând similar, cunoscând expresia de aproximare a coeficientului de cuplu C_{MX} al turbinei, se determină relația de aproximare a cuplului la arborele al turbinei WT1-UPT.

Cuplul dezvoltat la arborele turbinei de vânt la arbore $M_{arb}(\lambda, v)$, din (3.3.62) și considerând expresia de aproximare determinată prin regresie polinomială (3.3.75) a coeficientului de cuplu $C_{MX}(\lambda)$ și de asemenea expresia de definiție (3.3.7) a rapidității turbinei λ se obține expresia $M_{arbX}(n, v)$ de aproximare a cuplului la arborele turbinei:

$$M_{arbX}(n, v) = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v^2 C_M(\lambda) = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v^2 \frac{C_P \left(\frac{\pi R n}{30 v} \right)}{\frac{\pi R n}{30 v}} = a_{MX} v^3 n^{-1} + b_{MX} v^2 + c_{MX} v n + d_{MX} n^2 + e_{MX} v^{-1} n^3 \quad (3.3.81)$$

- Estimarea turațiilor pentru cuplul maxim la arborele turbinei în funcție de viteza vântului

Din (3.3.70), rezultă că dependența dintre turația n_{Mmax} corespunzătoare cuplului la arbore maxim $M_{arb\ max}$ și v viteza vântului, este una liniară. Valorile coeficientului K_{NMmax} , pentru valorile constantelor a, β, a_1, b_1 ale turbinei WT1-UPT.

- Estimarea turațiilor pentru putere maximă la arborele turbinei în funcție de viteza vântului

Pentru obținerea turației optime $n_{P_{max,i}}$ corespunzătoare puterii maxime P_{max} la o viteză v_i , $i=1, 2, \dots, k$, dată a vântului, se rezolvă ecuația transcendentă (3.3.59).

3.4. Turbina eoliană WT2-UPT. Caracteristici. Modelare

Varianta WT2-UPT a unui WECS de mică putere, prezentată în Fig.3.4.1, a fost realizată experimental de UPT în cadrul grantului [EEA2009].

Turbina de vânt WT2-UPT are o formă și o structură complexă. Paletel, realizate din fibre de sticlă cu poliesteri, cu inserție metalică de rezistență sunt răsucite în spațiu cu o geometrie cu secțiune variabilă. În plus, au o formă specială, în scopul reducerii zgomotului și a turbulenței de la extremitatea paletel [Mil 2008, Mil 2010].

Rotorul turbinei este prezentat în Fig.3.4.2. Poziția de instalare absolută a paletel este definită prin unghiul β_x . În modul normal de funcționare, în limitele nominale de turație, sistemul de limitare al turației nu este activ, paletel având poziția definită de unghiul β_0 .



Fig.3.4.1. Turbina experimentală WT2-UPT.

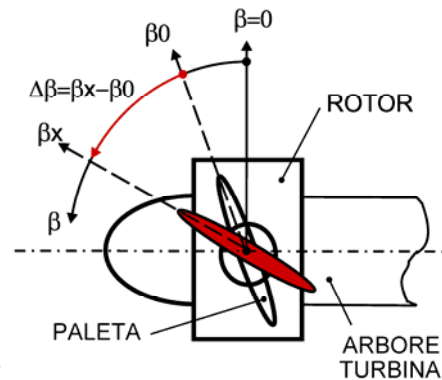


Fig.3.4.2. Rotorul turbinei WT2-UPT.

Estimările bazate pe datele de proiectare [Mil 2008], care consideră caracteristicile constructive corespunzătoare (profilul paletel, construcția turbinei, mecanismul de limitare a turației, etc.) pentru o variație a unghiului de atac $\Delta\beta = \beta_x - \beta_0$, în limitele $\Delta\beta_{min}=0^0$ și $\Delta\beta_{max} = 45^0$, sunt următoarele:

- viteza unghiulară: $\omega(n) = \pi n / 30$ (3.4.2)

- viteza periferică: $u(n) = \omega(n)R$ (3.4.3)

- rapiditatea turbinei ("tip-speed ratio"): $\lambda(v, n) = u(n) / v$ (3.4.4)

- coeficientul de cuplu la arbore

$$C_{M\beta}(v, n, \Delta\beta) = C_{M0\beta}(\Delta\beta) + a_{\beta}(\Delta\beta)\lambda(v, n)^{\alpha-1} - b_{\beta}(\Delta\beta)\lambda(v, n)^{\beta-1} \quad (3.4.5)$$

- cuplul la arbore: $M_{arb\beta}(v, n, \Delta\beta) = C_{M\beta}(v, n, \Delta\beta)\rho v^2 A_v R / 2$ (3.4.6)

- coeficientul de putere la arbore

$$C_{P\beta}(v, n, \Delta\beta) = C_{M\beta}(v, n, \Delta\beta)\lambda(v, n) = C_{M0\beta}(\Delta\beta)\lambda(v, n) + a_{\beta}(\Delta\beta)\lambda(v, n)^{\alpha} - b_{\beta}(\Delta\beta)\lambda(v, n)^{\beta} \quad (3.4.7)$$

- puterea la arbore

$$P_{arb\beta}(v, n, \Delta\beta) = M_{arb\beta}(v, n, \Delta\beta)\omega(n) = C_{M\beta}(v, n, \Delta\beta)\rho v^2 A_v R \omega(n) / 2 \quad (3.4.8)$$

3.4.2. Estimarea prin regresie a mărimilor caracteristice pentru WT2-UPT

Coeficientul de cuplu la arbore $C_{M\beta}(v, n, \Delta\beta)$

Din datele de proiectare ale WT2-UPT [EEA 2009, Mil 2010], pentru coeficientul de cuplu $C_{M\beta}(v, n, \Delta\beta)$, rezultă

$$C_{M\beta X}(v, n, \Delta\beta) = C_{M0\beta X}(\Delta\beta) + a_{\beta X}(\Delta\beta)\lambda^{\alpha-1}(v, n) - b_{\beta X}(\Delta\beta)\lambda^{\beta-1}(v, n) \quad (3.4.9)$$

unde:

$C_{M0\beta X}(\Delta\beta)$, $a_{\beta X}(\Delta\beta)$, $b_{\beta X}(\Delta\beta)$ sunt coeficienți estimați prin metode de regresie ca funcții de poziția unghiulară $\Delta\beta$, având expresiile :

$$\begin{aligned} C_{M0\beta X}(\Delta\beta) &= (c_{\beta 1} + c_{\beta 2}\Delta\beta) / (1 + c_{\beta 3}\Delta\beta + c_{\beta 4}\Delta\beta^2) \\ a_{\beta X}(\Delta\beta) &= (a_{\beta 1} + a_{\beta 2}\Delta\beta) / (1 + a_{\beta 3}\Delta\beta + a_{\beta 4}\Delta\beta^2) \\ b_{\beta X}(\Delta\beta) &= (b_{\beta 1} + b_{\beta 2}\Delta\beta) / (1 + b_{\beta 3}\Delta\beta + b_{\beta 4}\Delta\beta^2) \end{aligned} \quad (3.4.10)$$

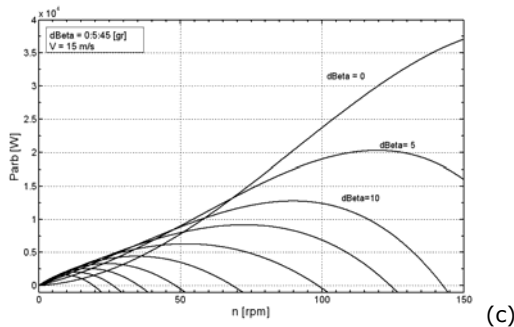
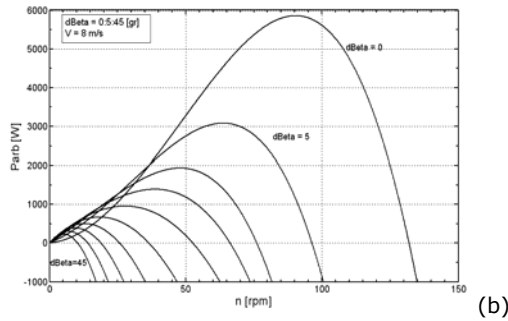
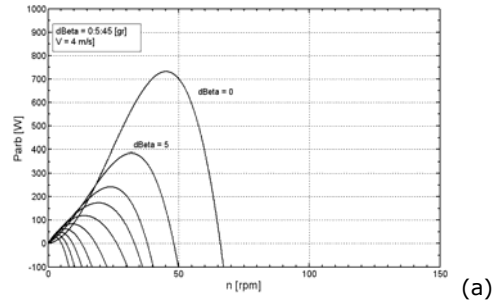


Fig.3.4.3. WT2-UPT Caracteristica $P_{arb}=F(n)$ cu $\Delta\beta$ parametru și V constantă (reprez.2D): (a) $V= 4$ m/s; (b) $V= 8$ m/s; (c) $V= 15$ m/s.

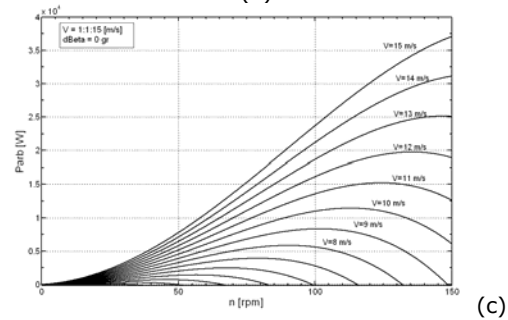
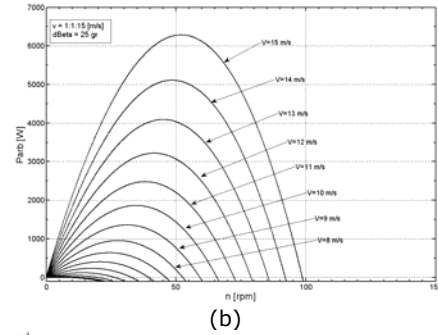
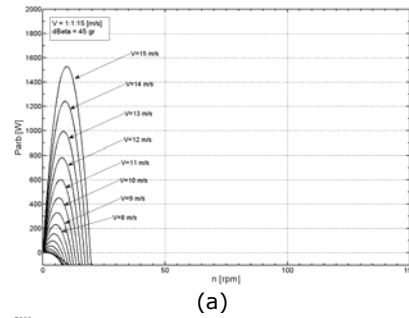


Fig.3.4.4. WT2-UPT Caracteristica $P_{arb}=F(n)$ cu V parametru și $\Delta\beta$ constantă (reprez.2D): (a) $\Delta\beta= 0^\circ$; (b) $\Delta\beta= 25^\circ$; (c) $\Delta\beta= 45^\circ$.

Cuplul mecanic la arborele turbinei de vânt $M_{arb\beta X}(v, n, \Delta\beta)$

$$M_{arb\beta X}(v, n, \Delta\beta) = C_{M\beta X}(v, n, \Delta\beta) \rho v^2 A_v R / 2 \quad (3.4.11)$$

Coeficientul puterii la arbore $C_{P\beta X}(v, n, \Delta\beta)$:

$$\begin{aligned} C_{P\beta X}(v, n, \Delta\beta) &= C_{M\beta X}(v, n, \Delta\beta) \lambda(v, n) = \\ &= C_{M0\beta X}(\Delta\beta) \lambda(v, n) + a_{\beta X}(\Delta\beta) \lambda^\alpha(v, n) - b_{\beta X}(\Delta\beta) \lambda^\beta(v, n) \end{aligned} \quad (3.4.12)$$

Puterea la arbore:

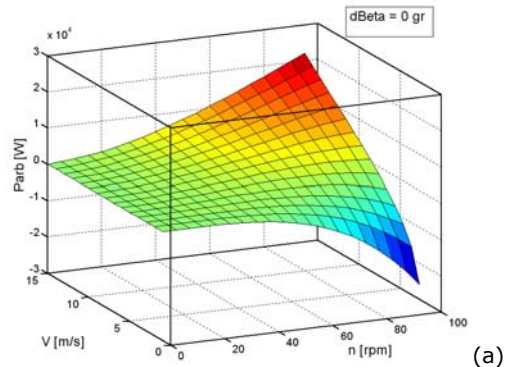
$$\begin{aligned} P_{arb\beta X}(v, n, \Delta\beta) &= M_{arb\beta X}(v, n, \Delta\beta) \omega(n) = \\ &= C_{M\beta X}(v, n, \Delta\beta) \rho v^2 A_v R \omega(n) / 2 \end{aligned} \quad (3.4.13)$$

În Fig.3.4.3 - Fig.3.4.6, se prezintă caracteristicile turbinei WT2-UPT când sistemul de protecție SPAST acționează prin modificarea unghiului de atac, dat prin $\Delta\beta$.

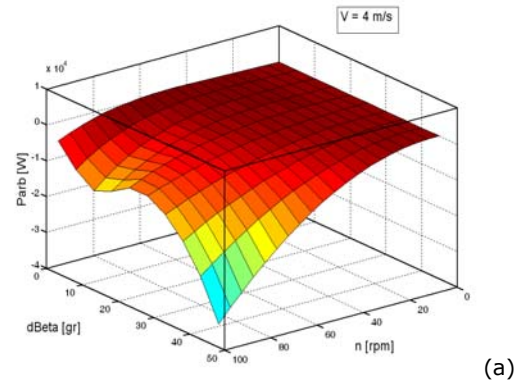
Din Fig.3.4.3, caracteristicile $P_{arb}=F(n)$ cu $\Delta\beta$ constant parametric în domeniul $0^\circ \dots 45^\circ$ și viteza vântului V constantă (în reprezentare 2D), se constată că pe măsură ce crește viteza vântului, efectul de reducere a puterii turbinei este mai importantă. Efectul modificării unghiului de atac, dată prin $\Delta\beta$

considerat constant, la modificarea vitezei vântului V în domeniul 1m/s ... 15 m/s, poate fi observat în reprezentarea 2D din Fig.3.4.4.

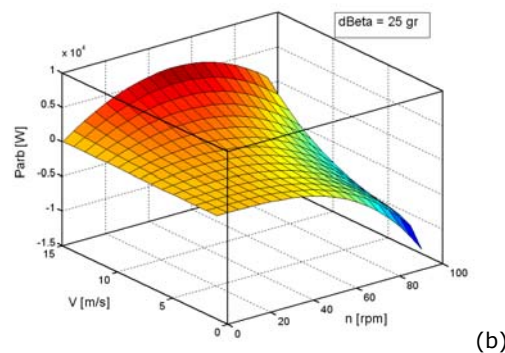
Relațiile de estimare prin metode de regresie ale puterii la arborele turbinei WT2-UPT este prezentat în reprezentare 3D, $P_{arb} = F(n, V, \Delta\beta)$, în Fig.3.4.5, sub forma $P_{arb} = F(n, V)$ cu $\Delta\beta = const.$ (pentru $\Delta\beta = 0^\circ, 25^\circ, 45^\circ$) și în Fig.3.4.6, prin relația $P_{arb} = F(n, \Delta\beta)$ cu $V = const.$ (pentru $V = 4, 8$ și 15 m/s).



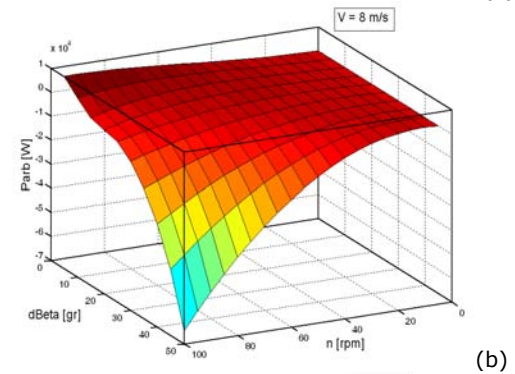
(a)



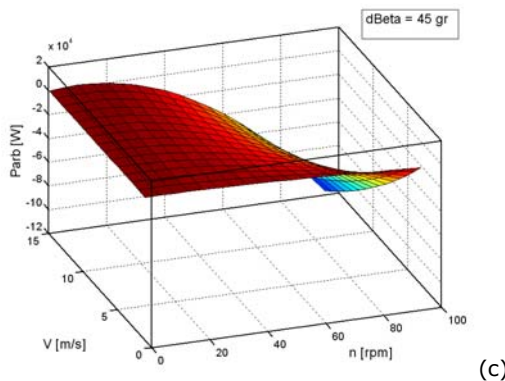
(a)



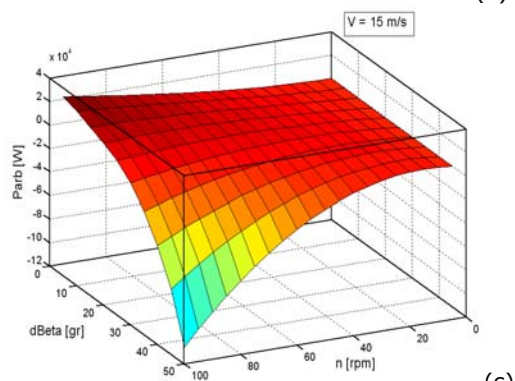
(b)



(b)



(c)



(c)

Fig.3.4.5. WT2-UPT Caracteristica $P_{arb}=F(n,V)$ cu $\Delta\beta$ constant (reprezentare 3D): (a) $\Delta\beta= 0^\circ$; (b) $\Delta\beta= 25^\circ$; (c) $\Delta\beta= 45^\circ$.

Fig.3.4.6. WT2-UPT Caracteristica $P_{arb}=F(n, \Delta\beta)$ cu V constant (reprezentare 3D): (a) $V= 4$ m/s; (b) $V= 8$ m/s; (c) $V= 15$ m/s.

3.4.3. Sistemul de protecție la supraturaj

Structura sistemului de protecție automată la supraturaj (SPAST)

Sistemul de protecție la supraturaj a unui agregat aeroelectric are rolul de a modifica caracteristicile aerodinamice ale turbinei eoliene, la depășirea unei turații limită ($n_{WT} > n_{WT\ Lim}$), astfel încât turația turbinei eoliene să scadă.

Creșterea turației turbinei eoliene poate avea loc datorită unei creșteri a vitezei vântului (în rafală de scurtă durată sau în rafală de lungă durată) reprezentând un real pericol, prin creșterea solicitărilor mecanice la care sunt supuse componentele mecanice ale agregatului eolian (palete, rotor, nacelă, turn) sau prin suprasolicitarea (curent, tensiune, putere, termic, etc.) a componentelor electrice ale WECS (generator, conversoare electronice de putere, echipamentele electrice, etc.).

În cazul în care viteza vântului se menține mare sau crește în continuare, posibilitatea de frânare prin metodele "clasice", prin cuplul de frânare electrodinamică, limitat de parametrii electrice ai generatorului sau echipamentului electric, și, respectiv, prin cuplul de frânare electromecanică, limitat de cuplul de frecare și de turația la care poate acționa, nu mai pot asigura cuplul de frânare necesar, cuplul turbinei eoliene fiind foarte mare.

Sistemul de protecție la supraturaj a WT2-UPT

Literatura de specialitate nu oferă soluții explicite de calcul pentru sistemele automate de protecție la supraturare. În cadrul programului de cercetare [EEA 2009] s-a realizat o soluție originală prin care paletelile rotorice sunt legate între ele prin intermediul unui mecanism bielă-manivelă. Mișcarea

lor simultană de rotație se transformă în mișcare de translație, prin care se comprimă un arc elicoidal și se activează un amortizor hidraulic. Fiind un sistem cu autoreglare, va oscila în jurul poziției de echilibru. Amortizorul hidraulic are rolul de a atenua viteza de oscilație și în acest fel se îmbunătățește dinamica întregului sistem. Sistemul cu mecanism centrifugal de punere în drapel a paletelor rotorice este preconizat a fi utilizat pentru turbine eoliene cu puterea în domeniul de 5 ... 10 kW. Acest sistem intră în funcțiune doar când turația rotorului depășește o anumită limită maximă admisă. Dacă viteza vântului scade sau cauza supraturării dispăre, sistemul reduce paletetele în poziție normală de lucru.

Deplasarea mecanismului se poate efectua între x_{min} , corespunzătoare poziției inițiale cu unghiul de instalare β_0 și x_{max} , corespunzătoare poziției finale cu unghi de atac β_{max} , $\Delta\beta_{max}=45^\circ$.

Funcția de transfer a mecanismului $H(s)$ este

$$\begin{aligned} H(s) &= X(s) / F_x(s) = 1 / (ms^2 + c_a s^1 + k_e) = \\ &= (1 / m) / (s^2 + (c_a / m)s^1 + (k_e / m)) = \\ &= b_{0SPST} / (s^2 + a_{1SPST} s^1 + a_{0SPST}) \end{aligned} \quad (3.4.19)$$

unde coeficienții sunt dependenți de coeficientul de amortizare al amortizorului c_a , are valori diferite la mișcarea de compresie a resortului, c_{a1} , și la mișcarea de revenire a resortului, c_{a2} , $c_{a1} < c_{a2}$, k_e - coeficientul de elasticitate al resortului și m - masa echivalentă a paletetei și mecanismului :

$$a_{1SPST} = c_a / m, a_{0SPST} = k_e / m, b_{0SPST} = 1 / m. \quad (3.4.20)$$

Mișcarea mecanismului SPAST va fi rapidă în sensul creșterii lui $\Delta\beta$, asigurând un răspuns rapid, respectiv, una mai lentă la revenire spre poziția inițială, în sensul scăderii lui $\Delta\beta$. În Fig.3.4.9 se prezintă blocul de selecție a comportării sistemului SPAST, pe baza comparației turației curente n_{WT} cu valoarea anterioară $n_{WT\ i-1}$. Ieșirea din acțiune a SPAST se obține numai dacă se menține funcționarea turbinei eoliene la o turație sub limita de acționare, $n_{WT} < n_{WT\ lim}$, un timp suficient ca mișcarea de revenire să își încheie cursa, unghiul de atac al paletetelele revenind la poziția inițială, cu $\Delta\beta_{min} = 0$.

4. Sisteme WECS bazate pe generatorul DSWIG

4.1. Modelarea generatorului DSWIG

Sintetizând tematica unui mare număr de lucrări de specialitate, în cadrul acestui capitol se definesc principalele tensiște de conducere a sistemelor de conversie a energiei eoliene echipate cu generatoare DSWIG.

Generatorul de inducție cu două înfășurări statorice trifazate similare separate, bobinate cu un același număr de poli și un rotor standard în colivie, deplasate în spațiu una față de cealaltă la 90 de grade electrice (dispunere spațială ortogonală).

Datorită capabilității de a funcționa la diferite condiții de turație, generatorul de inducție cu două înfășurări statorice ortogonale ("dual stator windings induction generator" - DSWIG), este recomandat să fie utilizat în aplicații eoliene [Yin 2010, Bu 2012, Tut 2014, Bas 2014a].

Comparativ cu generatorul sincron, DSWIG prezintă un set de avantaje cum ar fi:

- controlul tensiunii generatorului nu depinde de turația sistemului de antrenare al generatorului;
- tensiunile celor două înfășurări statorice pot fi diferite;
- creșterea siguranței în funcționare;
- prețul de cost redus.

Controlul DSWIG se poate realiza urmărind două direcții diferite [Bu 2012, Bu 2013, Bu 2014, Bu 2015, Tut 2014, Bas 2014a, Bas 2014b]:

- controlând curentul de sarcină din înfășurarea statorică w_1 prin utilizarea unui convertor de putere de frecvență format dintr-un redresor cu diode, un circuit intermediar de c.c., un invertor, rețeaua / sarcină (consumatorii).

- controlul curentului de excitație din înfășurarea statorică w_2 printr-o sursă de putere reactivă bazată pe un convertor electronic de putere cu elemente de comutație statică.

Prin intermediul controlului posibil menționat mai înainte, se poate asigura că sistemul considerat (turbina eoliană - generator DSWIG - sarcină) funcționează la valoarea maximă a puterii maxim disponibilă la diferite viteze ale vântului.

Sarcina conectată la bornele înfășurării de sarcină w_1 poate consta din: rețeaua trifazată standard (introducând puterea activă în rețeaua generală); rezistențe; motoare; baterie de acumuloare (elemente de stocare a energiei pentru intervalele de timp fără vânt).

Este absolut necesar ca puterea mecanică disponibilă să fie egală cu puterea necesară a sarcinii (considerat la o anumită viteză a vântului și influențată de randamentul echipamentelor de putere din sistem). Uzual, cantitatea necesară de putere se schimbă continuu prin variația consumului sarcinii, în timp ce viteza vântului are o variație aleatoare, ceea ce impune proiectarea unui sistem de înmagazinare a energiei (în baterii de acumuloare electrice, rețeaua electrică generală sau / și o sarcină disipativă de putere)

Capabilitatea de control a sistemului capacitiv plasat în înfășurarea statorică secundară W2 asigură energia reactivă cerută de sarcină (consumatori) [Bu 2012, Bu 2013, Bu 2014, Bu 2015]. Sistemul de conversie hibrid integrat cu ieșire de a.c. și de c.c. bazat pe generatorul DSWIG cu controler static de excitație (SEC), furnizează prin înfășurarea de sarcină W1 putere activă sub forma de energie a.c. cu frecvență variabilă, respectiv, prin înfășurarea de excitație poate furniza o tensiune c.c. prin intermediul circuitului intermediar de c.c. al SEC. Se folosește un sistem de control al alunecării de frecvență, care garantează o bună performanță sistemului.

Dimensionarea optimă a condensatoarelor din cele două înfășurări ale DSWIG, la excitație mixtă, este o problema în atenția specialiștilor [Bu 2010, Bu 2011]. Valoarea optimă a condensatoarelor depinde nu numai de parametrii generatorului, de domeniul de turație și de sarcină, ci este afectată și de curba de putere a turbinei eoliene utilizate. Prin utilizarea unei strategii de decuplare a reglajului puterii active și a puterii reactive, printr-o tehnică de modulație a vectorului spațial din analiza mecanismelor de control ale DSWIG și din modelare a SEC în sistemul de referință de tensiune statorică sincronă d-q.

Asigurarea funcționării a DSWIG cu turație variabilă, la turații mici cu un curent de sarcină mare, poate fi rezolvată prin proiectarea optimă a înfășurărilor statorice, astfel ca să se minimizeze puterea reactivă din înfășurarea de excitație W2, putând elimina condensatorul de excitație din înfășurarea de sarcină și inductanța de filtrare din înfășurarea de excitație, ceea ce are ca și consecință reducerea volumului sistemului [Hua 2010, Liu 2010, Bar 2013, Bu 2014]. Diferitele configurații ale înfășurărilor generatorului de inducție cu două înfășurări statorice DSWIG, trebuie analizate în diferite condiții de funcționare normală și de avarie [Alb 2010].

4.1.1. Modelul matematic al DSWIG cu două înfășurări statorice trifazate ortogonale

Modelul ortogonal pentru DSWIG

Structura generatorului de inducție cu două înfășurări statorice trifazate ortogonale (DSWIG) este dat în Fig.4.1.1. În Fig.4.1.2 se prezintă modelul ortogonal virtual pentru DSWIG.

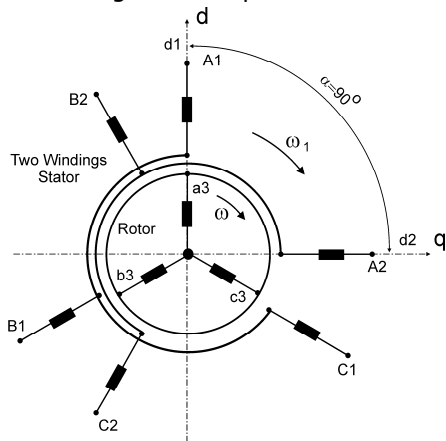


Fig.4.1.1. Structura generatorului de inducție cu două înfășurări statorice trifazate ortogonale (DSWIG)

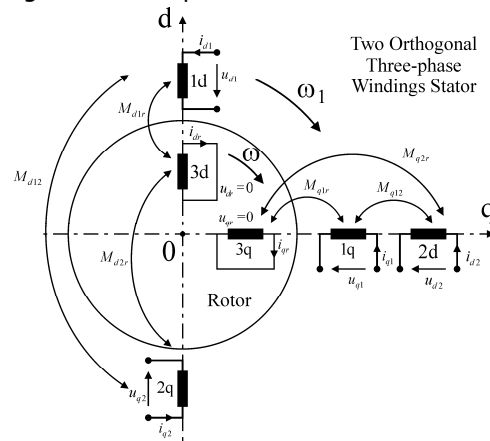


Fig.4.1.2. Modelul ortogonal virtual al DSWIG

Ecuțiile generice ale modelului matematic ortogonal pentru DSWIG (în sistemul axelor de referință d-q) sunt:

$$\begin{cases} U_{d1} = R_1 I_{d1} + \frac{d\psi_{d1}}{dt} - \omega_1 \psi_{q1} \\ U_{q1} = R_1 I_{q1} + \frac{d\psi_{q1}}{dt} + \omega_1 \psi_{d1} \\ U_{d2} = R_2 I_{d2} + \frac{d\psi_{d2}}{dt} - \omega_1 \psi_{q2} \\ U_{q2} = R_2 I_{q2} + \frac{d\psi_{q2}}{dt} + \omega_1 \psi_{d2} \\ U_{dr} = R_3 I_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega_1 - \omega) \psi_{qr} \\ U_{qr} = R_1 I_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega_1 - \omega) \psi_{dr} \end{cases} \quad (4.1.1)$$

unde fluxurile magnetice au următoarele expresii:

$$\begin{aligned}
\psi_{d1} &= L_1 I_{d1} + M_{d12} I_{q2} + M_{d1r} (I_{dr1} - I_{qr2}) \\
\psi_{q1} &= L_1 I_{q1} + M_{q12} I_{d2} + M_{q1r} (I_{qr1} + I_{dr2}) \\
\psi_{d2} &= L_2 I_{d2} + M_{q12} I_{q1} + M_{q2r} (I_{qr1} + I_{dr2}) \\
\psi_{q2} &= L_2 I_{q2} + M_{d12} I_{d1} + M_{d2r} (I_{dr1} - I_{qr2}) \\
\psi_{dr} &= L_3 (I_{dr1} - I_{qr2}) + M_{d1r} I_{d1} - M_{d2r} I_{q2} \\
\psi_{qr} &= L_3 (I_{qr1} + I_{dr2}) + M_{q1r} I_{q1} + M_{q2r} I_{d2}
\end{aligned} \tag{4.1.2}$$

În cazul înfășurărilor satorice ortogonale, între inductanțele considerate pot fi scrise ca având următoarele dependențe (vezi Anexa A)

$$\begin{aligned}
L_1 &= L_2 = L \\
M_{d1r} &= M_{d2r} = M_{q1r} = M_{q2r} = M \\
M_{d12} &= -L \\
M_{q12} &= L
\end{aligned} \tag{4.1.3}$$

ceea ce conduce la următoarele expresii pentru fluxurile magnetice:

$$\begin{aligned}
\psi_{d1} &= L(I_{d1} - I_{q2}) + M I_{dr} = -\psi_{q2} \\
\psi_{q1} &= L(I_{q1} + I_{d2}) + M I_{qr} = \psi_{d2} \\
\psi_{d2} &= L(I_{d2} + I_{q1}) + M I_{qr} = \psi_{q1} \\
\psi_{q2} &= L(I_{q2} - I_{d1}) - M I_{dr} = -\psi_{d1} \\
\psi_{dr} &= L_3 I_{dr} + M(I_{d1} - I_{q2}) \\
\psi_{qr} &= L_3 I_{qr} + M(I_{q1} + I_{d2})
\end{aligned} \tag{4.1.4}$$

Tensiunile satorice U_{d1} , U_{q1} (înfășurarea satorică w_1) și U_{d2} , U_{q2} (înfășurarea satorică w_2) sunt:

$$\begin{aligned}
U_{d1} &= -U_1 \sqrt{3} \sin \theta_1 \\
U_{q1} &= U_1 \sqrt{3} \cos \theta_1 \\
U_{d2} &= -U_2 \sqrt{3} \sin \theta_2 \\
U_{q2} &= U_2 \sqrt{3} \cos \theta_2
\end{aligned} \tag{4.1.5}$$

unde:

U_1 - tensiunea la bornele înfășurării satorice w_1 ;
 U_2 - tensiunea la bornele înfășurării satorice w_2 .
 θ_1 , θ_2 - unghiul de poziție al câmpurilor electromagnetice.

Ecuțiile modelului matematic ortogonal al DSWIG sunt:

$$\begin{cases}
U_{d1} = R_1 I_{d1} + L \left(\frac{dI_{d1}}{dt} - \frac{dI_{q2}}{dt} \right) + M \frac{dI_{dr}}{dt} - \omega_1 [L(I_{q1} - I_{d2}) + M I_{qr}] \\
U_{q1} = R_1 I_{q1} + L \left(\frac{dI_{q1}}{dt} + \frac{dI_{d2}}{dt} \right) + M \frac{dI_{qr}}{dt} + \omega_1 [L(I_{d1} - I_{q2}) + M I_{dr}] \\
U_{d2} = R_2 I_{d2} + L \left(\frac{dI_{d2}}{dt} + \frac{dI_{q1}}{dt} \right) + M \frac{dI_{qr}}{dt} - \omega_1 [L(I_{q2} - I_{d1}) - M I_{dr}] \\
U_{q2} = R_2 I_{q2} + L \left(\frac{dI_{q2}}{dt} - \frac{dI_{d1}}{dt} \right) - M \frac{dI_{dr}}{dt} + \omega_1 [L(I_{d2} + I_{q1}) + M I_{qr}] \\
U_{dr} = 0 = R_3 I_{dr} + L_3 \frac{dI_{dr}}{dt} + M \left(\frac{dI_{d1}}{dt} - \frac{dI_{q2}}{dt} \right) - (\omega_1 - \omega) [L_3 I_{qr} + M(I_{q1} + I_{d2})] \\
U_{qr} = 0 = R_3 I_{qr} + L_3 \frac{dI_{qr}}{dt} + M \left(\frac{dI_{q1}}{dt} + \frac{dI_{d2}}{dt} \right) + (\omega_1 - \omega) [L_3 I_{dr} + M(I_{d1} - I_{q2})]
\end{cases} \tag{4.1.6}$$

Ecuția de mișcare este:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{elm} + M_{WT} \quad (4.1.7)$$

unde

$$M_{elm} - \text{cuplul electromagnetic: } M_{elm} = p_1 M \left[I_{dr} (I_{q1} + I_{d2}) - I_{qr} (I_{d1} - I_{q2}) \right] \quad (4.1.8)$$

M_{WT} - este cuplul dezvoltat de turbina eoliană la arborele generatorului care depinde de caracteristicile constructive și aerodinamice ale turbinei.

Considerând expresiile tensiunilor din înfășurările statorice w_1 și w_2 , respectiv impedanțele conectate la bornele respective, sistemul diferențial devine:

$$\begin{cases} -r_1 I_{d1} + x_1 I_{q1} = R_1 I_{d1} + L \left(\frac{dI_{d1}}{dt} - \frac{dI_{q2}}{dt} \right) + M \frac{dI_{dr}}{dt} - \omega_1 \left[L(I_{q1} - I_{d2}) + M I_{qr} \right] & (1) \\ -x_1 I_{d1} - r_1 I_{q1} = R_1 I_{q1} + L \left(\frac{dI_{q1}}{dt} + \frac{dI_{d2}}{dt} \right) + M \frac{dI_{qr}}{dt} + \omega_1 \left[L(I_{d1} - I_{q2}) + M I_{dr} \right] & (2) \\ -r_2 I_{d2} + x_2 I_{q2} = R_2 I_{d2} + L \left(\frac{dI_{d2}}{dt} + \frac{dI_{q1}}{dt} \right) + M \frac{dI_{qr}}{dt} - \omega_1 \left[L(I_{q2} - I_{d1}) - M I_{dr} \right] & (3) \\ -x_2 I_{d2} - r_2 I_{q2} = R_2 I_{q2} + L \left(\frac{dI_{q2}}{dt} - \frac{dI_{d1}}{dt} \right) - M \frac{dI_{dr}}{dt} + \omega_1 \left[L(I_{d2} + I_{q1}) + M I_{qr} \right] & (4) \\ 0 = R_3 I_{dr} + L_3 \frac{dI_{dr}}{dt} + M \left(\frac{dI_{d1}}{dt} - \frac{dI_{q2}}{dt} \right) - (\omega_1 - \omega) \left[L_3 I_{qr} + M(I_{q1} + I_{d2}) \right] & (5) \\ 0 = R_3 I_{qr} + L_3 \frac{dI_{qr}}{dt} + M \left(\frac{dI_{q1}}{dt} + \frac{dI_{d2}}{dt} \right) + (\omega_1 - \omega) \left[L_3 I_{dr} + M(I_{d1} - I_{q2}) \right] & (6) \\ J \frac{d\omega}{dt} = p_1 M \left[I_{dr} (I_{q1} + I_{d2}) - I_{qr} (I_{d1} - I_{q2}) \right] + M_{WT} & (7) \end{cases} \quad (4.1.12)$$

unde:

$$\begin{aligned} \omega_1 - \omega &= s \omega_1 = 2\pi s f_1 && - s \text{ alunecarea, } f_1 \text{ frecven'a statorică} \\ \omega_1 &= 2\pi f_1 && - \omega_1 \text{ pulsația statorică,} \\ \omega &= 2\pi n = (1-s)\omega_1 && - \omega \text{ viteza unghiulară mecanică} \end{aligned}$$

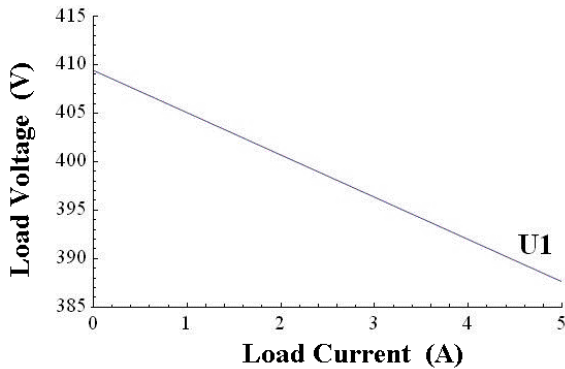


Fig.4.1.3. Dependența dintre tensiunea U_1 și curentul I_1 de sarcină.

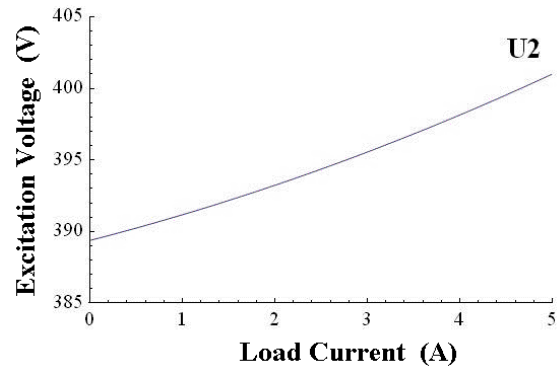


Fig.4.1.4. Dependența tensiunii de excitație U_2 a sistemului de curentul de sarcină I_1 .

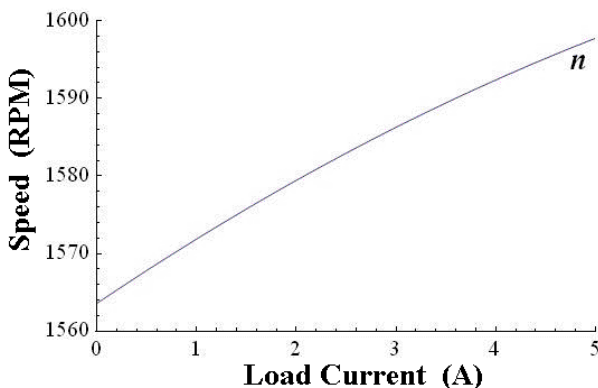


Fig.4.1.5. Dependența vitezei de rotație de curentul de sarcină I_1 .

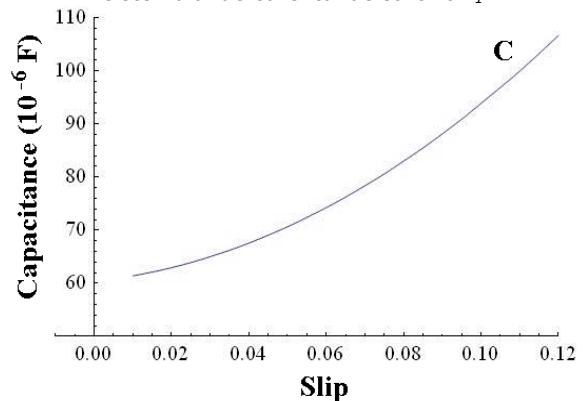


Fig.4.1.6 Dependența capacității sistemului de excitație C_e de alunecare s .

Pentru regimul staționar în sistemul de ecuații se anulează derivatele de timp.

Condițiile inițiale sunt determinate din sistemul de regim staționar, pentru următoarele mărimi: sarcină (curent, tensiune), cuplu și viteza unghiulară [Bor 2009a, Bor 2009b].

Într-un mod similar se pot calcula valorile finale pentru valorile modificate ale sarcinii electrice și ale puterii mecanice (cuplu, viteza unghiulară).

4.1.2. Rezultate în regimul staționar al generatorului de inducție cu două înfășurări statorice trifazate ortogonale (DSWIG)

Este analizată comportarea sistemului în condițiile funcționării în starea inițială și în starea finală pe baza ecuațiilor diferențiale (4.1.12) și staționare (4.1.13) a sistemului [Bor 2009a].

Cazul 1: În cazul unui curent de excitație constant, $I_2=10A$, și a frecvenței de $f=50Hz$, se obțin, prin modificarea curentului de sarcină I_1 în domeniul 0 ... 5A, rezultatele prezentate în figurile Fig.4.1.3 – 5. Cum era de așteptat, creșterea curentului conduce la o descreștere a tensiunii de sarcină cu 5% (Fig.4.1.3). Tensiunea de excitație U_2 crește cu mai puțin de 5% când curentul de sarcină variază de la 0 la I_{1nom} (Fig.4.1.4).

Cazul 2: Dacă se menține tensiunea de sarcină constantă la $U_1=400V$ și a frecvenței $f=50Hz$, se obțin următoarele rezultate de simulare prin modificarea alunecării s în domeniul 0.01 la 0.12 .

Prin creșterea alunecării (creșterea turației generatorului) capacitatea sistemului de excitație C_e crește de la 60 μF la 93 μF (Fig.4.1.6).

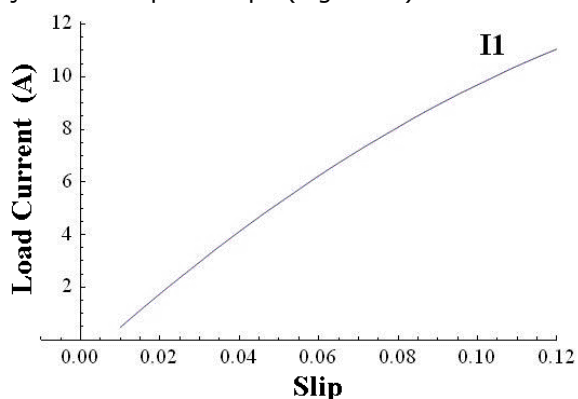


Fig.4.1.7. Dependenta curentului de sarcină I_1 și alunecare s .

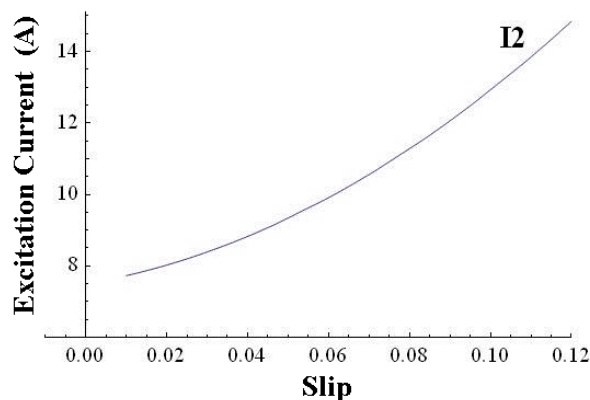


Fig.4.1.8. Dependenta curentului înfășurării de excitație I_2 de alunecare s .

De asemenea, curenții I_1 , de sarcină din înfășurarea de sarcină w_1 , și I_2 , de excitație din înfășurarea de excitație w_2 , cresc odată cu alunecarea, prezentați, respectiv, în Fig.4.1.7 și Fig.4.1.8.

Tensiunea la bornele înfășurării de excitație U_2 crește cu alunecarea, de la 400V la 443V când alunecarea variază de la 0.01 la 0.12 (Fig.4.1.9).

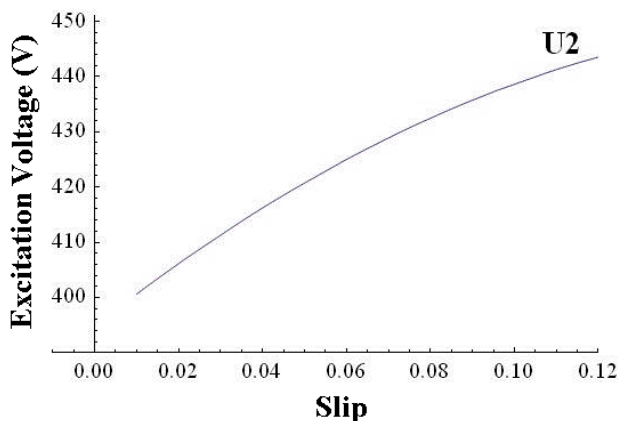


Fig.4.1.9. Dependenta tensiunii sistemului de excitație U_2 de alunecare s .

4.2. Regimurile dinamice ale generatorului de inducție cu două înfășurări statorice trifazate ortogonale (DSWIG)

În continuare se prezintă, bazat pe modelul ortogonal din (4.1.12), rezultatele simulării unui regim specific turbinelor eoliene, la o variație impuls a cuplului turbinei, ceea ce este similar cu efectul determinat de o modificare în rafală a vitezei vântului [Bor 2009b].

Se propune o metodă originală de rezolvare a sistemului nelinier de ecuații diferențiale (4.1.12) în vederea determinării regimurilor dinamice. Rezolvarea sistemului de ecuații (4.1.12) implică cunoașterea condițiilor inițiale la $t = 0$ și a valorii finale obținută când $t \rightarrow \infty$. Cele două înfășurări statorice fiind identice (număr de spire, diametre ale conductoarelor, mod de bobinare, etc.), au valori egale ale parametrilor. În sistemul de ecuații diferențiale neliniare (4.1.12), apare o nedeterminare, două

ecuații fiind cu coeficienți egali. În scopul de a elimina nedeterminarea matematică apărută în sistemul de ecuații diferențiale neliniare, se introduc următoarele relații:

$$\begin{aligned} Q &= I_{d1} - I_{q2} \\ P &= I_{q1} + I_{d2} \end{aligned} \quad (4.2.14)$$

Sarcina rezistivă R_s conectată la bornele înfășurării statorice W_1 de sarcină, impune condițiile:

$$\begin{aligned} X_S &= \frac{-U_{q1}I_{d1} + U_{d1}I_{q1}}{I_{d1}^2 + I_{q1}^2} = 0 \\ U_{d1}I_{q1} &= U_{q1}I_{d1} \end{aligned} \quad (4.2.15)$$

în timp ce "sistemul" capacitiv, (realizat prin condensatoare, convertoare, etc.), conectat la bornele înfășurării statorice W_2 de excitație, (rezistența echivalentă a sistemului de excitație a fost neglijată), impune:

$$\begin{aligned} X_e &= -\frac{1}{\omega_1 C_e} \\ R_e &= 0 \end{aligned} \quad (4.2.16)$$

Din ecuațiile (4.1.12.2, 4.1. 12.3) sau (4.1. 12.1, 4.1.12.4) a sistemului (4.1.12) se obține sistemul:

$$\begin{cases} I_{d1} - I_{q2} = Q \\ I_{q1} + I_{d2} = P \\ 200\sqrt{3} - 4.36I_{q1} = -\frac{1}{\omega_1 C_e} I_{q2} - 4.36I_{d2} \\ 200 - 4.36I_{d1} = -\frac{1}{\omega_1 C_e} I_{d2} - 4.36I_{q2} \\ \omega_1 = 314. \\ C_e = 67.172 \times 10^{-6} \end{cases} \quad (4.2.19)$$

Rezolvând sistemul (4.2.19), se obțin curenții statorici ca funcții de P și Q , care după înlocuirea expresiilor obținute pentru curenți în funcție de P și Q din (4.2.20) se obține în continuare, un sistem de ecuații diferențiale echivalent.

În continuare se va analiza, comportarea DSWIG la o solicitare de creștere și descreștere a cuplului turbinei M_{WT} .

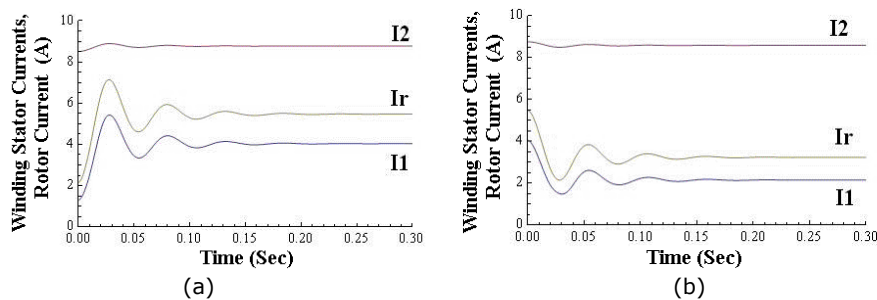


Fig.4.2.1. Variația curenților statorici, I1 , I2 și a curențului rotoric, Ir : (a) Cazul 1; (b) Cazul 2.

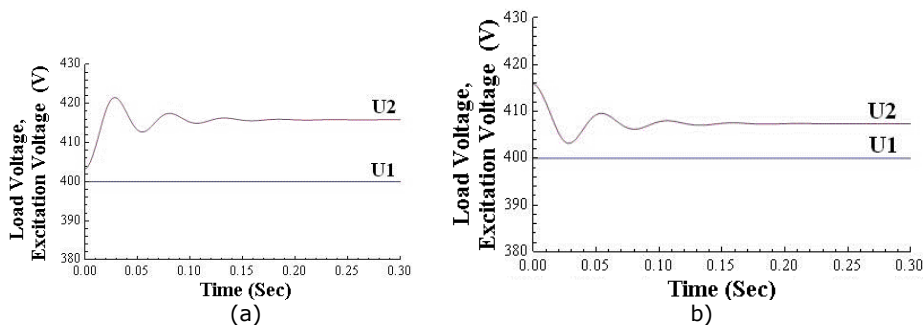


Fig.4.2.2. Variația tensiunii de sarcină U1 și de excitație U2: (a) Cazul 1; (b) Cazul 2.

Regimul tranzitoriu este definit de modificările treaptă ale cuplului turbinei M_{WT} (Tabelul 4.1.1), corespunzător celor două cazuri: (**Caz 1**) creștere de la valoarea inițială (la momentul $t=0$), $(M_{WT})_0 = 10.0 Nm$, la valoarea finală (la momentul $t=0_+$), $(M_{WT})_\infty = 25.744 Nm$; (**Caz 2**) descreștere de

la valoarea inițială (la momentul $t=0$), $(M_{WT})_0 = 25.744 Nm$, la valoarea finală (la momentul $t=0_+$), $(M_{WT})_\infty = 15.0 Nm$.

4.2.1. Rezultatele simulării. Regimul dinamic al DSWIG - pentru Cazul 1, respectiv Cazul 2

Intervalul de timp al tranziției în ambele cazuri, de creștere și descreștere a cuplului turbinei, este de $\Delta t=0,2\text{sec}$. Variația curentului statoric I_1 în înfășurarea de sarcină W1 este similară cu cea a curentului rotoric I_r .

Variația cuplului electromagnetic M_{elm} calculată cu relația (4.2.27) este redată în Fig.4.2.3.

$$M_{elm} = 0.596I_{dr}P - 0.596I_{qr}Q \quad (4.2.27)$$

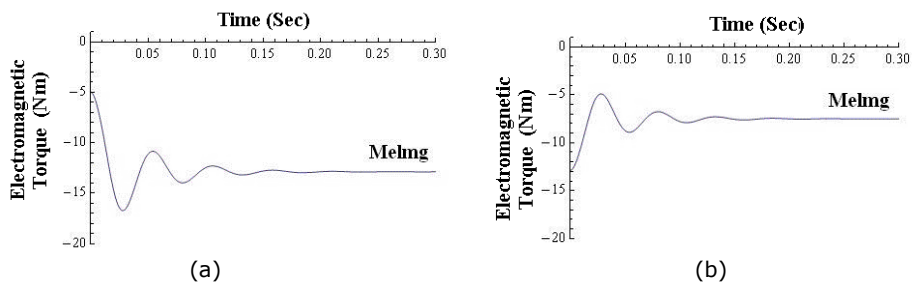


Fig.4.2.3. Variația cuplului electromagnetic M_{elm} : (a) Cazul 1; (b) Cazul 2.

Este posibil ca pe durata descreșterii cuplului mecanic, în procesul de tranziție, cuplul electromagnetic să obțină valori pozitive, corespunzătoare unui cuplu cu caracter motor. Aceasta se poate întâmpla pentru valori finale mici ale cuplului turbinei, $(M_{WT})_\infty < 4 Nm$.

Fig.4.2.4 și Fig.4.2.5 prezintă, respectiv, variația vitezei de rotație mecanice n , $n = 60(1-s)f_1 / p_1$ și a alunecării s .

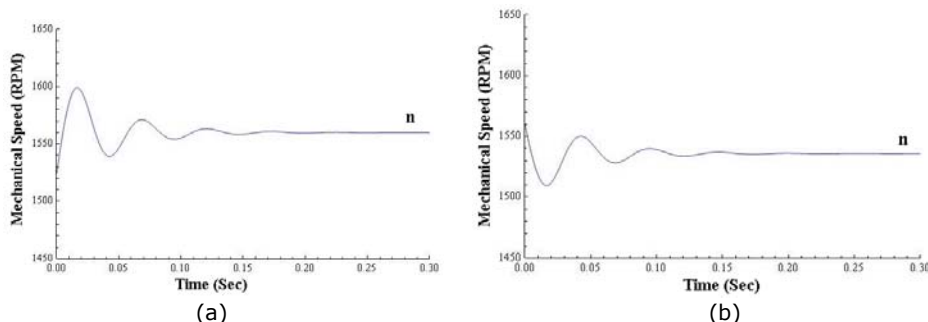


Fig.4.2.4. Variația vitezei de rotație mecanice: (a) Cazul 1; (b) Cazul 2

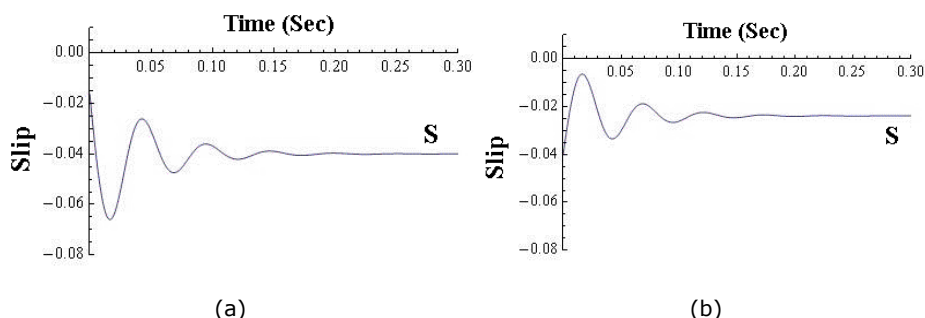


Fig.4.2.5. Variația alunecării s : (a) Cazul 1; (b) Cazul 2.

Regimul tranzitoriu este realizat în *Cazul 1*, printr-o creștere în treaptă a cuplului mecanic la arbore, și în *Cazul 2*, printr-o descreștere în treaptă a cuplului mecanic, care reproduce cazul unor solicitări ale sistemului WECS cu rafale de vânt manifestate prin creșterea și descreșterea vitezei vântului [Bor 2009b].

Rezolvarea unei nedeterminări rezultate din simetria parametrilor înfășurărilor statorice ale DSWIG, în vederea simulării DSWIG în regim dinamic, s-a realizat printr-o metodă originală.

4.3. Rezultate experimentale, probleme și soluții privind DSWIG pentru sisteme de conversie a energiei regenerabile

Generatorul de inducție cu două înfășurări statorice trifazate având același număr de poli și rotorul scurtcircuitat în colivie. Înfășurările statorice separate au funcții distincte - excitație și, respectiv, generarea de energie electrică, aceasta asigurând decuplarea fizică a excitației și a sarcinii, astfel un

control simplificat. S-a considerat o deplasare spațială de 90 grade electrice între înfășurarea de excitație și cea de sarcină, ortogonalitate care asigură decuplarea magnetică mutuală a celor două înfășurări. Se prezintă, în principal, rezultate experimentale asupra funcționării în modul de funcționare în sarcină. O altă problemă fiind cea a armonicilor curenților datorită prezenței a diferite tipuri de redresoare la bornele generatorului [Bud 2010a].

Controlul tensiunii, în cazurile metodelor de excitație considerate mai sus, poate fi realizat, corespunzător pe diferite căi [Bud 2007]:

- modificarea valorii vitezei de rotație în cazul unei valori constante a condensatorului din sistemul de excitație al DSWIG,
- modificând valoarea condensatorului de excitație în trepte egale sau normalizate.
- modificarea excitației sistemului de compensare capacitivă sincronă [Bud 2007],
- controlul tensiunii și frecvenței inverterului de excitație [Mir 2007], și altele.

4.3.1. Caracteristica de regim staționar al DSWIG cu autoexcitație

DSWIG experimental de putere mică a fost obținut prin transformarea constructivă a unui motor de inducție convențional de tip AT13 S-8 (ELECTROMOTOR, Romania): $P_{R\text{ mechanical}}=2928\text{ W}$, $n_R=709\text{ RPM}$, $U_R=230/400\text{ V}$, $I_R=6.14\text{ A}$, $\cos\varphi_R=0.688$, $\eta_R=0.751$.

DSWIG astfel realizat are următorii parametrii caracteristici constructivi:

- deplasarea dintre înfășurările statorice 80 grade electrice (aproximativ ortogonal),
- tensiunea de fază: 230V,
- curentul de fază: 3.5 A.

Din oportunități ale cercetării practice, s-a luat în seamă cel mai ușor accesibil sistem de excitație - excitație prin condensator, condensatoarele având valoarea capacității $C = 56\mu\text{F}$, respectiv $C = 40\mu\text{F}$. Controlul valorilor mărimilor interesate U_1 , I_1 și U_2 se poate realiza prin modificarea vitezei de rotație a generatorului.

S-au experimentat diferite moduri de funcționare cu sarcină în curent alternativ și în curent continuu:

(a). sistem de excitație cu capacitate constantă $C = 56\mu\text{F}$, conectat la înfășurarea de sarcină w_2 , înfășurarea de excitație în gol (echivalent cu sistemul de excitație a generatorului convențional în înfășurarea statorică trifazată), $n = \text{const.}$

(b). Sistemul de excitație cu capacitate constantă $C = 56\mu\text{F}$, conectat la înfășurarea de excitației w_1 , $n = \text{const.}$

(c). sistemul de excitație cu capacitate constantă $C = 56\mu\text{F}$, conectat la înfășurarea de sarcină w_2 , înfășurarea de excitație în gol (echivalent cu sistemul de excitație a generatorului convențional în înfășurarea statorică trifazată), $U = \text{const.}$, $n = \text{var.}$

(d). Sistemul de excitație cu capacitate constantă $C = 56\mu\text{F}$, conectat la înfășurarea de excitație w_1 , $U_2 = \text{const.}$, prin modificarea vitezei de rotație $n = \text{var.}$

(e). Sistemul de excitație cu capacitate constantă $C = 40\mu\text{F}$, conectat la înfășurarea de excitație w_1 , $I_{ex} = \text{const.}$, $n = \text{var.}$

(f). Sistemul de excitație cu capacitate constantă $C = 56\mu\text{F}$, conectat la înfășurarea de excitație w_1 , control al tensiunii optimal $U \cong U_R (f / f_R) \sqrt{M / M_R}$ prin modificarea vitezei de rotație $n = \text{var.}$, folosind sarcina rezistivă a.c. conectată direct la generator.



Fig.4.3.1. Stand de testare experimentală pentru generatoare de energie din surse regenerabile cu viteză variabilă (respectiv DSWIG, PMSG) realizat la Universitatea Politehnica Timișoara.

Rezultatele experimentale, au fost obținute pe un stand de testare experimentală pentru generatoare de energie din surse regenerabile cu viteză de rotație variabilă (Fig.4.3.1) realizat la Universitatea Politehnica Timișoara.

În Tabelul 4.3.7 se prezintă comparația rezultatelor experimentale cu cele teoretice obținute prin utilizarea modelului matematic particularizat pentru cazul amplasării ortogonale a înfășurărilor statorice ale generatorului (amplasarea reală constructivă este de 80 gr.el.).

Tabel 4.3.7. Compararea variabilelor de funcționare a DSWIG experimentale și rezultatele teoretice obținute prin utilizarea modelului matematic al DSWIG particularizat pentru cazul amplasării ortogonale a înfășurărilor statorice

Mod de determinare	Variabile cunoscute		Variabile necunoscute			
	$R_{load}[\Omega]$	$U_1[V]$	$n[RPM]$	$I_1[A]$	$U_{load}[V]$	$I_{load}[A]$
Experimental	∞	69.1	372	1.95	70.00	0.00
Model teoretic "d-q"	∞	69.1	372	1.90	68.63	0.00
Model teoretic fazorial	∞	69.1	372	1.87	58.01	0.00
Experimental	75	70.7	405	2.15	70.00	0.90
Model teoretic "d-q"	75	70.7	405	2.65	69.02	0.92
Model teoretic fazorial	75	70.7	405	2.52	57.46	0.77
Experimental	70	75.1	410	2.25	70.00	1.10
Model teoretic "d-q"	70	75.1	410	2.99	73.52	1.05
Model teoretic fazorial	75.1	410	2.89	60.51	0.87	
Experimental	50	74.5	426	2.30	70.50	1.35
Model teoretic "d-q"	50	74.5	426	3.55	71.13	1.42
Model teoretic fazorial	50	74.5	426	3.51	56.67	1.13
Experimental	25	86.5	547	3.16	72.70	3.00
Model teoretic "d-q"	25	86.5	547	5.68	67.52	2.70
Model teoretic fazorial	25	86.5	547	6.03	39.12	1.56

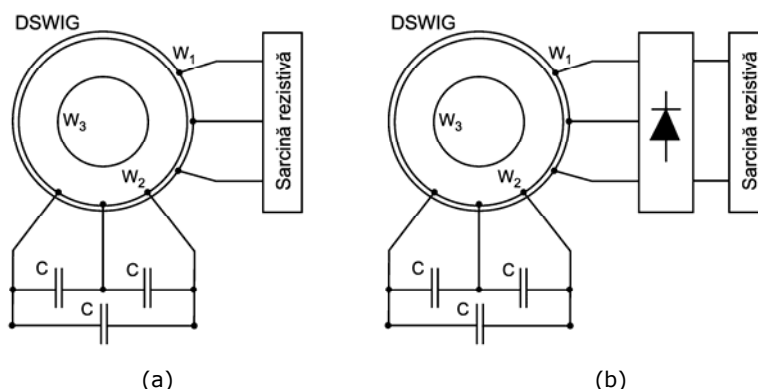


Fig.4.3.2. Structura a două sisteme similare de convertoare cu ieșirea a.c. (a), respectiv ieșirea c.c. (b) pentru o sarcină cu caracter rezistiv.

4.3.2. Problema armonicilor DSWIG în sistemul WECS

Este cunoscut faptul că în cazul sistemelor de conversie a energiei eoliene, în mod obișnuit viteza de rotație a sistemului este variabilă, fiind nevoie de un convertor electronic de putere a.c.-c.c.-a.c., având la ieșirea generatorului / la bornele de intrare, redresoare necomandate / comandate [Che 2009, Wan 2005]. Un astfel de redresor sau un inverter controlat poate fi prezent în circuitul de sarcină DSWIG precum și în circuitul de excitație DSWIG.

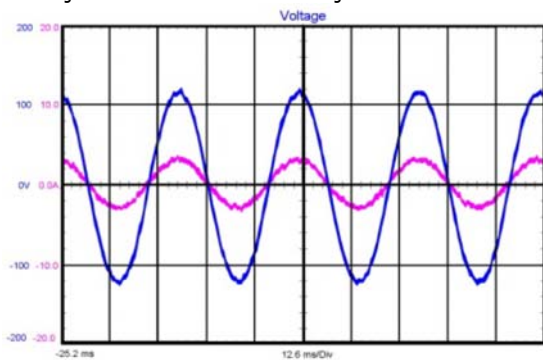


Fig.4.3.3. Valori reduse ale armonicilor curentului și tensiunii în cazul din Fig.4.3.2a, pentru funcționarea în regimul $n=496 \text{ RPM}$, $I_1=3.2 \text{ A}$, $I_2=2.7 \text{ A}$

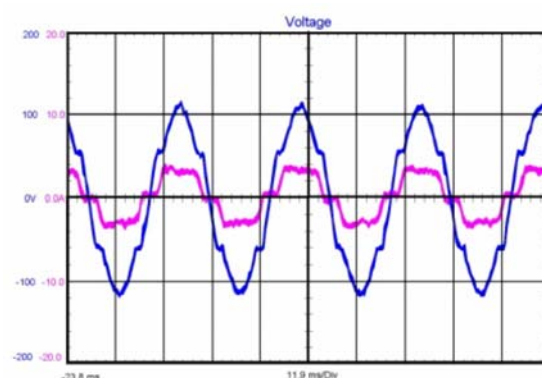


Fig.4.3.4. Valori mari ale armonicilor curentului și tensiunii în cazul din Fig.4.3.2b, pentru funcționarea în regimul $n=549 \text{ RPM}$, $I_1=3.5 \text{ A}$, $I_2=3.0 \text{ A}$

În Fig.4.3.2a,b sunt prezentate schemele a două sisteme de conversie, cu generatorul de inducție cu două înfășurări statorice DSWIG, cu ieșire a.c., respectiv cu ieșire c.c., sarcina având caracter rezistiv.

În Fig.4.3.12- Fig.4.3.15, se dau rezultatele analizei experimentale ale armonicilor de curent și tensiune pentru sistemele de conversie din Fig.4.3.2a,b, adică în absența sau în prezența redresorului la bornele generatorului, pentru conexiunea "Y" și "Δ" ale fazelor înfășurărilor de sarcină ale generatorului, pentru anumite regimuri specifice de funcționare.

Comparativ, coeficientul total de distorsiune armonică THD, în cazul sistemului din Fig.4.3.2a, fără redresor la bornele generatorului, are, ca exemplu pentru $n = 496$ RPM, $I_1 = 3,2$ A, $I_2 = 2,7$ A (Fig.4.3.12), valoarea THD = 1,6% pentru intensitatea curentului și THD = 1,4% pentru tensiune, atunci când, în cazul sistemului de Fig.4.3.2b, conexiunea "Y" a înfășurării de sarcină, cu redresor la bornele generatorului, are, ca de exemplu, pentru $n = 530$ RPM, $I_1 = 3.1$ A, $I_2 = 2.46$ A (Fig.4.3.13), valoarea THD = 20,8% pentru intensitatea curentului și THD = 9,2% pentru tensiune.

Rezultatele experimentale pentru conexiune "Δ", a înfășurărilor de sarcină ale generatorului (Fig.4.3.14a,b) au valori aproape de cele de mai sus.

Rezultatele prezentate mai sus conduc la următoarele concluzii:

Convertoare electronice (redresor necomandat, redresoare comandate, și altele) determină deformări importante ale curenților generatorului și a tensiunilor, și, ca urmare, pierderi suplimentare, încălziri și scăderea eficienței.

4.3.3. Rejecția armonicilor curentului și a tensiunii înfășurărilor generatorului datorate conectării directe la redresor

Este un fapt cunoscut că, datorită unor cauze interne importante (distribuția spațială a înfășurărilor, saturației totale sau parțiale a circuitului magnetic al mașinii, decalajul constructiv inegal între înfășurările statorice ale mașinii, în special în cazul polilor aparenti, etc.) sau de cauze externe (curentul de rectificat / de conversie), tensiunea și curentul, sunt periodice, dar au o funcționare nesinusoidală, care conține armonici de diferite ordine.

Armonica a 3-a și armonicile multiplu de trei pot fi eliminate / reduse de conexiune "Δ" a înfășurărilor trifazate. Această soluție nu rezolvă problema armonicilor din DSWIG, deoarece aceste armonici sunt mici și, pe de altă parte, conexiunea "Δ" nu rezolvă celelalte armonici de alte ordine.

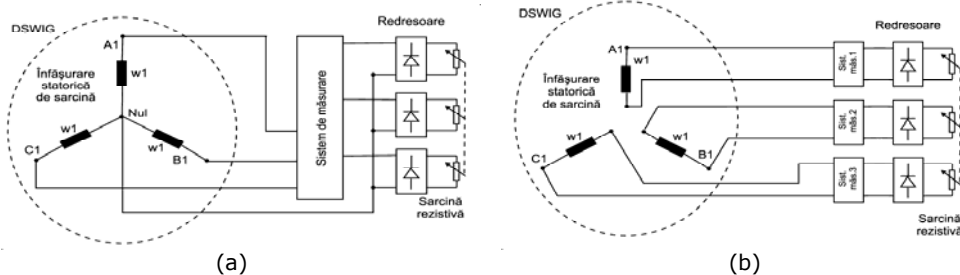


Fig.4.3.5. DSWIG cu redresarea separată a curentului fiecărei faze a înfășurării statorice de sarcină: (a) ieșirile cu punct de nul comun; (b) ieșirile izolate între ele.

Ca o posibilă soluție de reducere a armonicilor curentului, s-a considerat și experimentat redresarea separată a fiecărui curent de fază a celor trei înfășurări de fază a statorului de sarcină, așa cum este arătat în Fig.4.3.5.

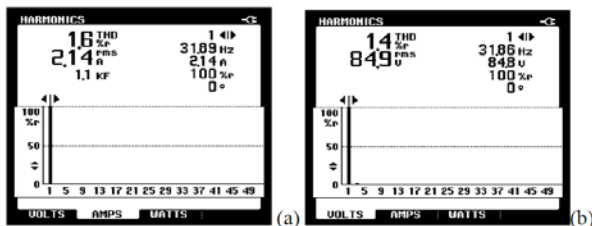


Fig.4.3.12. Armonicele de curent și tensiune în cazul din Fig.4.3.2a, conexiune Y a înfășurărilor statorice de sarcină, $n = 496$ rpm, $I_1=3.2$ A, $I_2=2.7$ A.

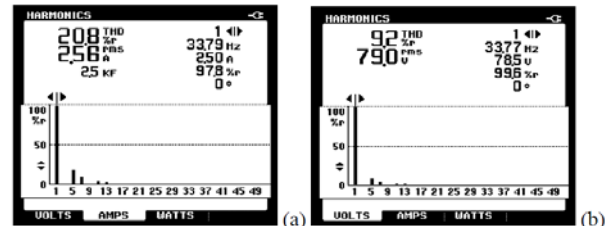


Fig.4.3.13. Armonicele de curent și tensiune în cazul din Fig.4.3.2b, conexiune Y a înfășurărilor de fază statorice de sarcină, $n = 496$ rpm, $I_1=3.2$ A, $I_2=2.7$ A.

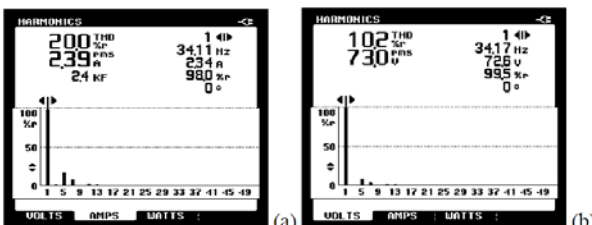


Fig.4.3.14. Armonicele de curent și tensiune în cazul din Fig.4.3.2b, conexiune "Δ" a înfășurărilor statorice de sarcină, $n = 546$ rpm, $I_1=3.1$ A, $I_2=2.41$ A.

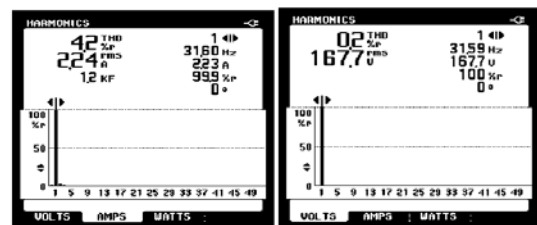


Fig.4.3.15. Armonicele de curent și tensiune în cazul din Fig.4.3.5b, cu redresarea separată a fiecărui curent de fază.

La UPT au fost efectuate de asemenea, studii preliminare de simulare comparative simplificate, în cazul punții trifazate cu diode, în conexiune de redresoare a fazelor statorice a generatorului, serie și în paralel. Se poate observa, din rezultatele preliminare de simulare, armonicile celor trei sisteme considerate, superioritatea redresorului în punte trifazat convențional (conexiune "Y" a fazele generatorului și punte trifazată cu diode redresoare). Soluții pentru a reduce distorsiunea curentului în

sistemul de sarcină, precum și în sistemul de excitație a sistemului WECS considerat, va fi în obiectivele de cercetare de la Universitatea Politehnica Timișoara.

4.3.4. Măsurători ale armonicilor de frecvență pentru configurațiile și regimurile considerate.

Fig.4.3.12.a,b prezintă măsurători ale armonicilor de curent (a) și de tensiune (b) realizate pe standul de la Universitatea Politehnica Timișoara, în cazul din Fig.4.3.1, în conexiunea "Y" a înfășurărilor statorice de sarcină, $n = 496 \text{ rpm} = \text{const.}$, $I_1=3.2\text{A}$, $I_2=2.7\text{A}$.

Ca o posibilă soluție la reducerea armonicilor s-a considerat și investigat redresarea separată a fiecărui curent de fază a cele trei înfășurări de fază a statorului de sarcină. Soluția propusă, care este una din mai multe soluții posibile de rezolvare a problemei de diminuare a armonicilor superioare de tensiune și de curent. Problema va fi luată în considerare în viitoarele cercetări ale echipei.

Printr-o proiectare electromagnetă adecvată, interfețe corespunzătoare cu sistemul de excitație și cu sistemul de sarcină (rețea / consumatori), precum și controlul decuplat al excitației și de sarcină, se pare a fi, eventual, o alternativă viabilă pentru a obține un generator electric pentru grupuri electrogene neconvenționale .

4.4. Algoritm de proiectare, a unui DSWIG dintr-un motor de inducție convențional

Se prezintă o metodă de proiectare pragmatică a generatoarelor de inducție cu două înfășurări statorice (DSWIG) deplasate în spațiu, una față de alta, cu un unghi de 90 gr. el., care se poate obține prin rebobinarea unor motoare de inducție convenționale de serie cu rotor în scurtcircuit în colivie.

La Universitatea Politehnica Timișoara (România) (UPT) au fost studiate generatoare de inducție cu două înfășurări statorice, w_1 și w_2 , trifazate (DSWIG) (Fig.4.4.1), cu un număr egal de poli $p_1 = p_2$, deplasate în spațiu la $\alpha = 90$ de grade electrice, care au ca rezultat avantaje importante [EEA-2009],[PRO-2009]. În ultimul timp, în scopul de a reduce prețul WECS de putere mică, se propun să fie utilizate generatoare de inducție cu turație mare, dimensiuni mici și greutate mică, cu un preț redus, antrenate de turbine de vânt de turație mică prin amplificatoare de turație. În cele ce urmează se propune o metodă de proiectare a înfășurărilor ortogonale ($\alpha = 90 \text{ gr.}$ el.) ale DSWIG, care se pot obține din motoare de inducție convenționale cu rotor în scurtcircuit, existente în fabricația curentă. În Fig.4.4.2 și Fig.4.4.3 sunt prezentate cele două posibilități de excitație.

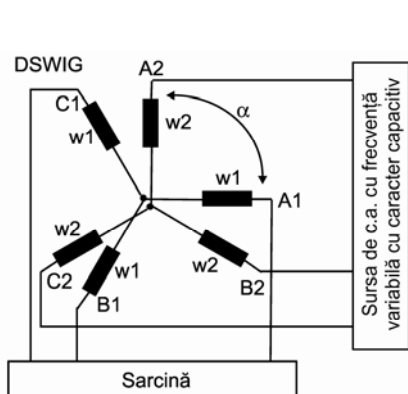


Fig.4.4.2. Sistemul de excitație a DSWIG numai în înfășurarea statorică W_2 .

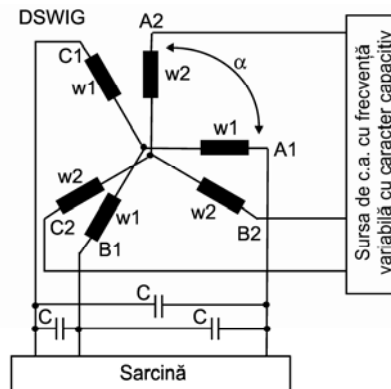


Fig.4.4.3. Sistem de excitație

4.4.1. Proiectarea înfășurărilor statorice ale DSWIG obținabil din motoare de inducție convenționale

În cele ce urmează se prezintă o metodă pragmatică originală de proiectare a înfășurărilor statorice ale DSWIG având același număr de perechi de poli pentru ambele înfășurări statorice, obținut prin modificări constructive minime, din motoare de inducție convenționale cu rotor în scurtcircuit, care au o putere aproape de cea a generatorului DSWIG necesar și cu aceeași viteză de rotație nominală [Bar 2013, Bor 2014, Bu 2014, PRO-2013]. Aceste motoare de inducție, existente în procesul de fabricație curentă, numite "motoare / mașini de referință" MRF, păstrând aceeași: turație nominală, parametrii electrici și magnetici (același circuit magnetic și același rotor).

Pentru metoda de proiectare elaborată, a fost stabilit un algoritm de calcul implementat într-un program de proiectare asistată de calculator în Matlab. Organigrama programului de calcul de dimensionare a DSWIG este prezentată în Fig.4.4.4.

Algoritmul are trei părți principale:

(a) Algoritmul de calcul al parametrilor "mașinii de referință" (MRF)

- valorile parametrilor $R_1, X_1, R_2', X_2', R_m, X_m$, rezultând din încercările în gol și în scurtcircuit (STAS 7246/5-74) pentru regim nominal; R_m, X_m pot fi determinate și pe cale analitică așa cum se prezintă în studiul extins.
- valorile parametrilor $R_1, X_1, R_2', X_2', R_m, X_m$, pentru regim diferit de cel nominal.
- numărul de spire w_{MRF} și diametrul d_{MRF} al spirelor înfășurărilor MRF din buletinul de încercări uzinale ;
- curentul admisibil de sarcină permanentă $(I_{MRF})_{admis}$ la tensiune și frecvență nominală a MRF;

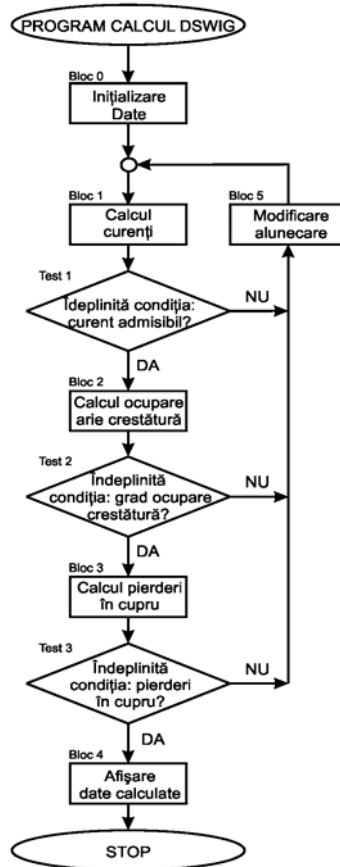


Fig.4.4.4. Algoritm de calcul de dimensionare a DSWIG

(b) Algoritm de calcul al parametrilor al generatorului DESWIG din cei ai "mașinii de referință" (MRF) pentru condiții nominale în două variante.

- Calculul curenților $(I_{w1,N})_{DSWIG}$, $(I_{w2,N})_{DSWIG}$ și al curentului total în crestătura statorică $(I_{\Sigma})_{DSWIG}$ în cazul realizării integrale a curentului de magnetizare nominal cu ajutorul înfășurării statorice de excitație w_2
- Calculul curenților $(I_{w1,N})_{DESWIG}$, $(I_{w2,N})_{DESWIG}$ și al curentului total în crestătura statorică $(I_{\Sigma})_{DESWIG}$ în cazul realizării excitației cu ambele înfășurări statorice w_1 și w_2 ale generatorului dual

(c) Algoritm de calcul al parametrilor și mărimi ale generatorului DESWIG pentru cele două variante de la punctul (b):

- pierderile în DESWIG - pierderi în fier, pierderi în cuprul înfășurărilor, pierderi mecanice, pierderi suplimentare
- randamentul DESWIG

(d) Algoritm de calcul al caracteristicilor ale generatorului DESWIG pentru regimuri de funcționare a unor sisteme electrogene neconvenționale uzuale.

- Calculul caracteristicilor DESWIG în cazurile $U_{DESWIG} = \text{const.}$, $f_{DESWIG} = \text{const.}$
- Calculul caracteristicilor DESWIG în cazurile $n_{DESWIG} = \text{const.}$, $U_{DESWIG} = \text{const.}$
- Calculul caracteristicilor DESWIG în cazurile $n_{DESWIG} = \text{var.}$, $U_{DESWIG} = \text{var.}$

Datele rezultate în urma proiectării a generatorului DSWIG, conform metodei pragmatice elaborate, au fost utilizate la execuție la SA BEGAElectromotor Timișoara.

4.4.2. Aplicarea metodei propuse de proiectare pentru sisteme WECS de putere mică

La Universitatea Politehnică Timișoara, în cadrul unui proiect de cercetare pentru sistemele WECS de mică putere, a fost propusă obținerea unui DSWIG de $P_N=(1.0\div 2.5)$ kW și $n_N = 750$ rpm. Corespunzător, pentru proiectarea generatorului dorit a fost selectat, ca mașină de inducție convențională "de referință" (MRF), motorul de inducție $MI 1AT 132S-8$, $P_N = 2.2$ kW, $n_N = 750$ rpm fabricat de BegaElectromotor (Timișoara, România).

Testarea generatorului realizat

Încercările experimentale ale generatorului DSWIG realizat, în varianta excitației distribuite în ambele înfășurări statorice w_1 și w_2 , conform metodologiei de proiectare propus, au condus la următoarele rezultate pentru regimul nominal de funcționare:

$$I_{w1n} = 1.304 \text{ A} - \text{curentul din înfășurarea } w_1$$

$$I_{w2n} = 5.65 \text{ A} - \text{curentul din înfășurarea } w_2$$

$P_{MRFn} = 2200 \text{ W}$ - putere activă maximă nominală a MRF (motorul din care a fost confecționat DSWIG)

$P_{DSWIG n} = 3898.4941 \text{ W}$ - puterea activă maximă nominală a DSWIG

$K_{DSWIG / MRF} = P_{DSWIG n} / P_{MRF n} = 1.772$ - raportul dintre puterile nominale ale DSWIG și MRF

În concluzie, raportul $K_{DSWIG / MRF} = 1.772$ indică faptul că puterea electrică nominală a DSWIG este sensibil mai mare decât puterea mecanică nominală a MRF.

Metodă pragmatică originală de proiectare a înfășurărilor statorice ale DSWIG având același număr de perechi de poli pentru ambele înfășurări statorice, obținut prin modificări constructive minime, din motoarele de inducție convenționale cu rotor în scurtcircuit, care au o putere apropiată de cea a generatorului DSWIG necesar și cu aceeași viteză de rotație nominală [Bar 2013, Bor 2014, Bu 2014, 7, PRO-2013], reduce mult timpul de proiectare și de realizare a unui DSWIG pentru o anumită aplicație, tehnologia de fabricație se păstrează practic corespunzătoare mașinii de inducție, deja existentă în procesul de fabricație curentă, păstrând aceeași: turație nominală, parametrii electrici și magnetici (același circuit magnetic și același rotor în scurtcircuit în colivie).

4.5. Strategii pentru WECS cu DSWIG

În vederea îmbunătățirii calității sistemelor de conversie a energiei eoliene cu generatoare de inducție și de reducere a complexității acestora, generatorul DSWIG se impune interesului de cercetare.,

Generatorul DSWIG face parte din categoria generatoarelor de inducție, care au avantaje privind robustețea, cost de fabricație redus, dar și dezavantajul necesității asigurării puterii reactive prin conectarea la borne a unui circuit de excitație, uzual printr-un banc capacitiv. Dacă circuitul de excitație nu poate fi ajustat, se reduce domeniul de turații de funcționare. Generatorul de inducție cu două înfășurări trifazate statorice cu rotor în colivie în scurtcircuit (DSWIG), constructiv, prin cele două înfășurări statorice, se poate separa prin înfășurarea W1 a circuitului de sarcină (de putere), care livrează sarcinii putere activă, respectiv, prin înfășurarea W2 a circuitului de excitație (de control), care în principal asigură puterea reactivă necesară funcționării DSWIG. Prin plasarea spațială la 90°el. a celor două înfășurări statorice, se realizează și o decuplare a celor două circuite.

Strategia de conducere a unui sistem WECS echipat cu generatorul DSWIG, are ca scop, pentru circuitul de sarcină, asigurarea transferului maxim de putere activă sarcinii și o tensiune de ieșire. cu parametrii stabili (amplitudine și frecvență constantă), respectiv, pentru circuitul de excitație asigurarea puterii reactive necesare, când turația de antrenare variază în limite cât mai largi și sarcina sistemului variază. Trebuie considerate cele două posibilități de funcționare a sistemului WECS, conectat la rețeaua electrică generală sau autonom pe o rețea izolată.

Interfața înfășurării W1 a circuitului de sarcină cu rețeaua electrică generală sau cu consumatorii locali, se realizează printr-un convertor c.a.-c.c.-c.a. care trebuie să asigure parametrii tensiunii de ieșire (amplitudine, frecvență, fază, etc.)

Sistemului de excitație al generatorului DSWIG poate fi realizat prin distribuția excitației în cele două înfășurări staționare W1 și W2, cazul excitației mixte, respectiv, excitația asigurată numai de înfășurarea de control W1.

La excitația mixtă, în circuitul de sarcină W1 se conectează Sistemul de excitație W1, format dintr-un banc de condensatoare fixe C_{ex1} , care se dimensionează pentru asigurarea magnetizării de pornire, pentru mers în gol, în timp ce în înfășurarea de control W2 se utilizează Sistemul de excitație W2, care livrează puterea reactivă necesară compensării variației sarcinii și turației, printr-un convertor static de excitație ("static excitation converter" - SEC), Convertorul SEC poate fi fix sau comandat, cu sau fără sursă suplimentară de asigurarea excitației de pornire.

În Fig.4.5.3 circuitul de preîncărcare a condensatorului sistemului de excitație W2 este conectat la circuitul de c.c. al convertorului de pe partea înfășurării de sarcină W1, care permite creșterea eficienței funcționării generatorului DSWIG la turații joase de antrenare [Bu 2015]. Această structură va fi dezvoltată în § 4.5.2.

Cerințele strategiei de control, impuse utilizării generatorului DSWIG, într-un domeniu larg de turații, atât domeniul turațiilor mari, când comportarea unui generator de inducție este corespunzătoare, cât mai ales la turații joase, la care scade foarte mult eficiența generatorului, impun utilizarea unei structuri care să asigure conducerea WECS cu DSWIG.

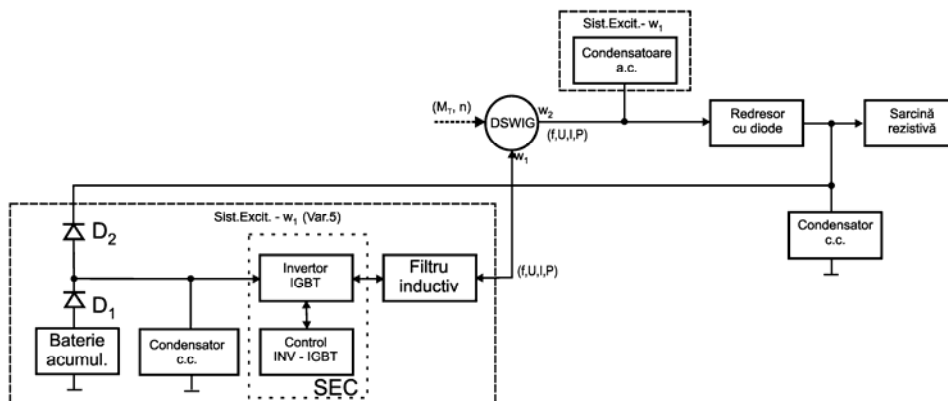


Fig.4.5.5. Sistem de excitație mixt, cu SEC în W2, conectat la circuitul intermediar de c.c. al convertorului de pe partea înfășurării de sarcină W1, pentru funcționarea într-un domeniu larg de turații.

Structura standului experimental de laborator pentru un sistem WECS cu DSWIG este prezentat în Fig.4.5.6. Standul este echipat cu un emulator al turbinelor WT1-UPT și WT2-UPT cu motor asincron de antrenare, prezentat în § 6.3. Standul este prevăzut cu un sistem de excitație mixtă. Se poate selecta structura Sistemului de excitație W2, conform variantelor prezentate în Fig.4.5.1 ... Fig.4.5.4.

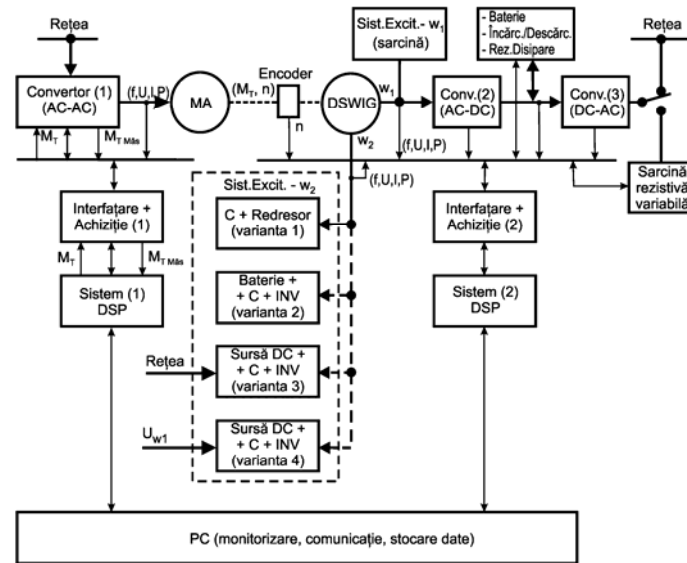


Fig.4.5.6. Structura standului experimental pentru un WECS cu DSWIG, cu emulator de turbină eoliană și cu selecția sistemului de excitație din W2.

Metoda originală de dimensionare a înfășurărilor statorice a unui generator DSWIG obținut dintr-o mașină electrică de inducție din fabricația de serie, metodă care păstrează rotorul în scurtcircuit în colivie, dimensiunile mecanice ale mașinii electrice, parametrii circuitului magnetic. Cele două înfășurări statorice W1 și W2 au același număr de perechi de poli, puterea electrică de ieșire a înfășurărilor statorice ortogonale DSWIG, încărcate rezistiv, având o singură sursă de excitație, în înfășurarea de excitație W2, este aproximativ apropiată de puterea mecanică a motorului transformat.

Strategiile de conducere a sistemelor WECS cu turație variabilă, cu ieșire în c.c. sau a.c., cu generator DSWIG trebuie să asigure menținerea parametrilor de funcționare (tensiunea de ieșire) într-un domeniu de variație a turației de antrenare a DSWIG în limite cât mai largi. Soluțiile prezentate permit funcționarea într-un domeniu larg, cu reducerea sau chiar eliminarea condensatoarelor din circuitul înfășurării de sarcină W1 și din cea a înfășurării de excitație W2, micșorând dimensiunile sistemului de control al excitației (SEC).

5. Sisteme WECS bazate pe generatorul PMSG

5.1. Modelarea generatorului sincron cu magneți permanenți (PMSG)

Sistemele WECS cu turație variabilă sunt cele mai des utilizate în prezent, fiind destinat extragerii energiei maxime în condițiile de variație a vitezei vântului. Generatoare sincrone sunt utilizate în astfel de sisteme. Generatoarele sincrone pot fi în principal de două tipuri cu magneți permanenți, respectiv cu rotor bobinat, care depind de tipul de sistem de excitație utilizat. Principalul dezavantaj constă în faptul că nu poate fi construit pentru puteri foarte mari, deoarece magneții mari nu sunt disponibili.

Rotorul poate fi din material feromagnetic solid sau din tole perforate, cu polii deplasați pentru a se minimiza cuplul cogging de pornire.

5.1.2. Modelarea PMSG în sistemul de referință staționar abc

Modelul matematic al mașinii electrice sincrone cu magneți permanenți ("Permanet Magnet Synchronous Machine" - PMSM) este similar celui al mașinii sincrone cu rotor bobinat. Ecuațiile de tensiune în sistemul de referință staționar abc al statorului PMSM pot fi exprimate în funcție de valorile instantanee ale curenților.

$$\vec{V}_{abc} = R_{Sabc} \cdot \vec{i}_{abc} + p \cdot \vec{\psi}_{abc} \quad (5.1.1)$$

unde:

$$\text{- vectorul tensiunilor statorice în sistemul de referință } abc, \vec{V}_{abc} = [V_a \ V_b \ V_c]^T \quad (5.1.2)$$

$$\text{- vectorul curenților statorici în sistemul de referință } abc, \vec{i}_{abc} = [i_a \ i_b \ i_c]^T \quad (5.1.3)$$

$$\text{- vectorul fluxurilor în sistemul de referință } abc, \vec{\psi}_{abc} = [\psi_a \ \psi_b \ \psi_c]^T \quad (5.1.4)$$

$$- \text{rezistența statorică în sistemul de referință } abc, R_{sabc} = \text{diag}[R_s \ R_s \ R_s] \quad (5.1.5)$$

unde s-a notat cu R_s rezistența unei înfășurări statorice;

Fluxului statoric al unui sistem magnetic poate fi calculat astfel :

$$\bar{\psi}_{abc} = L_{abc} \cdot \bar{i}_{abc} + \bar{\psi}_{mabc} \quad (5.1.6)$$

Fluxul statoric din ecuația (5.1.6) poate fi scrisă sub forma extinsă astfel:

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \psi_m \begin{bmatrix} \cos \theta_r \\ \cos(\theta_r - 2\pi/3) \\ \cos(\theta_r + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (5.1.15)$$

5.1.3. Modelarea PMSM în sistemul de referință rotativ sincron d-q

Analiza electromagnetică a unei mașini PMSM se poate realiza ușor în cadrul sistemului de referință rotativ a rotorului d - q . Transformarea Park [Par 1985] elimină toate inductanțele variabile din ecuațiile de tensiune ale mașinii sincrone, care se produc datorită a două circuite electrice în mișcare relativă și cu reluctanțe magnetice diferite. Transformarea Parc directă $T_{abc \rightarrow dq}$ și inversă $T_{abc \rightarrow dq}^{-1}$ pot fi exprimate matematic astfel [Par 1985]:

Sistemul de referință poate să se rotească cu unghiuri constante sau variabile în raport cu viteza de rotație, sau pot rămâne staționare ca în cazul transformatei Clarke [Dor 2005].

Pentru un sistem trifazat echilibrat, fără componentă homopolară, matricea de transformare $T_{abc \rightarrow dq0}^{-1}$ din (5.1.17) se poate reduce la $T_{abc \rightarrow dq}$:

Ecuația (5.1.4) poate fi scrisă în sistemul de referință rotativ astfel:

$$\bar{V}_{dq0} = R_s \bar{i}_{dq0} + T_{abc \rightarrow dq0} \cdot p \cdot (T_{abc \rightarrow dq0}^{-1}) \bar{\psi}_{dq0} + p \cdot \bar{\psi}_{dq0} \quad (5.1.19)$$

unde

$$- \text{vectorul tensiunilor în sistemul de referință } d\text{-}q, \bar{V}_{dq0} = [V_d \ V_q \ V_0]^T \quad (5.1.20a)$$

$$- \text{vectorul curenților în sistemul de referință } d\text{-}q, \bar{i}_{dq0} = [i_d \ i_q \ i_0]^T \quad (5.1.20b)$$

$$- \text{vectorul fluxurilor în sistemul de referință } d\text{-}q, \bar{\psi}_{dq0} = [\psi_d \ \psi_q \ \psi_0]^T \quad (5.1.20c)$$

Într-un mod similar:

$$p \cdot (T_{abc \rightarrow dq0})^{-1} = \omega_r \begin{bmatrix} -\sin \theta_r & -\cos \theta_r & 0 \\ -\sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & 0 \\ -\sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & 0 \end{bmatrix} \quad (5.1.30)$$

din care se obține :

$$T_{abc \rightarrow dq0} \cdot p \cdot (T_{abc \rightarrow dq0})^{-1} = \omega_r \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.1.31)$$

Prin simplificarea relației (5.1.32) rezultă:

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + L_d \frac{d i_d}{dt} + \omega_r L_q i_q \\ V_q = R_s i_q + L_q \frac{d i_q}{dt} + \omega_r L_d i_d + \omega_r \psi_m \\ V_0 = R_s i_0 + L_0 \frac{d i_0}{dt} \end{cases} \quad (5.1.33)$$

La o funcționare echilibrată a PMSM, ecuația homopolară poate fi neglijată.

Schemele echivalente ale PMSM pentru axele d și q , sunt reprezentate în Fig.5.1.2a și Fig.5.1.2b.

În Fig.5.1.2, E_d și E_q sunt forțe contraelectromotore ale axelor d , respectiv q . Ele pot fi exprimate prin relațiile:

$$\begin{cases} E_d = -\omega_r \psi_q = -\omega_r L_q i_q \\ E_q = \omega_r \psi_d = \omega_r L_d i_d + \omega_r \psi_m \end{cases} \quad (5.1.34)$$

Puterea mecanică creată de PMSM poate fi scrisă:

$$P_m = \frac{3}{2} (E_d i_d + E_q i_q) = \frac{3}{2} (\omega_r \psi_d i_d + \omega_r \psi_q i_q) \quad (5.1.35)$$

De asemenea, pornind de la ecuația derivată din expresia puterii mecanice din (5.1.35), expresia cuplului electromagnetic, T_e , în sistemul de referință rotativ sincron este:

$$T_e = \frac{P_m}{\omega_m} = \frac{P_m \rho}{\omega_r 2} \quad (5.1.36)$$

unde

ω_m - viteza unghiulară de rotație mecanică;
 ρ - numărul de perechi de poli.

Considerând relațiile (5.1.35) și (5.1.36) se obține expresia următoare a cuplului electromagnetic:

$$T_e = \frac{3 \rho}{2} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (5.1.37)$$

Mașina sincronă cu magneți permanenți fiind destinată pentru a fi exploatată în regim de funcționare de generator, circulația curenților în circuitul statoric va fi în sens invers. Prin considerarea sensului invers al curenților, ecuațiile de tensiune în mod generator (PMSG) pot fi scrise astfel:

$$\begin{cases} V_d = -R_s i_d - L_d \frac{d i_d}{dt} + \omega_r L_q i_q \\ V_q = -R_s i_q - L_q \frac{d i_q}{dt} + \omega_r L_d i_d - \omega_r \psi_m \end{cases} \quad (5.1.38)$$

Rezultă schemele echivalente ale PMSG pentru axele d și q, din figurile Fig.5.1.3a, și, respectiv, Fig.5.1.3b.



Fig.5.1.3. Schema echivalentă a PMSG pentru: (a) axa - d; (b) axa - q.

La mașinile sincrone cu magneți permanenți rotorului are o suprafață netedă și oferă astfel influențe egale asupra axelor d și q, rezultând o egalitate a inductanțelor $L_d = L_q$. În consecință, se obține pentru cuplului electromagnetic expresia:

$$T_e = \frac{3 \rho}{2} \psi_m i_q, \quad (5.1.39)$$

care evidențiază faptul că se poate controla cuplul electromagnetic al PMSG prin controlul componentelor sale de curent după axa în cuadratură, q.

5.1.4. Calculul randamentului generatorului PMSG

Modelul pentru generator a fost construit pe baza datelor buletinului de testare oferit de furnizor (Electromotor Timișoara) [EMT-2010].

Modelul are la bază aproximarea pierderilor în generator,

$$P_G = P_{arb} - (P_{L1Cu} + P_{L2Fe} + P_{L3Lagar}) \quad (5.1.40)$$

unde:

$$P_L - \text{pierderile totale din generator, } P_L = P_{L1Cu} + P_{L2Fe} + P_{L3Lagar} \quad (5.1.41)$$

P_{L1Cu} , P_{L2Fe} , $P_{L3Lagar}$ - pierderi în cupru, în fier și în lagăre;

P_G - puterea utilă la bornele generatorului.

P_{arb} - Puterea la arborele generatorului

Expresia randamentului generatorului η_G este:

$$\eta_G = \frac{P_G}{P_{arb}} = 1 - \frac{P_L}{P_{arb}} = 1 - \frac{P_{L1Cu} + P_{L2Fe} + P_{L3Lagar}}{P_{arb}} \quad (5.1.42)$$

care, după înlocuirea expresiilor puterilor determinate anterior, se obține dependența randamentului generatorului η_G de turația n [rpm], curentul de fază al generatorului I_G [A] și viteza vântului v [m/s]:

$$\eta_G(n, I_G, v) = \frac{P_G}{P_{arb}} = 1 - \frac{P_L}{P_{arb}} = 1 - \frac{c_L \cdot I_G^2 + d_L \cdot n^{1,3} + f_L \cdot n}{c_{pT} v^2 n + a_{pT} v^{3-\alpha} n^\alpha - b_{pT} v^{3-\beta} n^\beta} \quad (5.1.51)$$

5.1.5. Caracteristicile PMSG

Pe standul experimental realizat în condiții reale pentru generatorul PMSG al sistemului de conversie a energiei eoliene, s-au determinat caracteristicile de mers în gol, $U_{G0} = U_{G0}(n_G)|_{pt. I_G = 0}$, și caracteristicile de mers în sarcină, $U_G = U_G(I_G)|_{pt. n_G = const}$.

Datele nominale ale generatorului sincron cu magneți permanenți sunt: Puterea nominală: P_{nom} 5kVA; Curent nominal: I_{nom} 12 A; Turația nominală n_{nom} 120 rpm; Frecvența nominală f_{nom} 32 Hz; Număr de crestături statorice N_c 33; Număr de perechi de poli p 16.

- Caracteristica de mers în gol a PMSG

Măsurătorile s-au făcut cu generatorul fără sarcină ($I_G = 0$). S-a măsurat cu precizie turația motorului n_M și, cunoscând raportul de reducere de turație a cutiei de viteze $i_{RT} = 6.03$, s-a determinat turația generatorului $n_G = n_M/i_{RT}$. Prin aplicarea metodelor de regresie, pe baza datelor experimentale din Tabelul 5.1.3, se poate determina estimarea expresiei caracteristicii de mers în gol a PMSG $U_{G0X} = F_{UGX}(n_G)|_{I_G = 0}$, rezultând expresie liniară (5.1.58).

$$U_{G0X} = a_{n01} + a_{n02} n_G; \text{ pentru } I_G = 0, a_{n01} = 0.78110276; a_{n02} = 1.4841802 \quad (5.1.58)$$

- Caracteristica de sarcină a PMSG

Măsurătorile s-au făcut cu sarcină variabilă, menținând turația PMSG aproximativ constantă, în trei cazuri: $n_G = 60, 100, 120$ rpm. S-a măsurat cu precizie turația motorului n_M și cunoscând raportul de reducere de turație a cutiei de viteze $i_{RT} = 6.03$, s-a determinat turația generatorului $n_G = n_M/i_{RT}$. În rezultatele prezentate s-a notat cu: n_G -turația; ω_G -viteza unghiulară de rotație; M_G - cuplu de antrenare la arborele generatorului sincron cu magneți permanenți; P_{arb} - putere mecanică de intrare la arbore; I_G - curent pe fază la bornele generatorului (c.a. - valoare efectivă); U_G - curent pe fază la bornele generatorului (c.a. - valoare efectivă); P_G - putere electrică (activă), totală, la ieșire generator; η_G - randamentul generatorului; η_{Gx} - randamentul generatorului estimat prin metode de regresie.

În funcție de necesitățile sistemului de conducere, datele din tabelele cu măsurători pot fi prelucrate prin metode de regresie astfel încât să se obțină expresiile dependențelor necesare între mărimile PMSG.

5.1.6. Metodă de determinare a $P_G=F(I_G, n_G)$, $M_G=F(I_G, n_G)$, $U_G=F(I_G, n_G)$.

Metoda propusă în cele ce urmează reprezintă în fapt o generalizare, care permite extrapolarea caracteristicilor generatorului PMSG, $P_G=F(I_G, n_G)$, $M_G=F(I_G, n_G)$, $U_G=F(I_G, n_G)$, în domeniul de variație nominal al curentului I_G și turației n_G , având un număr limitat de caracteristici determinate experimental. Metoda presupune parcurgerea mai multor etape, prezentate în cazul determinării caracteristicii $P_G=F(I_G, n_G)$

Metodă de determinare a puterii generatorului $P_G=F(I_G, n)$

Utilizând rezultatele măsurătorilor experimentale, obținute pe standul de laborator de modelare a WECS, pentru un set de k_{mes} măsurători ale caracteristicilor în sarcină $P_G(I_G)$, pentru $n_G = const.$, n_G [rpm] = $\{n_{G1}, n_{G2}, \dots, n_{Gk_{mes}}\}$. Metoda propusă de determinare a puterii generatorului presupune parcurgerea următoarelor etape:

1. Se determină prin regresie, pentru fiecare set de valori, $k = 1, \dots, k_{mes}$, expresia funcției de aproximare corespunzătoare

$$P_{Gk,j} = F_k(I_{Gj}), \text{ pentru } n_{Gk}, k = 1, 2, \dots, k_{mes},$$

$$P_{Gk,j} = F_k(I_{Gj}) = a_{pk} + b_{pk} I_{Gj} + c_{pk} I_{Gj}^2 \quad (5.1.59)$$

unde:

$I_{Gj}, j = 0, 1, 2, \dots, k_j$, reprezintă un set de valori de calcul pentru curentul I_G , în limitele

$0 \leq I_{Gmin} \leq I_{Gj} \leq I_{Gmax} \leq I_{Gnom}$, determinate cu relația:

$$I_{Gj} = I_{Gmin} + j \Delta I_G, j = 0, 1, 2, \dots, k_j \quad (5.1.60)$$

în care, ΔI_G este pasul de variație ales pentru curentul I_G .

2. Se restructurează datele calculate, conform unui nou set de valori:

$$\{I_{Gj}, P_{Gk,j}, n_{Gk}\}, k = 1, 2, \dots, k_{mes} \quad (5.1.61)$$

3. Se determină funcțiile de aproximare prin regresie corespunzătoare noului set de valori, $\{P_{Gi}, n_{Gi}\}$ pentru I_{Gi} , $i = 1, 2, \dots, k_i$. Pentru cazul particular considerat acestea vor fi de forma:

$$P_{G,i} = F_i(n_G) = a_{pi} + b_{pi} n_G + c_{pi} n_G^2, \text{ pentru } I_{Gi}, i = 1, 2, \dots, k_i \quad (5.1.62)$$

4. Se grupează valorile obținute ale coeficienților a_i , b_i , c_i cu valoarea I_{Gi} și se determină funcțiile de aproximare prin regresie a dependenței acestor coeficienți de curentul I_G , rezultând din setul de valori:

$$\begin{aligned} \{I_{Gi}, a_{pi}\}, i = 1, 2, \dots, k_i & \quad \text{dependența} \quad a_{px} = a_{px}(I_G) \\ \{I_{Gi}, b_{pi}\}, i = 1, 2, \dots, k_i & \quad \text{dependența} \quad b_{px} = b_{px}(I_G) \\ \{I_{Gi}, c_{pi}\}, i = 1, 2, \dots, k_i & \quad \text{dependența} \quad c_{px} = c_{px}(I_G) \end{aligned} \quad (5.1.63)$$

5. În final, se obține expresia puterii estimate a generatorului P_{GX} în funcție de n_G și I_G următoare:

$$P_{GX}(n, I_G) = F_{PX}(n, I_G) = a_{px}(I_G) + b_{px}(I_G) n + c_{px}(I_G) n^2 \quad (5.1.64)$$

Relația (5.1.64) obținută pentru P_G permite determinarea caracteristicilor:

$$P_{GX}(n) \text{ pentru } I_G = \text{const.} \quad (5.1.65)$$

$$P_{GX}(I_G) \text{ pentru } n_G = \text{const.} \quad (5.1.66)$$

pentru întreg domeniul de variație nominală a curentului I_G și a turației n_G .

Figura Fig.5.1.6.a,b prezintă rezultatul aplicării metodei de determinare a caracteristicilor estimate propusă.

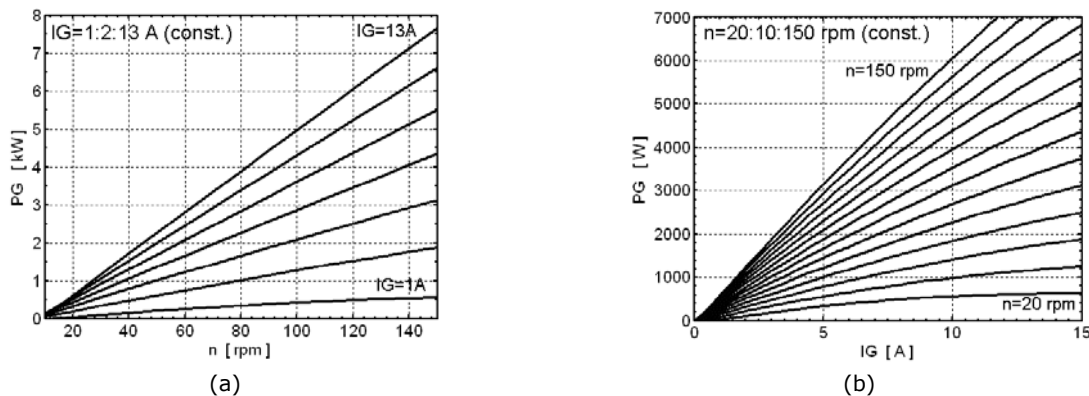


Fig. 5.1.6. Dependența estimată $P_{GX}(n_G, I_G)$ sub forma:
(a) $P_{GX}(n)$ la $I_G = \text{const.}$; (b) $P_{GX}(I_G)$ la $n = \text{const.}$

Metoda considerată poate fi extinsă și pentru determinarea următoarelor mărimi:

- **Determinarea tensiunii generatorului $U_{GX} = F_{UX}(n, I_G)$,**

$$U_{GX}(n_G, I_G) = F_{UX}(n_G, I_G) = a_{UX}(I_G) + b_{UX}(I_G) n_G + c_{UX}(I_G) n_G^2 \quad (5.1.67)$$

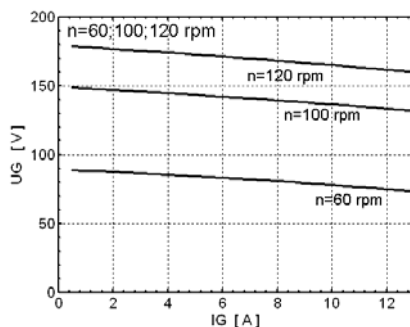


Fig.5.1.7. Caracteristica de sarcină $U_G(I_G)$ la $n = 60, 100, 120$ rpm (const.), determinată experimental.

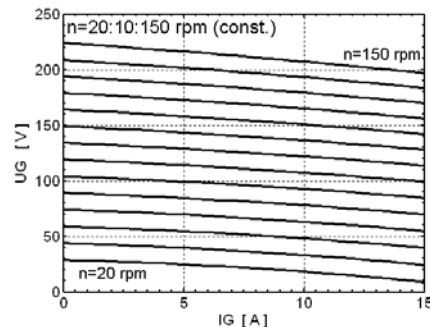


Fig.5.1.8. Dependența estimată $U_G(I_G)$ la $n = \text{const.}$.

5.1.7. Caracteristici estimate pentru WT1 și PMSG - rezultate prin simulare în Matlab

Caracteristicile estimate pentru generatorul PMSG și pentru turbina WT1 reprezintă expresii care pot fi ușor implementate în algoritmi numerici de conducere, timpii de calcul necesari fiind mult mai mici.

Pe de altă parte, expresiile estimate permit reprezentarea grafică în diferite condiții, în vederea determinării unor parametri funcționali ai componentelor sistemului WECS considerat în diferitele regimuri de funcționare.

În figurile Fig.5.1.9 ... Fig.5.1.12 sunt reprezentate caracteristici ale WT1-UPT și PMSG pe baza expresiilor estimate, în diferite combinații:

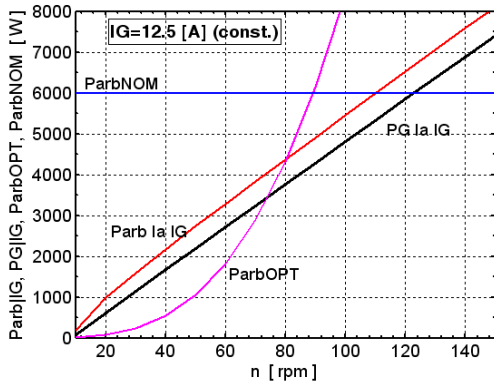


Fig.5.1.9. Dependentele de turație estimate pentru P_G , P_{arb} , P_{arbOpt} , P_{arbNom} la $I_G=12.5A$.

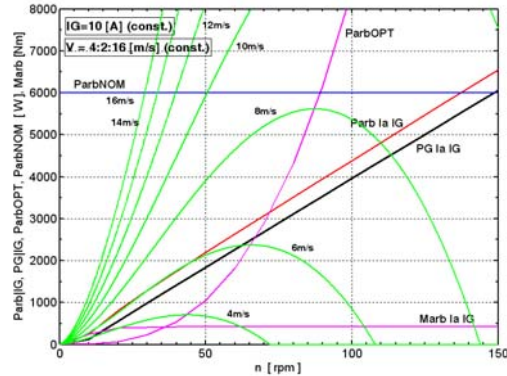


Fig.5.1.10. Caracteristicile estimate pentru PMSG și WT1-UPT ($I_G=10A$, $I=4:2:16$ m/s).

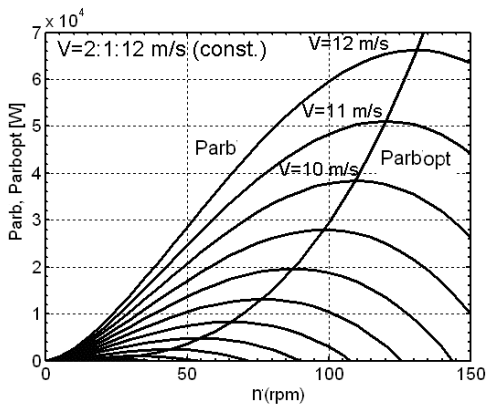


Fig.5.1.11. Dependentele de turație estimate pentru $P_{arb}(n)$ și $P_{arbOpt}(n)$ la $V=2, \dots, 12$ m/s (const.).

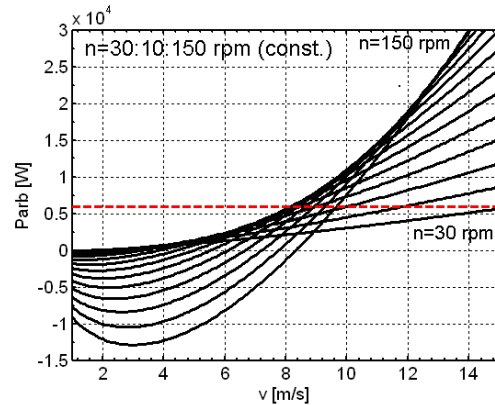


Fig.5.1.12. Dependența de viteza vântului estimate pentru $P_{arb}(V)$ la $n=30, \dots, 150$ rpm (const.).

5.2. Variante de conducere pentru PMSG, fără MPPT

Sunt considerate strategiile de control cele mai utilizate pentru conducerea WECS, care au în vedere o extragere optimă de energie de la vânt, și care nu utilizează metode de control prin urmărirea punctului de putere maximă (MPPT).

Este propusă o strategie de control care elimină traductoarele de măsurare a vitezei vântului (anemometre) și traductoarele de măsurare a turației (encoder, turometre, etc.) și le înlocuiește cu estimatoare bazate pe mărimi măsurate din sistem, crescând astfel fiabilitatea sistemului de conducere (traductoarele sunt supuse defectării). Principalul dezavantaj este cel al necesității cunoașterii, în prealabil, al modelului și caracteristicilor turbinei eoliene.

De asemenea inverterul de pe partea de rețea nu este inclus în studiu, având în vedere că supercondensatoarele asigurând o decuplare a circuitului de pe partea generatorului de circuitul de pe partea rețelei. Metoda de monitorizare a fost simulată în Matlab / Simulink. Rezultatele simulării, fiind analizate rezultatele obținute.

Sistemele de conversie a energiei eoliene cu viteză de rotație variabile (WECS) oferă multiple avantaje față de WECS cu funcționare la viteză de rotație constantă. Unul dintre avantaje este capacitatea sistemului de a urmări punctul maxim de putere și de a se recolta, în fiecare moment, maximul de energie de la vânt [Bud 2008]. Acest lucru se datorează faptului că puterea extrasă de la vânt este influențată atât de viteza vântului, cât și de viteza de rotație a paletelor [Bud 2010].

Sistemul considerat de conversie a energiei vântului

Recent au fost raportate noi topologii WECS. Se propune o astfel de topologie, folosind un nou tip de convertor c.c.-c.c. numit "hibrid DC-DC convertor" (HDC) și supercondensatoare în circuitul intermediar de c.c., așa cum se arată în Fig.5.2.1. [EEA 2009]

Topologia WECS constă dintr-un generator sincron cu magneți permanenți (PMSG), o punte redresoare cu diode (RD), un convertor c.c.-c.c. hibrid (HDC), supercondensator, bancuri de

acumuloare (Baterie Acumulat) și un inverter de tensiune ridicător de tensiune (BVI) pe partea de sarcină. Rezistența de disipare din circuitul intermediar de c.c. este utilizată la frânare sau la disiparea energiei în cazul când sarcina este mică și bateria de acumuloare este încărcată la maxim.

Supercondensatorul acționează ca un element de înmagazinare a energiei și are rolul de a separa generatorul de inverter și astfel generatorul poate fi controlat pentru a obține putere maximă de la vânt, în timp ce inverterul este controlat pentru a genera, la rândul său, curentul și tensiunea de ieșire de o anumită amplitudine și frecvență cu distorsiuni armonice reduse [Bud 2010], [Mun 2010].

Caracteristicile turbinei de vânt de tip WT1-UPT sunt prezentate în §3.3.1-§3.3.2: puterea extrasă de turbina eoliană de la vânt P_{arb} (rel. 3.3.51); coeficientul de putere C_p (rel. 3.3.38); coeficientul cuplului turbinei eoliene, C_M (rel. 3.3.41); cuplul mecanic la arborele turbinei, M_{arb} , (rel. 3.3.65), puterea optimă $P_{arb\ opt}$ (rel. 3.3.86, 3.3.87, 3.3.89, 3.3.89); cuplul optim $M_{arb\ opt}$ (rel. 3.3.81).

Pentru două modele de turbine de vânt cu parametrii din Tabelul 3.3.1, pentru două valori optime a tip-speed ratio de $\lambda_o=3$ și, respectiv, $\lambda_o=4$, și curbele coeficienților de putere și de moment corespunzătoare prezentate în Fig. 3.3.3, cele două curbe au maximum la diferite valori ale rapidității turbinei eoliene λ , $\lambda_{0\ C_p} \neq \lambda_{0\ C_m}$. Aceasta este o observație importantă care arată că, cuplul optim, $M_{arb\ opt}$, și puterea extrasă optimă, $P_{arb\ opt}$, sunt obținute la diferite valori ale rapidității turbinei. De obicei, în locațiile cu valori mici ale vitezei vântului, turbinele eoliene sunt proiectate pentru valori scăzute pentru λ . Modelul turbinei WT1-UPT utilizat în simulări este cel pentru $\lambda = 4$.

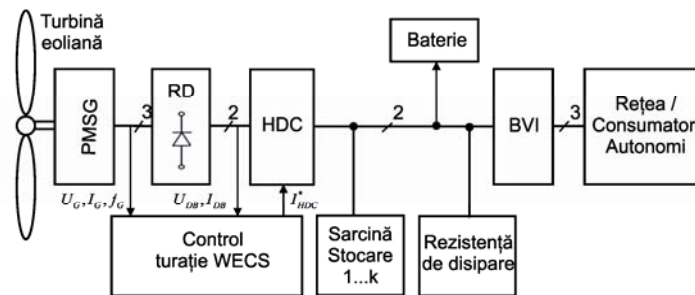


Fig.5.2.1. Topologia WECS cu noul convertor HDC pentru consumatori autonomi

Structura completă a WECS este prezentată în Fig.5.2.1 în care: WT – rotorul turbinei de vânt; PMSG – generatorul sincron cu magneți permanenți; RD – punte redresoare trifazată cu diode; HDC – convertor c.c.-c.c. hibrid coborâtor de tensiune; BVI – convertor c.c.-a.c. ridicător (inverter sursă de tensiune ridicător); BRK – sistem de frânare electromecanic de protecție; ELBRK – sistem de frânare electrodinamic cu rezistență de sarcină.

Structura propusă pentru HDC este dezvoltată în §6.1.2 .

Pentru simulare se consideră sistemul de conversie a energiei eoliene având ca ieșire tensiunea de pe supercondensatorul din circuitul intermediar de c.c.

Există mai multe metode de a controla puterea optimă a turbinei eoliene prin comanda de prescriere a curentului $I_{HDC\ opt}$, cunoscând caracteristicile turbinei și a elementelor componente ale WECS, și anume [Bor 2011], cu notațiile: n_{opt} - turația corespunzător puterii optime (maxime); $P_{T\ opt}$ - puterea optimă a turbinei la n_{opt} ; $(P_G)_{P_{T\ opt}}$ - puterea generată de PMSG când puterea turbinei este $P_{T\ opt}$;

$V_{G\ opt}$ - tensiunea generatorului pentru situația n_{opt} și $(P_G)_{P_{T\ opt}}$; $I_{G\ opt}$ - curentul rezultat pentru $(P_G)_{P_{T\ opt}}$ și $V_{G\ opt}$; I_{DB} - curentul c.c. de la ieșirea redresorului cu diode RD corespunzător lui $I_{G\ opt}$; V_{DB} - tensiunea c.c. de la ieșirea redresorului cu diode RD corespunzător lui $V_{G\ opt}$; $P_{HDC\ opt}$ - puterea c.c. de la ieșirea HDC rezultată; $V_{HDC\ opt}$ - tensiunea c.c. de la ieșirea HDC rezultată; $I_{HDC\ opt} = F(v)$ - relația finală între $I_{HDC\ opt}$ și v pentru comanda HDC:

(i) Controlul puterii optime pe baza relației dintre $I_{HDC\ opt}$ și viteza vântului v :

$$I_{HDC\ opt} = F(v) \quad (5.2.1)$$

Succesiunea de calcul este următoarea:

$$n_{opt} \rightarrow P_{T\ opt} \rightarrow (P_G)_{P_{T\ opt}} \rightarrow V_{G\ opt} \rightarrow I_{G\ opt} \rightarrow I_{DB} \rightarrow V_{DB} \rightarrow P_{HDC\ opt} \rightarrow V_{HDC\ opt} \rightarrow I_{HDC\ opt} = F(v)$$

(ii) Controlul puterii optime pe baza relației $I_{HDC\ opt}$ și n :

$$I_{HDC\ opt} = F(n) \quad (5.2.2)$$

Succesiunea de calcul este următoarea:

$$P_{T\ opt} \rightarrow (P_G)_{P_{T\ opt}} \rightarrow V_{G\ opt} \rightarrow I_{G\ opt} \rightarrow I_{DB} \rightarrow V_{DB} \rightarrow P_{HDC\ opt} \rightarrow V_{HDC\ opt} \rightarrow I_{HDC\ opt} = F(n)$$

(iii) Controlul puterii optime pe baza relației $I_{HDC\ opt}$ și $(P_G)_{P_{T\ opt}}$:

$$I_{HDC\ opt} = F\left((P_G)_{P_{T\ opt}}\right) \quad (5.2.3)$$

Sucesiunea de calcul este următoarea:

$$V_{G\ opt} \rightarrow I_{G\ opt} \rightarrow I_{DB} \rightarrow V_{DB} \rightarrow P_{HDC\ opt} \rightarrow V_{HDC\ opt} \rightarrow I_{HDC\ opt} = F\left((P_G)_{P_{T\ opt}}\right)$$

(iv) Controlul puterii optime pe baza relației $I_{G\ opt}$ și $V_{G\ opt}$:

$$I_{G\ opt} = F(V_{G\ opt}) \quad (5.2.4)$$

(v) Controlul puterii optime pe baza relației $I_{HDC\ opt}$ și V_{HDC} :

$$I_{HDC\ opt} = F(V_{HDC}). \quad (5.2.5)$$

Pentru sistemul WECS realizat cu turbina eoliană WT1-UPT și WT2-UPT, plecând de la legea de control optim bazat pe măsurarea mărimilor din circuitul intermediar de c.c., $I_{HDC\ opt} = F(V_{HDC})$, (din cauza accesibilității mărimilor I_{HDC} și V_{HDC}) a fost dezvoltată o strategie de control, bazată pe măsurarea mărimilor în circuitul intermediar de c.c. care este prezentată în continuare, pentru structura WECS cu HDC.

5.2.1. Strategii bazate pe măsurarea mărimilor în circuitul intermediar de c.c.

5.2.1.1. Controlul HDC pentru extracția de putere maximă fără MPPT

Structura propusă a strategiei de control al convertorului HDC este prezentată în Fig.5.2.3. Ideea principală a acestei strategii este aceea rezultată din relațiile pentru WT1-UPT din § 3, de a obține valoarea maximă a puterii extrasă, la o viteză de rotație dată [Haq 2010].

Puterea optimă extrasă, $P_{arb\ opt}$ în funcție de viteza unghiulară $\omega_{P\ opt}$:

$$P_{arb\ opt} = k_{P\ opt1} (\omega_{P\ opt})^3, \text{ unde } k_{P\ opt1} = 0.5 \rho A C_{P\ opt} \times \left(\frac{R}{\lambda_{P\ opt}}\right)^3, \quad (5.2.8)$$

respectiv, în funcție de turația turbinei eoliene $n_{P\ opt}$:

$$P_{arb\ opt} = k_{P\ opt2} (n_{P\ opt})^3, \text{ unde } k_{P\ opt2} = 0.5 \rho S C_{P\ opt} \times \left(\frac{\pi R}{30 \lambda_{P\ opt}}\right)^3 \quad (5.2.11)$$

Din (5.2.8), rezultă o relație directă între viteza de rotație a turbinei și puterea maximă extrasă corespunzătoare. Strategia de control propusă utilizează această relație ca un punct de plecare pentru determinarea mărimii de prescriere a curentului de intrare al HDC.

Algoritm de implementare a strategiei de control propusă este constituit din următoarele etape: • Măsurarea vitezei unghiulare de rotație a turbinei ω . • Determinarea puterii mecanice optime posibil de a fi extrasă, folosind relația (5.2.8). • Considerând randamentul generatorului PMSG și al redresorului RD ca fiind unitare, se poate obține referința I_{in}^* pentru curentul de intrare al HDC, din valoarea puterii optime $P_{P\ opt}$ și din tensiunea de intrare a HDC, V_{in} : $I_{in}^* = P_{P\ opt} / V_{in}$. • Abaterea valorii curentului măsurat față de referința de curent I_{in}^* se folosește pentru a modifica factorul de umplere D al tranzistorului de comutație al HDC.

Metoda are avantajul de a urmări puterea maximă fără a avea nici o informație cu privire la viteza vântului sau a turației generatorului, eliminând traductoarele de viteză a vântului. Dezavantajul metodei constă în necesitatea cunoașterii caracteristicilor și a parametrilor turbinei eoliene. În simulare se consideră randamentul generatorului PMSG unitar, dar în fapt, acesta variază cu viteza de rotație și cu curentul statoric al generatorului, randament exprimat prin (5.2.51).

Studiu de caz

Schema de simulare a WECS cu WT1-UPT în Matlab-Simulink și structura buclei de control al curentului convertorului HDC prin utilizarea algoritmului de obținere a $P_{arb\ opt}$, sunt prezentate în Fig.5.2.2 și Fig.5.2.3.

Sistemul aerodinamic a fost realizat pentru a reproduce turbina WT1-UPT, descrisă în § 3.3.2, având parametrii corespunzător cazului constructiv cu $\lambda_{opt} = 4$. Generatorul electric este un generator trifazat PMSG, cuplat direct la arborele turbinei de vânt, viteza de rotație fiind cea a turbinei eoliene. Parametrii și modelele pentru generatorul PMSG au fost prezentate în § 5.1. Turbina și generatorul sunt de putere nominală de 5kW. Generatorul PMSG este antrenat cu un cuplu furnizat de subsistemul aerodinamic al WT1-UPT implementat pe baza relației (3.3.81) stabilite în § 3.3.2

Fig.5.2.5e prezintă factorul de umplere D generat de semnalul de ieșire al regulatorului PI. Comanda tranzistorului comutator se face prin metoda PWM ("pulse width modulation"). Factorul de umplere este obținut prin compararea valorii de ieșire a regulatorului PI cu un semnal cu forma de undă triunghiulară cu frecvența de comutare f_{swr} și se generează comanda pe grila tranzistorului comutator.

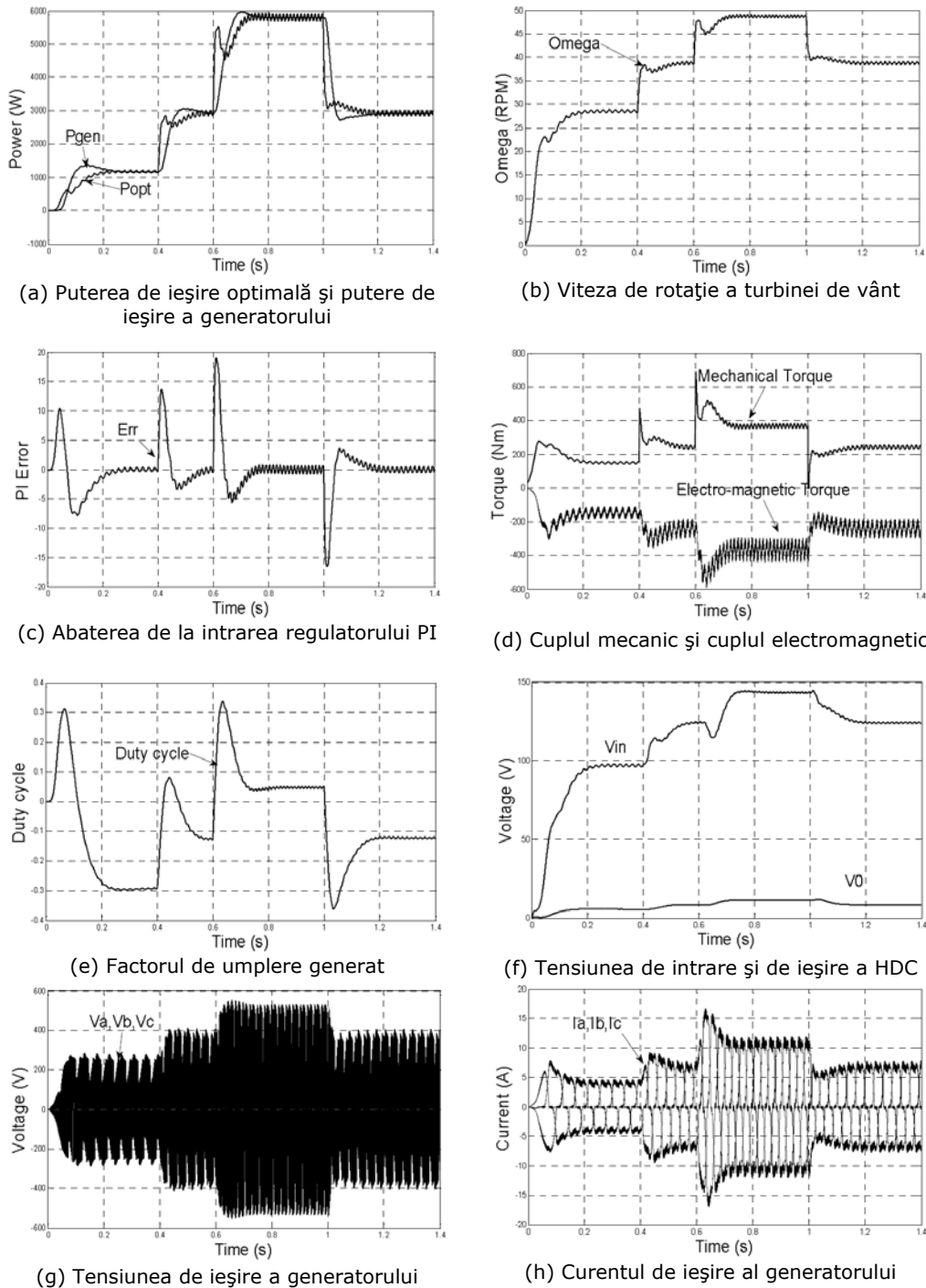


Fig.5.2.5. Variația mărimilor din sistem obținute prin simulare.

Din relația se poate determina relația dintre tensiunea de ieșire V_{out} și tensiunea de intrare V_{in} a convertorului HDC în funcție de factorul de umplere D de comandă a tranzistorului de comutație:

$$V_0 = \frac{D}{2-D} V_{in} \quad (5.2.13)$$

Prin variația factorului de umplere D al tranzistorului comutator conform relației (5.2.13) se poate observa modificarea atât a tensiunii de la intrare, cât și de la ieșirea convertorului HDC într-un raport diferit, din cauza regimului de alimentare (Fig.5.2.5f).

Fig.5.2.5b, Fig.5.2.5d prezintă variația cuplul mecanic al turbinei și a cuplului electromagnetic al PMSG în funcție de viteza de rotație care caracterizează comportarea din punct de vedere mecanic al grupului turbină - generator.

Formele de undă pentru tensiunea și curentul de ieșire al generatorului sunt prezentate, respectiv, în Fig.5.2.5g și Fig.5.2.5h.

În simulare, ca și în aplicația reală, există armonici de curent și de tensiune din cauza comutației tranzistorului din convertorul HDC. Măsurarea mărimilor electrice, pentru a putea fi folosite ca semnale în strategia de control, trebuie să se facă prin intermediul unor filtre „trece jos”. În acest caz, filtrele de

ordinul doi, elimină componentele armonice de înaltă frecvență. Utilizarea filtrelor în simulare are un efect similar utilizării traductoarelor în aplicația reală.

5.2.1.2. Strategie de control bazată pe estimarea vitezei vântului

Este propusă o strategie de control a turației structurii WECS de mică putere (vezi Fig.5.2.1) bazată pe estimarea vitezei vântului, dedicată optimizării, eficienței și furnizării de energie electrică. Este considerat cazul unei turbine cu ax orizontal, fără reglajul paletelor, realizat în cadrul UPT [EEA-2009].

Sistemele WECS de mică putere sunt utilizate, în mare parte, în zone îndepărtate cu vânt și fără conectare la rețea. Acestea au un preț relativ mare și, comparativ cu turbinele eoliene mari, se produce energie la costuri mai mari. În prezent cercetările actuale au ca scop reducerea prețului lor și asigurarea, de asemenea, unei funcționări sigure. În cele ce urmează se au în vedere următoarele direcții de preocupare: (i) eliminarea unor traductoare prin înlocuirea cu estimatoare software; (ii) sisteme noi de conversoare ac-dc-ac; (iii) promovarea unei strategii inovativă optimizată de control al turației.

Recent au fost semnalate noi topologii de sisteme WECS [Che 2009] [Deh 2009] [Ari 2005] [Ni 2009] [www-Sch] [Axe 2008]. Topologia propusă prezentată în Fig.5.2.6b, utilizează un nou tip de convertor c.c.-c.c. hibrid ("hybrid dc-dc converter"- HDC) [Deh 2009].

5.2.1.3. Strategia de control al turației pentru WECS

Metoda se bazează pe cunoașterea caracteristicii randamentului PMSG, $\eta_G = MP_1(n, I_G)$, și caracteristica turației optime a turbinei de vânt $n_{opt} = MP_2(v)$ pentru $n \leq n_{admisibil}$. Caracteristicile menționate MP_1 și MP_2 pot fi determinate folosind modelul anterior teoretic și posterior modelul experimental, determinat și studiat prin teste pe stand, în tunele de aerodinamice sau direct pe instalația reală. Caracteristica $\eta_G = MP_1(n, I_G)$ poate fi obținută din caracteristica experimentală $\eta_G = MP_1(n, I_G)$, pentru $n = n_k$, $k = 1, 2, \dots$, utilizând funcții de regresie după una sau două variabile [Bud 2008]. Caracteristica $n_{opt} = MP_2(v)$ poate fi obținută din modelul matematic al turbinei eoliene dat de relația cuplului $M_T(\rho, v, n)$, teoretică sau experimentală [Bud 2008], prin rezolvarea ecuației derivatei nule a cuplului turbinei M_T , pentru valori discrete ale vitezei vântului v_k , $k = 1, 2, \dots$ [Bud 2008].

Structura propusă pentru controlul turației WECS

Strategia propusă de control al turației pentru WECS este ilustrată în Fig.5.2.7.

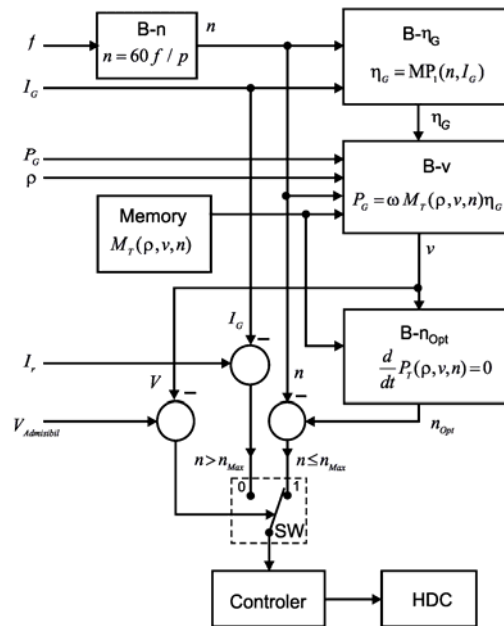


Fig.5.2.7. Structura de control al vitezei de rotație a WECS .

Structura de control propusă a turației WECS este prezentată în Fig.5.2.7, ea asigurând:

- determinarea indirectă a vitezei de rotație n a WECS, calculată de blocul B-n, turația generatorului sincron PMSG fiind proporțională cu frecvența f a tensiunii generate, $n = 60f / p$, unde p este numărul de perechi de poli ai PMSG;
- determinarea indirectă a randamentului η_G al PMSG folosind blocul de memorare și interpolare B- η_G , cu relația $\eta_G = MP_1(n, I)$, unde I este curentul generatorului;
- memorarea modelului matematic al turbinei eoliene prin relația $M_T(\rho, v, n)$ prin blocul MEMORY M_T ; este considerat modelul matematic al turbinei WT1-UPT, determinat în § 3.3, prin expresia (3.3.64) a cuplului la arbore $M_T(\rho, v, n)$;
- determinarea vitezei vântului v cu blocul de calcul B-v, din relația $P_G = \omega M_T(\rho, v, n) \cdot \eta_G(n, I)$;
- determinarea vitezei de rotație optimă n_{opt} a WECS, memorarea și interpolarea cu blocul de calcul B- n_{opt} , prin rezolvarea ecuației $\frac{d}{dt} M_T(\rho, v, n) = 0$

- selecția regimului de control al vitezei de rotație a WECS prin SW, în funcție de valoarea vitezei de rotație: (1) în cazul $n \leq n_{admisibil}$, controlul extragerii puterii maxime disponibile $P_{arb Opt}$ sau (2) în cazul când $n > n_{admisibil}$, controlul de protecție cu limitare la puterea maxim admisibilă $P_{arb Max}$.

Blocul CONTROL-n, va genera $I_{in}^*_{HDCr}$ mărimea de prescriere pentru bucla de reglare a curentului de intrare al convertorului HDC, $I_{in HDC}$.

Mărimile de intrare măsurate sunt: frecvența tensiunii PMSG (f), curentul PMSG (I), puterea electrică a PMSG (P_G), densitatea masică a aerului (ρ), respectiv, mărimi de intrare de prescriere sunt: curentul maxim admisibil (I^*_{max}), turația maxim admisibilă (n_{max}).

5.2.2. Strategii de conducere în regim de frânare

Problema limitării turației și a frânării turbinei eoliene este foarte importantă la o depășire a vitezei nominale a turbinei, situație în care puterea furnizată de turbină crește foarte mult favorizând condiții de avarii mecanice sau electrice.

Rezolvarea problemei se poate face pe două căi: (i) prin modificarea comportării aerodinamice a turbinei (prin efect "stall" la WT cu poziție fixă a paletelor, sau prin modificarea unghiului de atac la turbinele cu palete cu unghi de atac ajustabil); (ii) printr-o strategie de conducere adecvată.

Studiul implementării unui sistem de conducere aferent unei secvențe de frânare, pentru un sistem de conversie a energiei eoliene, în regimuri de funcționare care depășesc valorile regimului nominal. Având în vedere datele unui WECS real, sunt prezentate două scenarii: în primul caz, frânarea în timpul unei rafale puternice de vânt prin activarea frânării electrodinamice și electromecanice, și, în al doilea caz, frânarea este cauzată de o defecțiune a generatorului sincron cu magnet permanent (PMSG).

Acest studiu permite dimensionarea corectă a rezistorului de sarcină de frânare electrodinamică și de stabilire a valorilor pentru viteza de rotație la care trebuie să se activează diferite sisteme de frânare, cu scopul de a respecta limitele structurale impuse: curentul maxim prin PMSG, cuplul maxim suportat de axa turbinei de vânt, forțele maxime centrifuge ale paletelor, nivelul de vibrații admisibil, etc.

Controlul sistemului WECS, în acest caz, are ca obiective principale:

- Pornirea și conectarea la rețea / consumatori a WECS, la o viteză a vântului la care puterea turbinei eoliene este mai mare decât cea a pierderilor de putere din sistemul de conversie și, prin urmare, începe livrarea de energie electrică [Koc 2011] [Che 2006] [Bud 2010].

- Pentru a asigura funcționarea WECS la putere optimă a turbinei eoliene pentru domeniul de viteze a vântului între valoarea momentului de pornire și valorile nominale [Che 2006] [Bud 2010].

- Oprire în condiții normale de funcționare a WECS, la cererea operatorului uman.

- Opirrea automată de protecție a WECS în cazul unei situații de avarie a condițiilor de exploatare (viteză extremă a vântului, scurt-circuite, deteriorarea paletelor, defecțiuni mecanice).

În literatura de specialitate, un număr mare de lucrări implementează prin software dedicate modele dinamic ale diferitelor tipuri de generatoare electrice, strategii de control, regimuri de funcționare ale WECS, etc. [Cha 2010] [Ova 2007] [Yin 2009].

Se vor considera sisteme WECS echipate cu cele două tipuri de turbine experimentale WT1-UPT cu palete fixe și limitare prin "stall activ" și WT2-UPT cu sistem de protecție automată la supraturaj prin rotirea paletelor.

5.2.2.1. Frânare în cazul WT1-UPT cu palete fixe

Se consideră regimul de funcționare menționat al WECS de 5 kW cu turbină WT1-UPT cu PMSG cuplat direct [Koc 2010].

Regimul de funcționare staționar al generatorului este determinat de: M_{arb} cuplul mecanic la arborele turbinei eoliene; $M_{G arb}$ cuplul mecanic la arbore generatorului electric; M_{brake} cuplul mecanic dezvoltat de sistemul de frânare electromecanic de protecție (Cuplul la arborele turbinei eoliene este determinat de: v viteza vântului; θ unghiul de deviere a axei turbinei eoliene față de direcția vântului - devierea orizontală a rotorului turbinei de vânt față de direcția vântului); devierea expunerii (devierea planului de rotație al rotorului față de direcția vântului); intensitatea turbulenței: raportul dintre abaterea standard a vitezei vântului și viteza medie a vântului, determinate pentru același set de măsurători ale vitezei vântului, considerând și intervalul de timp.

Modelul de simulare

Modelul de simulare în ceea ce privește regimurile tranzitorii de frânare ale WECS este dezvoltat în Matlab / Simulink [Koc 2010].

După redresarea tensiunii trifazate de ieșire a PMSG (cu puntea redresoare), se alimentează convertorul hibrid c.c.-c.c. coborâtor HDC.

Pentru cuplul turbinei eoliene a sistemului WECS de 5 kW studiat, echipat cu turbina eoliană WT1-UPT, este utilizat modelul matematic determinat în § 3.3.

Studiu de caz

A fost simulat regimului tranzitoriu de frânare, având în vedere starea inițială a sistemului WECS pentru variația vitezei vântului în rafală de scurtă durată. Variația mărimilor de funcționare sunt prezentate în Fig.5.2.20 și Fig.5.2.21.

Parametrii mecanici dați de producătorul turbinei de vânt sunt: $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$; $A = 19.6 \text{ m}^2$; $R = 2.5 \text{ m}$; $C_{mo} = 0.0222$, $a = 0.0986$, $b = 0.0113$ - coeficienți constructivi mecanici Cuplul mecanic pentru frâna mecanică de siguranță a fost considerat $M_{brake} = 1000 \text{ Nm}$.

5.2.2.2. Frânare în cazul WT2-UPT cu sistem SPAST

Se stabilește o metodă pragmatică preliminară pentru a obține strategia de control a unui prototip inovator de sistem de conversie a energiei eoliene WECS de putere mică. Este prezentată

structura propusă a WECS cu componentele și subsistemele sale. S-au luat în considerare turbina eoliană WT2-UPT, generatorul PMSG, convertoarele electronice RD+HDC, sistemele de frânare (electrodinamică, electromecanică) și caracteristicile lor.

Caracteristicile sunt obținute teoretic sau experimental, din modul de funcționare constructivă și pe un model de laborator dedicat. Pe baza caracteristicilor componentelor, a restricțiilor de exploatare și a intervalelor de variație a vitezei vântului, s-au stabilit: condițiile de pornire și de oprire, legea de control pentru funcționarea optimă a turbine eoliene în domeniul nominal de variație a vitezei vântului, metodele de control și legile pentru viteze mari ale vântului, metode de frânare a WECS pentru diferite regimuri de avarie.

Metoda propusă presupune cunoscute structura sistemului WECS și caracteristicile componentelor Fig.5.2.12) [EEA 2009].

În conformitate cu tendințele deja menționate, au fost studiate, adoptate și implementate componente corespunzătoare sistemului WECS considerat. În Fig.5.2.22 și Fig.5.2.23 prezintă sistemele WECS cu generator PMSG echipate, respectiv cu turbinele WT1-UPT cu palete fixe și WT2-UPT cu sistem de protecție automată la supraturaj centrifugal SPAST [EEA 2009].

Controlul sistemului de conversie a energiei eoliene WECS: Controlul WECS are un algoritm propus care se bazează pe toate datele, caracteristicile și modele matematice ale componentelor WECS (generator, turbina, convertoare), pe modelul experimental WECS de laborator, emulator realizat special pentru acest scop (dezvoltat în § 3.4).

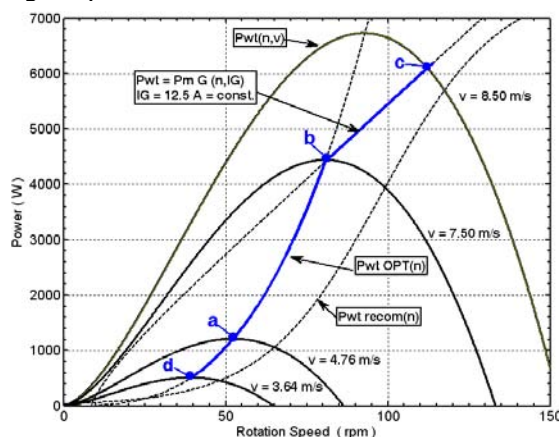


Fig.5.2.24. Caracteristica de conducere adoptată $P_{WT}(n)$ în planul caracteristicilor WT și PMSG.

În Fig.5.2.24 sunt reprezentate caracteristicile de putere, $P_{WT}(v, n)$, și de putere maximă, $P_{WT Opt}(n)$, ale turbinei eoliene WT, caracteristica de putere electromecanică la arbore a generatorului PMSG, $P_{mG}(I_G, n)$, caracteristica de putere de conducere a WT recomandată de proiectant, $P_{WT recom}(n)$ și cea adoptată, $P_{WT}(n)$. Caracteristica de putere de conducere adoptată pentru o funcționare normală a WT, este delimitată de punctele "d-a-b-c" :

- punctul "a", (n_{START} , v_{START}), corespunde momentului de intrare în funcțiune al WT,
- punctul "d", (n_{OPRIRE} , v_{OPRIRE}), corespunde momentului de oprire automată, de ieșire din regim de generare de energie,
- punctul "b", (n_{NOM} , v_{NOM}), corespunde momentului de delimitare a funcționării în regim de funcționare optim și de trecere la regimul de funcționare cu limitare,
- punctul "c", (n_{MAX} , v_{MAX}), corespunde momentului de delimitare a funcționării în regim de funcționare cu limitare, la depășirea căruia se impune regimul de frânare al WT.

Simularea WECS cu WT2-UPT în regimuri de funcționare cu limitare

Sistemul de conducere al WECS cu WT2-UPT și PMSG cu cuplaj direct în regim de frânare în Matlab-Simulink este prezentată în Fig.5.2.25.

Structura modelează: **profilul vitezei vântului** prin blocul **Profil_Vânt** prezentat în § 3.2.2; **comportarea aerodinamică a turbinei** WT2-UPT echipată cu un sistem de protecție automată la supraturaj (SPAST) este simulată prin modulul **WT2B**, care, pe baza valorilor mărimilor de intrare (viteza vântului, viteza unghiulară de rotație, turație), generează la ieșire valoarea cuplului turbinei, utilizând caracteristicile turbinei WT2-UPT (stabilite în § 3.3); modelează acțiunea sistemului de protecție SPAST, de modificare a unghiului de atac al paletelor prin Blocul **dBeta**. Blocul **CmB**; calculează valoarea coeficientului de cuplu al turbinei; cuplul mecanic de antrenare la arborele generatorului PMSG este calculat prin modulul **Mg_Cuplu Motor** (Fig.5.2.25).

Regimurile de funcționare ale WECS

(i) **Pornirea sistemului WECS.** Pornirea sistemului WECS poate fi validată numai dacă valoarea tensiunii de intrare a convertorului c.c. - c.c. hibrid HDC are valoarea $(U_{HDC})_{in} = (U_{HDC})_{START min} = 190V$, necesară asigurării conducției convertorului HDC, care tensiunii de fază în gol a PMSG $(U_{PMSG})_{START min} = 77.86V$, respectiv viteza de rotație $n_{START min} = 52$ rpm și unei viteze a vântului $v_{START min} = 4.76$ m/s. Valorile de start: $(U_{HDC})_{START min}$, $(U_{PMSG})_{START min}$, $n_{START min}$, $v_{START min}$, au fost stabilite experimental pe modelul WECS de laborator.

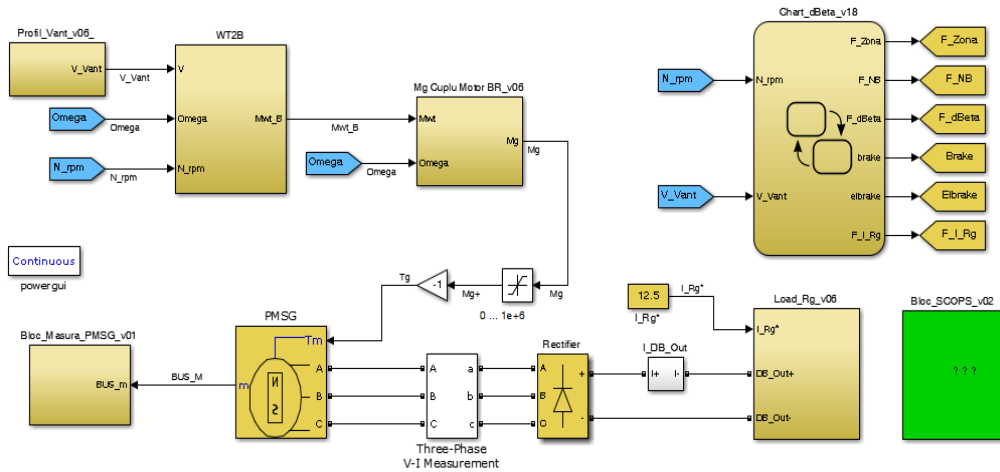


Fig.5.2.25. Sistemul de conducere al WECS cu WT2-UPT în Matlab-Simulink.

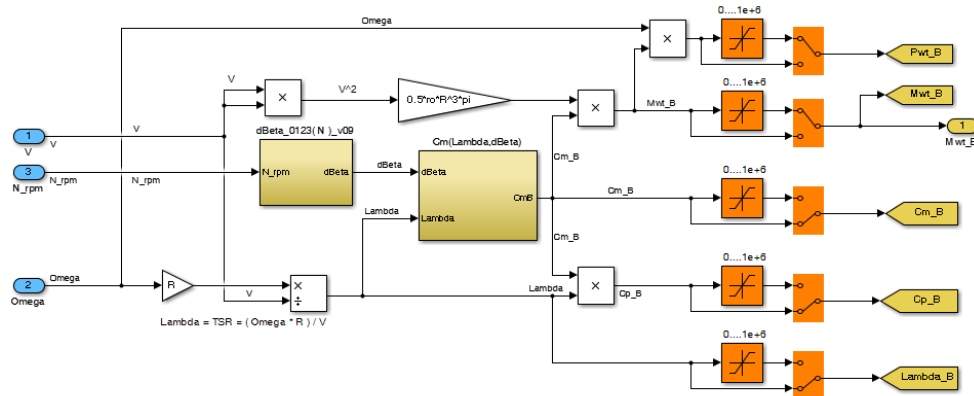


Fig.5.2.26. Bloc de modelare aerodinamică a WT2-UPT prin blocul WT2B

(ii) **Oprirea automată a WECS.** Valorile $(U_{HDC})_{STOP}$, $(U_{PMSG})_{STOP}$, n_{STOP} , v_{STOP} pentru oprirea automată a WECS la turații mici, au fost determinate pe modelul WECS de laborator. (iii) **Funcționarea WECS în domeniul vitezelor de rotație $n_{OPRIRE} < n_{START} \leq n^* \leq n_{Nom}$.** Acest regim de funcționare al WECS este determinat de următoarele constrângeri [Koc 2011, Bor 2011, Koc 2011], cu valoarea maximă a tensiunii de intrare a convertorului HDC, $U_{HDCmax}=380V$ și valoarea maxim admisibilă a curentului, în cazul considerat $I_{HDCmax}=12.5A$. În acord cu constrângerile impuse menționate, se stabilește următoarea strategie de control a WECS: (a) Funcționarea pe curba $P_{WTOpt}(n)$ între punctele "d-a-b", caracterizat prin $P_{WT} = 4500 W$ (la recomandarea proiectantului turbinei), $n = 80 rpm$, $P_{PMSG} = 4050 W$, $I_{HDC} = 12.5A$, $I_{PMSG} = 12.5A$ (valori experimentale, obținute pe modelul WECS de laborator, corespunzător puterii $P_{WT} = 4500W$). (b) Funcționarea cu valoarea curentului HDC constantă, $I_{HDC} = 12.5A$, când viteza de rotație este $n > 80 rpm$. Acest regim este reprezentat în Fig.5.2.24 prin segmentul de "b-c", între curba $P_{WTOpt}(n)$ și caracteristica $P_{WT recom}(n)$, recomandată de proiectantul turbinei.

(iv) **Funcționarea WECS la valori de supraturaj.** În acest caz de funcționare, când viteza vântului depășește $v = 8.5 m/s$, este necesar să se modifice caracteristica $P_{WT}(v, n)$, cu scopul de a reduce forța portantă a paletelor turbinei, astfel încât $I_{PMSG} = I_{HDC} + I_{Electrodynamic Brake} \leq I_{PMSGmax} = 12.5A$.

(v) **Funcționarea WECS în regim de avarie.** S-au simulat diferite regimuri posibile de avarie: a) În cazul regimului de avarie datorat defectării convertorului HDC, la viteza vântului $v < 11.5 m/s$, sistemul de control poate determina frânarea și oprirea WECS prin sistemele de frânare electrodinamică și electromecanic. b) În cazul regimului de avarie care se datorează defectării înfășurărilor generatorului, situație în care frânarea electrodinamică nu mai poate fi folosită, turația crește și astfel sistemul de limitare aerodinamică a turației intră în funcțiune. Deși sistemul WECS nu poate fi oprit, viteza de rotație rămâne mai mică decât viteza de rotație maxim admisibilă $n_{admis}=150 rpm$. Dacă viteza vântului este în domeniul $12 m/s < v < 15 m/s$ oprirea poate fi realizată împreună cu frânarea electromecanică cu un cuplu de frânare de $M_{Brake} \leq 1000 Nm$ într-un interval de circa 80 sec. c) În regimul de avarie determinat de apariția unor vibrații mecanice la nacelă sau la turnul de susținere, semnalizate prin senzorii de accelerație, simularea arată că WECS poate fi oprit numai când, presupunând că toate sistemele de frânare sunt funcționale, valoarea vitezei vântului este sub $v \leq 11m/s$.

O stare extremă o constituie funcționarea sistemului WECS la viteze extreme de până la $v_{extrem2} = 70 m/s$, când se presupune că viteza vântului crește la valoarea extremă în timpul funcționării normale, de la viteza inițială $V_0=8,5m/s$, cu un curent de sarcină $I_{Rg}=12.5A$. Numai sub acțiunea SPAST și a cuplului electromagnetic dat de curentul de sarcină, turația are o variație tranzitorie mai mică decât turația admisibilă, stabilizându-se la $n_{Final}=115rpm$, cu un unghi de atac $\Delta\beta=42^\circ$. Sistemul WECS poate furniza energie sarcinii în acest interval.

5.3. Metode de conducere cu MPPT a WECS

Principalele obiective urmărite în cadrul strategiilor de conducere, dedicate agregatelor aeroelectrice care funcționează la turație variabilă, cu urmărirea punctului de putere maximă (MPPT – "maximum power point tracking", HCS – "hill climbing search"), sunt creșterea randamentului de conversie a agregatului aeroelectric (reglajul turației) simultan cu menținerea calității energiei electrice debitate în rețea (reglajul tensiunii și factorului de putere).

Scopul principal al conducerii cu MPPT este realizarea puterii maxime în orice regim de funcționare, într-un interval dat de viteze ale vântului.

Structura sistemului de conducere a WECS este organizat pe două nivele, conform Fig.5.3.1: Nivelul superior, care asigură, la ieșire, generarea mărimilor de prescriere conform algoritmilor MPPT adoptați, pe baza mărimilor de intrare (experiența operatorului, caracteristici de putere ale turbinei eoliene, semnale de la senzori și traductoare ale vitezei vântului - anemometre, respectiv de turație - tahometre, etc.), nivelului inferior. Nivelul inferior conține structura de conducere a mărimilor de bază (turație, curent, tensiune, etc.) care generează la ieșire mărimile de comandă necesare, elaborate pe baza mărimilor de reacție de la senzori și traductoare.

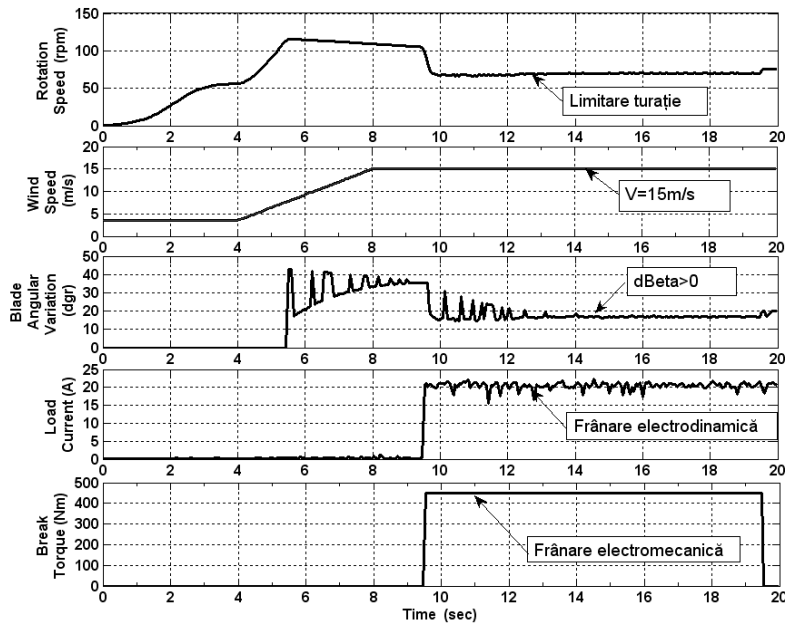


Fig.5.2.42. Limotare a turației în regim la limită, sub acțiunea SPAST fără sarcină, cu frânare simultană electrodinamică - electromecanică : ($V_0=3,5\text{m/s}$, $V_1=V_{\text{Limită}}=15\text{m/s}$, $I_{Rg}=0\text{A}$, $I_{Rg\text{ Elbreak}}=20\text{A}$, $M_{\text{Break}}=450\text{Nm}$, $n_{\text{Final}}=65\text{rpm}$).

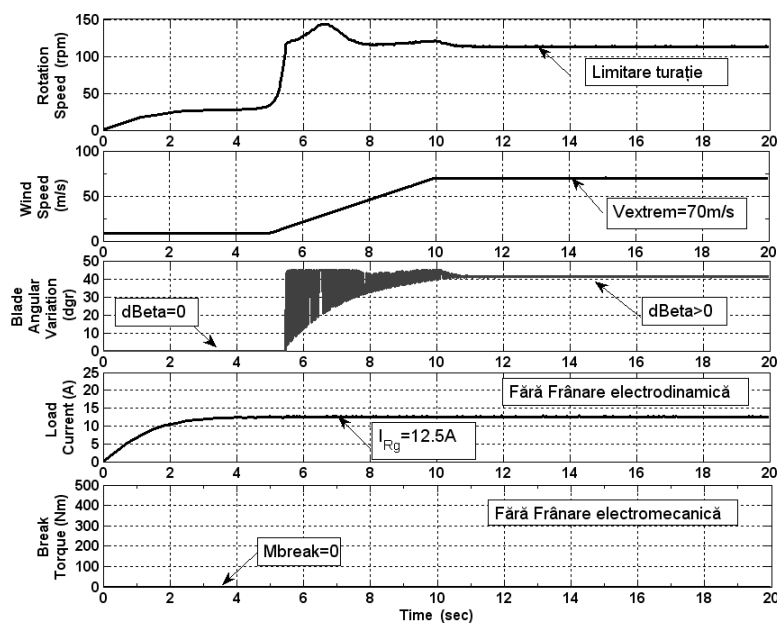


Fig.5.2.48. Regim extrem cu limitare a turației sub acțiunea SPAST cu debitare de energie, fără frânare electrodinamică și electromecanică : ($V_0=8,5\text{m/s}$, $V_1=V_{\text{extrem}}=70\text{m/s}$, $I_{Rg}=12.5\text{A}$, $I_{Rg\text{ Elbreak}}=0\text{A}$, $M_{\text{Break}}=0\text{Nm}$, $n_{\text{Final}}=115\text{rpm}$).

5.3.1. Metode de urmărire a maximului de putere (MPPT)

În literatura de specialitate se întâlnesc mai multe variante ale metodelor de tip MPPT, particularizate la diverse aplicații (agregate aeroelectrice, sisteme de conversie a energiei solare, etc.). Prin termenul de MPPT se acoperă de fapt o întreagă clasă de algoritmi de căutare [Bud 2003] [Hei 2006] [Tap 2003] [Pid 2003] [Yin 2008] [Haq 2008] [Mod 2008] [Lav 2006] [Ame 2002].

S-au analizat mai multe metode de urmărire a maximului de putere:

- Metode de urmărire a maximului de putere (MPPT) cu pas fix
- Metode MPPT-HCS cu pas divizat
- Metode MPPT-HCS cu pas adaptiv
- MPPT - turație, cu pas variabil
- Metode MPPT-HCS cu pas exponențial

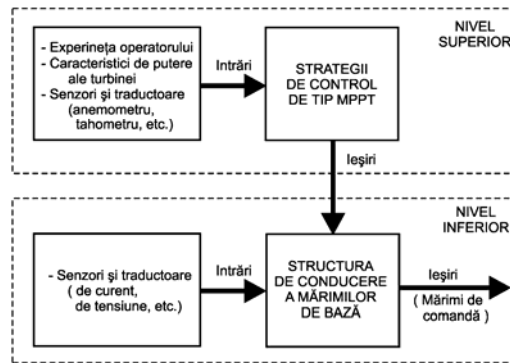


Fig.5.3.1. Structura de conducere de tip MPPT – diagrama pe nivele ierarhice.

Abordarea exponențială conduce la un răspuns de tranziție mult mai rapid. Pentru implementarea metodei este suficient să se determine incrementul inițial $\Delta\omega^*_{o}$ și valoarea de apropiere ξ , care determină numărul de iterații n ale variației incrementului și din $\Delta\omega^*_{o}$, rezultând constanta de ajustare X necesară. Implementarea metodei presupune două constrângeri: (i) starea de tranziție este dependentă de incrementul inițial $\Delta\omega^*_{o}$; (ii) starea de procesare este legată de valoarea de apropiere, ξ [Hei 2006] [Sim 2004].

Pașii algoritmului sunt următorii: se achiziționează curentul I_k și tensiunea V_k ; se calculează puterea ca produsul dintre cele două mărimi: $P_k = V_k I_k$; se calculează incrementul pentru pasul curent ΔI_{Wk} ;

- Dacă $\Delta I_{Wk-1} > 0$ (incrementul la pasul anterior a fost pozitiv):
 - dacă $P_k > P_{k-1}$ (puterea P_k este mai mare decât cea calculată la pasul anterior): prescrierea va crește, $\Delta I_{Wk} > 0$ (incrementul ΔI_{Wk} se adună)
 - dacă $P_k < P_{k-1}$ (puterea P_k este mai mică decât cea calculată la pasul anterior): prescrierea va scădea, $\Delta I_{Wk} < 0$ (incrementul ΔI_{Wk} se scade)
- Dacă $\Delta I_{Wk-1} < 0$ (incrementul la pasul anterior a fost negativ):
 - dacă $P_k > P_{k-1}$ (puterea P_k este mai mare decât cea calculată la pasul anterior): prescrierea va scădea, $\Delta I_{Wk} < 0$ (incrementul ΔI_{Wk} se scade)
 - dacă $P_k < P_{k-1}$ (puterea P_k este mai mică decât cea calculată la pasul anterior): prescrierea va crește, $\Delta I_{Wk} > 0$ (incrementul ΔI_{Wk} se adună)

S-au studiat metode de conducere cu urmărirea maximului de putere și s-au prezentat câteva variante uzuale ale acestora. Aceste metode de tip MPPT se pretează în mod natural la conducerea agregatelor aeroelectrice. Termenul de MPPT semnifică de fapt o întreagă clasă de algoritmi de căutare.

Testarea strategiilor de conducere de tip MPPT s-a realizat pentru diverse regimuri de funcționare specifice generatorului de inducție cu rotorul în scurtcircuit (la diverse variații ale vitezei vântului), obținându-se performanțe bune ale acestora.

Concluzia care poate fi desprinsă este că, structura de conducere bazată pe metoda de tip MPPT, implementată și validată prin simulare numerică, asigură performanțe bune pentru aplicația considerată (urmărirea maximului de putere a unui WECS echipat cu un generator de inducție cu rotorul în scurtcircuit).

6. Aspecte Hardware de realizare a sistemului de conversie

6.1. Convertor c.c.-c.c. hibrid (HDC)

Sistemul de conversie a energiei eoliene cu PMSG utilizează un convertor a.c.-c.c.-a.c. cu circuit intermediar de c.c. Convertorul de partea generatorului este format dintr-un convertor a.c.-c.c. necomandat (o punte redresare cu diode DB) urmat de un convertor c.c.-c.c. hibrid (HDC). Circuitul intermediar de c.c. este realizat de elemente de stocare a energiei cu supercondensatoare. Convertorul c.c.-a.c. de partea rețelei este format dintr-un invertor sursă de tensiune (BVI).

Calculul de dimensionare a componentelor HDC, pentru condițiile reale de funcționare, s-a realizat printr-un program în Matlab. Pentru verificarea corectitudinii relațiilor de calcul, s-a efectuat și o comparație grafică dintre variația mărimilor caracteristice (curenți, tensiuni, etc.) obținute pe baza relațiilor de calcul în Matlab și o schemă de simulare a HDC în programul de simulare PSIM.

Convertorul HDC asigură încărcarea supercondensatoarelor în intervalul de tensiuni între 50V și 125V, pentru un domeniu larg al tensiunilor de intrare, între 130V și 400V.

6.1.1. Funcționarea HDC

Pentru a se asigura curenți relativ mici în înfășurările PMSG, din considerente de randament, tensiunea nominală de linie a generatorului trebuie să fie mai mare de 100V (pentru un domeniu de putere 1kW ... 10kW). Pe de altă parte, tensiunea unei baterii de acumuloare având tensiunea de 24V sau 48V, convertorul c.c.-c.c. trebuie să fie unul coborâtor de tensiune, având schema convertorului hibrid cu schema din Fig.6.1.2.

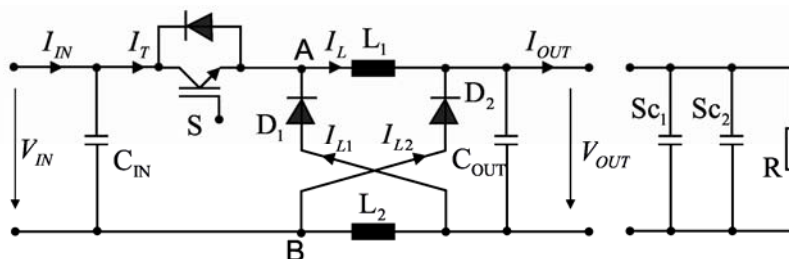


Fig.6.1.2. Schema convertorului HDC.

Acesta conține două bobine L_1 , L_2 ca elemente de stocare a energiei de comutație, precum și un tranzistor de comutație S .

Corespunzător celor două stări ale tranzistorului S , schemele echivalente ale HDC sunt: pentru starea de conducție schema din Fig.6.1.3a, respectiv, pentru starea de blocare cea din Fig.6.1.3b.

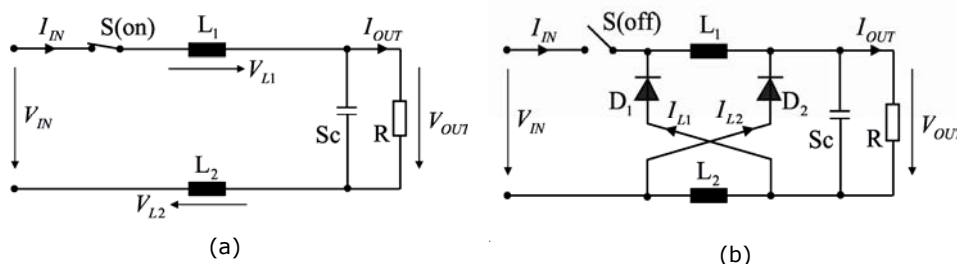


Fig.6.1.3. Schema echivalentă a HDC pentru comutatorul S : (a) închis (on); (b) deschis (off).

Pe durata conducției comutatorului S , bobinele acumulează energie. La sfârșitul perioadei de conducție, când comutatorul S se blochează, cele două inductanțe L_1 și L_2 , își schimbă polaritatea tensiunii pentru a se opune scăderii curentului și vor injecta curent în circuit, fiecare pereche formată din inductanța și dioda corespunzătoare vor funcționa ca două surse de curent, conectate paralel, debitând curent de sarcină.

Când S este închis (Fig.6.1.3a) curentul trece prin S , L_1 , supercondensatoare și L_2 . Considerând tensiunea de intrare V_{in} și tensiunea de ieșire V_{out} constante pe parcursul unei perioade de comutație, ecuația care poate fi scrisă este:

$$V_{in} = L_1 \frac{di_{L1}}{dt} + L_2 \frac{di_{L2}}{dt} + V_{out} \quad (6.1.1)$$

În cazul în care bobinele L_1 și L_2 au aceeași valoare $L_1=L_2=L$ ecuația (6.1.1) devine

$$V_{in} - V_{out} = 2L \frac{di_L}{dt} \quad (6.1.2)$$

Curentul prin bobine crește și energia obținută de la turbina eoliană se acumulează în L_1 și L_2 . În funcție de valorile V_{in} și V_{out} , convertorul funcționează într-una din cele două moduri: regimul de curent continuu (CCM), sau regimul de curent întrerupt (DCM). Deoarece formele de undă sunt diferite în cele două cazuri, CCM și DCM trebuie să fie tratate separat.

Specificațiile tehnice ale convertorului hibrid c.c.-c.c. utilizat la standul experimental sunt:

- tensiunea de intrare: $V_{in} = 130V..400V$
- tensiunea de ieșire: $V_{out} = 50V..125V$
- curentul maxim de intrare: $I_{in Max} = 17A$
- puterea maximă: $P_{in Max} = 5 kw$

Simularea funcționării HDC în Matlab - Simulink și în PSIM în cele două moduri de funcționare (CCM și DCM), au fost confirmate experimental pe stand.

Structura convertorului c.c.-c.c. hibrid HDC, prin structura sa, permite implementarea unor algoritmi de conducere a sistemelor WECS verificați pe standul experimental de la UPT.

Invertorul c.c.-c.c. hibrid considerat, realizat la UPT, este utilizat la sistemul WECS de mică putere echipate cu generator PMSG și cu turbinele eoliene WT1-UPT și WT2-UPT [EEA-2009].

6.2. Sistemul de achiziție

Funcțiile sistemului de achiziție

Sistemul de interfațare conceput și realizat, destinat achiziției și prelucrării semnalelor aferente unei unități cu DSP, destinate conducerii, supravegherii, protecției și monitorizării agregatului aeroelectric, îndeplinește următoarele funcții:

- Achiziționarea principalelor mărimi necesare:
 - o mărimi electrice de curent alternativ (trifazat, monofazat): curent, tensiune, frecvență, putere, energie;
 - o mărimi electrice de curent continuu: curent, tensiune, putere, energie;
 - o temperatura (prin utilizarea de senzori termici PT100);
 - o turația, poziția unghiulară a rotorului (prin utilizarea unui encoder de tip TIRO);
 - o cuplu mecanic (prin utilizarea unui traductor de cuplu mecanic);
- Preluarea semnalelor logice de semnalizare din proces;
- Generarea de semnale logice de comandă a procesului:
 - o generarea semnalelor logice de comandă (open colector);
 - o generarea semnalelor logice de comandă prin contacte ale contactoarelor electromagnetice (contact normal deschis, contact normal închis);
 - o generarea semnalelor logice de comandă pentru IGBT (conexiune prin fibră optică)
- Posibilitatea de achiziționare sincronă, la comanda DSP, a mărimilor din întreg procesul, ulterior informațiile se vor prelua prin transmisie serială. Modul de citire a datelor este sincron în sensul că sistemul cu DSP poate citi mărimile simultan de la toate modulele, placa cu DSP generând tactul pe care toate modulele îl folosesc pentru transmisie și achiziție.
- Modulele conțin:
 - o propriul procesor care asigură: achiziția sincronă, la comanda sistemului cu DSP; transmiterea sistemului cu DSP a mărimilor instantanee achiziționate și anumite valori calculate, prin aceasta se creează timp de calcul disponibil pentru alte operații ale DSP;
 - o circuitele electronice aferente interfațării modul - circuit de măsură,
 - o circuitele electronice aferente interfațării modul - sistem cu DSP
 - o surse de alimentare cu izolare.
- Toate modulele, mai puțin cel de TIRO, au un mod propriu de etalonare.
- Fiecare canal de achiziție pentru mărimi electrice poate funcționa în următoarele regimuri:
 - o *Mod valori directe*: atunci când la cererea plăcii DSP furnizează datele achiziționate în format brut;
 - o *Mod valori calculate*: atunci când la cererea plăcii DSP furnizează ultimele valori calculate pentru frecvență, valori energii acumulate (per total sau pe fiecare fază în parte)
 - o *Mod înregistrator*: atunci când la cerere, sau la un semnal generat de placa DSP, pornește achiziția datelor în memoria internă cu frecvența stabilită. Acest mod are avantajul că se pot sincroniza mai multe module pentru a se porni achiziționarea sincronă a diferite fenomene tranzitorii. Informația înregistrată se compune din valoare și momentul achiziției.
- Asigurarea izolării galvanice prin conexiune: cu optocuploare, cu fibră optică, prin transformatoare.
 - o între modul și circuitele de măsură
 - o între modul și sistemul cu DSP
 - o între canalele de achiziție
 - o între module
 - o față de rețeaua electrică de alimentare,
- Pentru fiecare pereche de mărimi electrice, curent și tensiune, s-a recurs la utilizarea senzorilor pur rezistivi și transmiterea digitală a informației după conversie. Izolația electrică la nivelul comunicației digitale elimină erorile datorate defazajului introdus de izolația la nivelul mărimilor analogice.
- Transmiterea datelor în funcție de mărimea achiziționată, poate fi realizată prin:
 - o conexiune rapidă, prin cabluri cu fibră optică;
 - o conexiune lentă, prin cabluri cu fire torsodate.
- Asigurarea transmiterii informației spre o unitate centrală PC.

6.2.1. Structura Sistemul de achiziție

Sistemul de achiziție și interfațare pentru plăcile DSP este compus din module capabile să furnizeze plăcilor cu DSP informații despre mărimile analogice achiziționate în format digital la nivelele semnalelor logice ale plăcilor DSP, cu viteza pe care aceste plăci o impun.

Toate modulele se conectează la placa cu DSP prin intermediul unei interfețe unice, care realizează și separarea galvanică necesară.

În Fig.6.2.2 se prezintă structura sistemului de achiziție și prelucrare a semnalelor (SAPS) pentru un agregat aeroelectric și modul de interconectare a modulelor sistemului de achiziție cu modulul DSP și cu calculatorul PC.

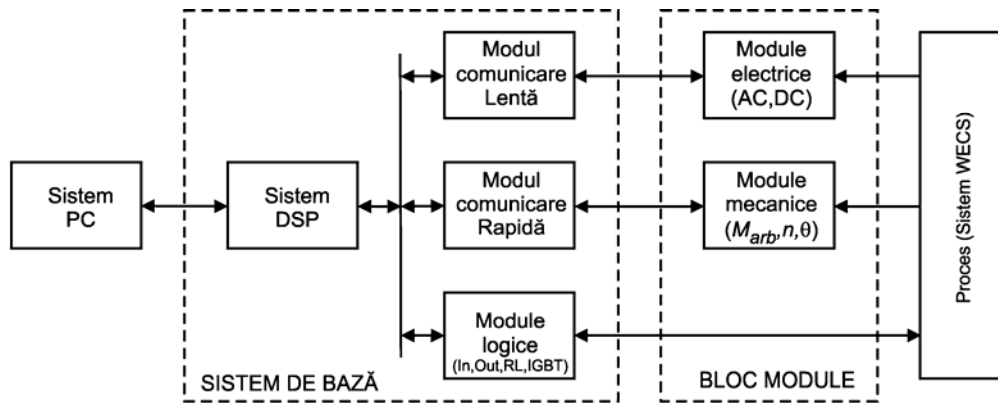


Fig.6.2.1. Structura sistemului SAPS.

Sistemului de achiziție propus, comparativ cu soluția utilizării conversiei semnalelor analogice măsurate prin circuite de izolare galvanică analogice (prin transformatoare de măsură, optocuploare cu modulare-demodulare, etc.), constă în eliminarea erorilor de măsură, posibilitatea achiziției sincrone a tuturor mărimilor necesare sistemului de conducere, supraveghere, monitorizare și protecție al WECS. Prin dezvoltarea, conceperea și realizarea unei structuri de sistem de achiziție flexibilă și multifuncțională pentru achiziția tuturor mărimilor semnificative (electrice - curent, tensiune, putere, energie; mecanice - cuplu, turație; temperatura) pentru funcționarea unui sistem de conversie a energiei eoliene. Sistemul de achiziție poate funcționa, prin programare, regim de achiziție valori instantanee sau valori prelucrate prin calcul, regim de achiziție structuri de date sub forma unor înregistrări.

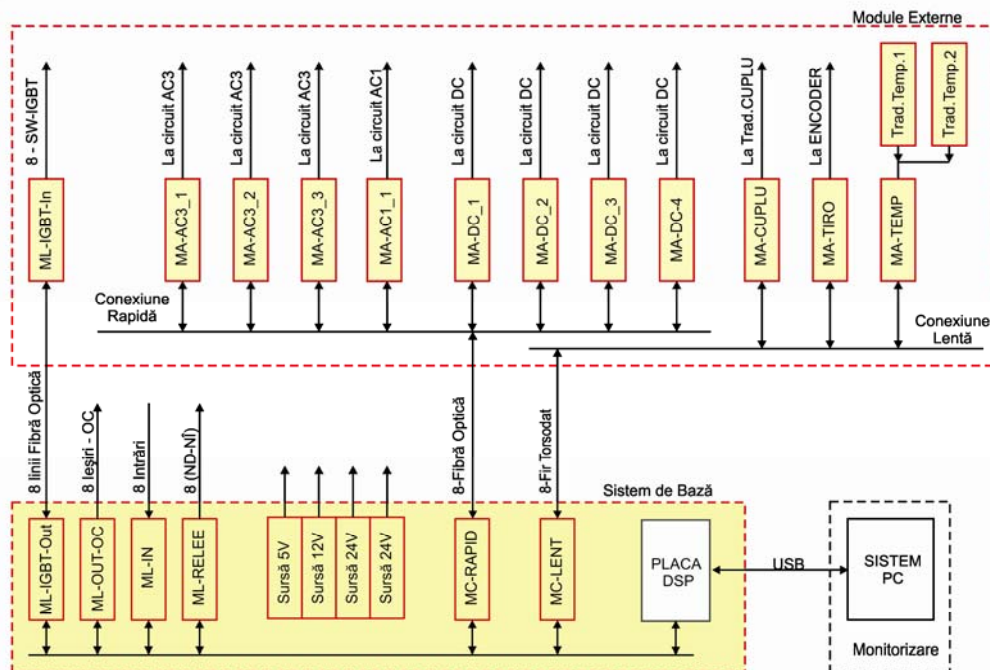


Fig.6.2.2. Structura sistemului de achiziție și prelucrare a semnalelor pentru un agregat aeroelectric.

6.3. Emulator de laborator pentru turbina eoliană. Modelare și realizare experimentală

6.3.1. Emulatorul de turbină eoliană. Rezultate experimentale pentru WT1-UPT și WT2-UPT

Se prezintă un emulator pentru turbina eoliană, realizat în laborator cu scopul de a verifica și implementa structuri și strategii de conducere, în condiții în care generatorul, convertoarele de putere și elementele de stocare a energiei sunt cele real utilizate la realizarea sistemului de conversie a energiei eoliene cu WT1-UPT și WT2-UPT. Emulatorul este realizat în tehnologia "hardware in the loop", ce include un model de turbină printr-un sistem dSpace, un motor de inducție pentru antrenare alimentat printr-un convertor de frecvență prevăzut cu un reglaj direct al cuplului (pentru simularea turbinei), cuplat cu un generator PMSG real și un sistem de echipamente de conversie a energiei, de stocare și de control. Se prezintă comparativ rezultatele simulării digitale și rezultatele experimentale, care confirmă validitatea emulatorului turbinei eoliene.

Testarea complexă a controlului generatorului pentru regimul de funcționare conectat la rețeaua generală sau în regim izolat [Fat 2007a, Fat 2007b] necesită un emulator bun al turbinei eoliene.

Emulatorului turbinei eoliene are structura din Fig.6.3.1.

- sistemul de programe care implementează modelul matematic al turbinei eoliene;
- sistemul fizic care asigură caracteristicile statice și dinamice similare sistemului real studiat [Car2010].

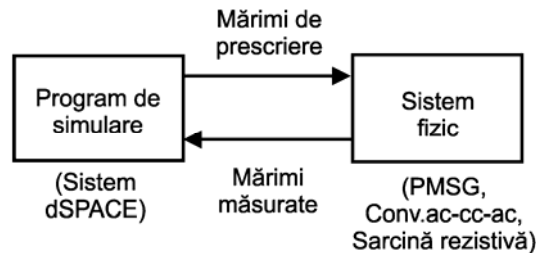


Fig.6.3.1. Schema generală "hardware in the loop" pentru emulatorul WT-UPT.

Se consideră sistemul format din implementarea numerică a turbinei eoliene cuplată la o sarcină mecanică, formată dintr-un generator PMSG cu o sarcină rezistivă.

Pentru programare și simulare s-a ales Matlab-Simulink, care permite controlul sistemului cu dSPACE .

Schema de simulare din Fig.6.3.4 conține:

- blocul generator de profil al vântului, selecția tipului de profil și a parametrilor se face de către operator de la consolă;
- blocul modelului aerodinamic al turbinei eoliene considerate (WT1-UPT sau WT2-UPT) furnizează cuplul turbinei, M_{WT} în funcție de V și ω_{WT} ;
- blocul modelului mecanic calculează valoarea vitezei unghiulare a turbinei ω_{WT} în funcție de M_{WT} și M_G ;
- blocul modelul generatorului PMSG, antrenat cu viteza unghiulară ω_{WT} , are ca mărimi de ieșire cuplul generatorului $M_G(\omega_{WT}, I_{CC})$ și tensiunea continuă redresată $V_{CC}(\omega_{WT}, I_{CC})$ de alimentare a sarcinii rezistive;
- valoarea cuplului generatorului de la ieșirea emulatorului $M_{G\ Sim} (M_{WT}, M_G)$ se obține cunoscând momentele de inerție ale turbinei eoliene și a generatorului.

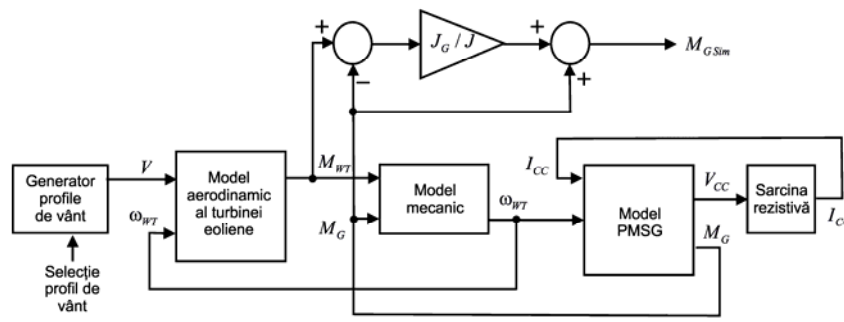


Fig. 6.3.4. Schema de simulare în Matlab-Simulink a emulatorului.

Realizarea experimentală

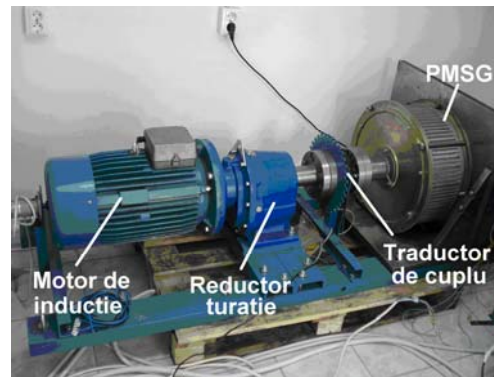
Implementarea emulatorului, prin sistemul de control cu dSPACE și inverterul trifazat cu control direct al cuplului (DTC) și grupul MI și PMSG sunt prezentate, respectiv, în Fig.6.3.8.a,b,..., h.

Avantajele unor astfel de sisteme sunt:

- flexibilitate: se pot testa o scară largă de sisteme WECS și de generatoare fără investiții în tunele aerodinamice și turbine reale;
- poate fi ușor estimată, la diferite profile de vânt, producția de energie prin WECS;
- posibilitatea verificării diferitelor: sisteme de control, convertoare de putere, elemente de stocare a energiei, sarcini electrice, etc.
- universalitatea: emulatorul poate fi utilizat pentru puteri diferite, fiind necesară adaptarea la puterea necesară a motorului de antrenare și a convertorului inverter cu control DTC;
- posibilitatea realizării rapide a prototipurilor pentru sisteme WECS;
- generalizarea: utilizarea structurii emulatorului poate fi extinsă și pentru alte sisteme de conversie a energiilor recuperabile (hidro, curenți marini, valuri marine, etc.) prin reconsiderarea programelor emulatorului.



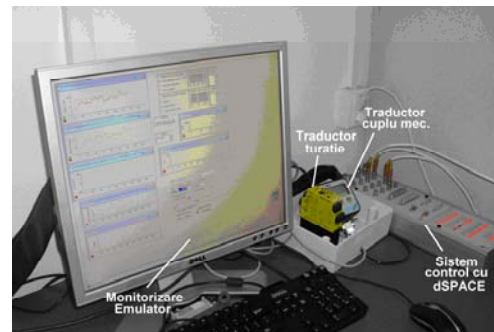
(a) Modelul de laborator al WECS cu PMSG;



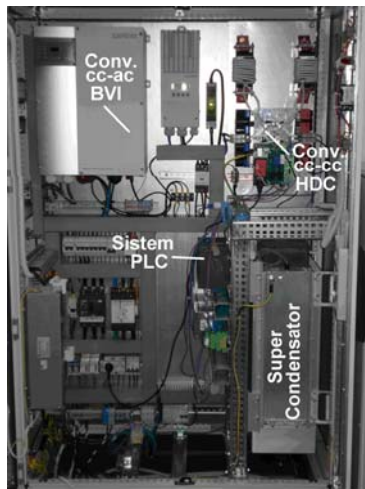
(b) Grup MI, reductor, PMSG;



(c) Sistemul de comandă al emulatorului WT;



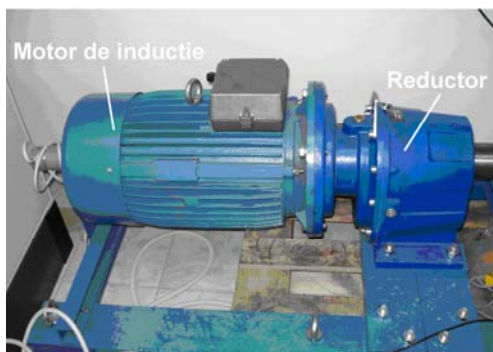
(d) Sistemul de control cu dSPACE;



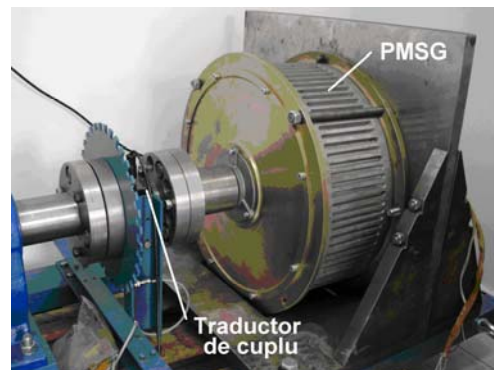
(e) Convertorul ac-cc-ac al WECS;



(f) Convertorul hibrid cc-cc HDC;



(g) Motorul MI de antrenare cu reductor de turajie;



(h) Generatorul PMSG și traductorul de cuplu mecanic.

Fig. 6.3.8. Emulatorul experimental pentru turbina eoliană (WT1-UPT, WT2-UPT), cu sistem de control bazat pe dSPACE, a unui WECS cu generator PMSG.

7. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII. PERSPECTIVE DE DEZVOLTARE

7.1. Concluzii finale

În lucrarea de față se abordează domeniul de mare actualitate al energiei resurselor eoliene, cu particularizare la problematica modelării și conducerii agregatelor aeroelectrice echipate cu generatoare de inducție și sincrone.

Lucrarea este concepută ca o dezvoltare progresivă de problematici legate de sistemele de conversie a energiei eoliene, care se completează continuu, sfârșitul fiecărei etape evidențiind particularități și concluzii utilizabile în etapele ulterioare.

În prezent se manifestă un interes deosebit pentru sistemele de conversie care operează la turație variabilă (acestea fiind agregatele la care se poate eficientiza randamentul de conversie al energiei electrice), respectiv pentru agregatele aeroelectrice cu cuplare directă a turbinei cu generatorul, care elimină amplificatorul de turație dintre turbină și generator (rezultând un preț de cost mai redus).

Realizarea unor teste prin simulare a funcționării sistemelor de conversie a energiei eoliene în diverse regimuri, impune sinteza unor modele matematice cât mai fidele pentru principalele componente ale acestora.

De asemenea, obținerea unui randament maxim necesită dezvoltarea unor structuri de conducere corespunzătoare, bazate pe metode de urmărire a extragerii maximumului de putere. În cadrul lucrării, randamentul generatorului și modelul matematic al turbinei de vânt, au fost determinate folosind funcții de regresie de o variabilă, respectiv funcții de 2 variabile.

Conducerea sistemului de conversie a energiei eoliene cu cuplaj direct și turație variabilă, a fost abordată pentru două tipuri de turbine eoliene, varianta cu palete cu unghi de atac constant și varianta cu sistem de protecție automată la supraturație, în combinație cu două tipuri de generatoare, generator de inducție cu rotor în scurtcircuit cu două înfășurări trifazate statorice (de sarcină și de excitație) și generatorul sincron cu magneti permanenți. Au fost elaborate sisteme de conducere pentru: (i) regimul optim de extragere a energiei eoliene în domeniul nominal de turații; (ii) regimul de limitare a puterii extrase la depășirea domeniului de turație nominală; (iii) regimul de frânare de protecție, la depășirea turației maxime în cazul creșterii vitezei vântului, sau la apariția unor avarii ale sistemului de conversie (defectare a convertoarelor electronice de putere, a generatorului, etc.).

Pe baza unor ample studii de caz, prin simulare și experimental, pe emulatorul de laborator sau pe sistemul de conversie a energiei eoliene real, s-a ajuns la concluzia că prin utilizarea modelelor matematice determinate pentru componente sistemului de conversie, strategiile de conducere asigură performanțe bune, fiind recomandate pentru configurații de sisteme de conversie a energiei eoliene de putere mică.

7.2. Contribuții personale

Pornind de la obiectivele declarate ale acestei lucrări, în continuare sunt prezentate principalele contribuții:

- Elaborarea unui studiu critic asupra problematicilor de baza ale sistemelor de conversie a energiei eoliene în vederea conducerii acestora.
- Realizarea unei clasificări a configurațiilor actuale ale sistemelor de conversie a energiei eoliene.
- Analiza regimurilor de funcționare specifice ale sistemelor de conversie a energiei eoliene (demarare, regimul de așteptare, conectarea, deconectarea de la rețea, oprirea).
- Dezvoltarea unor modele ale variației vitezei vântului, implementate în mediul Matlab-Simulink.
- Dezvoltarea și implementarea unui model matematic al turbinei eoliene cu unghi de atac fix.
- Dezvoltarea și implementarea unui model matematic al turbinei eoliene cu sistem de protecție automată la supraturație, prin modificarea unghiului de atac al paletelor.
- Identificarea modelului matematic al turbinei de vânt utilizând rezultatele încercărilor efectuate în cadrul unui tunel aerodinamic, bazate pe funcții de regresie de o variabilă, respectiv de două variabile.
- Studiu comparativ critic privind determinarea modelului matematic al turbinei de vânt, prin utilizarea funcțiilor de regresie de o variabilă, respectiv de două variabile.
- Identificarea unor modele matematice ale generatorului de inducție cu rotorul în scurtcircuit cu două înfășurări statorice trifazate (modelul în sistemul de referință fix cu axele „abc” și respectiv în sistemul de referință sincron cu axele „dq”).
- Implementarea și validarea modelelor matematice identificate ale generatorului de inducție cu rotorul în scurtcircuit cu două înfășurări statorice trifazate spațial ortogonale, folosind mediul Matlab.
- Implementarea și validarea unei metode de dimensionare a înfășurărilor statorice trifazate de sarcină și de excitație, în vederea obținerii unui generator de inducție cu rotor în scurtcircuit, cu două înfășurări statorice dintr-o mașină de inducție din producția de serie.

- Implementarea și validarea unui program, folosind mediul Matlab, pentru metoda de dimensionare și, respectiv, de determinare a caracteristicilor generatorului de inducție cu rotorul în scurtcircuit cu două înfășurări statorice trifazate spațial ortogonale, dimensionat.
 - Realizarea unui stand de laborator echipat cu un generator de inducție cu două înfășurări separate, de excitație și de sarcină, antrenat de un motor de inducție cu rotorul în scurtcircuit, destinat determinării caracteristicilor generatorului și testării experimentale a algoritmilor de conducere.
 - Dezvoltarea unor modele ale generatorului sincron cu magneți permanenți și implementarea acestora în Matlab-Simulink.
 - Realizarea unui stand de laborator de emulare a unui sistem de conversie a energiei eoliene, utilizând echipamente componente reale (generator sincron cu magneți permanenți, convertor electronic de putere c.c.-c.c. hibrid, convertor c.c.-a.c. invertor sursa de tensiune pentru conectare la sarcină și la rețea, etc.) și un motor de inducție cu rotorul în scurtcircuit pentru antrenare, controlat astfel pentru a genera un cuplu de antrenare a generatorului echivalent turbinei eoliene la o anumită viteză a vântului, destinat determinării caracteristicilor generatorului și a verificării experimentale ale strategiile de conducere în diferitele regimuri de funcționare.
 - Realizarea unor studii de validare, în regimuri specifice de funcționare ale generatorului de inducție, a modelului matematic neliniar propus, cu implementări în Simulink, pentru simularea unor regimuri de funcționare specifice ale generatorului de inducție cu două înfășurări statorice.
 - Analiza comparativa a rezultatelor obținute în cadrul simulării unor regimuri caracteristice de funcționare, în vederea validării modelului matematic al generatorului de inducție cu rotor scurtcircuitat cu două înfășurări statorice trifazate ortogonale.
 - Determinarea randamentului unui generator sincron cu magneți permanenți, utilizând funcții de regresie de o singură variabilă sau de două variabile, utilizând mediul CurveExpert.
 - Determinarea indirectă a turației și a vitezei vântului.
 - Realizarea unui studiu sintetic asupra metodelor de conducere ale agregatelor aeroelectrice cu urmărirea punctului de maxima putere (în corelație cu familiile de caracteristici „putere-turație” ale turbinelor eoliene).
 - Implementarea unui studiu de caz aferent conducerii agregatelor aeroelectrice utilizând metoda urmării extragerii maximului de putere cu pas fix, în cazul unui sistem de conversie a energiei eoliene echipat cu generator de inducție cu rotorul în scurtcircuit.
 - Elaborarea unui set de programe și de funcții Matlab, precum și a modelelor Simulink destinate implementării, analizei și validării metodelor de determinare a valorilor mărimilor specifice sistemelor de conversie a energiei eoliene și a structurilor de conducere în regim nominal și de limitare a puterii la depășirea limitelor nominale, respectiv cu urmărirea maximului de putere extrasă.
- Problemele prezentate, precum și rezultatele obținute în urma soluționării lor, conferă prezentei lucrări un real caracter de aplicabilitate practică, deschizând noi perspective ale cercetărilor în domeniul conversiei energiei eoliene în energie electrică.

7.3. Perspective de dezvoltare

Noile metode de conducere bazate pe urmărirea extragerii maximului de putere sunt abordate în mod neunitar în literatura de specialitate, fiind prezentate soluții adaptate unor cazuri particularizate. Aceste metode de conducere nu necesită o modelare foarte exactă a tuturor subsistemelor sistemelor de conducere a energiei eoliene.

Cercetările viitoare pot fi axate pe studiul unor noi variante ale strategiilor de conducere de urmărirea a extragerii maximului de putere, cum ar fi strategia de conducere „planificată”. Se poate urmări implementarea acestor strategii pe sistemele de conversie a energiei eoliene de putere redusă, echipate atât cu generator sincron cu magneți permanenți, cât și cu generator de inducție cu două înfășurări statorice. Aceste cercetări, reprezintă și unele dintre obiectivele unor granturi de cercetare în care este implicat autorul tezei de doctorat.

Bibliografie (Seleționată)

- [Ack 2005] T.Ackermann, "Wind Power in Power System", Wiley, 2005.
- [Ame 2002] K.Amei, Y.Takayasu, T.Ohji, M.Sakui, "A maximum power control of wind generator system using a permanent magnet synchronous generator and a boost chopper circuit", PCC Osaka 2002. Proceedings of the Power Conversion Conference, 2002, Volume 3, 2-5 April 2002 Page(s):1447 - 1452 vol.3
- [Ant 1987] I.Anton, F.Gyulai, C.Albu, N.Budișan, I.Caraba, s.a., "Investigation of optimal construction of horizontal axis wind turbines". Economic Council of Interhelping, Poiana Brașov, Romania, 1987. (Russian language)
- [Bab 2000] M.Babescu, "Electrical machines. The orthogonal model", Ed.Politehnica, Timișoara, 2000
- [Bab 2003] M.Babescu, "Synchronous machine: modeling, identification, simulation", Editura Politehnica, Timișoara, Romania, 2003 - ISBN 973-625-021-0, (lg. romanian).
- [Bar 2013] J.A.R.Barrado, X.Munte, H.Valderrama-Blavi, F.Gonzalez-Molina, "Design and testing of a dual stator winding induction generator," Systems, Signals & Devices (SSD), 2013 10th International Multi-Conference on , vol., no., pp.1,6, 18-21 March 2013
- [Bas 2014a] S.Basak, C.Chakraborty, "A brushless generation system for microgrid operation utilizing dual stator induction generator," Industrial Electronics (ISIE), 2014 IEEE 23rd International Symposium on , vol., no., pp.302,307, 1-4 June 2014

- [Bas 2014b] S.Basak, C.Chakraborty, A.K.Sinha, "Dual stator induction generator with controllable reactive power capability," *Industrial Electronics (ISIE)*, 2014 IEEE 23rd International Symposium on , vol., no., pp.2584,2589, 1-4 June 2014
- [Bej 2003] A.Bej, "Wind Turbines", Publishing House "Politehnica", Timisoara, Romania, 2003 (lg. romanian).
- [Bej 2007] A.Bej, F.Gyulai, "Preocupări în zona Banatului pentru două domenii ale energiei eoliene," *Buletinul AGIR nr.3/2007* , iulie-septembrie
- [Bet 1966] A.Betz, "Introduction to the Theory of Flow Machines." (D. G. Randall, Trans.) Oxford: Pergamon Press. 1966.
- [Bol 2006] I.Boldea, "The Electric Generators Handbook", CRC Press, 2006
- [Bor 2009a] R.Boraci, M.Babescu, N.Budisan, A.R.Boraci, "Mathematical model of the two orthogonal three-phase windings stator generator," *Applied Computational Intelligence and Informatics*, 2009. SACI '09. 5th International Symposium on , vol., no., pp.447-452, 28-29 May 2009 (ISI)
- [Bor 2009b] R.Boraci, M.Babescu, N.Budisan, A.R.Boraci, "Dynamic regimes of double - Fed orthogonal asynchronous generator," *Applied Computational Intelligence and Informatics*, 2009. SACI '09. 5th International Symposium on , vol., no., pp.551-556, 28-29 May 2009 (ISI)
- [Bor 2011] R.Boraci, C.Koch-Ciobotaru, O.Proștean, N.Budisan, "Experimental determination of an optimal control law of a small windgenerator", *IEEE 6th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI)*, 2011, 19-21 May 2011, pp.545-548.
- [Bor 2011] R.Boraci, C.Koch-Ciobotaru, O.Proștean, N.Budisan, "Experimental determination of an optimal control law of a small windgenerator", *IEEE 6th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI)*, 2011, 19-21 May 2011, pp.545-548.
- [Bor 2012] R.Boraci, I.Filip, N.Budisan, M.Greconici, "Pragmatic control strategy design method for a small windgenerator," *Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI)*, 2012 7th IEEE International Symposium on , vol., no., pp.353-358, 24-26 May 2012.
- [Bor 2014] R.Boraci, O.Proștean, N.Budisan, C.Vasar, "Consideration on Modeling, Identification and Control of Double Stator Windings Induction Generator DSWIG," *Proceedings of 9th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI 2014)*, Timișoara, Romania, May 15-17, 2014 (ISI)
- [Bu 2010a] F.Bu, W.Huang, Y.Hu, K.Shi, C.Wang, "Optimization Strategy of the Excitation Capacitor for the Dual Stator-winding Induction Generator System Applied in Wind Power Generation," *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2010 Asia-Pacific , vol., no., pp.1,5, 28-31 March 2010
- [Bu 2010b] F.Bu, W.Huang, Y.Hu, K.Shi, "Optimal selection of excitation capacitor for 6/3-phase dual stator-winding induction generator with the static excitation controller applied in wind power," *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2010 IEEE , vol., no., pp.2397,2402, 12-16 Sept. 2010
- [Bu 2011] F.Bu, W.Huang, Y.Hu, K.Shi, "An Excitation-Capacitor-Optimized Dual Stator-Winding Induction Generator With the Static Excitation Controller for Wind Power Application," *Energy Conversion*, *IEEE Transactions on* , vol.26, no.1, pp.122,131, March 2011
- [Bu 2012a] F.Bu, W.Huang, Y.Hu, J.Shi, K.Shi, "A Stand-Alone Dual Stator-Winding Induction Generator Variable Frequency AC Power System," *Power Electronics*, *IEEE Transactions on* , vol.27, no.1, pp.10,13, Jan. 2012
- [Bu 2012b] F.Bu, W.Huang, Y.Hu, J.Shi, K.Shi, "An instantaneous slip frequency control strategy for the dual stator-winding induction generator variable frequency AC power system," *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE , vol., no., pp.1673,1675, 5-9 Feb. 2012
- [Bu 2012c] F.Bu, W.Huang, Y.Hu, K.Shi, "An Integrated AC and DC Hybrid Generation System Using Dual-Stator-Winding Induction Generator With Static Excitation Controller," *Energy Conversion*, *IEEE Transactions on* , vol.27, no.3, pp.810,812, Sept. 2012
- [Bu 2013] F.Bu, Y.Hu, W.Huang, S.Zhuang, K.Shi, "Control Strategy and Dynamic Performance of Dual Stator-Winding Induction Generator Variable Frequency AC Generating System With Inductive and Capacitive Loads," *Power Electronics*, *IEEE Transactions on* , vol.PP, no.99, pp.1,1, 0
- [Bu 2014] F.Bu, Y.Hu, W.Huang, S.Zhuang, "Parameter Design and Static Performance of Dual Stator-Winding Induction Generator Variable Frequency AC Generating System With Inductive and Capacitive Loads", *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, VOL. 61, NO. 8, AUGUST 2014
- [Bu 2015] F.Bu, Y.Hu, W.Huang, S.Zhuang, K.Shi, "Wide-Speed-Range-Operation Dual Stator-Winding Induction Generator DC Generating System for Wind Power Applications," *Power Electronics*, *IEEE Transactions on* , vol.30, no.2, pp.561,573, Feb. 2015
- [Bud 1985] N.Budisan, N.Robu, "Process supervision and different responses to damages as part of a ECAROM-800 computer control system for AEROTIM-L1 windgenerator". *Microprocessor, Microcomputer and Application in Economy Symposium*, Timișoara Polytechnic Institute and Institute for Automation, Timișoara, 1985.
- [Bud 2003] N. Budisan, "Problems of induction generator systems – at wind/diesel/hydro unconventional electric groups/plants/farms", *Colectia "Energetica"*, Editura Politehnica, Timișoara, 2003.
- [Bud 2004] N.Budisan, Fr.Gyulai, O.Proștean, T.Hentea, "Speed Control Strategies for Fixed Blade Turbine Windmills", *Proceedings of the Global WINDPOWER 2004 Conference*, Chicago, March 2004.
- [Bud 2008] N.Budisan, V.Groza, O.Proștean, I.Filip, M.Biriescu, I.Szeidert, M.Stern, "Rotation Speed and Wind Speed Indirect Measurement Methods for the Control of Windmills with Fixed Blades Turbine", *IEEE International Instrumentation & Measurement Technology Conference I2MTC 2008*, Vancouver, Canada, *Proceedings*, ISBN 1-4244-1541-1, ISSN 1091-5281, May 2008, pp. 912-916
- [Bud 2010] N.Budisan, O.Proștean, R.Boraci, C.B.Muscă, "Structuri de configurare a înfășurărilor statorice ale generatoarelor de inducție și sincrone" , *Cerere de brevet de invenție la Oficiul de Stat pentru Invenții și Mărci (OSIM)*, nr.A/01401/24.12.2010.
- [Bud 2010a] N.Budisan, O.Proștean, R.Boraci, R.; I.Szeidert, V.Muller, "The dual induction generator for renewable energy conversion systems. Experimental results, problems and solutions," *Computational Cybernetics and*

- Technical Informatics (ICCC-CONTI), 2010 International Joint Conference on , vol., no., pp.445,450, 27-29 May 2010
- [Bud 2010b] N.Budisan, N.Muntean, R.Boraci, O.Cornea, C.Koch-Ciobotaru, D.Petrita, "Electronic conversion system and speed-control strategy for small wind generators," Computational Cybernetics and Technical Informatics (ICCC-CONTI), 2010 International Joint Conference on , vol., no., pp.455-458, 27-29 May 2010
- [Che 2009] Z.Chen, J.M.Guerrero and Fr.Blaabjerg, "Review of the State of the Art of Power Electronics for Wind Turbines", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 24, No. 8, August 2009
- [DIR-2009] ***, "Directiva 2009/28/CE a Parlamentului European și a Consiliului din 23.04.2009 privind promovarea utilizării energiei din surse regenerabile"; L 140/16 RO Jurnalul Oficial al Uniunii Europene 05.06.2009.
- [Dor 1977] T.Dordea, "Mașini electrice", Ed. Didactică și Pedagogică București, 1977
- [EEA-2009] ***, EEA European Economic Area Grant of Iceland, Lichtenstein, Norway: Project Nr. RD-0018 "Improvement of Structures and Efficiency of Small Horizontal Axis Wind Generators with Non-Regulated Blades", 2009-2011,
- [Fat 2007a] M.Fatu, C.Lascu, G.-D.Andreescu, R.Teodorescu, F.Blaabjerg, I.Boldea, "Voltage Sags Ride-Through of Motion Sensorless Controlled PMSG for Wind Turbines", Power Electronics Specialists Conference, 2007, pp. 1239 - 1244.
- [Fat 2007b] M.Fatu, L.Tutelea, R.Teodorescu, F.Blaabjerg, I.Boldea, "Motion Sensorless Bidirectional PWM Converter Control with Seamless Switching from Power Grid to Stand Alone and Back", Industry Applications Conference, 2007, pp. 171 - 178.
- [Gac 2005] A.Gacsani, V.Tiponuş, "Sistem de achiziții de date", Ed.Universității din Oradea, 2005, ISBN 973-613-868-2.
- [Haq 2008] M.E.Haque, M.Negnevitsky, K.M.Muttaqi, "A Novel Control Strategy for a Variable Speed Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator", 2008. IAS '08. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 5-9 Oct. 2008 Page(s):1 - 8
- [Haq 2010] M.E.Haque, M.Negnevitsky, K.M.Muttaqi, "A Novel Control Strategy for a Variable-Speed Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 46, No. 1, Jan/Feb 2010, pp 331-339
- [Hau 2005] E.Hau, "Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics", 2nd edition, Springer, 2005
- [Hua 2010] W.Huang, Y.Hu, F.Bu, K.Shi, "The magneto motive force of a novel dual stator-winding induction generator," in Proc. IEEE Energy Convers. Cong. Expo., 2010, pp. 3582-3587.
- [IEA-2014] International Energy Agency; "Renewables in global energy supply: An IEA facts sheet (PDF)", OECD 2007.
- [IEC-2006] *** International Standard IEC 614000-2, Part.2: Design requirements for small wind turbines.
- [Jur 1996] T.Jurca, D.Stoiciu, "Instrumentație de măsurare. Structuri și circuite", Ed. de Vest, Timișoara, 1996.
- [Koc 2010] C.Koch-Ciobotaru, R.Boraci, I.Filip, C.Vasar, G.Proștean, "Control Strategy for a Variable-Speed Wind Turbine Using DC Bus Measurements", 8th IEEE International Symposium on Intelligent Systems and Informatics September 10-11, 2010 ---.Subotica, Serbia pp.329-334;
- [Koc 2011a] C.Koch-Ciobotaru, R.Boraci, O.Proștean, N.Budisan, "Optimal control for a variable-speed wind turbine", 6th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI), 2011, vol., no., 19-21, May 2011, pp.541-544.
- [Koc 2011b] C.Koch-Ciobotaru, R.Boraci, I.Filip, C.Vasar, "Study of brake transient regimes for a small wind generator", IEEE 3rd International Symposium on Exploitation of Renewable Energy Sources (EXPRES), 11-12 March 2011, pp.85-89.
- [Kou 2006] E.Koutroulis, K.Kalaitzakis, "Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 53, no. 2, pp. 486-494, Apr. 2006.
- [Kra -1986] P.C.Krause, "Analysis of Electric Machinery", New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1986.
- [Li 2008] H.Li , Z.Chen, "Overview of different wind generator systems and their comparisons," IET Renew. Power Gener., vol. 2, no. 2, pp. 123-138, Jun. 2008.
- [Li 2009] Y.Li, Y.Hu, W.Huang, L.Liu, Y.Zhang, "The Capacity Optimization for the Static Excitation Controller of the Dual-Stator-Winding Induction Generator Operating in a Wide Speed Range," Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.56, no.2, pp.530,541, Feb. 2009
- [Liu 2005] L.Liu, Y.Hu, W. Huang, "Optimal design of dual stator-winding induction generator with variable speed based on improved genetic algorithm," in Proc. 8th Int. Conf. Elect. Mach. Syst., 2005, pp. 2343-2348.
- [Liu 2010a] L.Liu, "Analysis of the Physical Mechanism Inside Dual Stator-Winding Induction Generator," Information and Computing (ICIC), 2010 Third International Conference on , vol.2, no., pp.226,229, 4-6 June 2010
- [Liu 2012] C.Liu, F.Blaabjerg, W.Chen, D.Xu, "Stator current harmonic control with resonant controller for doubly fed induction generator," IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, no. 7, pp. 3207-3220, Jul. 2012.
- [Luk 2008] S.M.Lukic, J.Cao, R.C.Bansal, F.Rodriguez, A.Emadi, "Energy storage systems for automotive applications," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 55, no. 6, pp. 2258.2267, Jun. 2008.
- [Man 2012] J.F.Manwell, J.G.McGowan, A.L.Rogers, "Wind Energy Explained: Theory, Design and Application". Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons Ltd., 2012, ISBN 9780470015001.
- [Mar 2003] J.Marques, H.Pinheiro, H.A.Gründling, J.R.Pinheiro, H.L.Hey, "A survey on Variable-Speed Wind Turbine System", Power Electronics Brazilian Congress, COBEP'03, pp. 732-738, Fortaleza 03.
- [MATLAB-SIMULINK] *** www.mathworks.com/products/matlab/
- [Mil 2008] T.Milos, F.Gyulai, "CAD technique for blade design of small power wind turbine", Proceedings of the International Conference on Hydraulic Machinery and Equipments, HME 2008, Timisoara, Romania, Oct.16-17, 2008.

- [Mil 2010] T.Milos, A.Bej, E.Dobanda, A.Manea, R.Badarau, D.Stroita, "Blade design using CAD technique for small power wind turbine", International Joint Conference on Computational Cybernetics and Technical Informatics (ICCC-CONTI), Timisoara, Romania, 27-29 May 2010, pp.571-575.
- [Mir 2007b] A.Mirecki, X.Roboam and Fr.Richardeau, "Architecture complexity and energy efficiency of small wind turbines", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 54, No. 1, February 2007
- [Mun 2010] N.Muntean, O.Cornea, D.Petrila, "A New Conversion and Control System for a Small Off - Grid Wind Turbine", 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM 2010. 978-1-4244-7020-4/10/\$26.00 '2010 IEEE 1167-1173.
- [Mun 2011] N.Muntean, L.Tutelea, D.Petrila, O.Pelan, "Hardware in the loop wind turbine emulator," Electrical Machines and Power Electronics and 2011 Electromotion Joint Conference (ACEMP), 2011 International Aegean Conference on, vol., no., pp.53,58, 8-10 Sept. 2011
- [Nel 2003] R.M.Nelms, D.R.Cahela, B.J.Tatarchuk, "Modeling double-layer capacitor behavior using ladder circuits," IEEE Trans.Aerosp.Electron.Syst., vol. 39, no. 2, pp. 430-438, Apr. 2003.
- [Ojo 2000] O.Ojo, I.E.Davidson, "PWM-VSI inverter-assisted stand-alone dual stator winding induction generator," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 36, no. 6, pp. 1604-1611, Nov. 2000.
- [Ova 2007] R.I.Ovando, J.Aguayo, M.Cotorogea, "Emulation of a Low Power Wind Turbine with a DC motor in Matlab/Simulink", Power Electronics Specialists Conference, 2007. PESC 2007. IEEE, 17- 21 June 2007, 859 - 864. .
- [Pah 2009] M.Pahlevaninezhad, A.Safaei, S.Eren,A.Bakhshai, P.Jain, "Adaptive nonlinear maximum power point tracker for a WECS based on permanent magnet synchronous generator fed by a matrix converter", 2009. ECCE.IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 20-24 Sept. 2009 Page(s):2578 - 2583
- [Par 1981] J.Park, "The Wind Power Book", Cheshire Books, Palo Alto, California, 1981.
- [Pen 1996] F.Peng, J.Lai, "Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 45, no. 1, pp. 293-297, Feb. 1996.
- [PNA-2010] ***, "Planul Național de Acțiune în Domeniul Energiilor din Surse Regenerabile (PNAER) ", ICEMENERG-București, 2010.
- [PRO-2009] ***, Proiect Nr.127/ICER-TM, Sectorial Operational Programme Increase of Economic RD&I: Operation 2.2.1, National PROGRAMME "CAPACITIES", MODULE I: Large investment projects, 2009-2011.
- [PRO-2012] ***, Proiect: "Sisteme Hibrade de Conversie a Energiei Regenerabile de Mică Putere Integrate într-o Rețea (MICROREN)", Proiect Tip 2, Contract: 36, Autoritate contractantă:UEFISCDI, 2012-2015.
- [REN21-2014] ***, "RENEWABLES 2014-GLOBAL STATUS REPORT" <http://www.ren21.net/>
- [Sim 2004] G. Simoes, F. Farret, „Renewable Energy Systems – Design and Analysis with Induction Generator”, CRC Press, 2004, ISBN 0-8493-2031-3
- [Sin 2008] M.Singh, A.Chandra, "Power maximization and voltage sag/swell ride-through capability of PMSG based variable speed wind energy conversion system," IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 2008, 10-13 Nov. 2008 Page(s):2206-2211
- [Spa 2005] O.Spatari, P.Roșca, "Sisteme de achiziție date", Ed.ULBS 2005.
- [Ște 2003] C.Ștefănescu, N.Cupcea, "Electronică Aplicată - Sisteme inteligente hardware-software de măsurare și control" , București 2003.
- [Tho 2009b] J.S.Thongam, P.Bouchard, H.Ezzaidi, M.Ouhrouche, "Wind speed sensorless maximum power point tracking control of variable speed wind energy conversion systems", 2009. IEMDC '09. IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 3-6 May 2009 Page(s)1832-1837
- [Thr 2007] R.Thresher, M.Robinson, P.Veers, "To Capture the Wind. The status and future of wind energy technology", IEEE Power and Energy Magazine, vol. 5, no. 6, pp. 34-46, November/December 2007.
- [TPA-2013] ***, "Wind Energy and other renewable energy sources in Romania 2013", TPA Horwath România and Schoenherr, Bucharest, May, 2013, 3-rd edition, PDF, <http://www.wall-street.ro/files/149896-446.pdf>, 12.12.2014.
- [Tut 2014] L.N.Tutelea, I.Boldea, N.Muntean, S.I.Deaconu, "Modeling and performance of novel scheme dual winding cage rotor variable speed induction generator with DC link power delivery," Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2014 IEEE, vol., no., pp.271,278, 14-18 Sept. 2014
- [Wan 2005] D.Wang, W.Ma, F.Xiao, B.Zhang, D.Liu, A.Hu, "A novel standalone dual stator-winding induction generator with static excitation regulation," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 20, no. 4, pp. 826-835, Dec.2005.
- [Yin 2009] Ying-Yi Hong, Shiue-Der Lu, Ching-Sheng Chiou, "MPPT for PM wind generator using gradient approximation", Energy Conversion and Management 50 (2009) 82-89.