

STRATEGII DE COMANDĂ ȘI CONTROL ALE TURBINELOR DE VÂNT DE MARE PUTERE

Conf. dr. ing. Lucian MIHEȚ-POPA
Universitatea „Politehnica” din Timișoara



Absolvent al Facultății de Electrotehnică-Timișoara, promoția 1999. A absolvit studiile aprofundate în 2000, la specializarea Acționări Electrice și Electronică de Putere, iar în 2003 a obținut titlul de Doctor în Inginerie Electrică. În prezent este cadru didactic la Facultatea de Electrotehnică din cadrul catedrei de Mașini, Acționări și Utilizarea Energiei (MAUE). Este autor a trei cărți și a publicat peste 50 de lucrări științifice, ca unic sau prim autor, în reviste internaționale și naționale. A participat la 10 contracte de cercetare, dintre care 3 internaționale. A fost profesor invitat în Germania, la Universitatea din Siegen, în anul 2004 și a lucrat ca cercetător la Universitatea din Aalborg-Danemarca, în perioada 2000-2002. Este membru AGIR din 2008.

REZUMAT. Lucrarea prezintă principalele metode de comandă și control ale turbinelor de vânt cu generatoare de inducție de mare putere conectate la rețea. Sunt prezentate elementele componente ale sistemelor de reglare a pasului paletelor atât pentru o turbină de vânt cu viteză constantă cât și pentru una cu viteză variabilă. Pentru evaluarea performanțelor celor două sisteme eoliene a fost realizat un set de simulări, utilizând pachetul de programe dedicat sistemelor eoliene, DigSILENT.

Cuvinte cheie: controlul activ și pasiv al pasului paletelor, generatoare de inducție, turbine eoliene cu viteză constantă și variabilă.

ABSTRACT. This paper gives an overview of the state of the art control strategies for large wind turbines using induction generators. An active stall constant speed wind turbine controller with its actuator system for variable pitch angle and a control strategy for a pitch controlled variable speed wind turbine are described. To evaluate the performance for an active stall constant speed wind turbine using cage rotor induction generator versus a pitch controlled variable speed wind turbine using doubly fed induction generator, a set of simulations are performed.

Keywords: active and passive stall control, constant speed and variable speed wind turbines, induction generators.

1. INTRODUCERE

Energia eoliană este o sursă de energie inepuizabilă și nu este poluantă, iar în unele zone este „abundentă”. Acest lucru este fructificat cu precădere în țări ca Danemarca, unde din consumul anual de energie electrică 15 % provine din conversia energiei eoliene [1-3, 6, 10], sau Germania care în 2002 a fost țara cu cea mai mare putere instalată din lume [3, 9-10].

Industria producătoare de turbine de vânt a înregistrat o creștere rapidă și semnificativă în special în ultimii 20 de ani. O atenție deosebită a fost îndreptată spre strategiile de comandă și control ale turbinelor de mare putere (centralelor eoliene) conectate direct la rețea. Scopul principal al strategiilor de comanda și control dezvoltate constă în capacitatea turbinelor eoliene de a produce energie electrică la un cost cât mai redus. Acest lucru este posibil prin reducerea componentelor mecanice și prin reglarea pasului paletelor în vederea obținerii maximului de energie produsă de turbină [2-3].

Energia eoliană a devenit cea mai rentabilă sursă de energie (4 Eurocent/kWh). În anul 2005 au fost instalate turbine de vânt, având o putere instalată de 50 GW (1,3 % din totalul de putere instalată pe glob), iar până în

2020 se estimează că aceasta ar putea ajunge la 400 GW (8 % din totalul de putere instalată pe glob) [9-10].

2. STRATEGII DE REGLARE ȘI CONTROL ALE TURBINELOR EOLIENE

Turbinele de vânt sunt proiectate pentru a produce energie electrică la un preț cât mai scăzut cu o eficiență maximă. Acest lucru poate fi verificat pentru o viteză a vântului considerată nominală (12-15) m/s, la care puterea electrică (activă) de ieșire, produsă de turbină trebuie să fie maximă (egală cu puterea nominală a generatorului electric) [3, 7-10].

În cazul în care viteza vântului are o intensitate foarte puternică (>20-25 m/s) turbina eoliană trebuie oprită pentru a nu se distruge. De aceea este necesar ca turbinele de vânt, în special cele de mare putere (>500 kW) să conțină o anumită strategie de control [2, 3-5].

Turbinele de vânt clasice cu viteză constantă utilizează generatoare de inducție cu rotorul în colivie și nu necesită implementarea unei strategii de control a turbinei (rotorului aerodinamic). Turbinele eoliene cu viteză variabilă au implementată o strategie de comandă și

control, atât pentru generatorul electric cât și pentru rotorul turbinei, și pot utiliza atât mașini de inducție (asincrone) cu rotorul bobinat cât și mașini sincrone (atât cu magneți permanenți cât și cu înfășurare de excitație). De aceea, turbinele cu viteză variabilă au un sistem electro-mecanic mult mai complicat decât cele cu viteză constantă, dar pot să funcționeze la eficiență maximă pentru un domeniu al vitezei vântului mult mai larg, iar prin aceasta să capteze mai multă energie (cu până la 10 %).

Există trei strategii de control ale turbinelor eoliene de mare putere (*pitch control*, *stall control* și *active stall control*) care vor fi prezentate în continuare.

2.1. Reglarea pasului paletelor

Reglarea pasului paletelor (*pitch control*), aplicată turbinelor eoliene cu viteză variabilă, constă în măsurarea continuă a vitezei și a direcției vântului iar când puterea produsă de turbină devine mai mare decât puterea nominală se modifică unghiul paletei elicelor (prin intermediul unui mecanism hidraulic în general), astfel încât paletele să nu mai fie pe direcția vântului (în jurul axei longitudinale). Astfel, puterea generată de turbină rămâne constantă în jurul valorii nominale. Invers, când puterea generată scade sub valoarea nominală, paletele sunt puse din nou perpendicular pe direcția vântului pentru a extrage maximul de energie.

De asemenea, această metodă este folosită și în timpul procesului de pornire al turbinei pentru a asigura o pornire mai lină, fără șocuri, și pentru a nu distruge agregatele mecanice ale acesteia, cum ar fi cutia de viteze.

Investiția mecanismului de reglare al pasului paletelor plus sistemul de control aferent sunt justificate doar la puteri mari ale turbinelor eoliene (>800 kW).

2.2. Controlul pasiv

Această metodă se bazează pe proprietățile aerodinamice ale paletelor rotorului turbinei, deoarece acestea sunt înclinate (blocate) la un anumit unghi constant. Aceste proprietăți se referă la situația în care viteza vântului crește peste valoarea admisibilă, care le-ar putea distruge, situație în care paletele își măresc unghiul de atac față de axa longitudinală și se răsucesc până devin paralele pe direcția vântului și prin aceasta sunt capabile să blocheze rotorul turbinei.

Procesul de blocare al rotorului turbinei nu se realizează automat, perioadă în care puterea generată de turbină (puterea de ieșire) fluctuează foarte mult. De

aceea nu se recomandă plasarea turbinelor eoliene, care au implementată această metodă de control, în locuri cu rafale de vânt puternice.

Avantajul acestei metode este simplitatea și costul redus, deoarece nu necesită un mecanism suplimentar de reglare al pasului paletelor, dar designul rotorului aerodinamic este mai complex.

2.3. Controlul activ

La puteri de peste 800 kW se impune utilizarea acestui tip de control dedicat turbinelor de vânt cu viteză constantă. Controlul activ (*active stall*) al pasului paletelor este o metodă asemănătoare cu *pitch control*, deoarece utilizează un mecanism de reglare al pasului paletelor. Diferența dintre cele două strategii de control constă în faptul că, controlul activ al pasului paletelor nu monitorizează în permanență viteza și direcția vântului, iar când puterea de ieșire a turbinei depășește valoarea nominală paletele sunt rotite în direcție opusă.

Comparativ față de controlul pasiv (*stall control*) această metodă (*active stall control*) are avantajul că poate controla puterea activă generată de turbina de vânt mult mai precis și, de asemenea, la viteze mari ale vântului puterea este menținută constantă în jurul valorii nominale.

Turbinele de vânt moderne (fabricate în special în ultimii 10 ani), cu viteză constantă și generator de inducție cu rotorul în colivie, au implementată această metodă de control.

3. TURBINE DE VÂNT CU VITEZĂ CONSTANTĂ ȘI CONTROL ACTIV AL PASULUI PALETTELOR

În cazul turbinelor de vânt, de ordinul megawaților (centrale eoliene), cu viteză constantă, utilizând generatoare de inducție cu rotorul în colivie, conectate direct la rețea printr-un soft-starter fără alte componente electronice, sistemul de control activ al pasului paletelor a devenit în ultimii ani o componentă de bază. După cum am menționat în paragraful anterior, o turbină de vânt cu reglarea activă a pasului paletelor este, de fapt, o turbină care utilizează, pentru controlul puterii de ieșire și implicit pentru controlul puterii aerodinamice a rotorului turbinei, pasul variabil al paletelor prin intermediul unui mecanism hidraulic sau a unui motor pas cu pas. Reglarea pasului paletelor este utilizat atât pentru pornirea turbinelor cât și pentru oprirea acestora în caz de urgență și pentru controlul puterii active generate.

În figura 1 sunt prezentate elementele componente ale unei turbine de vânt de 2 MW cu viteză constantă și controlul activ al pasului paletelor.

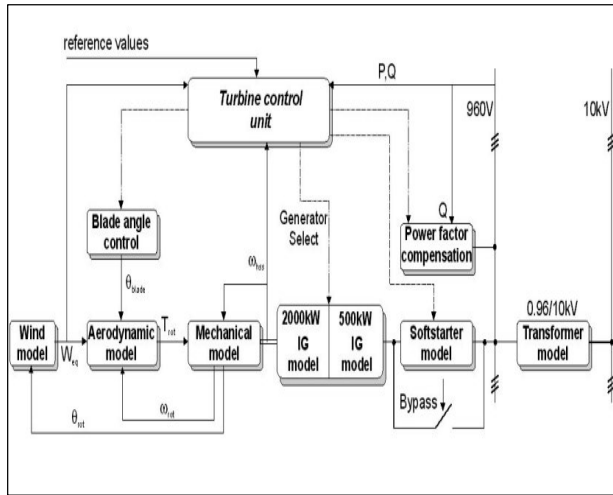


Fig. 1. Diagrama bloc cu elementele componente ale unei turbine de vânt cu viteză constantă și controlul activ al pasului paletelor.

Controlul activ implică interacțiunea dintre modelul vântului, modelul aerodinamic al rotorului turbinei și sistemul de reglare și control al pasului paletelor. Modelul vântului conține viteza acestuia măsurată cu un anemometru, pe circumferința fiecărei palete, și apoi filtrată. Modelul aerodinamic conține caracteristica reală a unei turbine de 2 MW ($C_p = f(\text{viteza vântului})$), figura 3. Blocul de control al unghiului paletelor (fig. 2) are ca mărime de intrare puterea de referință comparată cu puterea generatorului măsurată, având ca mărime de control viteza de rotație. Acest bloc conține un regulator PI cu limitare pentru corecția erorilor și limitarea unghiului paletei, un filtru pentru viteza vântului și un bloc temporizator pentru servomecanismul hidraulic de acționare al paletelor.

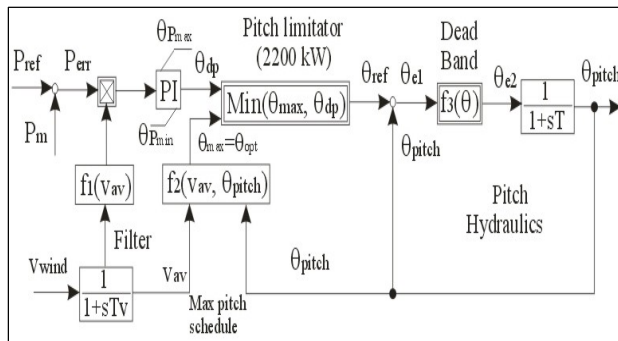


Fig. 2. Diagrama bloc a sistemului de reglare și control al pasului paletelor.

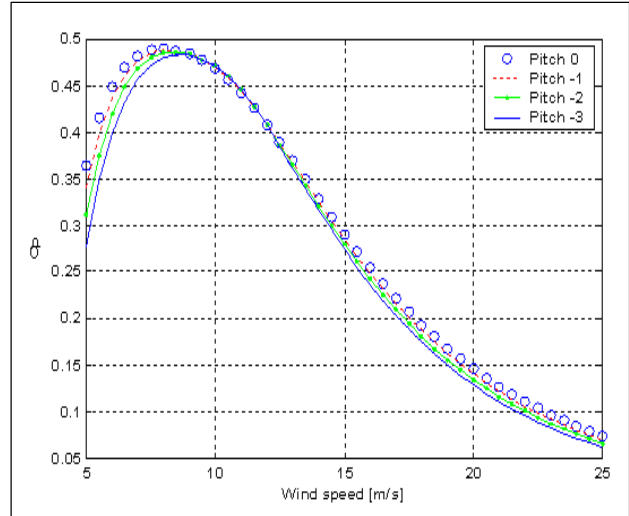


Fig. 3. Factorul de putere (C_p) în funcție de viteza vântului la diferite unghiuri ale pasului paletelor (pitch) a unei turbine de vânt de 2 MW cu diametrul rotorului de 76 m.

4. TURBINE DE VÂNT CU VITEZĂ VARIABILĂ ȘI CONTROLUL PASULUI PALETELOR

Datorită faptului că viteza vântului este variabilă este de dorit o soluție care să permită variația vitezei (turația generatorului) într-un domeniu cât mai larg ($\pm 25-30\%$). Acest lucru este posibil prin conectarea a două convertoare de frecvență (spate în spate), unul conectat la bornele rotorului mașinii iar celălalt la rețea, ambele fiind conectate la același circuit intermediar de tensiune. Cele două convertoare sunt comandate separat, convertorul din rotor are rolul de a controla independent circulația de putere activă și reactivă (în ambele sensuri), iar convertorul dinspre rețea are rolul de a menține constantă tensiunea din circuitul intermediar și factorul de putere unitar.

Sistemul central de control al turbinei eoliene mai conține, pe lângă controlul celor două convertoare, și controlul propriu-zis al rotorului turbinei. Acest lucru este posibil prin monitorizarea vitezei (turației) generatorului și a puterilor activă și reactivă, și în funcție de acești parametri își modifică unghiul pasului paletelor (θ_{pitch}), după cum poate fi văzut și în figura 4.

Soluția din figura 4 este cea mai utilizată configurație de turbine eoliene la ora actuală în lume, aplicată în special turbinelor de vânt de 2 și 3 MW cu viteză variabilă și generator de inducție dublu alimentat (rotor bobinat).

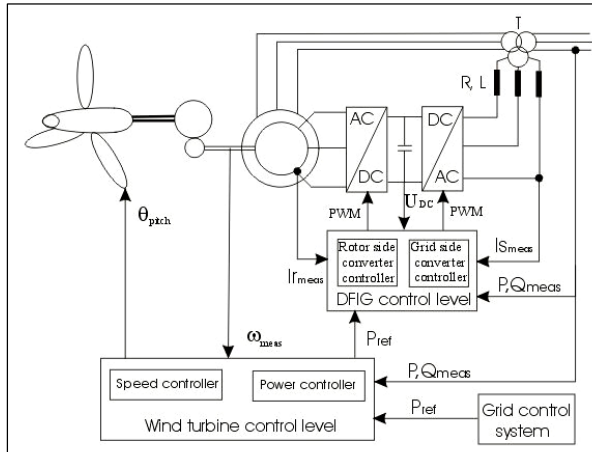


Fig. 4. Diagrama bloc a unei turbine de vânt cu viteză variabilă utilizând un generator de inducție cu rotorul bobinat și convertor bidirecțional cu circuit intermediar de tensiune.

5. REZULTATELE SIMULĂRIILOR

Cele două configurații de turbine eoliene, cu viteză constantă și cu viteză variabilă, prezentate în figura 1 și figura 4, au fost modelate și implementate într-un soft dedicat DIGSILENT, iar rezultatele simulărilor vor fi prezentate în figura 5 și în figura 6.

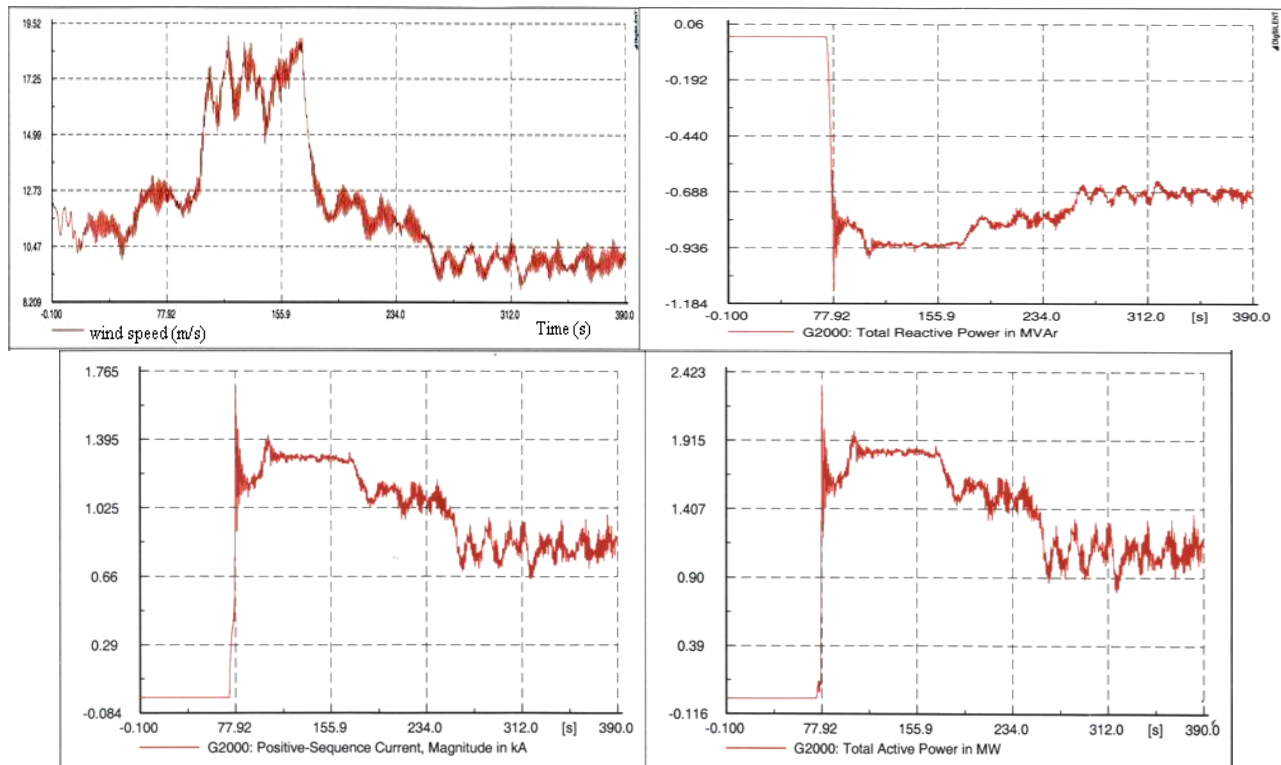


Fig. 5. Simularea unei turbine de vânt cu viteză constantă cu reglarea activă a pasului paletelor.

Figura 5 reprezintă simularea unui sistem eolian (turbină + generator) cu viteză constantă și reglaj activ al pasului paletelor, iar figura 6, a unui sistem cu viteză variabilă (mașină de inducție cu rotor bobinat + + convertor bidirecțional de putere) cu reglarea continuă a pasului paletelor. În figura 6, simularea a fost realizată pentru o viteză a vântului de peste 15 m/s pentru a verifica comportarea sistemului de reglare a pasului paletelor, necesar pentru a menține/limita puterea generată constantă în jurul valorii nominale de 2 MW.

Au fost utilizați parametri reali, atât pentru rotorul turbinei cât și pentru mașina electrică, ai celor două configurații de turbine de vânt de 2 MW/unitate.

6. CONCLUZII

Articolul prezintă principalele strategii de comandă și control ale turbinelor de vânt de mare putere, atât cu viteză constantă cât și cu viteză variabilă.

Există un număr mare de soluții pentru sistemele eoliene de mare putere, dar cele mai utilizate și performante sunt cele două soluții tratate și în această lucrare: turbine de vânt cu viteză constantă cu reglarea activă a pasului paletelor și turbine de vânt cu viteză variabilă cu reglarea continuă a pasului paletelor.

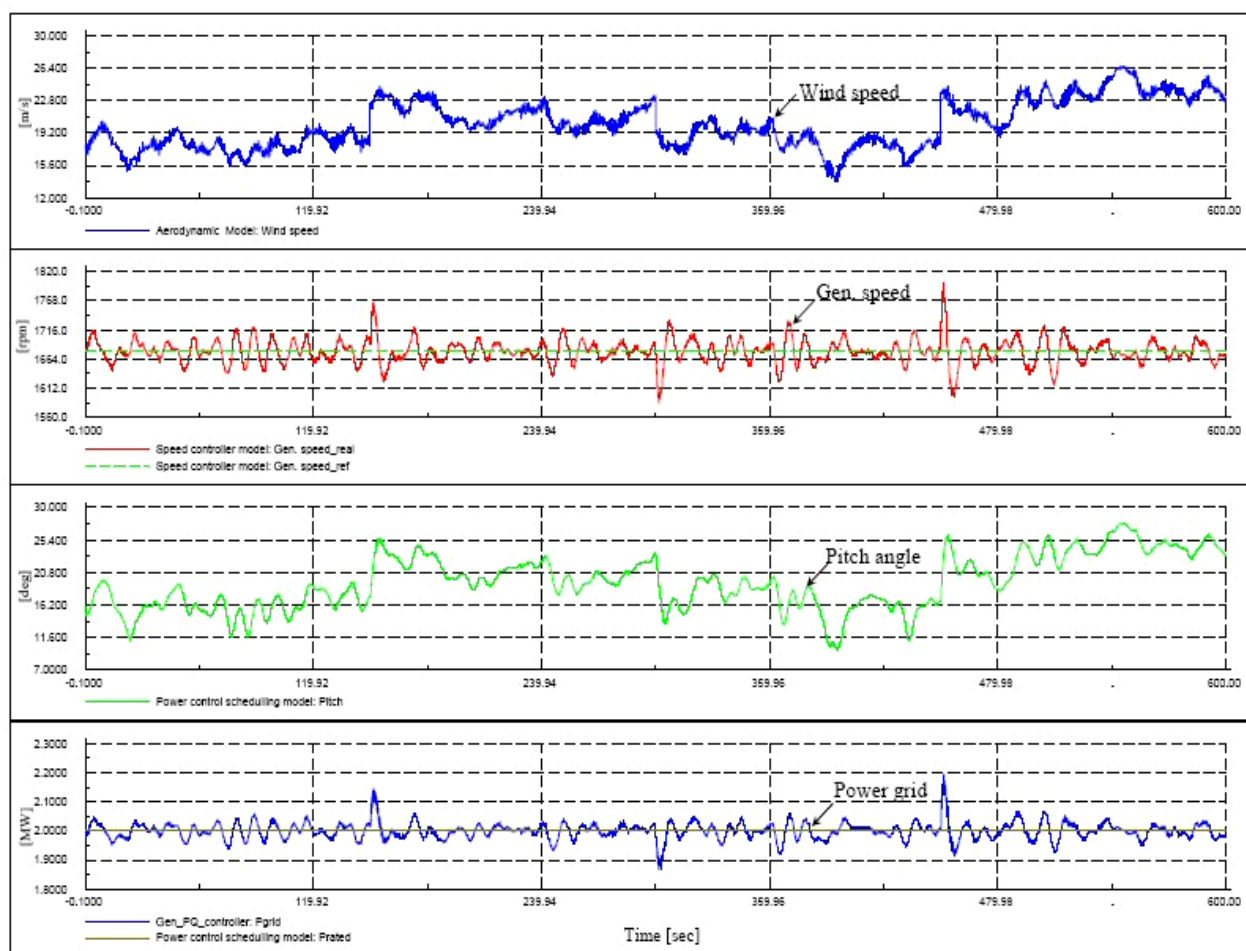


Fig. 6. Simularea unei turbine de vânt cu viteză variabilă cu reglarea continuă a pasului paletelor.

Rezultatele simulărilor celor două turbine eoliene de 2 MW arată o bună stabilitate a celor două sisteme de control implementate, la funcționarea atât în regim staționar cât și tranzitoriu.

Simulările digitale sunt o unealtă utilă pentru studiul comportării unui sistem dinamic complex în diferite situații și regimuri de funcționare.

BIBLIOGRAFIE

- [1] **Siegfried Heier**, *Wind energy conversion systems*, book, John Wiley & Sons Inc., New York, 1998.
- [2] **L.H. Hansen, L. Helle, F. Blaabjerg, E. Ritchie, S. Munk-Nielsen, H. Bidner, P. Sorensen and B. Bak-Jensen**, *Conceptual Survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines*, Riso-R-1205 (EN), December 2001.
- [3] **Lucian Mihet-Popa**, *Wind Turbines using Induction Generators connected to the grid*, Ph. D. Thesis, Politehnica University of Timișoara, October 2003.
- [4] **Saifur Rahman**, *Green Power. What is it and where can we find it?*, IEEE power & energy magazine, January/February 2003, pp. 30-37.
- [5] **A. D. Hansen, C. Jauch, P. Sorensen, F. Iov and F. Blaabjerg**, *Dynamic wind turbine models in power system simulation tool DigSILENT*, Riso-R, 1400 (EN), Riso National Laboratory, December 2003.
- [6] **H. Polinder, M.R. Dubois and J.G. Sloopweg**, *Generator systems for wind turbines*, PCIM 2003, Nuremberg, Germany, 20-22 May.
- [7] **L. Mihet-Popa and J.M. Pacas**, *Active stall constant speed wind turbine during transient grid fault events and sudden changes in wind speed*, PCIM 2005, Nuremberg-Germany, 7-9 June, pp. 646-652.
- [8] **L. Mihet-Popa, F. Blaabjerg and I. Boldea**, *Wind Turbine Generator Modeling and Simulation where Rotational Speed is the Controlled Variable*, IEEE-IAS Transactions on Energy Conversion, January / February 2004, Vol. 40, No. 1, pp. 3-10.
- [9] **Lucian Mihet-Popa and Ion Boldea**, „Dynamics of control strategies for wind turbine applications”, the 10th International Conference on Optimisation of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM 2006, May 18-19, Poiana Brasov, Vol. 2, pp. 199-206.
- [10] ** www.windpower.org, Danish Wind Industry Associations, Guided Tour on Wind Energy.