

Funcționarea instalațiilor eoliene cu generator cu dublă alimentare tip DFIG în regim cuazistaționar.

Macovei Ilie¹, Stratan Ion², Gropa Victor³ și Rujanschi Dumitru⁴

¹ Universitatea Tehnică a Moldovei, Chișinău, Republica Moldova;

² Universitatea Tehnică a Moldovei, Chișinău, Republica Moldova;

³ Universitatea Tehnică a Moldovei, Chișinău, Republica Moldova;

⁴ Î.S. Moldelectrica, Chișinău, Republica Moldova.

Abstract – În legătură cu implementarea masivă a instalațiilor eoliene, și anume a celor cu viteze variabile utilizate cu generatoare asincrone cu dublă alimentare (Dubly Feed induction Generator, DFIG), și conectarea lor la sistemul energetic apar probleme legate de influența lor asupra regimului sistemului, de exemplu influența asupra stabilității tensiunii, calității energiei electrice, apariției de armonici și pericolul apariției rezonanței electromecanice. În lucrare este prezentată analiza regimului cuazistaționar a unei instalații eoliene cu desfășurarea în timp a variațiilor puterilor livrate și a pendulațiilor rotorice. Variația vitezei vântului în timpul zilei duce la modificarea puterilor furnizate de instalațiile eoliene. Conform analizelor privind generatoarele eoliene, puterile livrate de o instalație eoliană timp de 5 min la diferite viteze ale vântului, variază mult. Viteza vântului și respectiv puterile livrate oscilează în jurul valorilor medii cu o frecvență de (30-45)s, și cu o amplitudine de la 15% la 40%. Deci mereu generatorul DFIG se află în dinamică. La variația vitezei vântului, se schimbă atât turațiile turbinei eoliene cât și frecvența curentului în circuitul statoric. Afară de menținerea frecvenței o altă proprietate importantă a instalațiilor eoliene cu DFIG constă în extragerea maximumului de energie eoliană în tot diapazonul de variație a vitezei vântului. Utilizarea generatoarelor DFIG permit controlul separat al puterilor active și reactive ceea ce este important pentru un sistem energetic.

Cuvinte cheie – turbine eoliene, regim cuazistaționar, desfășurarea în timp a puterilor livrate.

I. INTRODUCERE

DFIG reprezintă un generator asincron cu rotorul bobinat excitat printr-un circuit back-to-back cu dublă direcție a puterilor, alimentat de la rețeaua sistemului energetic și comandat cu PWM.

Pentru a restabili frecvența la rotor se aplică curentul alternativ trifazat cu frecvența alunecării rotorului în raport cu câmpul magnetic statoric. Curentul de excitație formează un câmp magnetic rotorice față de rotor cu frecvența alunecării.

Schema principală a unei instalații eoliene cu generator DFIG este prezentată în figura 1:

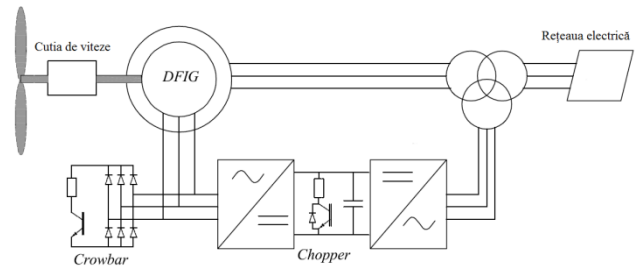


Fig. 1. Turbină eoliană cu viteză variabilă cu DFIG.

Viteza de variație a vântului în timpul zilei duce la modificarea puterilor furnizate de instalația eoliană, cu un grafic de evoluție prezentat în figura 2:

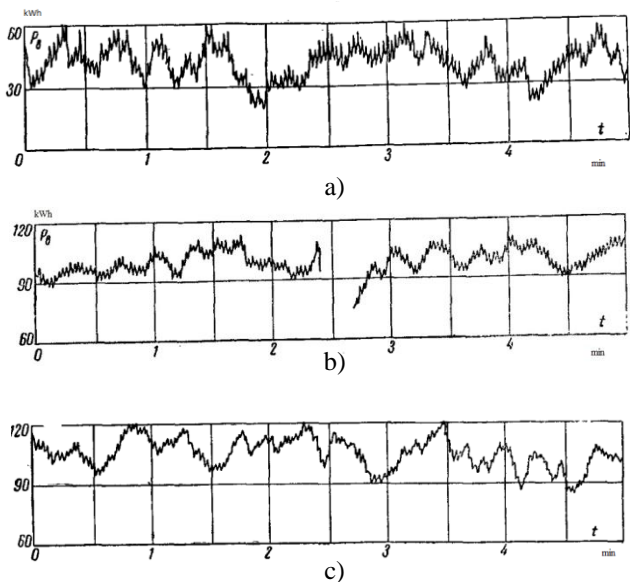


Fig. 2. Oscilograma de livrare a puterii de o instalație eoliană, pentru diferite viteze ale vântului, a – viteza vântului de 8,5 m/s; b – viteza vântului de 10,2 m/s; c – viteza vântului de 12 m/s.

Frecvența curentului produs de convertorul din partea rotorului se alege astfel ca viteza de rotație a câmpului magnetic în raport cu rotorul plus viteza rotorului să corespundă frecvenței standard de 50Hz.

II. Analiza regimului cuazistaționar a unei instalații cu generator DFIG

O particularitate a sistemelor eoliene constă în vitezele mici de variație a vitezei vântului de aceea în regimuri staționale la analiza proceselor electromagnetice pot fi neglijate derivatele. Astfel de regim poate fi considerat cuazistaționar.

Schema echivalentă a generatorului asincron cu dublă alimentare este prezentată în figura 3:

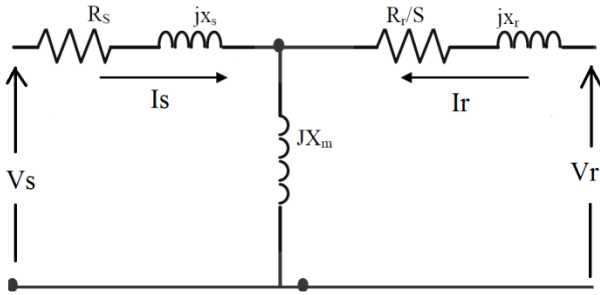


Fig. 3. Schema echivalentă a generatorului asincron cu dublă alimentare

Se consideră tensiunile V_s și V_r constate.

Ecuțiile circuitului rotoric și statoric se vor prezenta sub forma:

$$V_s = I_s \cdot (R_s + jX_s) + I_r \cdot (jX_m); \quad (1)$$

$$V_r = I_s \cdot (jsX_m) + I_r \cdot (R_r + jsX_r); \quad (2)$$

unde $X_s = X_m + X_s$; $X_r = X_m + X_r$; iar X_s și X_r sunt reactanțele de scăpări.

Rezolvând ecuațiile (1) și (2), în raport cu curenții se obține:

$$I_s = \frac{a + jb}{c + jd}; I_r = \frac{e + jg}{c + ja}; \quad (3)$$

$$\text{unde: } a = (V_s \cdot R_r + V_r \cdot X_m \cdot \sin\gamma); \quad (4)$$

$$b = (s \cdot V_s \cdot X_r - V_r \cdot X_m \cdot \cos\gamma); \quad (5)$$

$$c = (R_s \cdot R_r - s \cdot X_r \cdot X_s + s \cdot X_m^2); \quad (6)$$

$$d = (s \cdot R_s \cdot X_r + R_r \cdot X_s); \quad (7)$$

$$e = (V_r \cdot R_r \cdot \cos\gamma - V_r \cdot X_s \cdot \sin\gamma); \quad (8)$$

$$g = (V_r \cdot \cos\gamma + V_s \cdot V_s \cdot \sin\gamma - s \cdot X_m \cdot V_s); \quad (9)$$

unde: γ – reprezintă unghiul tensiunii de excitație.

Puterile statorice se vor calcula cu ajutorul relațiilor:

$$S_s = P_s + jQ_s, \quad (10)$$

și respectiv:

$$P_s = \frac{V_s \cdot (ac + bd)}{c^2 + d^2}; \quad (11)$$

$$Q_s = -\frac{V_s \cdot (bc - ad)}{c^2 + d^2}; \quad (12)$$

La rândul său puterile din circuitul rotoric se vor calcula respectiv:

$$S_r = P_r + jQ_r, \quad (13)$$

$$P_r = \frac{V_r \cdot (ec + gd) \cdot \cos\gamma + V_r \cdot (cg - cd) \cdot \sin\gamma}{c^2 + d^2}. \quad (14)$$

$$Q_r = \frac{V_r \cdot (ec + gd) \cdot \sin\gamma - V_r \cdot (cg - cd) \cdot \cos\gamma}{c^2 + d^2}, \quad (15)$$

Puterea mecanică dezvoltată de turbina eoliană se determină cu ajutorul relației:

$$P_{mc} = C_p \cdot P_w; \quad (16)$$

$$P_w = 0,5 \cdot \rho_{aer} \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_w^3; \quad (17)$$

unde: P_w – puterea vântului;

ρ_{aer} – densitatea aerului;

R – raza turbinei;

V_w – viteza vântului;

C_p – factorul de extragere a energie de turbina

eoliană, care este influențat de construcția turbinei și de viteză. În limita vitezelor care au loc în R.M., C_p – poate fi considerat constant ($C_p \approx 0,35$).

III. Algoritmul de calcul al regimului cuazistaționar al turbinei eoliene cu DFIG

În regim cuazistaționar al turbinei eoliene cu DFIG, alunecarea se va calcula din ecuația mișcării mecanice, iar ceilalți parametri se vor determina cu ajutorul relațiilor analitice. Calculul se va efectua pe intervale mici consecutive.

Pentru fiecare parametru se va lua valoarea medie de interval:

$$S_{im} = \frac{S_{i-1} + S_i}{2};$$

$$\Delta\gamma_i = S_{im} \cdot \Delta t;$$

$$\Delta P_{mc,i} = \frac{\Delta P_{mci-1} + \Delta P_{mc}}{2}; \quad (18)$$

$$t = \sum_{i=1}^t \Delta t;$$

$$\gamma_i = \gamma_{i-1} + \Delta\gamma_i.$$

A. Studiu de caz.

Pentru exemplificare vom efectua calculele pentru turbina eoliană cu puterea de 1,76 MVA, $V_s = 690$; $f_0 = 50\text{Hz}$, $w_0 = f_0 \cdot 6,28 = 50 \cdot 6,28 = 314\text{s}^{-1}$.

Parametri în unități relative nominale alcătuiesc: $V_s = 1, V_r = 0,5$; $R_s = 0,01$; $X_s = 4,58$; $R_r = 0,009$; $X_r = 4,409$; $T_j = 0,75$; $t_0 = 0$; $\gamma_0 = 0$; $s_0 = 0$; $\Delta t = 0,01$; $P_{mc0} = 5,37$; $Q_{s0} = 0,022$; $S_{m0} = 0$; $T = 4000$; $w_0 = 314$;

Ecuția mișcării mecanice se poate prezenta cu următoarea formulă

$$T_j \frac{ds}{dt} = \frac{P_{mc}(t)}{(1-s) \cdot w_0} - \frac{P_s}{w_0}, \quad (19)$$

Vom analiza reacția instalației eoliene la frecvența rafalelor de vânt. Se va analiza cazul în ipoteza că:

$$P_{mc} = P_{mc0} + 0,2 \cdot P_{mc0} \cdot \sin \frac{2\pi}{T} t. \quad (20)$$

Se consideră tensiunile rotorice și statorice constante: $V_s = 1 \text{ u.r.}$, $V_r = 0,5 \text{ u.r.}$ și atunci pentru $t = 0$, dacă $s = 0, \gamma = 0$ se obține:

$$\begin{aligned} P_{s0} &= 5,37 \text{ u.r.}; & Q_{s0} &= 0,022 \text{ u.r.}; \\ P_r &= ,5674 \text{ u.r.}; & Q_r &= 0,0125 \text{ u.r.} \end{aligned} \quad (21)$$

Vom considera puterea mecanică aplicată la rotor în momentul $t=0$, egală cu puterea electrică livrată:

$$P_{mc0} = P_{s0} = 5,37 \text{ u.r.} \quad (22)$$

Pentru calculul ecuației mișcării (19) se va prezenta sub forma:

$$\Delta s_i = \frac{1}{T_j} \cdot \left(\frac{P_m(t_i)}{(1-s_{mi}) \cdot w_0} - \frac{P_s}{w_0} \right) \cdot \Delta t, \quad (23)$$

unde: $s_{mi} = \frac{s_{i-1} + s_i}{2}$; $t_i = t_{i+1} + \Delta t$; $w_0 = 314$.

B. Rezultatele calculelor.

Rezultatele calculelor se vor prezenta sub formă grafică, pentru două cazuri: pentru $V_r = 0,1 \text{ u.r.}$ și pentru $V_r = 0,5 \text{ u.r.}$, în figurile 4 ÷ 17:

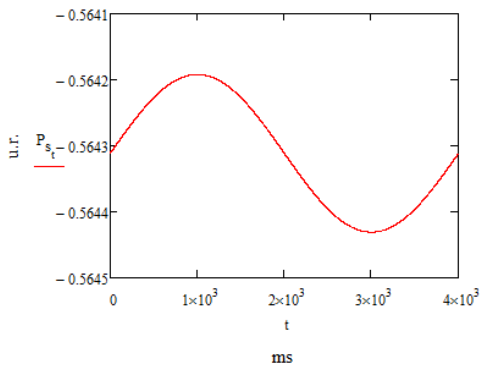


Fig. 4. Variația puterii active în circuitul statoric, pentru $V_r = 0,1 \text{ u.r.}$,

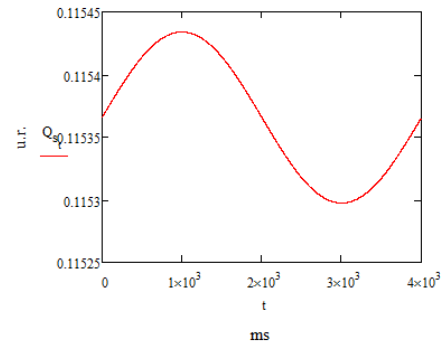


Fig. 5. Variația puterii reactive în circuitul statoric, pentru $V_r = 0,1 \text{ u.r.}$,

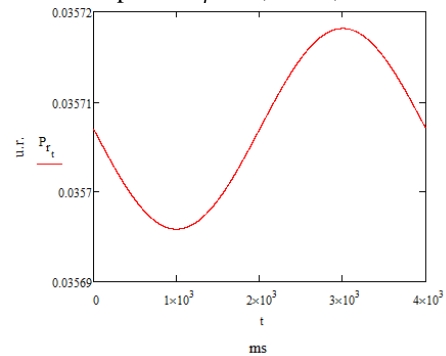


Fig. 6. Variația puterii active în circuitul rotoric, pentru $V_r = 0,1 \text{ u.r.}$,

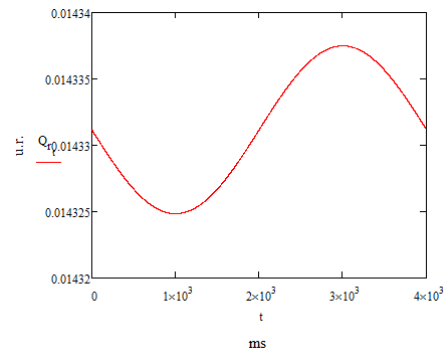


Fig. 7. Variația puterii reactive în circuitul rotoric, pentru $V_r = 0,1 \text{ u.r.}$,

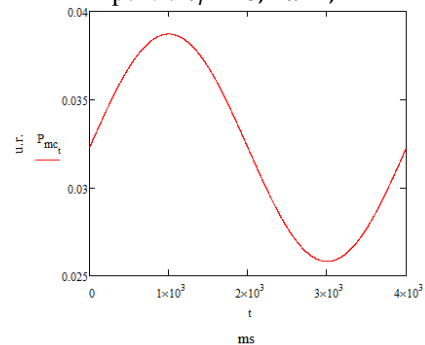


Fig. 8. Variația puterii mecanice pentru turbina eoliană, pentru $V_r = 0,1 \text{ u.r.}$,

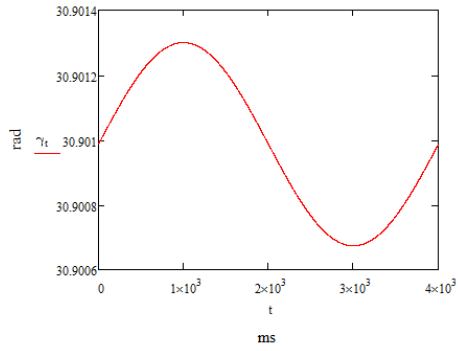


Fig. 9. Variația unghiului γ pentru turbina eoliană, la $V_r = 0,1 \text{ u.r.}$,

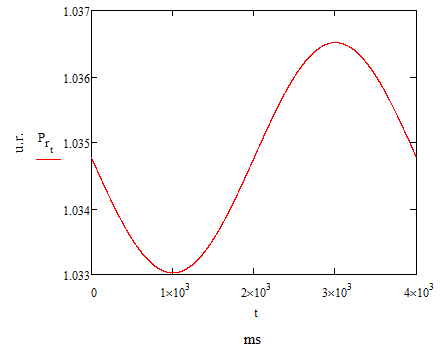


Fig. 13. Variația puterii active în circuitul rotor, pentru $V_r = 0,5 \text{ u.r.}$,

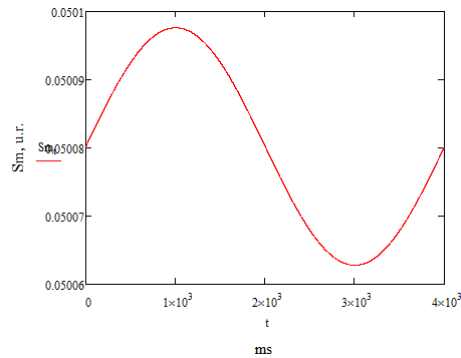


Fig. 10. Variația alunecării pentru generatorul asincron, la $V_r = 0,1 \text{ u.r.}$,

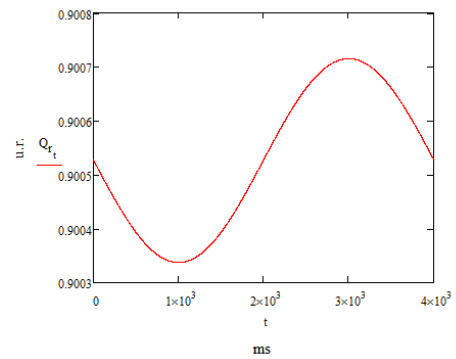


Fig. 14. Variația puterii reactive în circuitul rotor, pentru $V_r = 0,5 \text{ u.r.}$,

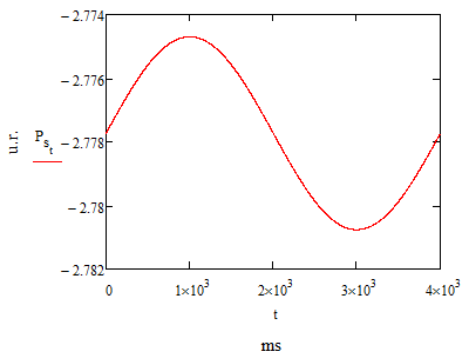


Fig. 11. Variația puterii active în circuitul statoric, pentru $V_r = 0,5 \text{ u.r.}$,

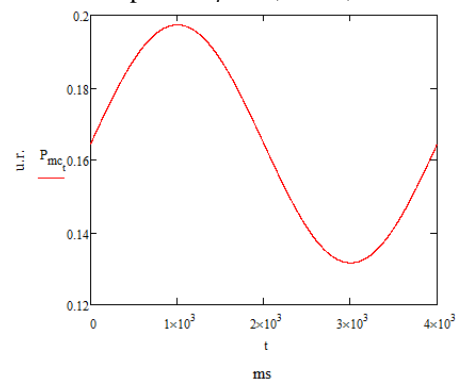


Fig. 15. Variația puterii mecanice pentru turbina eoliană, pentru $V_r = 0,5 \text{ u.r.}$,

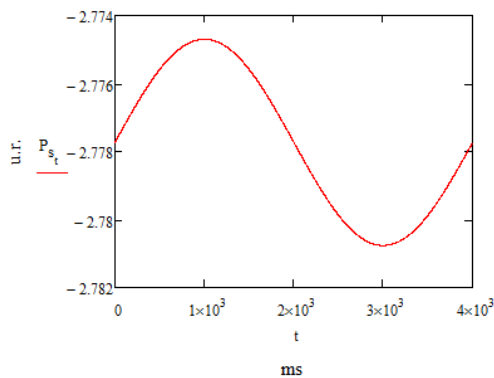


Fig. 12. Variația puterii reactive în circuitul statoric, pentru $V_r = 0,5 \text{ u.r.}$,

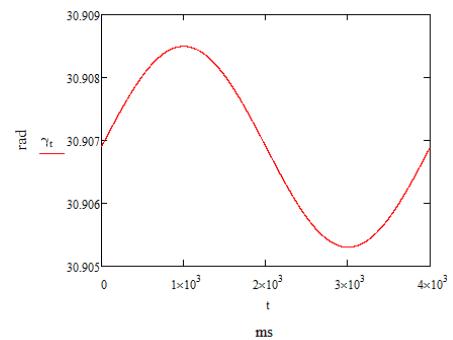


Fig. 16. Variația unghiului γ pentru turbina eoliană, la $V_r = 0,5 \text{ u.r.}$,

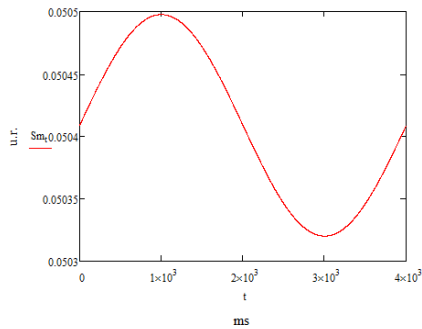


Fig. 17. Variația alunecării pentru generatorul asincron, la $V_r = 0,5 u.r.$,

CONCLUZII

Viteza vântului variază în jurul unei valori medii cu amplitudini semnificative cu o perioadă de câteva zeci de secunde. În mod similar variază și puterea mecanică dezvoltată de turbina eoliană. Ca rezultat rotorul generatorului asincron pendulează livrând în sistemul energetic putere activă de aceeași frecvență. Aceasta din urmă perturbă regimul de funcționare a sistemului și poate duce la instabilitatea tensiunii sau poate provoca fenomene de rezonanță. Lucrarea a avut drept scop analiza parametrilor regimului cuazistaționar în funcție de timp. În figurile 4 ÷ 17, sunt prezentate rezultatele obținute, în unități relative nominale ($S_b = 1,3148 MVA$) în urma calculelor pentru tensiunea de excitație de $V_r = 0,1 u.r.$, și $V_r = 0,5 u.r.$. Analiza rezultatelor calculelor concluzionează următoarele:

- Puterea activă livrată (cu semnul “-”) este în funcție de tensiunea rotorică V_r . La creșterea tensiunii rotorice, crește și puterea livrată în sistemul energetic (figurile 4, 11);
- La valori mici ale tensiunii rotorice, generatorul consumă putere reactivă (figura 5), dar la valori mai mari începe să livreze putere reactivă (figura 12);
- Circuitul rotoric consumă putere activă și reactivă în toate regimurile (figurile 6,7,13,14);
- Alunecarea în ambele cazuri variază în jurul valorii de $\pm 5\%$;
- Amplitudinile variațiilor pentru cazul studiat sunt mici, dar pentru alte cazuri merită a fii cercetate.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Ah.M. Alkandari, Soliman Ab. Elhady, “Steady State analysis of a DFIG,” *Energy and Power Engineering*, vol. A247, p. 393–400, 2011.
- [2] Andreas Peterson, “Analysis, Modeling and Control of DFIG for wind Turbines”, *Energy and Power Engineering, Sweden 2005*.
- [3] Dynamic Models for Wind Turbines and Wind Power Plants, *The University of Texas, 2008*.
- [4] Omar Naulden, “Behavior of DFIG wind turbines with crowbar protection”, *International journal of Electrical sciences* vol. 3, Nr.12.
- [5] Francesco Sulla, “Fault behavior of wind turbines,” Lund University 2012.