

ANALIZA FENOMENELOR TRANZITORII ÎN SISTEMUL ENERGETIC EOLIAN NAVAL

Dr.ing. Florențiu Deliu, *Academia Navală
Mircea cel Bătrân, Constanța*
Dr.ing. Gheorghe Samoilescu, *Academia
Navală Mircea cel Bătrân, Constanța*
Dr. Laura Cizer, *Academia Navală Mircea
cel Bătrân, Constanța*

ABSTRACT: În lucrare se analizează conducerea sistemului electroenergetic eolian naval. Performanțele dinamice ale sistemului sunt analizate având în vedere diverse funcții de variație a vitezei vântului. Generatorul sincron trebuie astfel condus încât să se obțină funcționarea în punctele de putere maximă. Se urmărește captarea cu randamente maxime a energiilor eoliene în sistemul energetic naval, acesta fiind folosit doar ca sursă complementară de energie, funcționând doar când acumulatele electrice sunt la capacitatea minimă admisă și nu pot satisface consumatorii electrici.

1. Dependența curentului statoric la începutul procesului

Din modelul ortogonal al generatorului sincron cu magneți permanenți reiese: curentul de amortizare din axa d , I_D - curentul statoric din axa d , se "stinge" în același interval de timp cu variația vitezei unghiulare, dar are valori mai mari atingând valoarea de 1.1[A] în vecinătatea punctului inițial [1,2].

Viteza unghiulară rotorică la arborele generatorului sincron cu magneți permanenți, ω , crește lent de la valoarea inițială $\omega_{(0)} = 314[\text{rad} / \text{s}]$, la valoarea finală $\omega_{(0)} = 888[\text{rad} / \text{s}]$, v. Figura 1 și 2.

ANALYSIS OF TRANSITORY PHENOMENA WITHIN ONBOARD WIND ENERGY SYSTEMS

Eng. Florențiu Deliu, PhD, *Mircea cel
Bătrân Naval Academy*
Eng. Gheorghe Samoilescu, PhD, *Mircea
cel Bătrân Naval Academy*
Laura Cizer, PhD, *Mircea cel Bătrân Naval
Academy*

ABSTRACT: The purpose of this paper is to analyse the conduct of a naval wind energy system. The dynamic performances of this particular system are examined by taking into account the different functions in the variation of the wind speed. Thus, the synchronous generator needs to be exploited in such a manner that peaks of maximum power are obtained. Our main purpose is to capture wind energies of maximum output within the onboard energy system that is used solely as a complementary energy source and provided the electric accumulators operate at the minimum permissible capacity and cannot comply with the electric consumers.

1. Dependency of stator current at the beginning of process

The orthogonal model of magnet synchronous generator shows that: the current attenuation from the d -axis, I_D - stator current from the d -axis, "dies out" within the same time interval as the variation of angular speed; however, it reaches greater values of 1.1 [A] in the proximity of the initial point [1, 2].

The rotor angular speed at the axle of the permanent magnet synchronous generator, ω , slowly increases from its initial value: $\omega_{(0)} = 314[\text{rad} / \text{s}]$, to its final value: $\omega_{(0)} = 888[\text{rad} / \text{s}]$, as shown in Figures 1 and 2.

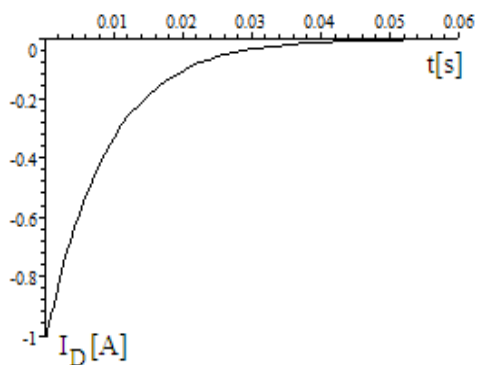


Fig.1. Variația în timp curentului I_D

Fig.1. Time Variation for I_D Current

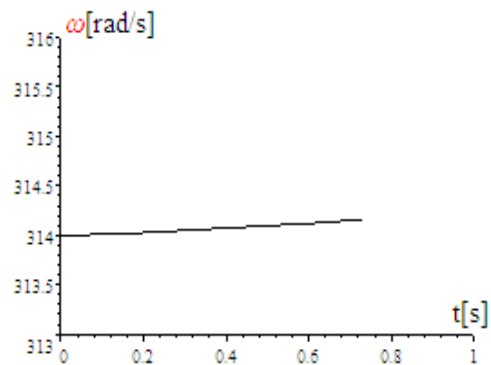


Fig. 2. Variația în timp a vitezei Unghiulare

Fig. 2. Time Variation for Angular Speed

Datorită lui momentului de inerție (J), viteza unghiulară se modifică lent.

Cuplul electromagnetic: $M_{elmg} = -0.01I_dI_q + I_q1.3 - 0.053I_dI_Q + 0.05I_qI_D$ se modifică de la valoarea inițială $M_{elmg}(0) = -0.6[Nm]$, la valoarea finală $M_{elmg}(\infty) = -1.8[Nm]$, într-un interval de timp de ordinul secundelor – v. Figura 3.

Due to the moment of inertia (J), the angular speed slowly modifies.

The electromagnetic couple: $M_{elmg} = -0.01I_dI_q + I_q1.3 - 0.053I_dI_Q + 0.05I_qI_D$ changes its initial value from $M_{elmg}(0) = -0.6[Nm]$, to its final value of $M_{elmg}(\infty) = -1.8[Nm]$, within a time interval of only a few seconds, as shown in figure 3.

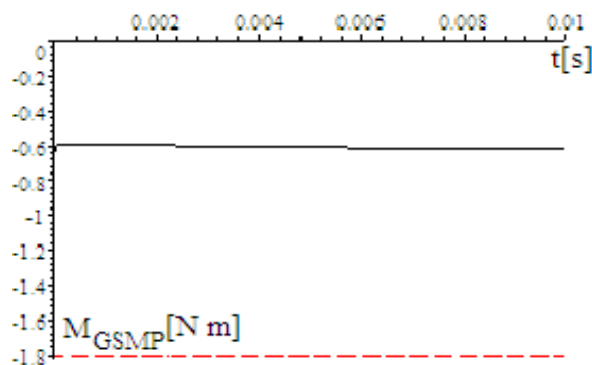


Fig.3. Variația în timp a cuplului electromagnetic
Fig. 3. Time Variation for Electromagnetic Couple

Din cauza momentelor de inerție, ($J = mr^2$), mari, procesele mecanice sunt lente și deci modificările curente ale vitezei vântului sunt "amortizate" de către turbina de vânt navală.

Puterea electrică obținută este fluctuantă și depinde de viteza vântului la

Due to the moments of inertia of considerable values ($J = mr^2$), the mechanical processes are slow and, therefore, the current changes in the wind speed are "absorbed" by the onboard naval turbine. The electric power that has been thus obtained is fluctuating and dependable on the cubic wind

puterea a treia, dacă funcționarea are loc în punctele de putere maximă, dar cum sistemul energetic eolian prezintă datorită momentelor de inerție mari, o importantă componentă inerțială mecanică, funcționarea în punctele de putere maximă nu este totdeauna posibilă și chiar mai mult, se poate observa că în cele mai multe perioade de timp funcționarea sistemului nu este optimă, oricât de rapid ar fi sistemul de conducere.

Funcționarea în punctele de putere maximă nu este totdeauna posibilă. Considerând o funcționare inițială optimală, la viteza vântului V_1 (la P_{max}), în punctul P_1 (figura 4), prin modificarea vitezei vântului la valoarea V_2 , punctul de funcționare trece în P_2 , iar viteza unghiulară la axul turbinei nu se modifică, datorită inerției mecanice mari [1,3,4,5,6].

speed provided the system is operational within peaks of maximum power; on the other hand, the wind energy system has an important inertial and mechanical component - triggered by the momentums of inertia of considerable values - which does not always allow the system to operate within its peaks of maximum power. Furthermore, the system operation is not optimal during most periods of time regardless its turn of speed.

The system operation is not always possible within its peaks of maximum power. Taking into consideration the optimal initial operation, at wind speed of V_1 , (at P_{max}) in point P_1 (figure 4), following the change in the wind speed at value V_2 , the function point moves to P_2 whereas the angular speed at the turbine axis does not change, due to the high values recorded by the mechanical inertia. [1,3,4,5,6].

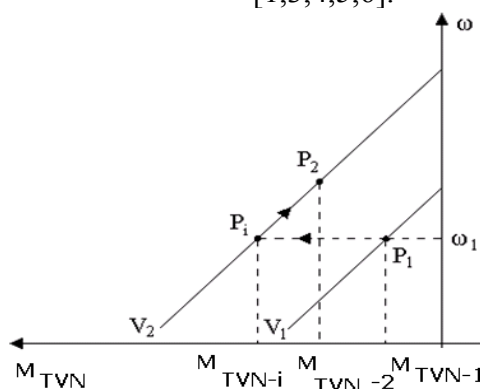


Fig.4. Modificarea punctului de funcționare
Fig.4. Change in the function point

Se determină mărimile importante în punctul de putere maximă P_1 :

$P_{TVN} = 200[W]$ - puterea mecanică dată de turbina de vânt navală

$P_{GSMP} = 199[W]$ - puterea electrică dată de generatorul sincron cu magneți permanenți

$\omega_{TVN} = 20[rad / s]$ - viteza unghiulară mecanică la turbina de vânt navală

$U_R = 235[V]$ - tensiunea la bornele generatorului sincron cu magneți permanenți

$I_R = 0.28[A]$ - curentul debitat de generatorul sincron cu magneți permanenți

The important values are measured in the maximum power peak P_1 :

$P_{TVN} = 200[W]$ - mechanical power exerted by the onboard wind turbine

$P_{GSMP} = 199[W]$ - electric power exerted by the permanent magnet synchronous generator

$\omega_{TVN} = 20[rad / s]$ - mechanical angular speed for the onboard wind turbine

$U_R = 235[V]$ - terminal voltage within the permanent magnet synchronous generator

$I_R = 0.28[A]$ - current exerted by the permanent magnet synchronous generator

$f = 50[Hz]$ - frecvența la generatorul sincron cu magneți permanenți

$\psi_S = 1.3[Wb]$ - fluxul statoric la generatorul sincron cu magneți permanenți

Sistemul funcționează la viteza inițială $V = 5[m/s]$

La viteza vântului $V = 10[m/s]$ se modifică caracteristica mecanică a turbinei de vânt navală, astfel încât și cuplul la generatorul sincron cu magneți permanenți se modifică.

2. Stabilitatea sistemului energetic eolian în funcție de rezistența de sarcină a generatorului sincron cu magneți permanenți

Nu se modifică R - datorită inerției mecanice mari a turbinei de vânt navale, turația se consideră constantă ($\omega_{TVN} = 20[rad/s]$), se obține sistemul de ecuații algebrice de mai jos. În cazul în care nu intervine sistemul de reglare și rezistența echivalentă de la bornele generatorului sincron cu magneți permanenți are valoarea $R = 830.97[\Omega]$, iar viteza vântului este de $V = 5[m/s]$, [7]

$f = 50[Hz]$ - frequency of the permanent magnet synchronous generator

$\psi_S = 1.3[Wb]$ - statoric flux within the permanent magnet synchronous generator

The system operates at the initial speed of $V = 5[m/s]$

The wind speed of $V = 10[m/s]$ changes the mechanical characteristic of the onboard wind turbine along with the couple of the permanent magnet synchronous generator.

2. The stability of the wind energy the system according to the loading resistance of the permanent magnet synchronous generator

R stays the same – due to the high values of the mechanical inertia of the onboard wind turbine, the speed of rotations is constant ($\omega_{TVN} = 20[rad/s]$), the following set of equations can be obtained, provided control system does not interfere, the output resultant resistance of the permanent magnet synchronous generator has the value of $R = 830.97[\Omega]$ and the value of the wind speed is [7]

$$\left. \begin{aligned}
 & V = 10 \\
 & \omega_{TVN} = 20 \\
 & R = 830.97 \\
 & U_d = 1.6I_d - \omega \cdot 0.08I_q \\
 & U_q = 1.6I_q + \omega \cdot 0.07I_d + \omega \Psi_{MP} \\
 & M_G = -0.01I_qI_d + \Psi_{MP}I_q \\
 & U_d = -RI_d \\
 & U_q = -RI_q \\
 & M_{TVN} = \left(-0.5\omega_{TVN} + 20 \left(\frac{V}{5} \right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\
 & P_{TVN} = \left(-0.5\omega_{TVN} + 20 \left(\frac{V}{5} \right)^{1.5} \right) \omega_{TVN} \\
 & P = U_dI_d + U_qI_q \\
 & Q = -U_dI_q + U_qI_d \\
 & \cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \\
 & \omega = \frac{314}{20} \omega_{TVN} \\
 & \Psi_{MP} = 1.3 \\
 & f = \frac{\omega}{6.28} \\
 & I_R = \frac{\sqrt{I_d^2 + I_q^2}}{\sqrt{3}} \\
 & U_R = \frac{\sqrt{U_d^2 + U_q^2}}{\sqrt{3}} \\
 & \Psi_S^2 = (0.08I_q)^2 + (\Psi_{MP} + 0.07I_d)^2
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Soluțiile sistemului sunt:

The solutions for the system are as follows:

$$\begin{aligned}
 \Psi_S &= 1.2996 [Wb], \quad f = 50 [Hz], \quad Q = 0 [VAR], \quad \Psi_{MP} = 1.3 [Wb], \quad \cos \varphi = 1, \\
 \omega_{TVN} &= 20 [rad / s], \quad V = 10 [m / s], \quad R = 830.97 [\Omega], \quad M_G = -0.63694 [Nm], \\
 U_d &= 12.283 [V], \quad P = -199.62 [W], \quad U_q = 407.09 [V], \quad U_R = -235.14 [V], \\
 I_d &= -1.4781 \times 10^{-2} [A], \quad I_R = -0.28297 [A], \quad M_{TVN} = 2.9661 [Nm], \\
 I_q &= -0.48990 [A], \quad P_{TVN} = 931.37 [W], \quad \omega = 314 [rad / s].
 \end{aligned}$$

În cazul în care sistemul funcționează la viteza finală $V = 10 [m / s]$, $R = 830.97 [\Omega]$ și $\omega_{TVN} = 20 [rad / s] = ct$ rezultă:

When the system operates at the final speed of $V = 10 [m / s]$, $R = 830.97 [\Omega]$ and $\omega_{TVN} = 20 [rad / s] = ct$ the results are as follows:

$$P_{TVN} = 931 [W]; P_{GSMP} = 199 [W];$$

$$P_{TVN} = 931 [W]; P_{GSMP} = 199 [W];$$

$$U_R = 235 [V]; I_R = 0.28 [A];$$

$$U_R = 235 [V]; I_R = 0.28 [A];$$

$$M_{GSMP} = 0.6 [Nm]; M_{TVN} = 2.9 [Nm].$$

Când se modifică R , la schimbarea valorii vitezei vântului de la $5[m/s]$ la $10[m/s]$, prin sistemul de conducere se modifică valoarea rezistenței echivalente de la bornele generatorului sincron cu magneți permanenți la valoarea corespunzătoare vitezei $V = 10[m/s]$, valoarea acesteia devenind : $R = 826.97[\Omega]$

$$M_{GSMP} = 0.6[Nm]; M_{TVN} = 2.9[Nm].$$

When the value of R changes, along with the wind speed from $5[m/s]$ to $10[m/s]$, the system modifies the value of the output resultant resistance of the permanent magnet synchronous which has the same speed value, that is $V = 10[m/s]$, and the resistance value becomes: $R = 826.97[\Omega]$

$$\left. \begin{aligned} &V = 10 \\ &\omega_{TVN} = 20 \\ &R = 826.97 \\ &U_d = 1.6I_d - \omega \cdot 0.08I_q \\ &U_q = 1.6I_q + \omega \cdot 0.07I_d + \omega\Psi_{MP} \\ &M_G = -0.01I_qI_d + \Psi_{MP}I_q \\ &U_d = -RI_d \\ &U_q = -RI_q \\ &M_{TVN} = \left(-0.5\omega_{TVN} + 20\left(\frac{V}{5}\right)^{1.5} \right) \frac{20}{314} \\ &P_{TVN} = \left(-0.5\omega_{TVN} + 20\left(\frac{V}{5}\right)^{1.5} \right) \omega_{TVN} \\ &P = U_dI_d + U_qI_q \\ &Q = -U_dI_q + U_qI_d \\ &\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \\ &\omega = \frac{314}{20}\omega_{TVN} \\ &\Psi_{MP} = 1.3 \\ &f = \frac{\omega}{6.28} \\ &I_R = \frac{\sqrt{I_d^2 + I_q^2}}{\sqrt{3}} \\ &U_R = \frac{\sqrt{U_d^2 + U_q^2}}{\sqrt{3}} \\ &\Psi_s^2 = (0.08I_q)^2 + (\Psi_{MP} + 0.07I_d)^2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} &\Psi_s = 1.2996[Wb], f = 50[Hz], Q = 0[VAR], \Psi_{MP} = 1.3[Wb], \cos\varphi = 1 \\ &\omega_{TVN} = 20.0[rad/s], V = 10.0[m/s], R = 826.97[\Omega], M_G = -0.64001[Nm], \\ &U_d = 12.342[V], P = -200.58[W], U_q = 407.08[V], U_R = -235.14[V], \\ &I_d = -1.4924 \times 10^{-2}[A], I_R = -0.28434[A], M_{TVN} = 2.9661[Nm], \\ &I_q = -0.49226[A], P_{TVN} = 931.37[W], \omega = 314[rad/s]. \end{aligned}$$

Punctul de funcționare este caracterizat de valorile mărimilor

The functionn peak is characterized by the quantum values and

$$V = 10[m/s], R = 826.97[\Omega]$$

$$\text{și } V = 10[m/s], R = 826.97[\Omega]$$

and

$\omega_T = 20[\text{rad}/\text{s}]$, soluțiile sistemului (2) pentru aceste valori fiind: $P_{TVN} = 931[\text{W}]$; $P_{GSMP} = 200[\text{W}]$; $M_{GSMP} = 0.64[\text{Nm}]$; $M_{TVN} = 2.96[\text{Nm}]$.

Pe caracteristica mecanică a turbina de vânt navală, la $V = 10[\text{m}/\text{s}]$, trecerea din punctul P_i în punctul final P_2 se poate observa prin simulare cu modelul matematic următor:

$\omega_T = 20[\text{rad}/\text{s}]$, the solutions to the system (2) for these values being: $P_{TVN} = 931[\text{W}]$; $P_{GSMP} = 200[\text{W}]$; $M_{GSMP} = 0.64[\text{Nm}]$; $M_{TVN} = 2.96[\text{Nm}]$.

At the mechanical characteristic of the onboard wind turbine, at $V = 10[\text{m}/\text{s}]$, the change from P_i to the final peak P_2 can be observed following the simulation that uses the mathematical model down below:

$$\left\{ \begin{array}{l} -826.977I_d = 1.6I_d + 0.07 \frac{dI_d}{dt} - \omega 0.08I_q + 0.05 \frac{dI_D}{dt} - \omega 0.053I_Q \\ -826.97I_q = \omega 0.07I_d + 1.6I_q + 0.08 \frac{dI_q}{dt} + \omega 1.3 + \omega 0.05I_D + 0.053 \frac{dI_Q}{dt} \\ 0 = 0.05 \frac{dI_d}{dt} + 7.95I_D + 0.07 \frac{dI_D}{dt} \\ 0 = 0.053 \frac{dI_q}{dt} + 30.22I_Q + 0.25 \frac{dI_Q}{dt} \\ 5 \frac{d\omega}{dt} = -0.01I_dI_q + I_q 1.3 - 0.053I_dI_Q + 0.05I_qI_D + \left(-\frac{10}{314}\omega + 56.569\right) \frac{20}{314} \\ I_d(0) = -1.4924 \times 10^{-2} \\ I_q(0) = -0.49226 \\ I_Q(0) = 0 \\ I_D(0) = 0 \\ \omega(0) = 314 \end{array} \right. \quad (3)$$

Valoarea finală $\sqrt{I_d^2 + I_q^2} = \sqrt{0.11873^2 + 1.3845^2} = 1.3896 [\text{A}]$
Curentul de amortizare din axa q, I_Q , se "stinge" în 0,04 [s], având valori mici (între 0.0 și 0.0001[A]) figura 5 și 6.

The final value $\sqrt{I_d^2 + I_q^2} = \sqrt{0.11873^2 + 1.3845^2} = 1.3896 [\text{A}]$
The current attenuation from the q axis (I_Q) "dies out" in 0.04 [s], recording low values (between 0.0 and 0.0001[A]) See Figures 5 and 6.

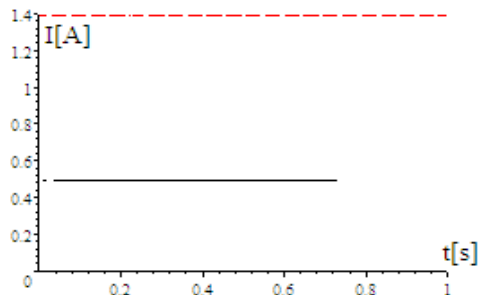


Fig. 5. Variația curentul statoric în timp
Fig. 5. Variation of statoric current in time

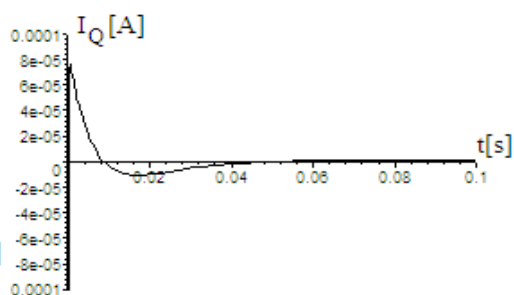


Fig. 6. Variația curentul I_Q în timp
Fig. 6. Variation of I_Q current in time

Curentul de amortizare din axa d, I_D , se "stinge" în același interval de timp, dar are valori mai mari: atingând 0.02[A] în

The current attenuation from the d axis (I_D) "dies out" in the same time interval, although it reaches higher values: 0.02[A] in

vecinătatea punctului inițial. V. Figura 7.
 Viteza unghiulară rotorică la arborele generatorului sincron cu magneți permanenți, ω , crește lent de la valoarea inițială $\omega_{(0)} = 314[\text{rad/s}]$, la valoarea finală $\omega_{(\infty)} = 888[\text{rad/s}]$, v. Figura 8.

the proximity of the initial peak. See Figure 7.
 The rotor angular speed at the axle of the permanent magnet synchronous generator (ω) slowly increases from the initial value of $\omega_{(0)} = 314[\text{rad/s}]$, to the final value of $\omega_{(\infty)} = 888[\text{rad/s}]$, as shown in Figure 8.

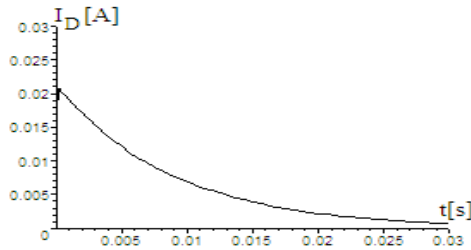


Fig. 7. Variația în timp a curentul I_D

Fig. 7. I_D Current Variation in Time

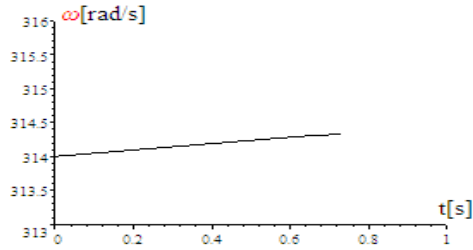


Fig. 8. Variația în timp a vitezei Unghiulare

Fig. 8. Angular Speed Variation in Time

Cuplul electromagnetic: $M_{elmg} = -0.01I_d I_q + I_q 1.3 - 0.053I_d I_Q + 0.05I_Q$ se modifică de la valoarea inițială $M_{elmg}(0) = -0.6[\text{Nm}]$, la valoarea finală $M_{elmg}(\infty) = -1.8[\text{Nm}]$, într-un interval de timp de ordinul secundelor, v. Figura 9.

The electromagnetic couple: $M_{elmg} = -0.01I_d I_q + I_q 1.3 - 0.053I_d I_Q + 0.05I_Q$ changes its initial value $M_{elmg}(0) = -0.6[\text{Nm}]$ to the final value: $M_{elmg}(\infty) = -1.8[\text{Nm}]$ within a time interval of seconds, as shown in Figure 9.

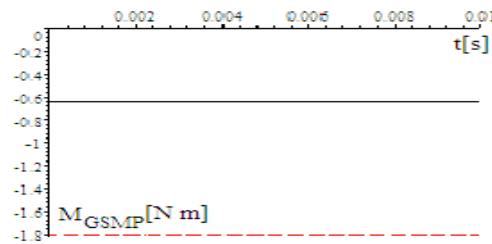


Fig. 9. Variația în timp a cuplului electromagnetic
 Fig. 9. Electromagnetic Couple Variation in Time

3. Concluzii

În sistemele electroenergetice de pe nave, analiza fenomenelor tranzitorii care apar în funcționarea sistemului eolian este esențială. Această stabilitate în funcționare este determinată de variația vitezei vântului în timp și de sistemul de conducere și chiar în regim static punctele de funcționare pot să fie stabile sau instabile.

3. Conclusions

Within the on-board electro-energetical power systems, the study of transient phenomena developed during the operation of the wind system is vital. While operating, this stability is conditioned by both the variation of wind speed in time and the control system, although the function peaks can be either stable or instable even in a non-operating state.

BIBLIOGRAFIE

1. Babescu M., Mașina Sincronă -Modelare-Identificare-Simulare, Editura POLITEHNICA Timișoara, 2003.
2. Boldea I., Unified treatment of core losses and saturation in the orthogonal axis model of electric machines, IEE Proceedings, Vol. 134, Pt.B., No.6, 1987.
3. Celanovic N., Boroyevich D., A fast space-vector modulation algorithm for multilevel three-phase converters, IEE Trans. Ind. Appl., vol. 37, no. 2, pp. 637-641, Mar. 2001.
4. Puttonen P, Salo M., Tuusa H., Wind power plant harmonics reduction using current source inverter with a controlled PWM rectifier, in Proc. EPE., Graz, Austria, Sep. 2001, CD-ROM.
5. Qiao W., Harley R.G., and Venayagamoorthy G.K., "Coordinated Reactive Power Control of a Large Wind Farm and a STATCOM Using Heuristic Dynamic Programming", IEEE Trans. Energy Convers., vol. 24, no. 2, pp.493-503 June 2009.

BIBLIOGRAPHY

1. Babescu M., Mașina Sincronă-Modelare-Identificare-Simulare, Editura POLITEHNICA Timișoara, 2003.
2. Boldea I., Unified treatment of core losses and saturation in the orthogonal axis model of electric machines, IEE Proceedings, Vol. 134, Pt. B., No. 6, 1987.
3. Celanovic N., Boroyevich D., A fast space-vector modulation algorithm for multilevel three-phase converters, IEE Trans. Ind. Appl., vol. 37, no. 2, pp. 637-641, Mar. 2001.
4. Puttonen P, Salo M., Tuusa H., Wind power plant harmonics reduction using current source inverter with a controlled PWM rectifier, in Proc. EPE., Graz, Austria, Sep. 2001, CD-ROM.
5. Qiao W., R.G.Harley, and G.K.Venayagamoorthy, "Coordinated Reactive Power Control of a Large Wind Farm and a STATCOM Using Heuristic Dynamic Programming", IEEE Trans. Energy Convers., vol. 24, no. 2, pp.493-503 June 2009.