

Mărirea eficienței energetice la sistemele electroenergetice eoliene funcționând la viteze ale vântului variabile în timp

Partea a II-a

Increasing energy efficiency in wind power systems operating at variable wind speeds over time. Part II

Lucian CRIȘAN¹, Simona POPA-ALBU¹, Meda Alexandra LAZĂR¹, Daniel BREBENARIU¹, Cristian MURĂRESCU¹, Marius DUDU¹, Ioan BORZA¹, Marius BABESCU¹

¹Universitatea Politehnica TIMIȘOARA

Piața Victoriei 2

ioan.borza@upt.ro, marius.babescu@et.upt.ro,

Rezumat - În prezenta lucrare, se propune o metodă de mărire a eficienței energetice la un sistem electroenergetic eolian, SEE, format dintr-o turbină de vânt, TV și un generator sincron cu magneți permanenți, GSMP, la viteze ale vântului variabile semnificativ în timp. Valoarea maximă a puterii TV, $P_{TV}(\omega)$, se obține la funcționarea la viteza unghiulară mecanică, VUM, optimă, ω_{OPTIM} , a cărei valoare depinde direct proporțional de viteza vântului. Energie electrică obținută, în intervalul de timp Δt , de la un SEE depinde de cele 2 mărimi funcționale de bază:

1) valorile vitezei vântului, V, în intervalul de timp Δt și 2) valorile VUM, ω , respectiv variația sa în timp. Problema fundamentală în realizarea unei eficiențe energetice maxime, la momentul de timp t, este corelarea valorii VUM curente, ω , cu valoarea vitezei vântului de la momentul de timp respectiv. Prin măsurarea a două mărimi de bază: viteza vântului V și VUM curentă, ω , se analizează posibilitatea captării unei energii eoliene maxime la SEE din locația MinAna-zona Dobrogea. Pentru a realiza o funcționare în punctul de putere maximă, MPP, trebuie ca VUM curentă să fie ω_{OPTIM} .

Cuvinte cheie - Sistem eolian, viteze ale vântului variabile în timp, modele matematice ale TV și GSMP, viteza unghiulară mecanică, viteza vântului, energie electrică debitată, puterea TV, puterea GSMP, inerție mecanică, ecuația momentului cinetic, simulări în Scientific WordPlace, eficiența energetică.

Abstract - This paper proposes a method of increasing the energy efficiency of a wind power system, SEE, consisting of a wind turbine, TV and a synchronous generator with permanent magnets, GSMP, at variable wind speeds over time. The maximum power of TV, $P_{TV}(\omega)$, is obtained when operating at the mechanical angular velocity, VUM, optimum, ω_{OPTIM} , the value of which depends directly on the wind speed. Electricity obtained over time Δt from an EEA depends on the two basic functional sizes:

1) Wind velocity values, V, in the time interval Δt , and 2) VUM, ω , respectively its variation over time. The fundamental problem in achieving the maximum energy efficiency at time t is to correlate the current VUM value ω with the value of the wind speed at that time. By measuring two basic sizes: wind speed V and current VUM, ω , the possibility of capturing a maximum wind energy in the EEA from the MinAna-Dobrogea area is analyzed. To perform at the MPP maximum power point, the current VUM must be OPTIM.

Key words - wind system, variable speed wind speeds, mathematical models of TV and GSMP, mechanical angular speed, wind speed, power consumption, TV power, GSMP power, mechanical inertia, kinetic momentum equation, Scientific WordPlace simulations, energy.

5. MĂRIREA EFICIENȚEI ENERGETICE LA TV DE MARE PUTERE LA VITEZE ALE VÂNTULUI DIN DOBROGEA

Se analizează mărirea eficienței energetice la variații ale vitezei vântului între 5,46[m/s] și 5,85[m/s], în decurs de 600[s], cu următoarele date experimentale:

P[kW]	n[rot/min]	V[m/s]
502,32	1261,59	5,46
495,07	1254,99	5,85

Cu MM-TV de forma

$$P_{TV}(\omega) = 1447,3(V/\omega - 2,0992 \times 10^{-2})e^{-52,402 \times (V/\omega)} V^3$$

La $V=5,46$ [m/s] se obțin coordonatele **MPP-1**

-VUM optimă, ω_{OPTIM} , prin anularea derivatei puterii:

$$\frac{dP_{TV}}{d\omega} = \frac{d}{d\omega} \left((5,46/\omega - 2,0992 \times 10^{-2}) e^{-52,402 \times (5,46/\omega)} \right) = 0, \text{ soluția}$$

$$\omega = \omega_{k-1} = \omega_{OPTIM-1} = 136,25 [\text{rad/s}], \text{ sau } n = 1301,1 [\text{rot/min.}]$$

$$-P_{TV-MAX-1} = 1447,3(5,46/136,25 - 2,0992 \times 10^{-2})e^{-52,402 \times (5,46/136,25)} 5,46^3 = 550,5 [\text{kW}]$$

La $V=5,85$ [m/s] coordonatele **MPP-2** sunt

- VUM optimă, ω_{OPTIM} , prin anularea derivatei puterii:

$$\frac{dP_{TV}}{d\omega} = \frac{d}{d\omega} \left((5,85/\omega - 2,0992 \times 10^{-2}) e^{-52,402 \times (5,85/\omega)} \right) = 0 \text{ soluția}$$

$$\omega = \omega_k = \omega_{OPTIM-2} = 145,97 [\text{rad/s}]$$

$$-P_{TV-MAX-2} = 1447,3(5,85/145,97 - 2,0992 \times 10^{-2})e^{-52,402 \times (5,85/145,97)} 5,85^3 = 677,1 [\text{kW}]$$

La $J=36734$ [kg·m²], în intervalul de timp $\Delta t=600$ [s], variația energiilor cinetice are valoarea:

$$J \frac{\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2}{2} = 36734 \frac{145,97^2 - 136,25^2}{2} = 5,0384 \times 10^4 [\text{kJ}]$$

unde: ω_k -VUM la momentul $t_k=600$ [s], ω_{k-1} -VUM la momentul

$t_{k-1}=0$, $\Delta t=t_k-t_{k-1}=600$ [s]

Energia eoliană utilă captată de TV, pe intervalul de timp Δt , are valoarea

Mărirea eficienței energetice la sistemele electroenergetice eoliene funcționând la viteze ale vântului variabile în timp. Partea a II-a

$$Energ_{-TV} = \frac{(P_{TV-MAX-1} + P_{TV-MAX-2})}{2} \cdot 600 = \frac{(550,5 + 677,1)}{2} \cdot 600 = 36,828 \times 10^4 \text{ [kJ]}$$

de aproximativ șapte ori mai mare decât valoarea energiilor cinetice.

Prin urmare, se poate ajunge în timp util la $\omega_{OPTIM-2} = 145,97 \text{ [rad/s]}$

Se pune, însă, problema **ce valoare trebuie să aibă sarcina la GSMP pentru a se ajunge în timp util** la $\omega_{OPTIM-2}$.

Energia eoliană utilă captată de TV, pe intervalul de timp Δt , trebuie să fie egală cu suma energiilor cinetice + energia electrică debitată de GSMP, pe intervalul de timp Δt :

$$Energ_{-TV} = J \frac{\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2}{2} + Energ_{-GSMP},$$

sau

$$36,828 \times 10^4 = 5,0384 \times 10^4 + P_{GSMP-MEDIU} \cdot 600 \text{ cu soluția } P_{GSMP-MEDIU} = 529,83 \text{ [kW]}$$

mai mică decât puterea inițială de la GSMP: $P_{GSMP-1} = 550,5 \text{ [kW]}$

Se confirmă, astfel, afirmația făcută la începutul lucrării ca pentru a se ajunge în timp util la $\omega_{OPTIM-2}$ trebuie micșorată sarcina la GSMP, la creșterea vitezei vântului.

La puterea $P_{GSMP-MEDIU}$ și la VUM medie:

$$\omega_{MEDIU} = \frac{136,25 + 145,97}{2} = 141,11 \text{ [rad/s]}$$

îi corespunde rezistența de sarcină $R_{OPTIM} = 1,4401 \text{ [\Omega]}$ obținută din sistemul algebric

$$\begin{cases} 529830 = 169000 \frac{\omega^2 R}{R^2 + 0,04583 \omega^2}, \text{ soluția } R_{OPTIM} = 1,4401 \text{ [\Omega]} \\ \omega = 141,11 \end{cases}$$

5.1. Vizualizarea procesului de la $t=0$ la $t=600 \text{ [s]}$ cu o variație a vitezei vântului de forma:

$$V(t) = \left(5,46 + \frac{5,85 - 5,46}{600} t \right)$$

și cu $R_{OPTIM} = 1,4401 \text{ [\Omega]}$ se face prin rezolvarea ecuației momentului cinetic de forma:

Lucian Crișan, Simona Popa-Albu, Meda Alexandra Lazăr, Daniel Brebenariu, Cristian Murărescu, Marius Dudu, Ioan Borza, Marius Babescu

$$\left\{ \begin{array}{l} 36734 \frac{d\omega}{dt} \omega = 1447,3 \times 10^3 \left(\left(5,46 + \frac{5,85 - 5,46}{600} t \right) / \omega - 2,0992 \times 10^{-2} \right) e^{-52,402 \left(\left(5,46 + \frac{5,85 - 5,46}{600} t \right) / \omega \right)} \\ \left(5,46 + \frac{5,85 - 5,46}{600} t \right)^3 - 16900 \frac{\omega^2 1,4401}{1,4401^2 + 0,04583 \omega^2} \\ \frac{dE}{dt} = 16900 \frac{\omega^2 1,4401}{1,4401^2 + 0,04583 \omega^2} \\ \frac{dM}{dt} = 1447,3 \times 10^3 \left(\left(5,46 + \frac{5,85 - 5,46}{600} t \right) / \omega - 2,0992 \times 10^{-2} \right) e^{-52,402 \left(\left(5,46 + \frac{5,85 - 5,46}{600} t \right) / \omega \right)} \\ \left(5,46 + \frac{5,85 - 5,46}{600} t \right)^3 \\ E(0) = 0 \\ M(0) = 0 \\ \omega(0) = 136,25 \end{array} \right.$$

și se dă în figura 3.

Energia eoliană captată, $Energ_{TV}$ în intervalul de timp Δt , se obține prin integrarea puterii P_{TV} .

$$Energ_{TV} = \int P_{TV} \cdot dt$$

sau

$$\frac{d}{dt} Energ_{TV} = \frac{dM}{dt} = P_{TV}$$

Analog și energia electrică debitată, $Energ_{GSMP}$ se obține prin integrarea puterii, P_{GSMP}

$$Energ_{GSMP} = \int P_{GSMP} \cdot dt$$

$$\frac{d}{dt} Energ_{GSMP} = \frac{dE}{dt} = P_{GSMP}$$

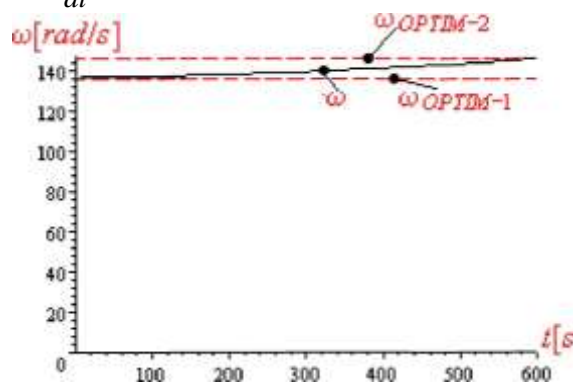


Fig.3. Evoluția în timp a VUM ω

La momentul $t = 600[s]$ se obțin valorile

Mărirea eficienței energetice la sistemele electroenergetice eoliene funcționând la viteze ale vântului variabile în timp. Partea a II-a

$$\omega(600)=145,79 \text{ [rad/s]} \text{ comparativ cu } \omega_{OPTIM-2}=145,97 \text{ [rad/s]}$$

$$\text{-energia electrică debitată } -E_1(600) = 3,1789 \times 10^8 \text{ [J]}$$

$$\text{-energia mecanică captată } -M_1(600) = 3,6733 \times 10^8 \text{ [J]}$$

La momentul inițial, la puterea

$$P_{W-MAX-1} = P_{GSMP-1} = 550,5 \text{ [kW]}$$

sarcina la generator are valoarea:

$$\begin{cases} 550500 = 16900 \frac{\omega^2 R}{R^2 + 0,04583\omega^2}, \text{ soluția: } R=1,4968, \omega=136,25 \\ \omega = 136,25 \end{cases}$$

La această valoare, $R=1,4968 \text{ } [\Omega]$, ecuația momentului cinetic devine:

$$\begin{cases} 36734 \frac{d\omega}{dt} \omega = 1447,3 \times 10^3 \left(\left(5,46 + \frac{5,85 - 5,46}{600} t \right) / \omega - 2,0992 \times 10^{-2} \right) e^{-52,402 \left(\left(5,46 + \frac{5,85 - 5,46}{600} t \right) / \omega \right)} \\ \left(5,46 + \frac{5,85 - 5,46}{600} t \right)^3 - 16900 \frac{\omega^2 1,4968}{1,4968^2 + 0,04583\omega^2} \\ \frac{dE}{dt} = 16900 \frac{\omega^2 1,4968}{1,4968^2 + 0,04583\omega^2} \\ \frac{dM}{dt} = 1447,3 \times 10^3 \left(\left(5,46 + \frac{5,85 - 5,46}{600} t \right) / \omega - 2,0992 \times 10^{-2} \right) e^{-52,402 \left(\left(5,46 + \frac{5,85 - 5,46}{600} t \right) / \omega \right)} \\ \left(5,46 + \frac{5,85 - 5,46}{600} t \right)^3 \\ E(0) = 0 \\ M(0) = 0 \\ \omega(0) = 136,25 \end{cases}$$

și se obțin valorile

$$\omega(600) = 143,41 \text{ [rad/s]} \text{ comparativ cu } \omega_{OPTIM-2} = 145,97 \text{ [rad/s]}$$

$$E_2(600) = 3,3033 \times 10^8 \text{ [J]} \text{ comparativ } E_1(600) = 3,1789 \times 10^8 \text{ [J]}$$

$$M_2(600) = 3,6712 \times 10^8 \text{ [J]} \text{ comparativ cu } M_1(600) = 3,6733 \times 10^8 \text{ [J]}$$

5.2. Bilanțul energetic

Energia eoliană captată, pe intervalul de timp Δt , se regăsește în variația energiilor cinetice, $J \frac{\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2}{2}$ și energia electrică debitată de GSMP, pe intervalul de timp Δt .

La momentul $t=600$ [s], în varianta optimă cu $R_{OPTIM}=1,4401$ [Ω] s-au obținut valorile:

$$\text{-VUM-}\omega(600)=145,79 \text{ [rad/s]}$$

$$\text{- energia cinetică - } J \frac{\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2}{2} = 36734 \frac{145,79^2 - 136,25^2}{2} = 4,9419 \times 10^7 \text{ [J]}$$

Lucian Crișan, Simona Popa-Albu, Meda Alexandra Lazăr, Daniel Brebenariu, Cristian Murărescu, Marius Dudu, Ioan Borza, Marius Babescu

- energia electrică debitată $-E_2(600)=3,1789 \times 10^8 [\text{J}]$
- energia eoliană captată $-M_2(600)=3,6712 \times 10^8 [\text{J}]$
- bilanțul energetic
- $Energ_{TV} = J \frac{\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2}{2} + Energ_{GSMP} = 3,7,9419 \times 10^7 + 3,1789 \times 10^8 = 3,6731 \times 10^8$

Comparativ cu $M_2(600)=3,6712 \times 10^8 [\text{J}]$

În varianta optimă energia eoliană captată $-Mi(600)=3,1789 \times 10^8 [\text{J}]$ - este mai mare decât energia eoliană captată $-M_2(600) = 3,6712 \times 10^8 [\text{J}]$.

În ambele variante energia eoliană utilă captată de TV, pe intervalul de timp Δt . Este egală cu suma energiilor cinetice+energia electrică debitată de GSMP, pe intervalul de timp Δt .

Observația 1

Asa cum se observă, din datele de mai sus, energia electrică debitată, în varianta optimă cu $R_{OPTIM}=1,4401 [\Omega]$, este mai mică decât energia electrică debitată în varianta cu $R=1,4968 [\Omega]$, creând, astfel, o contradicție. Această contradicție este doar aparentă deoarece în varianta optimă energia eoliană captată este mai mare decât energia eoliană captată în varianta cu $R=1,4968 [\Omega]$. În varianta optimă energia cinetică $J \frac{\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2}{2}$ este mai mare decât energia cinetică în varianta cu $R=1,4968 [\Omega]$ și, în final, această energie cinetică se va transforma în energie electrică.

Precizarea 3

Energia eoliană captată $M_2(600)$ este mai mică decât energia eoliană captată $M_1(600)$, deoarece traseul punctului de funcționare pentru M_1 , la $R_{OPTIM} = 1,4401 [\Omega]$, este cel optim din punct de vedere energetic, traseul **A-B** din figura 10, VUM în punctul B fiind egală cu $\omega_{OPTIM-2}$.

Traseul punctului de funcționare la $R=1,4968 [\Omega]$, traseul **A-C** din figura 4, nu este optim din punct de vedere energetic, VUM în punctul C fiind mai mică decât $\omega_{OPTIM-2}$

$$P_{TV-1} = 1447,3(5,46 / \omega - 2,0992 \times 10^{-2}) e^{-52,402(5,46 / \omega)} (5,46)^3$$

$$P_{TV-2} = 1447,3(5,85 / \omega - 2,0992 \times 10^{-2}) e^{-52,402(5,85 / \omega)} (5,85)^3$$

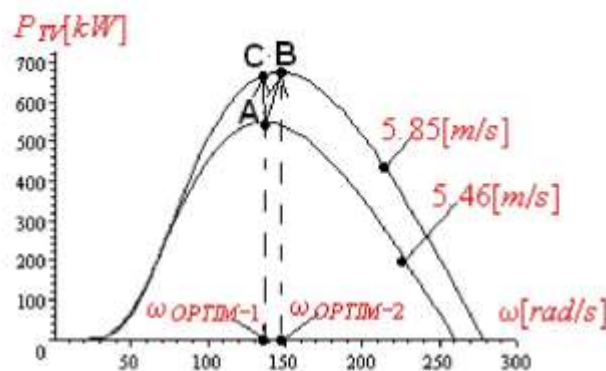


Fig.4.Traseele punctului de funcționare pentru două valori ale rezistenței de sarcină de la GSMP

Mărirea eficienței energetice la sistemele electroenergetice eoliene funcționând la viteze ale vântului variabile în timp. Partea a II-a

Punctele **A** și **B** sunt cele de putere maximă

-**A** pentru $V_1 = 5,46$ [m/s]

-**B** pentru $V_2 = 5,85$ [m/s]

Optimul energetic se asigură prin modificarea sarcinii la GSMP, astfel ca VUM ω să fie, ca valoare, în zona optimală, la valori apropiate de ω_{OPTIM} , care depinde de viteza vântului, fiind variabilă în timp

$$\omega(t) \Rightarrow \omega_{OPTIM}(t)$$

Precizarea 4

Valoarea VUM ω , comparativ cu valoarea VUM optime, ω_{OPTIM} influențează semnificativ valoarea puterii TV.

Datorită inerției mecanice mari VUM ω nu poate urmări variația rapidă a vitezei vântului în timp și, din acest motiv, eficiența energetică este scăzută, în anumite perioade de timp.

În concluzie, deși la creșterea vitezei vântului, V , puterea la TV crește cu V^3 , pentru atingerea VUM optime, $\omega_{OPTIM-2}$, sarcina la GSMP trebuie redusă cu o valoare bine precizată în funcție de rapiditatea variației în timp a vitezei vântului și de valoarea momentului de inerție J .

5.3. Maximul energetic

Valoarea maximă a energiei eoliene captate, în intervalul Δt , se obține la o funcționare în MPP, deci la:

$$\omega(t) = \omega_{OPTIM}(t).$$

Valoarea VUM optime, ω_{OPTIM} , se obține prin anularea derivatei puterii:

$$\frac{dP_{TV}}{d\omega} = \frac{d}{d\omega} \left((V / \omega - 2,0992 \times 10^{-2}) e^{-52,402 \times (V / \omega)} \right) = 0$$

sau

$$(52,402V^2 - 2,1V\omega) = 0, \text{ cu soluția } \omega = 24,953V$$

La o variație a vitezei vântului de forma:

$$V(t) = \left(5,46 + \frac{5,85 - 5,46}{600} t \right)$$

se obține:

$$\omega_{OPTIM}(t) = 24,953 \left(5,46 + \frac{5,85 - 5,46}{600} t \right)$$

Valoarea maximă a energiei eoliene captate în intervalul $\Delta t = 600$ [s] se obține prin integrarea puterii:

Lucian Crișan, Simona Popa-Albu, Meda Alexandra Lazăr, Daniel Brebenariu, Cristian Murărescu, Marius Dudu, Ioan Borza, Marius Babescu

$$Energ_{-TV} = \int_0^{600} P_{TV}(t)dt = \int_0^{600} P_{TV-MAX}(t)dt =$$

$$\int_0^{600} \left(1447,3(1/24,953 - 2,0992 \times 10^{-2})e^{-52,402 \times (1/24,953)t} \right) \left(5,46 + \frac{5,85 - 5,46}{600}t\right)^3 dt = 3,6741 \times 10^5 \text{ [kJ]}$$

comparativ cu $M_1(600)=3,6733 \times 10^8 \text{ [J]}$ și $M_2(600)=3,6712 \times 10^8 \text{ [J]}$

Valoarea maximă a energiei captate este cu $2,1774 \times 10^{-2} \%$ mai mare decât în cazul funcționării reale la $R_{OPTIM}=1.4401 \text{ [}\Omega\text{]}$.

Prin urmare, pierderea de energie pe durata unui an de zile este de

$$(M_1(600) - M_2(600)) \frac{365 \times 24 \times 3600}{600} = (3,6733 \times 10^8 - 3,6712 \times 10^8) \frac{365 \times 24 \times 3600}{600} =$$

$$\frac{1,1038 \times 10^4}{3600} = 3,0661 \text{ [MWh]}$$

Evoluția în timp a VUM ω se determină prin rezolvarea ecuației momentului cinetic care este:

$$\begin{cases} 36734, \frac{d\omega}{dt} \omega = 1447,3 \times 10^3 \left(\left(5,46 + \frac{5,85 - 5,46}{600}t \right) / \omega - 2,0992 \times 10^{-2} \right) e^{-52,402 \left(\left(5,46 + \frac{5,85 - 5,46}{600}t \right) / \omega \right)} \\ \left(5,46 + \frac{5,85 - 5,46}{600}t \right)^3 - 16900 \frac{\omega^2 1,4401}{1,4401^2 + 0,04583\omega^2} \\ \omega(0) = 136.25 \end{cases}$$

Evoluțiile în timp a VUM reale, ω_{REAL} și ideale, ω_{MPP} , sunt date în figura 5

Evoluția în timp a VUM reale este liniară, așa ca și evoluția în timp a vitezei vântului, iar evoluția în timp a VUM reale este determinată de valoarea momentului de inerție echivalent și de evoluția în timp a vitezei vântului.

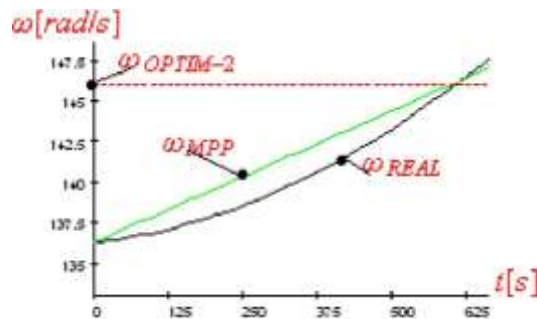


Fig.5. Evoluția în timp a VUM reale și ideale

Mărirea eficienței energetice la sistemele electroenergetice eoliene funcționând la viteze ale vântului variabile în timp. Partea a II-a

Se observă din figura 5 ca valorile VUM reale sunt mai mici decât valorile VUM la o funcționare în MPP.

Pentru a funcționa în MPP, deci la

$$\omega_{REAL} = \omega_{MPP}$$

se impune scăderea sarcinii la GSMP.

La funcționarea în gol, sarcina la GSMP fiind zero, ecuația momentului cinetic devine:

$$\begin{cases} 36734 \frac{d\omega}{dt} \omega = 1447,3 \times 10^3 \left(\left(5,46 + \frac{5,85 - 5,46}{600} t \right) / \omega - 2,0992 \times 10^{-2} \right) \\ e^{-52,402 \left(\left(5,46 + \frac{5,85 - 5,46}{600} t \right) / \omega \right)} \left(5,46 + \frac{5,85 - 5,46}{600} t \right)^3 \\ \omega(0) = 136,25 \end{cases}$$

și se observă din figura 6 ca valorile VUM reale, ω_{GOL} , sunt mai mari decât valorile VUM la o funcționare în MPP, accelerația rotorului fiind mai mare decât accelerația impusă de vânt.

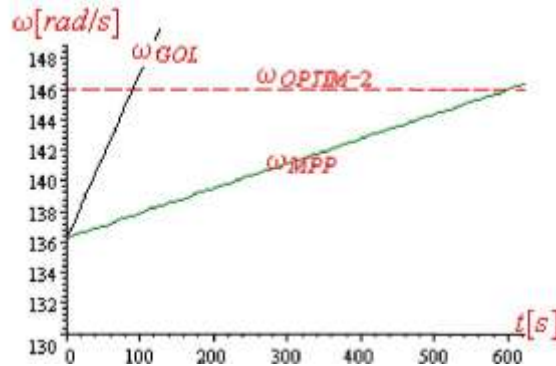


Fig.6. Evoluția în timp a VUM reale și ideale la funcționarea în gol

Pentru a avea aceeași evoluție în timp a VUM reale și ideale se impune ca valorile derivatelor:

$$\text{-VUM ideale} - \frac{d\omega_{OPTIM}}{dt}$$

$$\text{-VUM reale} - \frac{d\omega}{dt}$$

Valoarea derivatei $\frac{d\omega_{OPTIM}}{dt}$ se obține derivând funcția:

Lucian Crișan, Simona Popa-Albu, Meda Alexandra Lazăr, Daniel Brebenariu, Cristian Murărescu, Marius Dudu, Ioan Borza, Marius Babescu

$$\omega_{OPTIM}(t) = 24,953 \left(5,46 + \frac{5,85 - 5,46}{600} t \right)$$

și rezultă

$$\frac{d}{dt} \omega_{OPTIM}(t) = \frac{d}{dt} \left(24,953 \left(5,46 + \frac{5,85 - 5,46}{600} t \right) \right) = 1,6219 \times 10^{-2}$$

Valoarea derivatei $\frac{d\omega}{dt}$ se obține din ecuația momentului cinetic

$$J \frac{d\omega}{dt} \omega = P_{TV} - P_{GSMP}$$

sau

$$36734 \cdot \frac{d\omega}{dt} \omega = 1447,3 \times 10^3 \left(\left(5,46 + \frac{5,85 - 5,46}{600} t \right) / \omega - 2,0992 \times 10^{-2} \right) e^{-52,402 \left(\left(5,46 + \frac{5,85 - 5,46}{600} t \right) \omega \right)} - P_{GSMP}$$

de unde rezultă puterea la arborele GSMP, la momentul t

La momentul $t=0$ VUM are valoarea

$$\omega(0) = 136,25 \text{ [rad/s]}$$

și se obține:

$$36734 \cdot \frac{d\omega}{dt} \cdot 136,25 = 1447,3 \times 10^3 \cdot \left((5,46) / 136,25 - 2,0992 \times 10^{-2} \right) e^{-52,402 \cdot ((5,46) / 136,25)}$$

de unde se obține puterea la arborele GSMP, la momentul t . La momentul $t=0$

VUM are valoarea $\omega(0) = 136,25$ [rad/s] și se obține:

$$36734 \cdot \frac{d\omega}{dt} \cdot 136,25 = 1447,3 \times 10^3 \cdot \left((5,46) / 136,25 - 2,0992 \times 10^{-2} \right) e^{-52,402 \cdot ((5,46) / 136,25)} \quad (5.46 \text{ de unde}$$

prin înlocuirea derivatei $\frac{d\omega}{dt}$ cu valoarea

$$\frac{d}{dt} \omega_{OPTIM}(t) = 1,6219 \times 10^{-2}$$

rezultă

$$36734 \cdot 1,6219 \times 10^{-2} \cdot 136,25 = 1447,3 \times 10^3 \cdot \left((5,46) / 136,25 - 2,0992 \times 10^{-2} \right) e^{-52,402 \cdot ((5,46) / 136,25)}$$

de unde se obține puterea la arborele GSMP, la momentul $t=0$.

$$P_{GSMP}(0) = 4,6933 \times 10^5 \text{ [W]}$$

Mărirea eficienței energetice la sistemele electroenergetice eoliene funcționând la viteze ale vântului variabile în timp. Partea a II-a

mai mică decât puterea inițială de la GSMP: $P_{GSMP-1} = 550,5$ [kW] și valoarea puterii obținută din bilanțul energetic:

$$Energ_{-TV} = J \frac{\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2}{2} + Energ_{-GSMP} \text{ cu soluția } P_{GSMP-MEDIU} = 529,83 \text{ [kW]}$$

Pentru a avea aceeași evoluție în timp a VUM reale și ideale trebuie micșorată sarcina la GSMP, la creșterea vitezei vântului.

Modificarea sarcinii la GSMP se face la intervale de timp cât mai mici, de exemplu $\Delta t = 10$ [s]

La valoarea puterii, $P_{GSMP}(0)$, îi corespunde rezistența de sarcină $R(0)$ calculată din sistemul algebric:

$$\left\{ \begin{array}{l} 4,6933 \times 10^5 = 16900 \cdot \frac{\omega^2 R}{R^2 + 0,04583 \omega^2} \text{ Soluția: } R(0) = 1,2752 \text{ } [\Omega] \\ \omega = 136,25 \end{array} \right.$$

Vizualizarea procesului de la $t=0$ la $t=10$ [s] cu o variație a vitezei vântului de forma:

$$V(t) = \left(5,46 + \frac{5,85 - 5,46}{600} t \right)$$

și cu $R(0) = 1,2752$ [Ω] se face prin rezolvarea ecuației momentului cinetic de forma:

$$\left\{ \begin{array}{l} 36734 \cdot \frac{d\omega}{dt} \omega = 1447,3 \times 10^3 \left(\left(5,46 + \frac{5,85 - 5,46}{600} t \right) / \omega - 2,0992 \times 10^{-2} \right) e^{-52,402 \left(\left(5,46 + \frac{5,85 - 5,46}{600} t \right) / \omega \right)} \\ \left(5,46 + \frac{5,85 - 5,46}{600} t \right)^3 - 16900 \cdot \frac{\omega^2 1,2752}{1,2752^2 + 0,04583 \omega^2} \\ \frac{dE}{dt} = 16900 \cdot \frac{\omega^2 1,2752}{1,2752^2 + 0,04583 \omega^2} \\ \frac{dM}{dt} = 1447,3 \times 10^3 \left(\left(5,46 + \frac{5,85 - 5,46}{600} t \right) / \omega - 2,0992 \times 10^{-2} \right) e^{-52,402 \left(\left(5,46 + \frac{5,85 - 5,46}{600} t \right) / \omega \right)} \\ \left(5,46 + \frac{5,85 - 5,46}{600} t \right)^3 \\ E(0) = 0 \\ M(0) = 0 \\ \omega(0) = 136,25 \end{array} \right.$$

și se dă în figura 7.

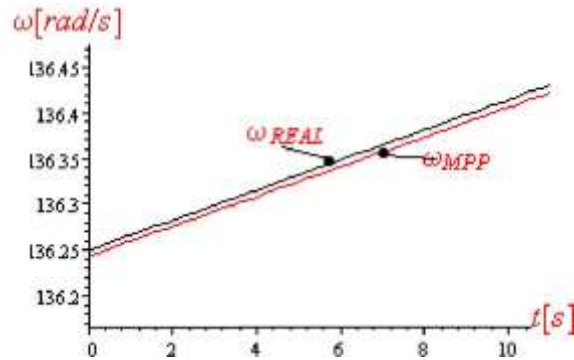


Fig.7. Evoluția în timp a VUM reale și ideale la funcționarea în MPP

La momentul $t=10$ [s] se obțin rezultatele

-VUM- $\omega(10)=136,41$ [rad/s]

$$\omega_{OPTIM}(10) = 24,953 \left(5,46 + \frac{5,85 - 5,46}{600} 10 \right) = 136,41 \text{ [rad/s]}$$

-energia electrică debitată- $E(10)=4,6934 \times 10^6$ [J]

- energia eoliană captată- $M(10)=5,5149 \times 10^6$ [J]

Se observă că VUM curentă, ω , are aceeași valoare cu VUM optimă, ω_{OPTIM} ,

$$\omega(10) = \omega_{OPTIM}(10) = 136,41 \text{ [rad/s]}$$

demonstrându-ne, astfel, că funcționarea SEE este în MPP.

Energia eoliană captată- $M(10)$ -este mai mare decât energia electrică debitată- $E(10)$ diferența dintre ele

$$\Delta ME = 5,5149 \times 10^6 - 4,6934 \times 10^6 = 8,215 \times 10^5 \text{ [J]}$$

regăsindu-se în variația energiilor cinetice de valoare

$$J \frac{\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2}{2} = 36734 \cdot \frac{136,41^2 - 136,25^2}{2} = 8,0127 \times 10^5 \text{ [J]}$$

Mărirerea eficienței energetice se realizează după algoritmul dat în continuare.

5.4. Algoritmul pentru mărirea eficienței energetice

Algoritmul pentru mărirea eficienței a TV se bazează pe măsurări ale vitezei vântului, V , ale VUM curente, ω și ale puterii debitate de generator și are 6 etape.

Etapa 1

măsurarea vitezei vântului, V_{k-1} , la momentul t_{k-1} și V_k , la momentul t_k , la un pas de eșantionare

$$\Delta t = t_k - t_{k-1} \text{ și calculul derivatei acesteia } \frac{dV}{dt}$$

Etapa 2

măsurarea VUM curente, ω_{k-1} , la momentul t_{k-1}

Mărirea eficienței energetice la sistemele electroenergetice eoliene funcționând la viteze ale vântului variabile în timp. Partea a II-a

Etapa 3

determinarea VUM optime, ω_{OPTIM} și calculul derivatei acesteia, cu relația:

$$\frac{d\omega_{OPTIM}}{dt} = k \cdot \frac{dV}{dt},$$

Etapa 4

determinarea puterii TV, la momentul t_{k-1} , cu MM-TV

$$P_{TV}(t_{k-1}) = a((V_{k-1})/\omega - b)e^{-c((V_{k-1})/\omega)(V_{k-1})^3},$$

Etapa 5

determinarea puterii la arborele GSMP, la momentul t_{k-1} din ecuația momentului cinetic

$$J \frac{d\omega}{dt} \omega = P_{TV} - P_{GSMP},$$

la $\frac{d\omega}{dt} = \frac{d\omega_{OPTIM}}{dt}$ obținându-se

$$P_{GSMP}(t_{k-1}) = P_{TV}(t_{k-1}) - J \frac{d\omega_{OPTIM}}{dt} \omega_{k-1}.$$

Etapa 6

modificarea puterii la GSMP la valoarea $P_{GSMP}(t_{k-1})$

Modificarea puterii la GSMP se face prin unghiul de comandă al tiristoarelor convertorului interpus între generator și rețea, astfel ca valoarea VUM ω să fie ω_{OPTIM} .

Pe baza rezultatelor de mai sus se poate concepe un sistem de conducere care să asigure funcționarea în zona optimă din punct de vedere energetic.

Algoritmul pentru mărirea eficienței energetice se bazează pe măsurări ale vitezei vântului și ale VUM, în sensul celor de mai sus.

Prin analiza mai multor cazuri s-au putut stabili mărimile de bază ce conduc la o funcționare optimă din punct de vedere energetic a SEE.

În acest fel se ține seama de evoluția în timp a vitezei vântului și se poate estima puterea la arborele GSMP, la orice variație a vitezei vântului.

Prin analiza mai multor cazuri s-au putut stabili zonele cu eficiență energetică mărită.

Se ține seama de evoluția în timp a vitezei vântului și se poate asigura o funcționare optimă, în MPP, la orice variație a vitezei vântului.

Precizarea 5 - mărirea eficienței energetice

Mărirea eficienței energetice se realizează prin modificarea sarcinii la GSMP, după evoluția în timp a vitezei vântului. Pentru a se ajunge, în timp util, la egalitatea VUM

$$\omega = \omega_{OPTIM}$$

trebuie modificată sarcina la GSMP astfel:

-la creșterea vitezei vântului valoarea lui ω_{OPTIM} crește și sarcina la GSMP trebuie micșorată pentru a se ajunge la egalitatea VUM, iar

-la scăderea, în timp, a vitezei vântului valoarea lui ω_{OPTIM} scade și sarcina la GSMP trebuie mărită pentru a se ajunge la egalitatea VUM

Modificarea sarcinii la GSMP se realizează considerând valorile momentului de inerție J și ale derivatei vitezei vântului, $\frac{dV}{dt}$.

Captarea unei energii eoliene maxime este o problemă complexă, dificil de rezolvat în practică în condițiile în care viteza vântului variază semnificativ în timp și inerția mecanică a SEE fiind mare nu permite ca turația de la generator să fie la valorile optime din punct de vedere energetic.

Din analiza rezultatelor obținute din datele experimentale din locația MinAna-zona Dobrogea se poate concluziona ca:

- 1) energia electrică debitată maximă se obține la $V = ct$ și depinde de valoarea vitezei vântului la puterea a treia;
- 2) datorită inerției mecanice energia eoliană captată depinde de rapiditatea variației vitezei vântului în timp, micșorându-se la variații mari ale vitezei vântului în timp;
- 3) energia eoliană captată, la viteze ale vântului variabile semnificativ în timp, scade cu cât J este mai mare și, din acest motiv sunt oportune plasarea fermelor eoliene de mare putere (peste 4 MW), în zonele cu viteze ale vântului de valoare medie puțin variabilă în timp.

6. CONCLUZII

În prezenta lucrare se realizează mărirea eficienței energetice la SEE de mare putere, când viteza vântului se modifică semnificativ în timp. Se realizează mărirea eficienței energetice la orice variație a vitezei vântului. S-a analizat funcționarea sistemului electroenergetic eolian din locația MinAna-zona Dobrogea. Determinarea puterii electrice în funcție de viteză vântului se bazează pe măsurarea a două mărimi de bază: viteza vântului și VUM curentă. Prin analiza mai multor cazuri s-au putut stabili mărimile de bază ce conduc la o funcționare optimă din punct de vedere energetic a SEE. S-a observat cum influențează inerția mecanică evoluțiile în timp ale eficienței energetice. Datorită inerției mecanice mari VUM se modifică foarte puțin, deși viteza vântului se modifică semnificativ. Eficiența energetică se micșorează la creșterea vitezei vântului deoarece VUM nu se modifică, datorită inerției mecanice mari, în aceeași proporție ca și viteza vântului. În finalul lucrării s-a dat algoritmul pentru mărirea eficienței energetice.

7. BIBLIOGRAFIE

- [1] [http://www.monsson.eu/LOCATIA GALBIORI](http://www.monsson.eu/LOCATIA_GALBIORI) 142 anul 2015;
- [2] Title: Mean values of plant: 25090142 file: MinAna., Local Time: 9/1/2015 09:27:37, Location: Galbiori, System: Galbiori 1, System Number: 25090142, System Type GEWE_B2.5-100, 9/1/2015;

Mărirea eficienței energetice la sistemele electroenergetice eoliene funcționând la viteze ale vântului variabile în timp. Partea a II-a

- [3] Akpınar, S. and Akpınar, E.K., "Wind energy analysis based on maximum entropy principle (MEP) - type distribution function", *Energy Conversion and Management*, 48(4), 1140-1149.(2007);
- [4] Akpınar, E.K. and Akpınar, S., "A statistical analysis of wind speed data used in installation of wind energy conversion systems", *Energy Conversion and Management*, 46(4), 515-532.(2005)
- [5] A.N. Celik, M. Kolhe, "Generalized feed-forward based method for wind energy prediction", *Applied Energy* 101 582-588(2013);
- [10] Babescu M., Borlea I., Jigoria Oprea D. "Fundamental aspects concerning Wind Power System Operattion Part.2, Case Study" Medina Tunisia 2012 IEEE MELECON, 2012, 25-28 March 978-1 - 4673-0783-3
- [6] Babescu M., Borlea I., Jigoria Oprea D "Fundamental aspects concerning Wind Power System Operattion Part.1, Matematical Models" Medina Tunisia 2012 IEEE MELECON, 2012 ,25-28 March, 978-1-4673-0783-3
- [7] Babescu M., Gana O., Ciotea L. "Fundamental Problems related to the Control of Wind Energy Conversion Systems-Maximum Power Extraction and Smoothing the Power Fluctuations deliveres to the Grid" OPTIM-13th International Conference on Optimizytion of Electrical and Electronic Equipment, Optim 2012, Braşov, 24-26 May;
- [8] Babescu M., Borza I., Gana O., Lăcătuşu F. "Comportarea sistemului electroenergetic eolian la variații rapide ale vitezei vântului" Producerea , transportul si utilizarea energiei, pp 11-24, Editura RISOPRINT Cluj-Napoca, 2010, ISSN 2066-4125;
- [9] Babescu M., Boraci R., Chioreanu C., Koch C., Gana O. "On Functioning of the Electric Wind System at its Maximum Power" ICCO-CONTI 2010, Timișoara, Romania, May 27-29, 2010;
- [10] Babescu M., Petrescu D., Vasar C., Prostean O., Boraci R. - "Maximum Power Point Control Approach for Wind Generators" -SOFA 24-26 July 2014-Timișoara, România;
- [11] Balog F., Ciocârlie H., Babescu M., Petrescu D.- "Maximizing the Captured Energy of a Wind System"-IEE - International Symposion on applied Compuțational intelligence and informatics-SACI 2014- Polytechnic University, Timișoara, Romania;
- [12] Balog F., Ciocârlie H., Erdodi.GiPolytechnic University, Timișoara, Romania;
- [13] Borza I., Erdodi G., Petrescu D., Lăcătuşu F.- "Sistem Eolian cu Stocare în Acumulatori Electrice"-SME 2014-Conferința Știința Modernă șiEnergia-Cluj-Napoca-15-16 Mai 2014;
- [14] Balog F, Ciocârlie H, Babescu M, Erdodi G- "Equivalent speed and equivalent power of the wind systems that works at variable wind speed"- SOFA 24-26 July 2014-Timișoara, România
- [15] Balog F., Ciocârlie H., Petrescu D., Erdodi G. - "Behavior of the wind systems optimally controlled at variable wind speeds"- SOFA 24-26 July 2014-Timișoara, România;
- [16] Barthelmie R. J., Jensen L. E. "Evaluation of power losses due to wind turbine wakes at the Nysted offshore wind farm". *Wind Energy*, 2010, 13: 573-58;
- [17] , Barthelmie R. J., Pryor S., Frandsen S. T., Hansen K. S., Schepers J., Rados K., et al., "Quantifying the Impact of Wind Turbine Wakes on Power Output at Offshore Wind Farms," *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Voi. 27, No. 8, pp. 1302- 1317,2010;
- [18] El Aimani S, Francois B., Minne F., Robyns B.-"Comparativw analysis of control structures for variable speed wind turbine", in Proc. CESA, Lille, France, Jul. 9-11,2003;
- [19] Eugene C., Morgan, Matthew Lackner, Richard M. Vogel, Laurie G. Baise, "Probability distributions for offshore wind speeds", *Energy Conversion and Management* 52 (2011) 15-26;
- [20] Erdem E, Shi J ARMA "Based approaches for forecasting the tuple of wind speed and direction". *Appl Energy* 88:1405-1414 Gallego C, Pinson P, Madsen H, Costa A, Cuerva A (2011)

Lucian Crișan, Simona Popa-Albu, Meda Alexandra Lazăr, Daniel Brebenariu, Cristian Murărescu, Marius Dudu, Ioan Borza, Marius Babescu

Influence of local wind speed and direction on wind power dynamics— application to offshore very short-term forecasting. *Appl Energy* 88:4087-4096, (2011);

[21] Farahani E M, Hosseinzadeh N, Ektesabi M M. "Comparison of dynamic responses of dual and single rotor wind turbines under transient conditions". In: *Sustainable Energy Technologies (ICSET)*, 2010 IEEE International Conference, Kandy, Sri Lanka, Dec., 2010

[22] Hu H., Tian W., Ozbay A. "Wind turbine aeromechanics and interferences among multiple turbines in onshore and offshore wind farms". In: 2013 NAWEA Symposium on Wind Energy, the University of Colorado, Boulder, USA, Aug. 06-08, 2013

[23] Kim K.H., Van T.L., Lee D.C., Song S.H., Kim E.H. - "Maximum output Power Tracking Control in Variable-Speed Wind Turbine System Considering Rotor Inertial Power", in *IEEE transaction on industrial electronics*, voi.60, no.8, august 2013, pp.3207-3217;

[24] Kim H., Kim K., Paek I., and Yoo, N., "Development of a Time- Domain Simulation Tool for Offshore Wind Farms," *Journal of Power Electronics*, Voi. 15, No. 4, pp. 1047-1053, 2015;

[25] , Lee J., Son E. , Hwang B. and Lee S., "Blade Pitch Angle Control for Aerodynamic Performance Optimization of a Wind Farm," *Renewable Energy*, Voi. 54, pp. 124-130, 2013;

[26] Meyers J., Meneveau C. "Optimal turbine spacing in fully developed wind farm boundary layers". *Wind Energy*, 2012, 15: 305-317;

[27] Ozbay A., Tian W., Yang Z., et al. "Interference of wind turbines with different yaw angles of the upstream wind turbine". *AIAA Paper*, 2012, AIAA-2012-2719;

[28] Tian W., Ozbay A., Yang Z., et al. "An experimental investigation on the wake interference of multiple wind turbines in atmospheric boundary layer winds". *AIAA Paper*, 2012, AIAA-2012-2784;

[29] Wu Y T, Porte-Agel F. "Simulation of turbulent flow inside and above wind farms: Model validation and layout effects". *Boundary-Layer Meteorology*, 2013, 146(2): 181-205;

[30] Wua S Y. Wanga S. Cheng, "Extreme learning machine based wind speed estimation and sensorless control for wind turbine power generation system", *Neurocomputing* 102 (2013) 163-175;

[31] Xie K. Wang K "Measurement of wind speed and direction with ultrasonic sensor using "FPGA. *Energy Procedia* 12:837-843, (2011);

[32] Yuan W., Ozbay A, Tian W, et al. "An experimental investigation on the effects of turbine rotation directions on the wake interference of wind turbines". *AIAA Paper*, 2013, AIAA-2013-0607;

[33] Zhang W, Markfort C D, Porte-Agel F. "Near-wake flow structure downwind of a wind turbine in a turbulent boundary layer". *Exp Fluids*, 2012, 52: 1219-1235;

[34] Quaschnig V.- "Understanding Renewable Energy Systems", ISBN 1-84407-128-6 London Carl Hanser Verlag GmbH & Co KG, 2011.