

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

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

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

¹Universitatea Politehnica TIMIȘOARA, Romania

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

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

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.

1. INTRODUCERE

În literatura de specialitate [1÷35] problemele ce vizează energia eoliană sunt abordate sub diferite aspecte: economic, tehnic, impactul asupra mediului, etc. Din punct de vedere tehnic, în mai toate lucrările, se analizează funcționarea TV la viteze ale vântului constante în timp, folosind diverse modele matematice, pentru turbina de vânt și generator, modele date de firma constructoare [11], și valabile numai în anumite condiții. Modelele matematice sunt deosebit de utile în asigurarea unei funcționări optime din punct de vedere energetic a SEE [1,3,5,7,9].

În general aceste modele matematice au o valabilitate restrânsă, fiind deduse în anumite condiții meteo. Reactualizarea în timp a acestor modele matematice se impune datorită faptului că, în timp, condițiile meteo se modifică: densitatea aerului, temperatura, etc. Recalculul acestor MM-TV trebuie făcut în timpul funcționării, pe baza datelor experimentale și fără a perturba funcționarea în condiții optime a SEE, asigurând captarea maximală a energiei eoliene [2,4,6,8]. 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 SEE fiind mare nu permite ca turația de la generator să fie la valorile optime din punct de vedere energetic [5,22,33].

În prezenta lucrare prin măsurarea vitezei vântului, se propune o metodă de mărirea eficienței energetice la un SEE prin modificarea sarcinii la GSMP, după evoluția în timp a vitezei vântului.

Pentru a ajunge, în timp util, la egalitatea VUM, figura 1:

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

Trebuie modificată sarcina 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.

La două valori ale vitezei vântului: $V_1 > V_2$, figura 1, punctul de funcționare se deplasează din **MPP1** în **MPP2**, dacă viteza vântului scade și la creșterea vitezei vântului din **MPP2** în **MPP1**.

Deoarece VUM ω_{OPTIM} are o valoare dependentă de viteza vântului: V , este necesar ca valoarea lui ω să se modifice în strânsă corelare cu V . Datorită inerției mecanice mari modificarea lui ω se face lent și, deci, $\omega \neq \omega_{OPTIM}$ în cea mai mare parte din timp.

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

De valoarea VUM curente, ω , depinde valoarea energiei eoliene captate.

În punctele A și B, figura 1, la VUM ω valorile puterii TV, P_{TV-1} și P_{TV-2} sunt mai mici decât valorile maxime din **MPP1** și **MPP2**, la ambele viteze ale vântului. Numai la $\omega_{OPTIM-1}$ și $\omega_{OPTIM-2}$ puterea TV este maximă.

$$P_{TV}(\omega, 6,5) = 3388(6,5 / \omega - 2,9164 \times 10^{-2}) e^{-67,461(6,5/\omega)} 6,5^3$$

$$P_{TV}(\omega, 5) = 3388(6 / \omega - 2,9164 \times 10^{-2}) e^{-67,461(6/\omega)} 6^3$$

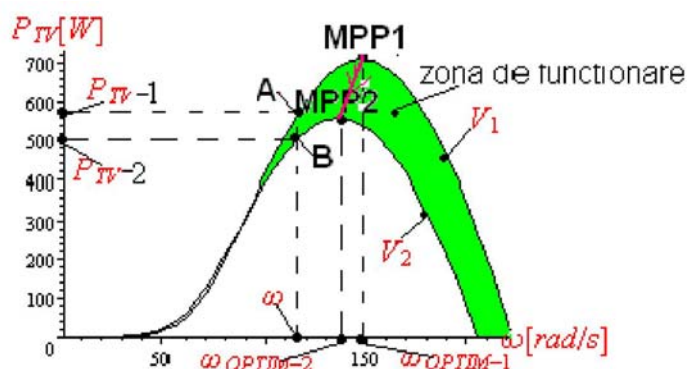


Fig.1. Caracteristicile puterilor la o TV la V_1 și V_2

Valoarea energiei eoliene captate se regăsește în suma dintre variația energiei cinetice și energia electrică debitată.

Simulările au la bază ecuația mișcării, sau a momentului cinetic:

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

sau, prin înmulțire cu ω se obține:

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

unde: J – momentul de inerție echivalent; M_{TV} – momentul la TV; M_{GSMP} – momentul la GSMP; P_{TV} – puterea utilă la TV; P_{GSMP} – puterea la arborele GSMP.

Prin integrare se obține:

$$J(\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / 2 = \int_{t_{k-1}}^{t_k} P_{TV} \cdot dt - \int_{t_{k-1}}^{t_k} P_{GSMP} \cdot dt = \text{Energ}_{TV} - \text{Energ}_{GSMP},$$

de unde rezultă energia eoliană captată de TV, pe intervalul de timp Δt :

$$\text{Energ}_{TV} = J(\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / 2 + \text{Energ}_{GSMP},$$

unde: ω_k – VUM la momentul t_k , ω_{k-1} – VUM la momentul t_{k-1} , $\Delta t = t_k - t_{k-1}$, Energ_{GSMP} – energia debitată de GSMP pe intervalul de timp Δt .

La o funcționare în punctul de putere maximă energia eoliană captată de TV, pe intervalul de timp Δt , depinde de cubul vitezei vântului.

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

Sarcina la GSMP se modifică în timp având în vedere variația lui V în timp și valoarea momentului de inerție echivalent, J .

La valori mici ale momentului de inerție, J , deci la puteri mici ale TV se poate aduce VUM în zona optimă, la ω_{OPTIM} . Desigur, în condițiile în care viteza vântului variază semnificativ în timp, valorile momentului de inerție trebuie corelate cu variația în timp a vitezei vântului.

2. MODELULUI MATEMATIC AL TV, (MM-TV)

Se are în vedere o formă clasică, [14], pentru MM-TV de forma:

$$P_{TV}(\omega, V) = (aV/\omega - b)e^{-c(V/\omega)}V^3$$

Valoarea maximă a funcției $P_{TV}(\omega)$ se obține pentru VUM optimă, ω_{OPTIM} , figura 1, prin anularea derivatei puterii:

$$\frac{dP_{TV}}{d\omega} = \frac{d}{d\omega} (a(V/\omega - b)e^{-c(V/\omega)}V^3) = 0,$$

obținându-se:

$$\omega_{OPTIM} = \frac{c}{bc+1} \cdot V$$

sau

$$\omega_{OPTIM} = k_0 \cdot V$$

unde k_0 – constanta constructivă a turbinei.

Puterea TV, $P_{TV}(\omega)$, este nulă la VUM ω_{MAX} și se obține:

$$V/\omega - b = 0,$$

de unde rezultă:

$$\omega_{MAXIM} = \frac{V}{b}$$

Făcând raportul $\omega_{OPTIM}/\omega_{MAX}$ se obține:

$$\frac{\omega_{OPTIM}}{\omega_{MAXIM}} = \frac{bc}{1+bc}.$$

Cu cât VUM curentă, ω , este mai mare decât ω_{OPTIM} cu atât stabilitatea în funcționare este mai mare și SEE nu-și pierde stabilitatea în funcționare, chiar dacă valoarea vitezei vântului scade în timp. În aceste situații energia eoliană captată se reduce cu mărirea lui ω .

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

Caracteristicile puterilor la o TV la două viteze ale vântului, V_1 și V_2 , sunt date în figura 1.

Determinarea puterii TV se face pe baza datelor experimentale din zona Dobrogea, [1,2] din anul 2015.

Energia electrică debitată în rețea și VUM, ω , s-au măsurat la intervale de timp Δt de 10 minute.

Folosind bilanțul energetic la SEE de forma:

$$P_{TV\text{-mediu}} = J \frac{\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2}{2 \cdot \Delta t} + P_{GSMP\text{-mediu}},$$

la $\Delta t=600$ [s] și la momentul de inerție J de valoare:

$$J=36734 \text{ [kgm}^2\text{]}$$

se obține valoarea puterii TV:

$$P_{TV\text{-mediu}} = 36734 \frac{\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2}{1200} + P_{GSMP\text{-mediu}} = 30,612 \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) + P_{GSMP\text{-mediu}}.$$

Pe intervalul de timp Δt viteza vântului s-a modificat de valoarea V_{k-1} la momentul t_{k-1} , la valoarea V_k la momentul t_k .

Determinarea MM-TV se face pe baza datelor experimentale din zona Dobrogea, locația MinAna-zona Dobrogea, [1,2] și are forma:

$$P_{TV}(\omega, V) = 1,0589 \times 10^6 (V / \omega - 2,6228 \times 10^{-2}) e^{-48,525(V/\omega)} V^3.$$

Dependența vitezei unghiulare mecanice optime, ω_{OPTIM} , de viteza vântului se obține din

$$\omega_{OPTIM} = k_0 \cdot V = 21,351 \cdot V$$

Valoarea maximă a puterii se obține la ω_{OPTIM} , de viteza vântului se obține din:

$$P_{TV}(\omega, V) = 1,0589 \times 10^6 (1/21,351 - 2,6228 \times 10^{-2}) e^{-48,525(1/21,351)} V^3 = 2248,3V^3$$

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.

3. MODELUL MATEMATIC AL GSMP, (MM-GSMP)

Pentru a analiza funcționarea sistemului (TV+GSMP), la viteze ale vântului variabile în timp, se folosește modelul matematic ortogonal pentru generatorul sincron cu magneți permanenți, (GSMP), dat în continuare prin ecuațiile [1,2].

$$\begin{cases} -U\sqrt{3} \sin \theta = R_d I_d - \omega L_q I_q \\ U\sqrt{3} \cos \theta = R_q I_q + \omega L_d I_d + \omega \Psi_{MP} \\ M_{GSMP} = p_1 ((L_d - L_q) I_d I_q + I_q \Psi_{MP}) \\ P_G = R(I_d^2 + I_q^2) \end{cases}$$

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

unde: U – tensiunea statorică; I_d , I_q – curenții statorici; M_{GSMP} – cuplul electromagnetic; θ - unghiul de sarcină; R_1 – rezistența înfășurării statorice; L_d – inductanța proprie a înfășurării statorice din axa d; L_q – inductanța proprie a înfășurării statorice din axa q; p_1 – numărul perechilor de poli; Ψ_{MP} – fluxul magnetului permanent.

Prin măsurarea puterii electrice debitate în rețea și a VUM, ω , se determină parametrii modelului ortogonal pentru GSMP.

STUDIUL DE CAZ 1-determinarea MM-GSMP

Puterea electrică debitată în rețea și VUM, ω , s-au măsurat la intervale de timp, Δt , de 10 minute.

Se folosesc datele experimentale

$$U=400[\text{V}],$$

$$I=618[\text{A}],$$

$$P=736560[\text{W}],$$

$$n=1430[\text{rot/minut}],$$

$$\omega=2\pi n/60=2\pi \cdot 1430/60=149, \text{ extrase din locația MinAna-zona Dobrogea [1,2]}$$

La neglijarea rezistenței înfășurării statorice se obține MM-TV simplificat:

$$\begin{cases} U\sqrt{3} \sin \theta = \omega L_q I_q \\ U\sqrt{3} \cos \theta = \omega L_d I_d + \omega \Psi_{MP} \\ M_{GSMP} = p_1 ((L_d - L_q) I_d I_q + I_q \Psi_{MP}) \\ P_G = R(I_d^2 + I_q^2) \end{cases}$$

cu parametrii: L_d – inductanța proprie a înfășurării statorice din axa d; L_q – inductanța proprie a înfășurării statorice din axa q, Ψ_{MP} – fluxul magnetului permanent.

Fluxul magnetului permanent, Ψ_{MP} , se determină printr-o probă la funcționarea în gol cu tensiunea pe faza: U_0

$$\sqrt{3}U_0 = \omega \Psi_{MP}$$

și rezultă

$$\Psi_{MP} = \sqrt{3}U_0 / \omega,$$

unde: $\omega = 2\pi n$,

n -turația la arbore.

La funcționarea în sarcină, la curentul I_N și după eliminarea lui θ se obține

$$\begin{cases} 3U^2 = (\omega L_q I_q)^2 + (\omega L_d I_d + \omega L_d I_d + \omega \Psi_{MP})^2 \\ I_N^2 = I_d^2 + I_q^2 \\ p_1 ((L_d - L_q) I_d I_q + I_q \Psi_{MP}) \cdot \omega = P_M \end{cases}$$

Aproximând $L_d=L_q=L_s$ se obține un sistem de 3 ecuații de forma:

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

$$\begin{cases} 3U^2 = (\omega L_s I_q)^2 + (\omega L_s I_d + \omega \Psi_{MP})^2 \\ I_N^2 = I_d^2 + I_q^2 \\ p_1 I_q \Psi_{MP} \cdot \omega = P_M \end{cases}$$

cu necunoscutele: L_s, I_q, I_d :

$$L_s = \frac{1}{\omega^2 I_N^2} \left(\omega^2 \Psi_{MP} \sqrt{I_N^2 - \frac{1}{\omega^2 p_1^2} \frac{P_M^2}{\Psi_{MP}^2}} + \sqrt{3U^2 \omega^2 I_N^2 - \omega^4 I_N^2 \Psi_{MP}^2 + \omega^4 \Psi_{MP}^2 \left(I_N^2 - \frac{1}{\omega^2 p_1^2} \frac{P_M^2}{\Psi_{MP}^2} \right)} \right),$$

$$I_d = \sqrt{I_N^2 - \frac{1}{\omega^2 p_1^2} \frac{P_M^2}{\Psi_{MP}^2}}, \quad I_q = \frac{1}{\omega p_1} \frac{P_M}{\Psi_{MP}}$$

Cu datele experimentale

$U=400V, I=618A, P=736560W, n=1430 \text{ rot/min}, \omega=2\pi n/60=2\pi 1430/60=149$

$\Psi_{MP}=130 \text{ Wb}, V=6.39 \text{ m/s}, p_1=2,$

se obține:

$$L_s = \frac{1}{\omega^2 I_N^2} \left(\omega^2 \Psi_{MP} \sqrt{I_N^2 - \frac{1}{\omega^2 p_1^2} \frac{P_M^2}{\Psi_{MP}^2}} + \sqrt{3U^2 \omega^2 I_N^2 - \omega^4 I_N^2 \Psi_{MP}^2 + \omega^4 \Psi_{MP}^2 \left(I_N^2 - \frac{1}{\omega^2 p_1^2} \frac{P_M^2}{\Psi_{MP}^2} \right)} \right) =$$

$$= \frac{1}{149,67^2 618^2} \left(149,67^2 130 \sqrt{618^2 - \frac{1}{149,67^2 2^2} \frac{736560^2}{130^2}} + \sqrt{3 \cdot 400^2 149,67^2 618^2 - 149,67^4 618^2 130^2 + 149,67^4 \cdot 130^2 \left(618^2 - \frac{1}{149,67^2 2^2} \frac{736560^2}{130^2} \right)} \right)$$

Valoarea obținută este foarte apropiată celei reale.

Caracteristica puterii: $P_{GSMP}(\omega)$

La o sarcină la borne dată, R , cu

$$U=RI$$

Din sistemul simplificat de ecuații ale GSMP:

$$\begin{cases} RI_d = \omega \cdot L_s I_q \\ -RI_q = \omega \cdot L_s I_d + \omega \Psi_M, \\ P_M = \omega \cdot \Psi_{MP} \cdot I_q \end{cases}$$

se obține puterea mecanică P_M sub forma:

$$P_M = P_{GSMP} = R \Psi_{MP}^2 \frac{\omega^2}{R^2 + L_s^2 \omega^2}$$

La $\Psi_{MP}=130Wb$ și $L_s=0,21408 \text{ H}$ se obține

$$P_{GSMP} = R 130^2 \frac{\omega^2}{R^2 + 0,21408^2 \omega^2} = 16900R \frac{\omega^2}{R^2 + 0,04583 \omega^2}$$

Puterea la GSMP depinde de:

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

- valoarea VUM și de
- valoarea rezistenței de sarcină.

4. DETERMINAREA EFICIENȚEI ENERGETICE LA FERMELE EOLIENE DE MARE PUTERE din datele experimentale din zona Dobrogea

Determinarea puterii TV se face pe baza datelor experimentale din zona Dobrogea [1,2] din anul 2015.

Energia electrică debitată în rețea și VUM, ω , s-au măsurat la intervale de timp, Δt , de 10 min.:

$$\Delta t = 600 \text{ [s]}$$

Folosind bilanțul energetic la SEE, de forma:

$$P_{TV\text{-mediu}} = J \frac{\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2}{2 \cdot \Delta t} + P_{GSMP\text{-mediu}}$$

se obține puterea medie a TV din:

$$P_{TV\text{-mediu}} = 30,612 \cdot 0,10467^2 (n_k^2 - n_{k-1}^2) + P_{GSMP\text{-mediu}} = 0,33538 \cdot (n_k^2 - n_{k-1}^2) + P_{GSMP\text{-mediu}}$$

Din datele măsurate se dau în tabelul 1 puterile și turațiile la GSMP în funcție de valorile vitezei vântului.

Tabelul 1

Puterile și turațiile la GSMP în funcție de valorile vitezei vântului

P[kW]	n[rot/min]	V[m/s]						
736,56	1430,19	6,39	585,94	1332,8	5,62			
511,24	1268,38	5,58	595,85	1339,54	5,74			
497,53	1258,36	5,46	580,83	1326,56	5,64	183,59	920,26	4,63
471,46	1234,86	5,25	512,58	1273,22	5,56	170,89	900,51	4,86
410,86	1183,14	5,23	389,92	1163,19	5,06	167,89	894,94	4,82
481	1244,3	5,56	303,31	1081,81	4,72	190,55	931,6	4,84
500,7	1260,94	5,55	239,35	1006,47	4,44	177,35	911,01	4,75
488,99	1251,33	5,46	234,9	996,98	4,72	150,48	866,73	4,52
589,16	1328,1	6,14	203,51	954,13	4,33	126,71	821,09	4,05
663,91	1381,46	6,34	181,84	922,74	4,37	100,6	768,16	3,75
620,01	1351,04	6,01	189,63	935,5	4,4	369,09	1138,31	5,22
534,09	1286,88	5,75	194,38	942,87	4,5	509,95	1266,11	6,26
508,75	1267,34	5,45	193,51	940,5	4,46	560,92	1309,46	6,42
502,32	1261,59	5,46	214,13	970,2	4,56	615,93	1343,78	6,36
495,07	1254,99	5,85	224,94	985,62	4,73	783,01	1458,07	6,88
525,87	1277,99	6,46	204,1	956,65	4,56	720,98	1420,73	6,65
609,29	1340,74	6,59	155,58	880,11	4,23	612,16	1347,23	6,08
612,84	1343,15	6,34	103,35	778,15	3,78	623,4	1355,38	6,13

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

P[kW]	n[rot/min]	V[m/s]						
761,63	1441,23	6,75	48,01	705,02	3,11	681,02	1394,49	6,42
833,23	1486	6,75	42,32	705	2,98	677,25	1392,89	6,59
854,62	1498,7	6,58	45,52	701,45	3,03	605,47	1343,19	6,42
812,01	1472,76	6,9	24,26	658,5	2,7	757,44	1445,06	6,94
884,4	1512,44	7,14	24,2	656,28	2,85	861,09	1507,62	7,15
1095,76	1624,33	7,71	45,08	701,69	3,04	769,35	1453,73	6,81
1329,84	1706,04	8,02	65,26	710,14	3,45	788,66	1465,15	6,89
1617	1720,58	8,4	74,85	714,13	3,59	856,68	1505,75	6,72
2058,83	1720,67	9,32	72,17	716,04	3,48	807,77	1476,54	6,66
2225,44	1720,57	10,28	60,76	705	3,28	734,54	1431,89	6,58
1947,92	1720,29	9,08	37,25	684,57	2,99	743,73	1436,91	6,53
1753,81	1720,41	8,38	47,58	705,07	3,1	736,8	1433,27	6,55
1497,38	1714,5	7,35	39,31	681,15	3,11	739,43	1435,62	6,64
885,61	1502,44	6,12	54,21	704,99	3,24	672,45	1392,58	6,43

4.1. Determinarea puterii TV

Valoarea energiei eoliene depinde de valorile VUM, ω și ale vitezei vântului V .

În funcție de valorile VUM, ω , respectiv ale turației n și ale puterii electrice debitate, P_{GSMP} se calculează valorile puterii TV, la diferite momente de timp.

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

$$Energ_{TV} = J \frac{\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2}{2} + Energ_{GSMP} = 201,23(n_k^2 - n_{k-1}^2) + P_{GSMP-mediu} \cdot 600 [kJ]$$

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

unde: J – momentul de inerție echivalent; M_{TV} – momentul la TV; M_{GSMP} – momentul la GSMP; P_{TV} – puterea la TV, P_{GSMP} – puterea la GSMP.

Prin integrare se obține:

$$J \frac{\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2}{2} = \int_{t_{k-1}}^{t_k} P_{TV} \cdot dt - \int_{t_{k-1}}^{t_k} P_{GSMP} \cdot dt = Energ_{TV} - Energ_{GSMP},$$

sau prin împărțire cu Δt , valoarea intervalului de timp analizat, rezultă:

$$J \frac{\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2}{2 \cdot \Delta t} = \int_{t_{k-1}}^{t_k} P_{TV} \cdot dt - \int_{t_{k-1}}^{t_k} P_{GSMP} \cdot dt = \frac{Energ_{TV}}{\Delta t} - \frac{Energ_{GSMP}}{\Delta t},$$

de unde rezultă energia eoliană captată de TV, pe intervalul de timp $T = \Delta t$:

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

La această energie eoliană captată de TV se obține o putere medie de valoare:

$$P_{TV-mediu} = J \frac{\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2}{2 \cdot \Delta t} + P_{GSMP-mediu}.$$

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

Din datele experimentale se obțin tablele: puterile în funcție de valorile vitezei vântului, VUM

$P_{TV}[\text{kW}]$	$V[\text{m/s}]$	$V[\text{m/s}]$	$\omega[\text{rad/s}]$	$\omega[\text{rad/s}]$	$P_{TV\text{-mediu}}/V_{MEDIU}^3$
504	5,475	5,475	134,6	124,46	4,3725
549	5,455	5,455	136,12	130,51	4,66
421	5,435	5,435	124,46	132,35	5,14
501	5,455	5,455	132,35	134,6	5,1192
473	5,53	5,53	130,51	136,12	5,6331
533	5,53	5,53	134,87	134,87	5,45346
508	5,48	5,48	134,4	134,4	5,1451
396	5,5	5,5	126,24	126,24	3,9577
466	5,435	5,435	121	120,98	4,84
402	5,395	5,395	124	124,02	4,26
471	5,41	5,41	132,74	132,74	4,957
405	5,375	5,375	123,22	123,22	4,3434
429	5,425	5,425	125	125,04	4,476

Poziția punctelor de funcționare, în raport cu poziția MPP, depinde de următorii factori:

- 1). variația în timp a vitezei vântului, respectiv valoarea derivatei vitezei vântului;
- 2). valoarea momentului de inerție echivalent a SEE. care în acest caz este mare.

Evoluțiile în timp ale vitezei vântului, VUM și a eficienței energetice în timp sunt date în figura 2.

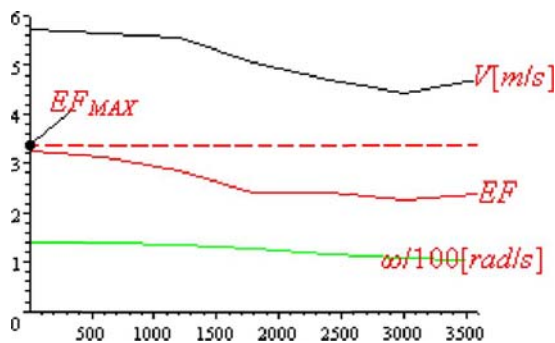


Fig.2. Evoluțiile în timp ale vitezei vântului, VUM și a eficienței energetice în timp

Precizarea 1

Se observă, din figura 2 cum influențează inerția mecanică evoluțiile în timp ale lui EF și ω , în sensul următor:

1) datorită inerției mecanice mari, în cele 2400[s], VUM s-a modificat foarte puțin, în jurul

valorii de 180[rad/s], deși viteza vântului s-a modificat de la 6.21 [m/s] la 4.8 [m/s]

2) deoarece VUM nu s-a modificat, datorită inerției mecanice mari, în aceeași proporție ca și viteza vântului eficiența energetică s-a micșorat la creșterea vitezei vântului

Precizarea 2

Valoarea VUM, ω , comparativ cu ω_{OPTIM} la momentul de timp t influențează semnificativ valoarea puterii TV. Datorită inerției mecanice mari VUM, ω , nu poate urmări variația rapidă, în timp, a vitezei vântului și, din acest motiv, eficiența energetică este scăzută, în anumite perioade de 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 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;
- [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)

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

- [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 March978-1 - 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, Brașov, 24-26 May;
- [8] Babescu M., Borza I., Gana O., Lăcătușu 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" ICCC-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 Compuțațional 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., Lăcătușu F.- "Sistem Eolian cu Stocare în Acumuloatoare 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 Aïmani 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) 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

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

- [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.