

Studiul aplicat al unei eoliene

Tematica: *Energii regenerabile*

→ **Capitol:** *Filiera eoliană*

→ **Secțiunea:** *Noțiuni generale*

Tip resursă: *Expunere* *Laborator virtual / Exercițiu* *CVR*

În acest curs ne propunem să prezentăm ecuațiile și cunoștințele necesare pentru studiul unui generator eolian, pentru a putea aborda exercițiile.

- cunoștințe anterioare necesare:
- nivel:
- durata estimată:
- autori: Diane Brizon, Nathalie Schild
- realizare: Diane Brizon, Nathalie Schild
- traducere: [Sergiu Ivanov](#)

1. Puterea unei eoliene

Eolienele pot fi clasificate în funcție de puterea lor:

	Diametrul palelor	Puterea nominală
Mică putere	< 12 m	< 40 kW
Medie putere	12 la 45 m	40kW la 1 MW
Mare putere	> 46 m	> 1 MW

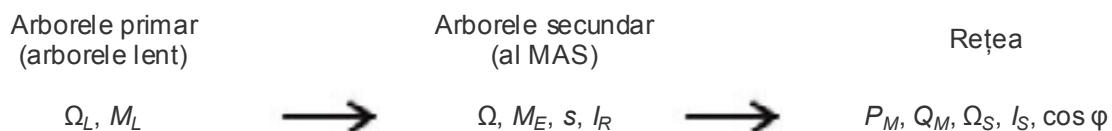
Ca ordin de mărime, 1 MW reprezintă necesarul de putere a aproximativ 900 de locuințe de 3 persoane, fără încălzirea electrică.

2. Prezentarea studiului

Se are în vedere studiul unei eoliene cu generator asincron (MAS), fiind mașina cea mai utilizată pentru astfel de aplicații.

În studiul eolienei, trebuie urmărite valorile cuplurilor M_L , M_E și a vitezelor arborelui primar Ω_L și a celui secundar Ω .

Arborele primar, numit și arborele lent, este arborele rotorului turbinei eoliene. Acesta se rotește cu viteza Ω_L și transmite cuplul M_L . Arborele secundar, numit și arborele rapid, este cel al generatorului. Acesta are viteza Ω , fiind caracterizat de cuplul electromagnetic M_E .



Pentru optimizarea puterii electrice debitate în rețea, se reglează viteza de rotație a eolienei Ω_L în funcție de viteza vântului. Punctul de funcționare se determină pe baza [caracteristicii eolienei](#) $P(\Omega)$, astfel încât puterea P_M să fie maximă.

Punctul de funcționare poate fi definit și prin puterile activă P_M , reactivă Q_M , tensiunea de fază V_S , factorul de putere $\cos \varphi$. P_M și Q_M vor depinde de viteza vântului.

3. Noțiuni despre aeromotor

Variația vitezei vântului v , în funcție de înălțimea h

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{h}{h_0} \right)^\alpha$$

V_0 - viteza [m/s] la nivelul solului ($h = 0$)
 α - coeficient caracteristic locației, $\alpha = 0,1 \div 0,4$

Coeficientul de putere (de performanță) C_p

Energia vântului este în fapt, energia cinetică recuperabilă a aerului, ce traversează suprafața S . Puterea asociată acestei energii cinetice este:

$$\left| P_{\text{vânt}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \right|$$

în care ρ este densitatea aerului.

Totuși, această putere nu poate fi recuperată în totalitate, deoarece o parte este necesară pentru evacuarea aerului care a efectuat lucru mecanic asupra palelor turbinei. Se introduce coeficientul de putere (de performanță) al turbinei C_p , rezultând puterea mecanică la arborele turbinei:

$$\left| P_{\text{turbină}} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \right|$$

în care

v - viteza vântului [m/s];

$\rho \approx 1,25 \text{ kg/m}^3$, densitatea aerului, în condiții normale de temperatură și presiune, la nivelul mării;

S : suprafața [m²] acoperită de palele turbinei.

Coeficientul C_p caracterizează randamentul turbinei eoliene. El poate fi exprimat și ca:

$$C_p = \frac{\text{Puterea mecanică turbină}}{\text{Putere disponibilă (recuperabilă)}}$$

Cuplul M_L produs de turbină

$$\left| M_L = \frac{P}{\Omega} = \frac{\frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot S \cdot v^3}{\Omega} \right|$$

Se definește coeficientul de cuplu C_T :

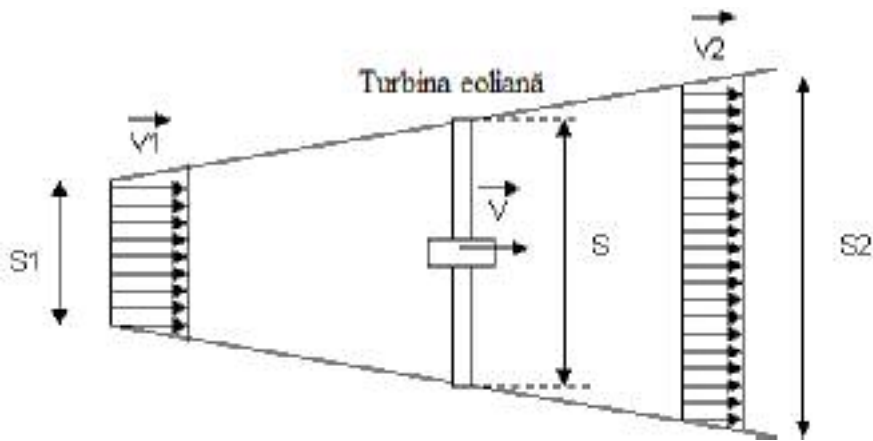
$$\boxed{C_T = \frac{C_p}{\lambda}}$$

vezi Exercițiul 6: Cuplul mecanic

Limita lui Betz

Coeficientul de putere a fost introdus în cadrul teoriei lui Betz. Limita lui Betz indică energia maximă ce poate fi recuperată, chiar și de cele mai performante eoliene - bipale sau tripale, cu ax orizontal. Aceasta nu poate fi decât 59% din energia vântului, ceea ce înseamnă că $C_{p \text{ max}}$ (teoretic) este 0,59. Pentru o eoliană reală, C_p este cel mult $0,3 \div 0,4$.

Teoria lui Betz modelează trecerea aerului prin palele turbine, printr-un tub de flux de aer cu vitezele:



V_1 - viteza vântului înainte de turbină;
 V - viteza vântului în dreptul palelor eolienei; este de ordinul a câțiva m/s (~ 10 m/s);
 V_2 - viteza vântului după preluarea energiei cinetice de către palele eolienei.
 Se consideră că vitezele sunt paralele cu axul turbinei eoliene, existând relațiile $V_1 > V > V_2$.

Observație: Se poate determina valoarea lui $C_{p\ max}$, printr-o analiză a puterilor, știind că:
 - pe de o parte, puterea recuperabilă de către o eoliană este o consecință a variației energiei cinetice a vântului:

$$P_{recup} = \frac{1}{2} \rho S V (V_1^2 - V_2^2)$$

- pe de altă parte, efortul care se exercită asupra eolienei, determină puterea P_{efort} . Cunoscând forța exercitată de vânt $F = \rho S V (V_1 - V_2)$, exprimând puterea în funcție de lucrul mecanic efectuat de forța vântului, rezultă:

$$P_{efort} = F \cdot V = \rho S V (V_1 - V_2) V = \rho S V^2 (V_1 - V_2)$$

P_{efort} corespunde puterii absorbite de rotorul turbinei, respectiv puterea mecanică furnizată de aeromotor.

vezi Exercițiul 4: Identificarea limitei lui Betz: Probleme de curs

Raportul de viteză λ

Se definește λ - raportul de avans, sau parametrul de rapiditate sau viteza specifică, sau raport de viteză la capătul palei (în engleză "tip-speed ratio") - ca fiind raportul dintre viteza tangențială a capătului palelor și viteza vântului:

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V}$$

în care

R - raza palelor [m];

Ω - viteza unghiulară a rotorului turbinei eoliene [rad-sec];

V - viteza vântului [m/s].

Pentru a avea o imagine asupra ordinului de mărime: dacă $\lambda < 3$, eoliana se consideră ca fiind lentă, dacă $\lambda > 3$, eoliana se consideră ca fiind rapidă.

Curba $C_p(\lambda)$, specifică fiecărei eoliene, permite clasificarea diferitelor tipuri de eoliene.

În afara eforturilor aerodinamice datorate vântului, trebuie să se mai țină seama de eforturile inerțiale și elastice datorate mișcării palelor: bătaie, flexiune, torsiune. Mai există, de asemenea, efecte ale vitezei vântului, ale scurgerii acestuia, ale gradientului de vânt. Toate aceste eforturi sunt exercitate asupra palelor și transmise apoi butucului și pilonului.

Parametrii ce caracterizează rotorul unei turbine eoliene sunt:

- randamentul aeromotorului;
- densitatea aerului [kg/m^3];
- numărul de pale;
- diametrul palelor [m];
- pasul elicei;
- suprafața acoperită [m^2];
- înclinarea palelor;
- înălțimea pilonului [m];
- viteza nominală a vântului [m/s];
- turația nominală a rotorului [rot/min].

Bilanțul de puteri:

$$\eta_{\text{aero-motr}} = \eta_{\text{turbina}}$$

$$P_{\text{max mecanică furnizată aero-motorului}} \Rightarrow P_{\text{electrică}}$$

Vezi:

Exercițiul 1: Lungimea unei pale

Exercițiul 5: Parametrii unei eoliene de 300 kW cu viteză fixă

4. Multiplicatorul

Multiplicatorul de viteză este caracterizat de raportul de transmisie și de randamentul său.

Calculul raportului de transmisie k

$$\Omega_{\text{MAS}} = \Omega_L \cdot k$$

Ω_{MAS} - viteza arborelui generatorului (asincron MAS)

Calculul randamentului η_m

$$P_{\text{MAS}} = P_{\text{meca}} \cdot \eta_m$$

P_{MAS} - puterea mecanică la arborele generatorului (asincron MAS)

P_{meca} - puterea mecanică furnizată de turbina eoliană

Vezi: Exercițiul 2: Viteza de rotație și puterea electrică a unei eoliene

5. Cunoștințe necesare despre MAS

Bilanțul de puteri:

$$\begin{array}{ccc} & \text{MAS} & \\ P_{meca} & \longrightarrow & P_{elec} (P_S) \end{array}$$

$$P_S = P_{meca} - \sum \text{pierderi}$$

Puterea mecanică P_{meca} este furnizată de mașina primară, care aici este turbina eoliană, prin intermediul multiplicatorului. Puterea este transformată apoi în energie electrică.

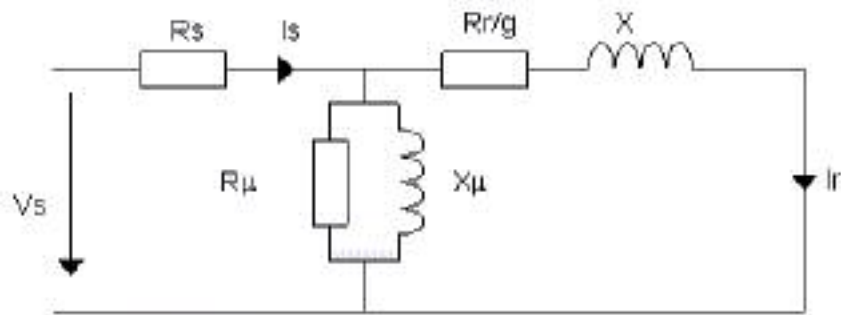
Parametrii ce caracterizează generatorul asincron (MAS) sunt:

- numărul de poli (de perechi de poli);
- puterea nominală [kW]
- turația nominală [rot/min];
- randamentul nominal;
- factorul de putere nominal $\cos \varphi_N$;
- cuplul electromagnetic [Nm];
- curentul statoric [A];
- tensiunea rotorică [V], doar dacă MAS este o MADA;
- frecvența nominală [Hz];
- tensiunea nominală (de linie a statorului) [V];
- tipul de cuplare;

Noțiuni despre MAS

În cadrul unei eoliene, MAS funcționează ca generator. Este necesar să se cunoască:

- noțiunea de viteză de sincronism;
- expresia alunecării s ;
- pierderile la funcționare în regim de motor;
- expresia cuplului electromagnetic;
- bilanțul de puteri;
- ipoteza lui Kapp;
- elementele schemei echivalente și modul de determinare a lor prin proba în gol, proba cu rotorul cald, proba în c.c.;
- calculul puterilor active și reactive schimbate cu rețeaua;
- noțiuni de saturare a circuitului magnetic.



I_s : curent statoric
 R_s : rezistență statorică
 V_s : tensiune statorică de fază
 R_μ : rezistență de magnetizare
 X_μ : reactanță de magnetizare
 $R_{r/g}$: rezistența rotorului raportată la stator
 X : reactanță a rotorului
 I_r : curent rotoric

Schema echivalentă monofazată a mașinii asincrone

Vezi: Exercițiul 3: Studiul generatorului asincron al unei eoliene

6. Cunoștințe necesare despre MS

Numărul de perechi de poli, p , determină turația mașinii:

$$n \text{ [rot/min]} = \frac{60 \cdot f}{p}$$

de exemplu:

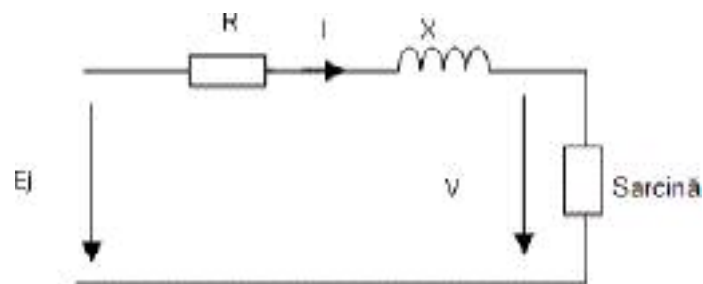
- pentru 50 Hz, 2 perechi de poli: 1500 rot/min
- pentru 60 Hz, 1 pereche de poli: 3600 rot/min

Gabaritul generatorului rezultă în funcție de turația necesară:

- mic pentru viteze mari (număr mic de perechi de poli),
- mare pentru viteze reduse (număr mare de perechi de poli).

Pentru mașina sincronă funcționând ca generator, trebuie să se cunoască:

- cuplare;
- expresia vitezei în funcție de numărul de perechi de poli;
- proba în gol și proba în scurtcircuit;
- să se determine parametrii schemei echivalente.



E_j : tensiune electromotoare
 R : rezistența înfășurării
 I : curentul absorbit de sarcină
 X : reactanța sincronă
 V : tensiunea de fază la bornele generatorului

Schema echivalentă monofazată a mașinii sincrone

7. Cunoștințe necesare despre inverter

Trebuie să se cunoască:

- să se calculeze pierderile în conducție;
- să se dimensioneze elementele semiconductorilor;
- să se calculeze pierderile totale;
- să se cunoască schema echivalentă termică (rezistențe termice, temperatura joncțiunii, alegerea radiatorului);
- să se calculeze conținutul de armonici.

Parametri ce caracterizează un inverter:

- curentul nominal;
- frecvența de comutație.

8. Caracteristicile rețelei

Parametri rețelei

- puterea de scurt-circuit P_{sc}

Tipuri de rețele

- rețea izolată (insulară): generatorul este controlat astfel încât să furnizeze o tensiune de valoare eficientă și frecvență constantă, pentru un anumit domeniu de variație a vitezei.

- rețea infinită (rețea puternică): aceasta impune valoarea eficientă a tensiunii V și frecvența f . În cazul generatoarelor conectate direct la rețea (eventual, prin intermediul unor transformatoare ridicatori), viteza câmpului învârtitor statoric este impusă de rețea. Când eoliana debitează energie în rețea, se consideră că impedanța acesteia este nulă. Înainte de cuplarea la rețea însă, trebuie realizate condițiile de punere în paralel (valori eficiente ale tensiunilor, frecvență, fază). În funcționare, se controlează puterile activă și reactivă schimbate cu rețeaua.

- rețea cu impedanță internă nenulă: X_L și R_L . Puterea de scurtcircuit P_{sc} este finită.

9. Bateria de condensatoare

Ce trebuie cunoscut:

- Dimensionarea compensării energiei reactive
- Expresia energiei reactive furnizată de un condensator

Parametrii:

- puterea reactivă furnizată [kVAR];
- tensiunea nominală [V].

Vezi: Exercițiul 3: Studiul generatorului asincron al unei eoliene

10. Filtrele

Filtrele se utilizează în cazul utilizării convertoarelor statice pentru conectarea eolienei la rețea, sau pentru reglarea acestora.

Ce trebuie cunoscut:

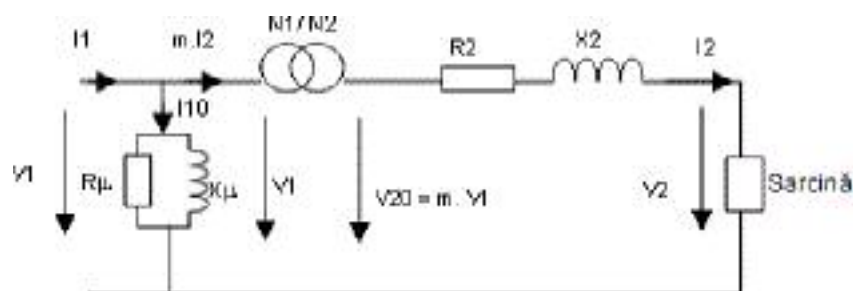
- noțiunea de amonici;
- noțiunea de factor de distorsiune;
- dimensionarea filtrelor (L , C).

11. Transformatoarele

Transformatoarele se utilizează pentru conectarea eolienei la rețea.

Ce trebuie cunoscut:

- proba în c.c., proba în gol, proba în scurtcircuit;
- schema echivalentă



- V_1 : tensiune de fază primar
- I_1 : curent primar
- I_{10} : curent de magnetizare
- R_μ : rezistența circuitului de magnetizare
- X_μ : reactanța circuitului de magnetizare
- I_2 : curent secundar
- N_1 : număr de spire primar
- N_2 : număr de spire secundar
- R_2 : rezistență echivalentă secundar
- X_2 : reactanță echivalentă secundar
- m : raport de transformare

Schema echivalentă monofazată a transformatorului

$$R_1 = r_1 + \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 r_2 = r_1 + \frac{r_2}{m^2},$$

cu:

$$X_1 = \left[r_1 + \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 r_2\right] \omega = \left[r_1 + \frac{r_2}{m^2}\right] \omega$$

r_1 : rezistența înfășurării primare

r_2 : rezistența înfășurării secundare

l_1 : inductanța de dispersie primară

l_2 : inductanța de dispersie secundară

ω : pulsația mărimilor electrice