

Studiul MADA

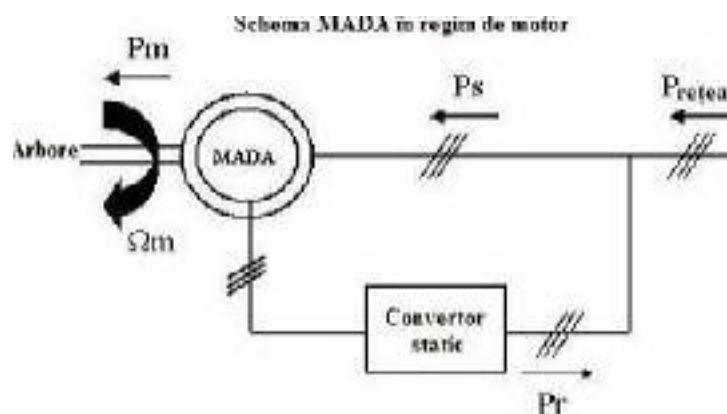
Tematica: *Energii regenerabile*

→ **Capitol:** *Filiera eoliană*

→ **Secțiunea:** *Mașina asincronă dublu alimentată (MADA)*

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

În această lecție va fi studiată mașina asincronă dublu alimentată (MADA).



Convenția de semne: funcționarea în regim de motor hiposincron

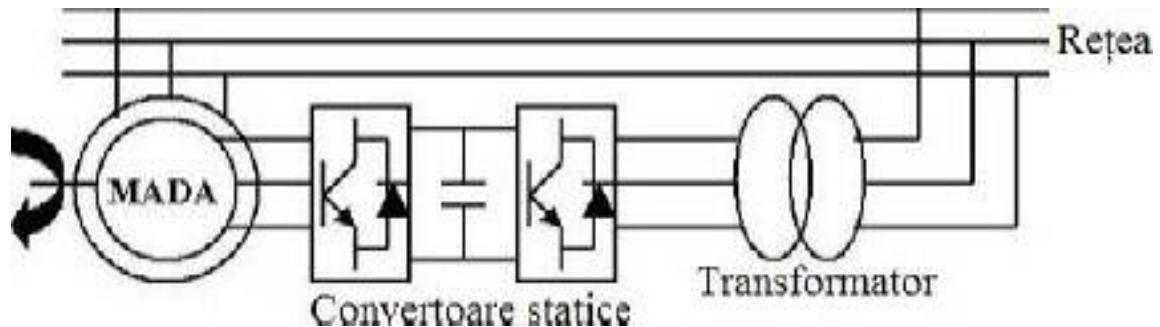
Expunerea se compune din:

- Structura unei eoliene ce integrează o MADA
- Interesul pentru MADA
- Principiul de funcționare
- Conectarea la rețea

- cunoștințe anterioare necesare: [mașina asincronă](#)
- nivel: #
- durata estimată: 40 minute
- autori: Nicolas Dujardin, Christian Iweins, Benoît Robyns
- realizare: Fabien Poje
- traducere: [Sergiu Ivanov](#)

Structura unei eoliene ce integrează o MADA

Elemente componente:



Generatorul este amplasat în nacela eolienei. El este antrenat de arborele secundar (rapid).

Mașina asincronă dublu alimentată este un generator asincron cu rotor bobinat. Înfășurarea statorică este conectată direct la rețeaua trifazată. Înfășurarea rotorică este conectată la convertoare statice bidirecționale: puterea ce tranzitează aceste convertoare poate fi produsă sau absorbită de mașină, în funcție de punctul de funcționare. Condensatorul dintre cele două convertoare formează circuitul intermediar de curent continuu. Transformatorul ridicător de tensiune asigură conectarea la rețeaua de distribuție la care este conectată eoliana.

Interesul pentru MADA

Cel mai mare avantaj al MADA îl constituie posibilitatea funcționării cu viteză variabilă.

Mașinile asincrone cu viteză fixă trebuie să funcționeze în apropierea vitezei de sincronism, deoarece frecvența este impusă de rețea. Viteza rotorului este cvasi-constantă. Sistemul cu MADA permite reglarea vitezei de rotație a rotorului generatorului, în funcție de viteza vântului. În consecință, MADA permite funcționarea atât în regim de generator hiposincron, cât și hipersincron. De asemenea, punctul de funcționare se poate regla astfel încât să se obțină maximul de putere debitată în rețea. Interesul pentru posibilitatea de funcționare cu viteză variabilă îl reprezintă posibilitatea funcționării într-o plajă largă a vitezei vântului și posibilitatea extragerii maximului de putere, indiferent de viteza vântului.

Rolul convertoarelor statice de putere:

Spre deosebire de majoritatea mașinilor sincrone, a căror convertoare statice asociate în stator sunt parcurse de 100% din puterea nominală, convertoare statice din componența eolienei cu MADA sunt dimensionate pentru a asigura doar circa 25% din puterea nominală. În consecință, sunt mai ieftine și au gabarit mai redus. Ele permit controlul MADA prin rotor, prin reglarea vitezei mecanice de rotație.

Funcționarea lor va fi studiată în paragraful ce tratează [conectarea la rețea](#).

Principiul de funcționare

O eoliană care utilizează o MADA, permite extragerea puterii maxime, pornind de la o anumită viteză a vântului, prin optimizarea vitezei specifice λ și prin minimizarea solicitărilor mecanice ale turbinei eoliene în timpul rafalelor de vânt. Viteza specifică λ este dată de raportul dintre viteza tangențială a extremității palelor și viteza vântului. Puterea mecanică recuperată de turbina eoliană este, în final, convertită în putere electrică debitată în rețea prin intermediul înfășurărilor statorice și rotorice.

Puterea mecanică P_m la intrarea MADA:

Expresia puterii mecanice a unei eoliene este :

$$P_m = 0.5 \rho \pi R^2 V^3 C_p(\lambda, \beta),$$

în care:

$\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ este densitatea aerului;

R = lungimea palelor sau raze turbinei [m];

V = viteza vântului [m/s];

$C_p(\lambda, \beta)$ = coeficientul de putere (de performanță);

λ = viteza specifică = $\Omega_m \cdot R/V$

Ω_m = viteza mecanică de rotație a turbinei [rad/s];

β = unghiul de orientare a palelor [grade].

Coeficientul C_p este adimensional. El depinde de eoliană. Expresia lui a fost dedusă, într-o manieră empirică, pentru o eoliană ce integrează o MADA:

$$C_p = \begin{cases} 0.5 \cdot \frac{116}{(\beta - 2)} \sin\left[\frac{\pi(1+11)}{13.5 - 0.1(\beta - 2)}\right] & 0.0184(\beta - 2) \end{cases}$$

Diferitele faze de funcționare ale unei eoliene cu viteză variabilă:

O eoliană ce utilizează o MADA, este caracterizată de patru faze de funcționare:

- Faza de pornire a mașinii. Producerea de energie electrică începe atunci când viteza mecanică atinge aproximativ 70% din viteza de sincronism a generatorului. Puterea electrică este însă mică

- Faza de extragere a puterii maxime, sau faza MPPT (Maximum Power Point Tracking). În această zonă, viteza mecanică variază și poate atinge valori apropiate de viteza nominală. Puterea electrică crește rapid.

În această zonă, unghiul de orientare a palelor β rămâne constant la valoarea minimă, pentru a putea obține valoarea maximă a coeficientului C_p . Se obține astfel puterea maximă, indiferent de valoarea vitezei mecanice, pentru viteze medii ale vântului (aproximativ 7-13 m/s).

- Faza vitezei mecanice cvasi-constante. Unghiul de orientare a palelor β se modifică pentru obținerea puterii electrice maxime, pentru diferite valori ale vitezei vântului. Este ceea ce se numește "pitch control". Puterea electrică crește foarte repede, până atinge valoarea nominală.

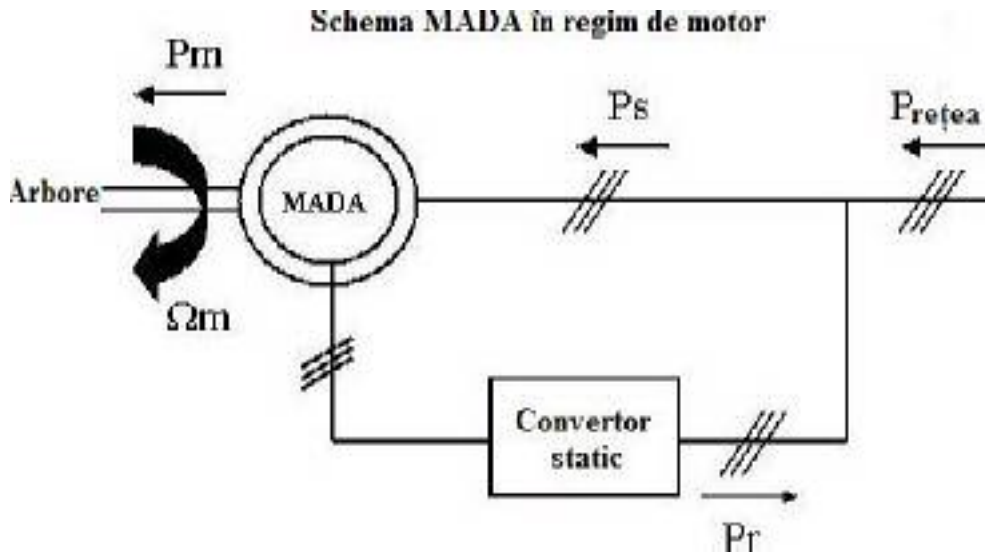
- Faza de putere constantă. În cazul în care viteza vântului crește în continuare, unghiul de orientare a palelor devine important, în scopul conservării puterii electrice constante, la valoarea nominală.

Din motive de siguranță, dacă viteza vântului devine prea mare și riscă să avarieze eoliana, unghiul de orientare a palelor este fixat la 90° . Este ceea ce se numește punerea în drapel, ce determină oprirea eolienei până când viteza vântului se reduce.

Transferurile de putere în MADA

Datorită convertoarelor statice de putere bidirecționale din circuitul rotor, MADA este capabilă să funcționeze atât ca generator, cât și ca motor, ambele regimuri putând fi obținute la viteze hiposincrone sau hipersincrone.

Se vor utiliza pentru MADA convențiile de semne pentru motor hiposincron, acestea fiind cele mai uzuale.



P_m : putere mecanică ($P_m < 0$ dacă mașina este antrenată)
 P_s : putere activă absorbită de stator ($P_s < 0$ dacă MADA este generator)
 P_r : putere activă debitată de rotor (sensul său depinde de semnul alunecării)
 $P_{rețea}$: putere activă furnizată mașinii din rețea ($P_{rețea} < 0$ dacă MADA este generator)
 Ω_m : viteza de rotație a MADA

Presupunând neglijabile pierderile din circuitele statorului și rotorului, între puteri există relațiile:

$$\begin{aligned}
 P_m &= P_{rețea} \\
 P_{rețea} &= P_s - P_r \\
 P_r &= s P_s \\
 P_s &= P_{rețea} / (1-s)
 \end{aligned}$$

În regim de generator hipersincron, P_r este pozitivă, puterea fiind transmisă din rotor către rețea.
 În regim de generator hiposincron, P_r este negativă, puterea fiind transmisă din rețea către rotor.
 În ambele cazuri, puterea statorică P_s este debitată în rețea.

Conectarea la rețea

În acest paragraf, se vor prezenta convertoarele statice prin intermediul cărora se conectează rotorul MADA la rețea. Înfășurările statorice sunt conectate direct la rețea.

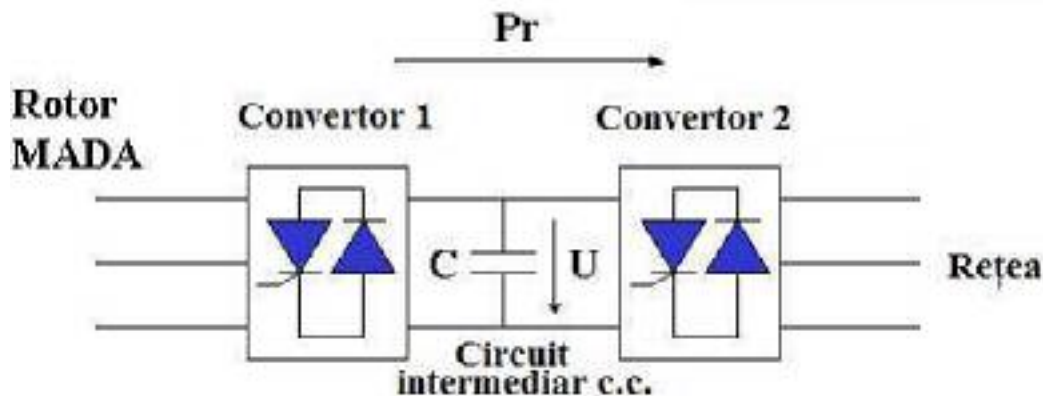
Convertorul static, este un CSTF (Convertor Static de Tensiune și Frecvență) indirect, fiind compus dintr-un redresor, un circuit intermediar de curent continuu și un invertor. El trebuie să fie bidirecțional (reversibil în curent), deoarece puterea rotorică P_r este transferată într-un sens la funcționarea hipersincronă și în celălalt sens la funcționarea hiposincronă. Aceasta înseamnă că invertorul devine redresor, iar redresorul, invertor, respectiv ambele convertoare trebuie să poată funcționa atât ca redresor, cât și ca invertor.

Știind că $P_r = s \cdot P_s$ și că, în general, valoarea absolută a alunecării s este mult mai mică decât 1, rezultă că P_r este doar o fracțiune din puterea statorică P_s . Semnul puterii rotorice P_r , depinde de cel al alunecării s .

Există două regimuri posibile de funcționare ale generatorului, în funcție de semnul alunecării s .

1 - Funcționarea în regim hipersincron:

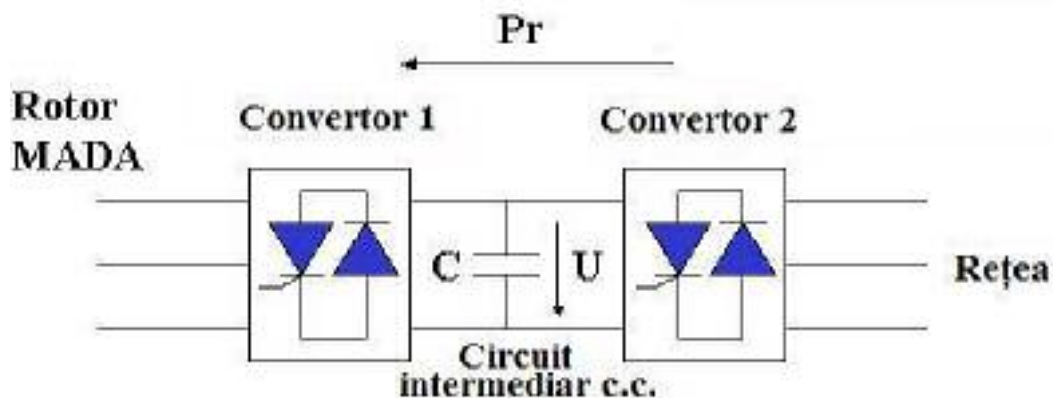
Mașina asincronă funcționează ca generator, având viteza de rotație superioară celei de sincronism. Rezultă că alunecarea $s < 0$, regimul de funcționare numindu-se hipersincron. Puterea rotorică este generată de MADA și transmisă în rețea prin intermediul CSTF.



- Convertorul 1 funcționează ca redresor, transformând energia de curent alternativ furnizată de rotorul MADA, în energie de curent continuu. Condensatorul C asigură circuitului intermediar caracterul de sursă de tensiune.
- Convertorul 2 funcționează ca invertor. Acesta recuperează energia de curent continuu și o transferă în rețea. Comanda acestuia asigură amplitudinea și frecvența tensiunii de ieșire, adaptate în funcție de rețea, transferând energia, prin intermediul unui transformator ridicător.
- Circuitul intermediar de curent continuu este indispensabil, pentru a permite invertorului reglarea amplitudinii și frecvenței. Ținând cont de inductivitatea rețelei, aceasta poate fi considerată o sursă de curent. Înfașurările rotorice sunt, de asemenea, surse de curent, fiind constituite din bobinaje. O bobină se consideră ca fiind o sursă de curent, deoarece curentul ce circulă printr-o bobină nu poate avea discontinuități. Similar, un condensator este considerat o sursă de tensiune, deoarece tensiunea la bornele sale nu poate avea discontinuități. Prin utilizarea unui circuit intermediar cu caracter de sursă de tensiune, se asigură alternanța surselor în cazul conversiilor multiple.

2 - Funcționarea în regim hiposincron:

Mașina asincronă funcționează ca generator, cu viteză mecanică, inferioară celei de sincronism. Alunecarea $s > 0$, regimul de funcționare numindu-se hiposincron. Rotorul MADA absoarbe energie. Aceasta este asigurată din rețea, prin intermediul CSTF, ce poate furniza până la 25% din puterea nominală a MADA.



- Convertorul 2 funcționează ca redresor, transformând energia de curent alternativ a rețelei, în curent continuu.
- Convertorul 1 funcționează ca invertor. Prin comanda acestuia, se reglează amplitudinea și frecvența energiei de curent alternativ transmisă rotorului MADA. În acest mod, se reglează viteza

motorului în funcție de cea a turbinei eoliene, realizându-se astfel un reglaj al puterii extrase sau transmise în rețea de către circuitul statoric.

Fluxul de putere:

- Dacă $\Omega_m > \Omega_s$, $s < 0$, regimul este hipersincron. Puterea rotorică este debitată. Ea este transmisă circuitului intermediar de c.c., determinând tendința de creștere a tensiunii la bornele condensatorului.
- Dacă $\Omega_m < \Omega_s$, $s > 0$, regimul este hiposincron. Puterea rotorică este absorbită. Ea provine din circuitul intermediar de c.c., determinând tendința de scădere a tensiunii la bornele condensatorului.
- Convertorul conectat la rețea furnizează energie în rețea sau absoarbe energie din rețea, astfel încât să mențină constantă tensiunea din circuitul intermediar.
- Convertorul conectat la rotorul MADA furnizează acestuia o tensiune alternativă, cu pulsația egală cu produsul dintre pulsația tensiunii statorice și valoarea absolută a alunecării s , respectiv, $\omega_r = |s| \cdot \omega_s$. Prin intermediul acestui convertor, se controlează cuplul electromagnetic al generatorului, deci viteza sa și puterea debitată în rețea.

Puterea reactivă:

Cele două convertoare au capacitatea de a transfera și energie reactivă. Prin comanda acestora, se poate regla nivelul energiei reactive transferate.

Puterea reactivă furnizată în rețea se poate controla prin intermediul puterii reactive generate sau absorbite de convertorul conectat la rotor. Puterea reactivă este transferată între acest convertor și rețea, prin intermediul generatorului. Acesta trebuie să absoarbă energie reactivă, ce este consumată de inductivitățile mutuale și de dispersie.

Convertorul conectat la rețea poate funcționa și în regim de compensator de energie reactivă.