

## Diferitele tehnologii

**Tematica:** *Energii regenerabile*

→ **Capitol:** *Filiera eoliană*

→ **Secțiunea:** *Noțiuni generale*

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

În acest curs se vor prezenta diferitele tehnologii utilizate în sistemele eoliene, respectiv cele care funcționează cu viteză fixă și cele care funcționează cu viteză variabilă. În final, se va trata conectarea eolienei la rețea.

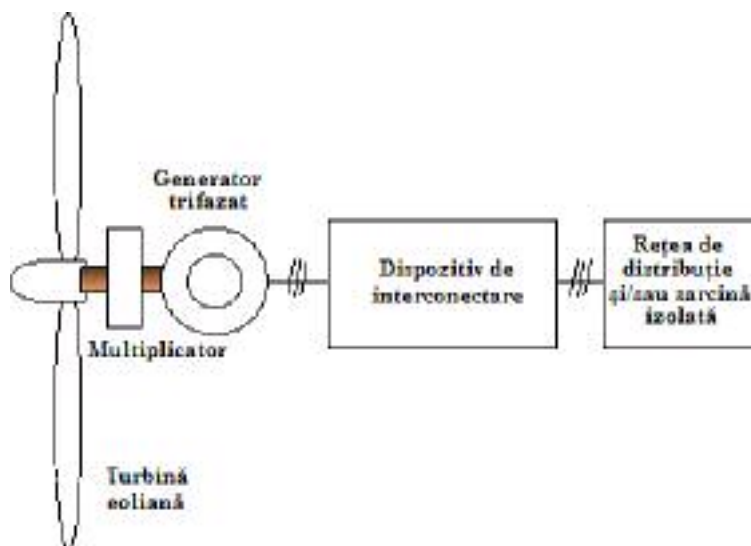
- cunoștințe anterioare necesare: noțiuni despre [mașinile sincrone](#) și [asincrone](#), noțiuni despre [convertoarele statice](#)
- nivel: fără restricții
- durata estimată: 1h
- autori: Diane Brizon, Nathalie Schild, Aymeric Anselm, Mehdi Nasser
- realizare: Diane Brizon, Nathalie Schild
- traducere: [Sergiu Ivanov](#)



Resursă realizată cu sprijin financiar din partea Comunității Europene. Documentul de față nu angajează decât responsabilitatea autorului(rilor) lui. Comisia își dedină orice responsabilitate ce ar putea decurge din utilizarea lui.

## Noțiuni generale

Elementele lanțului de conversie sunt de mai multe tipuri. Totuși, anumite elemente se regăsesc întotdeauna în lanțul de conversie, cum sunt: o turbină eoliană, un generator trifazat, un dispozitiv de interconectare, ce realizează conectarea generatorului la rețeaua de distribuție sau la o sarcină izolată.



*Structura generală a unui sistem de conversie a energiei eoliene*

Cu titlu informativ, mașinile cele mai utilizate pentru realizarea eolienele sunt cele asincrone cu rotorul în scurtcircuit (aproximativ 90% în 1997, 60% în 2001). Se observă că tendința de scădere a ponderii lor.

Generatoarele asincrone cu rotor bobinat s-au dezvoltat în ultimii ani (de la 3% în 1997, s-a ajuns la aproximativ 30% în 2001).

Mașinile sincrone cu rotor bobinat (cu excitație electrică) își sporesc, de asemenea, ponderea. Ele reprezentau puțin peste 5% în 2001.

### 1. Eoliene cu viteză fixă

În cazul mașinilor sincrone clasice și asincrone cu rotorul în scurtcircuit, viteza de rotație depinde direct și strict de frecvența curenților ce parcurg înfășurările statorice.

Mașina asincronă cu rotorul în scurtcircuit, având un număr fix de perechi de poli, poate funcționa într-un domeniu restrâns de viteze: alunecarea este de ordinul a câtorva procente.

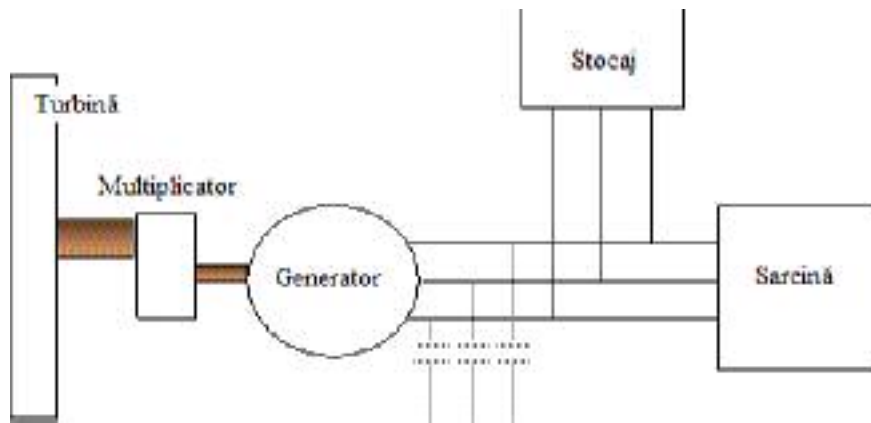
Mașina sincronă funcționează strict cu viteză fixă.

### Funcționarea în mod autonom

Eolienele neconectate la rețea funcționează în mod autonom, alimentând sarcini izolate, ce au eventual, unul sau mai multe grupuri electrogene în tampon. Pentru acest tip de configurație, utilizarea unui sistem de stocare prezintă un interes deosebit, mai ales în absența grupurilor electrogene, pentru situația când vântul este slab.

Utilizarea bateriilor de acumulare reprezintă o soluție pentru stocarea pe o durată mai mare. Există însă și alte sisteme de stocare, cum ar fi cel inerțial, pentru stocarea pe durate scurte. Acest tip de stocare evită utilizarea bateriilor de acumulare, care prezintă pentru mediu, un caracter poluant. Energia este stocată sub formă de energie cinetică a unui volant.

Generatorul poate fi o mașină sincronă cu magneți permanenți sau o mașină asincronă cu rotor în scurtcircuit, prevăzută neapărat cu condensatoare necesare asigurării energiei reactive, de magnetizare.



Schema generală a unei eoliene cu viteză fixă, în mod autonom

## Funcționarea în mod rețea

În cazul în care eoliana este conectată la rețea, viteza de rotație a mașinii asincrone trebuie să rămână practic constantă, apropiată de viteza de sincronism, pentru a asigura funcționarea stabilă a generatorului. Frecvența rețelei impune viteza de rotație a mașinii. Generatorul cu viteză fixă, conectat direct la rețea, trebuie neapărat prevăzut cu un multiplicator de viteză.

Eoliana funcționează la o anumită viteză de rotație, pentru un domeniu restrâns de viteze ale vântului. Din acest motiv, aplicațiile sunt limitate.

- Exemplu de montaj cu multiplicator și **mașină asincronă cu rotor în scurtcircuit conectată direct la rețea.**

## Mașină asincronă cu rotor în scurtcircuit conectată direct la rețea + multiplicator.

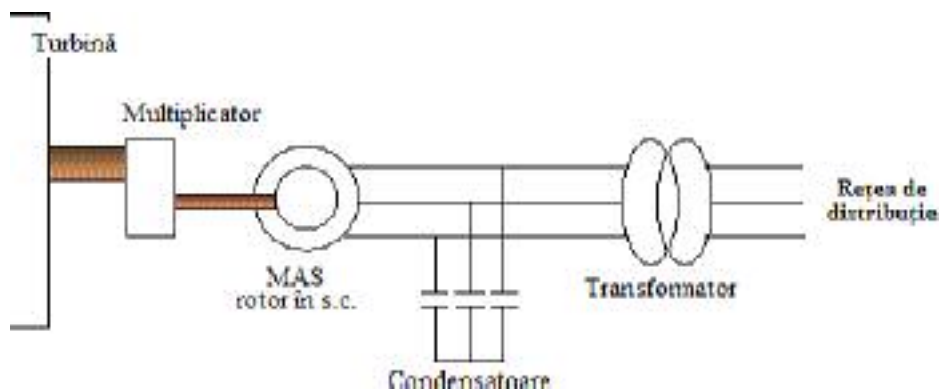
Exemplu: eoliene aflate în funcțiune în Danemarca

Pentru conectarea unei eoliene cu o astfel de structură la rețea, presupune două etape:

O primă etapă constă în conectarea înfășurării statorice la rețea cu rezistențe înseriate, pentru a se reduce curenții statorici tranzitorii. Pe durata acestei etape, palele turbinei sunt orientate astfel încât cuplul dezvoltat să fie nul.

După câteva secunde, rezistențele din circuitul statoric sunt scurtcircuitate (eliminate), apoi sistemul de reglare comandă orientarea palelor în scopul creșterii puterii.

Regimul tranzitoriu la conectare determină apariția unor curenți importanți, ce sunt limitați de către rezistențe. Rezistențele pot fi înlocuite cu variatoare de tensiune alternativă (VTA), prin modificarea unghiului de comandă, reglându-se tensiunea de alimentare, astfel încât curentul să nu se atingă valori periculoase pe durata etapei de conectare.



Schema de conectare directă la rețea a unei eoliene cu mașină asincronă cu rotor în scurtcircuit

- Exemplu de montaj cu **mașină asincronă cu stator dublu**

## Mașină asincronă cu stator dublu

Această configurație oferă posibilitatea funcționării eolienei cu două viteze.

Satorul este realizat din două bobinaje, care determină un număr variabil de poli și deci domenii diferite de viteză. Se pot impune 2 viteze de sincronism, prin schimbarea numărului de perechi de poli. Pe de o parte, pe stator există un bobinaj de mică putere, dar care creează un număr mare de poli, care este utilizat la viteze mici ale vântului.

Puterea debitată în rețea este

$$P_r = \Gamma \Omega_s,$$

în care:

$P_r$  este puterea transmisă de generator în rețea;

$\Gamma$  este cuplul electromagnetic;

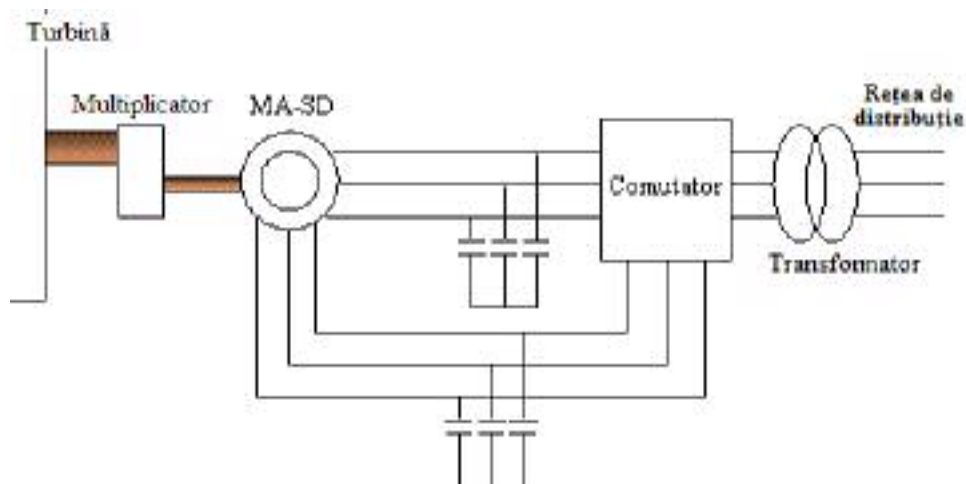
$\Omega_s$  este viteza de sincronism

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p}$$

cu  $\omega$  pulsația rețelei, iar  $p$  numărul de perechi de poli.

La viteze reduse ale vântului, puterea recuperată de eoliană este mică. De asemenea, datorită numărului mare de poli, și viteza de sincronism este mică, așa cum evidențiază relația de mai sus.

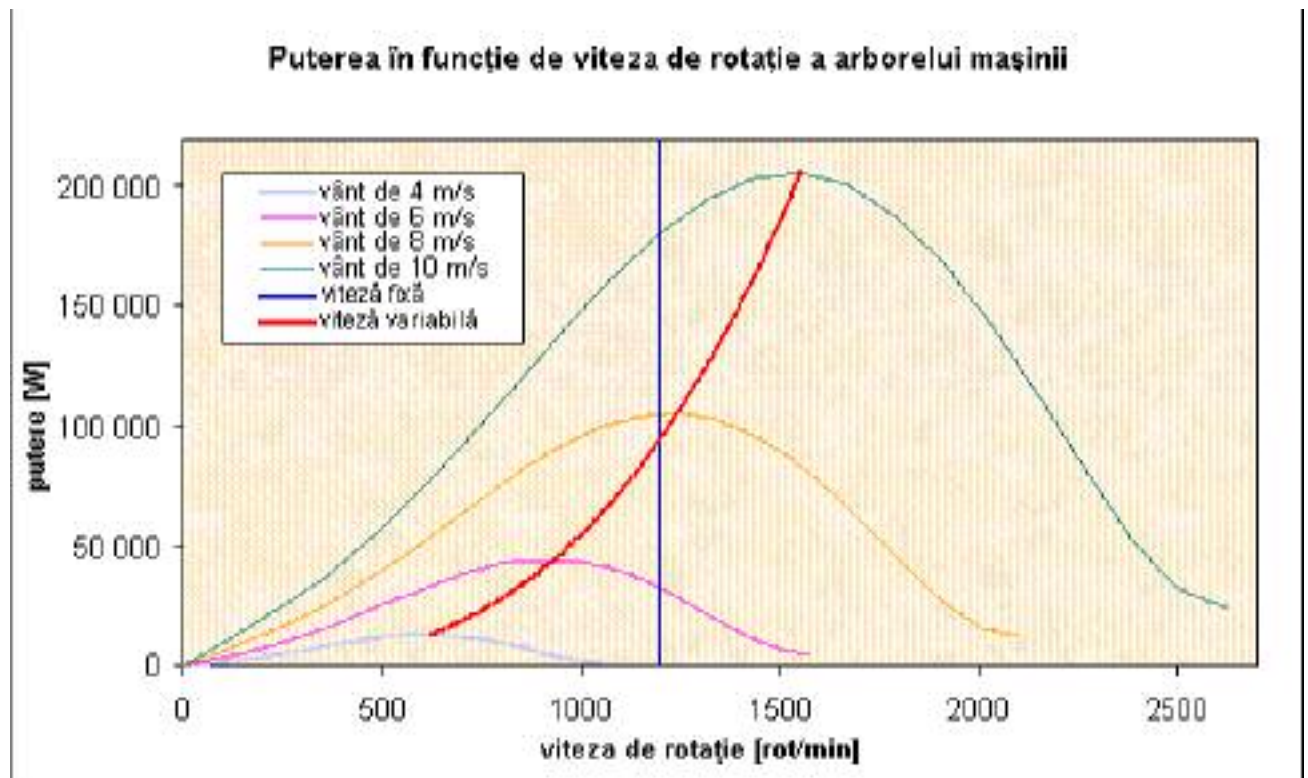
Pe de altă parte, statorul mai este dotat cu o înfășurare de putere mai mare, dar cu număr mai mic de poli, care este utilizată atunci când viteza vântului este suficient de mare. La viteze mari ale vântului, puterea recuperată, ca și viteza turbinei sunt mai mari.



Schema de conectare la rețea a unei eoliene cu mașină asincronă cu stator dublu

## 2. Eoliene cu viteză variabilă

Pentru optimizarea puterii debitate în rețea, în funcție de viteza vântului, este de dorit ca să se poată regla viteza de rotație a eolienei. Ideea de bază este de a realiza un generator cu frecvență fixă, dar cu viteză variabilă. Generatorul cu viteză variabilă ar permite funcționarea pentru o gamă mult mai largă a vitezei vântului, deci recuperarea unei cantități mai mari din energia vântului, reducând în același timp zgomotul pe durata intervalelor cu vânt slab. În cazul eolienei cu viteză variabilă, sistemul este reglat astfel încât, pentru fiecare viteză a vântului, eoliana să funcționeze la puterea maximă. Este ceea ce se numește **Maximum Power Point Tracking (MPPT)**. Pentru o anumită viteză de rotație a eolienei, puterea maximă se obține în concordanță cu caracteristica eolienei  $P(\Omega)$ .



Viteza de rotație se poate modifica în limite largi (într-un domeniu de până la 3), prin modificarea frecvenței de alimentare a mașinii.

**Sistemele eoliene cu viteză variabilă** ce funcționează conectate la rețea, utilizează **convertoare statice de tensiune și frecvență (CSTF)**.

#### Convertoare statice de tensiune și frecvență (CSTF)

Prin modificarea vitezei, frecvența și amplitudinea tensiunii la ieșirea generatorului sunt variabile. Pentru conectarea la rețea, energia electrică trebuie transformată și adusă la parametri constanți ai rețelei. În acest scop se utilizează convertoare statice de tensiune și frecvență, interpușe între generator (sincron sau asincron) și rețea. Acesta transformă energia de curent alternativ în curent continuu, generează energie de curent alternativ, ce este filtrată pentru a asigura conectarea cu rețeaua de distribuție, fără a produce perturbarea acesteia. Generatoarele astfel echipate pot suporta rafale ale vântului, reducând solicitările mecanice.

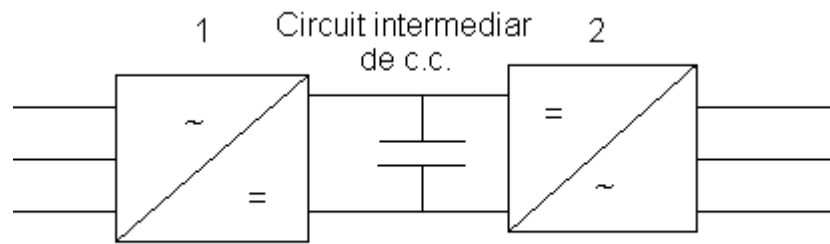
Lanțul de conversie va cuprinde:

- generatorul
- convertorul static de tensiune și frecvență, compus din:
  - convertor c.a.-c.c. (redresor) (1)
  - Se utilizează redresoare ne comandate, cu diode, în cazul generatoarelor sincrone. Acestea sunt convertoare unidirecționale.

În cazul generatoarelor asincrone, se utilizează redresoare cu comandă în durată. Acestea pot furniza și energia reactivă necesară magnetizării

- convertor c.c.-c.a. (invertor) (2)

Prin comanda acestuia, se poate regla frecvența și valoarea eficace a energiei, astfel încât să se poată realiza conectarea la rețea. Se preferă utilizarea **invertoarelor cu modulație în durată**, deoarece calitatea energiei furnizate este mai bună (conținut mai redus de armonici).



Convertor static de tensiune și frecvență

Comanda acestor convertoare se realizează cu plăci de comandă numerice specializate, implantate în PC.

Controlul transferului de putere între redresorul cu modulație în durată și inverter se realizează prin controlul circuitului intermediar de c.c. Acesta conține un condensator de valoare importantă, ce asigură atât filtrarea tensiunii, cât și caracterul de sursă de tensiune al circuitului intermediar.

### Sistemele cu viteză variabilă

Se vor prezenta:

- **Montarea a două generatoare**

#### Montarea a două generatoare

Pentru viteze slabe ale vântului, se utilizează un generator de mică putere și număr mare de poli, iar pentru vânt puternic, se utilizează un generator de putere mare și număr de poli mai mic. Montajul poate fi utilizat atât cu mașini sincrone, cât și asincrone.

- **Generator cu număr variabil de poli**

#### Generator cu număr variabil de poli

se poate modifica conectarea înfășurărilor statorice ale generatoarelor sincrone și asincrone, pentru a obține diferite numere de perechi de poli și deci, diferite viteze de rotație, în funcție de condițiile de vânt.

Această soluție se bazează pe expresia vitezei de sincronism  $\Omega_s$ :

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p},$$

în care  $\omega$  este pulsația rețelei, iar  $p$  numărul de perechi de poli, care se modifică.

Soluția nu permite însă, decât modificarea în trepte, numărul acestora fiind limitat.

- **În cazul generatoarelor asincrone**, datorită alunecării, există posibilitatea funcționării acestora cu ușoară variații de viteză. Sunt posibile mai multe configurații:

- **mașină asincronă (MAS) și reostat în circuitul rotoric**

#### Mașină asincronă (MAS) și reostat în circuitul rotoric

Această soluție exploatează faptul că alunecarea  $s$  depinde de rezistența rotorică, care exprimă în schema echivalentă prin  $R_r / s$ . Prin adăugarea de rezistențe suplimentare în circuitul rotoric, se poate regla alunecarea, și deci viteza rotorului, în funcție de condițiile de vânt. În consecință, pulsația rotorică  $\omega_r$  este dată de :

$$\omega_r = |s| \omega$$

În care  $\omega$  este pulsația fixă a rețelei, iar  $s$  alunecarea. Pulsația rotorică se poate exprima și ca:

$$\omega_r = p |\Omega s - \Omega|$$

În care  $\Omega$  este viteza de sincronism. Rezultă:

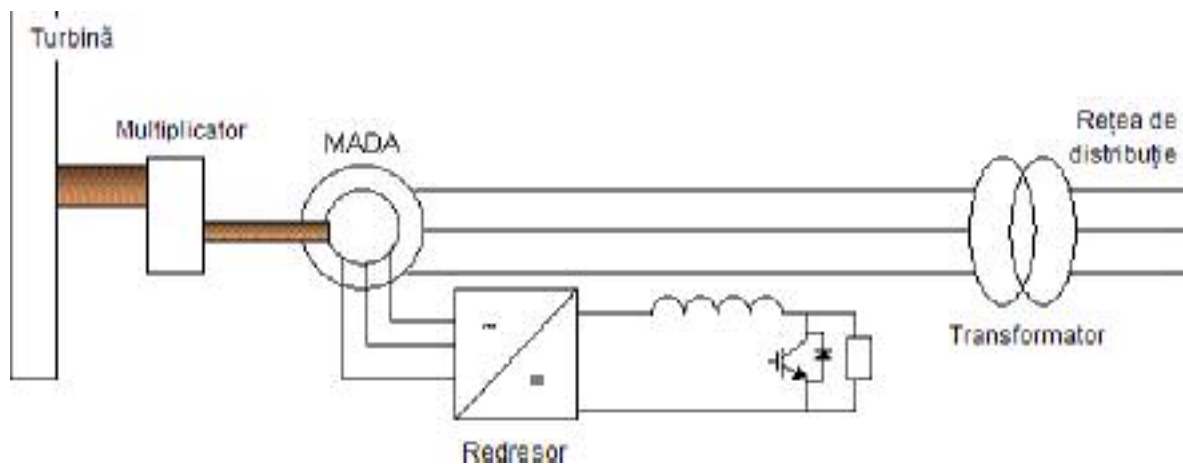
$$\Omega = \omega_s + \frac{\omega_r}{p}$$

dacă  $s < 0$

Exemplu: Variația maximă a alunecării poate fi de 10 %, sau chiar mai mare.

Generatorul utilizat este MADA (Mașină Asincronă cu Dublă Alimentare), sau MAS cu rotor bobinat.

Schema de principiu a acestui tip de sistem este prezentată în figura de mai jos



Schema de conectare la rețea a unei eoliene cu mașină asincronă și reostat în circuitul rotoric

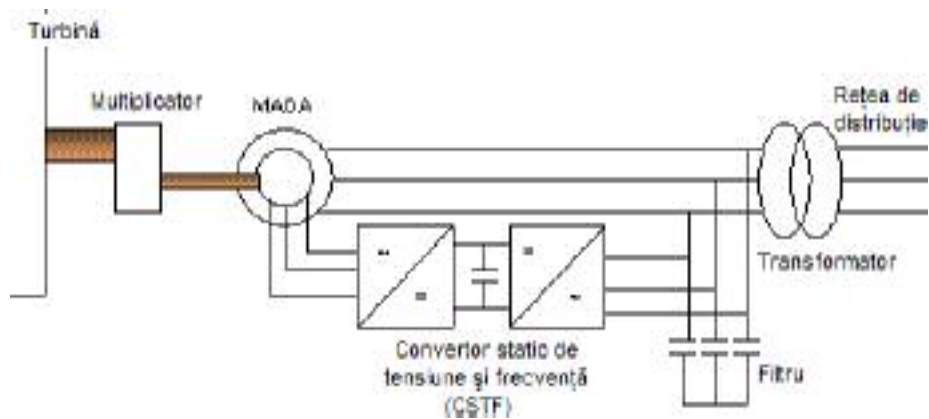
- **mașină asincronă cu dublă alimentare (MADA) și convertor dublu cu modulație în durată**

### Mașina asincronă cu dublă alimentare (MADA)

(mașină asincronă cu rotor bobinat, asociată cu un convertor indirect de tensiune și frecvență cu modulație în durată (structură Scherbius) cu tranzistoare IGBT)

Noțiunea de dublă alimentare se referă la faptul că statorul este conectat direct la rețea, iar rotorul este conectat la convertorul static de tensiune și frecvență.

Acest tip de structură se utilizează pentru eolienele de mare putere. Viteza de rotație se poate modifica în gamă destul de mare (de la simplu la dublu). Convertorul static de tensiune și frecvență este bidirecțional, putând asigura deci ambele sensuri de circulație a energiei în rotor. Prin comanda acestuia se realizează reglajul de viteză și controlul puterilor activă și reactivă vehiculate între mașină și rețea.

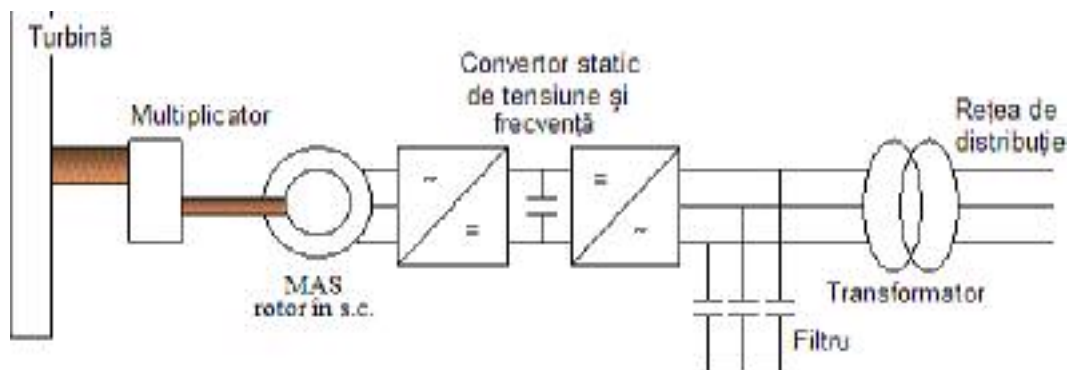


În principiu, viteza se reglează prin intermediul frecvenței de alimentare a înfășurărilor statorice. Bidirecționalitatea CSTF asigură funcționarea atât în zona hiposincronă (sub caracteristica mecanică naturală), cât și în cea hipersincronă (deasupra caracteristicii mecanice naturale) și controlul energiei reactive vehiculate cu rețeaua de distribuție.

- **mașină asincronă cu rotor în scurtcircuit**

### Mașină asincronă (MAS) cu rotor în scurtcircuit

asociată cu un convertor static de tensiune și frecvență (CSTF) indirect.



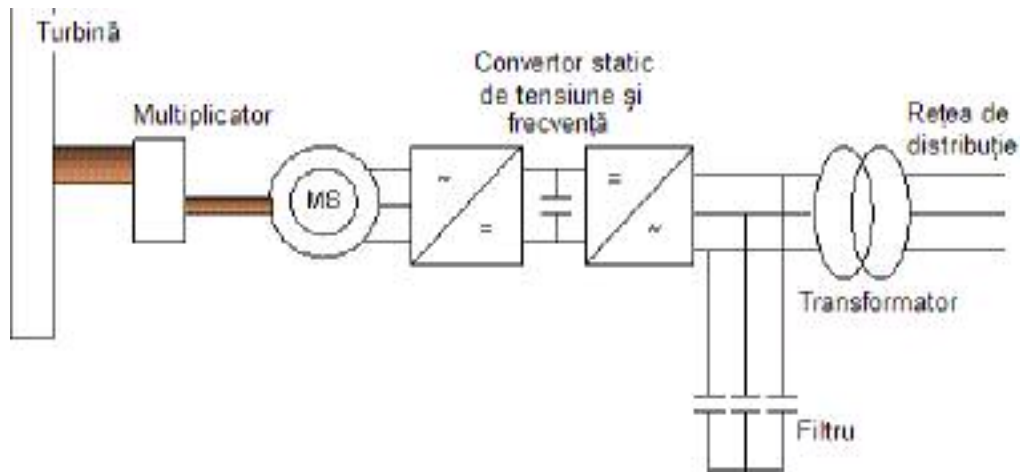
- Pentru generatoarele sincrone:

- **mașină sincronă (MS) cu multiplicator și convertor în stator**

### Mașină sincronă (MS) cu multiplicator și convertor în stator

În cazul mașinii sincrone, amplitudinea și frecvența tensiunii la borne, depind de viteză. Din acest motiv, conectarea la rețea trebuie să se realizeze prin intermediul unui **convertor static de tensiune și frecvență** (CSTF) indirect, compus dintr-un redresor, un circuit intermediar de c.c. și un invertor.





Se poate renunța la multiplicatorul mecanic, dacă se utilizează un generator sincron cu număr mare de poli (turație mică de sincronism). Amintim că, pentru mașina sincronă:

$$\Omega_s = \Omega = \frac{\omega}{p}$$

Sunt posibile două soluții, ambele referitoare la tehnologia de realizare a rotorului:

- **rotorul bobinat**

### Mașină sincronă cu rotorul bobinat

O mașină cu număr mare de poli (turație de sincronism redusă) implică un stator cu gabarit mare.

În această variantă, nu se mai utilizează multiplicatorul de viteză, dar mașina este conectată la rețea prin intermediul unui convertor static de tensiune și frecvență, care transformă energia de c.a. de frecvență variabilă, generată de mașină în energie de c.a. cu tensiunea și frecvența rețelei de distribuție.

- **rotorul cu magneți permanenți**

### Mașină sincronă cu rotor cu magneți permanenți

Rotorul este realizat cu magneți permanenți cu flux axial, rezultând o mașină compactă - Mașină Sincronă cu Magneți Permanenți (MSMP).

În această variantă, nu se mai utilizează multiplicatorul de viteză, dar mașina este conectată la rețea prin intermediul unui convertor static de tensiune și frecvență, care transformă energia de c.a. de frecvență variabilă, generată de mașină în energie de c.a. cu tensiunea și frecvența rețelei de distribuție.

## 3. Conectarea la rețea

Rețeaua de distribuție impune **stabilitatea** tensiunii și frecvenței. Din acest motiv, trebuie luate măsuri speciale în ceea ce privește etapele tranziției de funcționare ale eolieneror, cum ar fi pomirea, opirea sau absorbția rafalelor.

În ceea ce privește pornirea, aceasta se va realiza cu ajutorul unor variatoare de tensiune alternativă (VTA) cu tiristoare. Prin modificarea unghiului de comandă ale acestora, se reglează tensiunea de alimentare a mașinilor, acestea pornind pe [caracteristici artificiale de tensiune](#).

Normele de calitate a energiei, impun, de asemenea, ca eolienele să genereze cât mai puține **armonici**. Acestea sunt cauzate de convertoarele statice de tensiune și frecvență utilizate pentru conectarea generatoarelor la rețeaua de distribuție. Trebuie deci căutate soluții pentru ameliorarea acestora și utilizarea filtrelor. În același timp, trebuie asigurată și energia reactivă necesară magnetizării mașinilor. Se dorește ca aceasta să fie în proporție cât mai mică asigurată din rețeaua de distribuție.

De asemenea, trebuie să se țină cont de faptul că în realitate, rețeaua de distribuție nu are putere infinită, deci stabilitatea parametrilor ei (frecvența, valoarea eficace) poate fi influențată de eolienele, care sunt de puteri din ce în ce mai mari (în prezent, până la 5 MW).

Aceste probleme de conectare a eolienele, se pun în cazul fermelor de eoliene, al eolienele de medie putere și a celor cu putere mai mare de 100 kW, conectate la rețea. Energia produsă de acestea este vândută direct societăților care gestionează rețelele.

- Componente necesare:

Pentru a satisface exigențele rețelei, trebuie instalate diferite echipamente care concurează la conectarea eolienele:

#### **Transformatorul ridicător de tensiune:**

Generatoarele eolienele au tensiunea nominală, în general, de ordinul a 690 V. Transformatoarele asigură conectarea acestora la rețeaua de distribuție, care de cele mai multe ori este de 20 kV. În prezent, nu există nici o eoliană care să fie conectată direct la rețea, fără utilizarea unui transformator ridicător.

#### **Bateriile de condensatoare**

Pentru ameliorare factorului de putere al instalației, se conectează baterii de condensatoare, ce sunt constituite din trei baterii de condensatoare monofazate, conectate în triunghi.

Bateriile de condensatoare asigură și compensarea puterii reactive consumate (ca o medie, ținând cont de neregularitățile vântului).

Energia reactivă este necesară mașinilor asincrone pentru magnetizare. Astfel, bateriile de condensatoare (surse de energie reactivă) asigură local energia necesară magnetizării, ameliorând astfel factorul de putere global al eolienele. În cazul funcționării autonome a eolienele, bateriile de condensatoare sunt indispensabile pentru asigurarea energiei reactive necesare magnetizării mașinii.