

# ENERGIA EOLIANĂ

## I. Vântul ca sursă de energie

Energia eoliană a fost folosită de om pe parcursul a mii de ani. De peste 3000 de ani, morile de vânt sunt folosite pentru măcinat sau pomparea apei. Și astăzi, în secolul informaticii, al energiei nucleare și electricității, mii de mori de vânt sunt folosite pe diferite continente pentru pomparea apei și a petrolului, pentru irigare, producerea energiei mecanice în scopul acționării mecanismelor de mică putere.

Electricitatea poate fi obținută folosind diferite metode, dar absolut toate necesită combustibil în cele mai multe cazuri de origine fosilă: cărbune, gaz natural, petrol sau uraniu 235 și plutoniu 239 la centralele termonucleare. Prin ardere sau în rezultatul fisionii nucleare, energia primară înglobată în combustibil se transformă în energie termică. Proiectată în mod special pentru fiecare tip de combustibil, turbina antrenează generatorul care produce electricitate. În acest context, electricitatea produsă de vânt nu se deosebește de cea produsă din combustibil fosil sau nuclear. Vântul, în calitate de combustibil manifestă un avantaj esențial: este fără plată și nu poluează mediul ambiant.

În prezent, expresia „*utilizarea energiei eoliene*” semnifică, în primul rând, energia electrică nonpoluantă produsă la o scară semnificativă de „*morile de vânt*” moderne numite *turbine eoliene*, termen prin care se încearcă accentuarea similarității cu turbinele cu abur sau cu gaz, folosite pentru producerea electricității și totodată, pentru a face o distincție între vechea și noua lor destinație.

Încercări de a obține energie electrică din vânt energia vântului datează peste o sută de ani, începând cu sfârșitul secolului al XIX-lea. O adevărată înflorire a acestei tehnologii se atestă, însă, abia după criza petrolului din anul 1973. Creșterea bruscă a prețului la petrol a impus guvernele țărilor dezvoltate să aloce substanțiale surse financiare pentru programe de cercetare, dezvoltare și demonstrare. Pe parcursul a 20 de ani, la nivel mondial, s-a creat o nouă tehnologie, o nouă industrie și de facto, o nouă piață de desfacere: piața Sistemelor de Conversie a Energiei Eoliene (SCEE) - Wind Energy Conversion Systems (WECS).

Dacă în anul 1973 principalul stimulent de dezvoltare a SCEE l-a constituit prețul petrolului, astăzi s-a adăugat un al doilea stimulent: tendința omenirii să producă energie electrică „curată” sau „verde” fără sau cu mici emisii de oxid de carbon. Anul 1993 a fost marcat ca începutul unui avânt în domeniul conversiei energiei eoliene caracterizat printr-o creștere anuală de peste 20% a capacităților de putere instalată. Astfel, în 1999 capacitatea mondială a crescut cu 4.033 MW, ceea ce a constituit un record pentru filiera eoliană și ceea ce este foarte semnificativ, pentru prima dată a depășit capacitatea de putere nucleară instalată în lume în același an. În perioada 1996-2006, capacitatea mondială a crescut de peste 12 ori, atingând cifra de 73.904 MW în 2006. Liderul incontestabil este Uniunea Europeană, urmată de SUA și India. O astfel de dezvoltare spectaculoasă nu cunoaște nici un alt sector din industria mondială, preconizându-se ca în anul 2010 puterea instalată să ajungă la 160.000 MW.

## II. Conversia energiei cinetice a fluxului de aer în energie mecanică. Limita lui Betz

### II.1. Energia și puterea vântului

Energia unui flux de aer care se mișcă cu o viteză liniară  $v$  se determină cu expresia energiei cinetice:

$$E = m \frac{v^2}{2}, \quad (\text{II.1})$$

unde  $m$  este masa aerului în mișcare, determinată de densitatea aerului  $\rho$  și volumul care străbate o suprafață oarecare  $S$  în unitatea de timp:

$$m = \rho S v. \quad (\text{II.2})$$

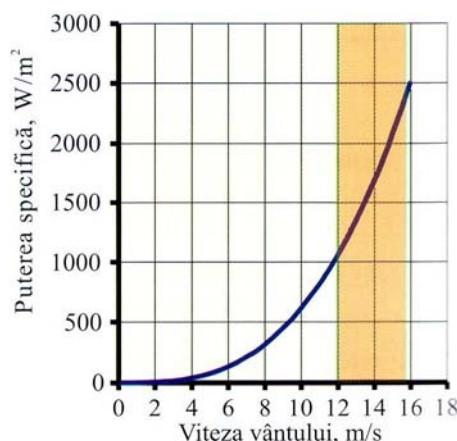
Unitatea de măsură a masei din expresia (II.2) este kg/s și înlocuind în (II.1), se obține puterea fluxului de aer în wați:

$$P = \frac{\rho}{2} S v^3. \quad (\text{II.3})$$

Puterea specifică sau densitatea de putere eoliană ce revine la un metru pătrat de suprafață va fi:

$$p = 0,5 \cdot \rho \cdot v^3 . \quad (\text{II.4})$$

La presiune atmosferică normală și la temperatura de 15°C, densitatea aerului este 1,225 kg/m<sup>3</sup>. Dacă înălțimea deasupra nivelului mării variază între 0 și 100 m (turnurile turbinelor moderne de putere mare au înălțimi de 60 - 120 m), variația densității nu depășește 5% și în prima aproximație, o considerăm constantă.



**Fig. II.1.** Variația puterii specifice a unui flux de aer în funcție de viteza cu care se deplasează acesta.

În figura II.1 este reprezentată variația puterii specifice a unui flux de aer în funcție de viteză. Viteza nominală de calcul a vântului pentru turbine moderne de mare putere variază între 12,0 și 15,0 m/s (vezi zona hașurată).

Pe baza expresiilor (II.3) și (II.4) se pot trage următoarele concluzii:

1. Formulele (II.1) și (II.2) prezintă potențialul energetic al unui flux de aer care străbate suprafața  $S$  sau un metru pătrat de suprafață (unitatea de suprafață).
2. Mărirea de două ori a diametrului rotorului turbinei va conduce la majorarea de 4 ori a puterii fluxului de aer care străbate suprafața rotorului.
3. Majorarea de 2 ori a vitezei vântului conduce la majorarea de 8 ori a puterii fluxului de aer sau a puterii specifice.
4. Este foarte important să cunoaștem valoarea vitezei vântului și cum variază în timp pentru a prezice cât mai exact potențialul energetic eolian într-o localitate oarecare.
5. Se cer eforturi considerabile pentru a obține certitudinea că centrala eoliană va fi amplasată într-o localitate cu cele mai mari viteze ale vântului. În unele țări, se utilizează turnuri relativ înalte (mai mari de 60 - 80 m), pentru a valorifica avantajele ce țin de creșterea vitezei odată cu creșterea înălțimii.

## **II.2. Turbina eoliană în fluxul de aer**

Turbina eoliană transformă energia cinetică a fluxului de aer care traversează aria baleiată de rotor în energie mecanică apoi, cu ajutorul generatorului, în energie electrică. Apare întrebarea: ce se întâmplă la amplasarea rotorului turbinei într-un flux de aer? Este evident că fluxul de aer cedează doar o parte din energia cinetică (după cum se va vedea ulterior), restul energiei se consumă pentru ca aerul să părăsească zona de interacțiune flux - turbină.

În fig. II.2 se prezintă schematic un flux de aer cu viteza inițială  $v_0$ , care străbate aria circulară  $A_0$  și interacționează cu rotorul turbinei cu aria baleiată  $A_1$ . În secțiunea  $A_1$ , fluxul de aer întâlnește o rezistență, presiunea crește, iar viteza scade până la  $v_1$ . Cedând o parte din energie, fluxul de aer părăsește turbina cu viteza  $v_2$  mai mică decât  $v_1$ . Deoarece masa de aer care traversează secțiunile  $A_0$ ,  $A_1$  și  $A_2$  rămâne constantă, iar viteza s-a micșorat, rezultă că  $A_2 > A_1 > A_0$ , altfel spus, are loc efectul de deflectare (deformare) a fluxului de aer care străbate rotorul turbinei, formându-se o pâlnie. Fluxul de aer format imediat după elice se mai numește jet de curent al elicei, în care presiunea sta-

tică este mai mică decât în zona liberă a atmosferei. La distanțe mai mari față de elice, presiunea statică se restabilește.

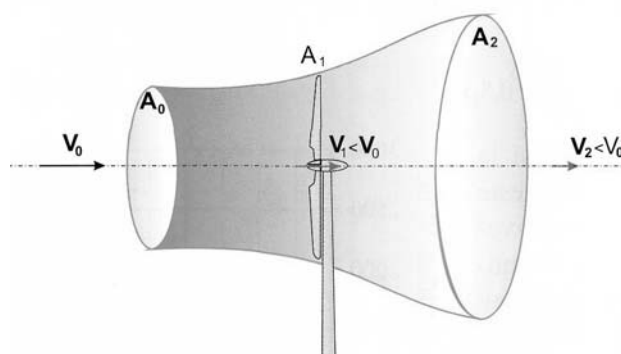


Fig. II.2. Efectul produs de turbina eoliană asupra unui flux de aer.

### II.3. Limita lui Betz

În anul 1919 fizicianul german Albert Betz a formulat legea care răspunde la întrebarea: ce parte din energia cinetică a unui flux de aer poate fi transformată în energie mecanică? Betz a analizat o turbină cu rotor idealizat:

- se admite că rotorul prezintă un disc cu un număr infinit de pale subțiri;
- se neglijează pierderile de energie;
- fluxul de aer curge prin secțiunile imaginate din figura II.2 fără turbulență.

Viteza  $v_0$  este viteza curentului de aer până la rotor,  $v_2$  - viteza cu care fluxul de aer părăsește zona rotorului,  $v_1$  - viteza fluxului în secțiunea  $A_1$  a rotorului. În conformitate cu legea a doua a lui Newton, variația cantității de mișcare este egală cu forța care acționează asupra corpului:

$$F = \frac{d}{dt}(mv) = m \frac{dv}{dt}. \quad (\text{II.5})$$

Variația vitezei curentului de aer pentru modelul de mai sus în decursul unei secunde ( $dt = 1s$ ) va fi  $dv = v_0 - v_2$  și în consecință:

$$F = m(v_0 - v_2). \quad (\text{II.6})$$

Introducând noțiunea de factor de frânare a fluxului de aer în turbină  $e = v_1/v_0$ , și în ipoteza că viteza vântului variază liniar, determinăm viteza fluxului de aer în aria  $A_1$  a turbinei:

$$v_1 = \frac{v_0 + v_2}{2}, \Rightarrow v_2 = 2 \cdot v_0 \cdot e - v_0. \quad (\text{II.7})$$

Conform relației (II.2), masa de aer care traversează suprafața  $A_1$  într-o secundă va fi:

$$m = \rho \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho \cdot A_1 \cdot v_0 \cdot e. \quad (\text{II.8})$$

Înlocuind în expresia forței  $F$  din (II.6) viteza  $v_2$  din (II.7) și masa  $m$  din (II.8) rezultă:

$$F = 2 \cdot \rho \cdot A_1 \cdot v_0^2 \cdot e(1-e). \quad (\text{II.9})$$

Puterea dezvoltată de turbină este produsul dintre forță și viteză:

$$P = F \cdot v_1 = 2 \cdot \rho \cdot A_1 \cdot v_0^3 \cdot e^2(1-e^2). \quad (\text{II.10})$$

Conform relației (II.3), puterea fluxului de aer care are viteza  $v_0$  va fi:

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho \cdot A_1 \cdot v_0^3 \text{ sau } 2P_0 = \rho \cdot A_1 \cdot v_0^3. \quad (\text{II.11})$$

Înlocuind în expresia puterii (II.10), se obține:

$$P = 4 \cdot P_0 \cdot e^2(1-e) = P_0 \cdot C_p, \quad (\text{II.12})$$

în care

$$C_p = 4 \cdot e^2(1-e) \quad (\text{II.13})$$

și se numește *factorul de putere* (factor de eficiență) sau *limita lui Betz*. Derivând expresia (II.137) în raport cu  $e$  și se determină valoarea acestuia pentru care puterea  $P$  va fi maximă. Se obține  $e = 2/3$  și  $C_p = 16/27 = 0,593$ .

Putem trage următoarea concluzie: fluxul de aer va ceda unei turbine ideale nu mai mult de 59,3% din puterea sa inițială  $P$  și aceasta se va realiza dacă factorul de frânare  $e = 2/3$  și viteza fluxului de aer după turbina va fi  $v_2 = 1/3 \cdot v_0$ . În realitate, cele mai performante turbine eoliene cu trei pale au factorul Betz egal cu 0,45 - 0,50.

#### II.4. Efectul numărului de pale și al diametrului rotorului

Limita lui Betz demonstrează că o turbină eoliană ideală poate extrage din vânt o putere de cel mult 59,3%, dar analiza efectuată mai sus nu indică regimul de funcționare a turbinei sau variația constructivă a rotorului astfel încât să se atingă valoarea maximă a factorului de putere. În cele ce urmează se va face o analiză din punct de vedere calitativ a regimului de funcționare a turbinei și a efectului numărului de pale sau al factorului de soliditate asupra valorii factorului de putere.

Eficiența conversiei energiei fluxului de aer în energie mecanică va fi mai mică decât valoarea optimă dacă:

a) Rotorul turbinei are un număr de pale mare (factorul de soliditate este mare) sau rotorul rotește cu o viteză foarte mare și fiecare pală se mișcă într-un flux de aer distorsionat (turbulent) de către pala din față.

b) Rotorul turbinei are un număr mic de pale (factorul de soliditate este mic) sau rotorul rotește cu o viteză foarte mică și fluxul de aer traversează suprafața rotorului fără a interacționa cu acesta.

În consecință, pentru a obține o eficiență maximă de conversie a energiei trebuie ca viteza de rotație a rotorului să fie corelată cu viteza vântului. Pentru a caracteriza turbinele eoliene cu diferite caracteristici aerodinamice se utilizează un parametru adimensional, numit *coeficient de viteză* al turbinei sau *rapiditatea turbinei*  $\lambda$  (în engleză *tip speed ratio*).

Rapiditatea leagă într-o singură formulă trei variabile importante ale turbinei: viteza de rotație  $\omega$ , raza rotorului (diametrul)  $R$  și viteza vântului  $v$  și se definește ca raportul dintre viteza liniară a vârfului palei  $U$  și viteza vântului.

$$\lambda = \frac{U}{v} = \frac{\omega R}{v}. \quad (\text{II.14})$$

O turbină oarecare poate funcționa într-o gamă largă de variație a rapidității  $\lambda$ , dar va avea eficiență maximă  $C_p$  numai pentru o valoare optimă a rapidității, cu alte cuvinte, dacă viteza liniară  $U$  va fi egală cu viteza vântului înmulțită cu valoarea optimă a rapidității.

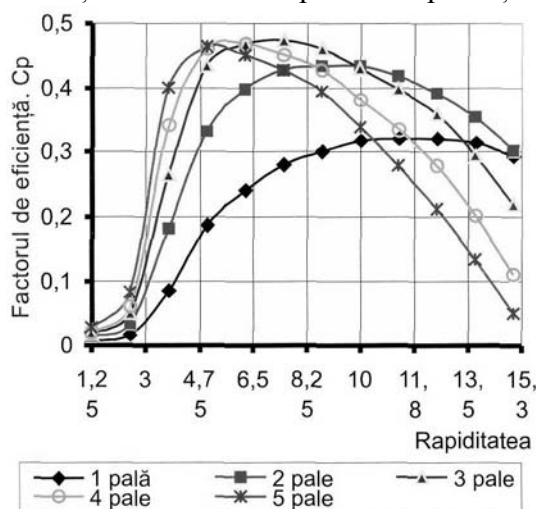


Fig. II.3. Caracteristicile aerodinamice ale diferitelor turbine.

În figura II.3 sunt prezentate caracteristicile  $C_p - \lambda$ , pentru turbine cu un număr diferit de pale. Analiza acestor caracteristici ne permite să tragem următoarele concluzii:

a) Cu cât numărul de pale este mai mic, cu atât mai mare este rapiditatea optimă pentru care factorul de putere sau eficiența conversiei energiei este maximă.

b) Două turbine cu puteri egale, dar cu număr diferit de pale se deosebesc prin aceea că turbina cu multe pale va dezvolta un moment mai mare și va avea viteza de rotație mai mică și invers - turbina cu puține pale va dezvolta un moment mic, dar va avea o viteză de rotație mai mare.

c) Turbina cu trei pale are cel mai mare factor de eficiență. Diferențele dintre factorii de eficiență maximi ai turbinelor cu 2-5 pale nu este semnificativă. Avantajele turbinelor cu două sau cu o singură pală constau în posibilitatea funcționării într-o zonă mai largă de variație a rapidității, în care factorul de eficiență are valoare maximă sau aproape de cea maximă.

d) Factorul maxim de eficiență (Betz) al turbinei cu 12 - 18 pale este mai mic decât al turbinei cu 3 pale și nu depășește 0,35.

**Dependența puterii turbinei de diametrul rotorului.** Turbinele de putere mică au turnuri cu înălțimi relativ mai mari decât cele de putere mare. Aceasta se explică prin necesitatea excluderii influenței negative a stratului de suprafață al solului și a obstacolelor asupra vitezei vântului. Pentru valori ale diametrului rotorului cuprinse între 5 și 10 m, raportul dintre înălțimea turnului și diametrul rotorului este egal cu 6 - 2. Începând cu diametre egale sau mai mari de 30 m, acest raport oscilează în jurul cifrei 1. Evident, costurile specifice ale turbinelor mici vor fi mai mari.

Puterea mecanică generată de turbină este proporțională cu pătratul diametrului rotorului. Odată cu creșterea diametrului, respectiv a înălțimii turnului, va crește și viteza vântului. De obicei, creșterea vitezei vântului este considerată proporțională cu raportul înălțimilor la puterea  $1/7$ . Astfel puterea turbinei este proporțională cu diametrul rotorului la puterea  $(2 + 3 \cdot 1/7) = 2,42$ . Pentru turbinele comercializate în prezent o bună aproximare oferă expresia:

$$P = 0,06 \cdot D^{2,42}, \quad (\text{II.15})$$

în care,  $D$  - este diametrul rotorului, în m,  $P$  - puterea, în kW.

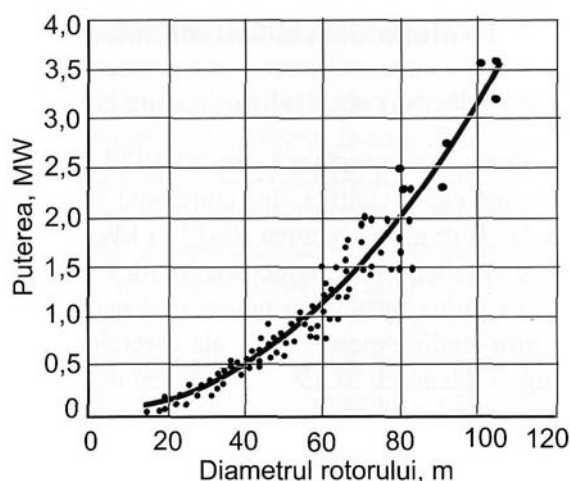


Fig. II.4. Puterea nominală a turbinelor comercializate în funcție de diametrul rotorului.

În figura de mai sus, linia continuă corespunde expresiei (II.15).

La nivel mondial se constată tendința de majorare a diametrului rotorului, chiar și în cazul când puterea nominală rămâne aceeași. De exemplu, turbinele cu puterea de 1,5 MW proiectate până în anul 1997 aveau diametrul mediu al rotorului egal cu 65,0 m, în anul 2000 diametrul rotorului a atins valoarea de 69,1 m, iar în anul 2003 a ajuns deja la 73,6 m. Majorarea diametrului rotorului conduce la creșterea puterii extrase din vânt. Dacă puterea nominală rămâne aceeași, poate fi micșorată viteza de calcul a vântului. Astfel, crește aria de utilizare a turbinelor eoliene, care includ noi zone cu un potențial energetic eolian mediu și mic. Această tendință se reflectă și asupra expresiei empirice (II.15): pentru turbinele proiectate după anul 2003, puterea nominală, în MW, poate fi calculată cu expresia:

$$P = 0,000195 \cdot D^{2,156}. \quad (\text{II.16})$$

Viteza liniară a vârfului palei este produsul dintre viteza de rotație și raza rotorului. Pentru turbinele cu puterea nominală de 0,6 - 3,6 MW viteza liniară variază între 43,0 și 90 m/s (155-325 km/h). Astfel de viteze liniare impun o proiectare riguroasă a profilului aerodinamic, asigurarea bu-

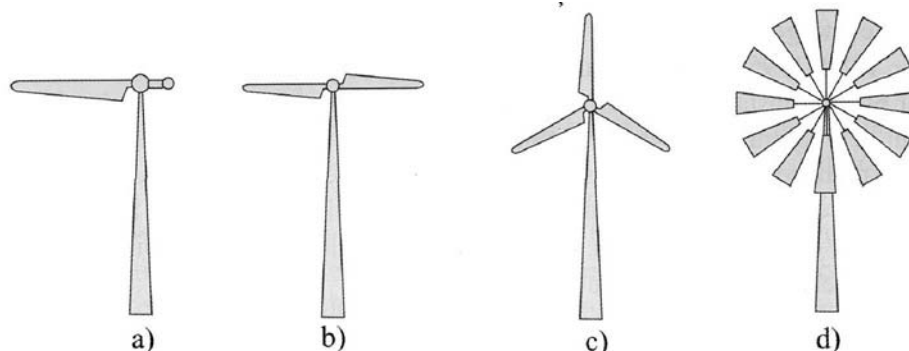
nei calități a suprafeței și o balansare dinamică excelentă a rotorului. Toate aceste măsuri conduc la diminuarea considerabilă a zgomotului și permit amplasarea turbinelor moderne în imediata vecinătate a comunelor și orașelor.

### II.5. Tipuri constructive de turbine eoliene

Turbinele eoliene pot fi clasificate în patru grupe mari, în funcție de puterea dezvoltată la viteza de calcul a vântului, care este cuprinsă între 11 și 15 m/s. Microturbinele acoperă puterile cuprinse între 0,05 și 3,0 kW. Turbinele de putere mică au puteri cuprinse între 3 și 30 kW, iar de putere medie – 30 - 1.000 kW. Atât microturbinele, cât și turbinele de putere mică sunt proiectate pentru a funcționa în regim autonom și alimentează cu energie electrică consumatorii dispersați teritorial și neconectați la rețelele electrice publice. În acest scop, turbinele sunt dotate cu acumulate de energie electrică și dispozitive de condiționare a energiei: regulatoare și convertoare de frecvență. În a patra grupă sunt incluse turbinele cu puterea mai mare de 1.000 kW, numite turbine de mare putere sau turbine multimegawatt. Tendința actuală este majorarea puterii per unitate, majoritatea absolută a turbinelor funcționează în paralel cu rețeaua electrică publică, dându-se prioritate turbinelor cu puterea mai mare de 1 MW.

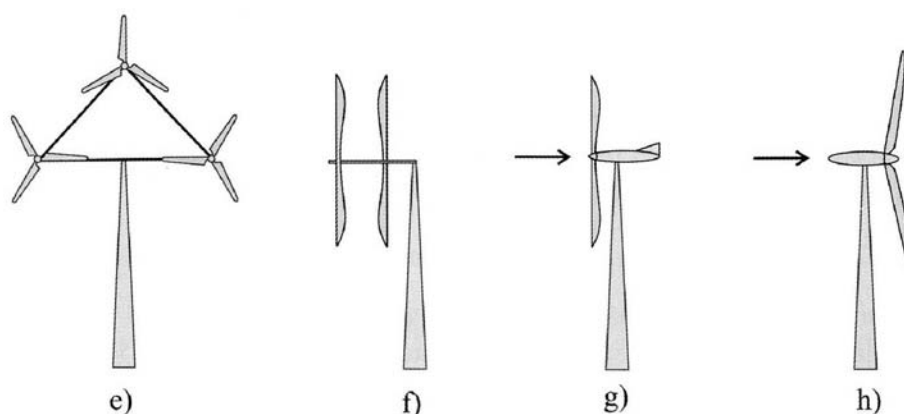
Pe parcursul anilor au fost propuse și patentate sute de scheme constructive ale turbinelor eoliene, însă doar câteva zeci au fost testate, din care doar câteva au penetrat piața turbinelor eoliene.

Majoritatea absolută a turbinelor comercializate sunt cu axă orizontală. Axa de rotație a turbinei coincide cu direcția vântului și este paralelă cu suprafața solului.



**Fig. II.5.** Turbine eoliene cu axa de rotație orizontală și un singur rotor: a) – cu o pală; b) – cu două pale; c) – cu trei pale; d) – cu mai multe pale.

În figura II.5 sunt prezentate tipuri constructive de turbine cu axa de rotație orizontală, cu un singur rotor și numere diferite de pale.



**Fig. II.6.** Turbine eoliene cu axa de rotație orizontală: e) – cu trei rotoare; f) – cu două rotoare ce se rotesc în direcții diferite; g) – cu rotor în fața turnului și giruetă (up-wind); h) – cu rotor în spatele turnului cu autoreglare (down-wind).

În figura II.6 sunt prezentate diverse tipuri constructive de turbine cu axa de rotație orizontală, cu mai multe rotoare (e și f) și cu un singur rotor și dispozitive de autoreglare pe direcția vântului.

În cazul turbinelor cu axă verticală, direcția vântului este perpendiculară pe axa de rotație și, respectiv, perpendiculară pe suprafața solului (fig. II.7).

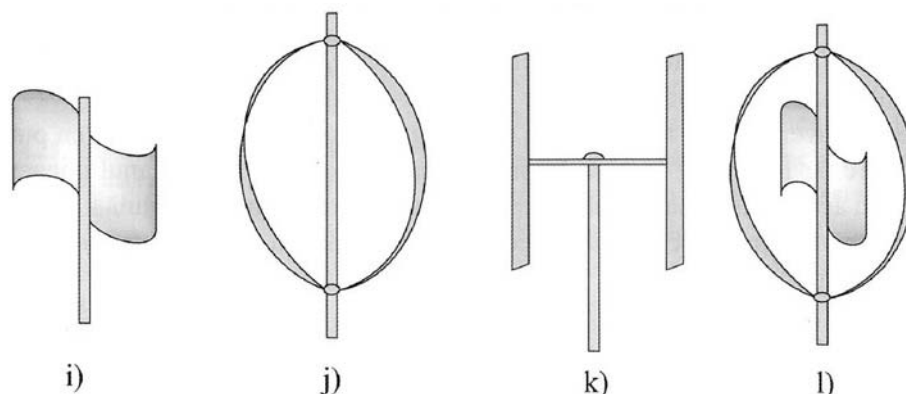


Fig. II.7. Turbine eoliene cu axa de rotație orizontală: i) – Savonius; j) – Darrieus; k) – Evence; l) – combinată Darrieus – Savonius.

Deși turbinele cu axa verticală au pierdut competiția, inginerii revin iarăși și iarăși la această schemă constructivă, cauza principală fiind următoarele două avantaje indiscutabile:

♦ Generatorul, multiplicatorul și alte componente funcționale pot fi amplasate pe suprafața solului, nu sunt necesare gondola și turnul masiv.

♦ Turbina nu necesită un mecanism special de urmărire a direcției vântului.

Din nefericire, dezavantajele acestor turbine prevalează în comparație cu avantajele:

- Viteza vântului în stratul limitrof cu suprafața solului este mică. Astfel, se fac economii la construcția turnului, dar pierdem în puterea dezvoltată de turbină.

- Factorul de conversie a energiei vântului în energie mecanică este mai mic.

- Unele tipuri, ca de exemplu turbina Darrieus sau Evence, nu asigură demararea. Este necesar un motor auxiliar care pornește turbina sau o turbină mică tip Savonius.

- Turbinele de mare putere necesită cabluri de suport, care măresc considerabil suprafața ocupată a terenului.

- Înlocuirea rulmentului axial principal necesită demontarea completă a turbinei.

O caracteristică esențială a turbinelor cu axă orizontală constituie numărul de pale. Ele pot fi cu una, două, trei sau mai multe pale (vezi fig. II.5, a-d). Cu cât turbina are mai multe pale, cu atât este mai mare aria solidă a suprafeței baleiate (măturată) de rotor. În teoria turbinelor eoliene numărul de pale este considerat cu factorul de soliditate, care reprezintă raportul dintre aria tuturor paletelor și aria baleiată de rotor. Este evident că turbinele cu 1-3 pale au un factor de soliditate mai mic decât turbinele cu 12 sau 18 pale. Cu cât este mai mare factorul de soliditate (rotor cu multe pale), cu atât este mai mică viteza de rotație a turbinei, iar cuplul dezvoltat va fi mai mare și invers. Din această cauză, turbinele cu puține pale sunt utilizate pentru generarea energiei electrice, iar cele cu pale multe, pentru pomparea apei, acționarea ferăstraielelor, concasoarelor, valțurilor de măcinat etc, altfel spus, a mașinilor, care necesită viteze mici de rotație și cupluri mari la pornire.

## II.6. Principii de control al puterii furnizate de turbina eoliană în rețea

Turbina eoliană va furniza în rețea puterea nominală, dacă viteza vântului va fi egală cu cea de calcul, de obicei 11-15 m/s. Pentru viteze ale vântului mai mari trebuie să limităm puterea mecanică, respectiv suprasolicitățile asupra paletelor rotorului, multiplicatorului, generatorului, turnului etc. Astfel, apare necesitatea controlului puterii turbinei. Cele mai răspândite sunt următoarele metode de control:

- frânarea aerodinamică pasivă (*passive stall control*);
- reglarea unghiului de atac (*activepitch control*);
- frânarea aerodinamică activă (*active stall control*);
- scoaterea rotorului turbinei din direcția acțiunii vântului (*yaw control*).

**Controlul puterii folosind frânarea aerodinamică pasivă**, este cea mai simplă metodă și poate fi folosită pentru turbine cu viteza de rotație constantă. Cu alte cuvinte, viteza de rotație nu

depinde de viteza vântului sau variază nesemnificativ (1-2%). Viteza de rotație constantă a turbinei poate fi obținută în SCEE dotate cu generatoare asincrone sau sincrone conectate direct la rețelele electrice publice (fig. II.8, b). Palele rotorului sunt fixate rigid și au o formă aerodinamică, care asigură un caracter laminar al fluxului de aer pentru viteze ale vântului cuprinse între cea de pornire  $v_p$  și cea calculată  $v_c$  (fig. II.8, c). Pentru viteze ale vântului mai mari decât  $v_c$  (fig. II.8, a), mișcarea fluxului de aer deasupra palei devine turbulentă, forța de ridicare scade, iar cea de rezistență crește și respectiv scade puterea mecanică.

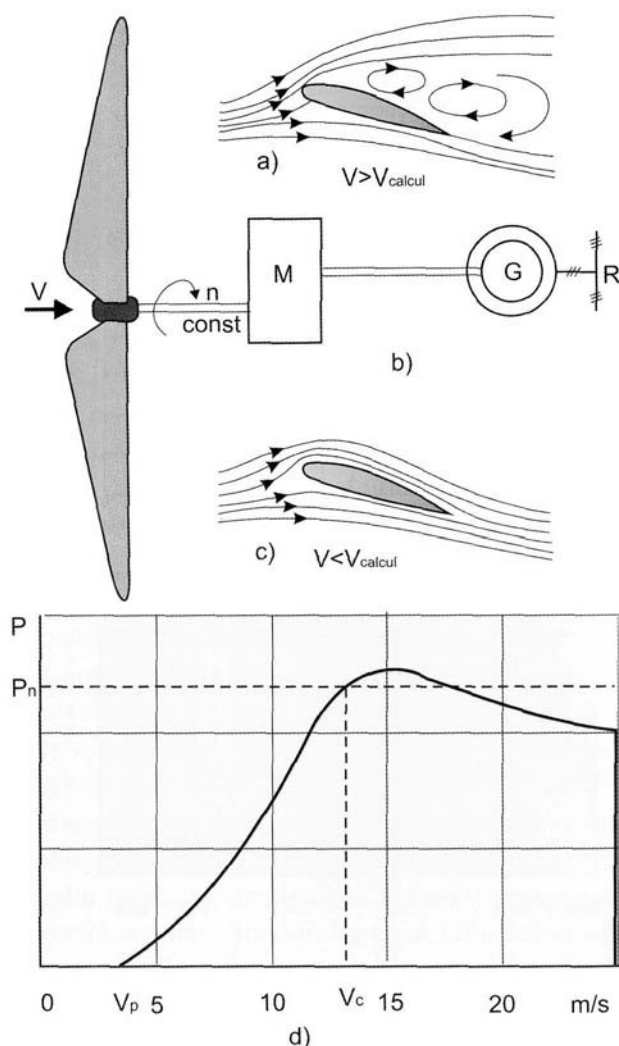


Fig. II.8. Principiul de control al puterii furnizate în rețea folosind frânarea aerodinamică.

b). Pentru unghiuri mici de atac, cuprinse între 0 și 13-15 grade, forța aerodinamică de ridicare (*lift force*) crește liniar odată cu creșterea unghiului de atac:

$$F_L = \frac{\rho}{2} C_L A_P v^2, \quad (\text{II.16})$$

în care  $C_L$  este coeficientul de ridicare (lift),  $A_P$  este aria palei (așa-numita arie a secțiunii maestre sau arie a proiecției palei pe o suprafață perpendiculară pe direcția vântului),  $v$  – viteza vântului, iar  $\rho$  – densitatea aerului.

Pe lângă forța de ridicare  $F_L$ , mai apare și forța de rezistență  $F_D$  (*drag force*), a cărei direcție coincide cu direcția vântului:

$$F_D = \frac{\rho}{2} C_D A_P v^2, \quad (\text{II.17})$$

în care  $C_D$  este coeficientul de rezistență.

Evoluția tipică a coeficienților  $C_L$  și  $C_D$  în funcție unghiul de atac  $\alpha$ , este prezentată în figura II.9, c).

Forma tipică a caracteristicii de putere  $P = f(v)$  pentru o turbină cu frânare aerodinamică se prezintă în fig. II.8, d. În zona vitezelor  $v_p < v < v_c$ , puterea furnizată în rețea este proporțională cu cubul vitezei vântului. La viteza de calcul, turbina generează puterea nominală, iar dacă viteza vântului continuă să crească, se intensifică frânarea aerodinamică și creșterea puterii furnizate în rețea se limitează. În cele mai frecvente cazuri, pentru viteze egale sau mai mari de 25 m/s, turbina este deconectată și frânată cu frâna mecanică din dotare. Avantajul principal al acestui principiu de control constă în simplitatea realizării. Dezavantajele constau în:

- necesitatea unui calcul riguros al profilului aerodinamic al palei,
- generatorul trebuie să reziste la supra-solicitări de 20-30%;
- pentru viteze mari (mișcarea turbulentă se intensifică) ale vântului puterea generată în rețea devine mai mică decât cea nominală.

**Controlul puterii folosind reglarea activă a unghiului de atac.** Controlul puterii furnizate se realizează prin reglarea unghiului de atac  $\alpha$  (fig. II.9, a). În acest scop pala este rotită de un mecanism special în jurul axei longitudinale. Viteza de rotație a turbinei poate fi variabilă. Pentru a menține frecvența constantă, generatorul sincron este conectat la rețea prin intermediul convertorului de frecvență (fig. II.9, b).

Pentru viteze ale vântului mai mari decât cea nominală, puterea mecanică se menține constantă prin majorarea unghiului de atac  $\alpha$ , coeficientul  $C_L$  scade brusc, iar  $C_D$  crește și puterea furnizată rămâne constantă (vezi fig. II.9, d).

Avantajul principal al reglării active a unghiului de atac constă în micșorarea solicitărilor mecanice asupra palelor, rotorului și turnului și crește cu 2 - 4% eficiența conversiei energiei vântului la viteze mai mici decât cea nominală.

Dezavantaje: complexitatea realizării, necesitatea unui sistem de reglare rapidă a unghiului de atac.

**Frânare aerodinamică activă.** Este o combinație a celor două metode: cu frânare aerodinamică și reglare a unghiului de atac. La viteze ale vântului mai mici decât cea nominală, unghiul de atac se reglează în scopul obținerii unei eficiențe sporite a conversiei energiei vântului în energie mecanică. Pentru viteze ale vântului mai mari decât cea nominală, unghiul de atac se reglează în direcția opusă celei obișnuite pentru reglarea pitch. De obicei gama de reglare este  $0 < \alpha < -5^\circ$ . Din fig. II.9,c rezultă că pentru aceste unghiuri de atac coeficientul  $C_L$  (lift) scade și, respectiv, scade forța de ridicare. Astfel, puterea mecanică se menține constantă.

**Limitarea puterii prin scoaterea rotorului turbinei din direcția acțiunii vântului.** Această metodă se recomandă doar pentru turbine de putere mai mică de 30 kW. La viteze mari ale vântului, rotorul turbinei este scos din direcția acțiunii vântului fie prin rotirea lui în jurul axei turnului (*yaw control*), fie în jurul axei perpendiculare pe axa turnului (*tilt control*). În ambele cazuri se utilizează sisteme mecanice pasive care reacționează la viteze ale vântului mai mari decât cea nominală.

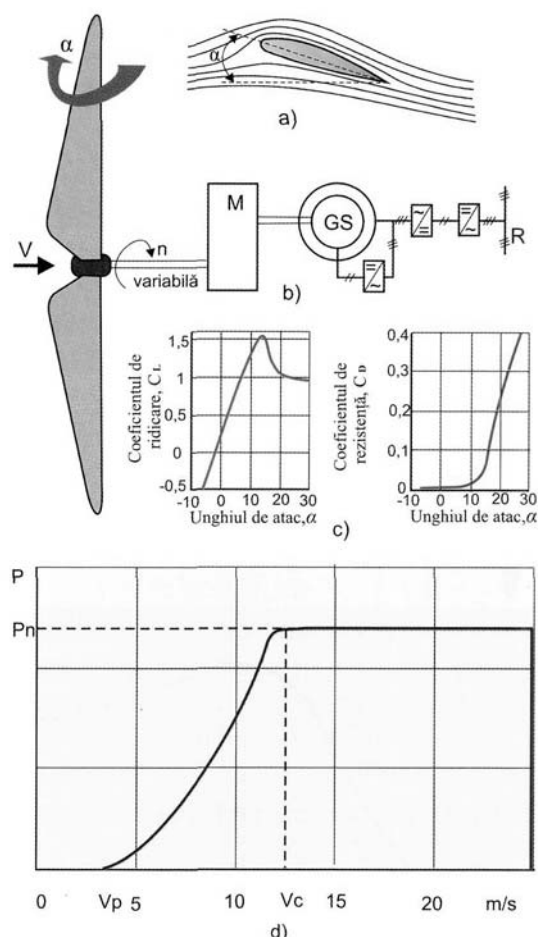
În 57% din proiectele realizate se folosește metoda de scoatere a rotorului turbinei din direcția acțiunii vântului, iar circa 17% turbine nu sunt dotate cu sisteme de control ale puterii. Rotorul turbinelor fără controlul puterii este calculat să reziste la vânturile extreme din zona respectivă. La turbinele de mare putere se constată tendința certă de folosire tot mai largă a controlului prin reglarea unghiului de atac sau *pitch control*.

## II.7. Variante de acționare a generatorului

Prima turbină eoliană comercială, construită de J. Juul în localitatea Gedser, care a generat „conceptul danez” a fost dotată cu multiplicator și generator asincron. Această schemă (fig. II.10, a) predomină și astăzi în majoritatea turbinelor cu puterea nominală mai mare de 100kW. Pentru a micșora masa și a mări eficiența, generatorul asincron trebuie proiectat la viteze de rotație cât mai mari posibile: 3000 rot/min la frecvența de 50 Hz. Totodată, viteza de rotație a turbinei cu puterea de 600 kW este de circa 30 rot/min, iar a turbinelor cu puterea mai mare de 1000 kW este și mai mică. O masă optimă a sistemului multiplicator - generator se obține pentru viteze de rotație a generatorului de (1000-1500) rot/min. În acest caz, raportul de transmisie al multiplicatorului trebuie să fie 1:50.

Schema constructivă a sistemului multiplicator - generator asincron nu este universală și nu poate fi recomandată pentru toate turbinele eoliene. Soluțiile sunt diferite, depind de puterea turbinei și de domeniul de utilizare.

**Microturbine – turbine cu puterea nominală egală sau mai mică de 3 kW.** Viteza nominală de rotație a microturbinelor este relativ mare (200-500 rot/min) și se utilizează în general în regim autonom. Peste 95% dintre turbine sunt dotate cu generatoare sincrone de mică viteză, cu mag-



**Fig. II.9.** Principiul de control al puterii furnizate în rețea folosind reglarea unghiului de atac.

neți permanenți (GSMP), cuplate direct la rotorul turbinei (fără multiplicator mecanic) după cum este prezentat în figura II.10, b).

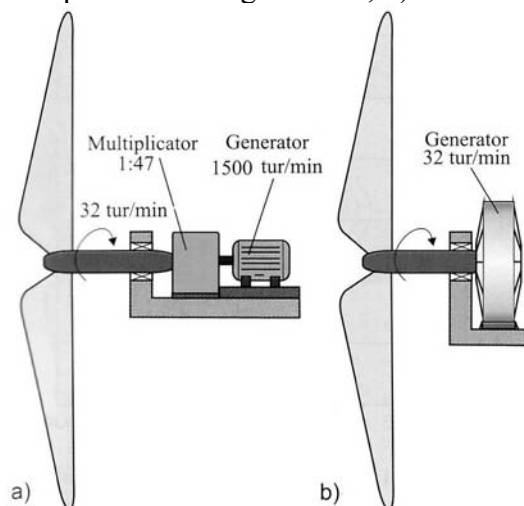


Fig. II.10. Turbină eoliană: a) – cu multiplicator; b) – cu cuplare directă.

La viteze mici de rotație, performanțele tehnice ale generatorului asincron scad esențial și în sisteme electrice izolate necesită echipament special pentru excitație și stabilizarea tensiunii. În literatura de specialitate nu a fost identificat nici un exemplu de dotare a micro-turbinelor eoliene cu generator asincron care funcționează în regim autonom sau alimentează o rețea electrică izolată.

**Turbine de mică putere - (3 - 30 kW).** Absolut toate turbinele cu puterea nominală de până la 10 kW sunt dotate cu GSMP cuplate direct cu turbina eoliană. În gama de puteri 10-30 kW sunt și unele excepții: turbina eoliană produsă de „Atlantic Orinet Corporation ” (SUA) cu puterea nominală de 20 kW este dotată cu generator cu reluctanță variabilă.

**Turbine de putere medie - (30 -1000 kW) și turbine multi-megawatt.** În acest domeniu, situația este

incertă. Pe piață predomină sistemul multiplicator - generator asincron sau sincron, cu excitație electromagnetică (GSEM) sau cu magneți permanenți. După anii 1990 au fost lansate pe piață câteva prototipuri de turbine eoliene cu cuplare directă, prin care se urmăresc următoarele sco-puri:

- micșorarea costurilor de operare și mentenanță;
- majorarea eficienței conversiei energiei eoliene, inclusiv în zonele cu vânturi moderate;
- micșorarea vitezei de pornire (start) a turbinei, astfel crește gama de viteze lucrative ale vântului;
- micșorarea lungimii și greutateii gondolei;
- micșorarea vibrațiilor și zgomotului;
- crește disponibilitatea și fiabilitatea turbinei eoliene.

Firma finlandeză WinWind a lansat pe piață o turbină eoliană cu puterea de 1.100 kW, cu diametrul rotorului 56 m, care prezintă un hibrid, un compromis dintre schema cu multiplicator și cea cu cuplare directă. Așa-numitul concept „Multibrid”, care se află la baza noii turbine, constă în utilizarea multiplicatorului planetar cu o singură treaptă cu raportul de transmisie de 1:5,7 și a GSMP cu viteza de rotație cuprinsă între 40 și 146 rot/min. Masa sistemului multiplicator - GSMP a rămas aceeași ca și la turbine tradiționale, dar gondola are o construcție mai simplă și mai compactă.

## II.8. Configurații de turbine eoliene

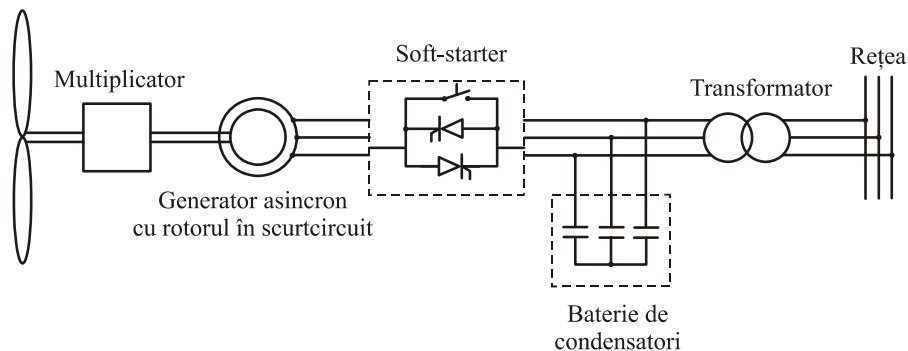
Cele mai utilizate configurații pentru turbinele eoliene se clasifică după capacitatea de control al vitezei și după metoda de reglare a puterii folosită de turbina respectivă. Dacă se considera metoda de control al vitezei ca fiind criteriul de clasificare, se pot prezenta patru tipuri de turbine dintre cele mai utilizate. Aceste configurații se pot însă clasifica și după modul de control al puterii furnizate.

### 1. Tipul A: turbine cu viteză fixă, conform figurii II.11

Această configurație este cunoscută și sub numele de „Conceptul Danez”, care utilizează un generator asincron cu rotorul în scurtcircuit (GARS) pentru a converti energia mecanică în energie electrică. Datorită diferenței dintre viteza rotorului turbinei și viteza rotorului generatorului asincron este necesară utilizarea unui multiplicator (cutie de viteze) care realizează concordanța necesară dintre aceste două viteze. Alunecarea generatorului asincron variază puțin pe măsură ce puterea generată crește, nerămânând riguros constantă. Deoarece variațiile vitezei mașinii electrice sunt sub 1%, acest tip de turbină se consideră a funcționa la viteză constantă sau viteză fixă.

Turbina cu viteză fixă este în prezent prevăzută cu sisteme de frânare aerodinamică activă (stall control) chiar dacă s-au proiectat și sisteme de turbine cu viteză fixă și reglarea unghiului de a-

tac (active pitch control).

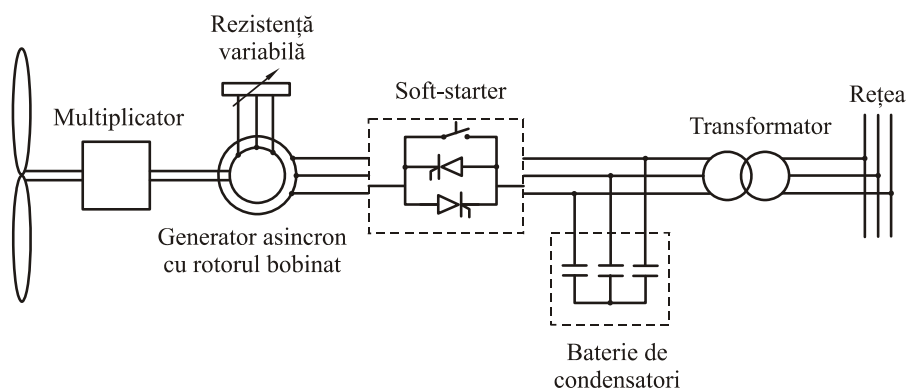


**Fig. II.11.** Turbină eoliană de tip A – cu viteză fixă (conceptul danez).

Generatorul asincron cu rotorul în scurtcircuit este conectat la rețea prin intermediul unui transformator. Datorită fluctuațiilor de tensiune, generatorul asincron absoarbe putere reactivă de la rețea. Din acest motiv, configurația prezentată utilizează o baterie de condensatoare cu rolul de compensator de energie reactivă. Conectarea la rețea se realizează prin intermediul unui soft-starter, cu rolul de a preveni șocurile de curent în cazul în care condițiile de cuplare în paralel a celor două surse de energie electrică (generator asincron și rețea) nu sunt îndeplinite.

Indiferent de metoda de control a puterii generate, trebuie de menționat că fluctuațiile vitezei vântului se transformă în fluctuații ale puterii mecanice și în consecință în fluctuații ale puterii electrice. În cazul unei rețele slabe, aceste fluctuații ale puterii electrice conduc la apariția unor variații ale tensiunii în punctul de conexiune cu rețeaua. Principalele dezavantaje ale acestei configurații constau în faptul că necesită un sistem de control (reglare) a vitezei, o rețea puternică și trebuie să fie capabil să suporte solicitări mecanice apreciabile.

## 2. Tipul B: turbine cu viteză variabilă limitată

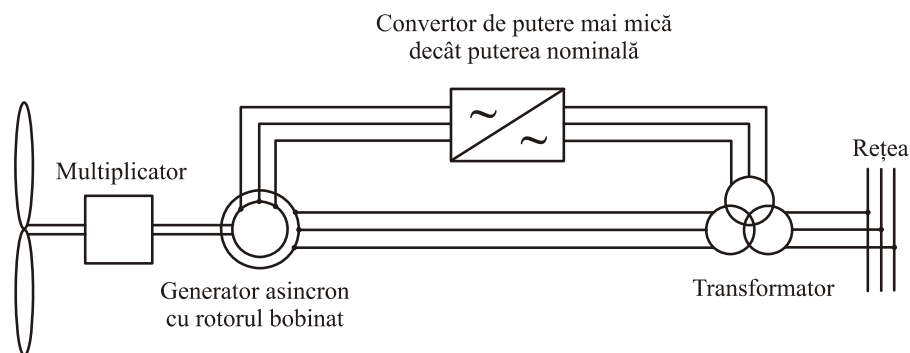


**Fig. II.12.** Turbină eoliană de tip B – cu viteză variabilă limitată.

Această configurație utilizează un generator asincron cu rotorul bobinat (GARB), care are conectată în circuitul rotorului o rezistență variabilă. Generatorul asincron este conectat la rețea prin intermediul unui transformator. Conectarea fără șocuri de curent se face cu ajutorul dispozitivului soft-starter, iar bateria de condensatoare asigură compensarea puterii reactive. Valoarea rezistenței rotorice se modifică prin intermediul unui convertor optic montat pe axul rotorului. Cuplarea optică elimină necesitatea sistemului inele – perii care este mai scump și necesită operații de întreținere. Reglarea puterii generate de sistem se realizează prin modificarea alunecării mașinii asincrone, alunecare care se modifică prin variația rezistenței circuitului rotoric. Plaja de reglare dinamică a vitezei este impusă de valoarea rezistenței variabile din circuitul rotoric. Domeniul obișnuit este de 0 – 10 % peste valoarea vitezei de sincronism. Energia suplimentară produsă de generator este disipată sub formă de căldură prin rezistența conectată în circuitul rotoric.

## Tipul C: turbine cu viteză variabilă și convertor de putere mai mică decât puterea nominală

Această configurație are la bază un generator asincron cu rotorul bobinat în regim de dublă alimentare (MADA).



**Fig. II.13.** Turbină eoliană de tip C – cu viteză variabilă și convertor de putere mai mică decât puterea nominală.

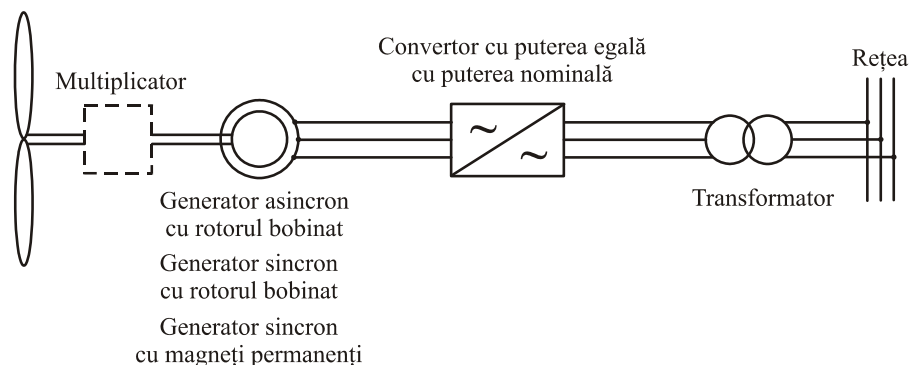
Aborele generatorului asincron în regim de dublă alimentare este cuplat la arborele turbinei prin intermediul multiplicatorului.

Înfășurările statorice ale generatorului sunt conectate la rețea, iar înfășurările rotorice sunt conectate la un convertor electronic cu reacție după curent. În acest mod, frecvențele mecanică și electrică ale rotorului sunt decuplate, deoarece convertorul electronic de putere compensează diferența dintre frecvența mecanică și frecvența electrică, injectând în rotor un curent de frecvență variabilă. Prin aceasta devine posibilă funcționarea turbinei la viteză variabilă. Viteza rotorului se poate regla în scopul dorit, de exemplu: fie pentru obținerea cantității maxime de energie, fie pentru micșorarea zgomotului produs de turbină.

În cazul acestei configurații, controlul puterii aerodinamice se face în mod uzual prin reglarea unghiului de atac al palei elicei.

Puterea nominală a convertorului electronic de frecvență este de aproximativ 30% din puterea nominală a generatorului asincron. Convertorul realizează atât compensarea puterii reactive cât și conectarea la rețea fără șocuri de curent. Uzual, sistemul funcționează în domeniul -40% - +30% din viteza de sincronism. Deoarece puterea convertorului de frecvență este mult mai mică decât puterea nominală, această configurație devine atractivă din punct de vedere economic. Prezintă însă dezavantajul prezenței ansamblului inele – perii și al protecției împotriva avariilor ce pot apare în rețea.

*Tipul D: turbine cu viteză variabilă și convertor cu putere egală cu puterea nominală*



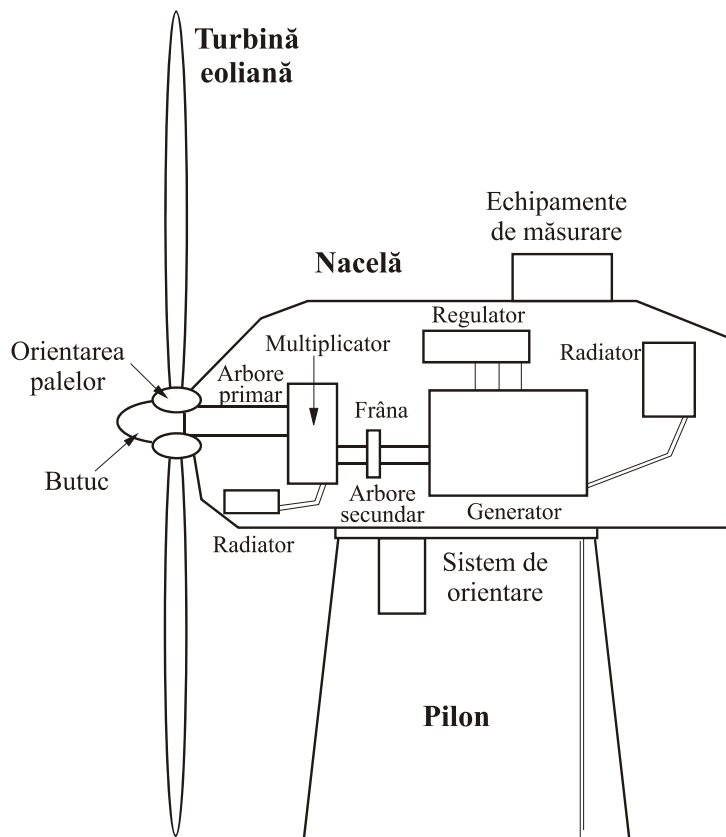
**Fig. II.14.** Turbină eoliană de tip D – cu viteză variabilă și convertor cu puterea egală cu puterea nominală.

Această configurație se mai numește „turbina cu acționare directă”, deoarece nu necesită în mod esențial un multiplicator. La arborele turbinei se poate conecta un generator sincron multipolar de viteză mică, cu rotorul bobinat și cu inele, care are aceeași viteză cu viteza de rotație a turbinei și care transformă energia mecanică în energie electrică. Generatorul sincron poate fi excitat electric (dacă are rotorul bobinat) (GSRB) sau poate fi excitat cu magneți permanenți în cazul generatorului sincron cu magneți permanenți (GSMP). Se mai poate folosi ca generator electric și un generator asincron în regim de dublă alimentare (MADA).

Satorul generatorului electric nu este conectat direct la rețea, ci prin intermediul unui con-

vertor electronic de frecvență convertorul de frecvență asigură compensarea puterii reactive și cuplarea la rețea fără șocuri de curent. Ca și în cazul anterior, limitarea puterii mecanice a vântului se realizează prin reglarea unghiului de atac.

În figura II.15 sunt prezentate principalele componente ale unui sistem eolian.



**Fig. II.15.** Turbină eoliană de tip D – cu viteză variabilă și convertor cu puterea egală cu puterea nominală.

**Palele sau captorul de energie** sunt realizate dintr-un amestec de fibre de sticlă și materiale compozite. Ele au rolul de a capta energia vântului și de a transfera rotorului turbinei. Profilul lor este rodul unor studii aerodinamice complexe, de el depinzând randamentul turbinei. Astfel, diametrul palelor (sau suprafața acoperită de acestea) este în funcție de puterea dorită. De exemplu, pentru turbinele cu trei pale se folosesc următoarele dimensiuni:

- o putere 10 kW necesită un diametru de 7 m pentru suprafața descrisă de pale;
- o putere 0,2 MW necesită un diametru de 27 m pentru suprafața descrisă de pale;
- o putere 2 MW necesită un diametru de 72 m pentru suprafața descrisă de pale.

Lățimea palelor impune valoarea cuplului de pornire, care va fi cu atât mai mare cu cât palele sunt mai late;

Profilul palelor depinde de cuplul dorit în funcționare.

Numărul de pale depinde de eoliană. În prezent, sistemul cu trei pale este cel mai utilizat, deoarece asigură limitarea vibrațiilor, a zgomotului și a oboselii rotorului, față de sistemele mono-pală sau bi-pală. Coeficientul de putere este cu 10 % mai mare pentru sistemul bi-pală față de cel mono-pală, iar creșterea este de 3% între sistemul cu trei pale față de două pale. În plus, este un compromis bun între cost și viteza de rotație a captorului eolian și avantaje din punct de vedere estetic pentru sistemul cu trei pale, față de cel cu două pale.

**Butucul** este prevăzut cu un sistem pasiv (aerodinamic), activ (hidraulic) sau mixt (active stall) care permite orientarea palelor pentru controlul vitezei de rotație a turbinei eoliene (priza de vânt).

• Controlul activ, prin motoare hidraulice, numit și "pitch control". Acest sistem asigură modificarea unghiului de incidență a palelor pentru a valorifica la maximum vântul instantaneu și pentru a limita puterea în cazul în care vântul depășește viteza nominală. În general, sistemul rotește pa-

lele în jurul propriilor axe (mișcare de pivotare), cu câteva grade, în funcție de viteza vântului, astfel încât palele să fie poziționate în permanență sub un unghi optim în raport cu viteza vântului, astfel încât să se obțină în orice moment puterea maximă. Sistemul permite limitarea puterii în cazul unui vânt puternic (la limită, în caz de furtună, trecerea palelor în "drapel").

- Controlul aerodinamic pasiv, numit și "stall control". Palele eolienei sunt fixe în raport cu butucul turbinei. Ele sunt concepute special pentru a permite deblocarea în cazul unui vânt puternic. Deblocarea este progresivă, până când vântul atinge viteza critică. Acest tip de control este utilizat de cea mai mare parte a eolienei, deoarece are avantajul că nu necesită piese mobile și sisteme de comandă în rotorul turbinei.

- Ultimul tip de control, vizează utilizarea avantajelor controlului pasiv și al celui activ, pentru a controla mai precis conversia vântului în energie electrică. Acest sistem este numit control activ cu deblocare aerodinamică, sau "active stall". El este utilizat pentru eolienele de foarte mare putere.

**Arborele primar:** este arborele rotorului turbinei eoliene. Se mai numește arborele lent, deoarece el se rotește cu viteze de ordinul a 20 - 40 rot/min. Prin intermediul multiplicatorului, el transmite mișcarea, arborelui secundar.

**Multiplicatorul mecanic de viteză** permite transformarea puterii mecanice, caracterizată prin cuplu mare și viteză mică specifică turbinei eoliene, în putere de viteză mai ridicată, dar cuplu mai mic. Aceasta deoarece viteza turbinei eoliene este prea mică, iar cuplul prea mare, pentru a fi aplicate direct generatorului. Multiplicatorul asigură conexiunea între arborele primar (al turbinei eoliene) și arborele secundar (al generatorului).

Există mai multe tipuri de multiplicatoare, cum ar fi:

a) Multiplicatorul cu una sau mai multe trepte de roți dințate, care permite transformarea mișcării mecanice de la 19-30 rot/min la 1500 rot/min. Axele de rotație ale roților dințate sunt fixe în raport cu carcasa.

b) Multiplicatorul cu sistem planetar, care permite obținerea unor rapoarte de transmisie mari, într-un volum mic. În cazul acestora, axele roților numite sateliți nu sunt fixe față de carcasă, ci se rotesc față de celelalte roți.

Există și posibilitatea antrenării directe a generatorului, fără utilizarea unui multiplicator.

**Arborele generatorului sau arborele secundar** antrenează generatorul electric, sincron sau asincron, ce are una sau două perechi de poli. El este echipat cu o frână mecanică cu disc (dispozitiv de securitate), care limitează viteza de rotație în cazul unui vânt violent. Pot exista și alte dispozitive de securitate.

**Generatorul electric** asigură producerea energiei electrice. Puterea sa atinge 4,5 MW pentru cele mai mari eoliene. În prezent se desfășoară cercetări pentru realizarea unor eoliene de putere mai mare (5 MW). Generatorul poate fi de curent continuu sau de curent alternativ. Datorită prețului și randamentului, se utilizează, aproape în totalitate, generatoare de curent alternativ. Generatoarele de curent alternativ pot fi sincrone sau asincrone, funcționând la viteză fixă sau variabilă.

#### *Generatorul sincron*

Generatorul sincron sau mașina sincronă (MS) se poate utiliza în cazul antrenării directe, respectiv legătura mecanică dintre arborele turbinei eoliene și cel al generatorului se realizează direct, fără utilizarea unui multiplicator. În consecință, generatorul este conectat la rețea prin intermediul unui convertor static. Dacă generatorul este cu magneți permanenți, el poate funcționa în mod autonom, neavând nevoie de excitație. Excitația unei mașini sincrone se poate realiza în variantele:

- *Excitație electrică.* Bobinele circuitului de excitație (situate pe rotor) sunt alimentate în curent continuu, prin intermediul unui sistem de perii și inele colectoare fixate pe arborele generatorului. Alimentarea se poate face prin intermediul unui redresor, ce transformă energia de curent alternativ a rețelei, în curent continuu. Există însă mai multe metode de realizare a excitației. Generatoarele sincrone cu excitație electrică sunt cele mai utilizate în prezent.

- Cu magneți permanenți (MSMP). Sursa câmpului de excitație o constituie magneții permanenți situați pe rotor, fiind astfel independentă de rețea. Acest tip de mașină are tendința de a fi

din ce în ce mai utilizată de către constructorii de eoliene, deoarece ea funcționează autonom, iar construcția în ansamblu, este mai simplă.

#### *Generatorul asincron*

Mașina asincronă (MAS) este frecvent utilizată, deoarece ea poate suporta ușoare variații de viteză, ceea ce constituie un avantaj major pentru aplicațiile eoliene, în cazul cărora viteza vântului poate evolua rapid, mai ales pe durata rafalelor. Acestea determină solicitări mecanice importante, care sunt mai reduse în cazul utilizării unui generator asincron, decât în cazul generatorului sincron, care funcționează în mod normal, la viteză fixă. Mașina asincronă este însă puțin utilizată pentru eoliene izolate, deoarece necesită baterii de condensatoare care să asigure energia reactivă necesară magnetizării.

Din punct de vedere constructiv, mașinile asincrone se realizează în două variante.

- Cu rotor bobinat. Înfășurările rotorice, conectate în stea, sunt legate la un sistem de inele și perii ce asigură accesul la înfășurări, pentru conectarea unui convertor static în cazul comenzii prin rotor (mașina asincronă dublu alimentată - MADA).

- Cu rotorul în scurtcircuit. Rotorul este construit din bare ce sunt scurtcircuitate la capete prin intermediul unor inele. Înfășurările rotorice nu sunt accesibile din exterior.

**Sistemul electronic de control** a funcționării generale a eolienei și a mecanismului de orientare, are rolul de a asigura pornirea eolienei, reglarea înclinării palelor, frânarea, ca și orientarea nacellei în raport cu vântul.

**Sistemul de răcire.** Sunt prevăzute sisteme de răcire, atât pentru multiplicatorul de viteză ce transmite eforturile mecanice între cei doi arbori, cât și pentru generator. Ele sunt constituite din radiatoare de apă sau ulei și ventilatoare. Răcirea cu ulei este utilizată pentru multiplicatoare.

**Dispozitivele de măsurare a vântului** sunt de două tipuri: o giruetă pentru evaluarea direcției și un anemometru pentru măsurarea vitezei. Informațiile sunt transmise sistemului numeric de comandă, care realizează reglajele în mod automat

**Sistemul de orientare** a nacellei este constituit dintr-o coroană dințată (cremalieră) echipată cu un motor. El asigură orientarea eolienei și "blocarea" acesteia pe axa vântului, cu ajutorul unei frâne.

**Pilonul** este, în general, un tub de oțel și un turn metalic. El susține turbina eoliană și nacela. Alegerea înălțimii turnului de oțel este importantă, deoarece trebuie realizat un bun compromis între prețul de construcție și expunerea dorită la vânt. În consecință, odată cu creșterea înălțimii, crește viteza vântului, dar și prețul. În general, înălțimea pilonului este puțin mai mare decât diametrul palelor. Înălțimea eolienei este cuprinsă între 40 și 80 de metri. Prin interiorul pilonului trec cablurile care asigură conectarea la rețeaua electrică.

### **III. GENERATOARE CU VITEZĂ VARIABILĂ**

#### **III.1. Generatorul asincron cu rotorul bobinat**

Generatorul asincron cu rotorul bobinat (GARB) sau în limba engleză Wound Rotor Induction Generator (WRIG) este prevăzut cu câte o înfășurare trifazară simetrică pe ambele armături (stator și rotor), cele două înfășurări având obligatoriu același număr de poli. Deoarece în această variantă constructivă mașina poate fi alimentată prin cele două înfășurări, se poate vorbi de mașina asincronă dublu alimentată (MADA).

În regim de dublă alimentare, mașina asincronă prevăzută cu un convertor electronic de putere care alimentează înfășurarea rotorică prin intermediul inelelor colectoare și a periilor de contact poate funcționa atât în regim de motor cât și în regim de generator, realizând transferul de putere în ambele direcții.

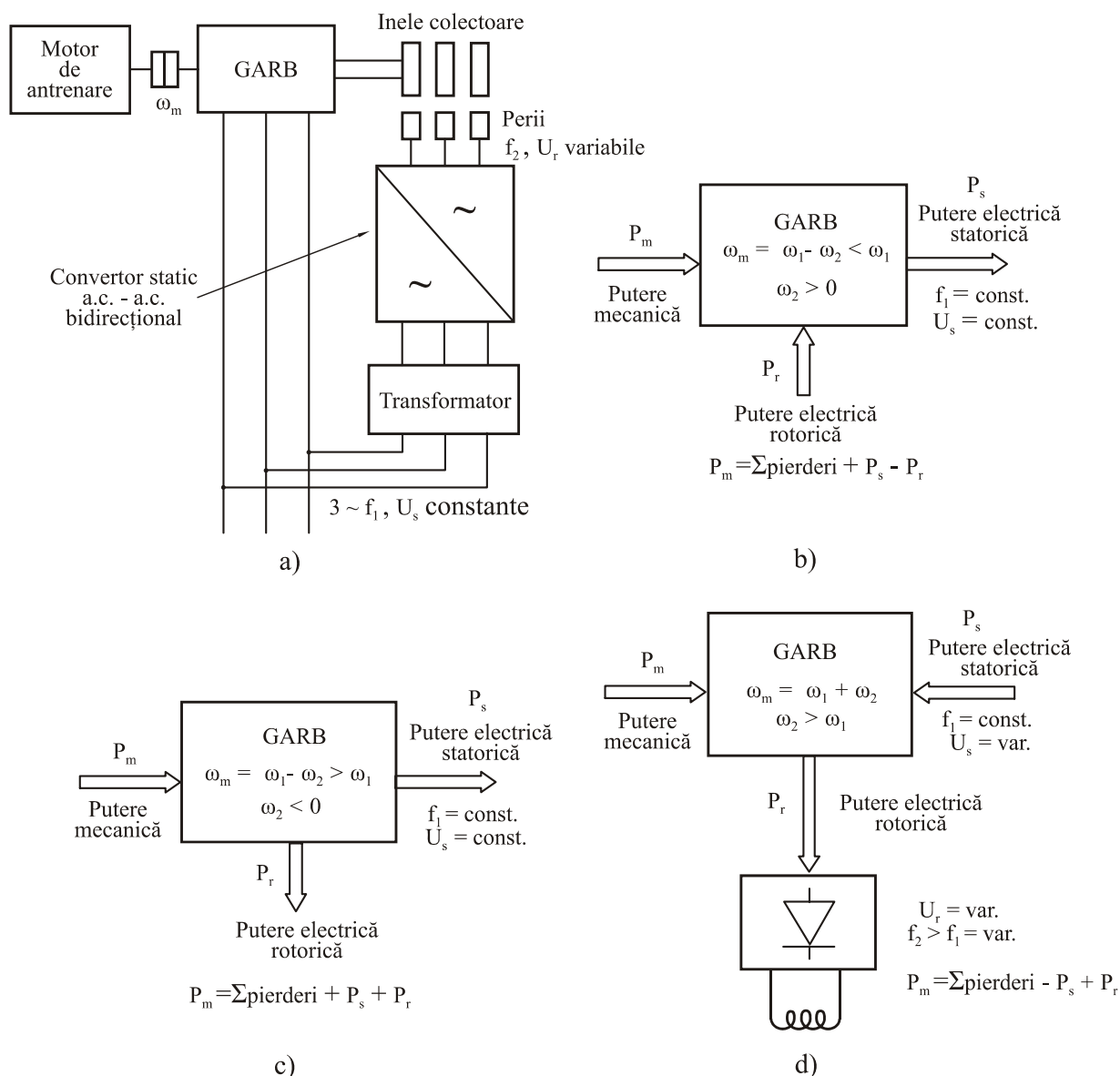
Funcționând ca generator, MADA poate oferi la bornele statorului tensiune constantă sau reglabilă  $U_s$  la frecvența  $f_1$ , în timp ce rotorul este alimentat prin intermediul unui convertor static de putere cu o tensiune variabilă  $U_r$  la frecvență  $f_2$ . Circuitul rotoric poate să absoarbă sau să cedeze energie electrică. Deoarece numărul de poli ale celor două înfășurări este același, conform teoremei frecvenței, viteza electrică  $\omega_m$  va fi:

$$\omega_m = \omega_1 \pm \omega_2; \quad \omega_m = \Omega_r \cdot p, \quad (\text{II.18})$$

în care,  $p$  este numărul de perechi de poli, iar  $\Omega_r$  este viteza mecanică a rotorului.

În relația (II.18), semnul (+) corespunde cazului în care succesiunea fazelor rotorice este aceeași cu succesiunea fazelor statorice și  $\omega_m < \omega_1$ , ceea ce corespunde funcționării subsincrone. Semnul (-) corespunde cazului în care se inversează succesiunea fazelor rotorice, când  $\omega_m > \omega_1$ , ceea ce corespunde funcționării suprasincrone.

Pentru a se obține frecvență constantă la ieșire ( $f_1 = \text{const.}$  sau  $\omega_1 = \text{const.}$ ), frecvența rotorică  $f_2$ , respectiv  $\omega_2$  trebuie modificată în funcție de viteza rotorică. În acest fel în condițiile în care viteza rotorului este variabilă, frecvența și tensiunea la ieșire pot fi menținute constante controlând tensiunea, frecvența și succesiunea fazelor în circuitul rotorului.



**Fig. II.16.** Principalele regimuri de funcționare ale generatorului asincron cu rotorul bobinat: a) – configurația de bază; b) – regimul de generator subsincron ( $\omega_r < \omega_1$ ); c) – regimul de generator suprasincron ( $\omega_r > \omega_1$ ); d) – regim de excitatoare fără perii (puterea electrică generată este debitată prin rotor).

Principalele regimuri de funcționare ale generatorului asincron cu rotorul bobinat sunt prezentate în figura II.16. Figurile II.16, b) și c) ilustrează regimurile de generator subsincron și supra-sincron definite anterior. În regim de motor, statorul absoarbe putere activă, iar pentru rotor se inversează sensul de circulație al puterii active.

Alunecarea  $s$  se definește ca:

$$s = \frac{\omega_2}{\omega_1} \quad (II.19)$$

$s > 0$ , definește regimul de funcționare subsincron, iar  $s < 0$ , definește regimul de funcționare suprasincron.

Un GARB funcționează în general la  $\omega_2 \neq 0$  ( $s \neq 0$ ) și păstrează caracteristicile mașinii asincrone. Puterea electrică este livrată în principal prin circuitul statorului, însă în cazul funcționării în regim suprasincron, o putere proporțională cu alunecarea și puterea statorică ( $s \cdot P_s$ ) este livrată prin circuitul rotorului. Într-o plajă limitată de variație a vitezei rotorice, de exemplu între  $s_{max}$  și  $-s_{max}$ , puterea nominală a convertorului conectat la rotor – excuzând necesitatea furnizării de putere reactivă rotorului – va fi  $P_{conv} = |s_{max}| \cdot P_s$ . Pentru a valoare tipică a alunecării critice  $s_{max}$  cuprinsă între  $\pm 0,2\%$  și  $0,25\%$ , puterea nominală a convertorului și prețul său va fi cuprinsă între  $20\%$  și  $25\%$  din puterea debitată de stator.

La viteză maximă de funcționare, GARB va debita puterea maximă  $P_{max}$ :

$$P_{max} = P_s + P_{rmax} = P_s + |s| \cdot P_s, \quad (II.20)$$

$P_s$  fiind puterea debitată de generator la viteza  $\omega_m = \omega_1$ . O putere mai mare se va obține la o viteză mai mare decât viteza nominală:

$$\omega_{mmax} = \omega_1 (1 + |s_{max}|) \quad (II.21)$$

În consecință, GARB este proiectat electric pentru puterea  $P_s$  la  $\omega_m = \omega_1$ , dar mecanic la  $\omega_{mmax}$  și  $P_{max}$ .

Capacitatea GARB de a debita putere electrică la viteză variabilă dar la tensiune și frecvență constante reprezintă un avantaj în crearea unei flexibilități sporite în conversia energiei, oferind o stabilitate sporită pentru controlul tensiunii și frecvenței în rețelele la care sunt conectate aceste generatoare.

Producerea energiei reactive de către GARB depinde esențial de capacitatea convertorului conectat la circuitul rotoric de a produce acest tip de energie. Dacă convertorul funcționează la factor de putere unitar datorită rețelei la care este conectat, puterea reactivă necesară mașinii trebuie să fie oferită de convertorul conectat la circuitul rotorului, ceea ce conduce la creșterea puterii nominale a acestuia și prin aceasta la creșterea prețului său. Din această cauză, GARB este portivit unui regim de funcționare în care factorul de putere este unitar la sarcină statorică nominală.

Producerea unei importante cantități de putere reactivă în rețea se realizează încă cu generatoare sincrone (GS) sau cu GARB care funcționează la sincronism ( $s = 0$ ,  $\omega_2 = 0$ ) și cu convertoare de tensiune PWM „spate în spate” conectate în circuitul rotoric și special controlate în acest scop.

GARB pot fi folosite pentru producerea puterii electrice livrate numai prin circuitul rotoric, destinată alimenterii unor sarcini în curent continuu, conform figurii II.16, d). Pentru a controla tensiunea continuă sau curentul continuu destinat sarcinii, se reglează tensiunea aplicată statorului la frecvență constantă  $\omega_1$ , cu ajutorul unui dispozitiv de ieftin de modificare a tensiunii trifazate (ATR trifazat). Dacă viteza rotorului crește, pentru a menține constantă valoarea curentului continuu prin sarcină tensiunea statorică trebuie redusă ( $\omega_2 = \omega_1 + \omega_m$ ). Cu cât mașina are un număr mai mare de poli ( $2p = 6, 8, 12$ ), puterea de c.a. necesită de circuitul statorului devine tot mai mică, astfel încât puterea electrică de la ieșire provine în principal de la arbore (putere mecanică). O astfel de configurație este adecvată pentru excitatoarele fără perii destinate motoarelor sau generatoarelor sincrone comandate în stator prin convertoare de putere, la care chiar la viteză zero este necesară prezența câmpului magnetic inductor în mașină.

Înfășurările celor două armături sunt similare și au rolul de a produce solenații învârtitoare capabile să producă câmpuri magnetice învârtitoare în întrefierul uniform (influența creștăturilor se poate neglija sau lua în considerație prin intermediul coeficientului lui Carter  $k_C = 1.02 \div 1.5$ . Inducția instantanee va avea expresia:

$$B_\delta(x, t) = \frac{\mu_0 F_{s,r}(x, t)}{\delta \cdot k_C (1 + k_s)}, \quad (II.22)$$

în care:

-  $F_{s,r}$  este solenația instantanee (tensiunea magnetomotoare) corespunzătoare unui pol inductor la momentul  $t$  și coordonata spațială  $x$ , pentru stator ( $s$ ) și respectiv pentru rotor ( $r$ ).

- $\delta$  reprezintă dimensiunea întrefierului.
- $k_C$  este coeficientul lui Carter care ține cont de creșterea dimensiunii întrefierului  $\delta$  datorită deschiderii creștăturilor.
- $k_s$  reprezintă contribuția miezului de fier la reluctanța echivalentă a traseului fluxului principal.

Pentru a produce un câmp magnetic învârtitor, solenațiile celor două armături trebuie să fie de forma:

$$F_s(\theta_s, t) = F_{Is} \cos(p\theta_s - \omega_1 t), \quad (II.23)$$

$$F_r(\theta_r, t) = F_{Ir} \cos(p\theta_r \pm \omega_2 t), \quad (II.24)$$

în care  $p$  este numărul de perechi de poli ai mașinii sau numărul de perioade al unei câmpului magnetic din întrefier, iar  $\theta_{s,r}$  reprezintă coordonata spațială statorică, respectiv rotorică la momentul  $t$ .  $F_{Is,r}$  sunt amplitudinile solenațiilor celor două armături. Solenația rotorică este produsă de curenții rotorici de frecvență  $\omega_2$ .

La viteză de rotație constantă, coordonatele spațiale unghiulare vor fi:

$$p\theta_s = \omega_1 t; \quad p\theta_r = p\theta_s - \omega_1 t + \gamma; \quad \omega_r = \Omega_r p, \quad (II.25)$$

în care  $\omega_r$  este viteza rotorului în radiani electrici pe secundă (rad/sec),  $\Omega_r$  este viteza mecanică, iar  $\gamma$  este poziția inițială a rotorului la momentul  $t = 0$ . În consecință, solenația rotorică  $F_r(\theta_s, t)$  devine:

$$F_r(\theta_s, t) = F_{Ir} \cos[p\theta_s - (\omega_r \pm \omega_2)t + \gamma]. \quad (II.26)$$

Valoarea medie a cuplului electromagnetic și a puterii dezvoltate pe o perioadă vor fi diferite de zero numai în cazul în care cele două câmpuri învârtitoare vor fi fixe unul față de celălalt, adică:

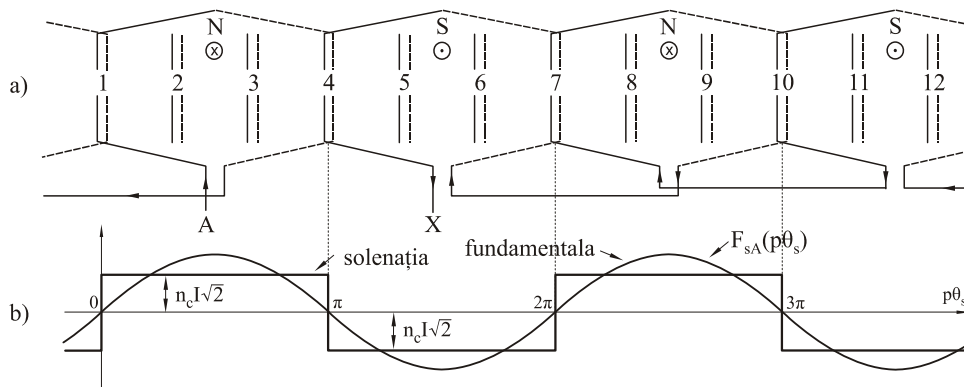
$$\omega_1 = \omega_r \pm \omega_2; \quad s = \frac{\omega_2}{\omega_1}. \quad (II.27)$$

Semnul (+) corespunde situației în care  $\omega_r < \omega_1$  și în acest caz, undele solenațiilor rotorică și statorică se rotesc în același sens. Semnul (-) corespunde cazului în care  $\omega_r > \omega_1$  și în acest caz, cele două solenații se rotesc în sensuri contrare. De asemenea, cuplul este diferit de zero dacă  $\gamma \neq 0$ , adică în cazul în care cele două solenații sunt defazate.

Pentru a produce un o solenație învârtitoare cu o înfășurare trifazată simetrică, fiecare înfășurare de fază ce compune înfășurarea trifazată, trebuie să producă în mod independent câte o solenație spațială (sinusoidală), cele trei solenații produse de având aceeași amplitudine, dar fiind defazate între ele cu  $2\pi/3$  radiani electrici:

$$(F_{sA,B,C}(\theta_s, t))_{t=0} = \frac{2}{3} F_{Is} \cos\left(p\theta_s - (i-1)\frac{2\pi}{3}\right); \quad i=1,2,3. \quad (II.28)$$

Fiecare solenație de fază trebuie să producă  $2p$  semiperioade într-o perioadă mecanică (într-o rotație completă). Dacă înfășurarea de fază are numai o bobină pe pol și fază, vor exista  $2p$  bobine pe fază și  $2p$  creștături pe fază, fiecare bobină ocupând jumătate din creștătură, după cum se poate remarca în figura II.17.



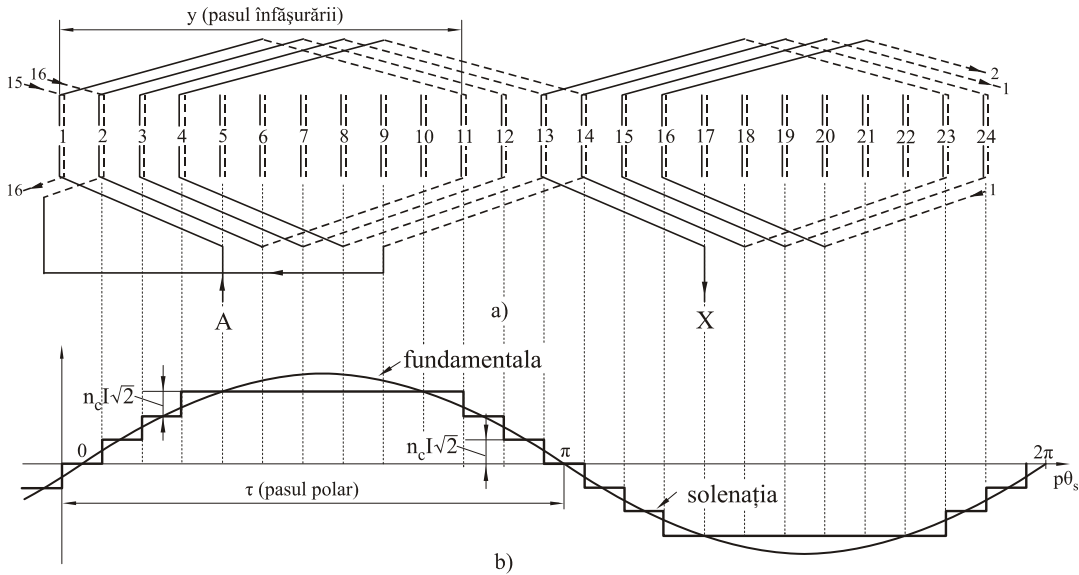
**Fig. II.17.** Înfășurare trifazată cu  $2p = 4$  poli și  $Z_s = 12$  creștături; a) – bobinele fazei A – X conectate în serie; b) – solenația fazei A pentru valoarea maximă a curentului de fază.

La un anumit moment (valoare constantă a curentului de fază), distribuția spațială a solenației de fază este dreptunghiulară. Fundamentală solenației dreptunghiulare va avea expresia:

$$F_{sA}(p, \theta_s) = \frac{2}{\pi} n_c I \sqrt{2} \cos(p\theta_s), \quad (\text{II.29})$$

în care  $n_c$  reprezintă numărul de spire al bobinei, iar  $I$  valoarea eficace a curentului de fază.

Deoarece înfășurarea are o singură creștătură pe pol și fază ( $q = 1$ ), conținutul armonic al solenației de fază este ridicat (forma solenației este dreptunghiulară). Pentru a reduce conținutul de armonici, se introduc mai multe trepte în forma solenației (care va deveni mai apropiată de o sinusoidă), prin mărirea numărului de creștături pe pol și fază, după cum se poate remarca în figura II.18, în care  $q = 4$ .



**Fig. II.18.** Înfășurare trifazată în două straturi cu parametrii:  $2p = 2$ ,  $Z = 24$ ,  $y/\tau = 10/12$ ,  $q = 4$ ;  
a) – înfășurarea fazei A; b) – solenația (tensiunea magnetomotoare) fazei A pentru valoarea maximă a curentului de fază.

Valoarea maximă a fundamentalei spațiale a solenației va fi în cazul înfășurării repertizate în  $q$  creștături pe pol și fază exemplificată în figura II.18, b) de forma:

$$F_{sA1} = \frac{2w_l k_{d1} k_{y1} I \sqrt{2}}{\pi p}, \quad (\text{II.30})$$

în care  $w_l$  reprezintă numărul de spire al înfășurării de fază. Similar, valoarea maximă a armonicii spațiale de ordin  $v$ , va fi:

$$F_{sAv} = \frac{2w_l k_{dv} k_{yv} I \sqrt{2}}{v \pi p}, \quad (\text{II.31})$$

în care  $k_{dv}$  reprezintă factorul de repartiție ce pune în evidență influența repartiției înfășurării de fază în  $q$  creștături pe pol și fază, iar  $k_{yv}$  este factorul de modificare a pasului înfășurării care pune în evidență scurtarea pasului înfășurării  $y$  cu pasul polar  $\tau$ :

$$k_{dv} = \frac{\sin \frac{v\pi}{2m}}{\frac{v\pi}{2mq}}; \quad k_{yv} = \sin \frac{vy}{\tau} \frac{\pi}{2}. \quad (\text{II.32})$$

După cum este cunoscut,  $q$  este numărul de creștături pe pol și fază, iar  $m$  este numărul de faze:

$$q_{s,r} = \frac{Z_{s,r}}{2pm}. \quad (\text{II.33})$$

Deoarece polii pozitivi și negativi sunt identici, armonicile spațiale de ordin par vor fi nule. Datorită simetriei curenților de pe cele trei faze (amplitudini egale și defazaj de  $2\pi/3$  radiani electrice), din spectrul solenației vor lipsi și armonicile de ordin multiplu de trei. Vor exista numai armonicile de ordin  $v = 1, 5, 7, 11, 13, 17, 19, \dots$

Armonicile de ordin  $v = 6k + 1$  (7,13, 19 ...) se consideră a fi de secvență pozitivă, iar cele de ordin  $v = 6k - 1$  (5,11, 17 ...), de secvență negativă.

Solenația rezultată din contribuția celor trei solenații de fază va avea amplitudinea:

$$F_{sv} = \frac{3}{2} F_{sAv} = \frac{3w_l k_{dv} k_{yv} I \sqrt{2}}{v \pi p} . \quad (II.34)$$

Similar, se pot scrie expresiile solenațiilor produse de înfășurarea rotorică.

Pentru a preveni apariția cuplurilor sincrone parazite, numărul creștăturilor statorice trebuie să difere de numărul creștăturilor rotorice:

$$Z_s \neq Z_r , \quad q_s \neq q_r . \quad (II.35)$$

Existența armonicilor conduce la fenomene nedorite, cum ar fi forțele radiale datorate excentricității rotorului, care în cazul GARB tind să fie mai mari decât în cazul generatoarelor asincrone cu rotorul în scurtcircuit.

În general, GARB se construiesc cu  $q$  întreg atât pentru înfășurarea statorică cât și pentru înfășurarea rotorică, iar pentru reducerea secțiunii conductoarelor elementare, se folosesc mai multe conductoare elementare de secțiune mai mică în paralel.

Reducerea efectului pelicular, în special la GARB de mare putere cu înfășurări cu bare necesită efectuarea de transpoziții.

Înfășurările rotorice și capetele de bobină ale acestora trebuie protejate împotriva forțelor centrifugale prin bandaje adecvate.

Acolo unde este posibil, tensiunea nominală a înfășurării rotorice trebuie să fie egală la alunecare maximă cu tensiunea nominală a înfășurării statorice, ca în cazul generatorului comandat în rotor cu convertoare statice de putere. În acest fel, transformatorul care alimentează convertorul static de putere poate fi eliminat, iar raportul de transformare al generatorului va avea valoarea:

$$k_{rs} = \frac{w_r k_{d1}^r k_{y1}^r}{w_s k_{d1}^s k_{y1}^s} \cong \frac{1}{|s_{\max}|} . \quad (II.36)$$

Problema esențială la aceste sisteme constă în evitarea conectării statorului la rețea dacă viteza rotorului este nulă ( $s = 1$ ), deoarece tensiunea indusă în înfășurările rotorului va fi de  $k_{rs}$  ori mai mare decât tensiunea lor nominală, periclitându-se astfel izolația și convertorul static de putere ce alimentează circuitul rotoric.

Dacă este necesar ca generatorul să funcționeze în regim de motor (în cazul acumulărilor prin pompare), pornirea se face prin alimentarea rotorului, cu ajutorul convertorului static bidirecțional conectat la înfășurările rotorice și cu înfășurările statorice în scurtcircuit. După demarare, la o anumită viteză  $\omega_{rmin} > \omega_{rn}(1 - |s_{\max}|)$ , se deschide circuitul statoric. În timp ce rotorul încă se rotește, circuitele de control pregătesc condițiile de sincronizare utilizând convertorul din circuitul rotoric pentru a aduce tensiunea indusă în circuitul statoric la frecvența și valoarea adecvată. După realizarea sincronizării, cu statorul conectat la rețea, mașina poate funcționa în siguranță în regim de motor.

În cazul GARB, înspre și dinspre circuitul rotoric se transferă prin intermediul inelelelor colectoare și a periilor de contact o putere electrică de valoare însemnată: până la  $|s_{\max}| \cdot P_{sN}$ . Dacă  $|s_{\max}| = 0,2$  această putere ajunge la 20% din puterea nominală a mașinii, spre deosebire de generatoarele sincrone la care puterea electrică necesară excitației transferată rotorului prin intermediul inelelor și a periilor este de cinci până la zece ori mai mică.

Există în funcțiune (de mai bine de cinci ani) unități GARB de 200 MW și 400 MW ceea ce înseamnă că prin intermediul sistemului inele – perii circulă puteri de ordinul zecilor de megawați. Pentru a reduce curentul care circulă prin inele și perii, în cazul GARB, puterea care circulă prin rotor se va utiliza la înaltă tensiune. Adecvate acestui scop sunt convertoarele PWM multinivel bidirecționale cu caracter de sursă de tensiune, cu tiristoare comandate MOSFET (MTC). Deoarece tensiunea rotorică este de ordinul kilovolților sau chiar mai mare, se impun măsuri corespunzătoare de asigurare a izolației înfășurărilor rotorice, a inelelor colectoare și a sistemelor port – perie.

### III.1.1. Ecuațiile de funcționare în regim staționar

Tensiunea autoindusă în înfășurările statorice cu circuitul rotoric deschis,  $E_1$ , are expresia:

$$E_1 = \sqrt{2} \pi f_1 w_1 k_{w1} \theta_{10} , \quad (II.37)$$

în care,  $w_1$  este numărul de spire al înfășurării de fază statorice,  $f_1$  este frecvența curentului statoric,  $k_{w1}$  este factorul de înfășurare egal cu:

$$k_{w1} = k_{d1} \cdot k_{y1} . \quad (II.38)$$

Fluxul polar  $\theta_{10}$  este dat de relația:

$$\theta_{10} = \frac{2}{\pi} B_{\delta 10} \tau l_i , \quad (II.39)$$

în care:  $l_i$  este lungimea ideală a miezului magnetic al statorului,  $\tau$  este pasul polar, iar  $B_{\delta 10}$  este valoarea maximă a inducției în întrefier:

$$B_{\delta 10} = \frac{\mu_0 F_{s10}}{\delta k_c (1 + k_s)} , \quad (II.40)$$

în care  $F_{s10}$  este amplitudinea solenației statorice corespunzătoare unui pol.

În relația (II.34), făcând  $v = 1$ , se obține:

$$F_{s10} = \frac{3 w_1 k_{w1} I_{10} \sqrt{2}}{\pi p} . \quad (II.41)$$

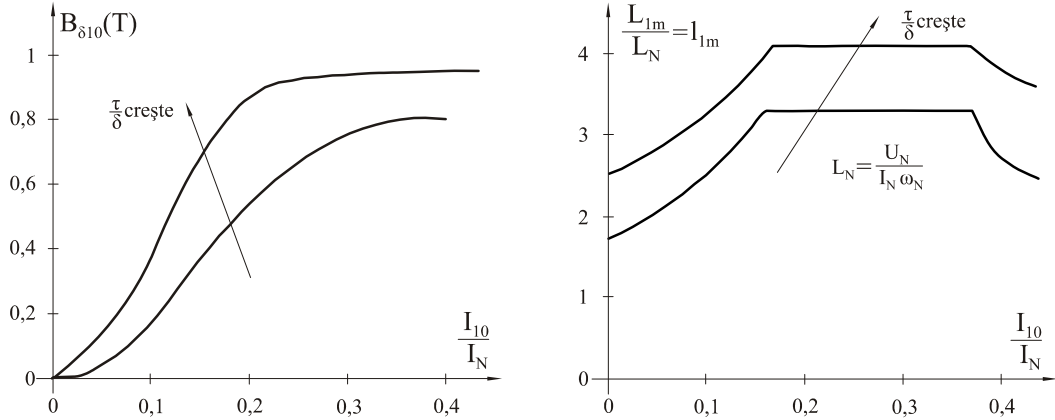
Aceeași valoare eficace a tensiunii induse în înfășurările statorului se mai poate scrie sub forma:

$$E_1 = \omega_1 L_{1m} I_{10} . \quad (II.42)$$

Din relațiile (II.37) ... (II.42), rezultă:

$$L_{1m} = \frac{6 \mu_0 (w_1 k_{w1})^2 \tau l_i}{\pi^2 \delta p k_c (1 + k_s)} . \quad (II.43)$$

Factorul de saturare  $k_s$  care afectează reluctanța circuitului magnetic al miezului variază în funcție de solenație statorică (deci în funcție de curent pentru o mașină dată), la fel ca și inductanța de magnetizare  $L_{1m}$ , după cum se poate observa în figura II.19.



**Fig. II.19.** Evoluția inducției în întrefier  $B_{\delta 10}$  (T) și a inductanței de magnetizare (în p.u. – unități relative) în funcție de curentul statoric (în p.u. – unități relative).

În afară de inductanța de magnetizare  $L_{1m}$ , statorul se mai caracterizează și prin rezistența ohmică a înfășurării de fază  $R_s$  și inductanța de scăpări (de dispersie)  $L_{s1}$ .

Același curent statoric, induce în înfășurările deschise ale rotorului tensiunea de valoare eficace  $E_2$ . Dacă viteza rotorului este  $\omega_r$ , alunecarea va fi  $s = (\omega_1 - \omega_r)/\omega_1$ , iar tensiunea indusă  $E_2$  va avea frecvența  $f_2 = sf_1$ :

$$E_{2s}(t) = E_{2s} \sqrt{2} \cos \omega_2 t , \quad (II.44)$$

în care:

$$E_{2s} = \sqrt{2} \pi s f_1 w_2 k_{w2} \theta_{10} . \quad (II.45)$$

În consecință,

$$\frac{E_{2s}}{E_1} = s \frac{w_2 k_{w2}}{w_1 k_{w1}} = s k_{rs} . \quad (II.46)$$

Circuitul rotoric, se caracterizează prin rezistența ohmică de fază  $R_r'$  și inductanța de scăpări  $L_{rl}'$ . În plus, rotorul este alimentat cu un sistem trifazat simetric de tensiuni cu frecvența  $f_2 = sf_1$  în fază cu tensiunile induse pe fiecare fază (de fază prescrisă).

*Observație.* Pentru ușurința scrierii în continuare, parametrii reali ai rotorului vor fi notați cu superscript  $r$  (real), iar mărimile raportate vor fi scrise ca și mărimile statorice.

În regim staționar de funcționare, ecuațiile tensiunilor de fază pentru stator și respectiv rotor vor fi scrise în complex, pentru stator la frecvența  $\omega_1$ , iar pentru rotor la frecvența  $\omega_2$ :

$$\begin{aligned} \underline{U}_s &= -\underline{E}_1 + (R_s + j\omega_1 L_{sl}) \underline{I}_s \quad \text{la } \omega_1, \\ \underline{U}_r &= -\underline{E}_{2s} + (R_r' + j\omega_2 L_{rl}') \underline{I}_r' \quad \text{la } \omega_2. \end{aligned} \quad (\text{II.47})$$

Raportarea parametrilor rotorului la stator se face principial ca și în cazul transformatoarelor, dar în acest caz, raportul de transformare are forma din relația (II.46). Prin înmulțirea membru cu membru a ecuației tensiunilor rotorice din (II.47) cu  $1/k_{sr}$ , rezultă:

$$\begin{aligned} \frac{\underline{U}_r}{k_{sr}} &= -\frac{\underline{E}_{2s}}{k_{sr}} + (R_r + j s \omega_1 L_{rl}) \underline{I}_r; \quad \text{cu } E_{2s} = s E_1 k_{sr}, \\ R_r &= \frac{R_r'}{k_{sr}^2}; \quad L_{rl} = \frac{L_{rl}'}{k_{sr}^2}; \quad \underline{U}_r = \frac{\underline{U}_r'}{k_{sr}}; \quad \underline{I}_r = \underline{I}_r' k_{sr}. \end{aligned} \quad (\text{II.48})$$

Împărțirea membru cu membru a ecuației (II.48) prin  $s$ , conduce la forma:

$$\frac{\underline{U}_r}{s} = -\frac{s E_1}{s} + \left( \frac{R_r}{s} + j \omega_1 L_{rl} \right) \underline{I}_r. \quad (\text{II.49})$$

Se poate interpreta că ecuația (II.49) a fost “convertită” la frecvența  $\omega_1$ , deoarece tensiunea indusă  $E_1$  corespunde frecvenței  $\omega_1$  ( $E_{2s}/s = E_1$ ):

$$\frac{\underline{U}_r}{s} = -\underline{E}_1 + \left( \frac{R_r}{s} + j \omega_1 L_{rl} \right) \underline{I}_r \quad \text{la } \omega_1. \quad (\text{II.50})$$

În relația (II.50), tensiunea rotorică  $U_r$  și curentul rotoric  $I_r$  evoluează în timp cu frecvența  $\omega_1$ , ceea ce înseamnă că aceste mărimi au fost scrise în coordonate statorice. S-a efectuat astfel o “transformare de rotație”. Pe de altă parte, toți parametrii rotorici au fost raportați la stator. Din punct de vedere fizic, ecuația (II.50) se referă la un rotor în repaus, care poate produce sau absorbi putere activă pentru acoperirea pierderilor și care în regim de motor debitează putere mecanică.

În final, se poate considera că tensiunea  $E_1$  este produsă curentii  $I_s$  și  $I_r$  (de aceeași frecvență  $\omega_1$ ), ambii acționând asupra inductanței de magnetizare  $L_{1m}$  de vreme ce parametrii rotorici au fost raportați la stator.

$$\underline{E}_1 = -j \omega_1 L_{1m} (\underline{I}_s + \underline{I}_r) = -j \omega_1 L_{1m} \underline{I}_m. \quad (\text{II.51})$$

Schema echivalentă realizată pe baza ecuațiilor (II.48), (II.49) și (II.50) este prezentată în figura II.20.

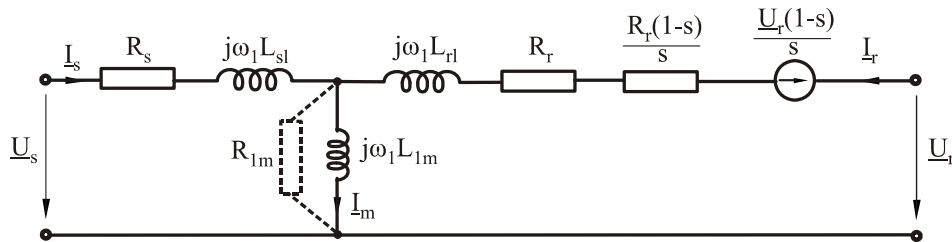


Fig. II.20. Schema echivalentă a GARB în regim staționar

Cu privire la schema echivalentă din figura II.20 se impun două observații:

- Pierderile în mașină se datorează pierderilor joule în înfășurările statorice și rotorice  $p_{js} + p_{jr}$ , pierderile în fier  $p_{Fe}$  și pierderilor mecanice (prin frecare și ventilație)  $p_{mec}$ :

$$p_{js} = 3 R_s I_s^2, \quad p_{jr} = 3 R_r I_r^2, \quad p_{Fe} = 3 R_{lm} (s \omega_1) I_{s0}^2, \quad (\text{II.52})$$

în care  $I_{s0}^2$  reprezintă componenta activă a curentului statoric de mers în gol.

- Rezistența  $R_{lm}$  care reprezintă pierderile în fier depinde de frecvența de alunecare  $\omega_2 = s \omega_1$  din care cauză în fierul rotoric vor apare pierderi ce nu pot fi neglijate dacă  $s f_1 > 5$  Hz.

• Bilanțul puterilor active rezultă din figura II.20. Puterea mecanică  $P_m$  va fi diferența dintre puterile electrice de intrare corespunzătoare statorului  $P_s$  și respectiv rotorului  $P_r$  și pierderile din mașină.

$$P_m = P_s + P_r - \sum p = 3\text{Re}(\underline{U}_s \underline{I}_s^*) + 3\text{Re}(\underline{U}_r \underline{I}_r^*) - \sum p, \quad (\text{II.53})$$

în care:

$$\sum p = p_{js} + p_{jr} + p_{Fe}. \quad (\text{II.54})$$

Pentru un sens de mișcare dat, semnul puterii mecanice face distincția dintre regimurile de funcționare. În asociație cu tensiunile  $\underline{U}_s$  și curentului  $\underline{I}_s$  din figura II.20, semnul pozitiv (+) al puterii mecanice  $P_m$  este atribuit regimului de funcționare ca motor.

Puterea electromagnetică  $P_{elm}$  care se transmite prin întrefier este egală cu puterea  $P_s$  din care se scad pierderile joule din înfășurarea statorică  $p_{js}$  și pierderile în fier  $p_{Fe}$  și conform schemei echivalente din figura II.20, egală cu suma dintre pierderile joule pe rezistența  $R_r/s$  și puterea electrică datorată tensiunii  $\underline{U}_r/s$  și a curentului  $\underline{I}_r$ .

În mărimi raportate se poate scrie:

$$P_{elm} = 3\text{Re}(\underline{U}_s \underline{I}_s^*) - p_{js} - p_{Fe} = 3 \frac{R_r}{s} I_r^2 - 3 \frac{\text{Re}(\underline{U}_r \underline{I}_r^*)}{s}. \quad (\text{II.55})$$

Din relația (II.53), rezultă:

$$P_m = P_{elm} + 3\text{Re}(\underline{U}_r \underline{I}_r^*) - p_{jr} = 3 \frac{R_r}{s} I_r^2 - 3 \frac{\text{Re}(\underline{U}_r \underline{I}_r^*)}{s} + \text{Re}(\underline{U}_r \underline{I}_r^*) - 3 R_r I_r^2 = \left[ 3 \frac{R_r}{s} I_r^2 - 3 \frac{\text{Re}(\underline{U}_r \underline{I}_r^*)}{s} \right] (1-s), \quad (\text{II.56})$$

din care:

$$P_m = P_{elm} (1-s) = M \cdot \Omega_1 (1-s) = M \cdot \frac{\omega_l}{p} (1-s). \quad (\text{II.57})$$

În relația (II.57),  $M$  reprezintă cuplul electromagnetic dezvoltat de mașină, iar  $\Omega_1$  reprezintă viteza unghiulară a câmpului magnetic învârtitor.

Dacă se neglijează toate pierderile, conform relațiilor de mai sus rezultă:

$$P_m \approx P_s + P_r \approx -P_r \frac{1-s}{s} \quad (\text{II.58})$$

din care:

$$P_r = -s \cdot P_s. \quad (\text{II.59})$$

Funcționarea mașinii în regim de motor sau de generator este determinată conform relațiilor (II.53) ... (II.57) de doi factori: valoarea alunecării  $s$  și semnul și valoarea relativă a puterii active introdusă sau extrasă pe cale electrică din rotor (tabelul II.1).

**Tabelul II.1.** Regimuri de funcționare

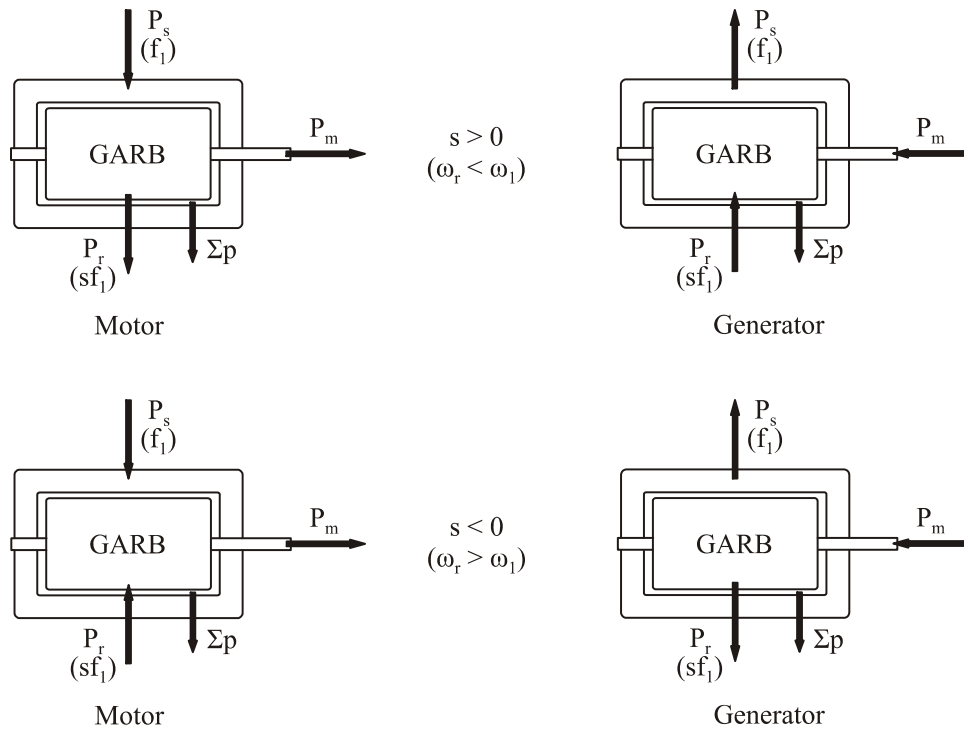
| $s$                | $0 < s < 1$                          |           | $s < 0$                                |           |
|--------------------|--------------------------------------|-----------|----------------------------------------|-----------|
|                    | Subsincron ( $\omega_r < \omega_l$ ) |           | Suprasincron ( $\omega_r > \omega_l$ ) |           |
| Mod de funcționare | Motor                                | Generator | Motor                                  | Generator |
| $P_m$              | $> 0$                                | $< 0$     | $> 0$                                  | $< 0$     |
| $P_s$              | $> 0$                                | $< 0$     | $> 0$                                  | $< 0$     |
| $P_r$              | $< 0$                                | $> 0$     | $> 0$                                  | $< 0$     |

Generatorul asincron cu rotorul bobinat poate funcționa atât în regim subsincron ( $\omega_r < \omega_l$ ) cât și în regim suprasincron ( $\omega_r > \omega_l$ ). Semnul puterilor din tabelul II.1 este explicat în figura II.21.

Cu cât alunecarea este mai mare, cu atât puterea electrică absorbită sau cedată prin rotor este mai mare relația (II.59). Se poate remarca de asemenea, că în regim de funcționare suprasincron, atât puterea electrică statorică cât și cea rotorică contribuie la conversia puterii mecanice.

Circulația puterii reactive este similară cu cea a puterii active și din schema echivalentă rezultă:

$$Q_s + Q_r = 3\text{Imag}(\underline{U}_s \underline{I}_s^*) + 3\text{Imag}\left(\frac{\underline{U}_r \underline{I}_r^*}{s}\right) = 3\omega_l (L_{sl} I_s^2 + L_{rl} I_r^2 + L_m I_m^2). \quad (\text{II.60})$$



**Fig. II.21.** Circulația puterilor active în cazul GARB funcționând în regim subsincron ( $s > 0$ ) și suprasincron ( $s < 0$ ).

Puterea reactivă necesară magnetizării mașinii poate fi furnizată de stator, de rotor sau de ambele armături. Prezența alunecării  $s$  în ecuația (II.60) este justificată prin faptul că magnetizarea mașinii este percepută în stator la frecvență  $f_l$ .

Deoarece parametri nominali ai convertorului static depind mai degrabă de puterea aparentă nominală decât de puterea activă nominală, pare normal ca magnetizarea mașinii să fie asigurată de către stator. În acest caz, GARB absoarbe putere reactivă de la rețea sau de la o sarcină activ – capacitivă. Dacă generatorul funcționează în regim autonom, statorul nu poate consuma putere reactivă de la sarcină decât până în momentul în care atinge valorile impuse ale factorului de putere. În cazul în care statorul funcționează la factor de putere unitar, sarcina asigurării puterii reactive revine convertorului static care alimentează rotorul. Acesta asigură puterea reactivă fie din surse proprii (de la capacitatea conectată pe calea de curent continuu) sau de la rețeaua la care convertorul static este conectat.

### III.2. Diagrame fazoriale

Pentru a înțelege mai bine modul de circulație al puterilor activă și reactivă în cazul GARB, se utilizează diagramele fazoriale de funcționare.

În regim staționar, fluxurile corespunzătoare unei faze vor avea expresiile:

$$\begin{aligned} \underline{\Psi}_m &= L_{lm} \underline{I}_m ; & \underline{I}_m &= \underline{I}_s + \underline{I}_r \\ \underline{\Psi}_s &= \underline{\Psi}_m + L_{sl} \underline{I}_s ; & \underline{\Psi}_s &= L_s \underline{I}_s + L_{lm} \underline{I}_r ; & L_s &= L_{sl} + L_{lm} \\ \underline{\Psi}_r &= \underline{\Psi}_m + L_{rl} \underline{I}_r ; & \underline{\Psi}_r &= L_r \underline{I}_r + L_{lm} \underline{I}_s ; & L_r &= L_{rl} + L_{lm} , \end{aligned} \quad (II.61)$$

în care:

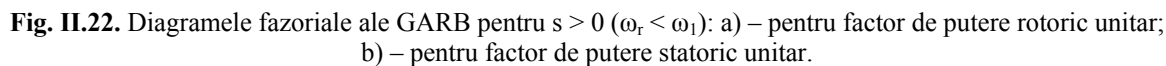
- $\underline{\Psi}_m$  = fluxul de magnetizare (fluxul din întrefier), iar  $L_{lm}$  este inductanța de magnetizare;
- $\underline{\Psi}_s$  = fluxul total produs de înfășurarea statorică, iar  $L_s$  este inductanța totală a înfășurării statorice;
- $\underline{\Psi}_r$  = fluxul total produs de înfășurarea rotorică, iar  $L_r$  este inductanța totală a înfășurării rotorice;
- $\underline{I}_m$  = curentul de magnetizare;
- $\underline{I}_s$  = curentul statoric, iar  $L_{sl}$  este inductanța de scăpări a înfășurării statorice;
- $\underline{I}_r$  = curentul rotoric, iar  $L_{rl}$  este inductanța de scăpări a înfășurării rotorice.

Toate mărimile rotorice din ecuația (II.61) sunt raportate la stator și relațiile sunt scrise într-un sistem de referință solidar cu statorul ("în coordonate statorice"), având aceeași frecvență  $f_l$ .

Cu aceste precizări, din ecuațiile (II.47), (II.50) și (II.51), rezultă:

$$\underline{U}_s = j\omega_l \underline{\Psi}_s + R_s \underline{I}_s ; \quad \underline{U}_r = j\omega_l \underline{\Psi}_r + R_r \underline{I}_r = -\underline{E}_r^f + R_r \underline{I}_r . \quad (II.62)$$

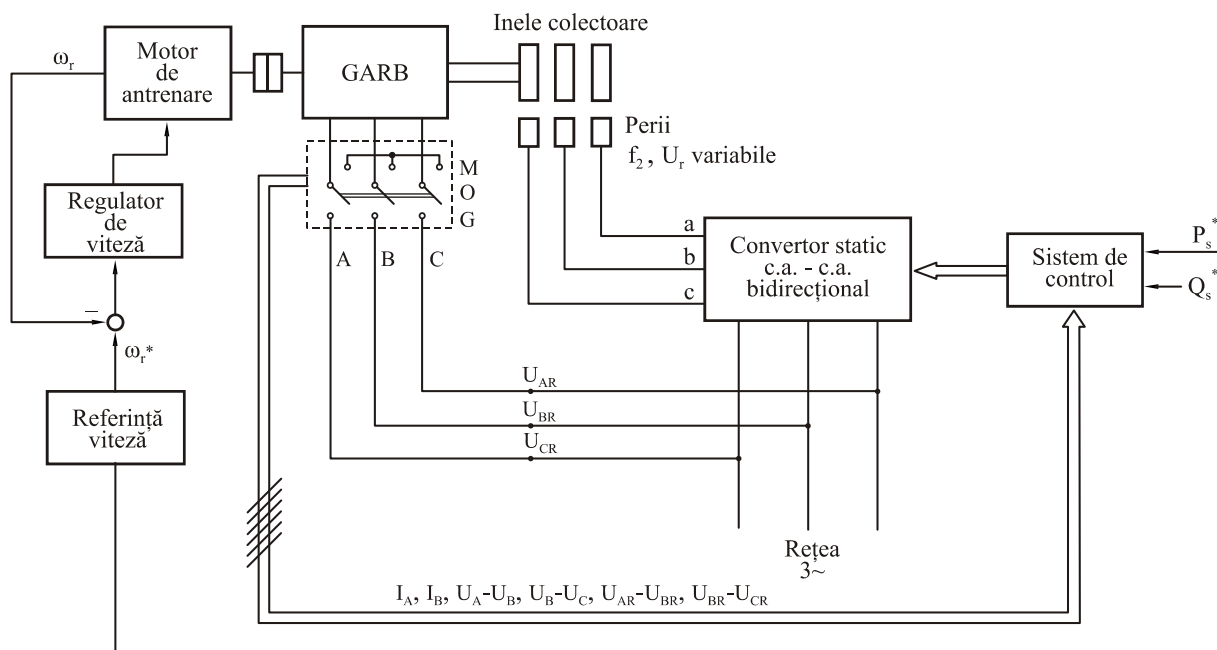
Pentru a trasa diagrama fazorială, trebuie cunoscută valoarea și semnul alunecării  $s$ , defazajul  $\varphi_r$  dintre  $\underline{U}_r$  și  $\underline{I}_r$ , parametrii mașinii și amplitudinea  $|\underline{U}_r|$  a tensiunii aplicate rotorului. Se vor considera două cazuri: subexcitare și supraexcitare, adică magnetizarea mașinii realizată de stator și respectiv de rotor ( $\cos \varphi_s$  – cu rol de antrenare și respectiv cu rol de urmărire). Se mai presupune, în regim de subexcitare, că rotorul funcționează la factor de putere unitar ( $\varphi_r = 0$ ), astfel încât magnetizarea mașinii este realizată de stator (figura II.22, a). Alcătuirea diagramei fazoriale începe cu trasa-rea perechii de fazori  $\underline{U}_r$  și  $\underline{I}_r$  și se continuă urmărind ecuațiile (II.61) și (II.62) pînă se obține fazorul  $\underline{U}_s$ .



### III.3. Functionarea în paralel cu rețeaua de alimentare

25

motor ( $P_s > 0$ ), fie ca generator ( $P_s < 0$ ), prin intermediul unui circuit de control în buclă închisă, conform figurii II.23. Odată mașina conectată la rețeaua de alimentare, este important să se cunoască posibilitățile de transfer ale puterilor activă și reactivă la tensiune constantă și frecvență constantă  $f_1$ , pentru vite-ză  $\omega_r$  variabilă (și implicit  $\omega_2 = \omega_1 - \omega_r$  variabilă).



**Fig. II.23.** Schemă de sincronizare pentru generatorul asincron cu rotorul bobinat (GARB): M – pornire în regim de motor; O – pregătirea sincronizării; G – conectarea generatorului la rețea.

### III.4. Funcționarea în regim autonom

În afara cazului în care regimul de funcționare autonom a fost proiectat inițial, funcționarea generatorului în acest regim poate interveni și în situația în care un generator asincron cu rotorul bobinat (GARB) a funcționat în paralel cu rețeaua. Trecerea în regim autonom de funcționare poate fi impusă de exesul de putere debitată în sistem sau de probleme de stabilitate în funcționare. În regim autonom, se impune menținerea constantă a tensiunii și frecvenței statorice la diferite viteze de antrenare în intervalul  $\omega_r(1 \pm |s_{max}|)$  și pentru diverse sarcini active și reactive.

Indiferent de valoarea puterii reactive cerută de consumatori, ea trebuie furnizată de convertorul static ce alimentează rotorul, după ce acesta asigură nivelul de putere reactivă necesară magnetizării mașinii. Dacă nivelul puterii reactive cerută de consumatori este mare, pentru a profita de puterea limitată a convertorului static ce alimentează rotorul și pentru a limita pierderile în înfășurările rotorului și în convertorul static, este profitabil ca generatorul să funcționeze la viteză constantă și alunecare nulă ( $s = 0$ ).

Pe de altă parte, dacă consumatorii necesită un nivel mare de putere activă, este indicat ca generatorul să funcționeze în regim suprasincron. În acest fel, GARB poate funcționa la factor de putere statoric unitar, păstrând nivelul tensiunii statorice în limitele impuse.

La sarcini mici, este preferabil ca generatorul să funcționeze în regim subsincron, asigurându-se astfel un randament bun al motorului de antrenare.

Echema echivalentă în regim autonom (figura II.24) se poate obține relativ ușor din schema echivalentă din figura II.20.

În regim de funcționare autonom, tensiunea statorică  $\underline{U}_s$  se înlocuiește prin:

$$\underline{U}_s = -(\underline{R}_{sarc} + jX_{sarc})\underline{I}_s \quad (II.63)$$

În aceste condiții, tensiunea rotorică este singura responsabilă de fenomenele din mașină și se poate considera plasată în axa reală:  $\underline{U}_r = U_r$ . Prin neglijarea rezistenței statorului  $R_s$  nu se va obține nici o simplificare, fiind conectată în serie cu sarcina (relația II.63).

Neglijând rezistența de magnetizare  $R_{lm}$  rezultă:

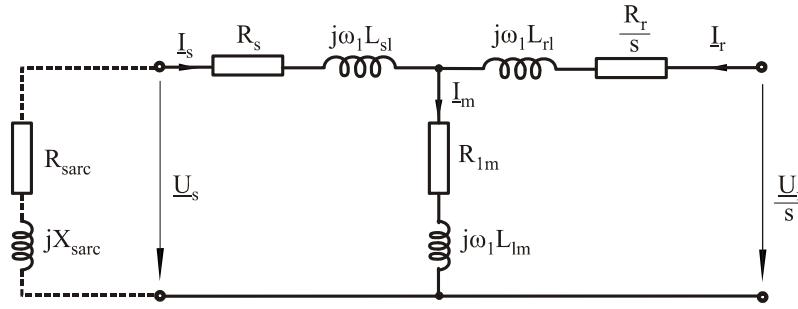


Fig. II.24. schema echivalentă a generatorului asincron cu rotorul bobinat (GAR) în regim autonom.

$$\begin{aligned} [R_s + R_{sarc} + j(X_{sarc} + X_{sl})]I_s &= -jX_{lm}I_{lm} = -jX_{lm}(I_s + I_r) = E_m \\ (R_r + jsX_{rl})I_r - \frac{U_r}{s} &= -jsX_{lm}I_{lm} = -jsX_{lm}(I_s + I_r) = sE_m \end{aligned} \quad (II.64)$$

Ambele ecuații de mai sus sunt scrise în coordonate statorice (toate reactanțele corespund pulsației  $\omega_1$ ). Generatorul este alimentat prin rotor, statorul fiind conectat pe o impedanță externă. Altfel spus, GAR a devenit un generator asincron tipic, alimentat prin rotor, cu statorul debitând putere electrică pe o sarcină. Este de așteptat ca această mașină să funcționeze în regim de motor la alunecări pozitive ( $s > 0$ ,  $\omega_r < \omega_1$ ) și în regim de generator pentru alunecări negative ( $s < 0$ ,  $\omega_r > \omega_1$ ), constituind o schimbare drastică a comportamentului mașinii față de cazul în care statorul era conectat la o rețea puternică de tensiune și frecvență constantă, caz în care regimul de motor era subsincron, iar regimul de generator era suprasincron.

Modificând frecvența rotorică  $\omega_2$  în raport cu viteza  $\omega_r$ , în scopul menținerii frecvenței  $\omega_1$  constante și reglând amplitudinea și secvența fazelor tensiunii rotorice  $U_r$ , tensiunea statorică  $U_s$  poate fi menținută constantă până la un anumit nivel al cutentului statoric pentru o valoare dată a factorului de putere al sarcinii.

Pentru a obține expresiile puterilor activă și reactivă statorică și rotorică  $P_s$ ,  $Q_s$ ,  $P_r$ ,  $Q_r$ , se vor scrie expresiile curenților statoric și rotoric conform ecuațiilor (II.64), neglijând rezistența de magnetizare  $R_{lm}$  ( $R_{lm} = 0$ ).

$$\begin{aligned} I_s &= \frac{U_r}{R_{se}(s) + jX_{se}(s)} \\ R_{se}(s) &= \frac{R_r X_{s+sarc} - sX_r X_{s+sarc}}{X_{lm}} \\ X_{se}(s) &= \frac{sX_r R_{s+sarc} + X_{s+sarc} R_r}{X_{lm}} + sX_{lm} \\ R_{s+sarc} &= R_s + R_{sarc} ; \quad X_{s+sarc} = X_s + X_{sarc} \\ X_s &= X_{sl} + X_{lm} ; \quad X_r = X_{rl} + X_{lm} \end{aligned} \quad (II.65)$$

Expresiile puterilor activă și reactivă corespunzătoare statorului vor rezulta:

$$\begin{aligned} P_s &= 3I_s^2 R_{sarc} > 0, \quad s < 0 \text{ generator}, \quad s > 0 \text{ motor} \\ Q_s &= 3I_s^2 X_{sarc} < > 0 \end{aligned} \quad (II.66)$$

Tot din ecuațiile (II.64), va rezulta expresia curențului rotorice:

$$I_r = j \frac{(R_{s+sarc} + jX_{s+sarc})I_s}{X_{lm}}, \quad (II.67)$$

precum și:

$$P_r^r + jQ_r^r = 3(\underline{U}_r \cdot \underline{I}_r^*) \quad (II.68)$$

Puterea mecanică  $P_m$  este:

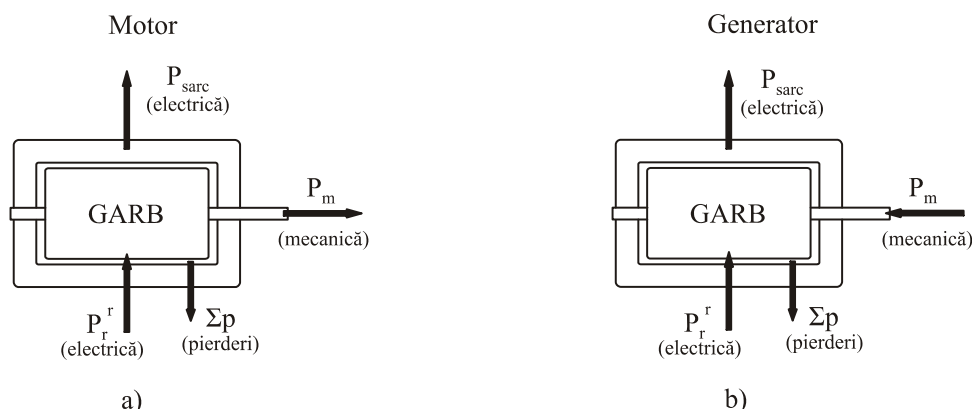
$$P_m = \frac{1-s}{s} [3R_r I_r^2 - P_r^r], \quad (II.69)$$

iar puterea reactivă statorică:

$$Q_s = Q_r^r - 3(X_{sl} I_s^2 + X_{rl} I_r^2 + X_{lm} I_m^2) \quad (II.70)$$

Deoarece mașina funcționează ca o mașină asincronă alimentată prin rotor, cu o impedanță pasivă conectată la bornele statorului, performanțele ei vor fi descrise prin caracteristicile de funcționare ale mașinii asincrone.

Bilanțurile puterilor active în regim de motor și în regim de generator sunt prezentate în figura II.25.



**Fig. II.25.** Bilanțul puterilor active: a) – regim de motor,  $s > 0$ ; b) – regim de generator  $s < 0$ .

Funcționarea în regim de motor la viteze subsincrone este foarte utilă în cazul în care se impune autodemararea mașinii. Pentru acesta, se scurtcircuitază sarcina statorică ( $R_{sarc} = X_{sarc} = 0$ ) și mașina accelerează încet (deoarece în general convertorul static ce alimentează rotorul este de putere mai mică decât puterea nominală a mașinii) până în apropierea vitezei de sincronism  $\omega_r(1 \pm |s_{max}|)$ . În acest moment, circuitul statoric se deschide, însă tensiunea indusă în stator este de frecvență redusă. Din acest motiv se impune schimbarea secvenței de succesiune a fazelor pentru tensiunea de alimentare a rotorului, în scopul obținerii  $\omega_l > \omega_r$ , pentru același sens de rotație a rotorului. Acesta constituie momentul de începere a procesului de resincronizare, în timp ce mașina se rotește în virtutea inerției. În interval de câteva milisecunde, sunt realizate valorile necesare pentru tensiunea și frecvența statorică și statorul mașinii este reconectat la circuitul de sarcină.

Funcționarea în regim autonom (regim mai nou numit “sarcină de stabilitate”) poate fi utilizată în momentul în care după îndepărtarea sarcinii se dorește frânarea rapidă a motorului de antrenare pentru a preveni supraturări periculoase când regulatorul de viteză iese din funcție.

Amplitudinea tensiunii statorice poate fi reglată prin modificarea amplitudinii tensiunii rotorice, pe când frecvența tensiunii statorice  $\omega_l$  se menține constantă prin modificarea frecvenței  $\omega_2$  a tensiunii rotorice furnizată de convertorul static ce alimentează rotorul.