

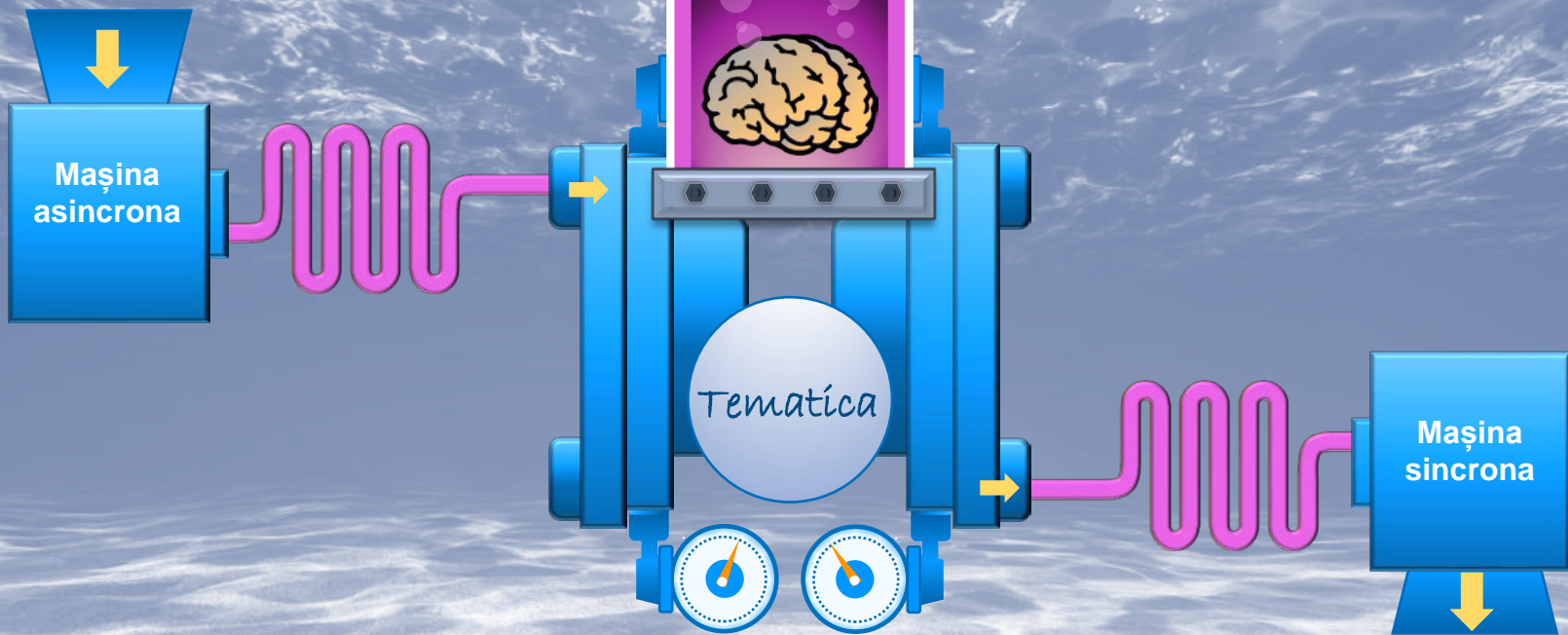
MASINI ELECTRICE II



- prezentari .pdf -
2024-2025



Conf. Leonard Livadaru
Univ. Tehnica "Gh. Asachi" Iasi



Noțiuni generale de electromagnetism

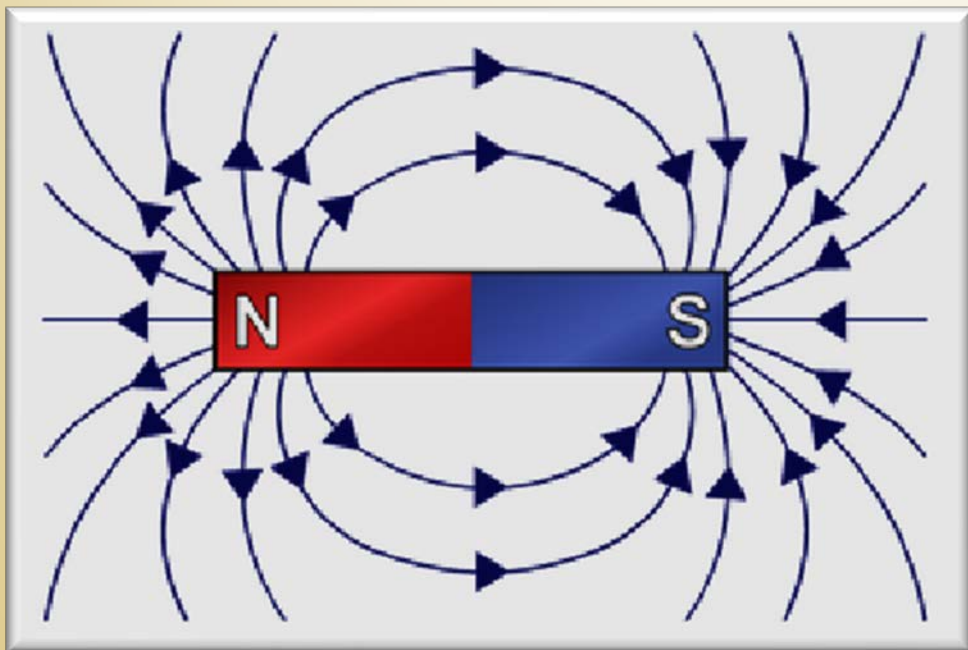


Surse de câmp magnetic

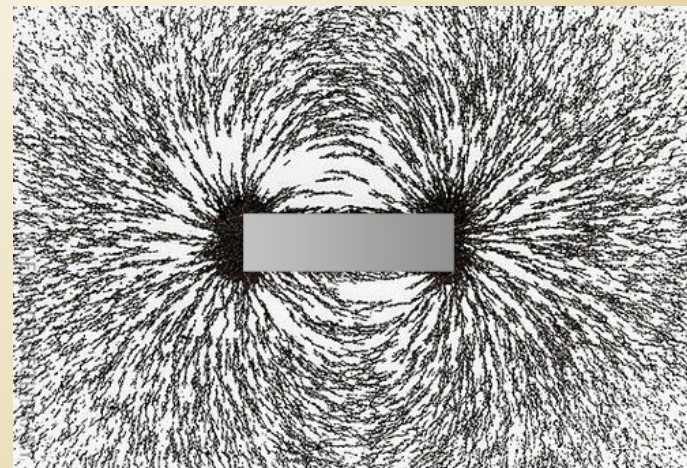
Bobine parcurse
de curent electric
(*electromagneți*)

Magneți
permanenți

Sensul liniilor de câmp create de un magnet permanent



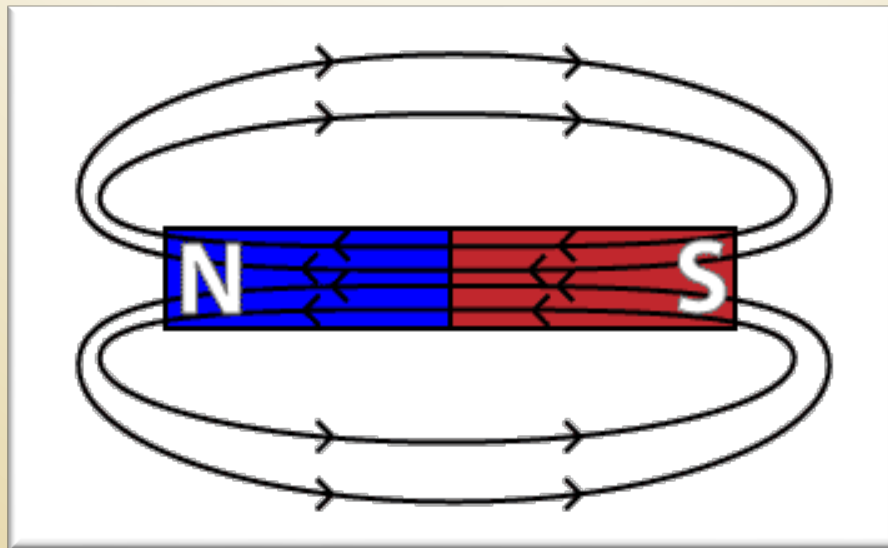
Reprezentare convențională



Reprezentare reală

Liniile câmpului magnetic creat de un magnet permanent se închid (prin exterior) de la polul N către polul S (desemnarea polilor și a sensului liniilor de câmp este adoptată convențional).

Sensul liniilor de câmp create de un magnet permanent



Liniile câmpului magnetic formează ÎNTOTDEAUNA curbe (trasee) închise. Acest lucru este o consecință a legii fluxului magnetic care, în forma locală, este exprimată de relația:

$$\operatorname{div} \bar{B} = 0 \quad \text{sau} \quad \int_S \bar{B} \cdot d\bar{A} = 0$$

Sensul liniilor de câmp create de un conductor parcurs de curent

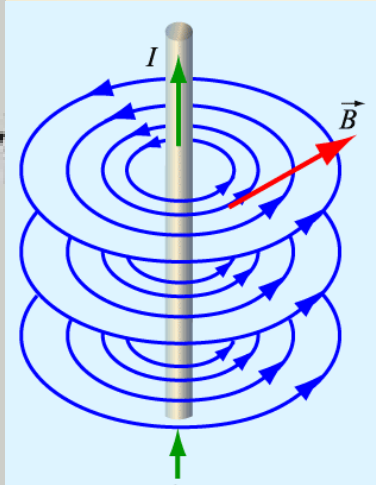
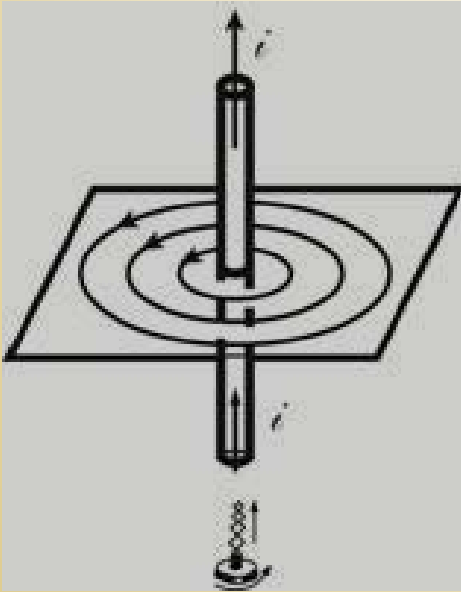


Fig. 1

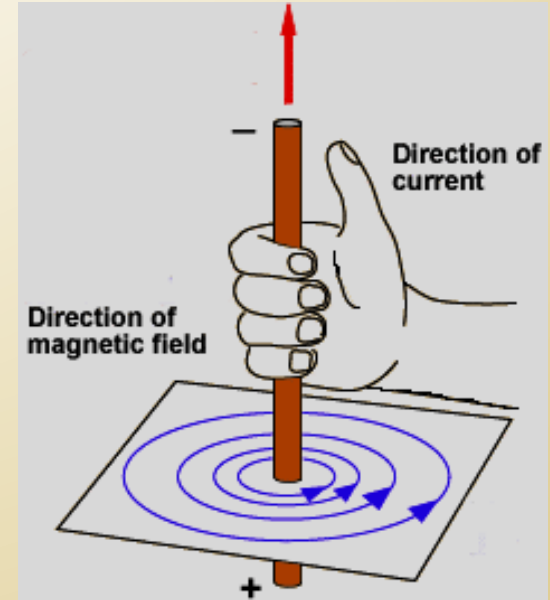
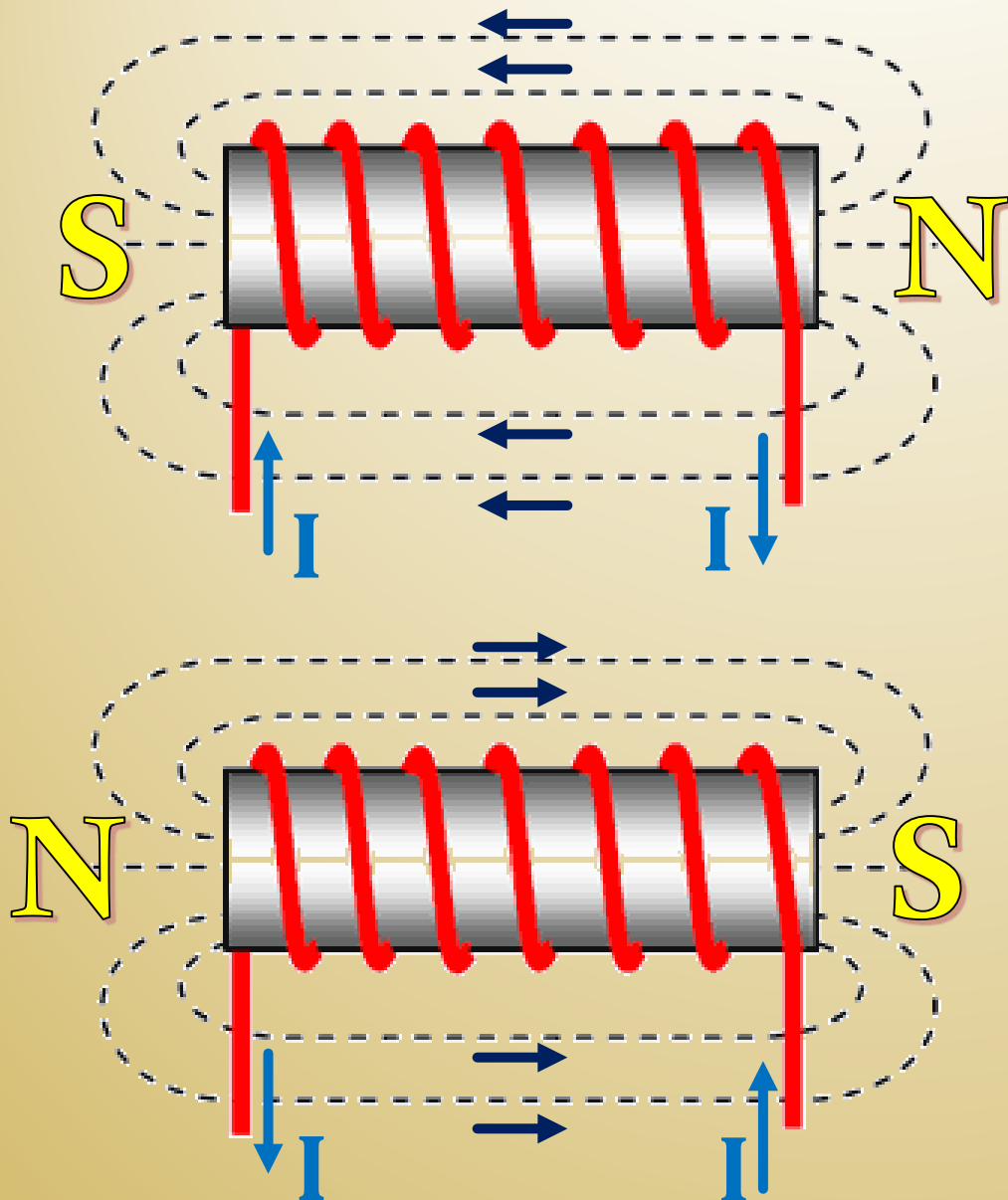


Fig. 2

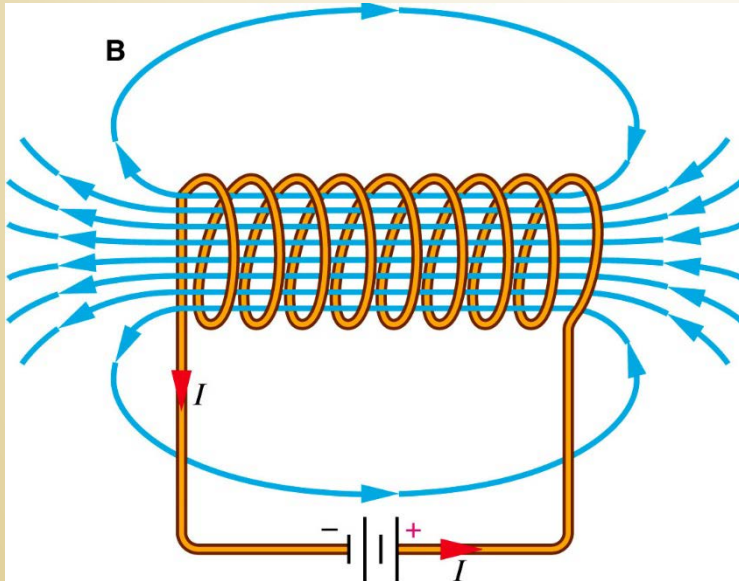
Liniile de câmp se închid într-un plan perpendicular pe axa conductorului și au sensul dat de regula burghiului drept (sensul de rotire a burghiului ce determina mișcarea lui în sensul curentului ce străbate conductorul) - fig. 1, sau de regula mâinii drepte – fig. 2.

Sensul liniilor de câmp create de o bobina

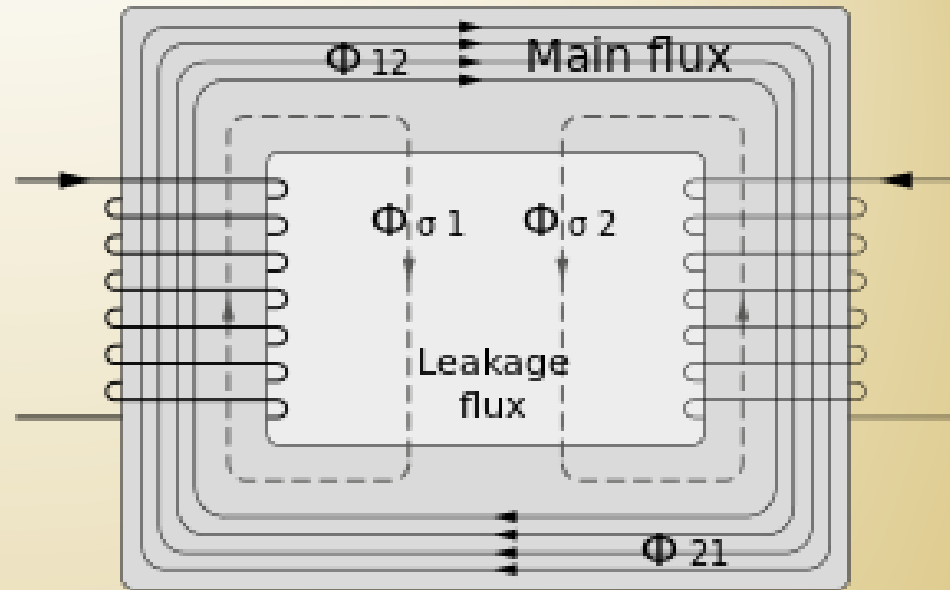


Atunci când o bobină (un solenoid) este parcursă de curent electric (indiferent dacă este c.c. sau c.a.) apare un câmp magnetic ale cărei linii se închid similar celor produse de un magnet permanent.

Sensul curentului prin spirele solenoidului determină polaritatea câmpului magnetic creat de acesta.



Bobină fără miez magnetic



Bobină plasată pe un miez magnetic

Prezența unui miez magnetic duce la două consecințe importante:

- „intensifică” câmpul magnetic rezultat în secțiunea miezului;
- „conduce” liniile de câmp pe trasee prestabilite utile scopului urmărit.

Legile lui Faraday (legea inducției electromagnetice)

1. Atunci când un conductor este plasat într-un câmp magnetic VARIABIL se induce o tensiune ce se regăsește la capetele conductorului.
2. Mărimea tensiunii induse este proporțională cu viteza de variație a fluxului prin bobină.

$$e = k \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

Legea lui Lenz

Curentul determinat de tensiunea indusă creează un câmp magnetic ce se opune câmpului inițial.

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} = -N \cdot \frac{d\varphi}{dt}$$

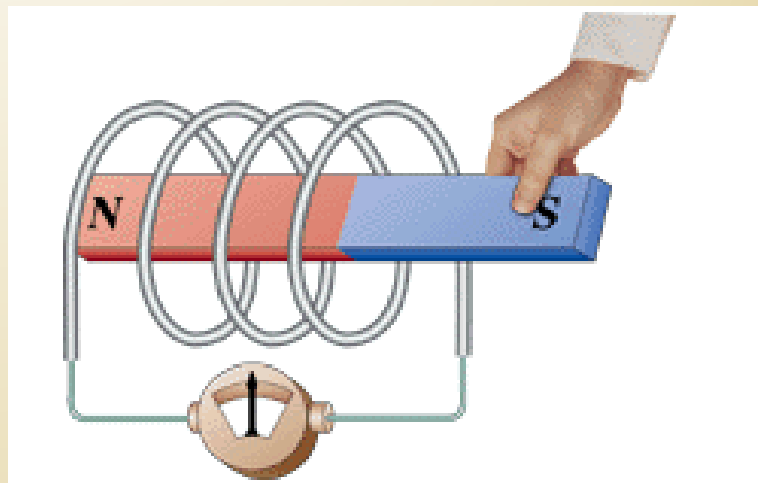
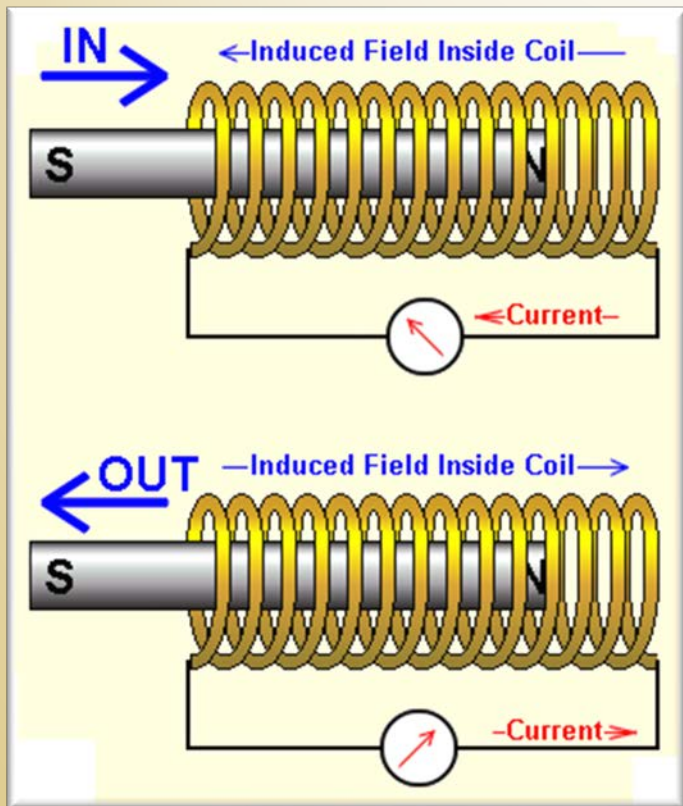
Modalități de obținere a unei tensiuni induse

1. Bobină fixă + câmp magnetic în mișcare (eventual variabil).

2. Câmp magnetic fix + bobină în mișcare.

3. Bobină în mișcare + câmp magnetic în mișcare (eventual variabil) + viteză relativă nenulă între cele două elemente în mișcare.

Bobină fixă – câmp magnetic în mișcare

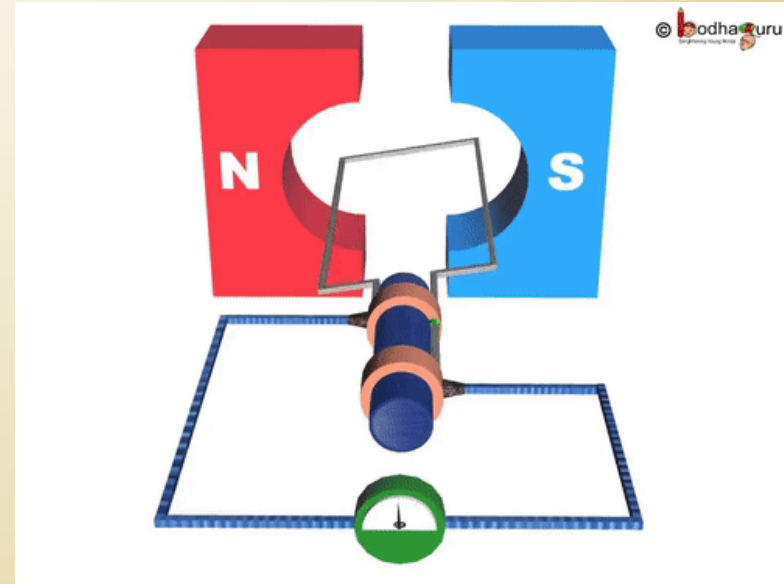
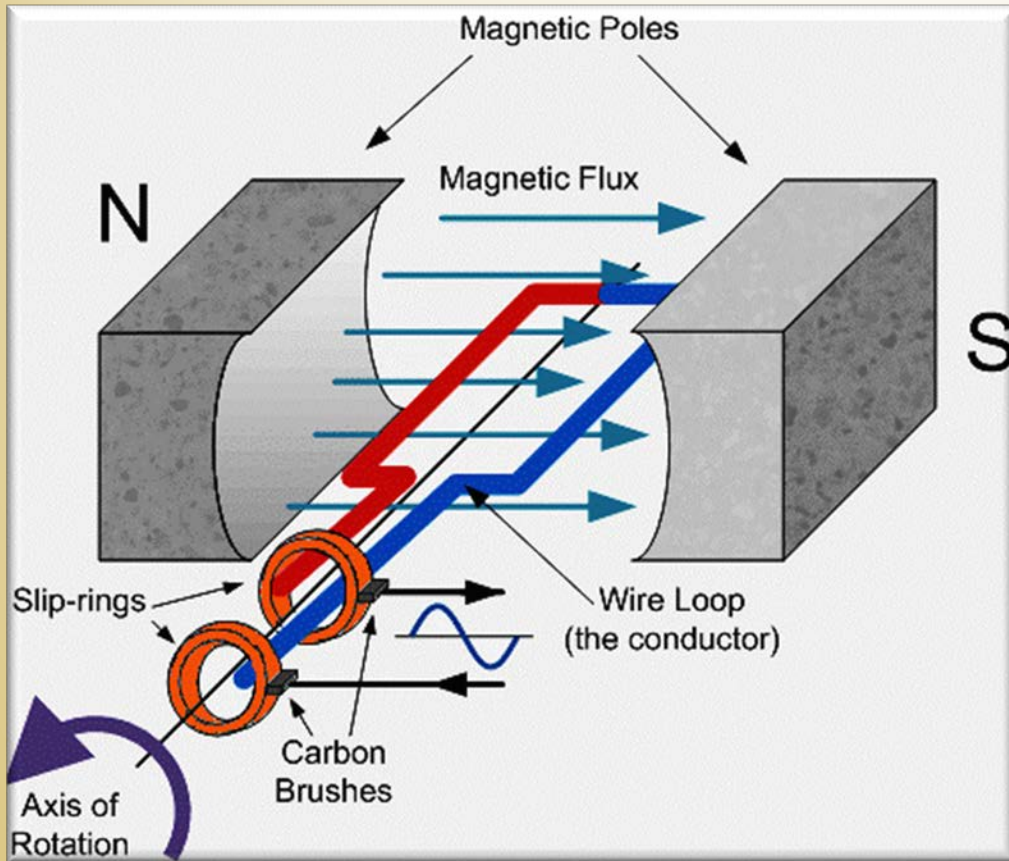


Deplasarea magnetului permanent în interiorul bobinei determină inducerea unei tensiuni în bobină. Acest fapt este demonstrat de aparatul de măsură care sesizează prezența curentului electric.

Sensul deplasării magnetului permanent (către stânga sau către dreapta) determină semnul tensiunii induse.

NUMAI mișcarea magnetului determină inducerea unei tensiuni în bobină.

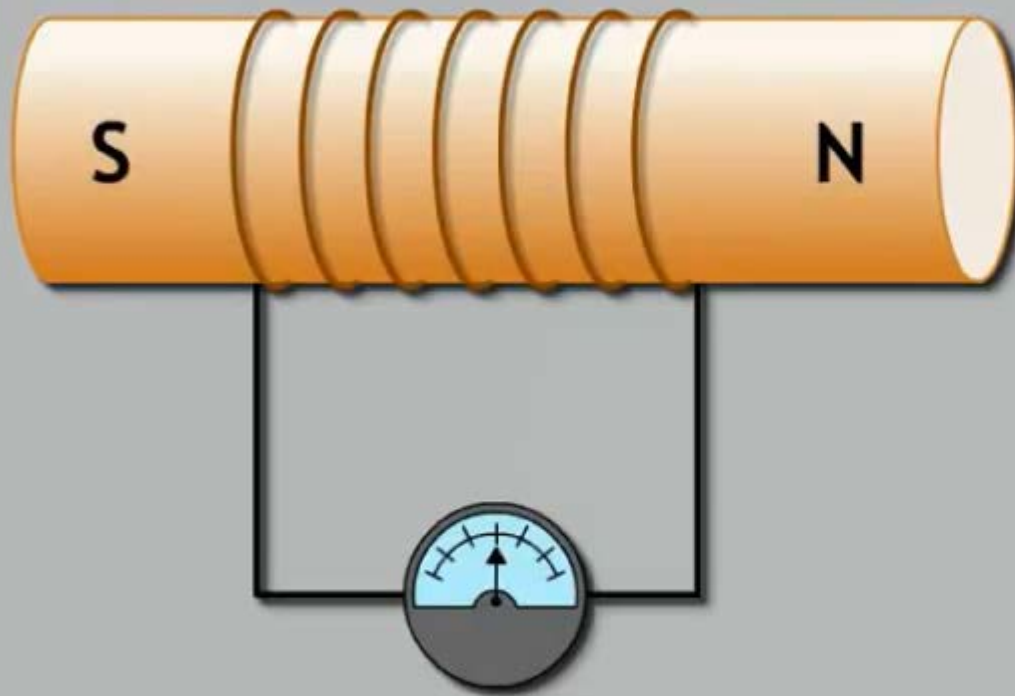
Bobina în mișcare – câmp magnetic fix



Dacă magnetul permanent este fix dar bobina se deplasează în câmpul magnetic (în cazul din figură bobina este reprezentată de o singură spira și se rotește) atunci, în bobină se induce tensiune care poate fi regăsită și vizualizată la capetele bobinei cu un aparat de măsură.

Semnul tensiunii induse este determinat de sensul de rotație sau de sensul liniilor de câmp create de magnetul permanent.

Electromagnetic Induction





BOBINA

+

CÂMP MAGNETIC

+

DEPLASARE

=

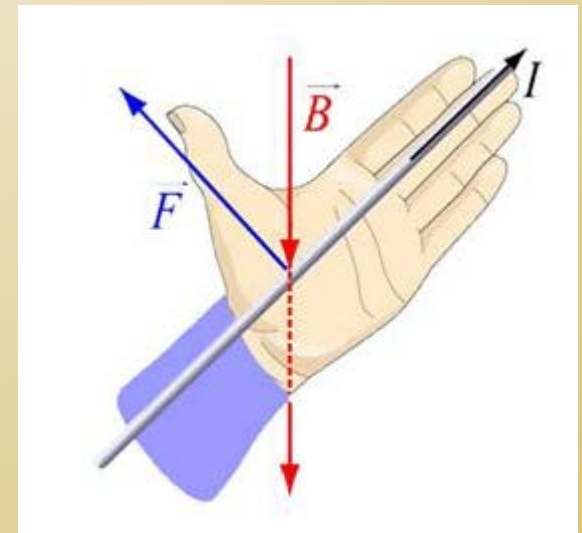
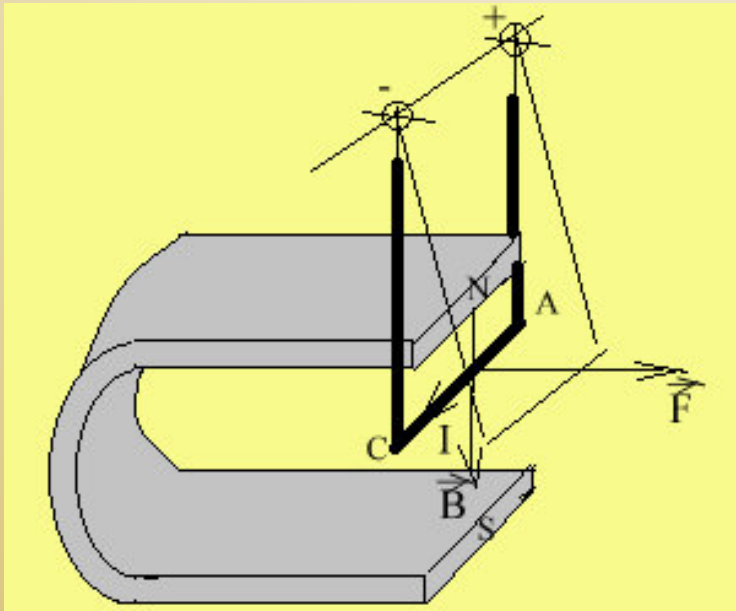
TENSIUNE INDUSA

Forța Laplace

Forța Laplace este forța ce acționează asupra unui conductor parcurs de curent (i) și care se află într-un câmp magnetic de inducție B . Dacă unghiul dintre direcția conductorului (de lungime ℓ) și vectorul inducției magnetice este de 90° atunci mărimea forței este maximă.

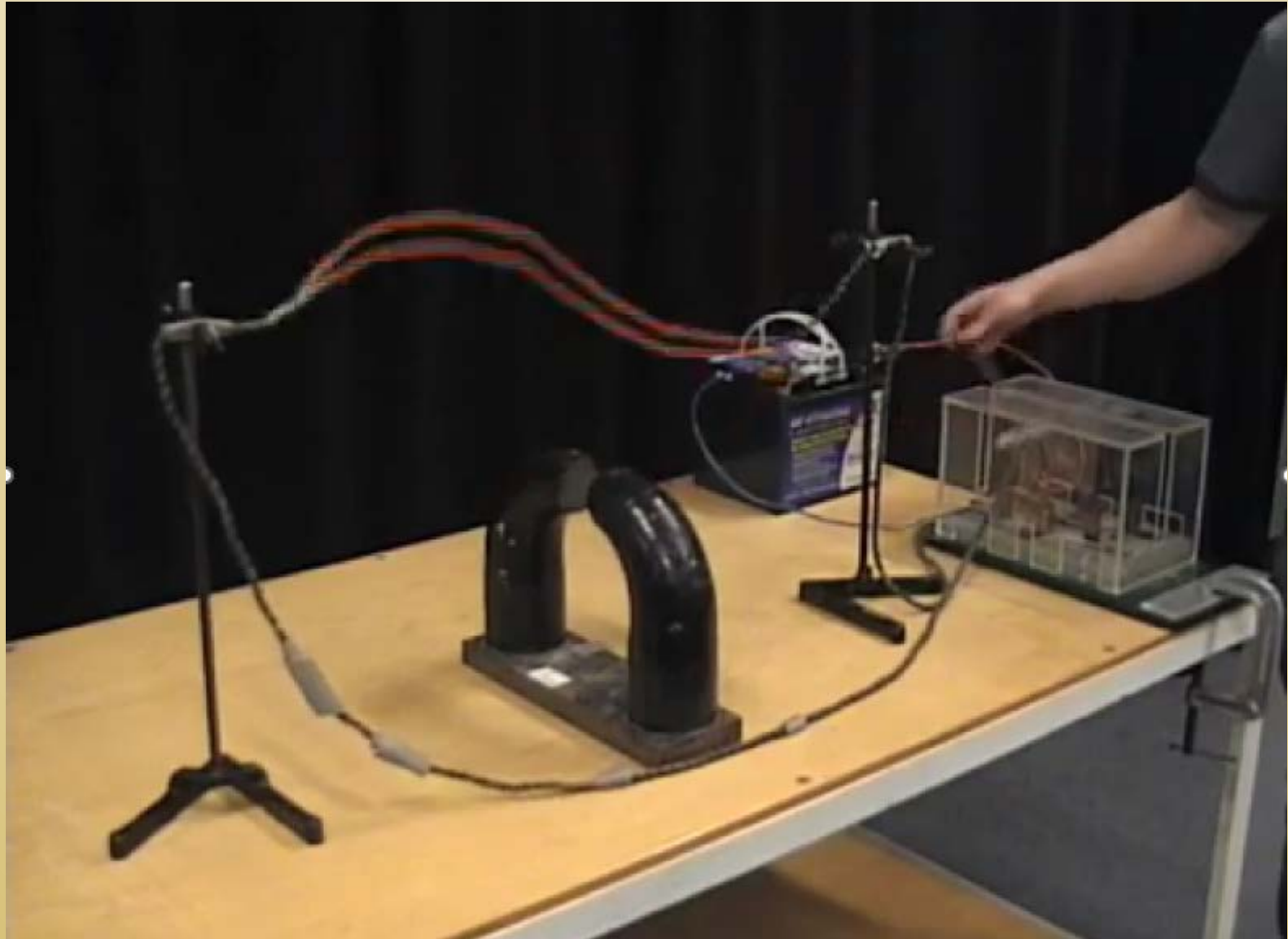
$$\vec{F} = i\vec{l} \times \vec{B}$$

$$F = BIl \cdot \sin \theta$$



Regula mâinii stângi de determinare a sensului Forței Laplace

Forța Laplace



Producerea cuplului

CUPLUL sau **momentul forței** este o mărimă fizică vectorială ce exprimă cantitativ capacitatea forței de a roti un rigid în jurul unei drepte ce trece printr-un punct și este perpendiculară pe planul format de dreapta suport a forței și punctul respectiv ([Wikipedia](#)).

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F} = r \cdot F \cdot \sin(\alpha)$$

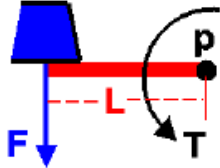


Torque (Moment)

Glenn
Research
Center

The Torque (T) about a point (p) is equal to the Force (F) times the distance (L) measured from the point perpendicular to the force. $T = F \times L_{\perp}$

Example 1:



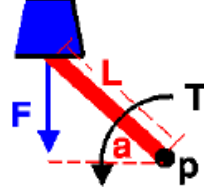
$$T = F \times L$$

Example 2:

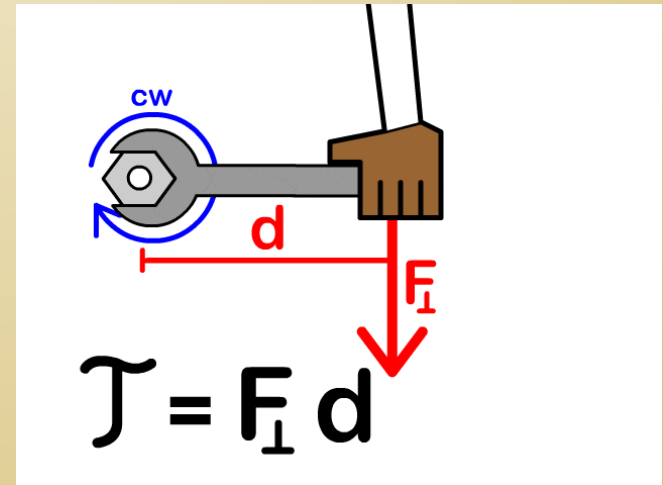


$$T = 0$$

Example 3:



$$T = F \times L \times \cos a$$





**Legea inducției
electromagnetice**



Forța Laplace

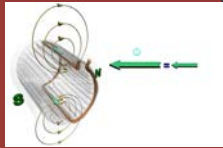
CURS 2

CÂMPURI MAGNETICE IN MAȘINILE DE CURENT ALTERNATIV



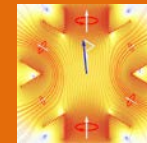
Cuprins:

1



Câmpul creat de o înfășurare monofazată distribuită

Câmpul creat de o înfășurare trifazată distribuită

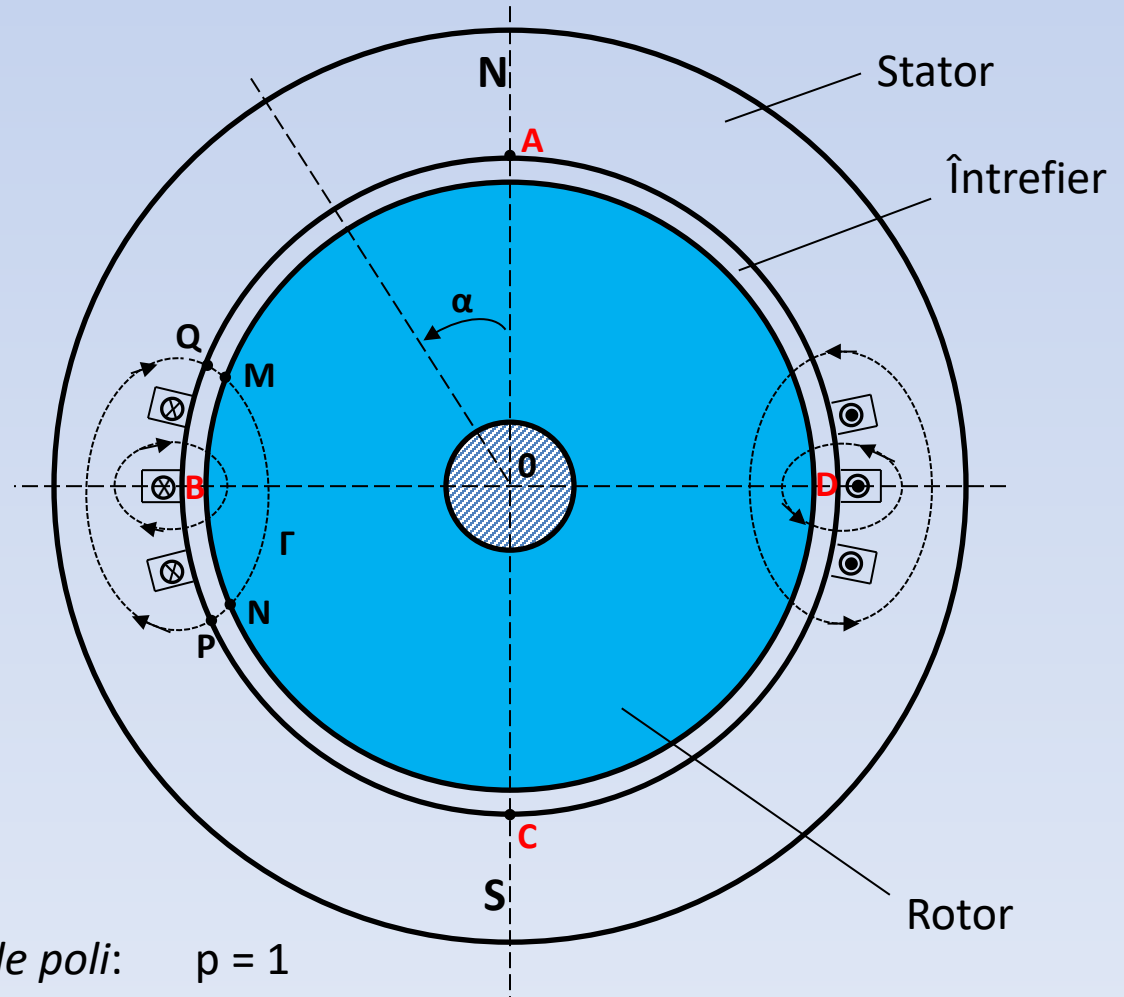
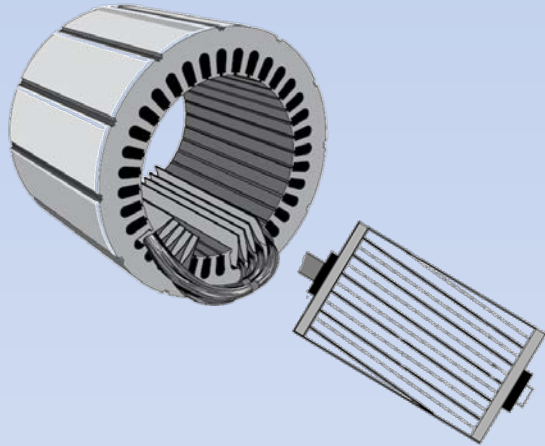


2

3

Teorema lui Leblanc

CÂMPUL CREAT DE O ÎNFĂȘURARE MONOFAZATĂ DISTRIBUITĂ



Numărul de *perechi de poli*: $p = 1$

Se consideră o structură feromagnetică formată din stator (exterior) și rotor (interior) despărțite de un întrefier. Pe stator, către întrefier, sunt practicate creștături (pentru simplificarea discuției se considera doar 6 creștături plasate câte trei diametral opus).

În creștăturile statorice este plasată o înfășurare. Conductoarele din stânga sunt parcurse de curent într-un sens (curentul intră în secțiune) iar cele din dreapta, în sens contrar (curentul iese din secțiune). Sursa de alimentare a înfășurării este de tensiune alternativă, deci curentul ce străbate conductoarele este alternativ (în figură, sensurile curenților corespund unui anumit moment t al variației sinusoidale a curenților).

Curenții din înfășurare determină apariția unui câmp magnetic ale cărui linii de câmp se închid conform traseelor figurate pe desen (pentru simplificare, s-a considerat o singură linie de câmp corespunzătoare fiecărui conductor). Sensul liniilor de câmp este dat de regula burghiului drept. Traseul fiecărei linii de câmp traversează jugul statoric (porțiunea PQ în sensul liniei de câmp), jugul rotoric (porțiunea MN) și de două ori, pe direcție radială, întrefierul (porțiunile QM și NP).

Ca urmare a sensului închiderii liniilor de câmp, pe stator se formează doi poli magnetici: în partea de sus, un pol N (liniile de câmp ies din stator) și în partea de jos un pol S (liniile de câmp intră în stator). Rezultă astfel o structură feromagnetică (în cazul acesta o mașină electrică) cu 2 poli sau o pereche de poli ($p = 1$).

Expresia curentului prin
înfășurarea statorică:

$$i = \sqrt{2}I \sin \omega t$$

Pentru determinarea modului de variație a câmpului magnetic în întrefier se aplică legea circuitului magnetic (legea lui Ampere) pe un contur (Γ):

$$\oint_{\Gamma} H dl = \sum Ni$$

Se descompune integrala de pe conturul Γ într-o sumă de integrale pe porțiuni:

$$\underbrace{\int_P^Q H dl}_{V_{Fe}} + \underbrace{\int_Q^M H dl}_{V_{\delta}} + \underbrace{\int_M^N H dl}_{V_{Fe}} + \underbrace{\int_N^P H dl}_{V_{\delta}} = \sum Ni$$

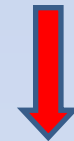
unde: H-intensitatea câmpului magnetic; N-numărul de conductoare înlănțuit de conturul Γ ; i-curentul ce parcurge conductoarele; V-tensiune magnetică

Prima și a treia integrală definesc tensiunea magnetică în fier iar a doua și a patra, tensiunea magnetică în întrefier. Rezultă:

$$2V_{Fe} + 2V_{\delta} = \sum Ni$$

$$\left(\begin{array}{l} \mathcal{R}_{Fe} = \frac{l_{Fe}}{\mu_{Fe} \cdot S} \\ \mathcal{R}_{\delta} = \frac{l_{\delta}}{\mu_0 \cdot S} \end{array} \right) \quad \text{Dar: } \mu_{Fe} \gg \mu_{\delta} \longrightarrow \mathcal{R}_{Fe} \ll \mathcal{R}_{\delta}$$

$$\text{Dar: } V = \mathcal{R} \cdot \phi$$



$$V_{Fe} \ll V_{\delta}$$

Întrucât reluctanța circuitului magnetic (a fierului) este mult mai mică decât reluctanța întrefierului (a aerului), rezultă că tensiunea magnetică a fierului este muuult mai mică decât cea a întrefierului și, prin urmare, aceasta se poate neglija. Rezultă:

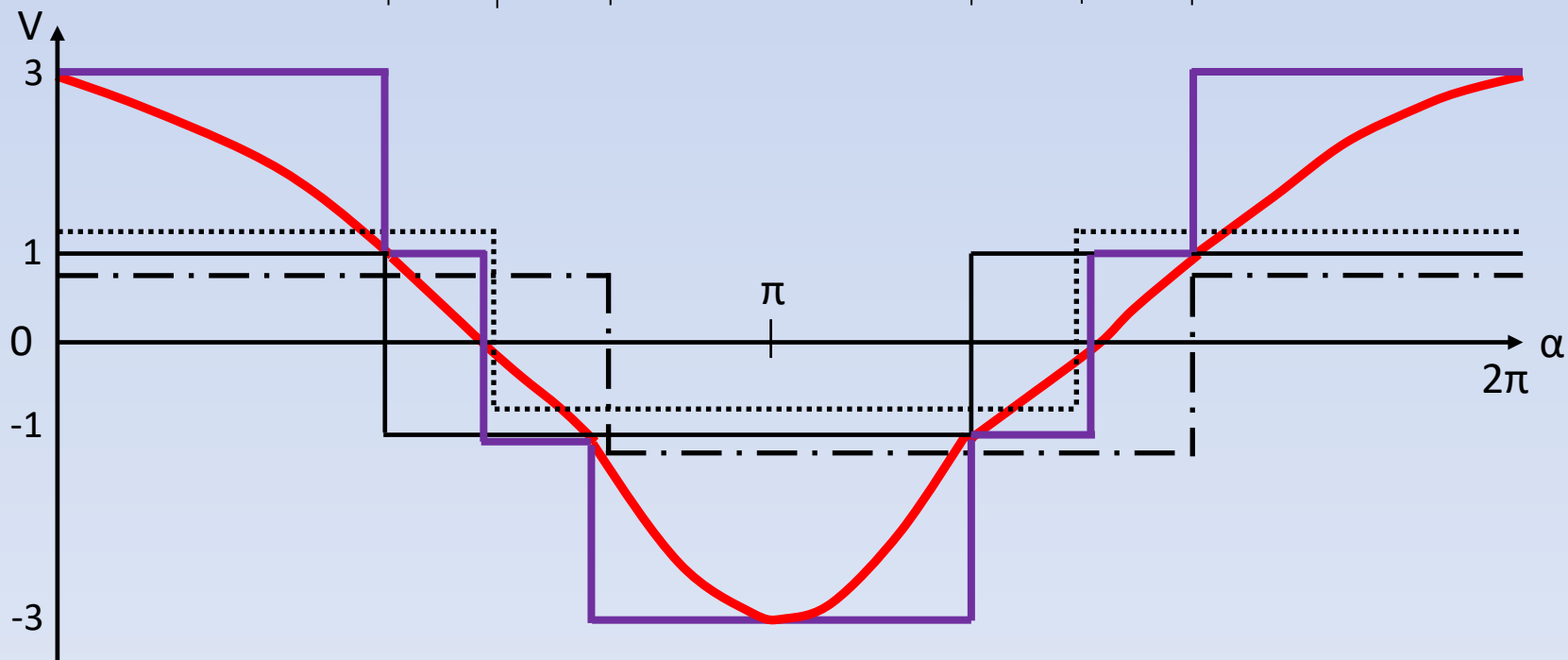
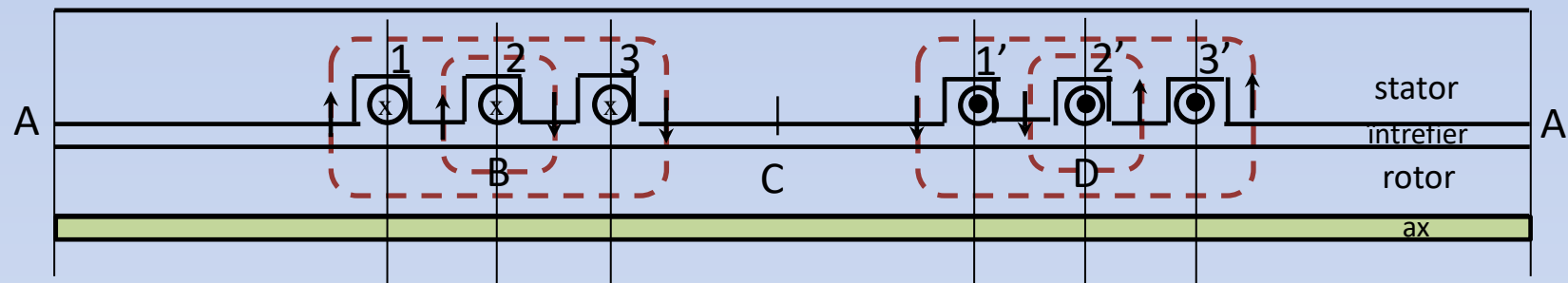
$$2V_{\delta} = \sum Ni = N(\alpha) \cdot i$$

Mărimea $N(\alpha)$ exprimă modificarea numărului de conductoare N odată cu modificarea coordonatei unghiulare α .

Înlocuind și expresia curentului, se obține:

$$V(\alpha, t) = \frac{1}{2} N(\alpha) \cdot \sqrt{2} I \sin \omega t$$

Construcția grafică a tensiunii magnetice din întrefier pentru structura cu 6 crestături



- Curba tensiunii magnetice din întrefier creata de spira 1-1'
- Curba tensiunii magnetice din întrefier creata de spira 2-2'
- · - Curba tensiunii magnetice din întrefier creata de spira 3-3'

- Curba rezultanta a tensiunii magnetice din întrefier creata de cele 3 spire
- Fundamentala tensiunii magnetice din întrefier

Explicații

Se consideră structura considerată anterior, secționată după o generatoare și desfășurată în plan. Crestăturile din partea stânga se notează cu 1, 2 și 3 iar cele din dreapta cu 1', 2' și 3'. Conductoarele din crestăturile 1-3 sunt parcurse de curent ce intră în secțiunea figurii iar cele din crestăturile 1'-3' de curent ce iese din secțiunea figurii. Este reprezentată, de asemenea câte o singură linie de câmp pe traseele de închidere.

Să presupunem, pentru început, că există curent numai în spira care ocupă crestăturile 2 și 2'. Liniile câmpului creat se închid în jurul celor două crestături astfel încât: în zona din stânga crestăturii 2 toate liniile de câmp se închid dinspre rotor spre stator; în zona din dreapta crestăturii 2 liniile de câmp se închid invers, adică dinspre stator spre rotor; în mod identic, pentru crestătura 2' avem o închidere a liniilor de câmp dinspre stator spre rotor în partea ei stângă și dinspre rotor spre stator în partea ei dreaptă. Observați că sensul liniilor de câmp creat de cele două crestături coincide în zona punctului C și de asemenea în zonele laterale care, în fapt, sunt unite pentru că avem o construcție circulară.

Putem aprecia că în stânga punctului B și în dreapta punctului D avem o polaritate de tip S(sud) a statorului (liniile de câmp intră în stator) și o polaritate de tip N(nord) între punctele B și D. Considerând că amplitudinea câmpului este aceeași, pe aceste porțiuni putem face o reprezentare grafică a modului de variație a amplitudinii câmpului (amplitudinea tensiunii magnetice în acest caz). Asociem, prin convenție, semnul plus câmpului S și semnul minus câmpului N. Rezultă „curba” punctată de culoare neagră.

Refacem același raționament dar luând în considerație numai spira 1-1' respectiv apoi spira 3-3'. Se obțin alte două curbe identice (cea neagră cu linie plină și cea linie-punct) dar care sunt deplasate către stânga respectiv către dreapta cu câte o crestătură.

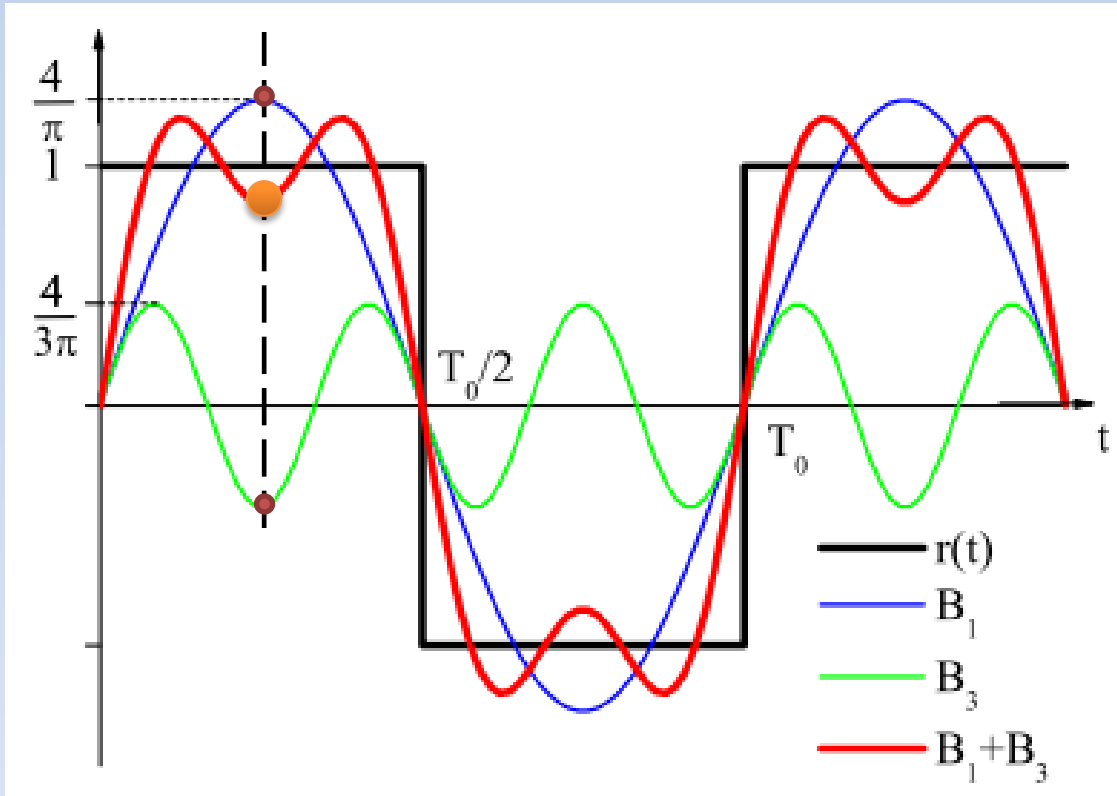
Atunci când luăm în considerare simultan toate cele trei spire (deci curenți prin cele șase conductoare), câmpul magnetic rezultă prin suprapunerea efectelor celor trei spire. Adunând cele trei curbe pe porțiuni se obține curba rezultantă, cea de culoare mov.



Curba roșie, ce are forma unei cosinusoide, reprezintă „fundamentală” curbei mov.

În figură este reprezentată o „curbă” alternativă, nesinusoidală – $r(t)$ – a cărei simetrie este de tipul: $V(\alpha, t) = -V(\alpha + \pi, t)$

Descompunerea în serie Fourier reține NUMAI termenii impari (funcția $r(t)$ poate fi obținută prin însumarea punct cu punct a curbelor sinusoidale B_1 și B_3)



Explicativa la descompunerea in serie Fourier a undelor alternative nesinusoidale in armonici sinusoidale (B_1 -fundamentala, B_3 -armonica de ordin 3).

Prin urmare, expresia tensiunii magnetice dedusa grafic în slide-ul 7, poate fi scrisă astfel:

$$v(\alpha, t) = \sum_{\gamma=1,3,5\dots}^{\infty} \frac{1}{\gamma} \cdot V_{max} \cos \gamma \alpha \cdot \sin \omega t$$

Expresia unei fundamentale (armonica de ordinul I, $\gamma=1$) este:

$$v(\alpha, t) = V_{max} \cos \alpha \cdot \sin \omega t$$

$$H(\alpha, t) = \frac{v(\alpha, t)}{\delta(\alpha)}$$

Variația unei fundamentale a „intensității câmpului magnetic” are aceeași expresie ca și variația tensiunii magnetice, întrucât se poate considera întrefierul δ ca fiind cvasi-uniform:

$$H = H_{max} \cos \alpha \cdot \sin \omega t$$

In cazul unei mașini cu p perechi de poli:

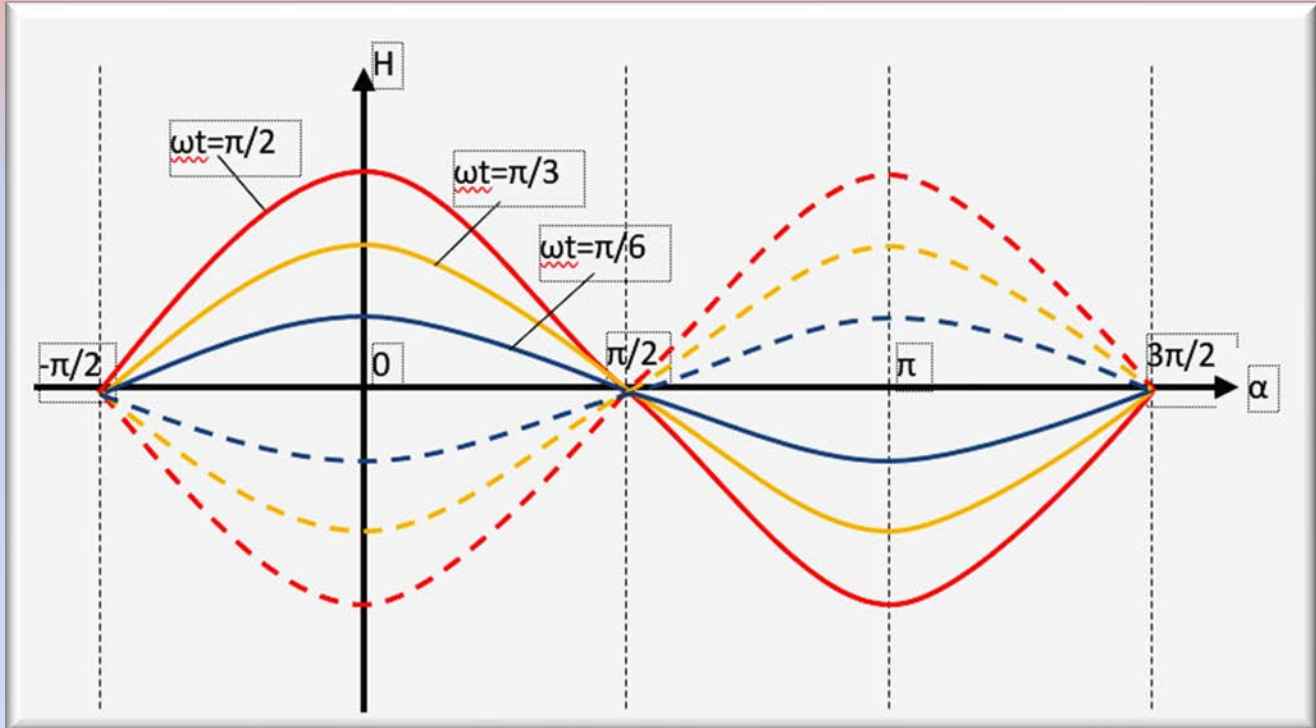
$$H = H_{max} \cos p\alpha \cdot \sin \omega t$$

In mod analog, expresia unei fundamentale a inducției electromagnetice este:

$$B = B_{max} \cos p\alpha \cdot \sin \omega t$$



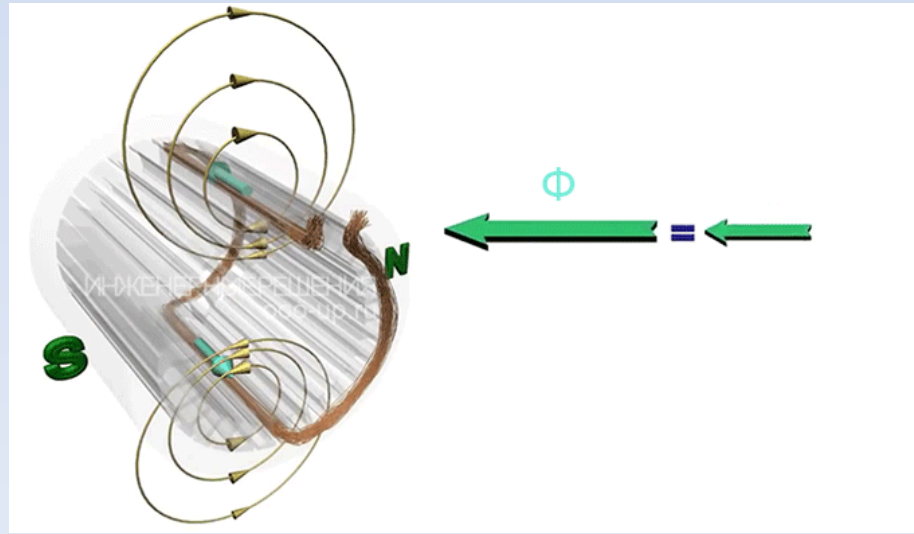
Această relație reprezintă expresia unui câmp PULSATORIU (sau alternativ) care este FIX în spațiu și VARIABIL în timp



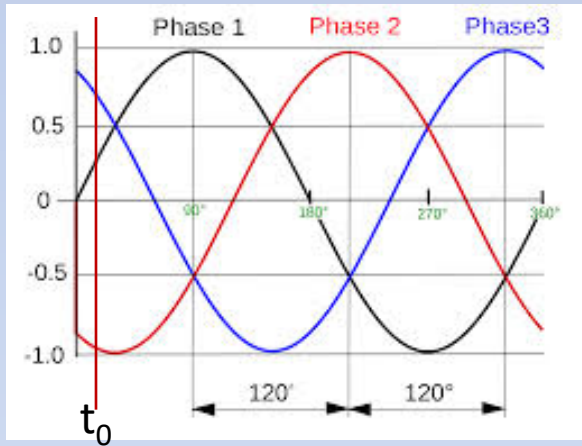
Curbele câmpului creat de o înfășurare monofazata la diverse momente de timp

La diverse momente (ωt), modul ideal de variație a câmpului este o sinusoidă. Valorile de minim și de maxim (adică poziția polilor) corespund unor poziții fixe (pentru $\alpha=0$ și $\alpha=\pi$).

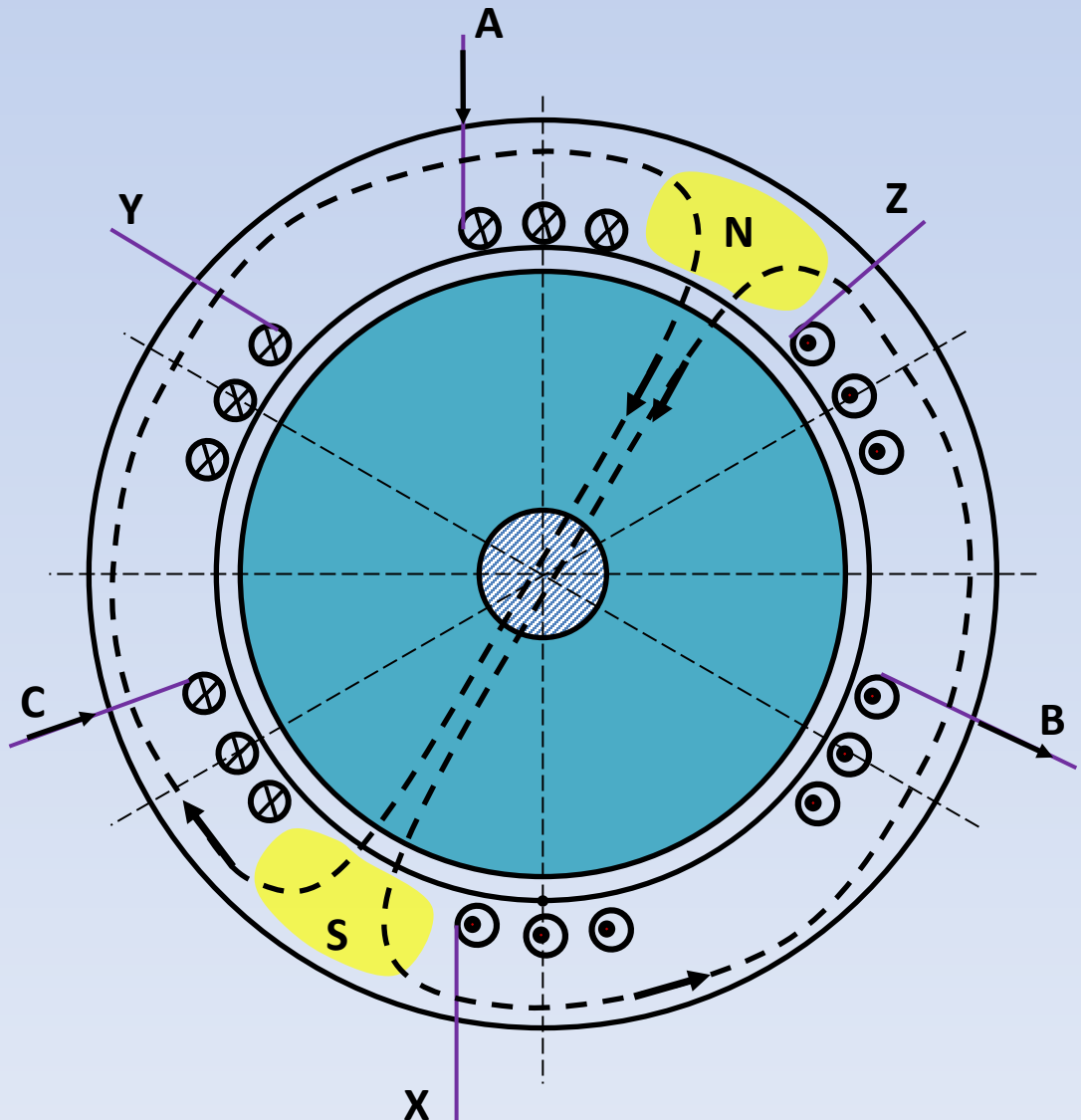
$$H = H_{max} \cos \alpha \cdot \sin \omega t$$



CÂMPUL CREAT DE O ÎNFĂȘURARE TRIFAZATĂ DISTRIBUITĂ



a. Sistem trifazat de curenți



b. Structura electromagnetica cu înfășurare statorică trifazată

Pe structura feromagnetică din cazul anterior, se plasează în creștături o înfășurarea trifazată distribuită. Aceasta este formată din trei înfășurări monofazate identice (A-X, B-Y și C-Z) care sunt plasate SPAȚIAL la 120° (electrice).

Înfășurarea este parcursă de un sistem trifazat de curenți. La momentul t_0 , curenții sunt pozitivi prin fazele A-X și C-Z și negativ prin faza B-Y (conform variației sinusoidale a curenților, prezentată în figura a) .

Pentru această situație, liniile câmpului magnetic creat de sistemul trifazat de curenți se închid ca în figura b și formează doi poli (N și S), marcați cu galben (pentru simplificarea desenului s-a prezentat doar câte o linie de câmp creată de grupul de 9 conductoare din dreapta ce este parcurs în același sens de curenții sistemului trifazat, respectiv o linie de câmp a celor 9 conductoare din stânga) .

Are loc o magnetizare a circuitului magnetic al statorului, care este particulară momentului t_0 .

Expresia sistemului trifazat de curenți ce străbate conductoarele înfășurării statorice este:

$$\begin{cases} i_{AX} = \sqrt{2}I \sin \omega t \\ i_{BY} = \sqrt{2}I \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ i_{CZ} = \sqrt{2}I \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \end{cases}$$

Câmpul magnetic rezultat din întrefier este suma câmpurilor magnetice create de fiecare înfășurare monofazata in parte, adică:

$$H_{rez} = H_{AX} + H_{BY} + H_{CZ}$$

sau:

$$\begin{aligned} H_{rez} &= \\ &= H_{max} \sin \omega t \cdot \cos p\alpha + H_{max} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \cdot \cos \left(p\alpha - \frac{2\pi}{3} \right) \\ &+ H_{max} \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \cdot \cos \left(p\alpha - \frac{4\pi}{3} \right) \end{aligned}$$

Întrucât: $\sin x \cdot \cos y = \frac{1}{2} [\sin(x + y) + \sin(x - y)]$

Expresia câmpului
rezultant devine:

$$\begin{aligned} H_{rez} &= \\ &= \frac{1}{2} H_{max} [\sin(\omega t + p\alpha) + \sin(\omega t - p\alpha)] \\ &+ \frac{1}{2} H_{max} \left[\sin\left(\omega t + p\alpha - \frac{4\pi}{3}\right) + \sin(\omega t - p\alpha) \right] \\ &+ \frac{1}{2} H_{max} \left[\sin\left(\omega t + p\alpha - \frac{8\pi}{3}\right) + \sin(\omega t - p\alpha) \right] \end{aligned}$$

dar: $\sin(\omega t + p\alpha) + \sin\left(\omega t + p\alpha - \frac{4\pi}{3}\right) + \sin\left(\omega t + p\alpha - \frac{8\pi}{3}\right) = 0$

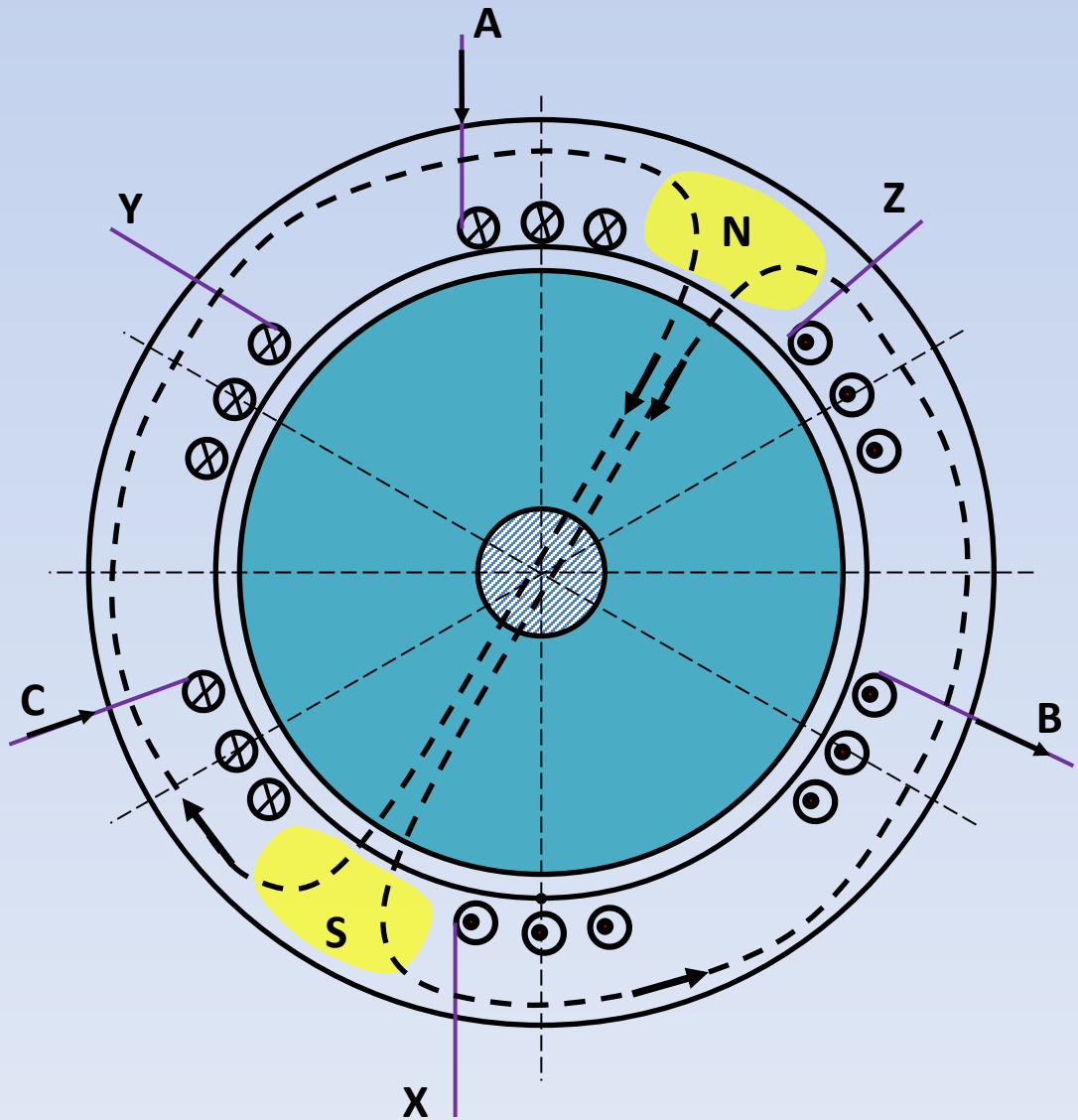
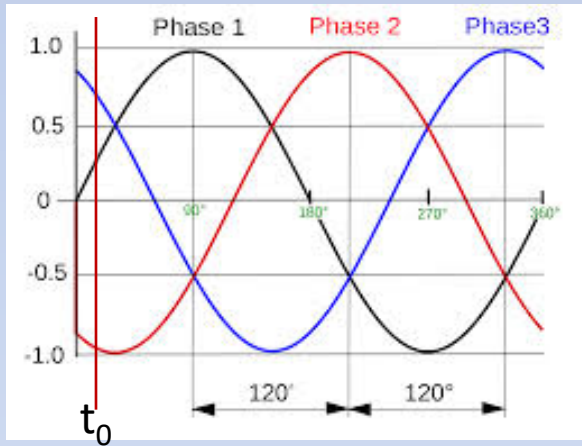
$$H_{rez} = \frac{3}{2} H_{max} \cdot \sin(\omega t - p\alpha);$$

$$B_{rez} = \frac{3}{2} B_{max} \cdot \sin(\omega t - p\alpha)$$

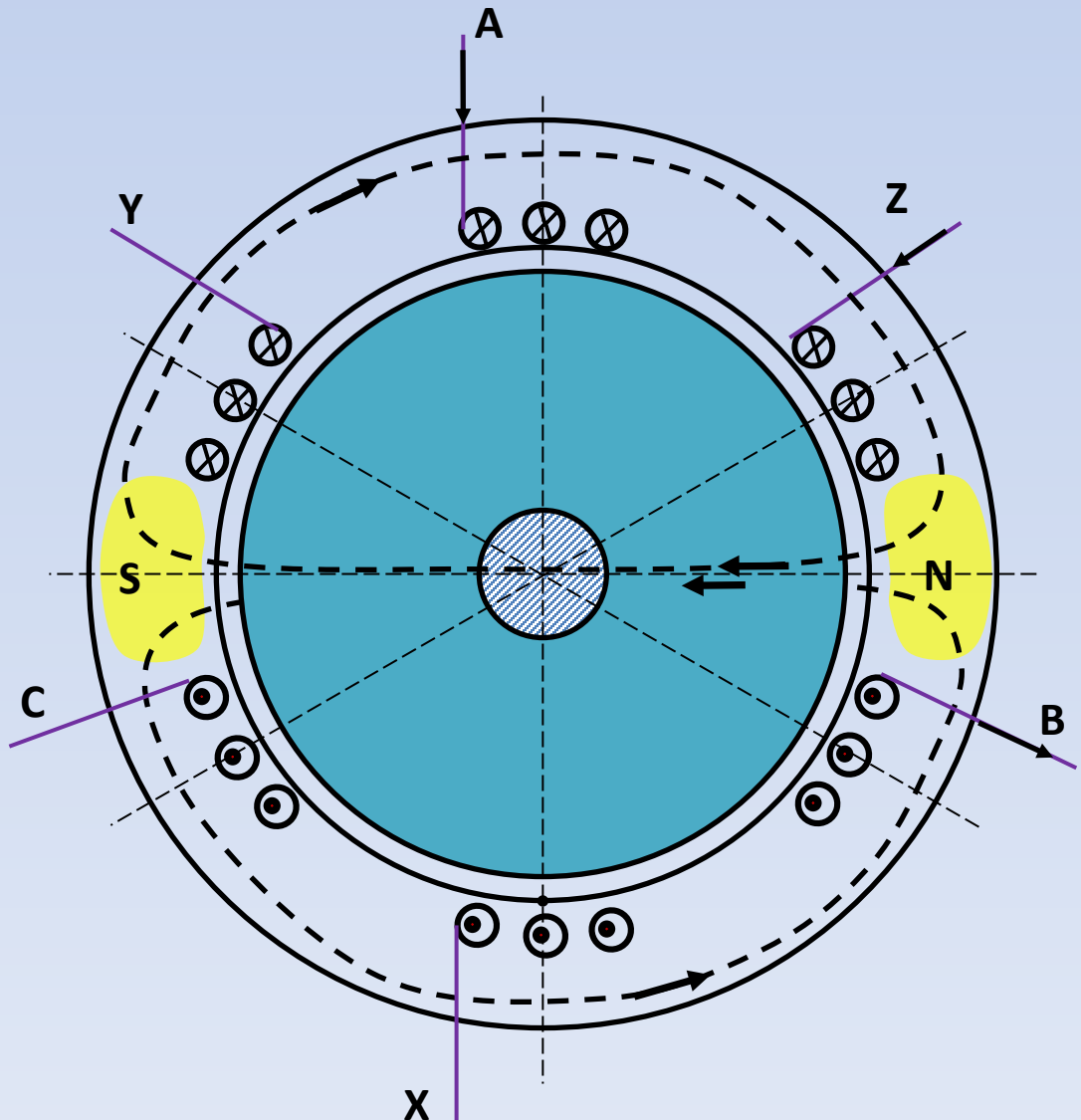
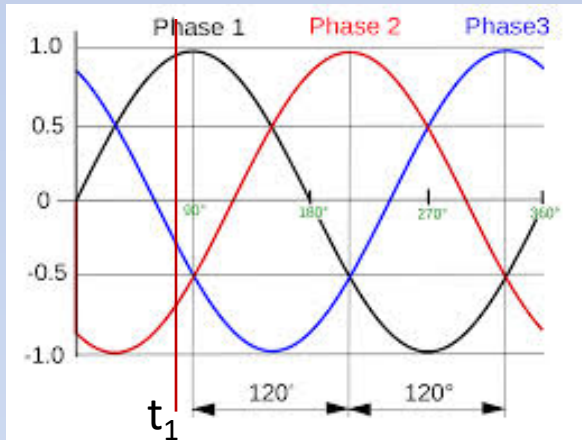


**Această relație reprezintă expresia unui câmp ÎNVÂRTITOR
care este VARIABIL în spațiu și VARIABIL în timp**

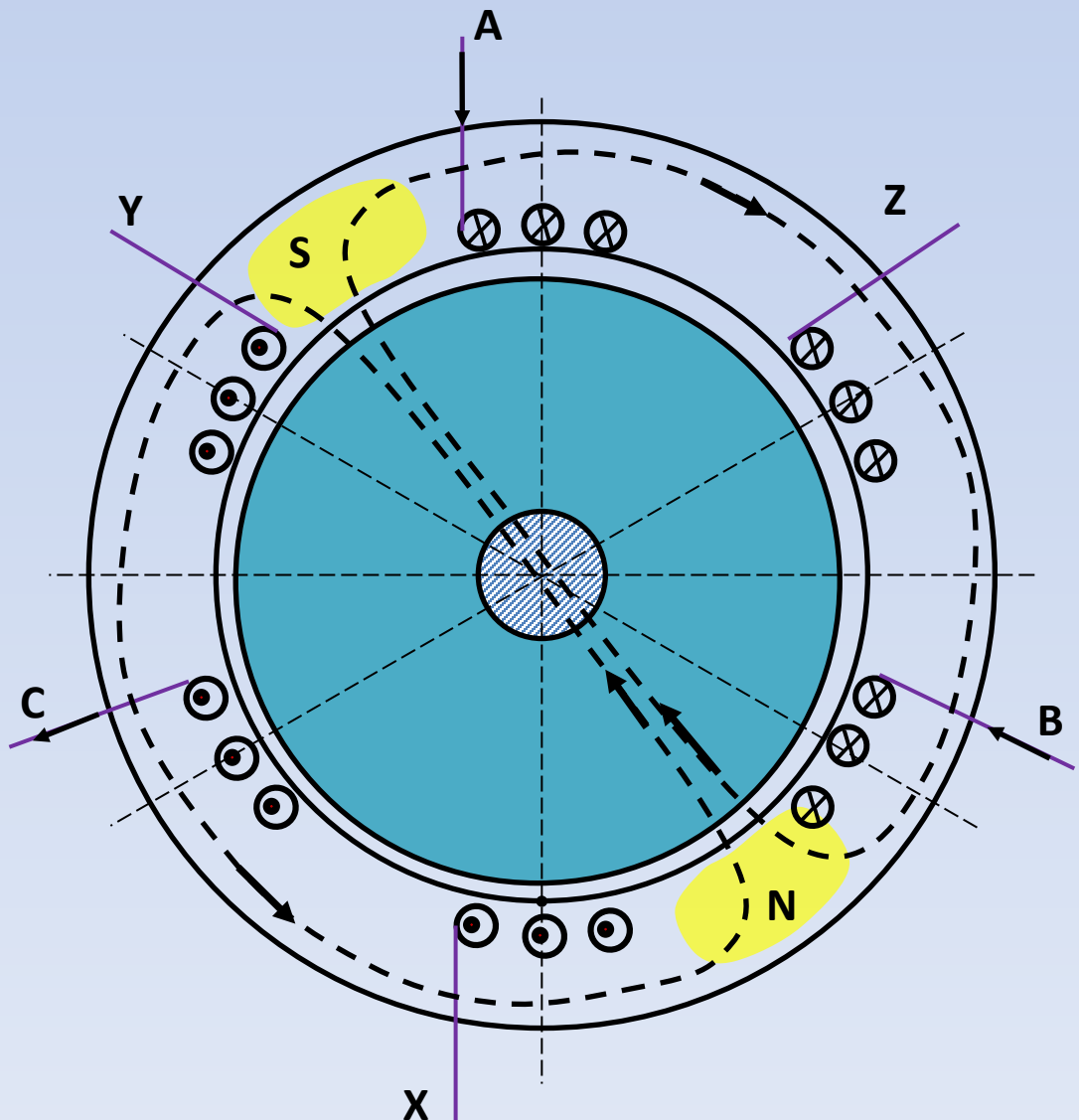
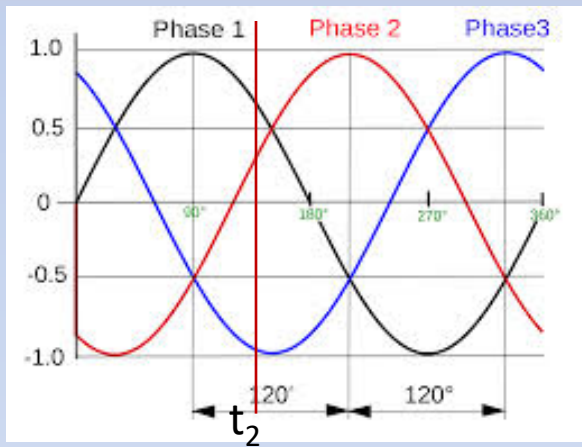
a) Poziția câmpului la momentul t_0



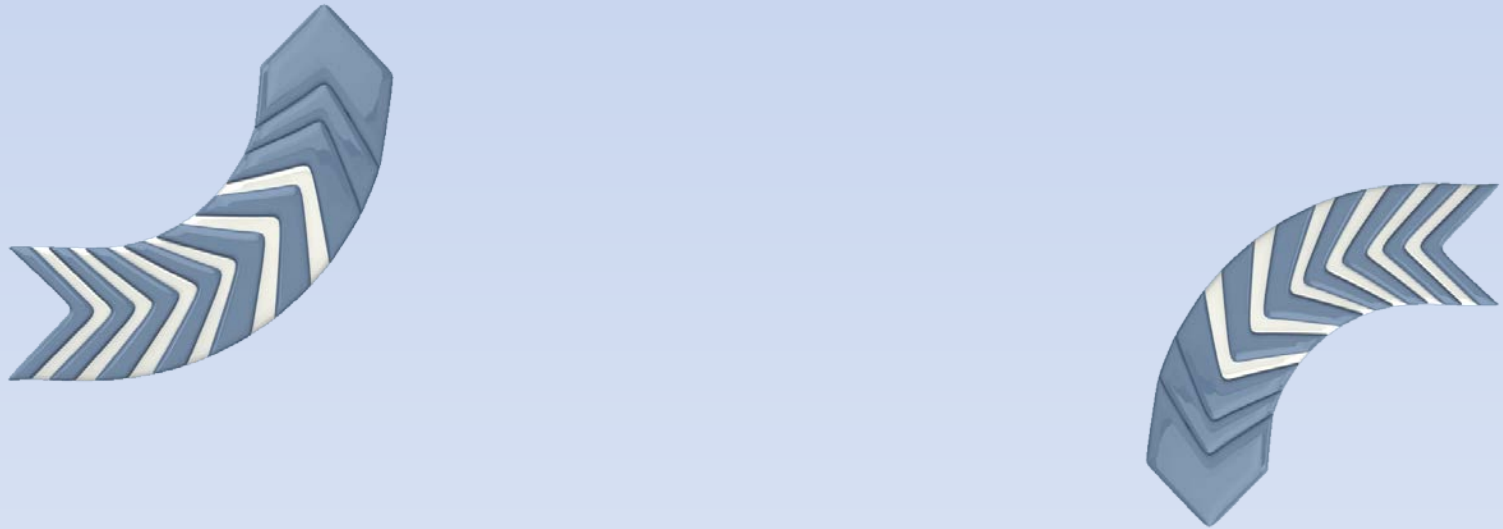
b) Poziția câmpului la momentul t_1



c) Poziția câmpului la momentul t_2

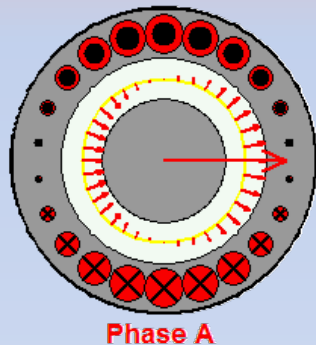


Sistemul de curenți trifazat (caracterizat de defazajul temporal între curenți de 120°) ce străbate înfășurarea trifazată (având fazele decalate spațial la 120° electrice) determină formarea unui câmp magnetic ai cărui poli ocupă diferite poziții spațiale.

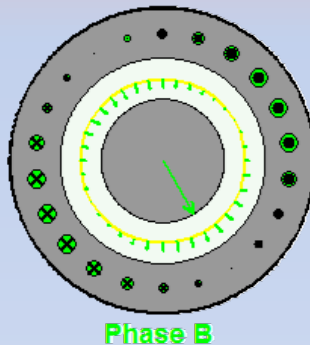


Poziția polilor magnetici sugerează o rotire a acestora. Sensul de rotire este dat de succesiunea fazelor (sensul curenților prin cele trei înfășurări de fază).

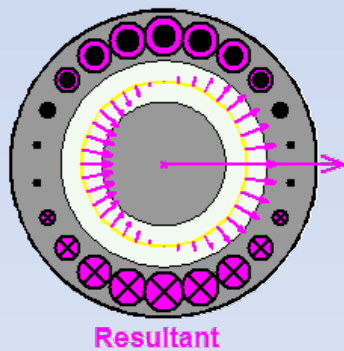
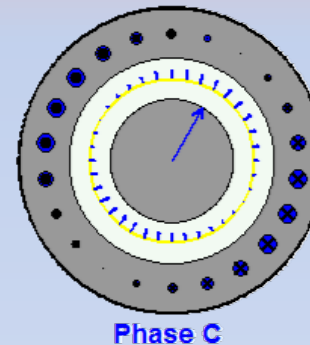
Câmpul creat de faza A-X



Câmpul creat de faza B-Y

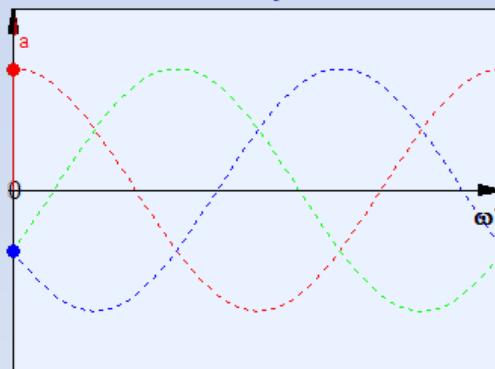


Câmpul creat de faza C-Z



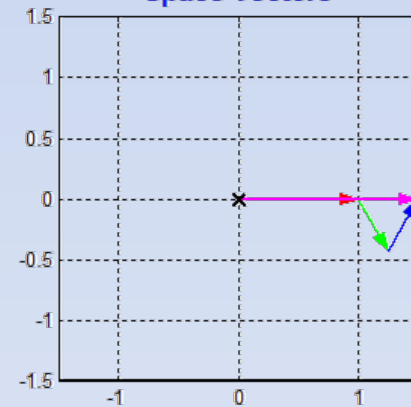
Câmpul rezultat

Balanced three-phase currents

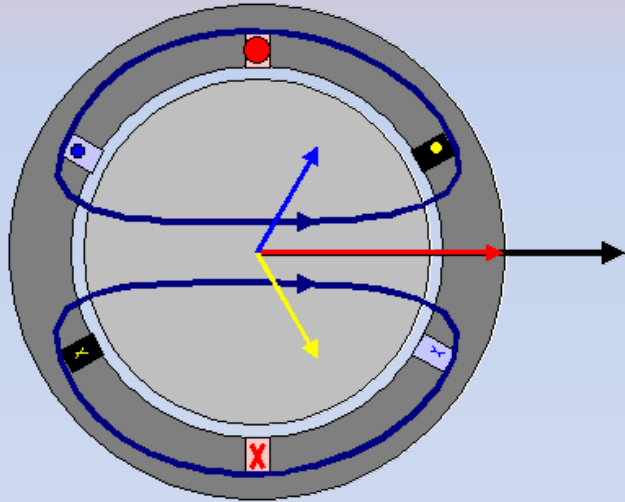


Variația curenilor sistemului trifazat

Space vectors



Variația vectorilor spațiali de câmp



Viteza câmpului învârtitor este data de:

$$\Omega_1 = \frac{\omega}{p} \quad [\text{rad/sec}]$$

unde: ω -pulsăția curentului, p -numărul perechilor de poli magnetici formați

Întrucât: $\Omega_1 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p}$ dar, de asemenea: $\Omega_1 = \frac{2\pi \cdot n_1}{60}$

Rezulta expresia turației câmpul învârtitor:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} \quad [\text{rot/min}]$$

Viteza câmpului învârtitor poarta numele de VITEZA DE SINCRONISM.

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}$$

In funcție de numărul de poli ai mașinii, pentru frecvența de 50 Hz, pot exista următoarele turații de sincronism:

$$p = 1 \rightarrow n_1 = 3000 \text{ rot/min}$$

$$p = 2 \rightarrow n_1 = 1500 \text{ rot/min}$$

$$p = 3 \rightarrow n_1 = 1000 \text{ rot/min}$$

$$p = 4 \rightarrow n_1 = 750 \text{ rot/min}$$

.....

INVERSAREA SENSULUI DE rotație AL CÂMPULUI ÎNVÂRTITOR

Dacă se modifică succesiunea curenților a doua faze (de ex. faza a doua și a treia) se obține:

$$\begin{aligned} H_{rez} &= \\ &= H_{max} \sin \omega t \cdot \cos p\alpha + H_{max} \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \cdot \cos \left(p\alpha - \frac{2\pi}{3} \right) \\ &+ H_{max} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \cdot \cos \left(p\alpha - \frac{4\pi}{3} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_{rez} &= \\ &= \frac{1}{2} H_{max} [\sin(\omega t + p\alpha) + \sin(\omega t - p\alpha)] \\ &+ \frac{1}{2} H_{max} \left[\sin(\omega t + p\alpha - 2\pi) + \sin \left(\omega t - p\alpha - \frac{2\pi}{3} \right) \right] \\ &+ \frac{1}{2} H_{max} \left[\sin(\omega t + p\alpha - 2\pi) + \sin \left(\omega t - p\alpha + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \end{aligned}$$

$$H_{rez} = \frac{3}{2} H_{max} \cdot \sin(\omega t + p\alpha)$$

$$\Omega_1 = -\frac{\omega}{p}$$



Inversarea sensului de rotație al câmpului învârtitor se obține prin schimbarea succesiunii fazelor curenților (inversarea a două faze).

TEOREMA LUI LEBLANC

Expresia câmpului alternativ este:

$$H = H_{max} \cos p\alpha \cdot \sin \omega t$$

Prin înlocuirea produsului trigonometric $\cos(p\alpha) \cdot \sin(\omega t)$, se obține:

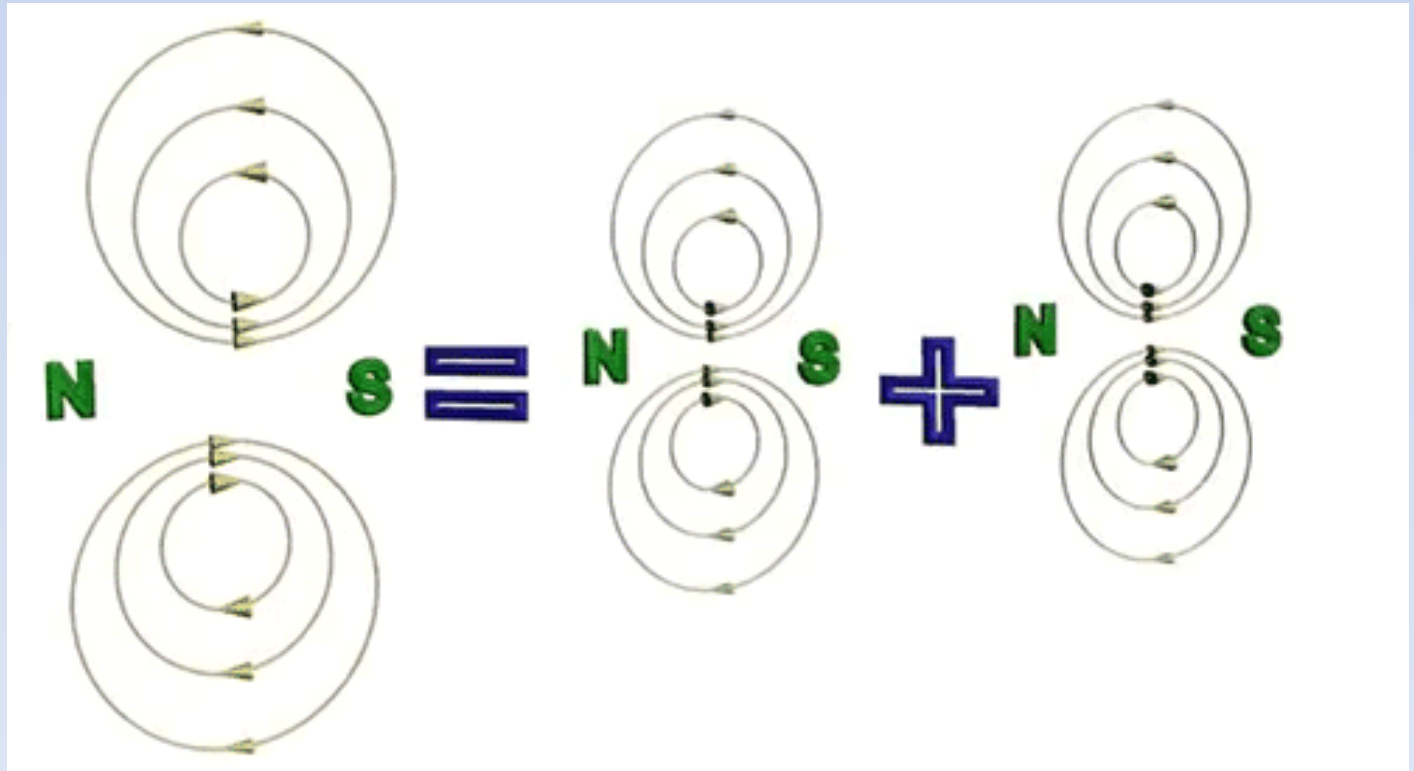
$$H = \frac{1}{2} H_{max} \cdot \sin(\omega t - p\alpha) + \frac{1}{2} H_{max} \cdot \sin(\omega t + p\alpha)$$

Expresia unui câmp magnetic învârtitor
ce se rotește în sens „direct”

Expresia unui câmp magnetic învârtitor
ce se rotește în sens „invers”



Câmpul magnetic creat de o înfășurare monofazată este echivalent cu două câmpuri învârtitoare identice care se rotesc în sensuri contrare și au amplitudinea pe jumătate.

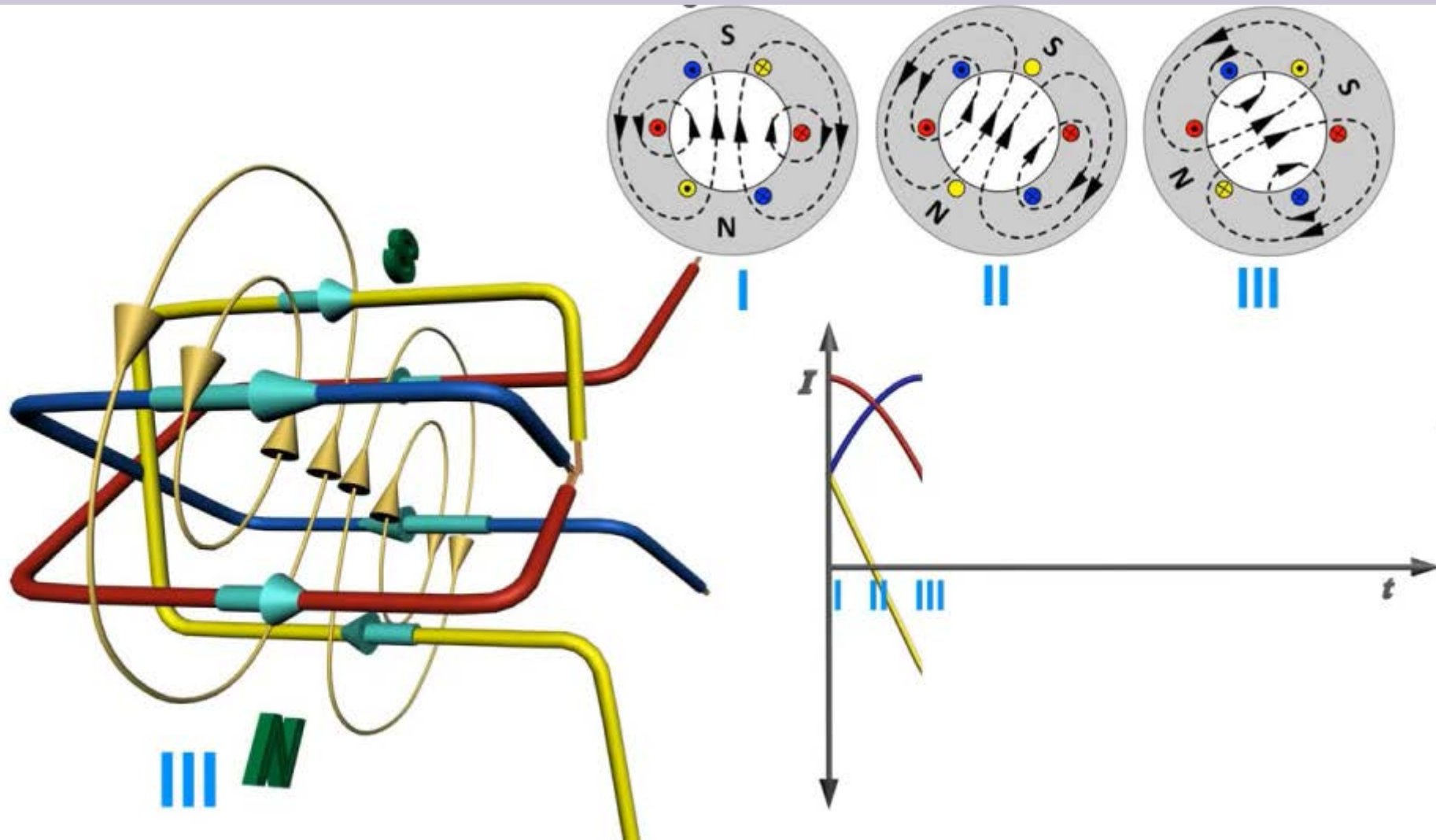




Câmp pulsatoriu (alternativ) – este creat de o înfășurare monofazată

Câmp învârtitor – este creat de o înfășurare polifazată

Viteza de sincronism – viteza câmpului magnetic învârtitor



MAȘINA ASINCRONĂ

Curs 3

Construcție și
principiu de
funcționare



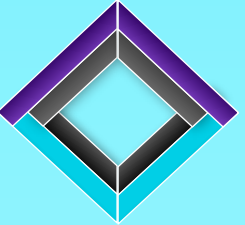
CUPRINS



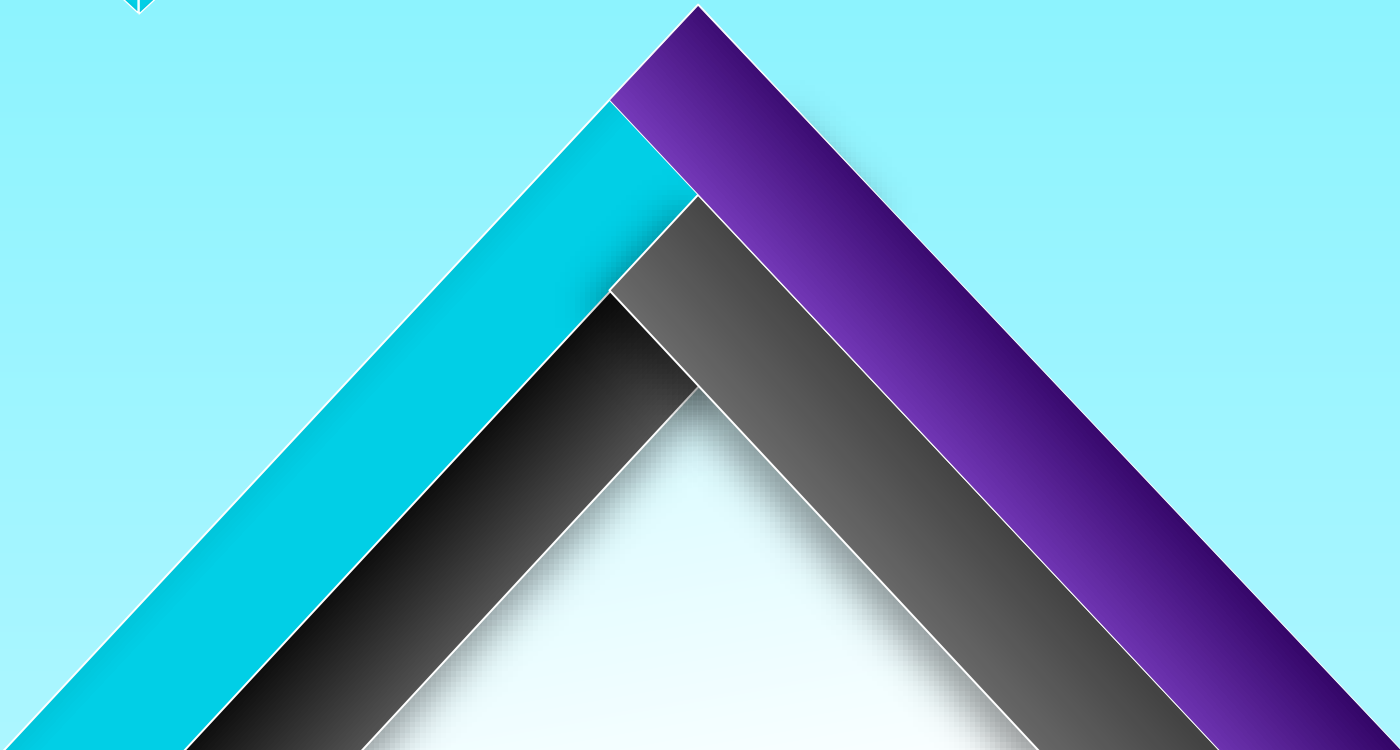
1. Înfășurările mașinilor de curent alternativ



2. Elemente componente și tipuri constructive de mașini asincrone

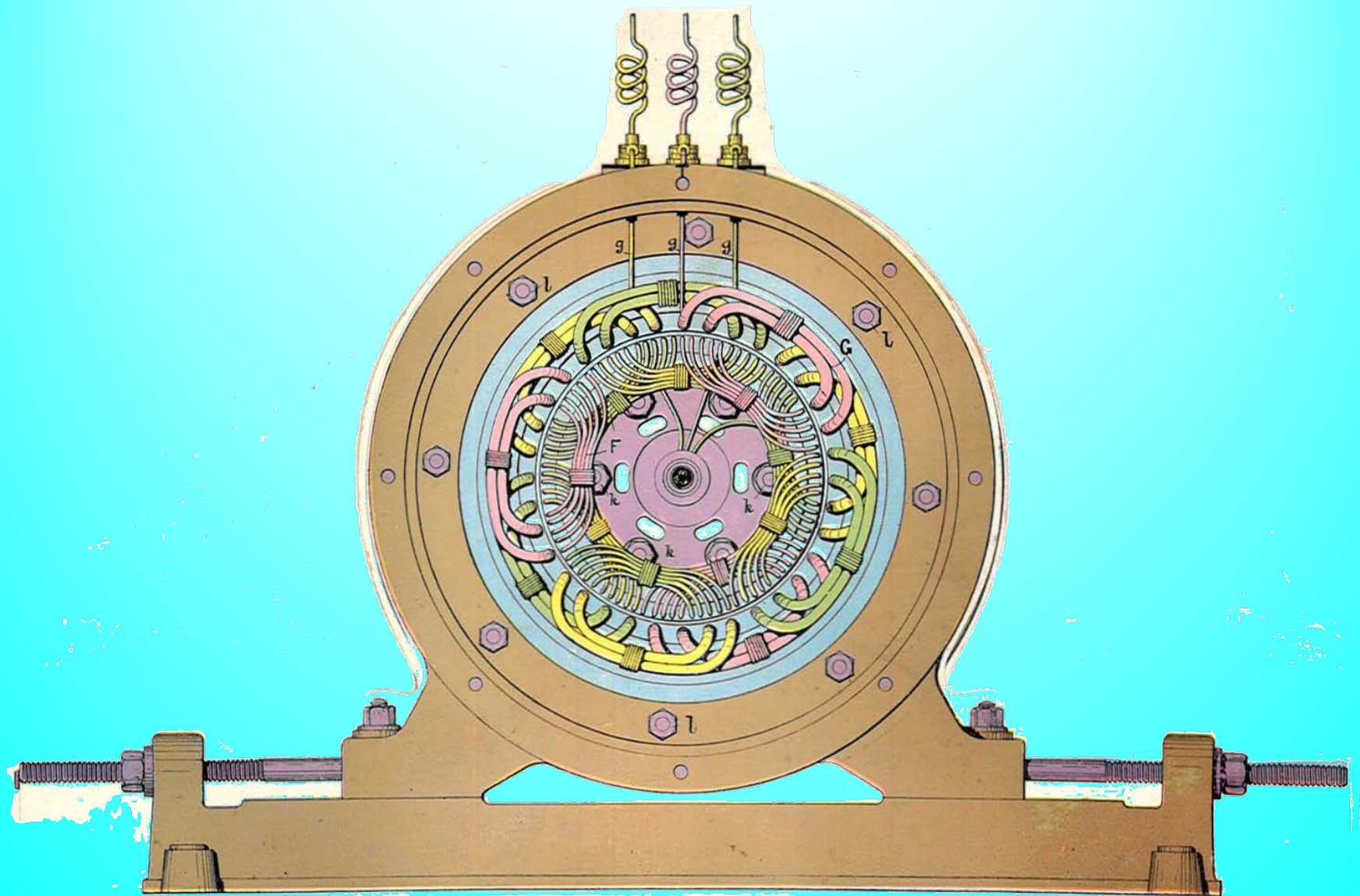


3. Principiul de funcționare a mașinii asincrone

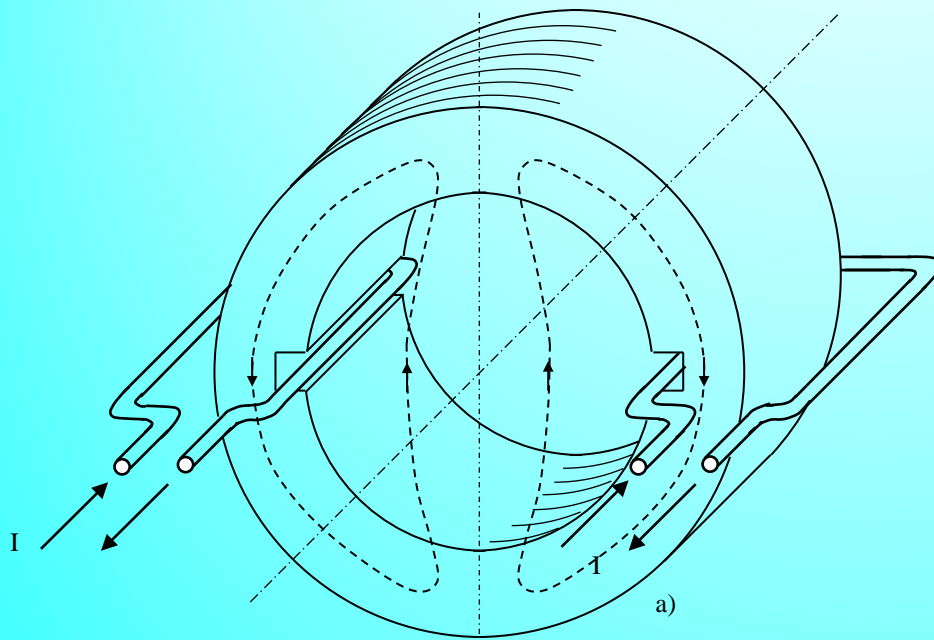


Înfășurări de curent alternativ

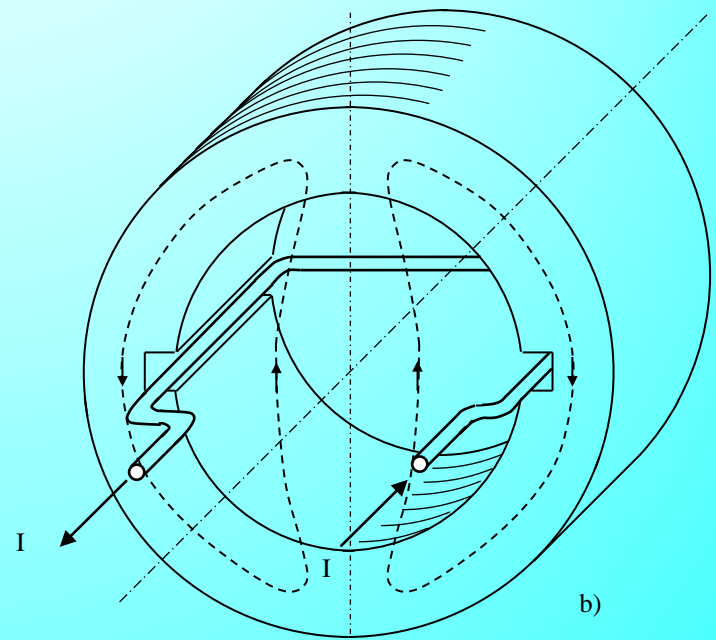
- **Înfășurări de tip repartizat**
- **Înfășurări în scurtcircuit (colivie de veveriță)**
- **Înfășurări de tip concentrat**



Mașină asincronă – secțiune transversală



a. Înfășurare în inel (toroidală)
(o singură latură activă)



b. Înfășurare în tobă
(ambele laturi active)

$$2p = 2$$

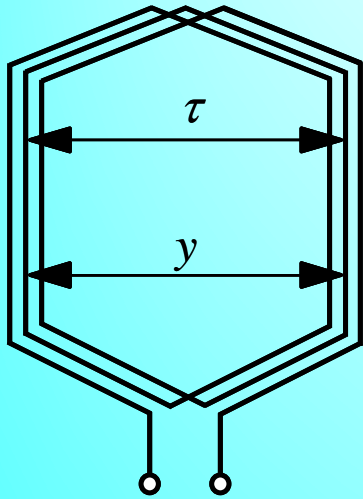
Bobinele ce formează înfășurarea în inel sunt plasate în câte o creștătură statorică având laturile de o parte și de cealaltă a statorului (fig. a din slide-ul anterior). Partea activă a fiecărei bobine este latura plasată în creștătură.

Acest tip de înfășurare este mai puțin folosit întrucât se consideră că o mare parte din fiecare bobină nu joacă un rol activ.

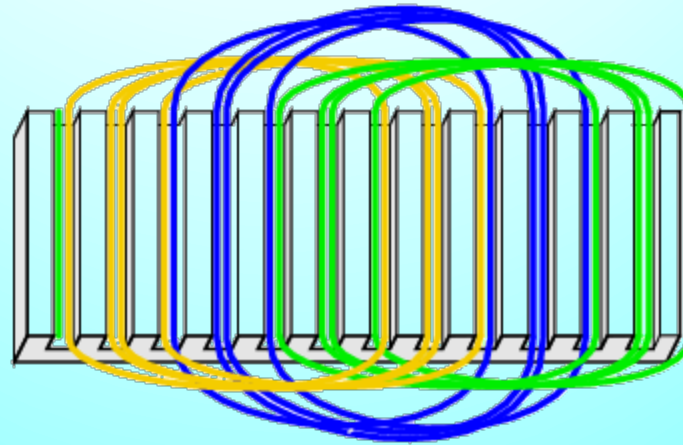
Înfășurările în tobă sunt formate din bobine care au ambele laturi plasate în creștături statorice și deci partea activă este preponderentă.

Acest tip de înfășurare este cel mai utilizat în construcția actuală a mașinilor de curent alternativ.



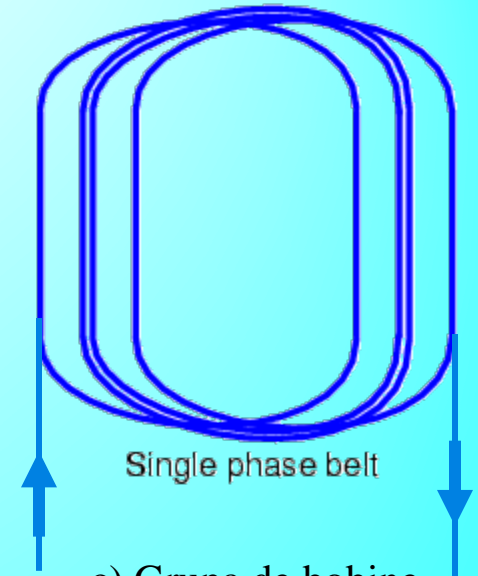


a) $w_s=3$ (buclată)



3- ϕ distributed winding

b) Înfășurare distribuita trifazata



Single phase belt

c) Grupa de bobine

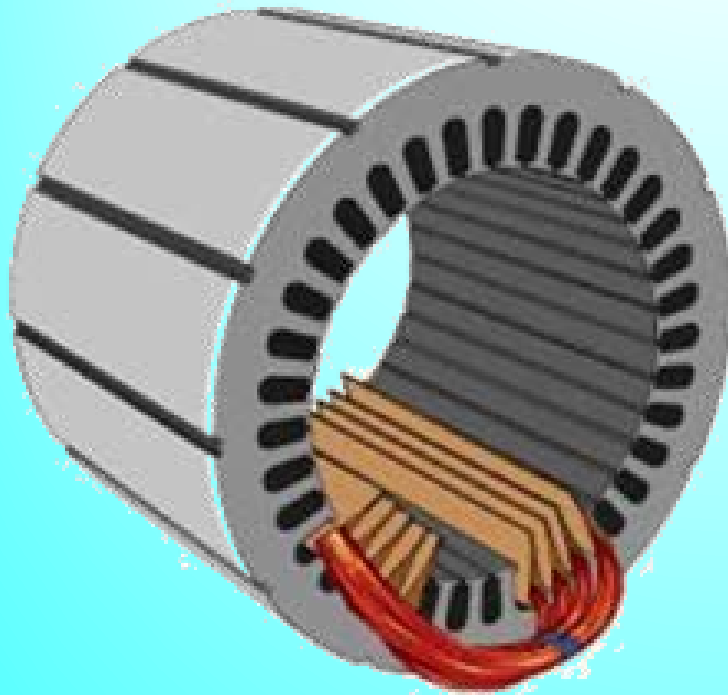
Fiecare bobină de tip repartizat are o latură de ducere (de ex. latura din stânga a figurii a) și o latură de întoarcere, care sunt plasate în creștăturile statorului. Bobinele pot fi formate dintr-o singură spiră sau din mai multe spire (în cazul bobinei din fig. a sunt 3 spire).

Distanța, în număr de creștături, dintre latura de ducere și latura de întoarcere se numește „pasul bobinei” sau „pasul înfășurării”.

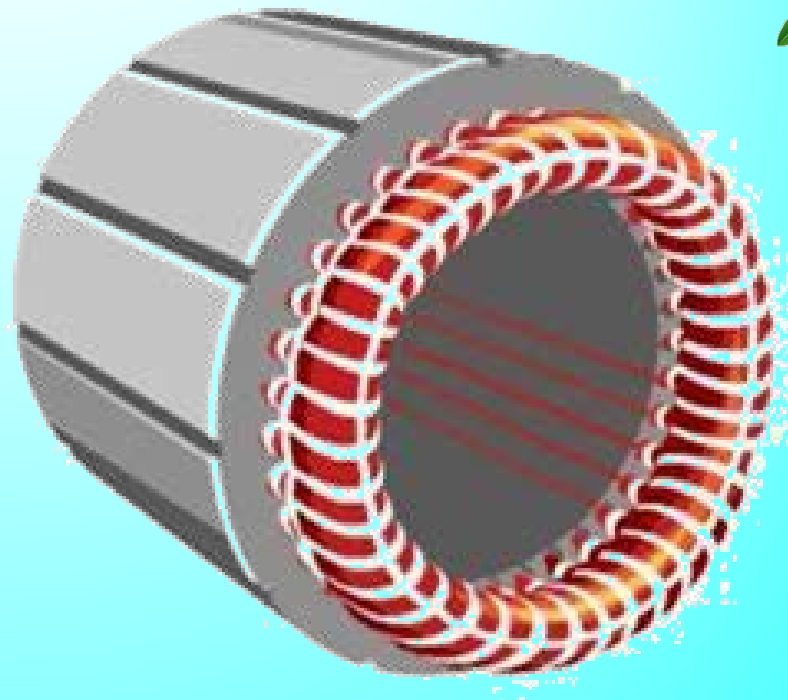
y – pasul înfășurării; τ – pasul diametral $\left(\tau = \frac{Z}{2p}\right)$

$y = \tau$ – pas diametral; $y < \tau$ – pas scurtat; $y > \tau$ – pas alungit





a) Bobinare in curs de realizare



b) Bobinaj finalizat

Rolul înfășurării statorice este de a crea câmpul magnetic inductor, respectiv de a crea un anumit număr de poli magnetici. Se fixează astfel turația de sincronism și respectiv turația rotorului.





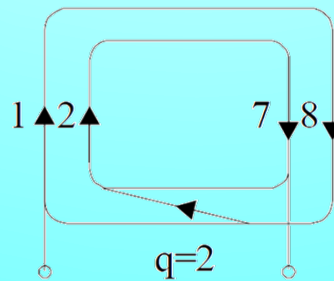
Bobinarea unui stator de mașină de CA cu bobine preformate

CLASIFICARE

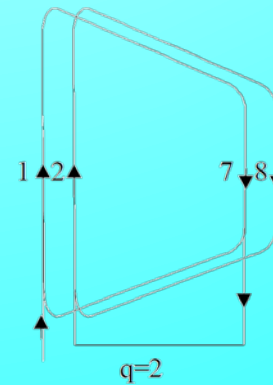
I. După tipul bobinelor

➤ Bobine egale

➤ Bobine concentrice



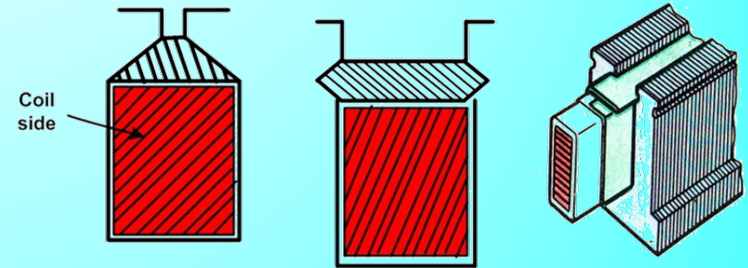
➤ Bobine trapezoidale



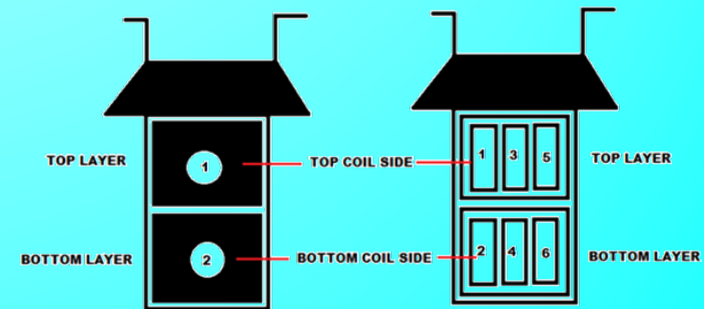
➤ Bobine in manta

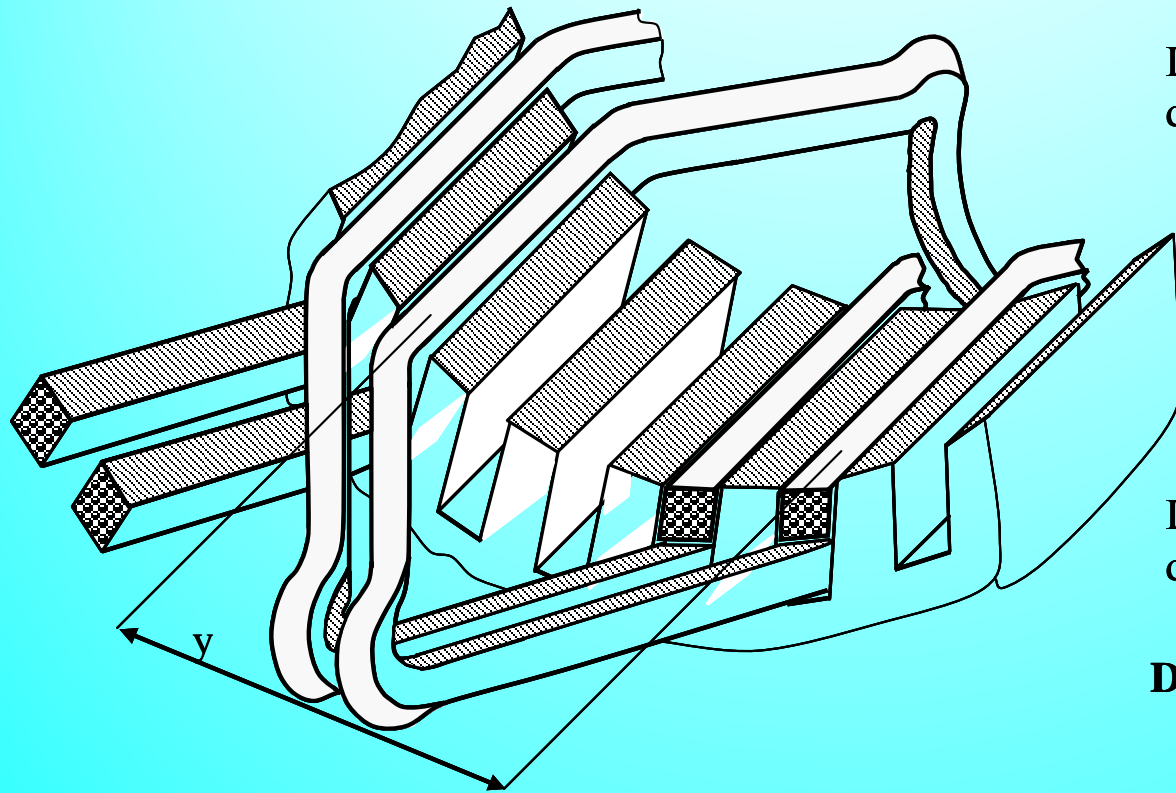
II. După numărul de straturi al înfășurării

- Înfășurări într-un singur strat (în fiecare creștătură este plasată o *singură* latură de bobină);

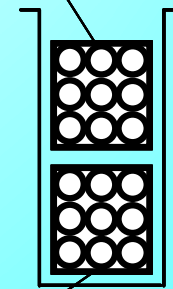


- Înfășurări în două straturi (în fiecare creștătură sunt plasate *două* laturi a două bobine diferite – o latură de ducere respectiv o latură de întoarcere). Bobinele pot fi din aceeași fază sau din faze diferite.





Latură (mănunchi)
de ducere



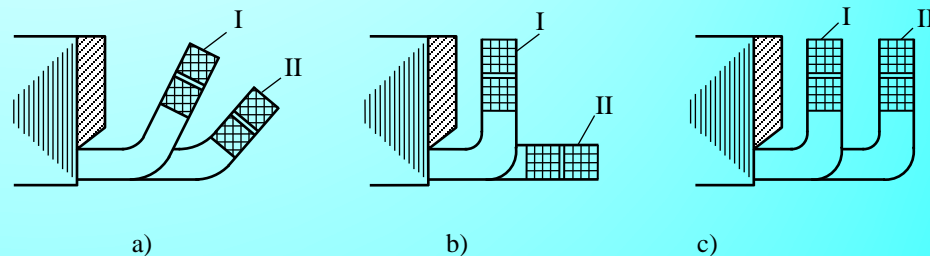
Latură (mănunchi)
de întoarcere

Detaliu creștătură

Înfășurare în dublu strat

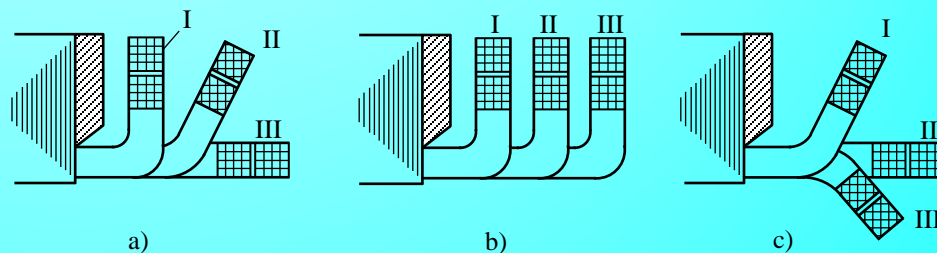
III. După dispunerea părților frontale

➤ Înfășurări în două etaje



Forme ale capetelor de bobine la înfășurări în 2 etaje

➤ Înfășurări în trei etaje



Dispunerea capetelor de bobine la înfășurări în 3 etaje

➤ Înfășurări cu capetele dispuse în coroană

CALCULUL ÎNFĂȘURĂRILOR TRIFAZATE

Date inițiale:

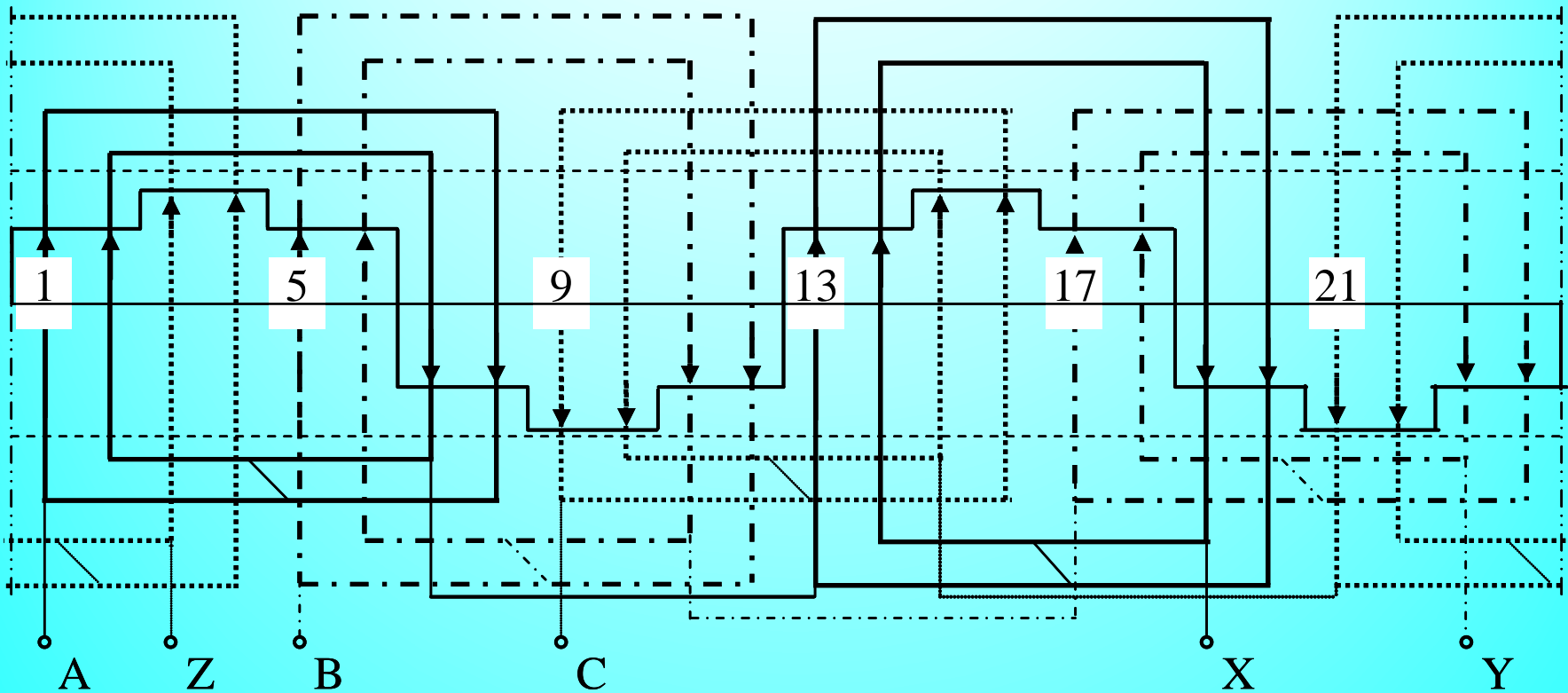
- Z – numărul de creștături statorice
- $2p$ – numărul de poli
- m – numărul de faze

Date calculate:

- Q – numărul de creștături pe pol $Q = \frac{Z}{2p}$
- q – numărul de creștături pe pol și fază $q = \frac{Z}{2pm}$
- y – pasul înfășurării $y = \tau = \frac{Z}{2p}$
- unghiul electric al fazorilor $\alpha_{el} = \frac{2\pi}{Z} \cdot p = \frac{360}{Z} \cdot p$

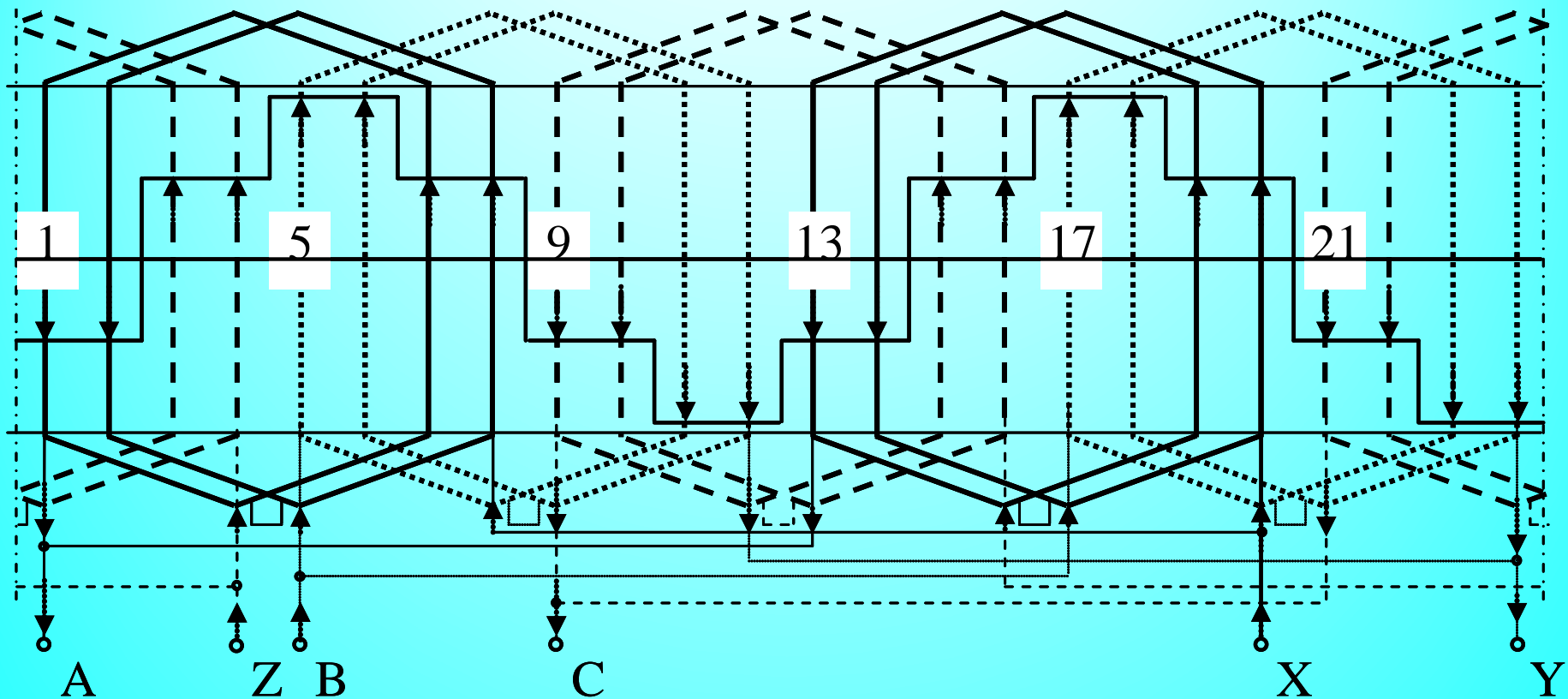


Înfășurare trifazată într-un strat (în două etaje) cu bobine concentrice, $Z=24$, $2p=4$, $a=1$



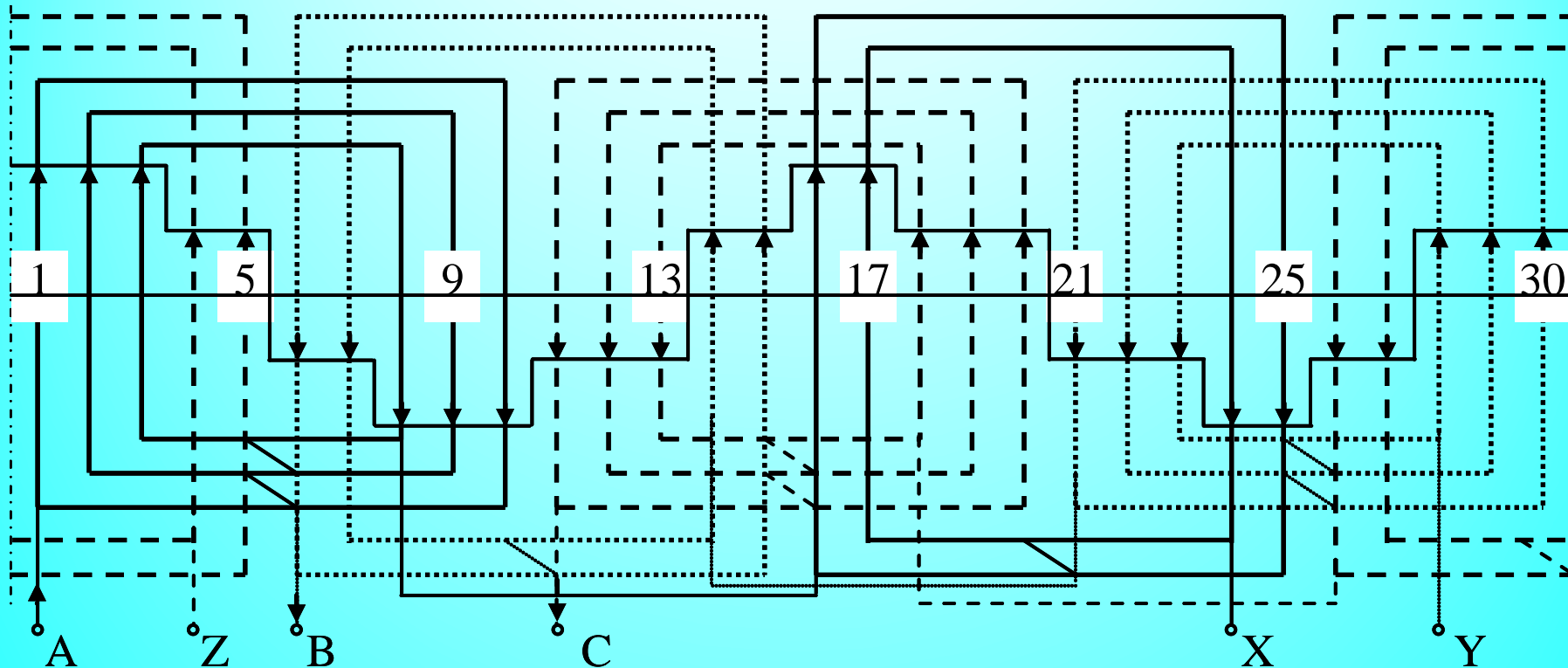
- Din punct de vedere funcțional, această înfășurare este identică cu cea de pe slide-ul anterior. Ea diferă doar din punct de vedere tehnologic;
- Pe fiecare fază există câte 2 grupuri de bobine care sunt diferite ca mărime;
- În plus fiecare grup de bobine conține câte două bobine de mărime diferită, așezate concentric;
- De ex: primul grup de bobine din faza AX are o bobină cu laturile plasate în creștăturile 1-8 și o a doua bobină având laturile plasate în creștăturile 2-7;
- Pasul înfășurării, ce corespunde cu pasul fiecărui grup de bobine, este: $(7+5)/2=6$, adică la fel ca în cazul anterior al înfășurării în manta.

Înfășurare trifazată cu bobine identice (în manta): $Z=24$, $2p=4$, $a=2$



- Parametrul a reprezintă numărul de căi de curent în paralel;
- Pe fiecare fază, cele două grupuri de bobine componente sunt legate în paralel;
- Și această înfășurare, din punct de vedere funcțional, este identică cu cele două anterioare. Curentul prin bobine este însă mai mic.

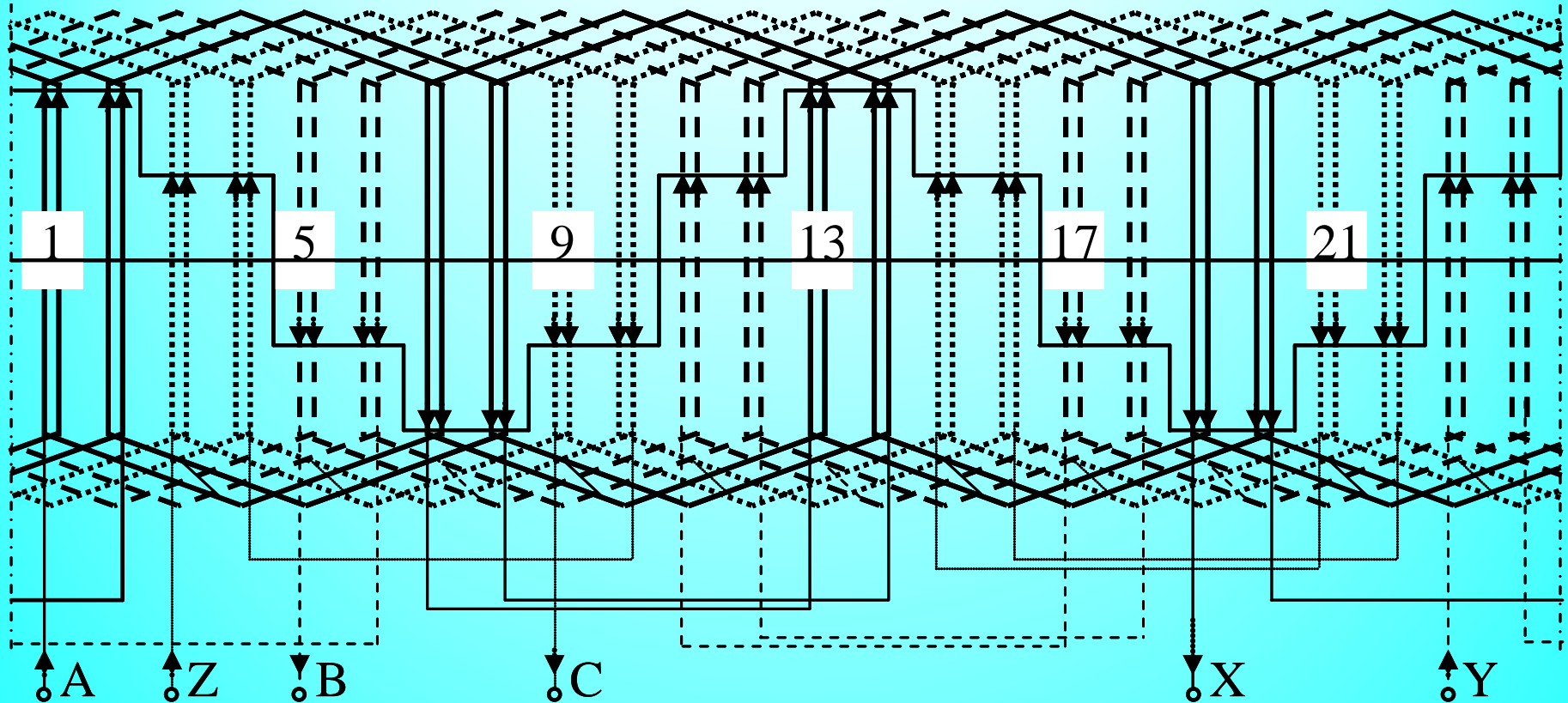
Înfășurare trifazată cu q fracționar (2,5) într-un strat: $Z=30$, $2p=4$



$$Q=30/4=7,5; q=30/12=2,5; y= \tau =30/4=7,5.$$

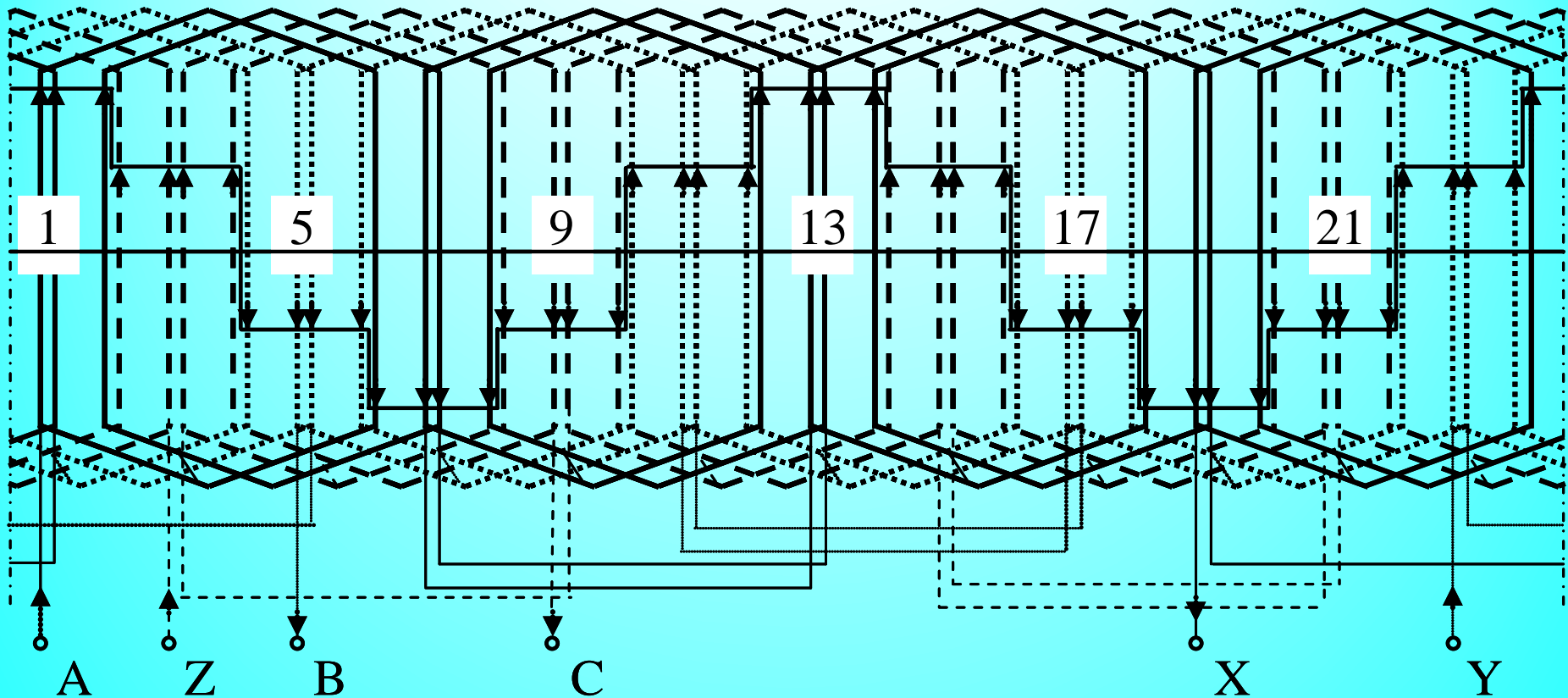
- Întrucât numărul q este fracționar, pe fiecare fază avem grupuri de bobine cu număr diferit de bobine: un grup cu 3 bobine și un grup cu 2 bobine (media este tocmai 2,5);
- Primul grup de bobine are pasul 7 iar cel de-al doilea are pasul 8 (media este 7,5);
- Înfășurarea este oarecum asimetrică pe fiecare fază dar simetrică în ansamblul ei.

Înfășurare trifazată în 2 straturi cu pas diametral: $Z=24$, $2p=4$



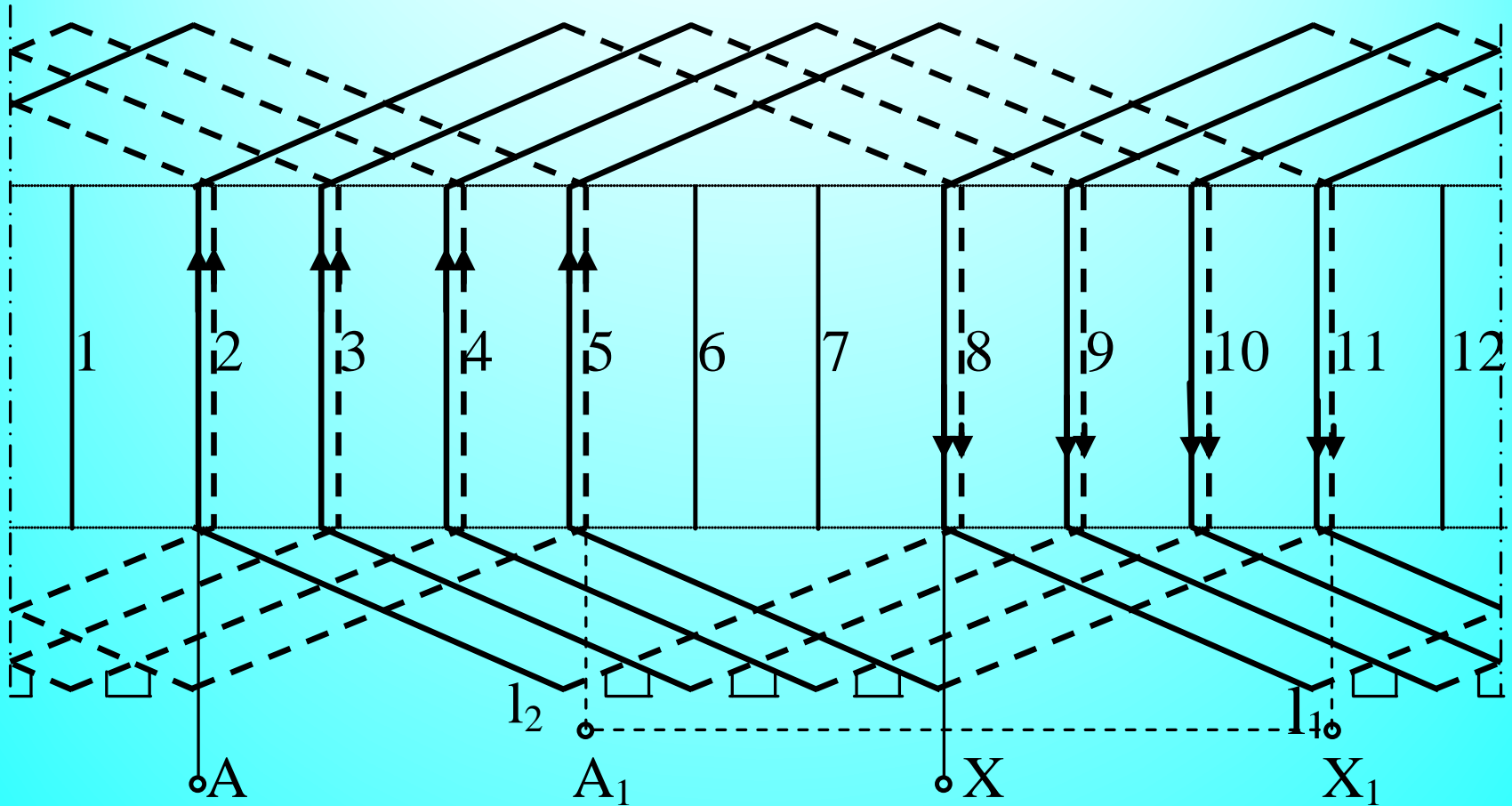
- Înfășurarea în două straturi are numărul de bobine dublat dar numărul de conductoare în creștătură rămâne același;
- În fiecare creștătură se regăsesc o latură de ducere respectiv o latură de întoarcere a unor bobine de pe faza respectivă;

Înfășurare trifazată cu pas scurtat, în 2 straturi: $Z=24$, $2p=4$



- La înfășurările cu pas scurtat, în mod deliberat se scurtează pasul diametral (în acest exemplu $y=5$ în loc de $y=6$);
- Apar creștături ce adăpostesc laturi de bobine aparținând unor faze diferite. Drept urmare apar curenți de valori diferite, uneori în sens contrar;
- Aceste înfășurări creează câmpuri magnetice în întrefier care au o formă mai apropiată de sinusoidă decât cele create de înfășurările cu pas diametral.
- Înfășurările cu pas scurtat sunt cele mai folosite în construcția mașinilor electrice. Scurtarea pasului cu 1, 2 sau 3 creștături se face după criterii bine stabilite.

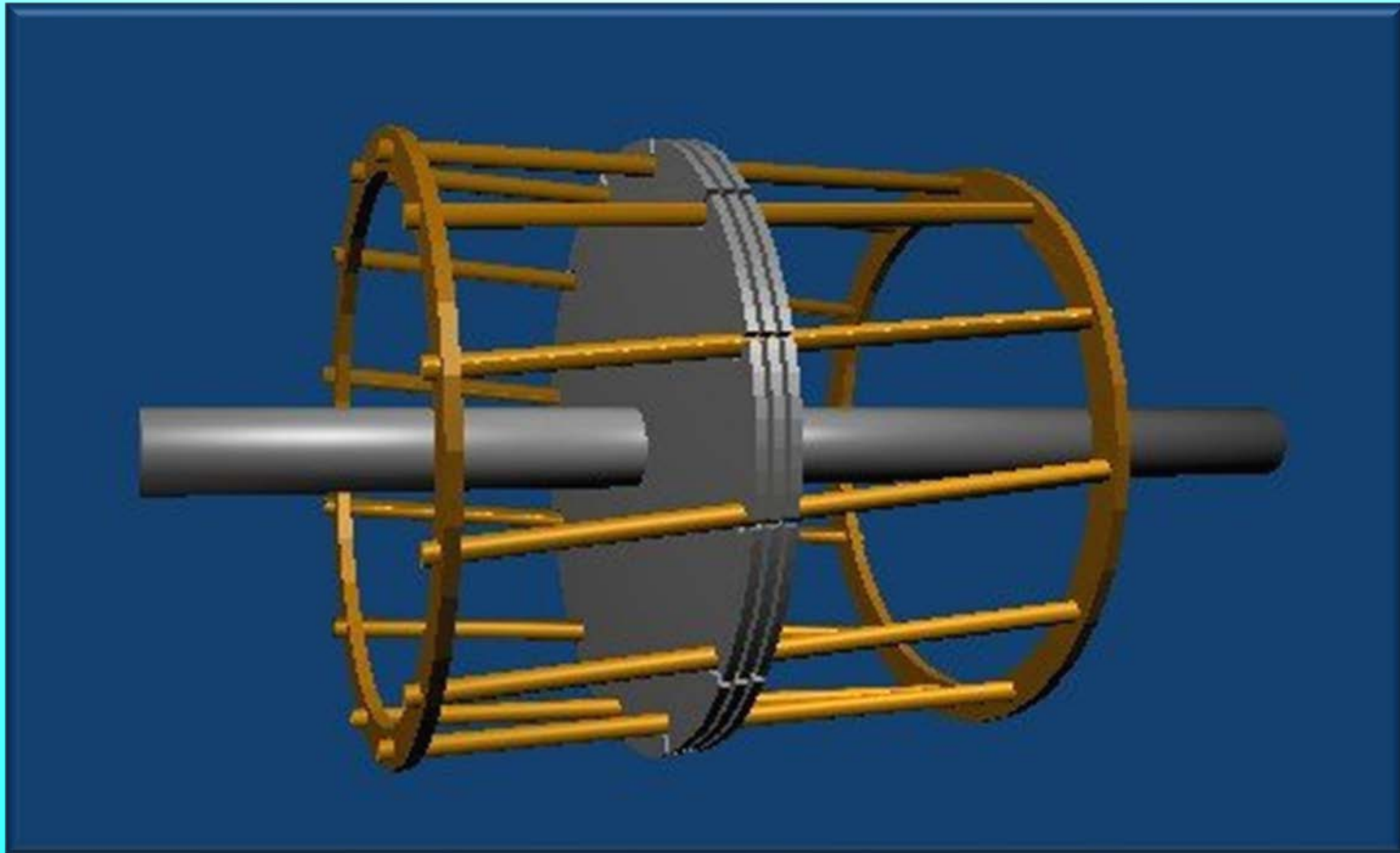
Înfășurare monofază în dublu strat: $Z=12$, $2p=2$



$$y=12/2=6$$

- Înfășurarea monofază, utilizată la mașinile asincrone monofazate, ocupă doar $2/3$ din creștăturile statorului. Relațiile de calcul sunt identice cu cele folosite la înfășurările trifazate

Înfășurare rotorica în scurt-circuit



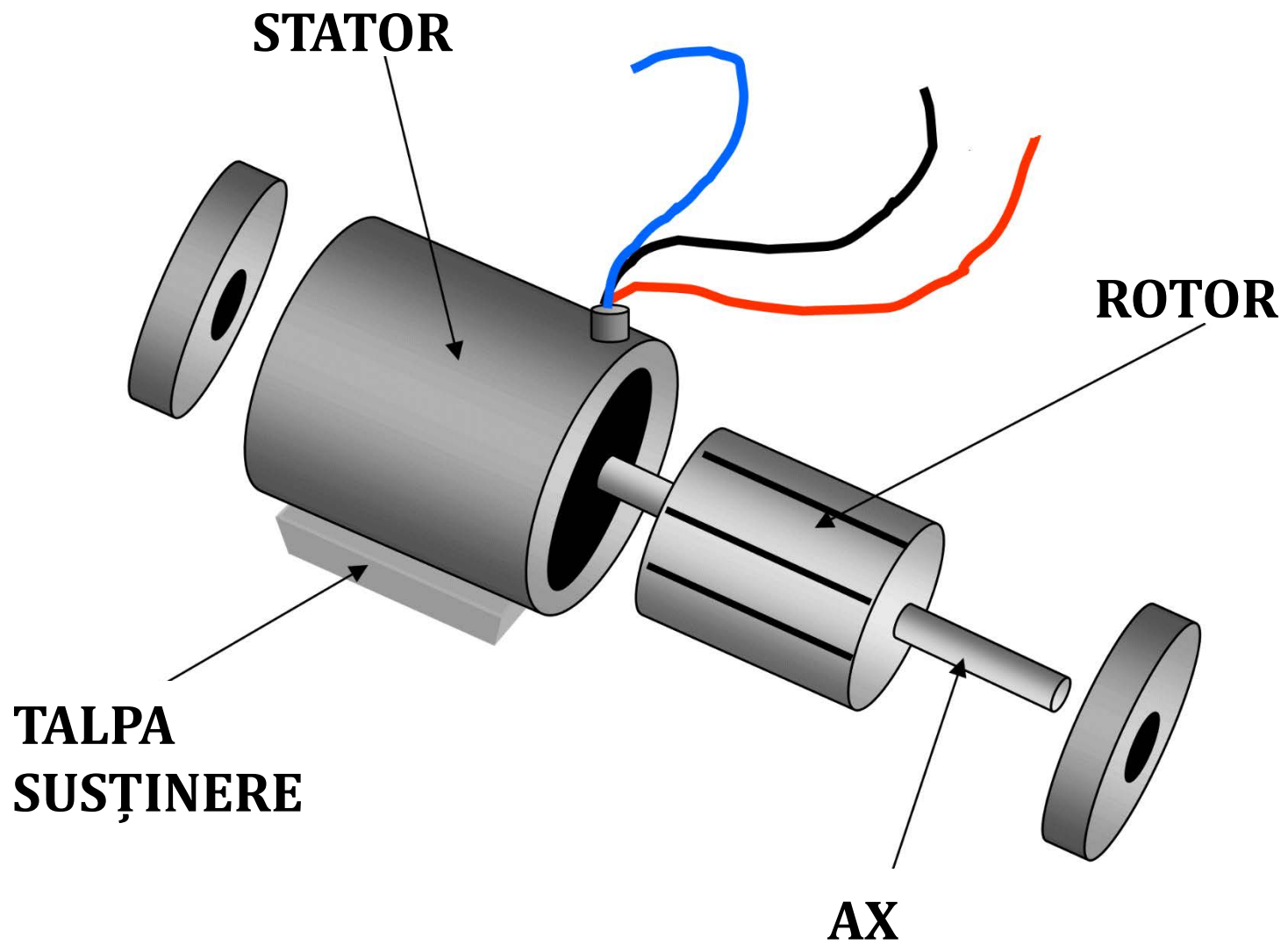
Înfășurarea în scurt-circuit este realizată din bare (cupru sau aluminiu) scurtcircuitate la capete de două inele.

NU este o înfășurare inductoare (nu se alimentează niciodată de la o sursă de tensiune exterioară) ci întotdeauna o înfășurare indusă.

Elemente constructive și tipuri de mașini asincrone



„Mașina asincronă este o mașină de curent alternativ la care viteza rotorului variază cu sarcina și nu rămâne într-un raport constant cu frecvența rețelei la care este conectată”

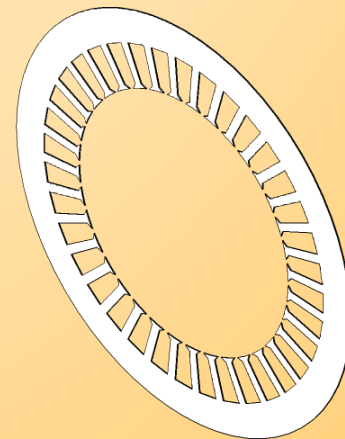
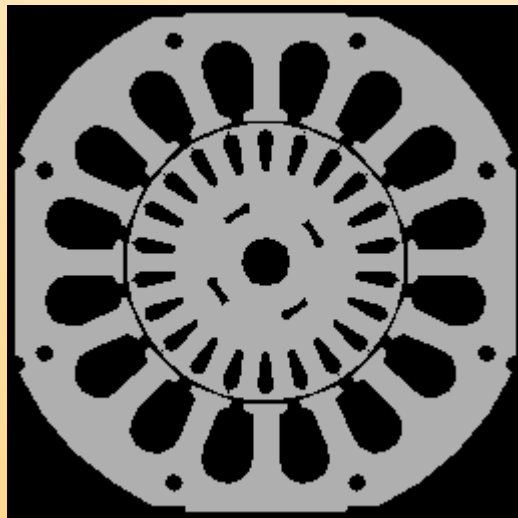
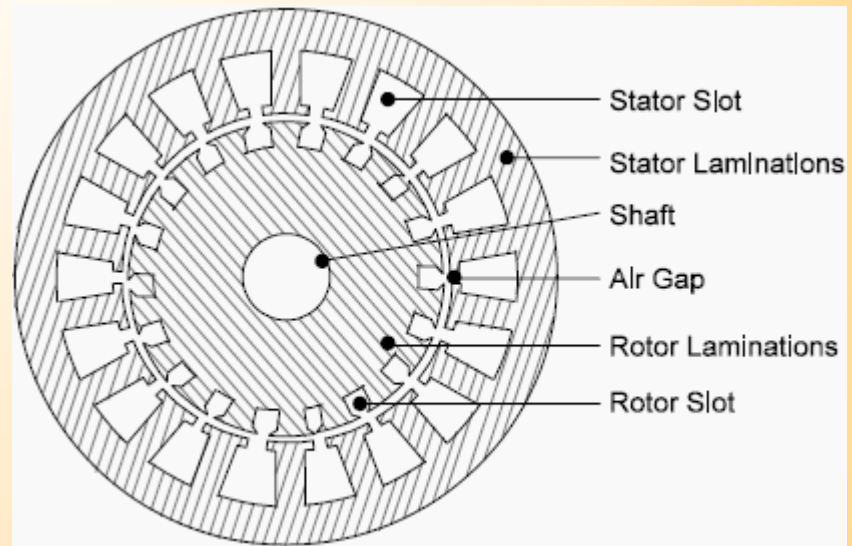
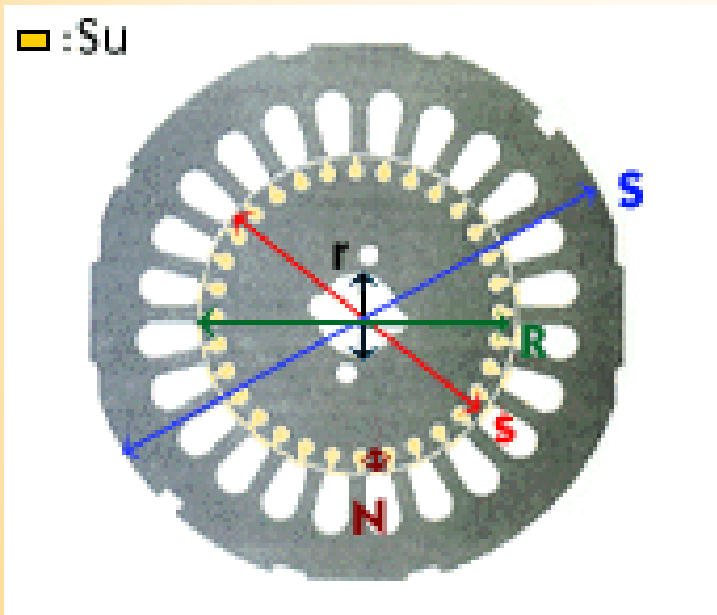


Mașina asincronă are două elemente constructive principale: statorul și rotorul.

Statorul, partea fixă a mașinii, îndeplinește, din punct de vedere funcțional, rolul de INDUCTOR (creează câmpul magnetic principal în mașină).

Rotorul, partea mobilă a mașinii, reprezintă INDUSUL (locul unde se află înfășurarea în care se „induc” curenții responsabili de crearea cuplului electromagnetic).

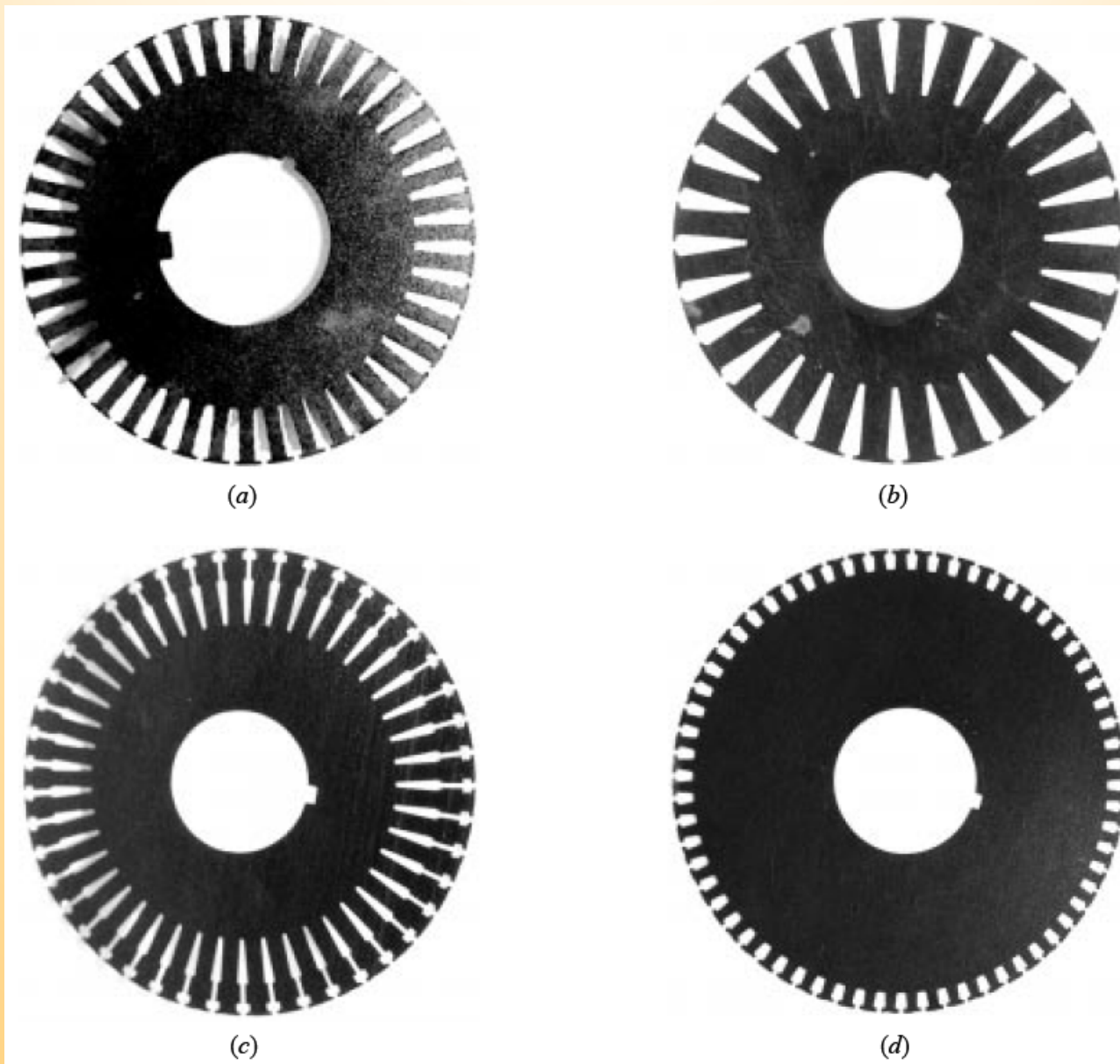
Adițional (nefigurate), mașina asincronă are elemente constructive ce nu participă la procesul de conversie electromecanică, dar fac posibilă utilizarea mașinii în acționări electrice: ax, rulmenți, carcasă, capace laterale, tălpi de susținere, cutie de borne, ventilator, etc.



Atât circuitul magnetic statoric cât și cel rotoric sunt realizate din tole . Acestea sunt fâșii din tablă feromagnetică de diverse grosimi (0,35mm, 0,28mm, etc) aliată cu siliciu.

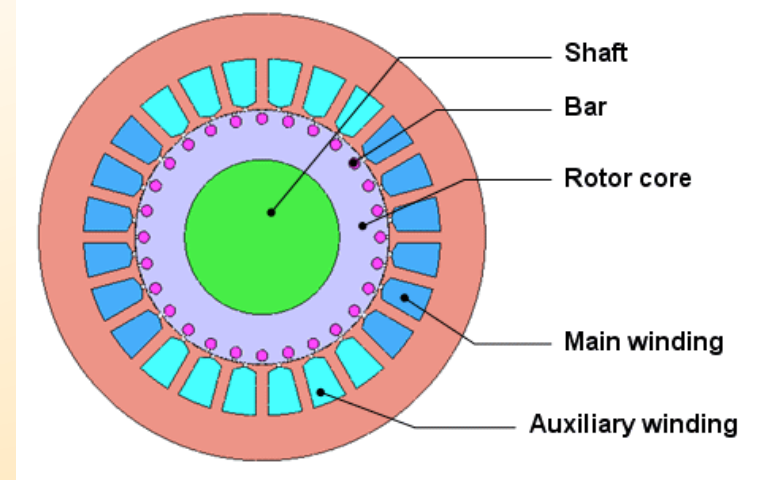
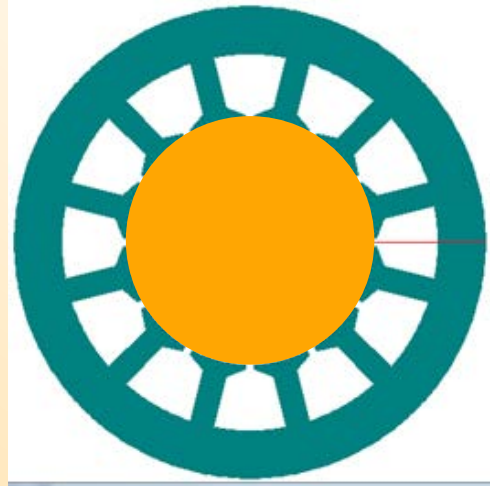
Motivul „segmentării” circuitului magnetic este prezența curenților turbionari induși în miez. Tolele, fiecare din ele purtând un strat de izolație, determină o micșorare a acestor curenți și deci o scădere a pierderilor în fier.



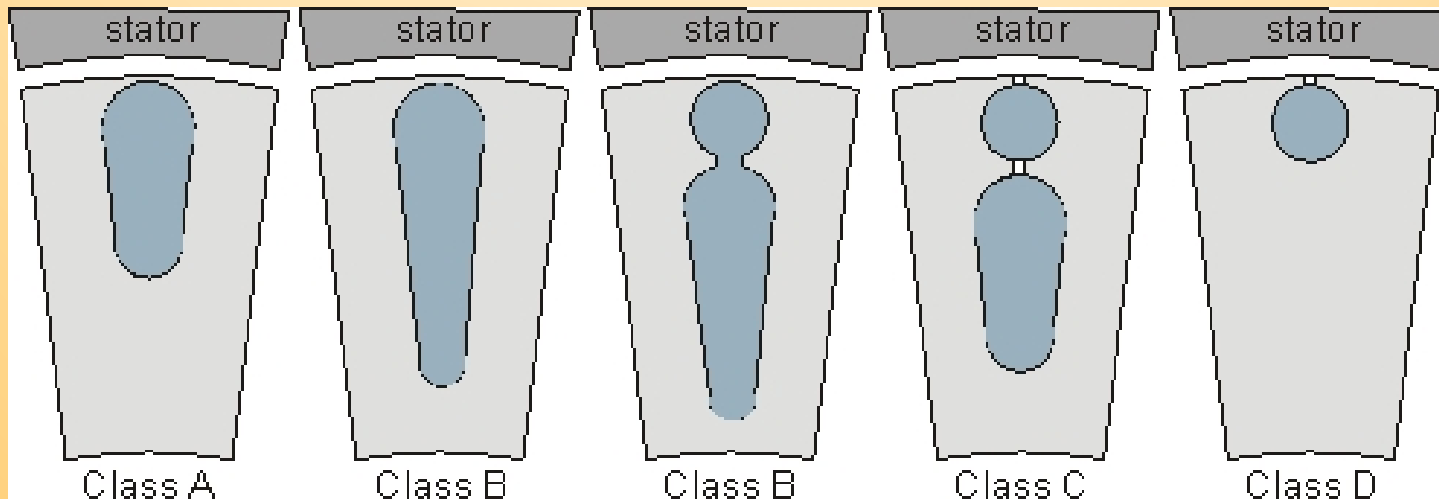


Tole rotorice: a) si b) crestături tip amfora; c) dubla colivie; d) crestături trapezoidale

Crestături statorice – stator slots



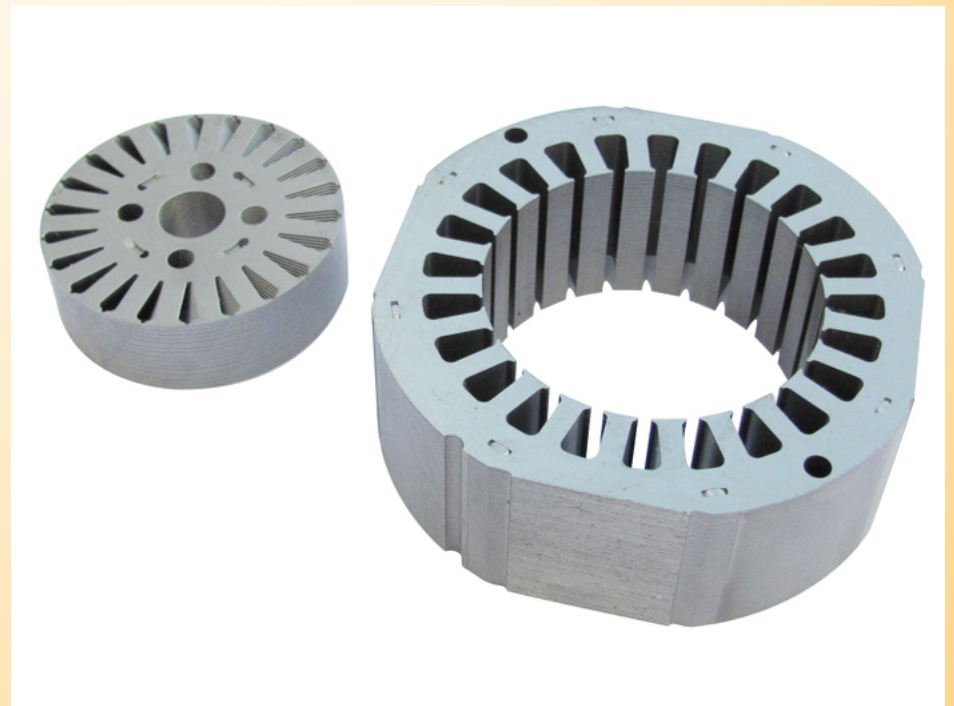
Crestături rotorice – rotor slots



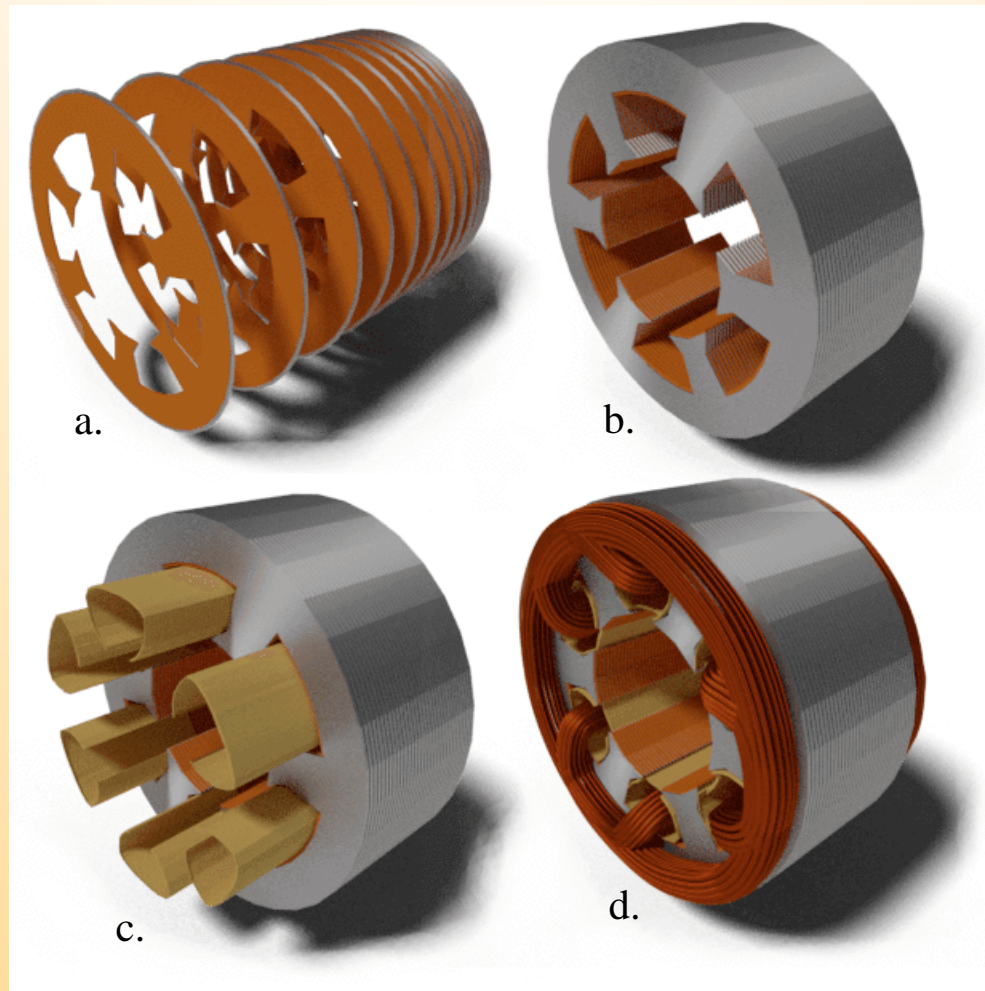
Atât statorul cât și rotorul sunt prevăzute către întrefier cu creștături (respectiv dinți) distribuite pe întreaga periferie. În aceste creștături sunt plasate înfășurările.

Forma creștăturilor, mai ales în cazul celor de pe rotor, este diversă. Drept consecință, anumite valori ale parametrilor de funcționare se modifică.



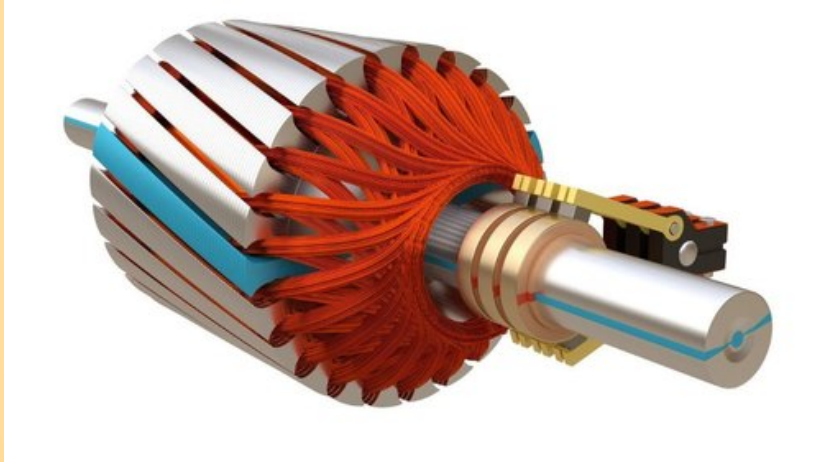


Miezurile magnetice se obțin prin împachetarea axială a tolelor.

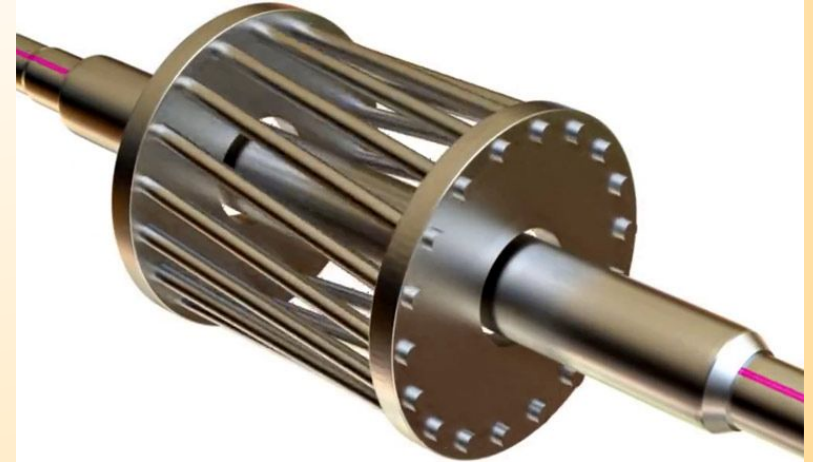


Procesul tehnologic de realizare a statorului include: împachetarea axială și fixarea tolelor (a. și b.), izolarea creștăturilor (c.) și plasarea bobinelor în creștături (d.).

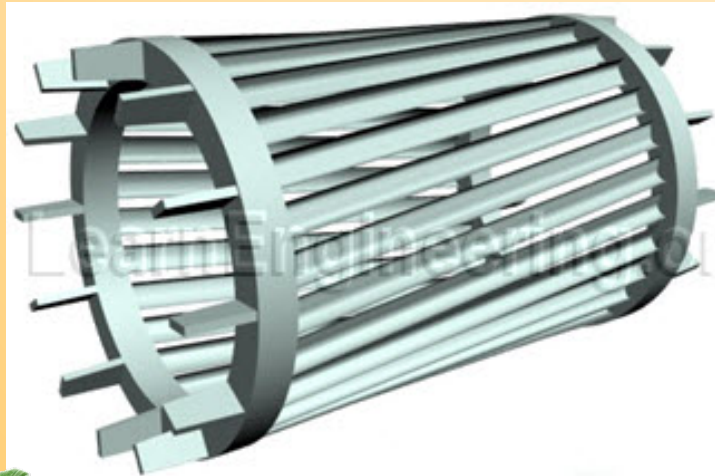
Rotor bobinat



Rotor in sc

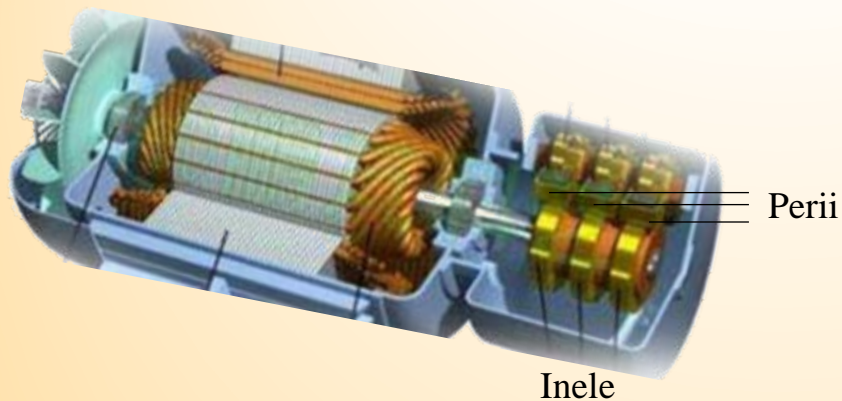


Colivie de veveriță



Circuit magnetic rotoric „expandat”





Înfășurarea de pe rotorul bobinat se realizează după aceleași principii ca înfășurarea statorică.

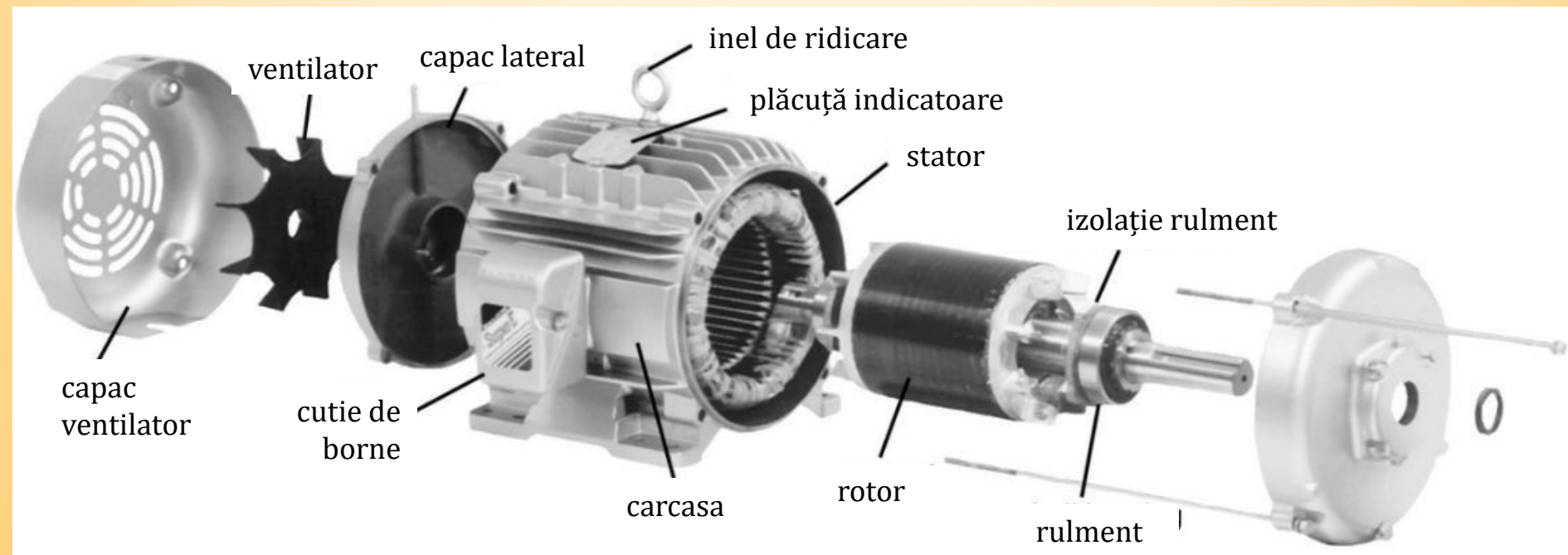
Înfășurarea în sc este realizată din bare de material conductor (cupru sau aluminiu) care sunt scurtcircuitate la cele două capete ale rotorului de către două inele.

Înfășurarea este de asemenea trifazată și se conectează totdeauna în stea (Y). Cele trei capete ramase libere se conectează fiecare la câte un inel din cele trei de pe axul mașinii. În acest fel, prin intermediul periilor ce calcă pe inele, înfășurarea rotorică are legături scoase la o placă de borne.

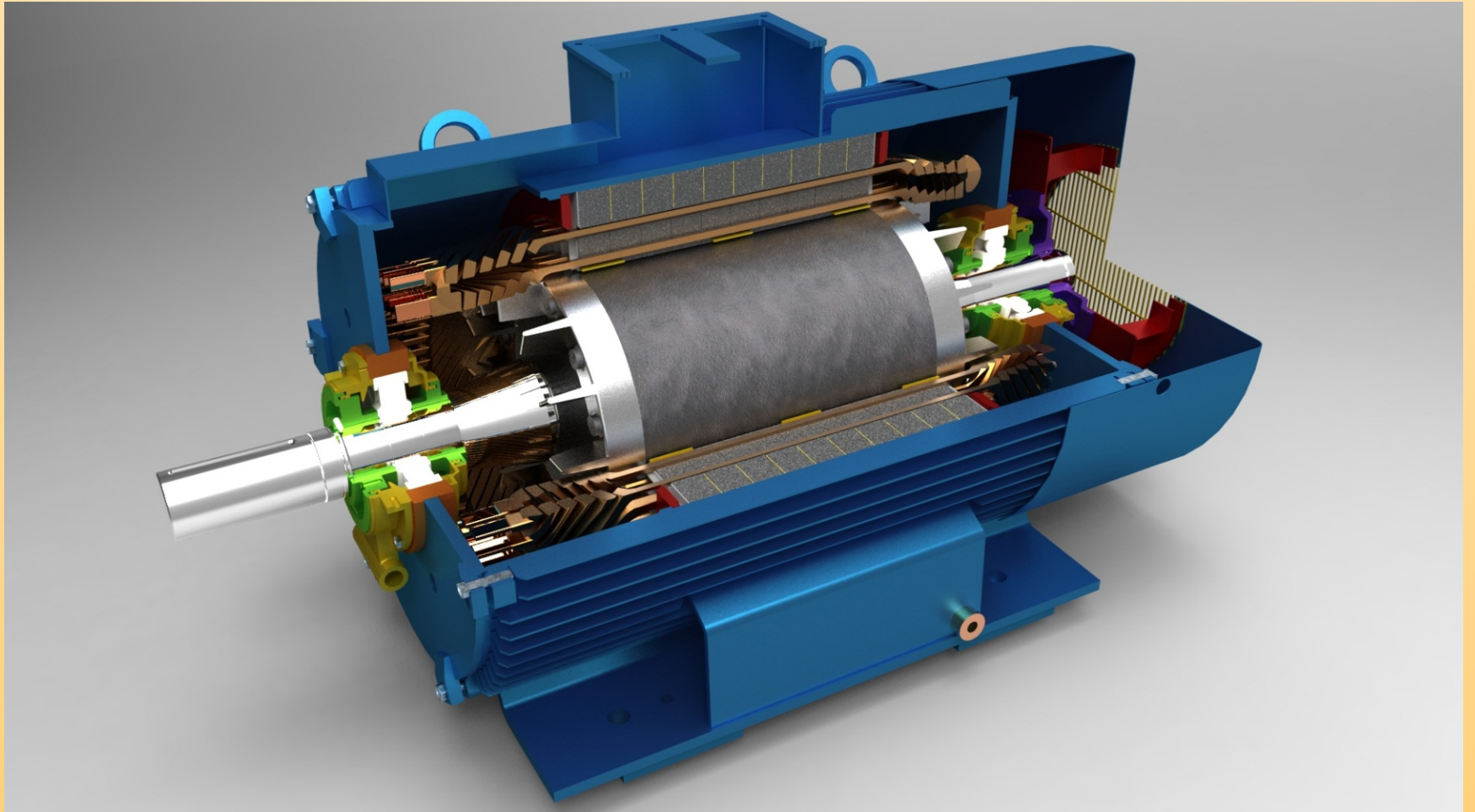
Înfășurarea în sc (colivie de veveriță) este polifazată (numărul de faze este egal cu numărul de bare).

Înfășurarea rotorică TREBUIE să formeze un câmp de reacție având ACELAȘI număr de poli ca și câmpul creat de înfășurarea statorică.

Înfășurarea în sc ADOPTA în mod automat numărul de poli pe care îl are câmpul magnetic creat de înfășurarea statorică.

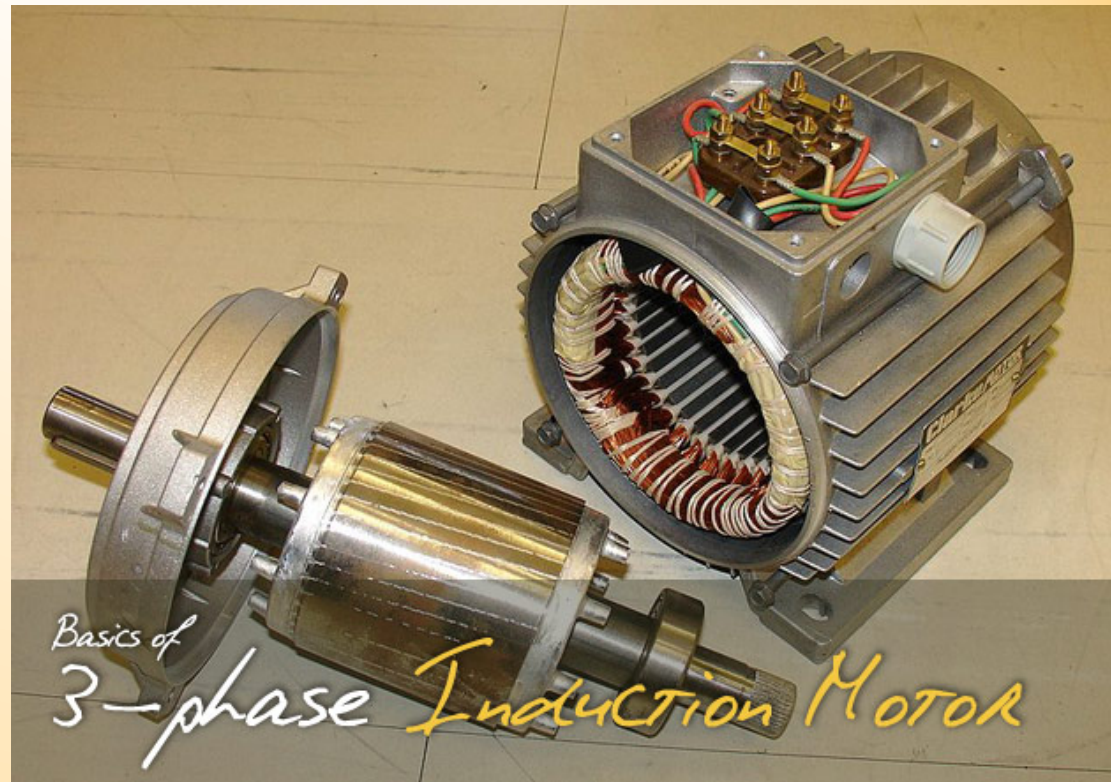


Elementele componente ale unei mașini asincrone

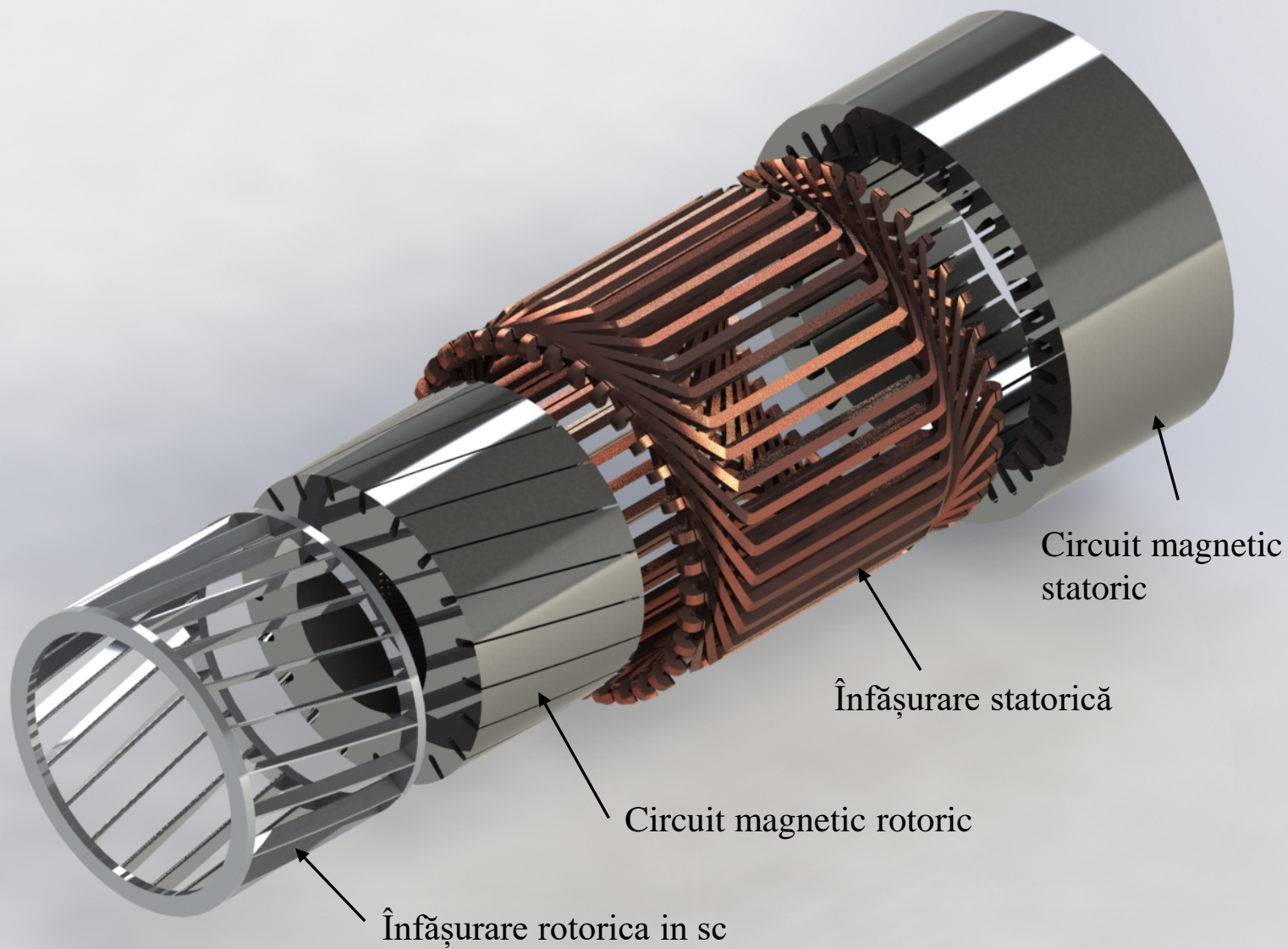


Secțiune printr-o mașină asincronă

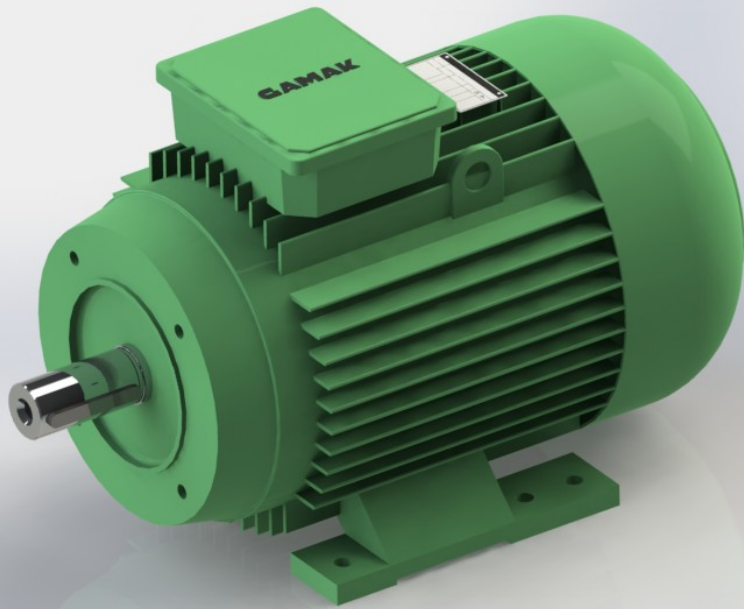
Rotor in scurtcircuit – squirrel cage rotor



Rotor bobinat – wound rotor



Circuit magnetic + înfășurări la mașina asincronă (imagine descompusă)



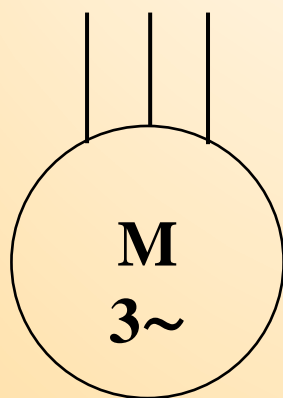
Squirrel cage motor
(rotor in scurtcircuit)

(rotor bobinat)

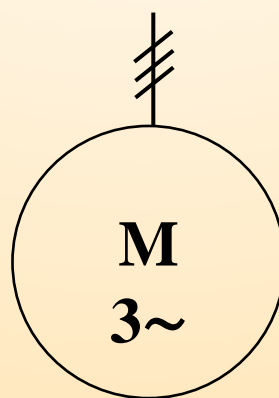
Wound rotor motor



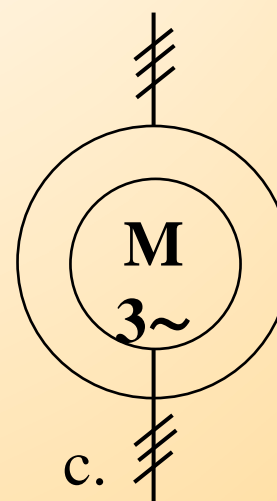
Simbolizarea mașinilor asincrone



a.



b.

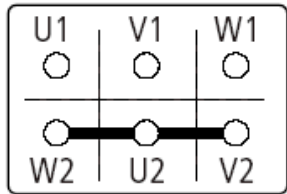


c.

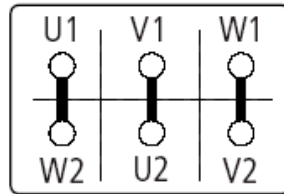
- a. Motor asincron trifazat cu rotor în scurtcircuit
- b. Motor asincron trifazat cu rotor în scurtcircuit – în scheme monofilare
- c. Motor asincron trifazat cu rotor bobinat

Placa de borne, conexiuni

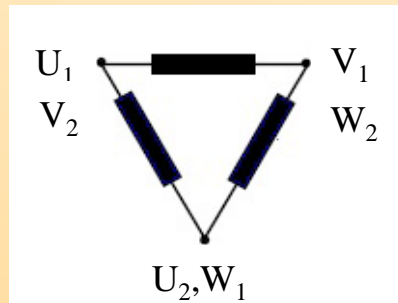
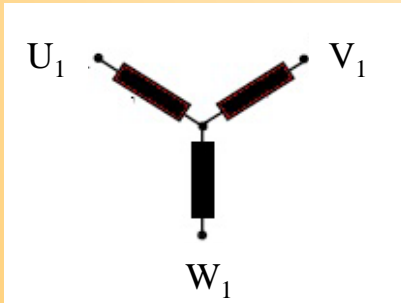
Conexiune stea



Conexiune triunghi

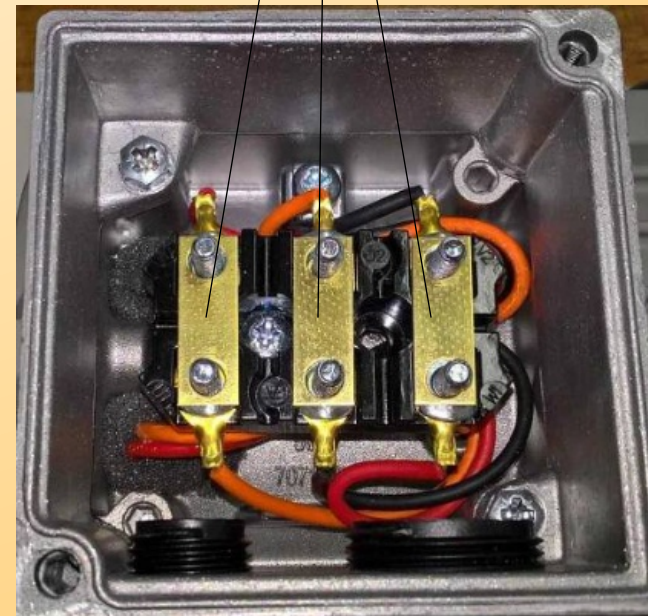


Conexiunea stea sau triunghi a înfășurării statorice se poate realiza, la placa de borne, prin intermediul unor lamele metalice.



La mașina asincronă trifazată, înfășurarea statorică poate fi conectată în stea sau triunghi.

Lamele metalice



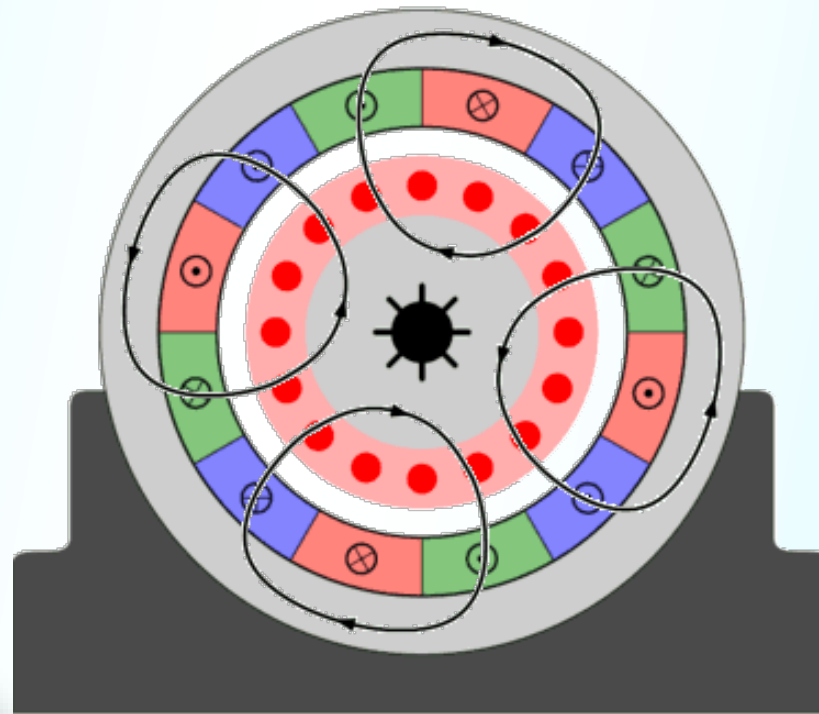
Plăcuța indicatoare

Motor & Co GmbH		
Typ 160 I		
3 ~ Mot.	Nr. 12345-88	
Δ Y 400/690 V	29/17 A	
S1 15 kW	cos φ 0,85	
1430 U/min	50 Hz	
Iso.-Kl. F	IP 54	t
IEC34-1/VDE 0530		

Datele nominale principale ale mașinii electrice se regăsesc pe plăcuța indicatoare: tipul conexiunii, tensiunea de alimentare, curentul nominal, puterea nominală, factorul de putere, frecvența tensiunii de alimentare, turația.

În unele cazuri, pot apărea și alte date nominale dacă mașina are o construcție sau utilizare particulare.

Principiul de funcționare





Se consideră o mașină asincronă trifazată.

 Prin alimentarea înfășurării statorice de la o sursă de tensiune alternativă trifazată, ia naștere un câmp magnetic învârtitor.

Acest câmp intersectează conductoarele înfășurării rotorice, care inițial se consideră imobil.

 Conform legii inducției electromagnetice, în conductoarele înfășurării rotorului se induc tensiuni.

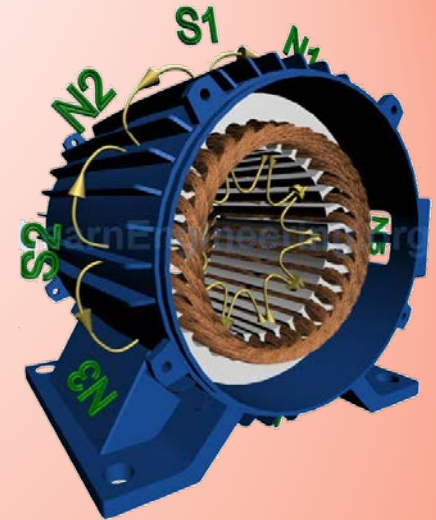
 Dacă înfășurarea este închisă (este întotdeauna cazul înfășurării în sc) atunci prin conductoarele rotorului apar curenți (uneori sunt denumiți „curenți induși”).

 Interacțiunea dintre acești curenți și câmpul învârtitor creat de înfășurarea statorică se manifesta prin apariția unei forțe (forța Laplace) respectiv a unui cuplu electromagnetic ce pune în mișcare de rotație rotorul.

Acesta accelerează până la o viteză apropiată de viteza de sincronism, dar mai mică decât aceasta. Valoarea vitezei depinde de cuplul rezistent.

1. Producere câmp magnetic învârtitor

$$\Omega_1 = \frac{\omega_1}{p}$$

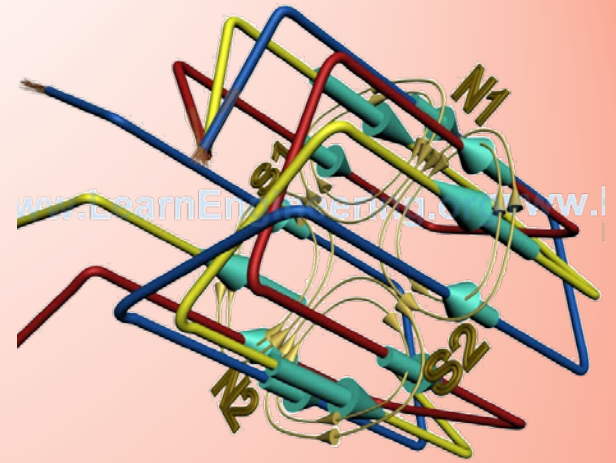


2. Se induce în înfășurarea rotorică o tensiune a cărei pulsație este:

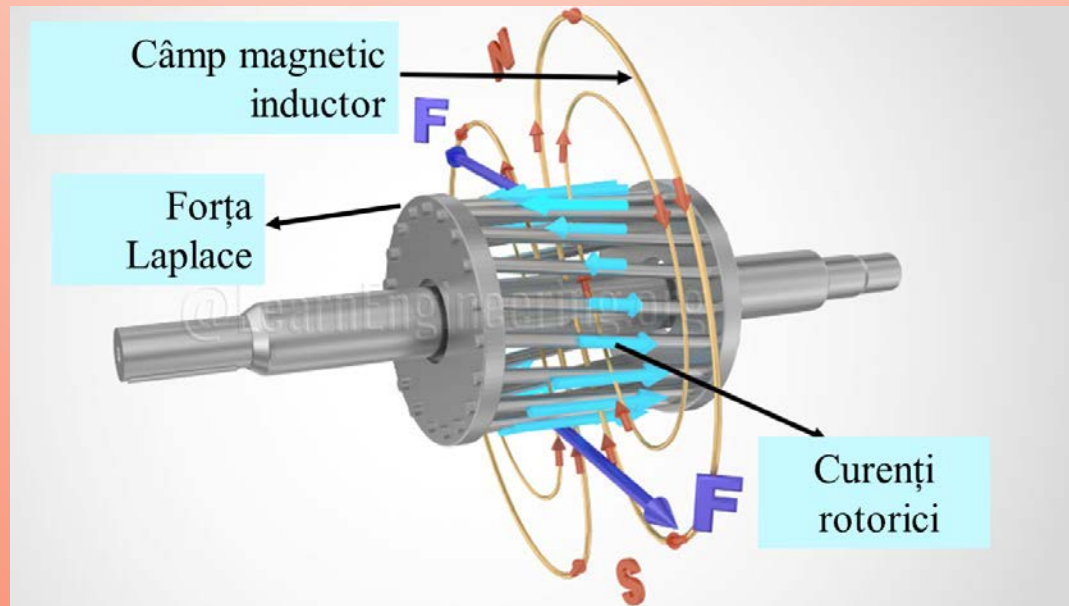
$$\omega_2 = p \cdot \Omega_1 = \omega_1$$

respectiv, pulsația și frecvența tensiunii induse sunt aceleași cu cele ale tensiunii de alimentare a înfășurării statorice. Acest lucru este valabil NUMAI în momentul inițial când rotorul este încă imobil.

3. Apariția curentului rotoric și a câmpului de reacție care este, de asemenea, un câmp învârtitor având același număr de poli ca și câmpul creat de înfășurarea statorică.



4. Apariția cuplului electromagnetic (datorita prezentei fortei Laplace, F) ce pune în mișcare de rotație rotorul până la viteza Ω .



5. Tensiunea indusă în înfășurarea rotorică are acum o pulsație de:

$$\omega_2 = p \cdot (\Omega_1 - \Omega)$$

(pulsația și frecvența tensiunii și curenților rotorului scad odată cu accelerarea acestuia)

6. Câmpul de reacție se rotește față de rotor cu:

$$\Omega_2 = \frac{\omega_2}{p} = \Omega_1 - \Omega$$

iar față de stator cu:

$$\Omega + \Omega_2 = \Omega + \Omega_1 - \Omega = \Omega_1$$

(adică, cele două câmpuri, inductor și de reacție se rotesc cu aceeași viteză – de sincronism - dar diferită de viteza rotorului)



Expresia alunecării

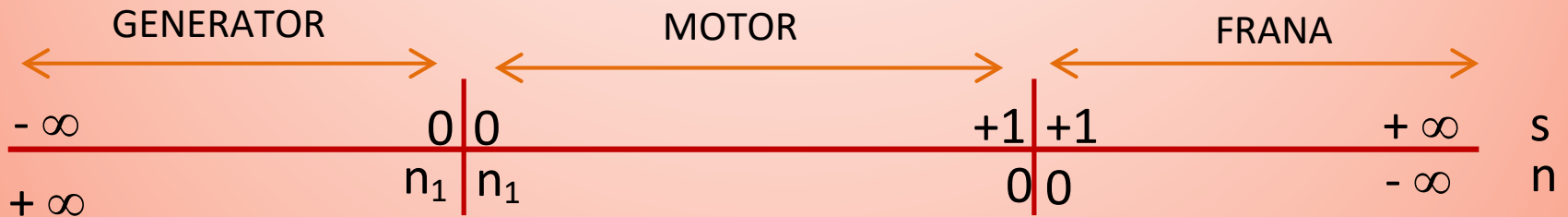
$$s = \frac{\Omega_1 - \Omega}{\Omega_1} = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \cdot 100 [\%]$$



Alunecarea este mărimea caracteristică numai mașinilor asincrone. Ea exprimă cantitativ diferența de viteză (turație) dintre câmpul învârtitor statoric și rotor.

Regimuri de funcționare



Regim de funcționare	Alunecare s	Turație rotor n
Motor	$s \in (0, 1)$	$n \in (0, n_1)$
Generator	$s < 0$	$n > n_1$
Frână	$s > 1$	$n < 0$

Regimul de motor are loc atunci când mașina electrică absoarbe energie electrică pe la borne și furnizează energie mecanică la ax. În acest regim, mașina asincronă are o turație a rotorului mai mică decât turația de sincronism.

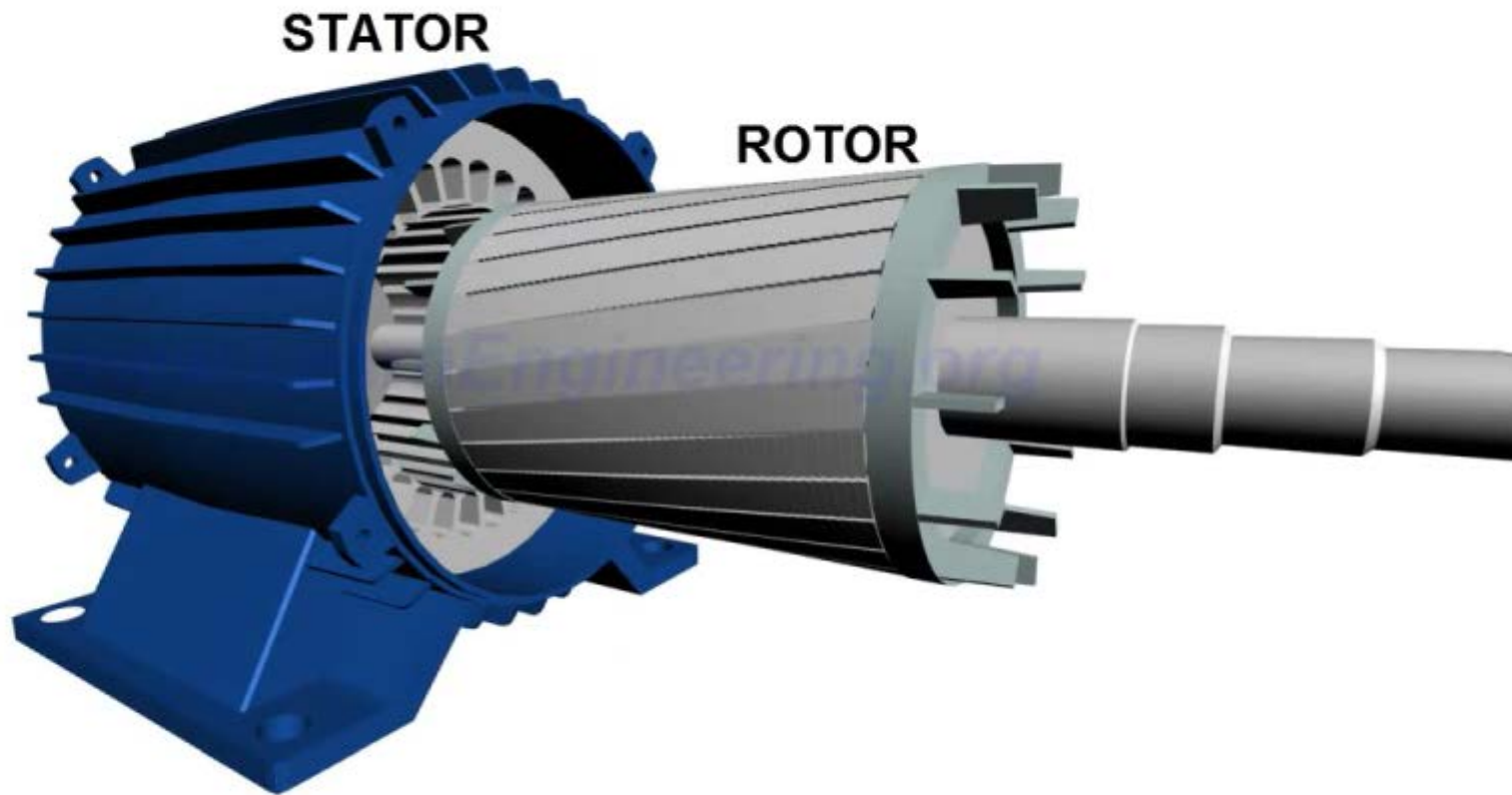


Funcționarea în *regim de generator* are loc atunci când viteza rotorului depășește viteza de sincronism. Acest lucru este posibil numai dacă mașina electrică primește energie mecanică din exterior, pe la ax.

Regimul de frână se obține atunci când rotorul se rotește în sens invers sensului câmpului învârtitor statoric. Regimul de frânare propriu-zisă este un regim tranzitoriu, limitat.



- Înfășurări de tip repartizat
- Rotor in scurt-circuit
- Rotor bobinat
- Alunecare





CURS 4

Ecuatiile masinii asincrone

Scheme electrice echivalente

CUPRINS

Masina asincrona
ideala

1

Masina asincrona
raportata

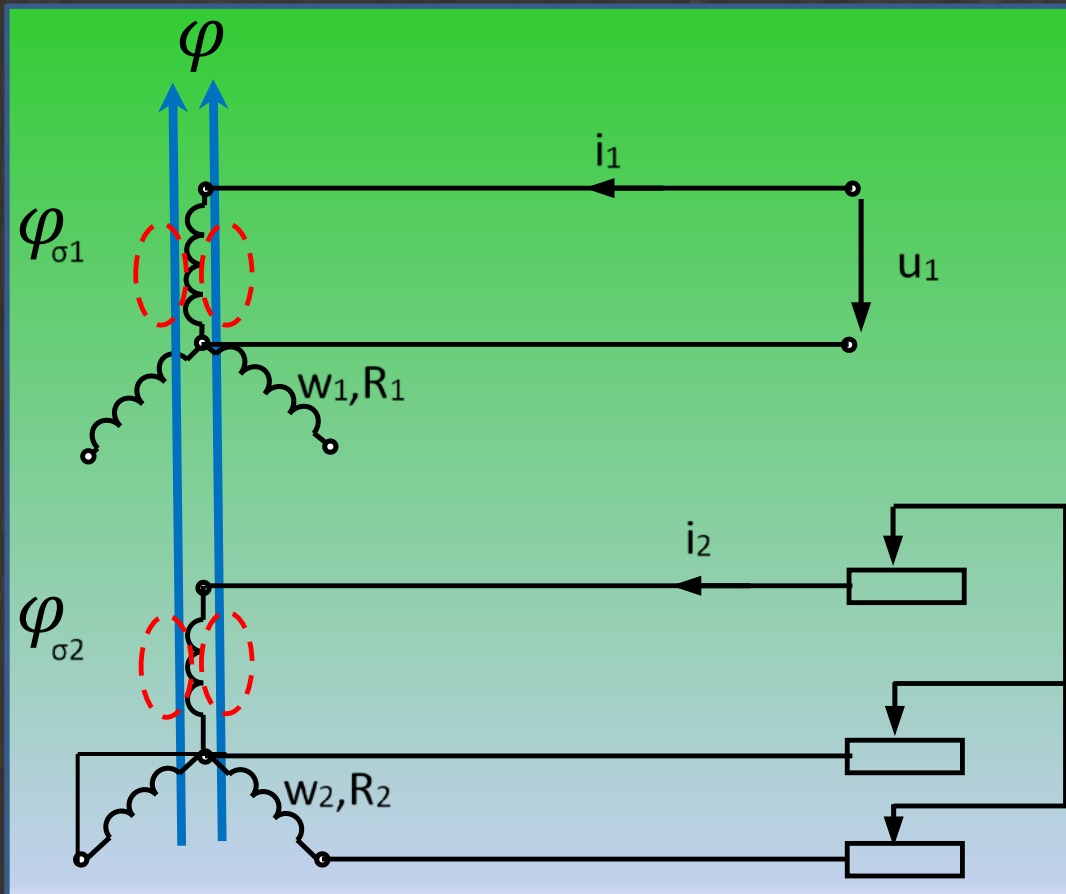
2

Masina asincrona
reala

3

Scheme echivalente

Ecuatiile de funcționare ale mașinii asincrone *ideale*



φ - flux fascicular rezultat
(fluxul ce înlanțuie o
singură spirală)

$\varphi_{\sigma 1}, \varphi_{\sigma 2}$

- fluxuri fasciculare de
dispersie ce corespund
înfășurării statorice,
respectiv rotorice

w_1, w_2 - nr. de spire ale
înfășurărilor de fază
statorice și rotorice

R_1, R_2 - rezistența
înfășurărilor de fază
statorice și rotorice

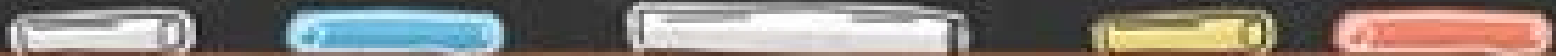
Explicații slide anterior

Se consideră o mașină trifazată atât în stator cât și în rotor. Înfășurarea statorică este alimentată de la o sursă de tensiune trifazată, sinusoidală având tensiunea de fază u_1 . Prin înfășurarea statorică se stabilește curentul i_1 ce determină apariția unui câmp magnetic învârtitor. Totodată apare un flux de dispersie $\varphi_{\sigma 1}$

Obs: In figură s-au reprezentat numai mărimile de pe o singură fază

Câmpul învârtitor creat de înfășurarea statorică induce în înfășurarea rotorică, conform principiului inducției electromagnetice, un sistem trifazat de tensiuni. Dacă înfășurarea rotorică este scurtcircuitată sau închisă pe o sarcină (în desen este reprezentată o sarcină rezistivă) atunci apare un curent i_2 ce determină un câmp „de reacție”, câmp produs de înfășurarea rotorică. Este un câmp învârtitor ce se rotește cu aceeași viteză de sincronism ca și câmpul creat de înfășurarea statorică, indiferent de viteza de rotație a rotorului. De asemenea, apare și câmpul de dispersie caracterizat de fluxul $\varphi_{\sigma 2}$

Cele două câmpuri învârtitoare se compun dând naștere câmpului rezultat în mașină, caracterizat de fluxul φ



Expresiile fluxurilor totale de dispersie corespunzătoare înfășurării statorice (indice 1) respectiv rotorice (indice 2) sunt:

$$\Psi_{\sigma 1} = L_{\sigma 1} \cdot i_1; \quad \Psi_{\sigma 2} = L_{\sigma 2} \cdot i_2 \quad \text{unde: } L_{\sigma} - \text{inductanța de dispersie}$$

Ecuțiile corespunzătoare unei faze statorice (1) respectiv rotorice (2):

$$\begin{cases} u_1 = R_1 i_1 + \frac{d}{dt} (\Psi_{u1} + \Psi_{\sigma 1}) & (1) \\ 0 = R_2 i_2 + \frac{d}{dt} (\Psi_{u2} + \Psi_{\sigma 2}) & (2) \end{cases}$$

unde: $\Psi_{u1} = k_{w1} \cdot w_1 \cdot \varphi$ - reprezintă fluxurile utile totale

$$\Psi_{u2} = k_{w2} \cdot w_2 \cdot \varphi$$

- φ - flux util fascicular
- k_w - factor de înfășurare
- w - număr de conductoare

Introducând expresiile fluxurilor totale utile și de dispersie în ecuațiile (1) și (2) se obține:

$$\begin{cases} u_1 = R_1 i_1 + k_{w1} \cdot w_1 \cdot \frac{d\varphi}{dt} + L_{\sigma 1} \cdot \frac{di_1}{dt} \\ 0 = R_2 i_2 + k_{w2} \cdot w_2 \cdot \frac{d\varphi}{dt} + L_{\sigma 2} \cdot \frac{di_2}{dt} \end{cases}$$

Considerând o variație sinusoidală a tensiunii și curentului, deci și a fluxului, se poate trece la scrierea ecuațiilor în *complex simplificat*. Regulile de scriere a unei mărimi sinusoidale în complex simplificat sunt date mai jos (inclusiv regulile de derivare și integrare).

$$\left(\begin{array}{l} i = \sqrt{2}I \sin(\omega t + \varphi) \leftrightarrow \underline{I} = I \cdot e^{j\omega t} \\ \frac{di}{dt} \leftrightarrow j\omega \underline{I} \qquad \int i \cdot dt \leftrightarrow \frac{1}{j\omega} \underline{I} \end{array} \right)$$

Obs: In complex simplificat, mărimile electrice sunt mărimi efective iar mărimile magnetice sunt valori maxime.

Sistemul de ecuații, în complex simplificat, devine:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + j\omega_1 L_{\sigma 1} \cdot \underline{I}_1 + j\omega_1 \cdot k_{w1} \cdot w_1 \cdot \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} \\ 0 = R_2 \underline{I}_2 + j\omega_2 L_{\sigma 2} \cdot \underline{I}_2 + j\omega_2 \cdot k_{w2} \cdot w_2 \cdot \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} \end{cases}$$

Întrucât: $\omega_2 = s \cdot \omega_1$, adică: $(f_2 = s \cdot f_1)$ ecuația 2 devine:

$$0 = R_2 \underline{I}_2 + js\omega_1 L_{\sigma 2} \cdot \underline{I}_2 + js\omega_1 \cdot k_{w2} \cdot w_2 \cdot \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}}$$

-împart membrul din dreapta cu s:

$$0 = \frac{R_2}{s} \underline{I}_2 + j\omega_1 L_{\sigma 2} \cdot \underline{I}_2 + j\omega_1 \cdot k_{w2} \cdot w_2 \cdot \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}}$$

Notăm termenul:

$$-j\omega_1 \cdot k_{w1} \cdot w_1 \cdot \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} = \underline{E_1}$$

întrucât el reprezintă t.e.m. indusă în înfășurarea statorică de către câmpul magnetic rezultat

Analog:

$$\underline{E_{2s}} = -j\omega_2 \cdot k_{w2} \cdot w_2 \cdot \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} = -js\omega_1 \cdot k_{w2} \cdot w_2 \cdot \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} = -s \cdot \underline{E_2}$$

E_2 - reprezintă t.e.m. indusă în înfășurarea rotorică de către câmpul magnetic rezultat când rotorul este fix ($s=1$ sau $n=0$)

Sistemul de ecuații devine:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + j\omega_1 L_{\sigma 1} \cdot \underline{I}_1 - \underline{E}_1 \\ 0 = \frac{R_2}{s} \underline{I}_2 + j\omega_1 L_{\sigma 2} \cdot \underline{I}_2 - \underline{E}_2 \end{cases}$$

Din ecuația a doua poate fi evidențiată expresia curentului rotoric:

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + (\omega_1 L_{\sigma 2})^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + \left(\frac{\omega_2}{s} L_{\sigma 2}\right)^2}} = \frac{sE_2}{\sqrt{R_2^2 + (\omega_2 L_{\sigma 2})^2}}$$

Celor două ecuații li se poate adăuga ecuația circuitului magnetic (de egalitate a solenațiilor):

$$k_{w1} \cdot w_1 \cdot i_1 + k_{w2} \cdot w_2 \cdot i_2 = k_{w1} \cdot w_1 \cdot i_{1\mu}$$

sau în complex simplificat:

$$\underline{I_1} + \frac{k_{w2} \cdot w_2}{k_{w1} \cdot w_1} \cdot \underline{I_2} = \underline{I_{1\mu}}$$

$I_{1\mu}$ reprezintă *curentul de magnetizare*

Prin urmare, sistemul de ecuații ce caracterizează funcționarea mașinii asincrone ideale este:



$$\begin{cases} \underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_{\sigma 1} \cdot \underline{I}_1 - \underline{E}_1 \\ 0 = \frac{R_2}{s} \underline{I}_2 + jX_{\sigma 2} \cdot \underline{I}_2 - \underline{E}_2 \\ \underline{I}_1 + \frac{k_{w2} \cdot w_2}{k_{w1} \cdot w_1} \cdot \underline{I}_2 = \underline{I}_{1\mu} = \underline{I}_{10} \end{cases}$$

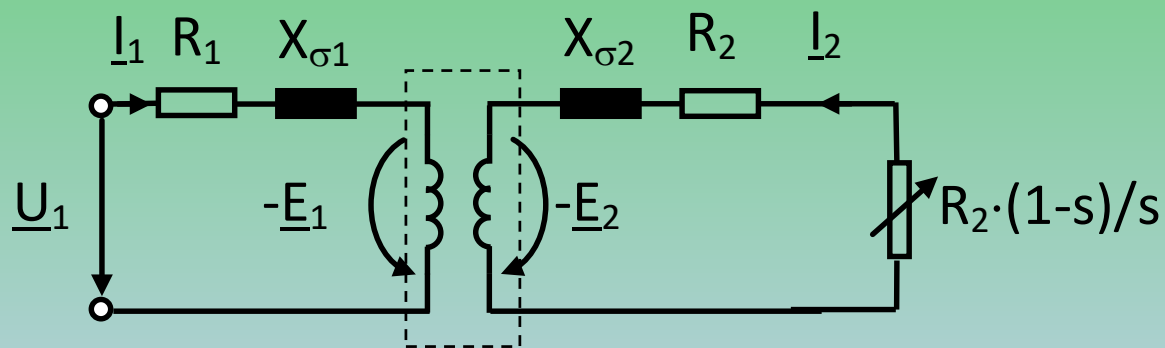
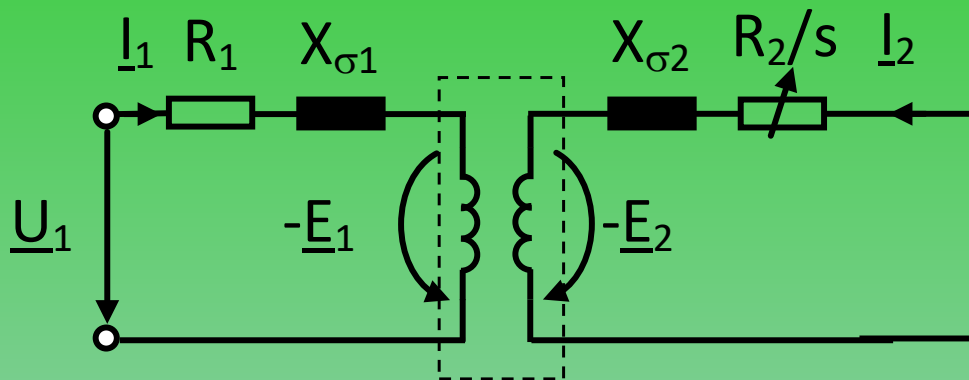
- unde s-au înlocuit expresiile:

$$\omega_1 L_{\sigma 1} = X_{\sigma 1}$$

$$\omega_1 L_{\sigma 2} = X_{\sigma 2}$$

ce reprezintă reactanțe de dispersie

Schema electrica echivalentă – mașina ideală



$$\frac{R_2}{s} = R_2 + R_2 \cdot \frac{1-s}{s}$$

Cele două scheme echivalente prezentate în slide-ul anterior „transcriu” în formă grafică sistemul de ecuații al mașinii ideale.

Pot fi identificate cele două circuite electrice corespunzătoare statorului (mărimile cu indice 1) respectiv rotorului (mărimile cu indice 2). Între cele două circuite, care fizic sunt separate de întrefierul mașinii, există un cuplaj magnetic mutual.

Trebuie remarcat faptul că rezistența înfășurării rotorice variază odată cu alunecarea (deci cu viteza rotorului). Această rezistență poate fi descompusă în două componente: una constantă (R_2) și una variabilă cu alunecarea – vezi cea de a doua schemă echivalentă.

Ecuatiile mașinii asincrone cu mărimile rotorului *raportate* la stator

Pentru a putea face o comparație reală între circuitul statoric și circuitul rotoric, în ceea ce privește parametrii electro-magnetici, se poate realiza procedura de „raportare” a mărimilor unui circuit la celălalt circuit. De obicei se raportează mărimile rotorului (circuit secundar) la stator. Procedura este similară cu cea de la studiul transformatorului electric în mărimi raportate.



Mașina cu mărimi raportate – este o mașină echivalentă cu mașina reală dar care are același număr de conductoare (w) și același factor de înfășurare (k_w) pe ambele circuite magnetice, statoric și rotoric.

$$w_1 = w_2$$
$$K_{w1} = k_{w2}$$

Condiții de echivalență

1. Solenația “raportată” să fie egală cu cea reală

$$k_{w1} \cdot w_1 \cdot I'_2 = k_{w2} \cdot w_2 \cdot I_2$$

$$I'_2 = \frac{k_{w2} \cdot w_2}{k_{w1} \cdot w_1} \cdot I_2 = K \cdot I_2$$

Obs: Mărimile raportate se notează cu „prim” iar K reprezintă coeficientul de raportare.

Condiții de echivalență

2. Pierderile de putere activă pentru cele două situații să fie aceleași

$$R'_2 \cdot (I'_2)^2 = R_2 \cdot I_2^2$$

$$R'_2 = R_2 \cdot \left(\frac{I_2}{I'_2}\right)^2 = \frac{1}{K^2} \cdot R_2$$

Condiții de echivalență

3. Pierderile de putere reactivă datorate fluxului de dispersie să fie aceleași

$$X'_{\sigma 2} \cdot (I'_2)^2 = X_{\sigma 2} \cdot I_2^2$$

$$X'_{\sigma 2} = X_{\sigma 2} \cdot \left(\frac{I_2}{I'_2}\right)^2 = \frac{1}{K^2} \cdot X_{\sigma 2}$$

În plus, tensiunea indusă în înfășurarea rotorică echivalentă trebuie să fie aceeași ca în înfășurarea statorică întrucât înfășurările sunt acum identice

dar

$$E'_2 = E_1$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{k_{w1} \cdot w_1}{k_{w2} \cdot w_2} = \frac{E'_2}{E_2}$$

de unde rezultă:

$$E'_2 = \frac{1}{K} \cdot E_2$$

Prin urmare, condițiile de echivalență sunt:

$$I'_2 = K \cdot I_2 \quad (1)$$

$$R'_2 = \frac{1}{K^2} \cdot R_2 \quad (2)$$

$$X'_{\sigma 2} = \frac{1}{K^2} \cdot X_{\sigma 2} \quad (3)$$

$$E'_2 = \frac{1}{K} \cdot E_2 \quad (4)$$

unde: $K = \frac{k_{w2} \cdot w_2}{k_{w1} \cdot w_1}$

(ecuațiile mașinii ideale rescrise pentru comparație)

$$\left\{ \begin{array}{l} \underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_{\sigma 1} \cdot \underline{I}_1 - \underline{E}_1 \\ 0 = \frac{R_2}{s} \underline{I}_2 + jX_{\sigma 2} \cdot \underline{I}_2 - \underline{E}_2 \\ \underline{I}_1 + \frac{k_{w2} \cdot w_2}{k_{w1} \cdot w_1} \cdot \underline{I}_2 = \underline{I}_{1\mu} = \underline{I}_{10} \end{array} \right.$$

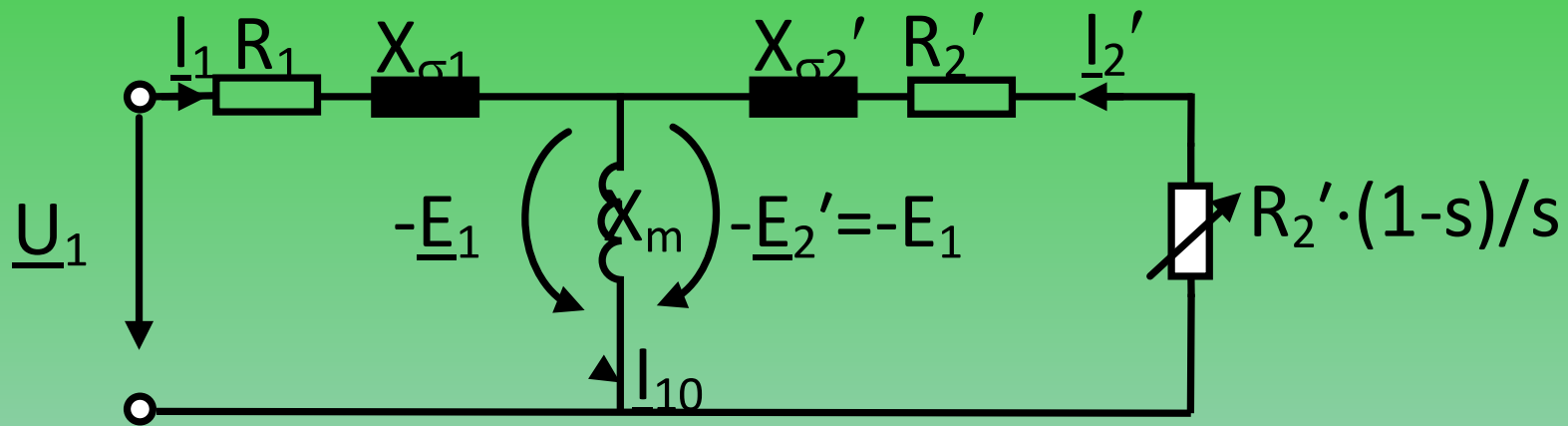
Înlocuind în ecuațiile a doua și a treia ale mașinii ideale mărimile obținute din condițiile de echivalență, se obțin:

- ecuațiile mașinii raportate -



$$\left\{ \begin{array}{l} \underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_{\sigma 1} \cdot \underline{I}_1 - \underline{E}_1 \\ 0 = \frac{R'_2}{s} \underline{I}'_2 + jX'_{\sigma 2} \cdot \underline{I}'_2 - \underline{E}_1 \\ \underline{I}_{1\mu} = \underline{I}_{10} = \underline{I}_1 + \underline{I}'_2 \end{array} \right.$$

Schema electrică echivalentă – rotorul este raportat la stator



X_m se numește reactanța de magnetizare și reprezintă elementul de circuit ce „întreține” fluxul în mașina asincronă.



Prin raportarea mărimilor rotorice la cele statorice s-a obținut o mașină echivalentă a cărei schemă electrică nu mai conține cuplajul mutual între circuitul electric statoric și cel rotoric. Analiza circuitului obținut devine mult mai simplă.

Ecuatiile mașinii asincrone când sunt luate în considerare pierderile în fier (*mașina reală*)

Ecuatiile mașinii asincrone prezentate până aici NU iau în considerație pierderile în fier (în circuitul magnetic). În realitate, curentul de magnetizare conține pe lângă componenta reactivă și una „activă” ce corespunde pierderilor în fier. Deci, expresia reală a curentului de magnetizare este:

$$\underline{I_{10}} = \underline{I_{1\mu}} + \underline{I_{10a}} = \underline{I_1} + \underline{I'_2}$$

I_{10a} - componenta activă a curentului de magnetizare ce corespunde pierderilor în fier

$I_{1\mu}$ - componenta reactivă a curentului de magnetizare

Expresia componentei active a curentului de magnetizare este:

$$I_{10a} = \frac{P_{Fe1}}{3E_1}$$

unde P_{Fe1} sunt pierderile în fier în circuitul magnetic statoric. De regulă, întrucât pierderile în fier în miezul rotoric sunt foarte mici, ele se neglijează.

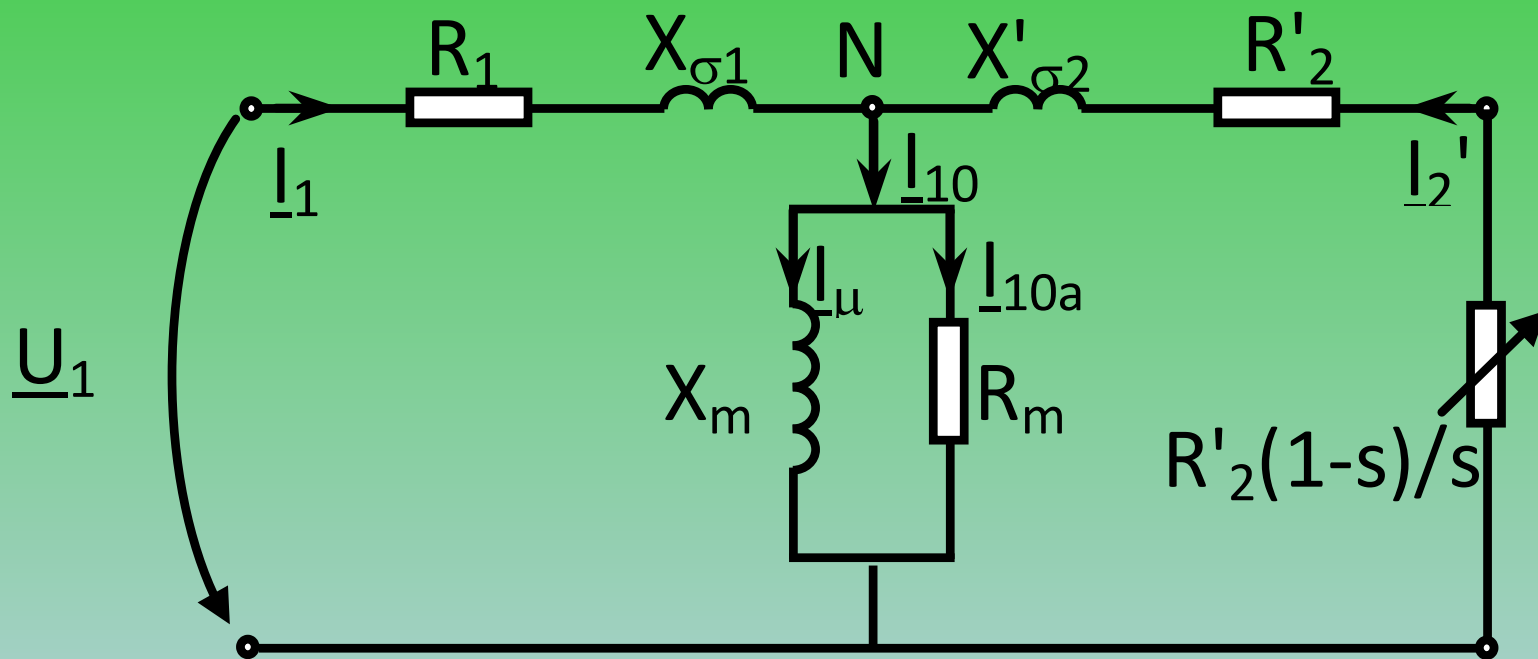
Pierderile în fier, care se manifestă prin încălzirea miezului magnetic, pot fi echivalate cu pierderile pe o rezistență. În acest scop, se introduce rezistența R_m , care, în schema echivalentă a mașinii, apare în paralel cu reactanța de magnetizare. Expresia ei poate fi obținută din explicitarea pierderilor în fier:

$$P_{Fe} = 3 \cdot R_m \cdot I_{10a}^2 = 3 \cdot R_m \cdot \left(\frac{P_{Fe}}{3E_1} \right)^2$$

respectiv:

$$R_m = \frac{3E_1^2}{P_{Fe}}$$

Schema electrică echivalentă – mașina reală



R_m – rezistența de magnetizare – elementul de circuit „responsabil” de pierderile în fierul mașinii asincrone

Ramura de circuit în paralel X_m, R_m poate fi înlocuită printr-o impedanță echivalentă, notată cu Z_0 , și care este parcursă de curentul I_{10} . Expresia ei este:

$$\frac{1}{Z_0} = \frac{1}{R_m} + \frac{1}{jX_m}$$

de unde:

$$\begin{aligned} Z_0 &= \frac{j \cdot R_m \cdot X_m}{R_m + jX_m} = \frac{j \cdot R_m^2 \cdot X_m + R_m \cdot X_m^2}{R_m^2 + X_m^2} = \frac{R_m \cdot X_m^2}{R_m^2 + X_m^2} + j \cdot \frac{R_m^2 \cdot X_m}{R_m^2 + X_m^2} \\ &= R_0 + j \cdot X_0 \end{aligned}$$

unde am amplificat la numitor și la numărător cu $(R_m - jX_m)$

Daca se fac și înlocuirile:

$$R_1 + jX_{\sigma 1} = Z_1$$

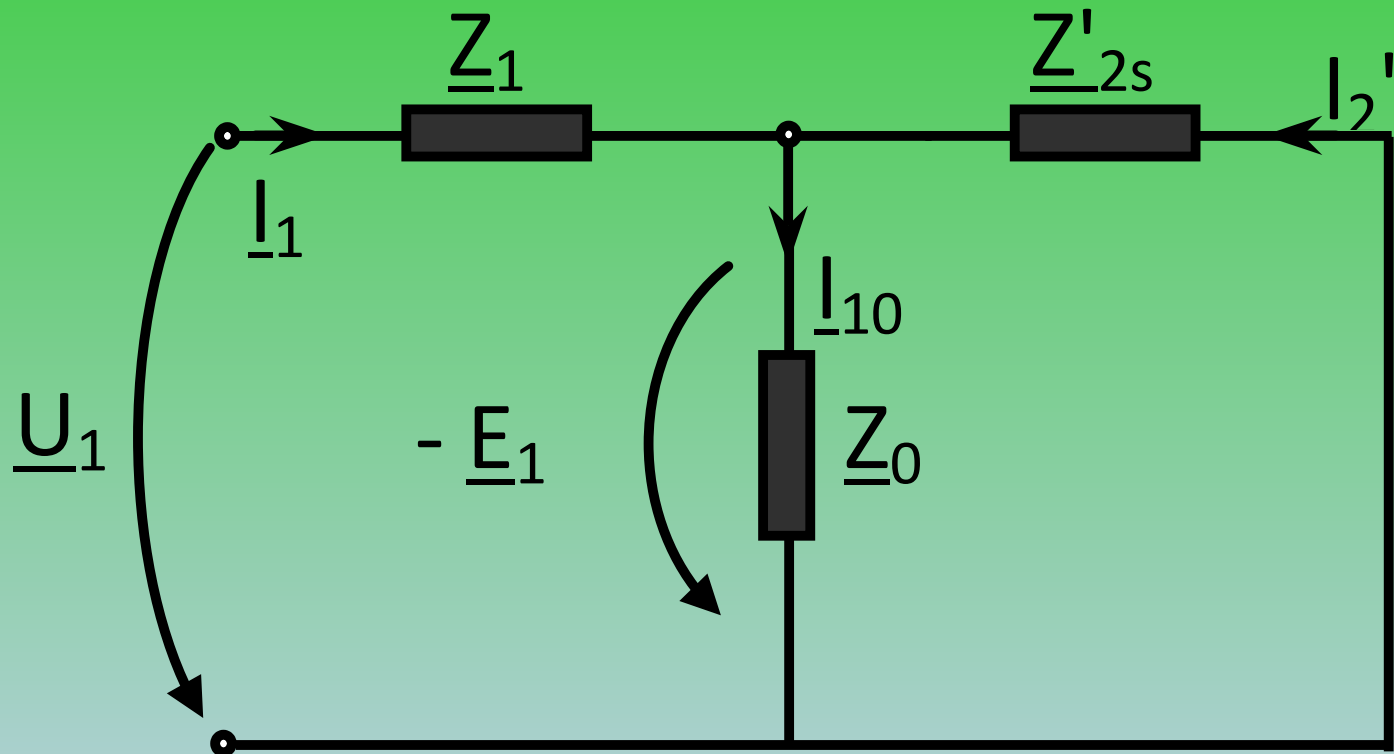
$$\frac{R'_2}{s} + jX'_{\sigma 2} = Z'_{2s}$$

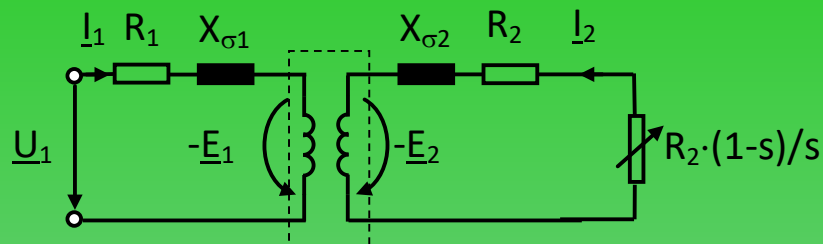
atunci, sistemul de ecuații ale mașinii asincrone poate fi scris sub forma:



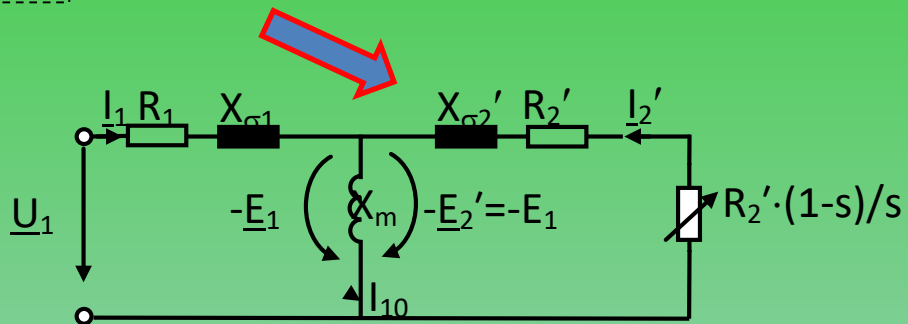
$$\begin{cases} \underline{U}_1 = \underline{Z}_1 \cdot \underline{I}_1 - \underline{E}_1 = \underline{Z}_1 \cdot \underline{I}_1 + \underline{Z}_0 \cdot \underline{I}_{10} \\ 0 = \underline{Z}'_{2s} \cdot \underline{I}'_2 - \underline{E}_1 = \underline{Z}'_{2s} \cdot \underline{I}'_2 + \underline{Z}_0 \cdot \underline{I}_{10} \\ \underline{I}_{10} = \underline{I}_{1\mu} + \underline{I}_{10a} = \underline{I}_1 + \underline{I}'_2 \\ -\underline{E}_1 = jX_m \cdot \underline{I}_\mu = \underline{Z}_0 \cdot \underline{I}_{10} \end{cases}$$

Schema electrică echivalentă – în T

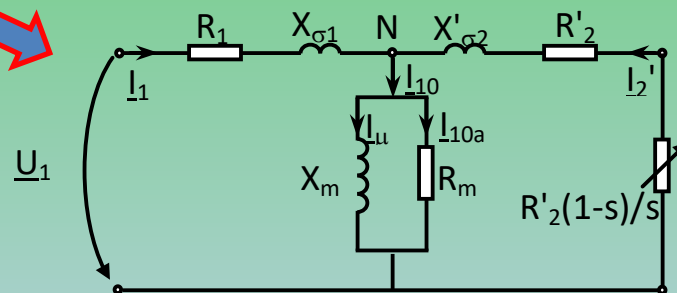




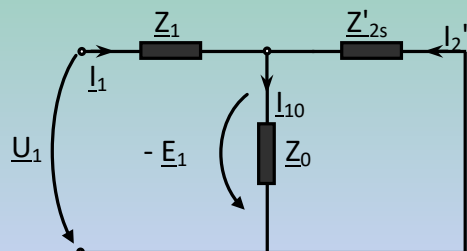
Mașina asincronă ideală



Mașina asincronă ideală în mărimi raportate



Mașina asincronă reală



Schema in T

Pentru determinarea curentului I_2'

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = \underline{Z}_1 \cdot \underline{I}_1 + \underline{Z}_0 \cdot \underline{I}_{10} \\ \underline{0} = \underline{Z}'_{2s} \cdot \underline{I}'_2 + \underline{Z}_0 \cdot \underline{I}_{10} \\ \underline{I}_{10} = \underline{I}_1 + \underline{I}'_2 \end{cases}$$

In ecuația 2 înlocuiesc termenul I_{10} cu cel din ecuația 3:

$$\underline{0} = \underline{Z}'_{2s} \cdot \underline{I}'_2 + \underline{Z}_0 \cdot \underline{I}_1 + \underline{Z}_0 \cdot \underline{I}'_2$$

de unde rezulta:

$$\underline{I}_1 = -\frac{\underline{Z}'_{2s} + \underline{Z}_0}{\underline{Z}_0} \cdot \underline{I}'_2$$

Înlocuiesc această expresie a curentului I_1 în prima ecuație a sistemului:

$$\underline{U}_1 = -\underline{Z}_1 \cdot \frac{\underline{Z}'_{2s} + \underline{Z}_0}{\underline{Z}_0} \cdot \underline{I}'_2 - \underline{Z}_0 \cdot \frac{\underline{Z}'_{2s} + \underline{Z}_0}{\underline{Z}_0} \cdot \underline{I}'_2 + \underline{Z}_0 \cdot \underline{I}'_2$$

respectiv:

$$\underline{U}_1 = -\frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}'_{2s}}{\underline{Z}_0} \cdot \underline{I}'_2 - \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_0}{\underline{Z}_0} \cdot \underline{I}'_2 - \frac{\underline{Z}_0 \cdot \underline{Z}'_{2s}}{\underline{Z}_0} \cdot \underline{I}'_2 - \underline{Z}_0 \cdot \underline{I}'_2 + \underline{Z}_0 \cdot \underline{I}'_2$$

Obțin în final:

$$\underline{U}_1 = -\underline{Z}'_{2s} \left(1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_0} \right) \cdot \underline{I}'_2 - \underline{Z}_1 \cdot \underline{I}'_2$$

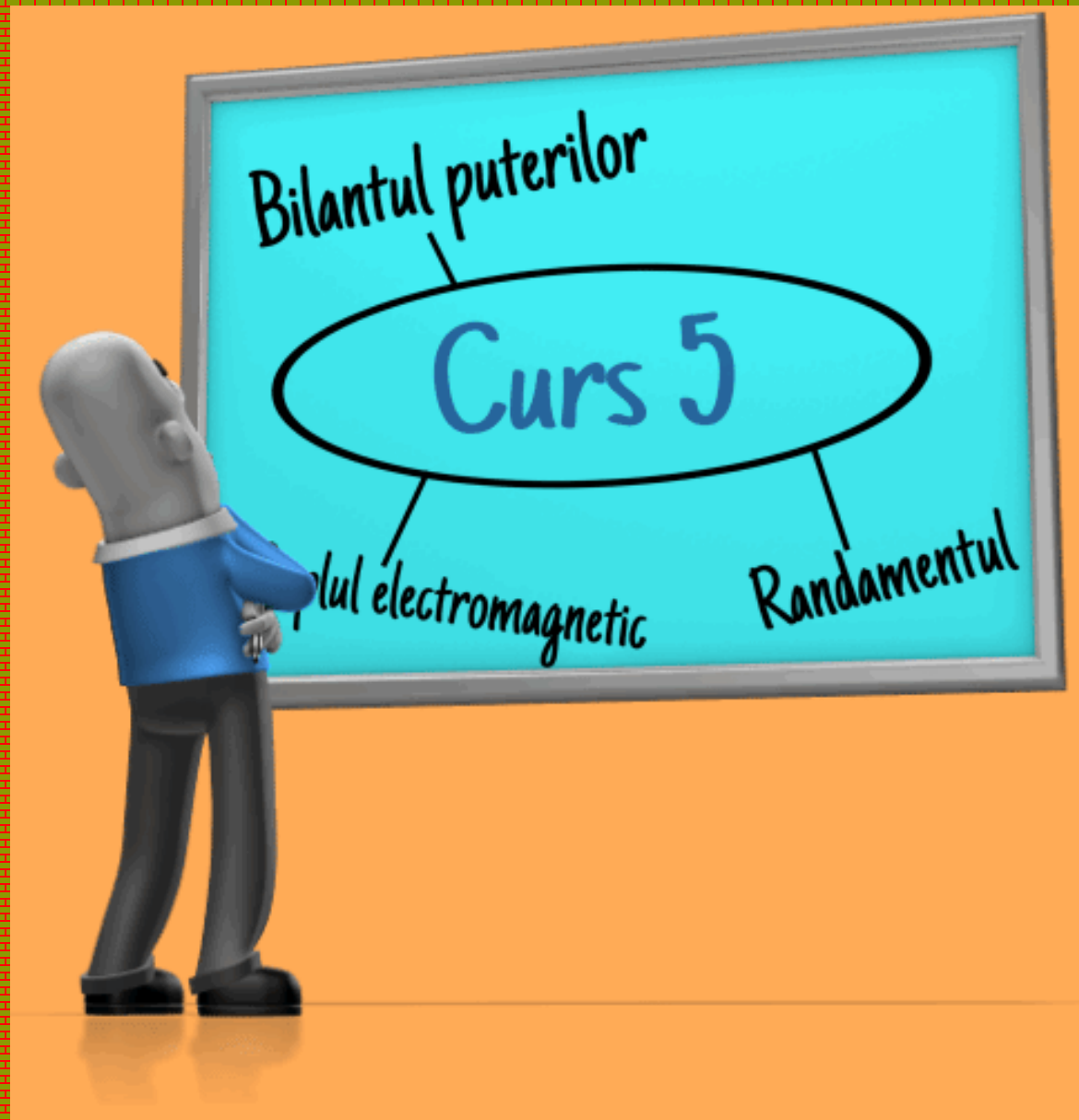
Notez:
$$1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_0} = c_1$$

Expresia tensiunii U_1 devine:

$$\underline{U}_1 = -c_1 \cdot \underline{Z}'_{2s} \cdot \underline{I}'_2 - \underline{Z}_1 \cdot \underline{I}'_2$$

iar expresia curentului prin circuitul secundar este:

$$\underline{I}'_2 = - \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_1 + c_1 \cdot \underline{Z}'_{2s}}$$





CUPRINS

Bilantul puterilor

Randamentul
masinii asincrone

Expresia cuplului
electromagnetic

Bilanțul puterilor și randamentul mașinii asincrone

Se pornește de la sistemul de ecuații ale mașinii asincrone reale:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_{\sigma 1} \cdot \underline{I}_1 - \underline{E}_1 & \text{ecuația 1} \\ 0 = \frac{R'_2}{s} \underline{I}'_2 + jX'_{\sigma 2} \cdot \underline{I}'_2 - \underline{E}_1 & \text{ecuația 2} \\ \underline{I}_{1\mu} = \underline{I}_{10} = \underline{I}_1 + \underline{I}'_2 & \text{ecuația 3} \end{cases}$$

La scrierea în complex simplificat avem relațiile:

$$\underline{I}_1 = I_1 e^{j\alpha_1} = I_1 (\cos \alpha_1 + j \sin \alpha_1)$$

$$\underline{I}_1^* = I_1 e^{-j\alpha_1} = I_1 (\cos \alpha_1 - j \sin \alpha_1)$$

$$\underline{I}_1 \cdot \underline{I}_1^* = I_1^2$$

Se înmulțește, în ecuația 1, cu \underline{I}_1^* :

$$\left\{ \begin{array}{l} \underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_{\sigma 1} \cdot \underline{I}_1 - \underline{E}_1 \quad \left| \underline{I}_1^* \right. \\ 0 = \frac{R'_2}{s} \underline{I}'_2 + jX'_{\sigma 2} \cdot \underline{I}'_2 - \underline{E}_1 \\ \underline{I}_{1\mu} = \underline{I}_{10} = \underline{I}_1 + \underline{I}'_2 \end{array} \right.$$

$$\underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* = R_1 \underline{I}_1 \cdot \underline{I}_1^* + jX_{\sigma 1} \cdot \underline{I}_1 \cdot \underline{I}_1^* - \underline{E}_1 \cdot \underline{I}_1^*$$

Din ecuația 3 înlocuiesc pe I_1

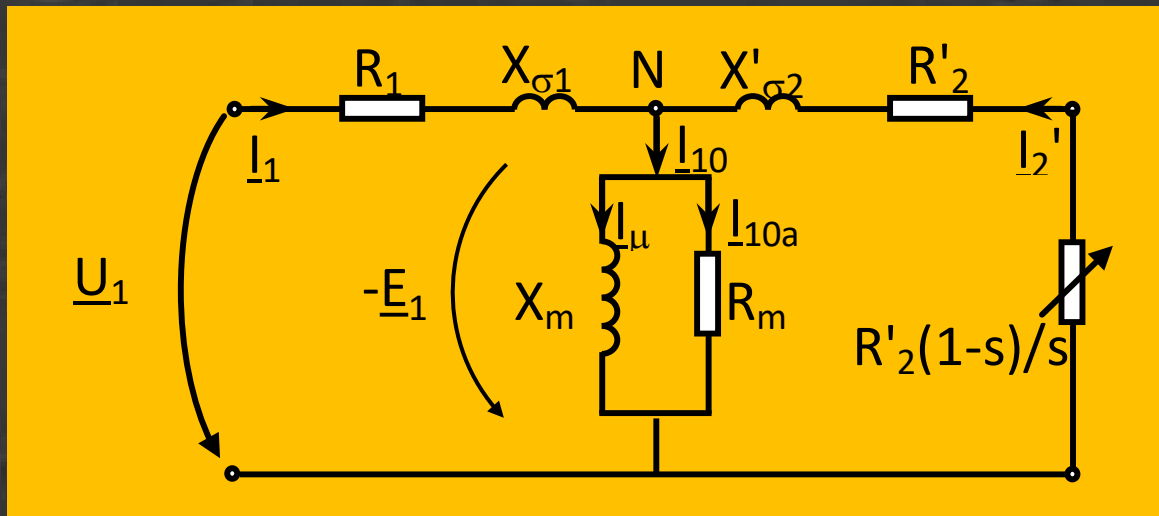
$$\underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* = R_1 I_1^2 + jX_{\sigma 1} \cdot I_1^2 - \underline{E}_1 \left(\underline{I}_{10} - \underline{I}'_2 \right)^*$$

respectiv:

$$\underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* = R_1 I_1^2 + jX_{\sigma 1} \cdot I_1^2 - \underline{E}_1 \cdot \underline{I}_{10}^* + \underline{E}_1 \cdot \underline{I}'_2^*$$

Înlocuiesc pe I_{10} cu suma celor doi curenți (componentele activă și reactivă):

$$\underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* = R_1 I_1^2 + jX_{\sigma 1} \cdot I_1^2 - \underline{E}_1 \left(\underline{I}_{10a} + \underline{I}_{\mu} \right)^* + \underline{E}_1 \cdot \underline{I}'_2^*$$



Însă, din schema echivalentă:

$$\begin{aligned}
 -E_1(I_{10a} + I_\mu)^* &= -E_1 \cdot I_{10a}^* - E_1 \cdot I_\mu^* = R_m \cdot I_{10a} \cdot I_{10a}^* + jX_m \cdot I_\mu \cdot I_\mu^* = \\
 &= R_m \cdot I_{10a}^2 + jX_m \cdot I_\mu^2
 \end{aligned}$$

unde, evident s-au folosit expresiile:

$$-E_1 = R_m \cdot I_{10a} \quad \text{si} \quad -E_1 = jX_m \cdot I_\mu$$

Ecuția 1 rezultă:

$$\underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* = R_1 I_1^2 + jX_{\sigma 1} \cdot I_1^2 + R_m \cdot I_{10a}^2 + jX_m \cdot I_\mu^2 + \underline{E}_1 \cdot \underline{I}_2^*$$

Înlocuiesc în ecuația obținută pe E_1 dat de ecuația 2:

$$\underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* = R_1 I_1^2 + jX_{\sigma 1} \cdot I_1^2 + R_m \cdot I_{10a}^2 + jX_m \cdot I_\mu^2 + \underline{I}_2^* \left(\frac{R'_2}{s} \underline{I}_2 + jX'_{\sigma 2} \cdot \underline{I}_2 \right)$$

dar:

$$\frac{R'_2}{s} = R'_2 + R'_2 \cdot \frac{1-s}{s}$$

Înlocuiesc și rearanjez termenii:

$$\underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* = R_1 I_1^2 + R_m \cdot I_{10a}^2 + R_2' \cdot I_2'^2 + jX_{\sigma 1} \cdot I_1^2 + \\ + jX_m \cdot I_\mu^2 + jX_{\sigma 2}' \cdot I_2'^2 + R_2' \cdot ((1-s)/s) I_2'^2$$

Trec la modul de scriere in mărimi de fază (pentru termenul din stânga) și egalez părțile reale respectiv părțile imaginare :

$$\begin{cases} U_1 I_1 \cos \varphi_1 = R_1 I_1^2 + R_m \cdot I_{10a}^2 + R_2' \cdot I_2'^2 + R_2' \cdot ((1-s)/s) I_2'^2 \\ U_1 I_1 \sin \varphi_1 = X_{\sigma 1} \cdot I_1^2 + X_m \cdot I_\mu^2 + X_{\sigma 2}' \cdot I_2'^2 \end{cases}$$

unde φ_1 este defazajul dintre \underline{U}_1 și \underline{I}_1

Prima ecuație reprezintă echilibrul puterilor active:

$$U_1 I_1 \cos \varphi_1 = R_1 I_1^2 + R_m \cdot I_{10a}^2 + R'_2 \cdot I_2'^2 + R'_2 \cdot ((1 - s)/s) I_2'^2$$

- Puterea activă absorbită (pentru mașina trifazată în ansamblu):

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos \varphi_1$$

- Pierderi în înfășurarea statorică și respectiv fierul statorului:

$$p_{j1} = 3R_1 I_1^2$$

$$p_{Fe1} = 3R_m I_{10a}^2$$

Putere electrică rămasă în urma eliminării pierderilor din stator (p_{j1} și p_{Fe1}) reprezintă *puterea electromagnetică*, adică puterea transmisă pe cale electromagnetică de la stator către rotor:

$$P_e = P_1 - (p_{j1} + p_{Fe1})$$

- Pierderi în înfășurarea rotorului

$$p_{j2} = 3R'_2 \cdot I_2'^2$$

De regulă, pierderile în fierul rotorice se neglijează întrucât ponderea lor este foarte mică (frecvența curenților rotorici este de 1-2 Hz).

Puterea mecanică reprezintă puterea furnizată de mașină la ax (puterea obținută după scăderea pierderilor în fier și înfășurări):

$$P_{mec} = P_e - p_{j2} = R'_2 \cdot ((1 - s)/s) I_2'^2$$

Puterea disponibilă la arbore (valoarea indicată pe plăcuța indicatoare a mașinii) este:

$$P_2 = P_{mec} - (p_{fv} + p_s)$$

unde: p_{fv} =pierderi prin frecare și ventilație; p_s =pierderi suplimentare

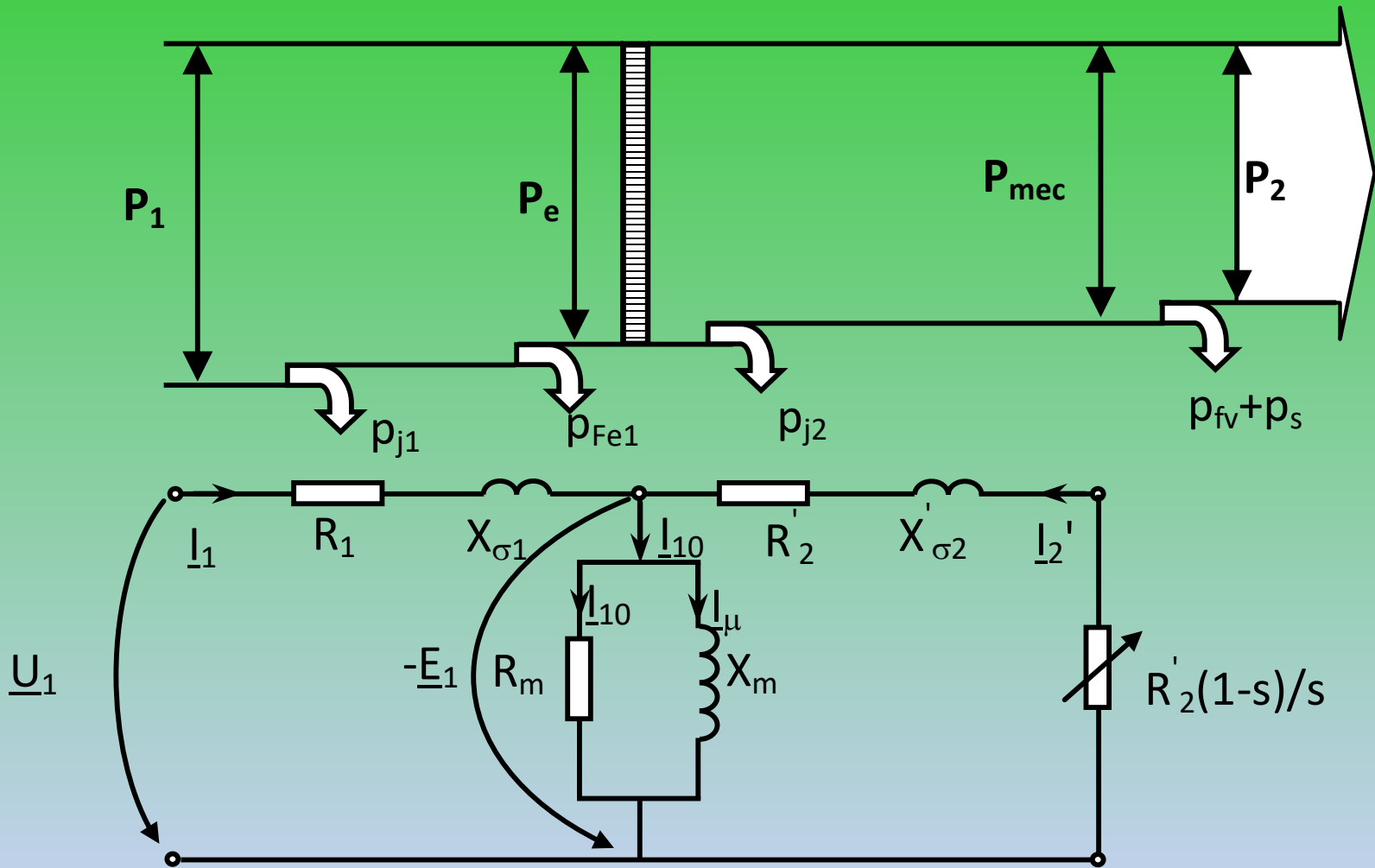
Expresia generală (ce include toate pierderile) a puterii utile la arbore este:

$$P_2 = P_1 - (p_{j1} + p_{Fe1} + p_{j2} + p_{fv} + p_s) = P_1 - \sum p$$

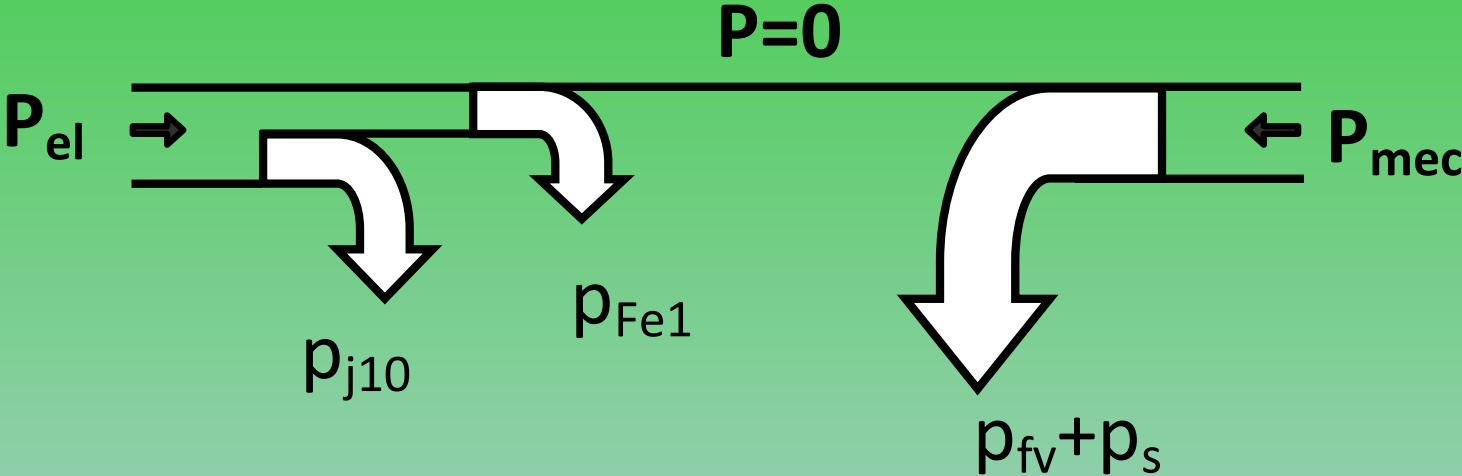
Expresia randamentului este:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum p}{P_1}$$

MOTOR



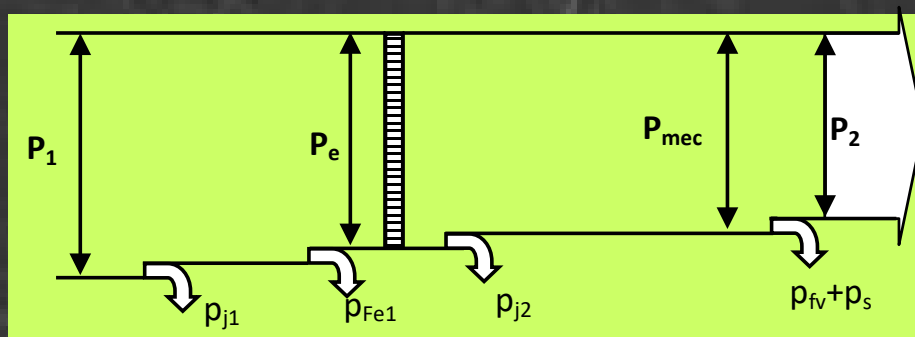
SINCRONISM



Cuplul electromagnetic la mașina asincrona

Din diagrama bilanțului energetic

$$P_e = p_{j2} + P_{mec}$$



Folosind relația $P=M \cdot \Omega$ rezulta: $M_e \cdot \Omega_1 = 3R'_2 \cdot I_2'^2 + M_e \cdot \Omega$

respectiv:

$$M_e = \frac{3R'_2 \cdot I_2'^2}{s \cdot \Omega_1}$$

$$\left(s = \frac{\Omega_1 - \Omega}{\Omega_1} \right)$$


Expresia curentului rotoric (vezi curs anterior) este:

$$\underline{I}'_2 = - \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_1 + c_1 \cdot \underline{Z}'_{2s}}$$

iar expresia modulului curentului rotoric:

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + c_1 \cdot \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2}}$$

Prin urmare, expresia *cuplului electromagnetic* produs în mașina asincrona devine:


$$M_e = \frac{3U_1^2 \cdot R'_2}{s \cdot \Omega_1 \left[\left(R_1 + c_1 \cdot \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2 \right]}$$

Pentru determinarea valorii maxime a cuplului se
derivează în funcție de alunecarea s :

$$\frac{dM_e}{ds}$$

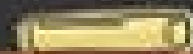
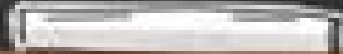
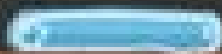
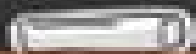


Pentru ușurință, rescriu relația cuplului electromagnetic știind că:

$$\left(\Omega_1 = \frac{\omega_1}{p} = \frac{2\pi f_1}{p} \right)$$

$$M_e = \frac{3U_1^2 \cdot p}{2\pi f_1} \cdot \frac{\frac{R'_2}{s}}{\left[\left(R_1 + c_1 \cdot \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2 \right]}$$

$$\left[\text{!} \frac{dM_e}{ds} = \frac{3U_1^2 \cdot p}{2\pi f_1} \cdot \frac{A' \cdot B + A \cdot B'}{A^2 + B^2} \right] \text{ Regula de derivare}$$



$$\frac{dM_e}{ds} = \frac{3U_1^2 \cdot p}{2\pi f_1} \cdot \frac{-\frac{R'_2}{s^2} \left[\left(R_1 + c_1 \cdot \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2 \right] - \frac{R'_2}{s} \left[-\frac{2R_1 \cdot c_1 \cdot R'_2}{s^2} - \frac{2c_1^2 \cdot R'_2{}^2}{s^3} \right]}{\left(\frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left[\left(R_1 + c_1 \cdot \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2 \right]^2}$$

Pentru determinarea valorii alunecării la care se obține valoarea maximă de cuplu, se egalează derivata cu zero:

$$\frac{dM_e}{ds} = 0 \rightarrow R_1^2 - \left(\frac{c_1 \cdot R'_2}{s} \right)^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2 = 0$$

Valoarea maximă a cuplului se obține pentru:

$$s_{cr} = \pm \frac{c_1 \cdot R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2}}$$

numită *alunecare critică*.

Înlocuiesc valoarea critică a alunecării pentru a obține valoarea maximă a cuplului:

$$M_{emax} = \pm \frac{3U_1^2}{\Omega_1} \cdot \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2} \cdot \left[\left(R_1 \pm \frac{c_1 \cdot R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2}} \right)^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2 \right]}$$



$$M_{emax} = \pm \frac{3U_1^2}{2c_1 \cdot \Omega_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2} \pm R_1} = M_{cr}$$

Semnul „+” corespunde regimului de motor iar semnul „-” celui de generator.

Cuplul de pornire, obținut pentru $s=1$, are expresia:



$$M_p = \frac{3U_1^2 \cdot R'_2}{\Omega_1 \left[\left(R_1 + c_1 \cdot \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2 \right]}$$

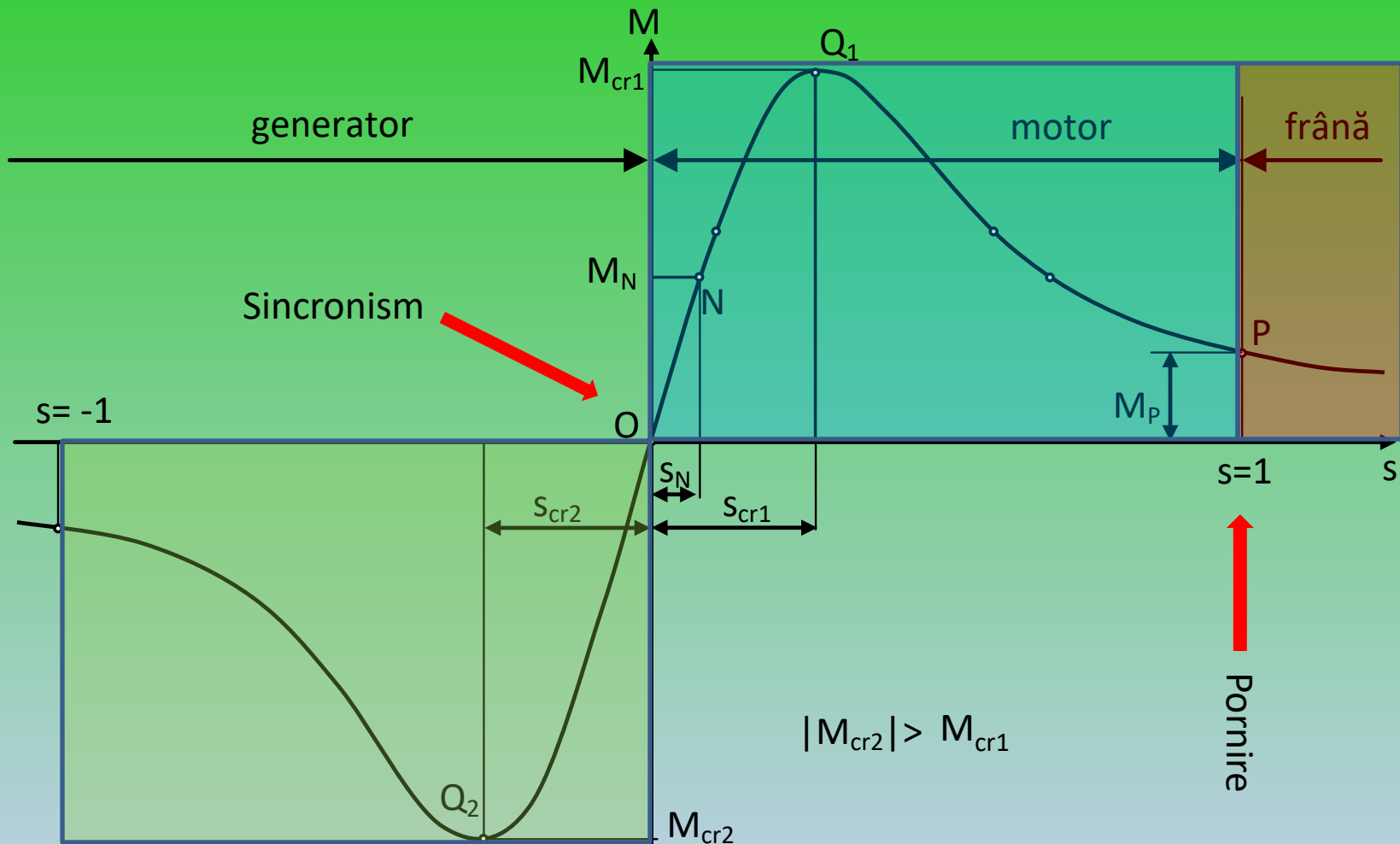
Pentru a exprima sintetic raportul dintre cuplul electromagnetic dezvoltat de mașina asincronă la o anumită alunecare și cuplul maxim, se folosește în mediul ingineresc o formulă simplificată care neglijează rezistența înfășurării statorice, R_1 , ce poartă numele de „formula lui Kloss”.

$$\frac{M_e}{M_{cr}} = \frac{2}{\frac{s}{s_{cr}} + \frac{s_{cr}}{s}}$$

Se definește și coeficientul de suprasarcină ca fiind raportul dintre cuplul maxim (cuplul critic) și cuplul nominal:

$$\frac{M_{cr}}{M_n} = \frac{1}{2} \left(\frac{s_n}{s_{cr}} + \frac{s_{cr}}{s_n} \right) = K$$

Coeficientul de suprasarcină descrie capacitatea mașinii asincrone de a funcționa peste cuplul nominal, o perioadă scurtă de timp (fixată de regimul termic).



Caracteristica $M = f(s)$ a mașinii asincrone (variația cuplului electromagnetic cu alunecarea)

Mașina asincronă funcționează în regim de motor pentru $s = (0, 1)$

Pentru $s < 0$, mașina asincronă funcționează în regim de generator.

Când alunecarea $s > 1$, mașina asincronă funcționează în regim de frână.

Puncte de funcționare specifice:

- Punctul P este punctul de pornire în regim de motor. În funcție de caracteristicile constructive ale mașinii, ea poate dezvolta un cuplu electromagnetic, M_p , ce reprezintă cuplul de pornire ce pune în mișcare de rotație rotorul. Este caracterizat de valorile M_p respectiv $s=1$.
- Punctul Q_1 reprezintă punctul corespunzător valorii maxime a cuplului electromagnetic. Este deci caracterizat de valorile M_{cr} respectiv s_{cr} .
- Punctul N este punctul de funcționare nominală. Corespunde valorilor indicate pe plăcuța indicatoare a mașinii și este caracterizat de valorile M_N respectiv s_N .

La funcționarea în regim de motor, punctul de funcționare evoluează din P1 spre Q1 apoi coboară pe caracteristică spre punctul N. În funcție de cuplul rezistent la arbore (adică sarcina motorului), el se fixează în N sau mai jos către punctul de sincronism ce corespunde lui $M=0$ și $s=1$. Zona de funcționare P-Q1, este o zonă tranzitorie de funcționare (doar la pornire și la oprire. Mașina nu poate funcționa stabil pe această porțiune.

Regimul de funcționare ca generator presupune antrenarea rotorului la o viteză mai mare decât cea de sincronism. Caracteristica $M=f(s)$ este situată în cadranul trei.



La funcționarea în regim de generator, cuplul electromagnetic dezvoltat de mașina asincronă are valoare negativă, adică se opune mișcării rotorului.

Punctele de funcționare nominal și critic, descrise la regimul de motor, sunt valabile și pentru regimul de generator.



Putere absorbită (P_1) vs. Putere cedată (P_2)

Pierderi în înfășurări

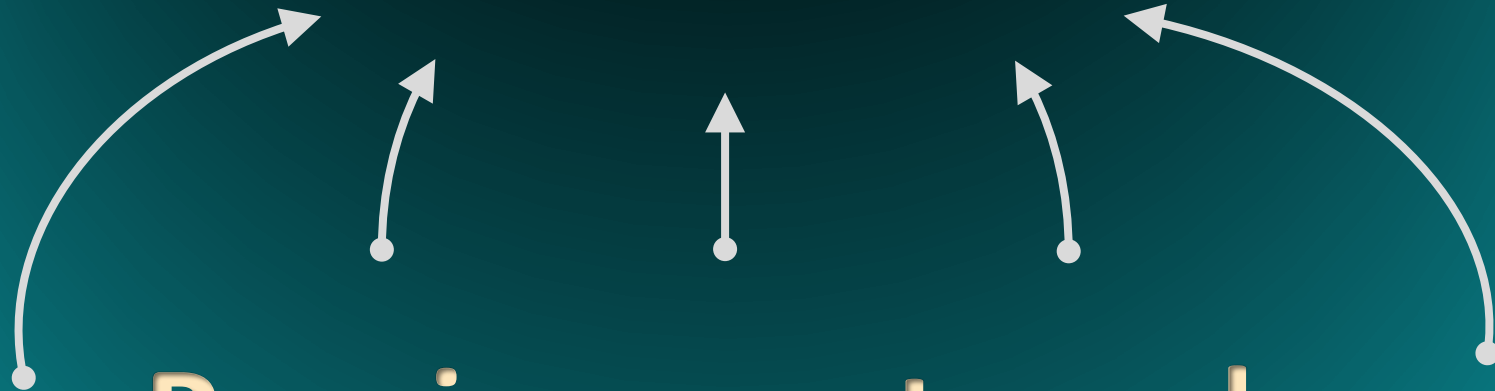
Pierderi în fier

Cuplu electromagnetic

Cuplu de pornire

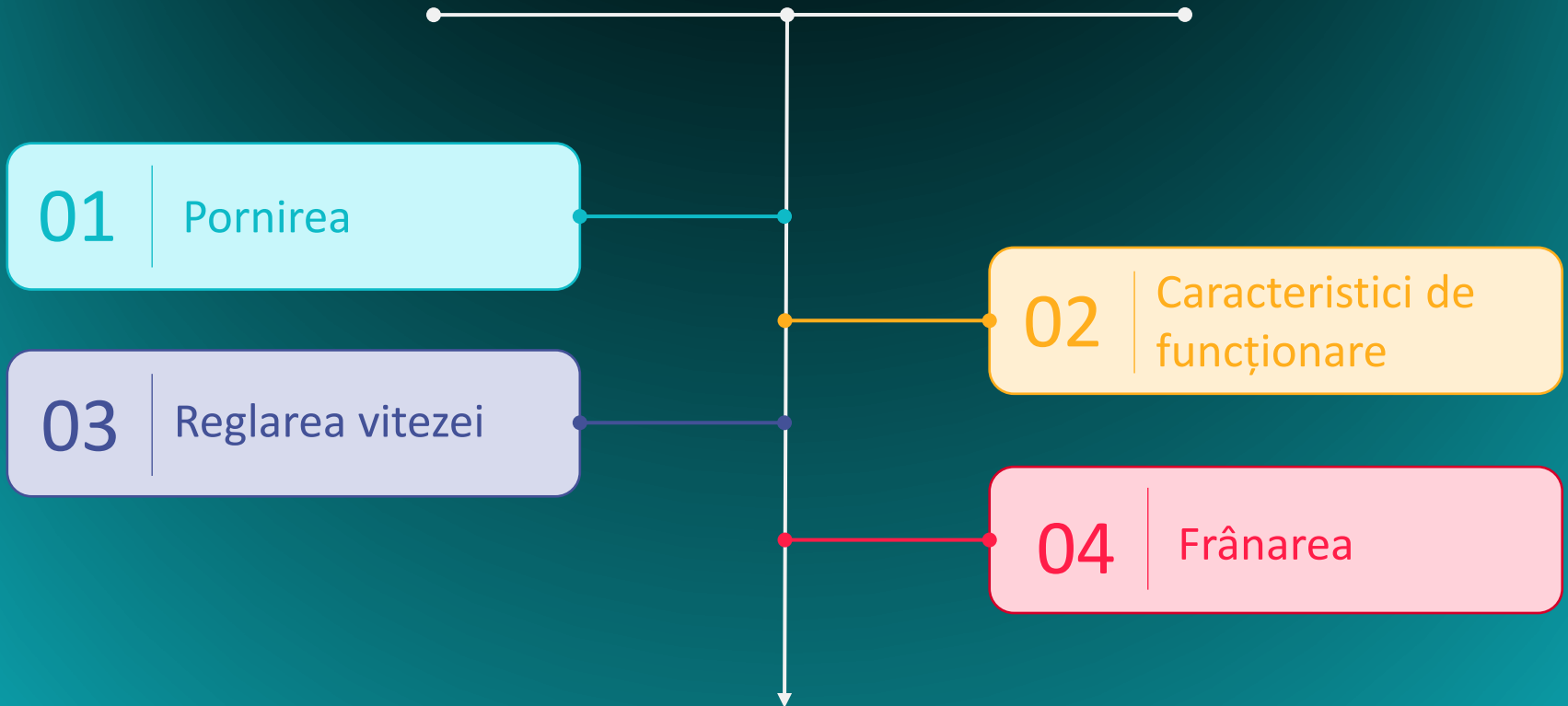
Cuplu maxim (critic)

CURS 6



Pornirea motoarelor asincrone

Tematici de analiză la motorul asincron



CUPRINS



I.
Cuplarea directă la rețea

II.
Pornirea stea-triunghi



III.
Pornirea cu autotransformator

IV.
Pornirea cu soft-starter



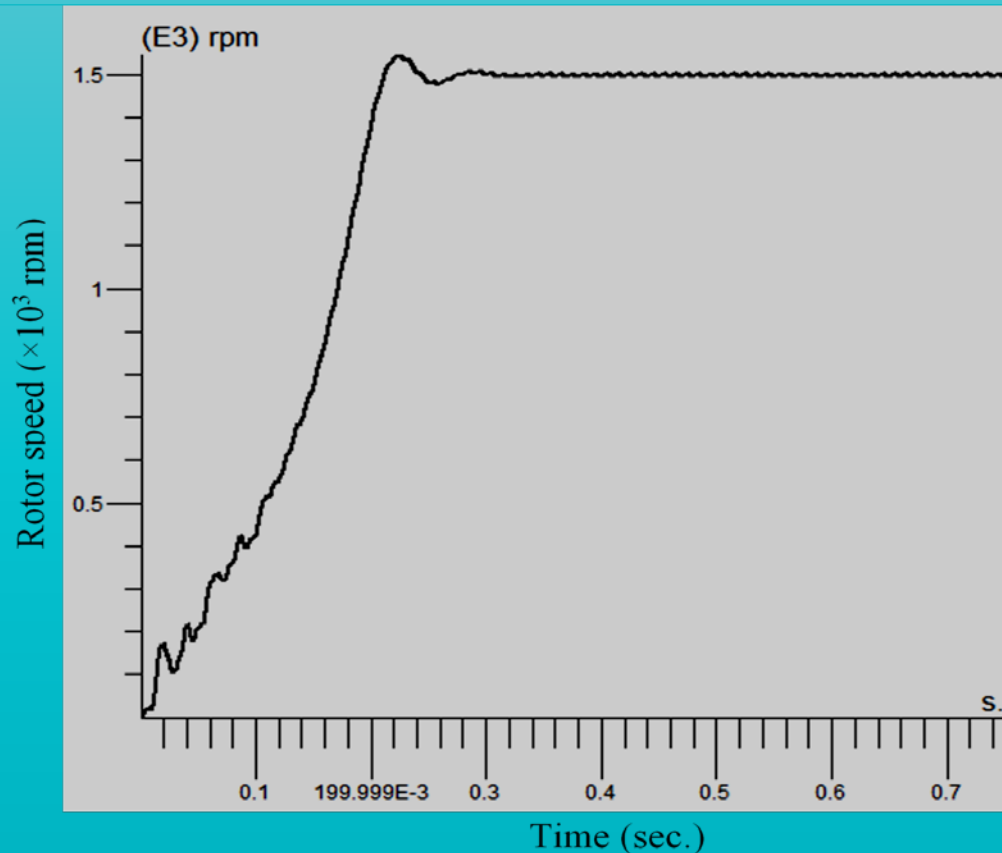
V.
Pornirea cu convertor de frecvență

VI.
Pornirea cu rezistențe înseriate în
circuitul rotoric

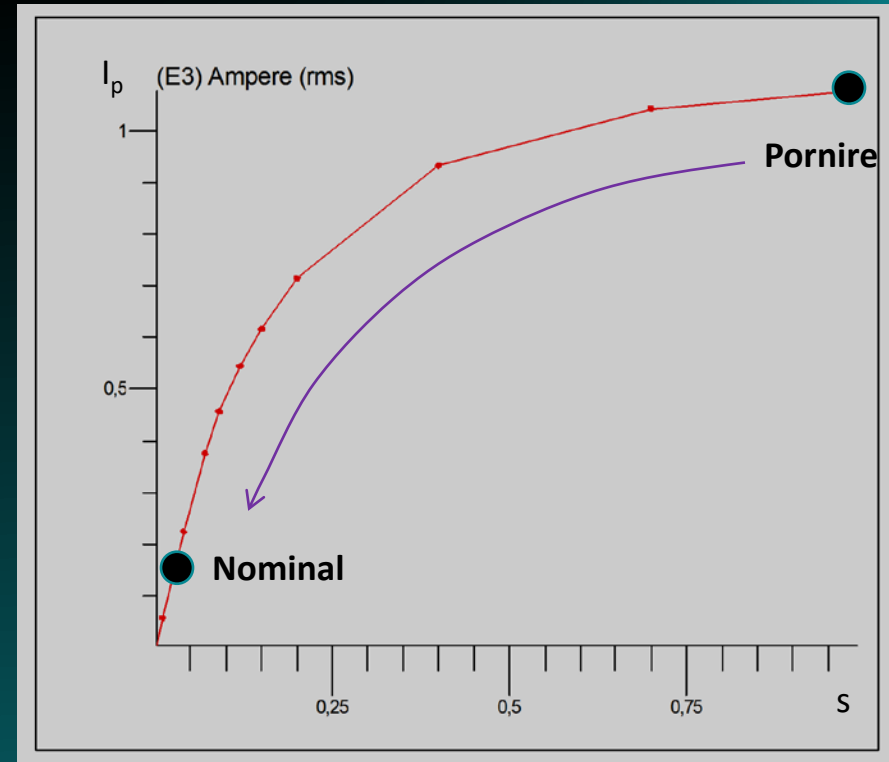
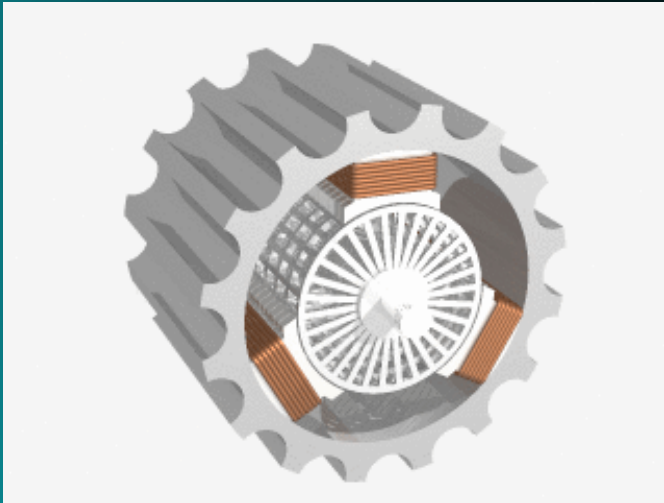




Pornirea este un regim tranzitoriu al funcționării in regim de motor pe parcursul căruia mașina accelerează de la zero până la stabilizarea vitezei la o valoare constantă, determinată de sarcină.



Caracteristica de pornire in gol a unui motor asincron (variația turației in timp)



Variația curentului, în barele rotorice, pe perioada pornirii.



Pe timpul pornirii, curentul depășește valoarea sa nominală atât în înfășurarea statorică cât și în cea rotorică.

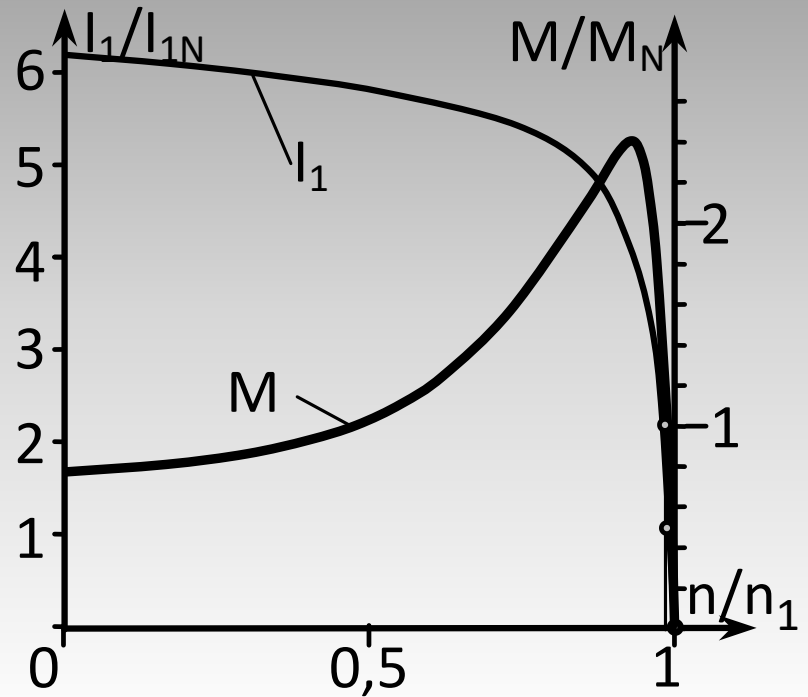
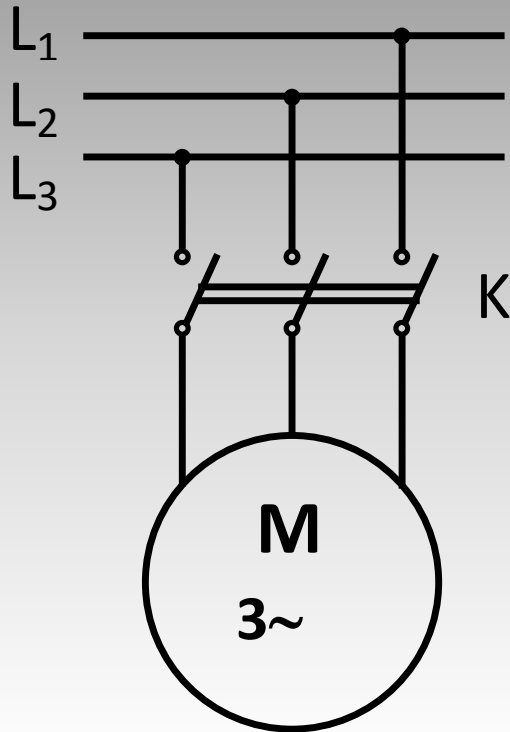
La pornirea motorului asincron apare întotdeauna prin înfășurări un curent mai mare decât valoarea nominală. Acest curent, în mod uzual, se încadrează în limitele $(4-7)I_N$. Deși, pe moment, acest curent nu produce defectarea mașinii întrucât regimul de pornire este scurt, în timp are loc o depreciere mai rapidă a înfășurărilor.

De asemenea, valoarea mare a curentului poate afecta în mod negativ rețeaua de alimentare, mai ales dacă aceasta este de putere scăzută.

În plus, regimul mecanic de pornire se poate manifesta prin șocuri ce pot afecta cuplajele mecanice sau însuși procesul tehnologic.

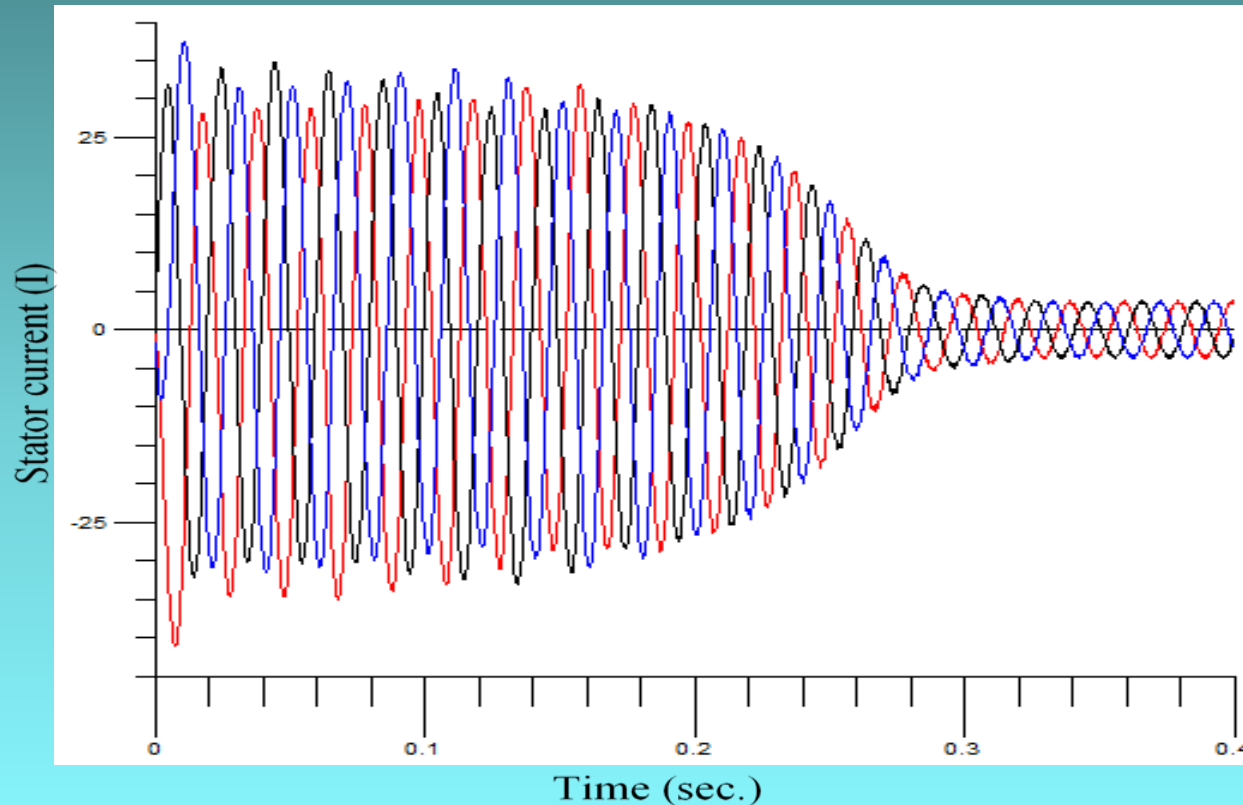
Drept urmare, de cele mai multe ori trebuie adoptate măsuri speciale pentru pornirea în siguranță a motorului asincron.

I. Cuplarea directa



Mașina se conectează la rețea prin intermediul contactorului K, FĂRĂ a se lua vreo măsură de limitare a curentului de pornire. Metoda se aplică în cazul motoarelor de mică putere (puteri până la 2-3 kW) ținând cont și de frecvența pornirilor.

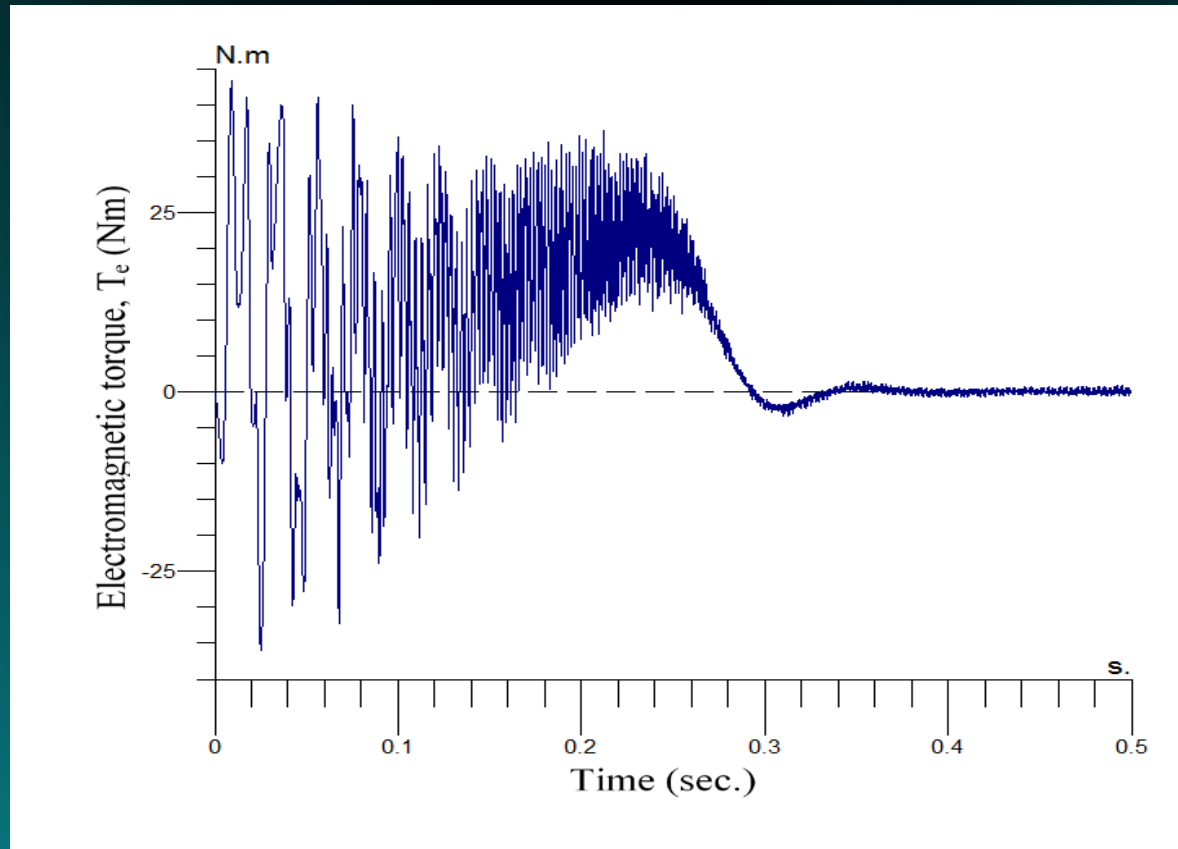
Variația curenților prin înfășurarea trifazată statorică, la conectarea unei mașini asincrone la rețea.



Timpul de pornire durează până la stabilizarea valorii curentului (pe figură $t_p=0,32\text{sec}$)

Pe timpul pornirii, curentul poate atinge valori de până la 6-7 ori peste valoarea nominală.

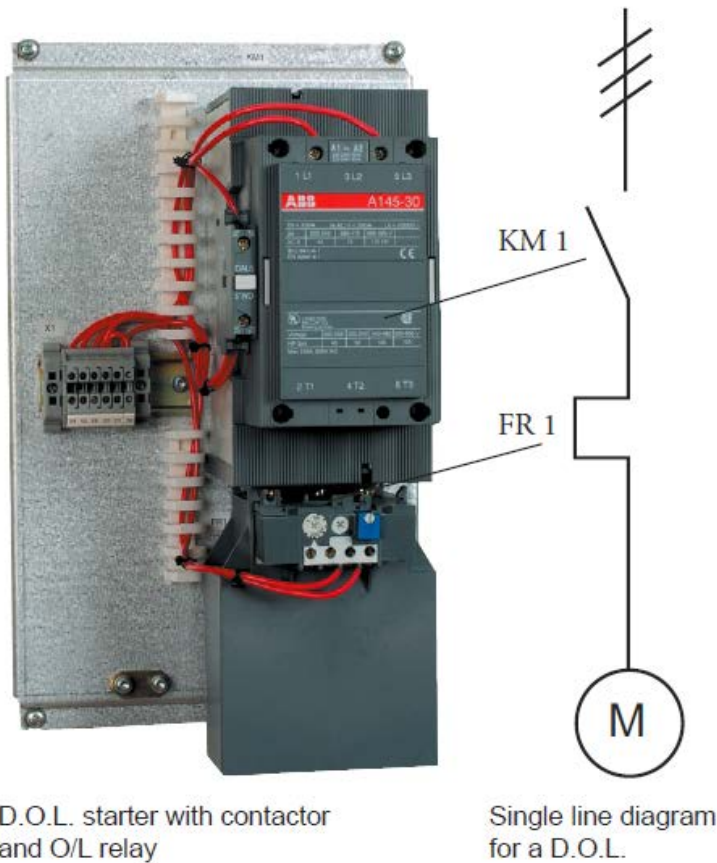
Variația cuplului electromagnetic la conectarea unei mașini asincrone la rețea



$$M_e = J \frac{d\Omega}{dt} + M_r$$

unde: J – momentul de inerție; M_r – cuplul rezistent;
 Ω – viteza unghiulară a rotorului.

Pe timpul pornirii are loc o variație importantă și alternativă a cuplului electromagnetic.



D.O.L. starter with contactor and O/L relay

KM 1 Main contactor
FR 1 Overload relay



1. Curent de pornire $I_p = (4-7.5)I_n$
2. Cuplul de pornire depinde numai de caracteristicile motorului
3. Pentru ca pornirea motorului să nu dezechilibreze rețeaua de alimentare trebuie îndeplinită următoarea condiție:

$$\frac{I_p}{I_n} \leq \frac{3}{4} + \frac{\text{Puterea instalata pe retea}}{4 \times \text{Puterea motorului}}$$

Contactor utilizat la cuplarea directă a motorului asincron la rețea

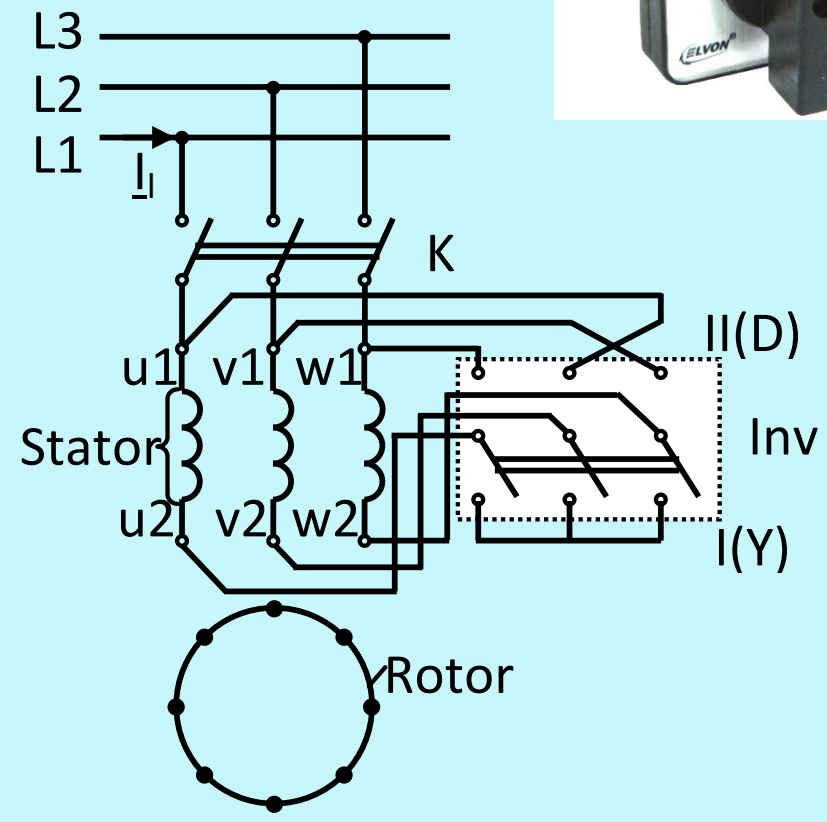
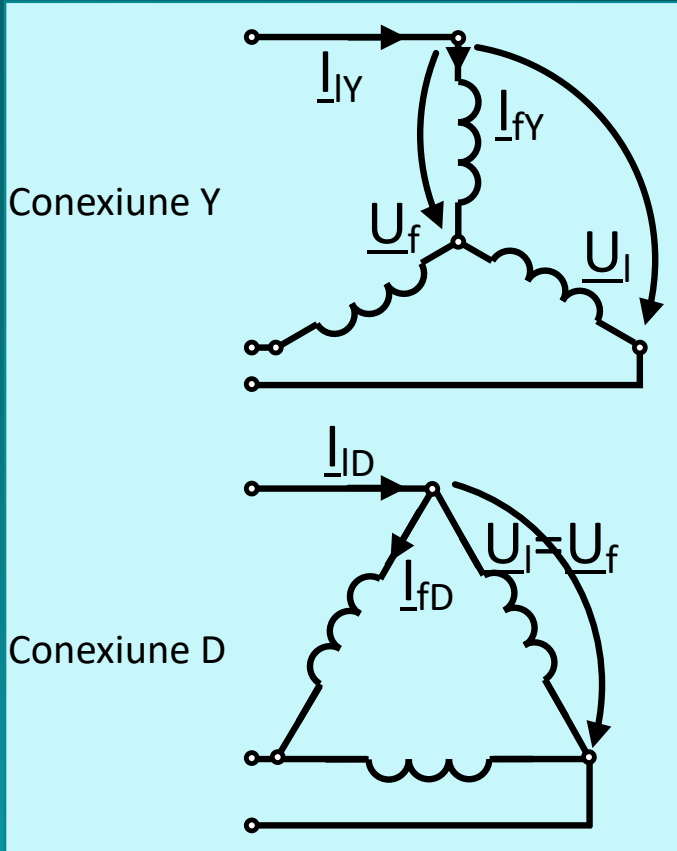
II. Pornirea stea-triunghi

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + c_1 \cdot \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2}}$$

Principial, metoda constă în scăderea tensiunii de alimentare. În sistemul trifazat românesc (având tensiunea de linie de 400 V), tensiunea de alimentare se reduce de la 400V la 230V pe fiecare fază a motorului.

Practic, înfășurarea trifazată statorică este conectată inițial în stea (Y) după care se trece la conexiunea triunghi (D).

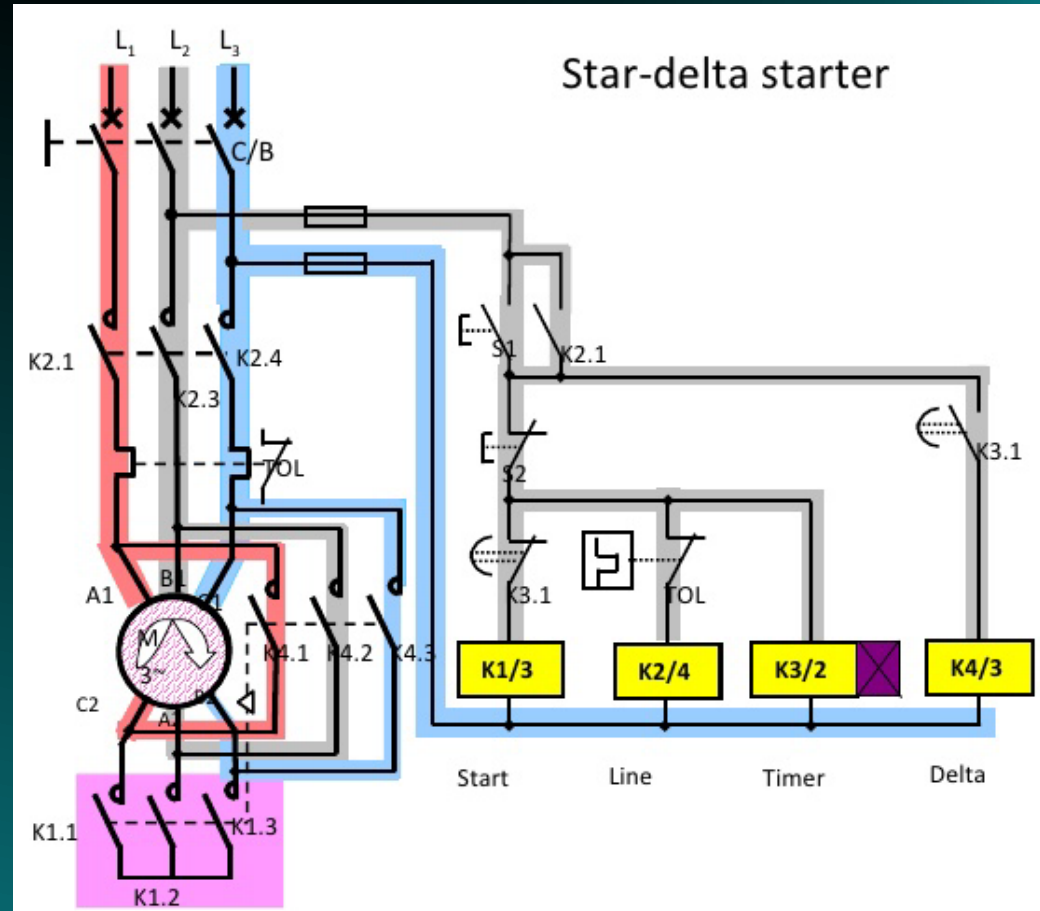
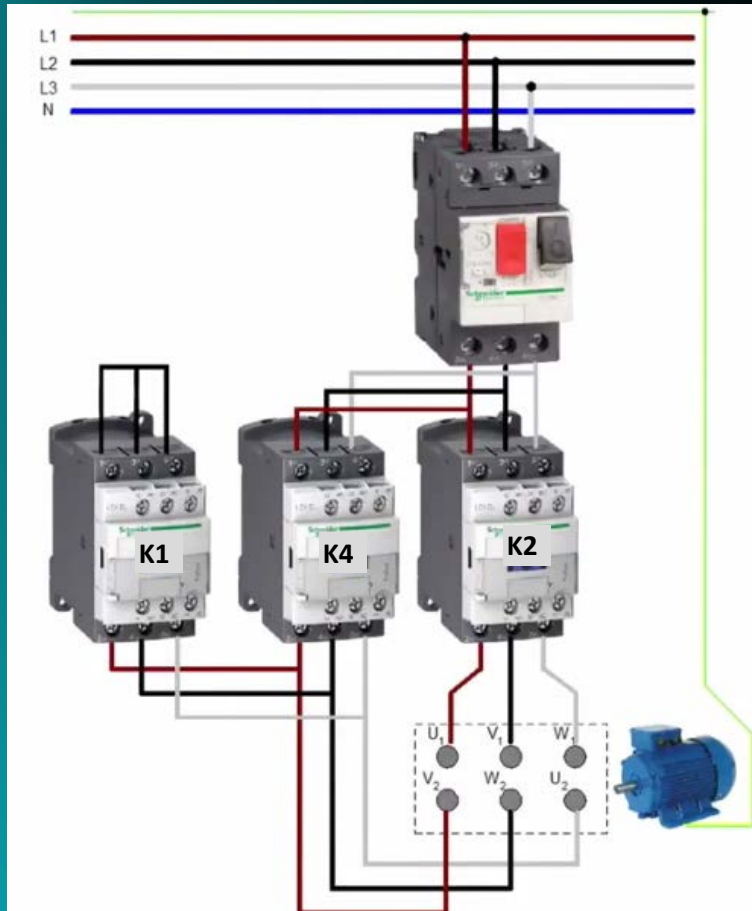
Comutator stea-triunghi



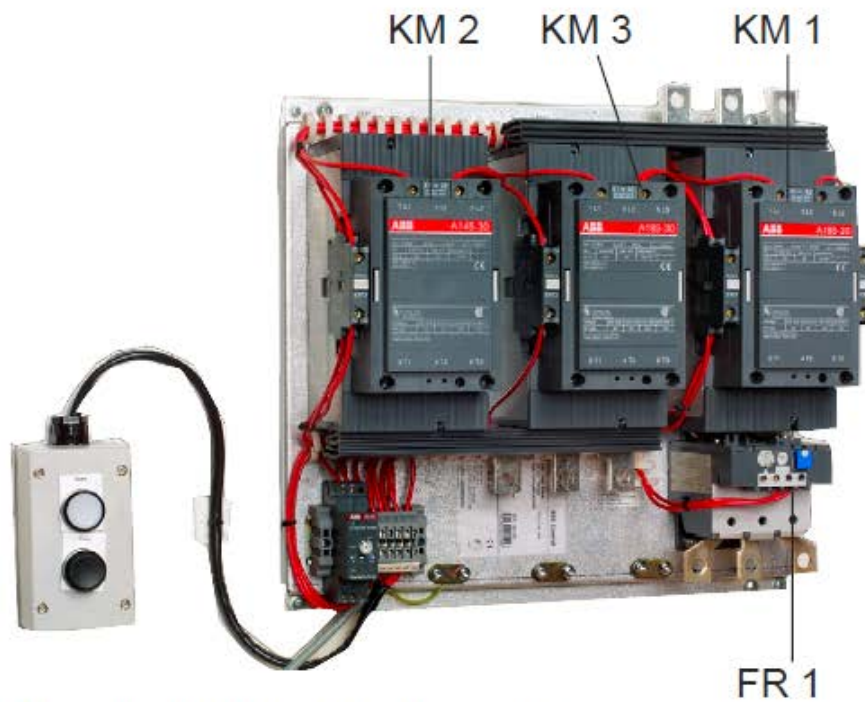
Principiul reducerii tensiunii de fază utilizând trecerea de la conexiunea triunghi la conexiunea stea

Schema de principiu a comutatorului stea-triunghi

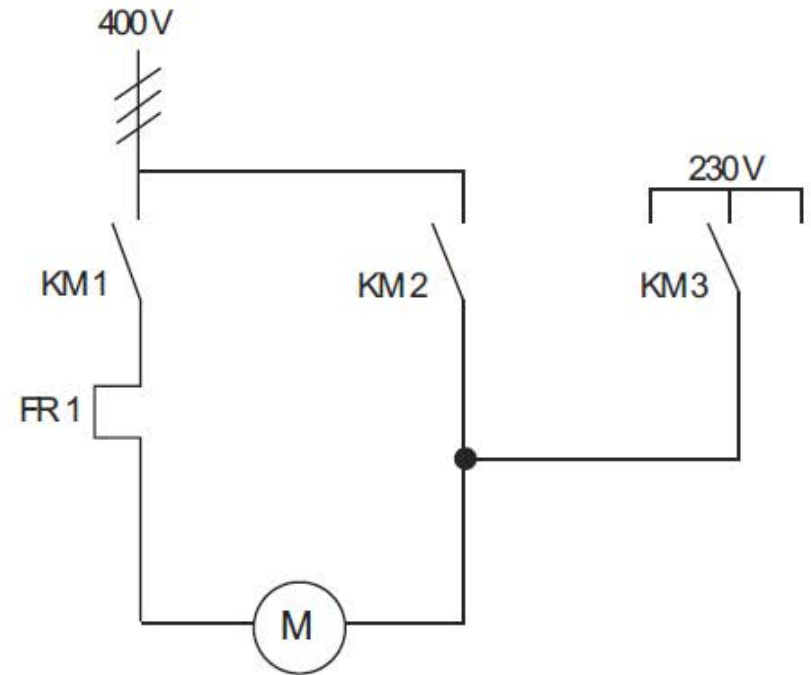
Sistem de pornire Y/Δ automatizat



- Când se apasă butonul de pornire S1, se alimentează bobinele contactoarelor K1 și K2 ce duce la închiderea contactelor acestora. Mașina este alimentată în conexiunea Y. De asemenea se alimentează bobina releului de timp K3/2.
- După timpul setat pe K3/2, se deschide contactul K3.1 (de pe ramura lui K1/3) și se închide contactul K3.1 de pe ramura lui K4/3. Astfel se trece de pe conexiunea Y pe conexiunea Δ (se deschid contactele principale K1.1-K1.3 și se închid contactele K4.1-K4.3).



Star-delta starter with contactors and O/L relay



Single line diagram for a Star-delta starter

- KM 1 Main contactor
- KM 2 Delta contactor
- KM 3 Star contactor
- FR 1 Overload relay

Sistem de pornire Y/Δ industrial ABB

$$\left(\begin{array}{l} \mathbf{Y} \\ \\ \end{array} \begin{array}{l} I_{linie} = I_{faza} \\ U_{linie} = \sqrt{3} U_{faza} \end{array} \quad \Delta \quad \begin{array}{l} U_{linie} = U_{faza} \\ I_{linie} = \sqrt{3} I_{faza} \end{array} \right)$$

$$I_{lY} = I_{fY} = \frac{U_f}{Z_f} = \frac{U_l}{\sqrt{3} \cdot Z_f} \quad (1)$$

$$I_{l\Delta} = \sqrt{3} \cdot I_{f\Delta} = \sqrt{3} \cdot \frac{U_f}{Z_f} = \sqrt{3} \cdot \frac{U_l}{Z_f} \quad (2)$$

$$\frac{I_{lY}}{I_{l\Delta}} = \frac{1}{3}$$

Dacă exprimăm curenții de linie, corespunzători celor două conexiuni, în funcție de tensiunea de linie, U_l , și impedanța de fază, Z_f (rel. 1 și 2), atunci se constată că raportul curenților pentru cele două conexiuni este de 1/3.

Caracteristicile de cuplu și curent ale motorului asincron la pornirea stea-triunghi

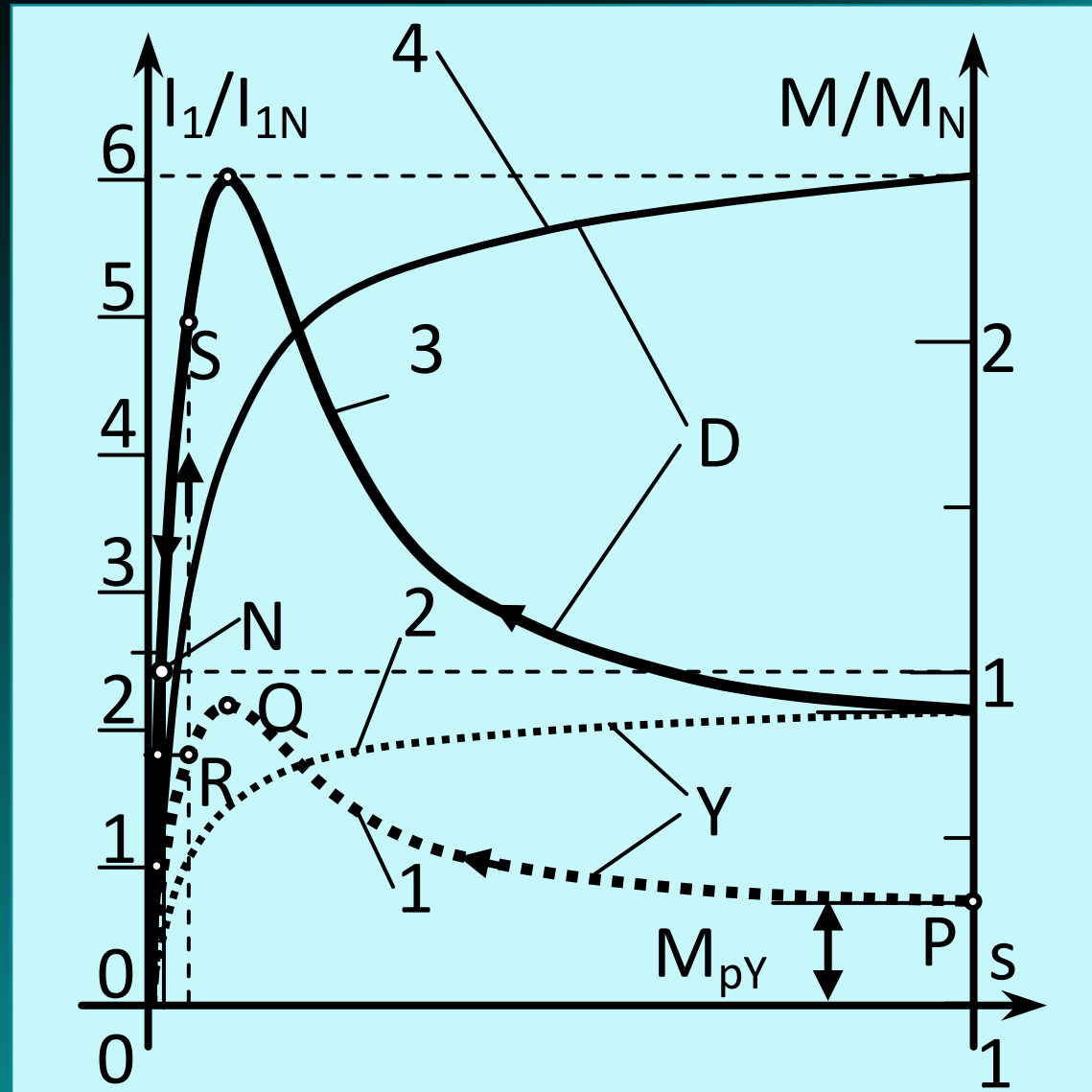
- 1- curba $M=f(s)$ la funcționarea Y
- 2- curba $I=f(s)$ la funcționarea Y
- 3- curba $M=f(s)$ la funcționarea Δ
- 4- curba $I=f(s)$ la funcționarea Δ

P- *punctul de pornire*

R- *punctul de schimbare a conexiunii din stea în triunghi*

S- *punctul de funcționare omolog lui R de pe caracteristica conexiunii triunghi*

N- *punctul nominal de funcționare*



Explicații

- a. Motorul pornește din punctul P, iar punctul de funcționare evoluează pe caracteristica 1 până în punctul R.
- b. Se trece de la conexiunea stea la conexiunea triunghi.
- c. Punctul de funcționare „sare” din R în S.
- d. Punctul de funcționare evoluează pe noua caracteristică (3) din S în N (dacă mașina este încărcată la cuplu nominal) sau mai jos.



1. Curentul de pornire *scade de 3ori*

2. Cuplul de pornire *scade de 3ori*

3. Mașina trebuie să aibă toate capetele înfășurării statorice scoase la cutia de borne (6 borne)

4. Mașina trebuie să fie destinată funcționarii în triunghi

Indicația de pe plăcuța indicatoare trebuie să arate astfel:

Δ/Y - 380/660 V (400/690)

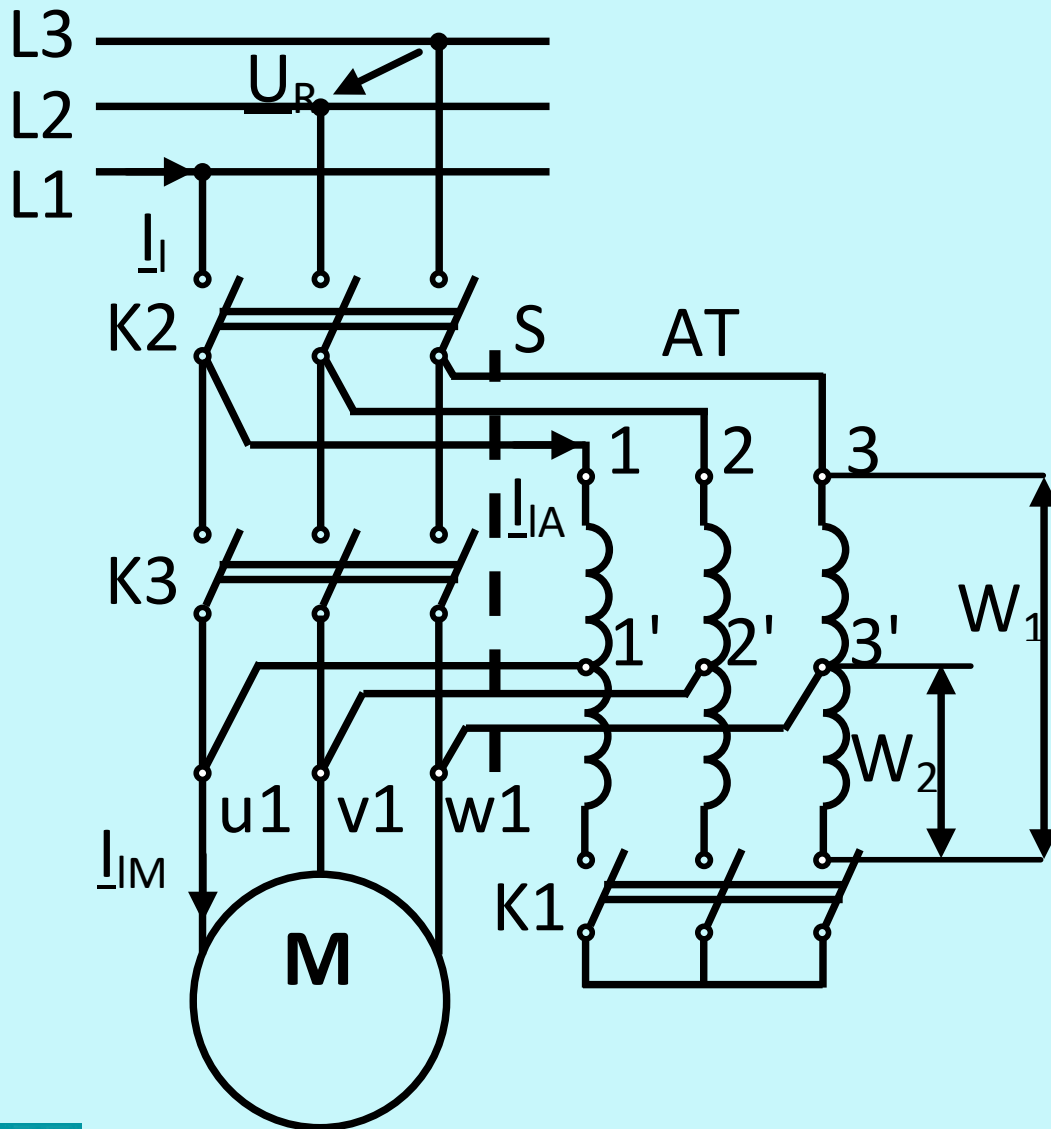


Dacă pe plăcuța indicatoare a mașinii apare:

Δ/Y - 220/380 V (230/400)

înseamnă că mașina este destinată să funcționeze în conexiunea stea și trecerea ei în conexiunea triunghi determină o tensiune de fază mai mare decât tensiunea nominală

III. Pornirea cu autotransformator



Acest tip de pornire se folosește în cazul motoarelor de foarte mare putere (MW sau uneori sute de kW)

1. Se închide K1 și apoi K2. Înfășurarea statorică este alimentată la jumătate din tensiunea rețelei.
2. Se deschide K1. Rămâne jumătate din înfășurarea autotransformatorului pe care are loc o anumită cădere de tensiune iar tensiunea de alimentare crește peste jumătatea tensiunii rețelei dar sub valoarea sa nominală.
3. Se închide K3. Mașina se alimentează la tensiunea nominală.



1. Curentul de pornire *scade de* w_1/w_2 ori

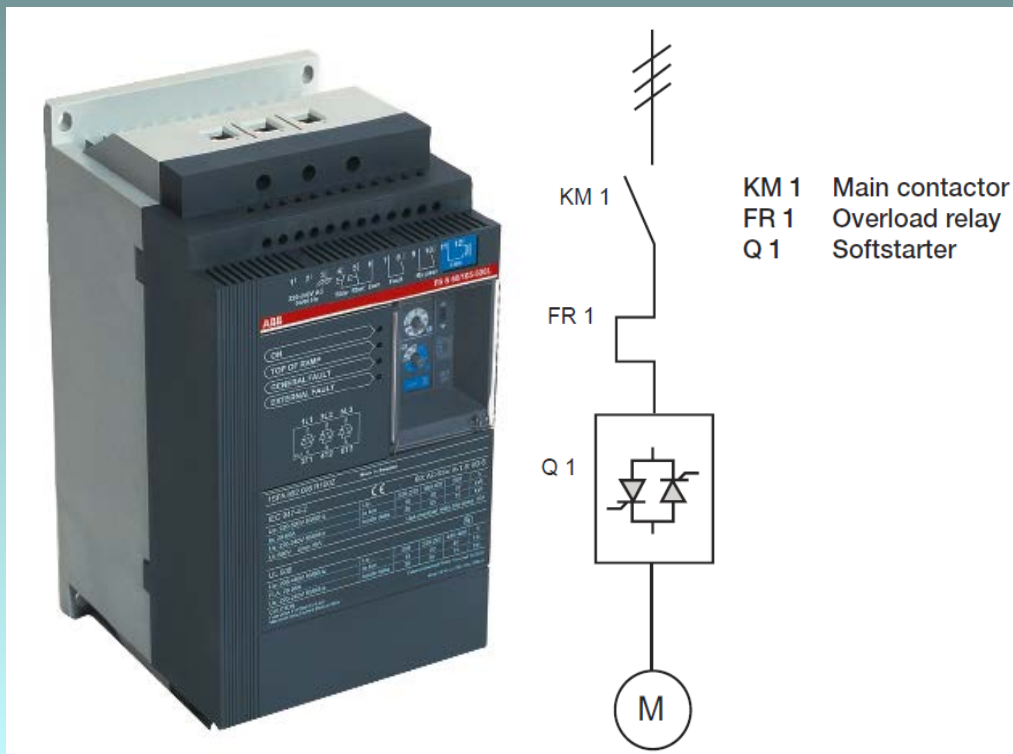
$$\text{Daca } \frac{w_1}{w_2} = 2 \quad \text{atunci } U_{1m} = \frac{1}{2} U_{1r} \quad \text{dar } M = 0,25 \cdot M_{pN}$$

2. Cuplul de pornire *scade cu pătratul raportului* w_1/w_2

3. Metoda se aplică mașinilor de mare putere (4-5 MW)

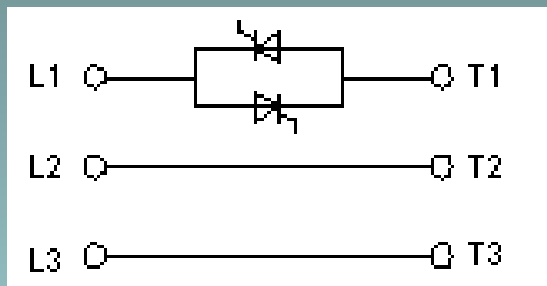
4. Deoarece costul ATR este mare, metoda se folosește pentru alimentarea succesivă a mai multor motoare.

IV. Pornirea cu soft-starter

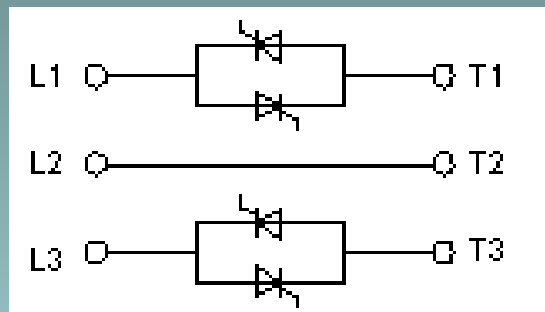


Soft-starterul este un dispozitiv ce permite reglarea temporară, pe cale electronică, a tensiunii de alimentare. De regulă, este prevăzut cu tiristoare legate în antiparalel pe una, două sau toate trei fazele. Valoarea tensiunii este reglată prin modificarea unghiului de conducție al tiristoarelor.

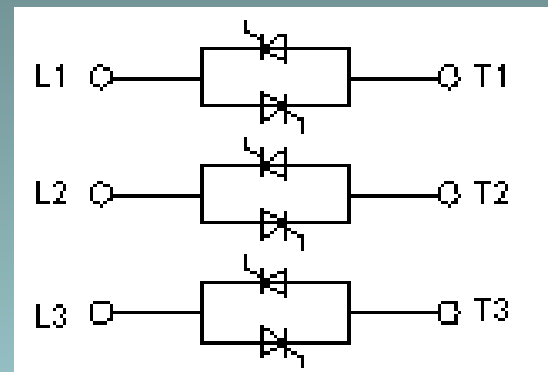
Tipuri de soft-startere



Soft-starter cu reglajul tensiunii pe o singura faza a sistemului de alimentare



Soft-starter cu reglajul tensiunii pe doua faze ale sistemului de alimentare



Soft-starter cu reglajul tensiunii pe toate fazele sistemului de alimentare

Secvență de comanda a tiristoarelor soft-starterului

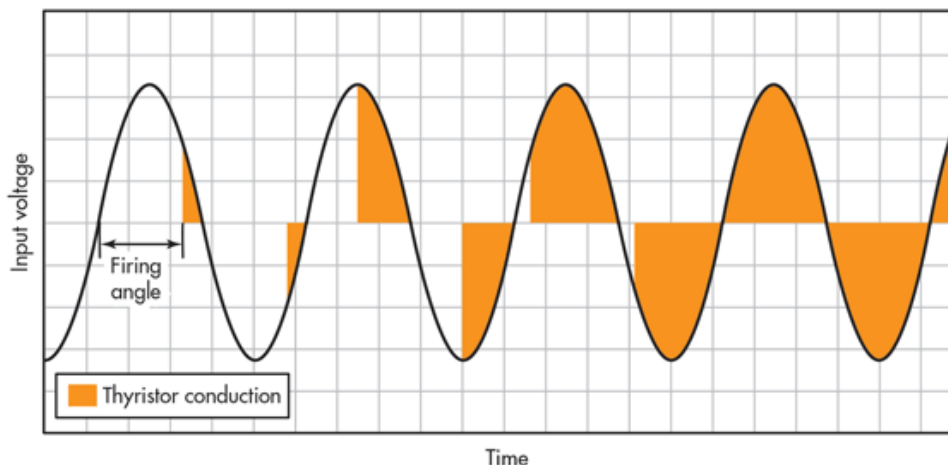
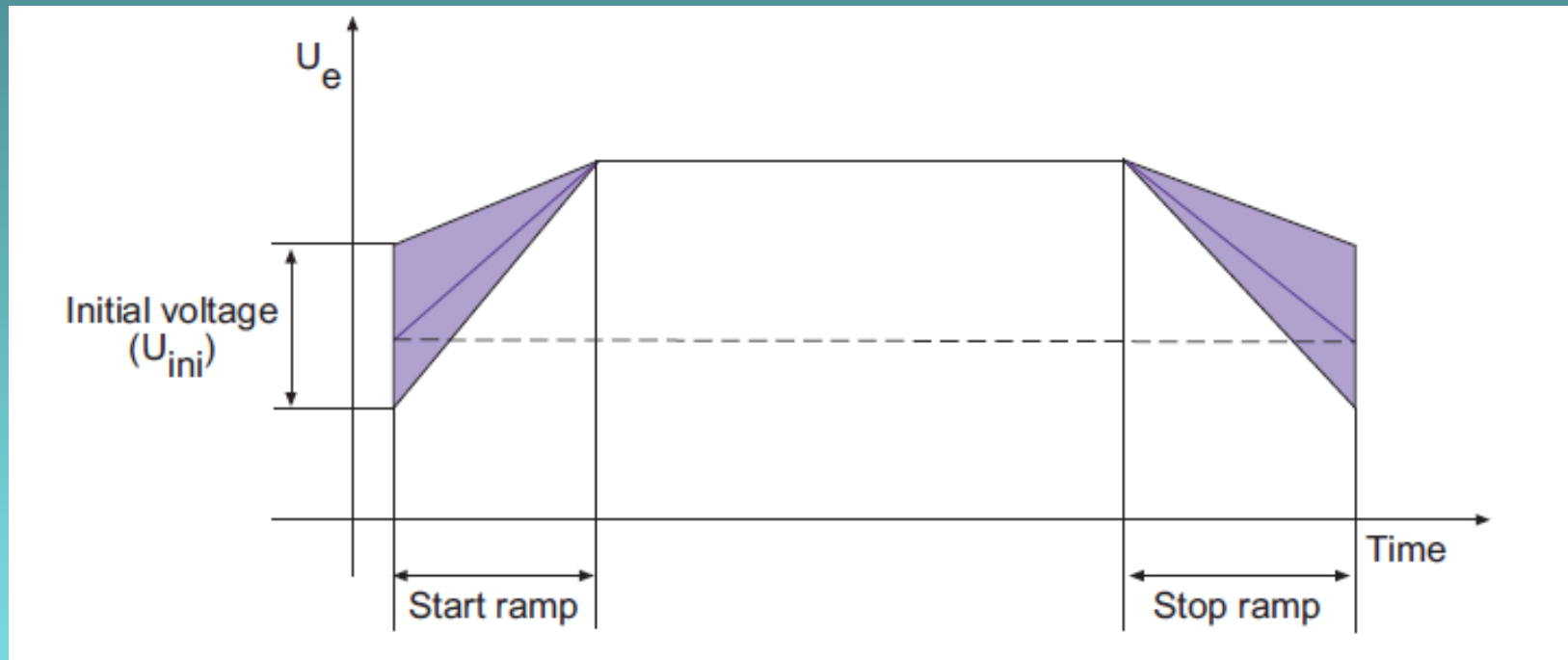


Diagrama de pornire cu soft-starter



Soft-starterul permite pornire cu tensiune redusă a cărei valoare poate fi ajustată de utilizator în funcție de specificul pornirii. În plus, se poate regla și timpul de pornire.

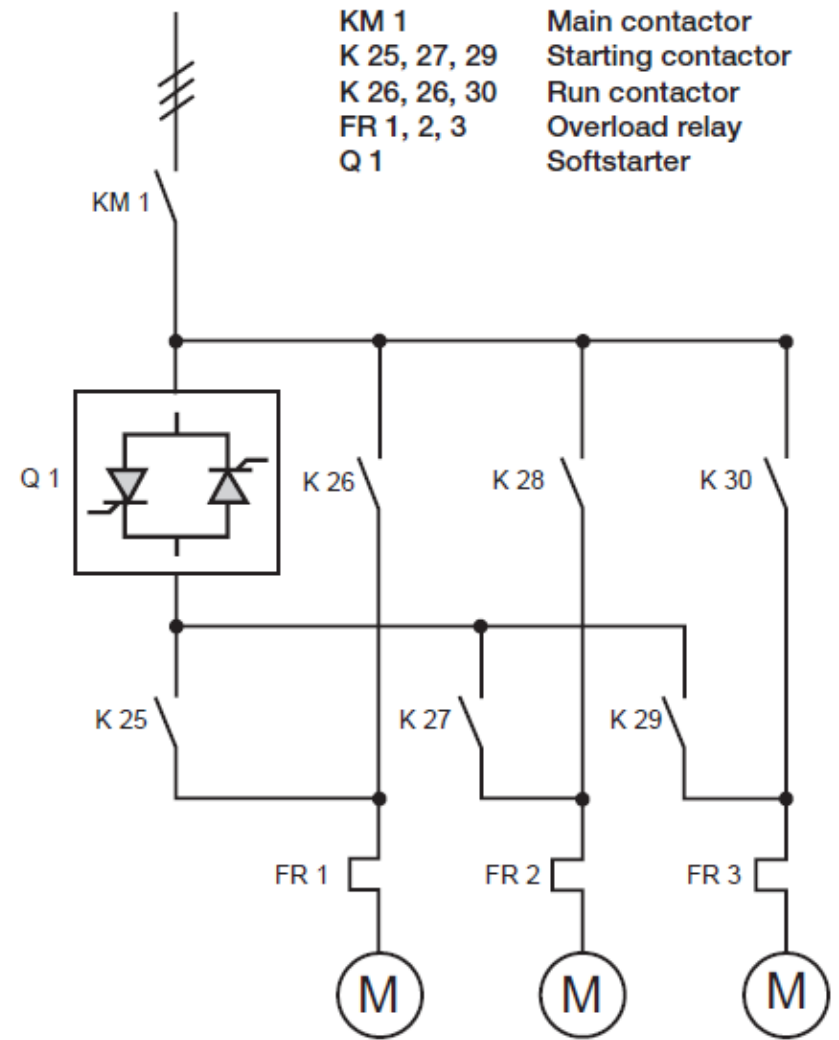
Unele soft-startere permit funcția de „Soft-stop” (utilă la pompe, benzi rulante, etc) – este o oprirea controlată a mașinii prin descreșterea tensiunii de alimentare și fixarea precisă a timpului de oprire.

Pornirea cu un singur soft-starter a mai multor motoare

Se poate folosi un singur dispozitiv pentru pornirea mai multor motoare.

Pornirea are loc *secvențial* – motoarele sunt pornite pe rând.

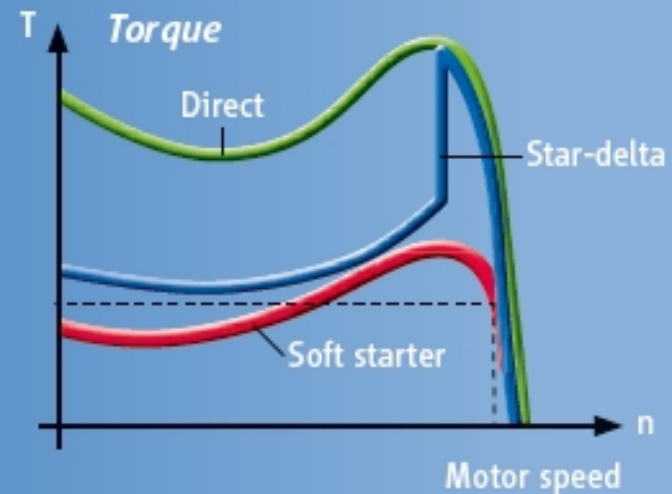
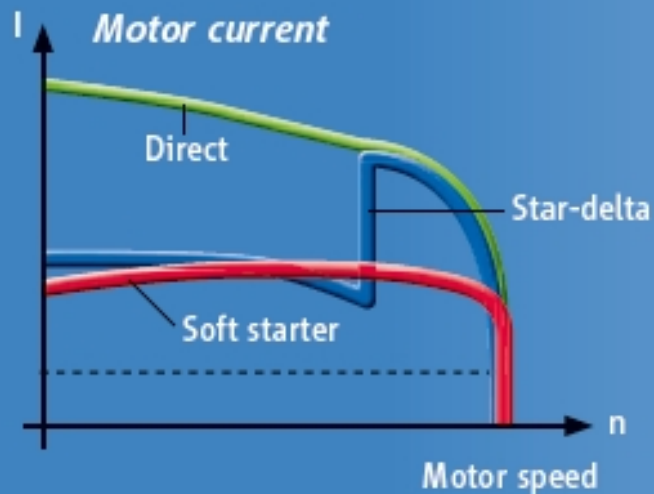
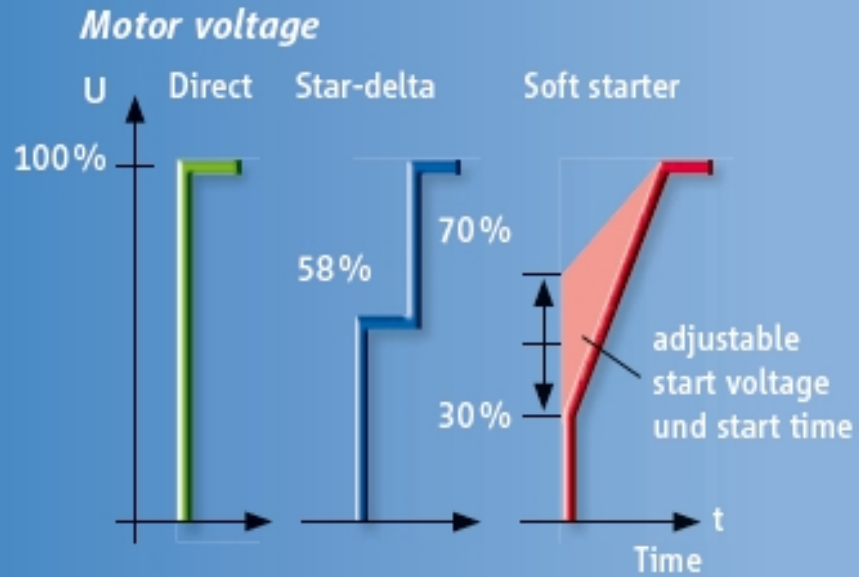
Soft-starterul trebuie dimensionat corespunzător motorului cu cel mai mare curent de pornire.



Sequential start of motors using a softstarter

Diagrams of starting

The graphics show the basic differences between direct, star-delta and soft starters with regard to motor voltage (U), motor current (I) and motor torque (T).



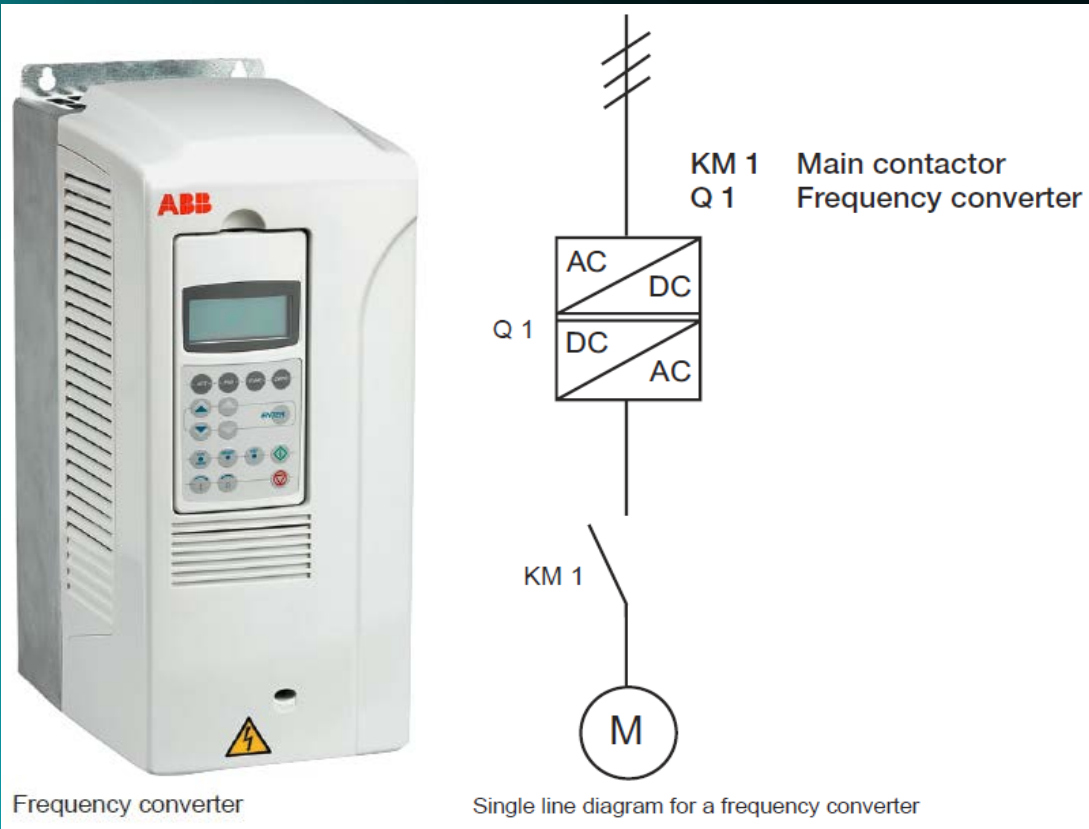


- 1. Pornire se face cu tensiune redusă *ajustabilă*.**
- 2. Se poate face controlul rampei de pornire. Oprirea poate fi de asemenea controlată.**
- 3. Se poate folosi un singur starter pentru pornirea mai multor motoare.**
- 4. Atenție la reducerea cuplului de pornire.**

Tabel comparativ cu parametri specifici de pornire

Tipul pornirii	Directă	Cu AT sau/și react. inser.	Cu com. Y-Δ	Cu soft-startere
Procent din I_{1N} la pornirea directă (în rețea)	100%	30-40% sau 64%	33%	Dependent de reglaje <90%
Procent din cuplul la pornirea directă	100%	30-40% sau 64%	33%	Depend. de reglaje <80%
Nr. de pași la pornire (modif. bruște de vit.)	1	4,3 sau 2	2	Continuu, fără pași
Nr. de conexiuni la motor	3	3	6	3
Supracurentul în rețea (aprox.)	$5I_{1N}$	1,5-2,1 sau $3,2 I_{1N}$	$1,65I_{1N}$	Depend. de regl. < $5I_{1N}$

V. Pornirea cu convertor de frecvență



Pornirea se face cu *tensiune și frecvență reduse.*


Este o metodă ce se folosește doar atunci când este necesar și reglaj de viteză.




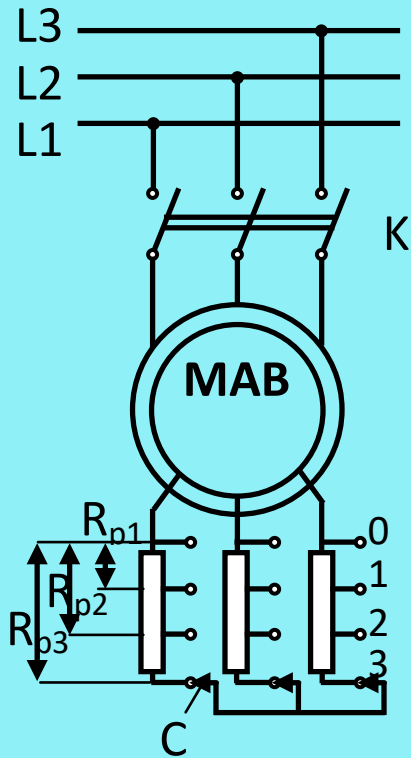
Beneficiază de funcția *soft-stop.*

Aceasta metodă se poate aplica NUMAI la motoarele asincrone cu rotor bobinat.

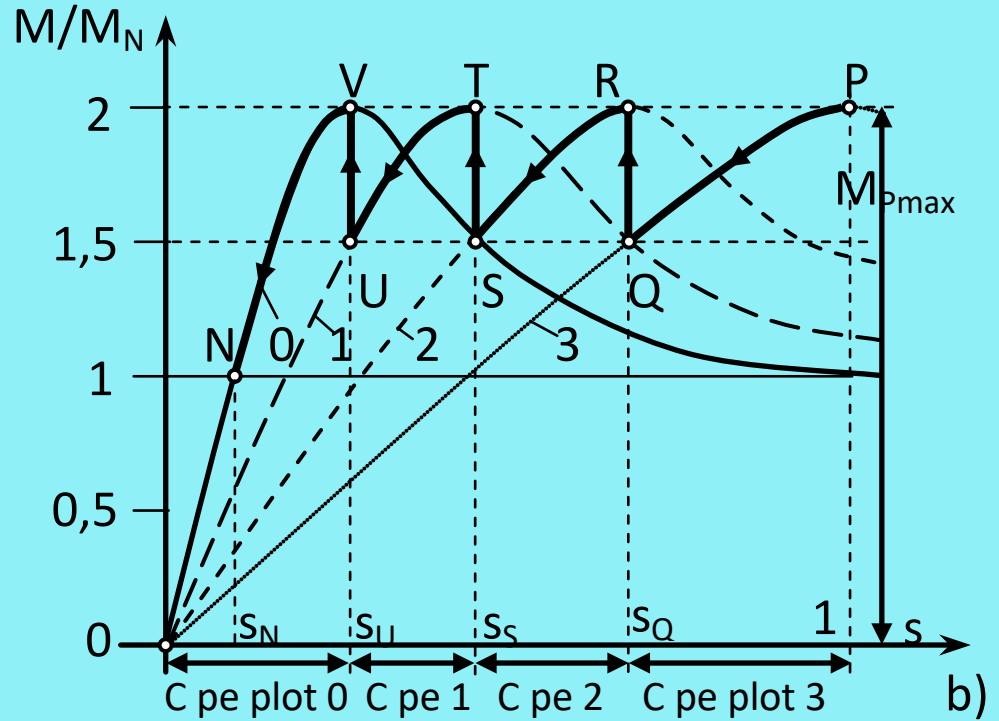
$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + c_1 \cdot \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2}} \quad M_p = \frac{3U_1^2 \cdot R'_2}{\Omega_1 \left[\left(R_1 + c_1 \cdot \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2 \right]}$$

 Din expresia curentului rotoric se poate observa că o creștere a rezistenței circuitului, R'_2 , determină scăderea valorii acestuia.

 Din expresia cuplului de pornire se observă că, o creștere a rezistenței circuitului rotoric duce la creșterea cuplului de pornire.



a)



b)

Procedura de pornire implică înscrierea în circuitul rotoric al mașinii a unei rezistențe variabile special dimensionată (de regulă este o rezistență cu ploturi).

Procedura de pornirea cu rezistențe înseriate în circuitul rotoric

1. Se poziționează rezistența de pornire pe valoarea sa maximă.
2. Motorul asincron pornește și evoluează pe porțiunea PQ.
3. În momentul atingerii unei valori de cuplu de 1,5 Mn se trece rezistența de pe valoarea R_{p3} pe valoarea R_{p2} . Punctul de funcționare sare în R și evoluează pe caracteristica 2.
4. Când ajunge în punctul S, se micșorează din nou rezistența de pornire, la valoarea R_{p1} , iar punctul de funcționare sare pe caracteristica 1, în T.
5. În mod similar, în punctul U se elimină și ultima treaptă de rezistență, iar mașina trece pe caracteristica naturală, 1, punctul de funcționare evoluând din V până în N, la valoarea nominală de funcționare.



1. Curentul de pornire se poate micșora cu mai mult de 30% față de pornirea directă.
2. Cuplul de pornire se poate aduce la valoarea cuplului maxim al motorului. Pentru aceasta $R_p = 5,1R_2'$
3. Se poate menține cuplul în anumite limite pe perioada pornirii (de ex. $1,5-2 I_n$).
4. Metoda se folosește pentru porniri în sarcină grea.



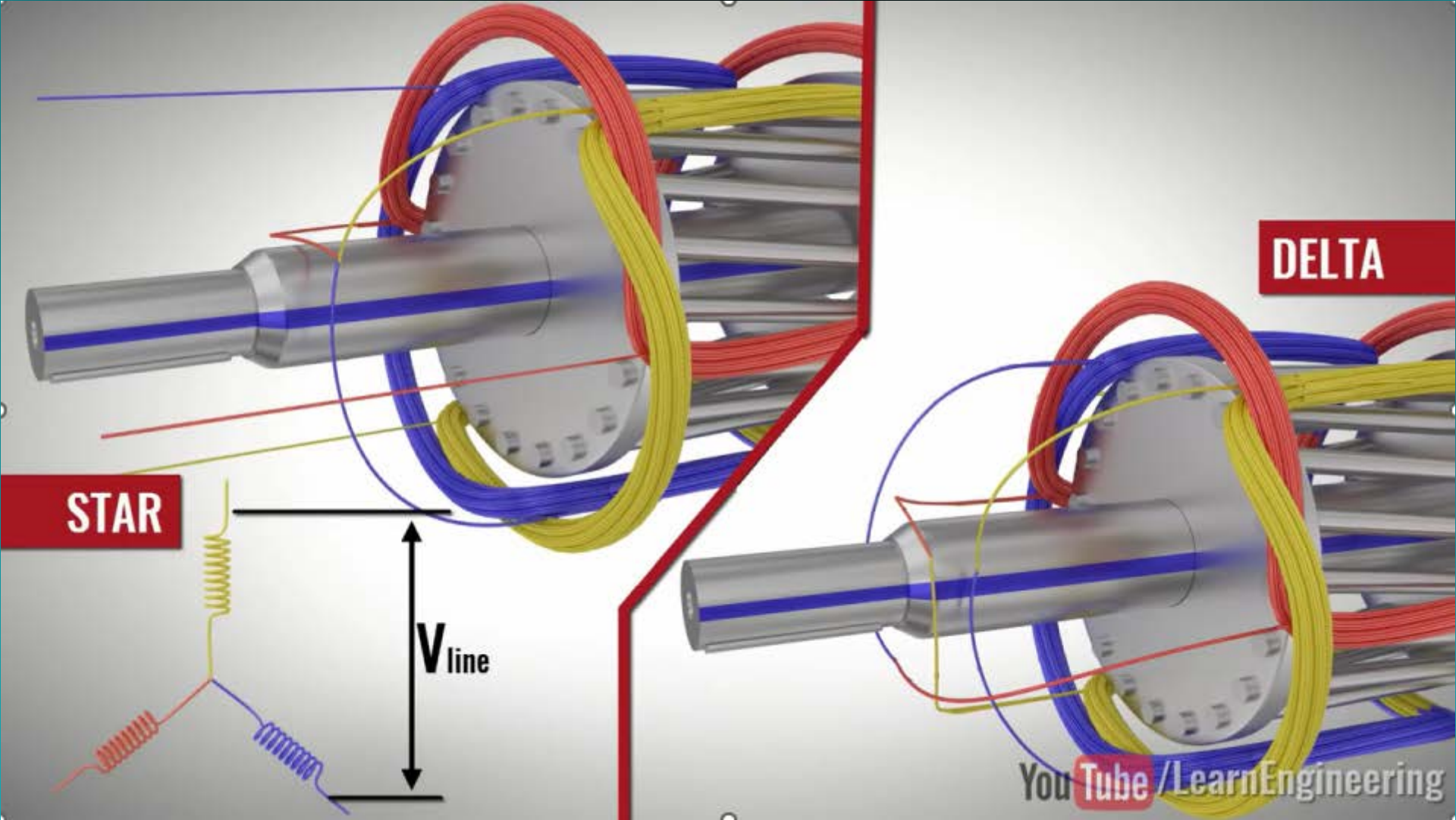
Pornire=regim tranzitoriu



Curent absorbit mare



Masuri de limitare



Curs 7



CUPRINS



1

Caracteristici de funcționare

2

Reglarea vitezei motoarelor asincrone

3

Inversarea sensului de rotație

4

Frânarea motoarelor asincrone

Caracteristici de funcționare

Caracteristicile de funcționare exprimă modul de comportare a unei mașini electrice atunci când *sarcina este variabilă*.

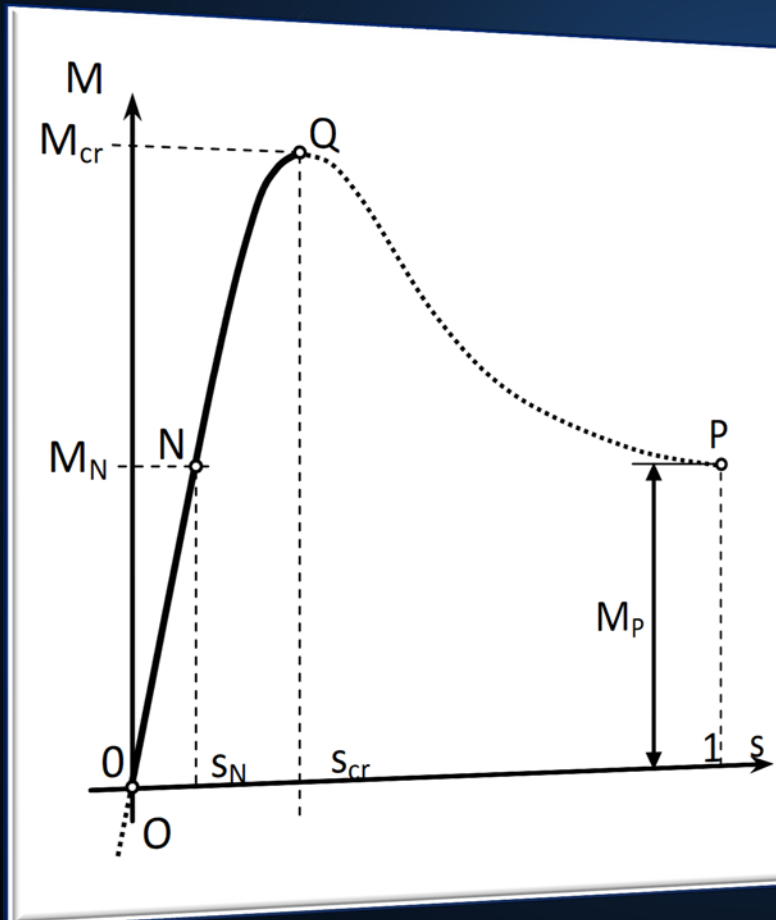
Dacă funcționarea are loc la mărimi nominale (tensiune, frecvență indicate pe plăcuța indicatoare), atunci caracteristicile obținute se numesc „naturale”.

În cazul în care parametrii menționați sunt modificați prin intermediul unor dispozitive exterioare, caracteristicile rezultate se numesc „artificiale”.

Mărimi variabile cu alunecarea

1

Caracteristica $M=f(s)$ – reprezintă variația cuplului electromagnetic cu alunecarea



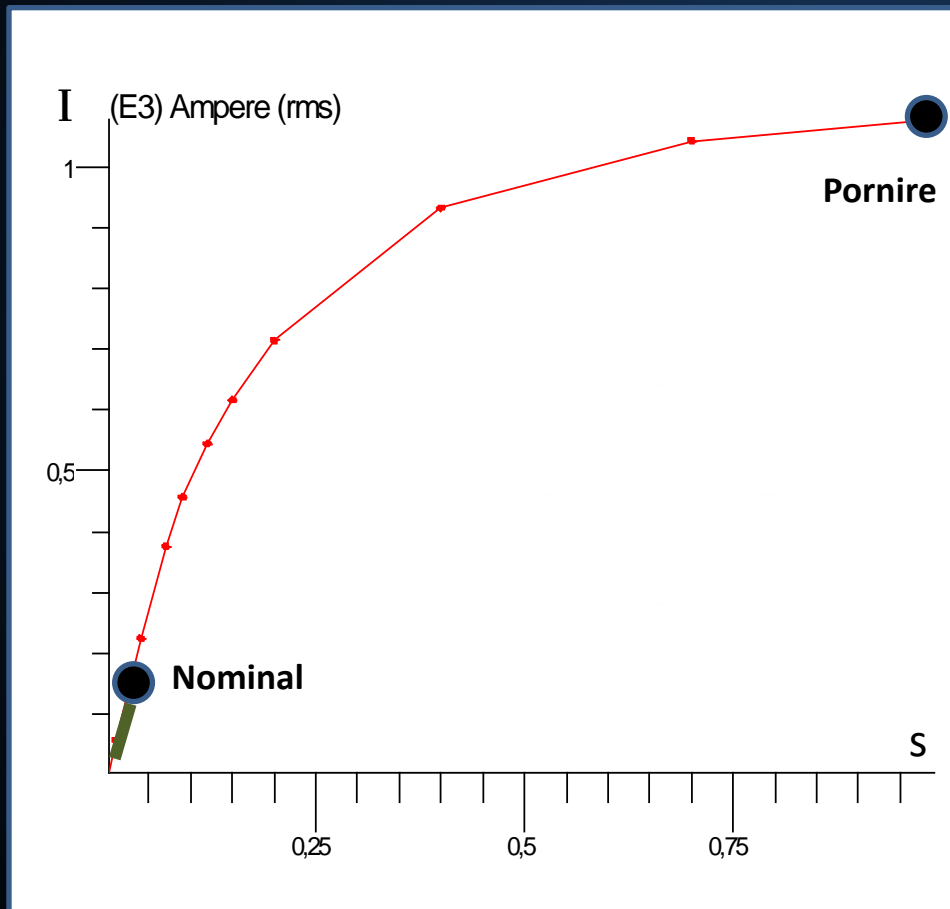
Această caracteristică este specifică mașinii asincrone.

În regim de motor, caracteristica este plasată în cadranul I, adică în zona de cuplu dezvoltat „pozitiv” și alunecare cuprinsă în intervalul $(0,1)$.

Punctele caracteristice și de interes sunt: P (pornire), Q (valoare maximă), N (valoare nominală).

2

Caracteristica curentului, $I=f(s)$ – exprimă variația curentului (statoric sau rotoric) odată cu alunecarea

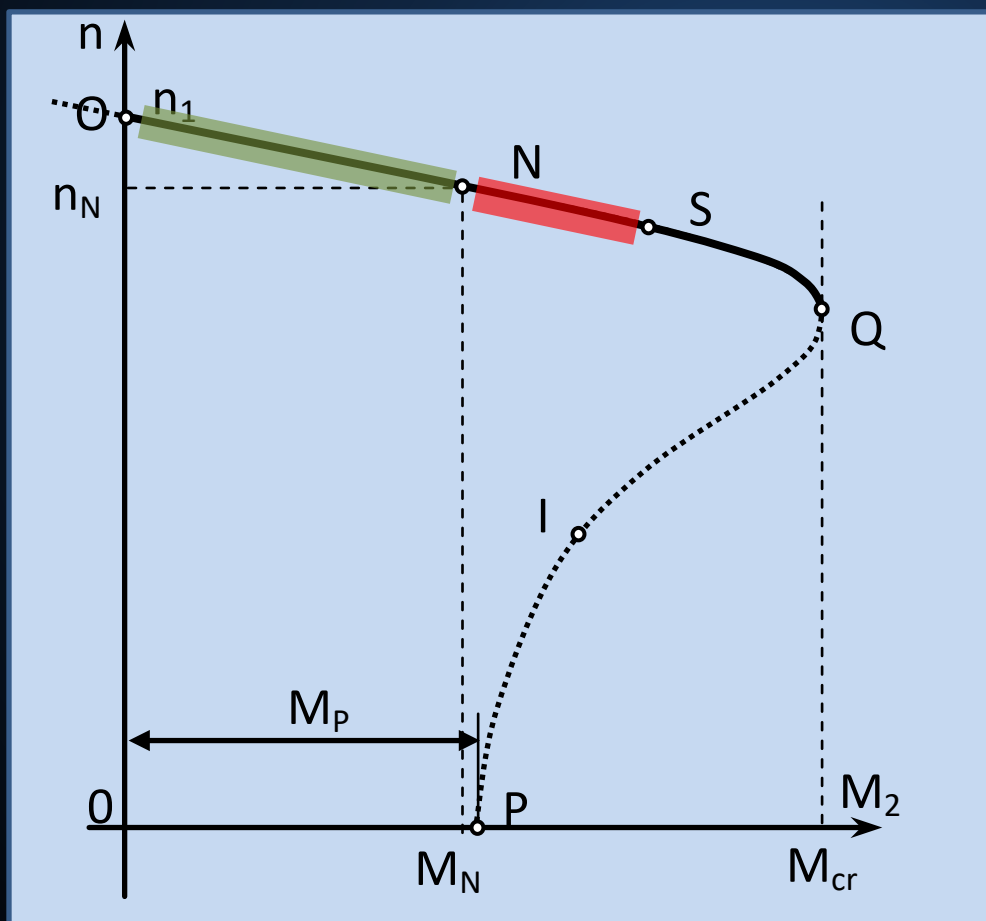


Zona dintre punctul de pornire și cel de funcționare nominală corespunde regimului tranzitoriu de pornire.

Funcționarea în sarcină are loc pe zona verde, adică între nominal și gol.

3

Caracteristica mecanică $n=f(M_2)$ – reprezintă variația vitezei motorului asincron datorită variației cuplului de sarcină



Creșterea cuplului de sarcină duce la SCĂDEREA vitezei motorului asincron.

Caracteristica mecanică este similară celei a motorului de c.c. cu excitație separată (derivație), adică o caracteristica mecanică „rigidă”.

Caracteristica mecanică

Punctele specifice caracteristicii mecanice sunt:

- *Punctul P* – punctul de pornire caracterizat de valoarea cuplului de pornire, M_p (cuplul pe care mașina îl poate dezvolta la pornire).
- *Punctul Q* – punctul de cuplu maxim, M_{max} , și alunecare critică, s_{cr}
- *Punctul N* – punctul de funcționare nominală caracterizat de cuplul nominal, M_N , și viteza nominală, n_N . Aceste valori sunt indicate pe plăcuța indicatoare a mașinii.
- *Punctul S* – punct situat între N și Q, este punctul de funcționare la suprasarcină. Funcționarea în acest punct este limitată în timp de regimul termic (încălzirea mașinii).

Pentru sarcini mai mici decât cea nominală, punctul de funcționare se fixează în zona verde a caracteristicii. Aceasta reprezintă, în fapt, zona de funcționare uzuală a motorului asincron. În zona roșie, funcționarea este limitată în timp.

Mărimi variabile cu puterea utilă, P_2

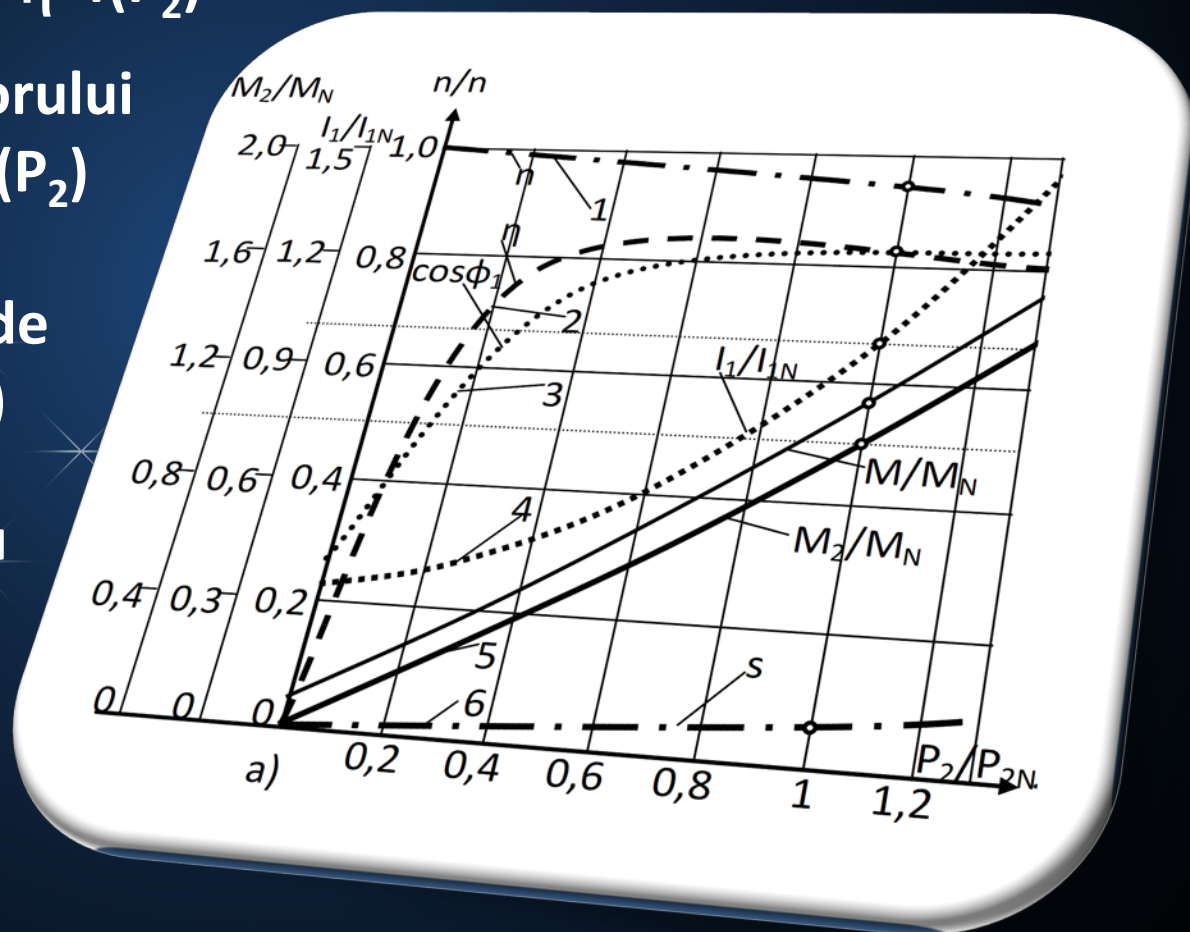
4. Caracteristica de randament(2), $\eta=f(P_2)$

5. Caracteristica factorului de putere(3), $\cos\varphi=f(P_2)$

6. Caracteristica de curent(4), $I_1=f(P_2)$

7. Caracteristici de cuplu

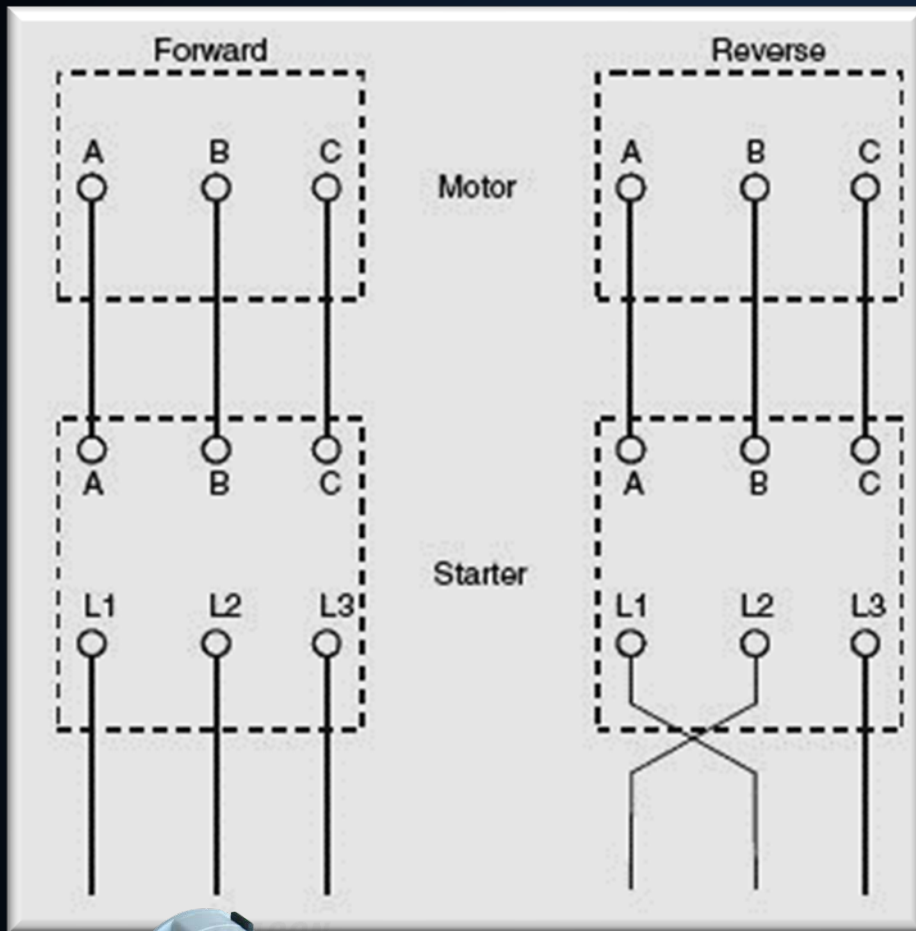
8. Caracteristica de alunecare (6)



Caracteristicile de randament și factor de putere pun în evidență faptul că valorile lor cresc către valorile maxime în preajma punctului de funcționare nominală. Cu alte cuvinte, funcționarea la gol sau la sarcini reduse duce la randamente și factor de putere reduse.

Evident, atât curentul (prin înfășurarea statorică sau rotorică) cât și cuplul electromagnetic dezvoltat cresc odată cu puterea utilă P_2 .

Inversarea sensului de rotație



Inversarea sensului de rotație la motorul asincron trifazat se obține prin inversarea sensului de rotație a câmpului magnetic învârtitor produs de înfășurarea statorică.

Pentru aceasta este suficientă inversarea alimentării a două dintre fazele înfășurării statorice. În exemplul din figură, se inversează alimentarea fazelor A și B.

De regulă, există comutatoare speciale care au poziția de zero centrală, iar pozițiile 1 și 2 corespund celor două sensuri inverse de rotație.



De regulă, inversarea sensului de rotație se face în stare de repaus a motorului. Dacă inversarea fazelor se face în timpul funcționării, mașina intră în regim de frânare bruscă.

La alimentarea în succesiune „directă” a înfășurării trifazate statorice, sistemul de curenți este :

$$\begin{cases} i_{AX} = \sqrt{2}I \sin \omega t \\ i_{BY} = \sqrt{2}I \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ i_{CZ} = \sqrt{2}I \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \end{cases}$$

Câmpul rezultat și viteza de sincronism au expresiile:

$$B_{rez} = \frac{3}{2} B_{max} \cdot \sin(\omega t - p\alpha) \longrightarrow \Omega_1 = +\frac{\omega}{p}$$

La alimentarea în succesiune „inversă” se modifică defazajul a doi dintre curenți:

$$\begin{cases} i_{AX} = \sqrt{2}I \sin \omega t \\ i_{BY} = \sqrt{2}I \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \\ i_{CZ} = \sqrt{2}I \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \end{cases}$$

Se modifică expresia câmpului rezultat iar viteza de sincronism devine „negativă”, adică își schimbă sensul de rotație:

$$B_{rez} = \frac{3}{2} B_{max} \cdot \sin(\omega t + p\alpha) \longrightarrow \Omega_1 = -\frac{\omega}{p}$$

Reglarea vitezei motorului asincron

Reglarea vitezei presupune modificarea intenționată a unor parametri nominali, ceea ce duce la modificarea vitezei rotorului.


Această operație nu trebuie confundată cu modificarea vitezei rotorului datorită variației sarcinii.

Caracteristicile obținute sunt caracteristici „artificiale”.

Reglarea turației

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}$$

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$


$$n = \frac{60 \cdot f_1}{p} \cdot (1 - s)$$

Reglarea turației



Modificarea frecvenței tensiunii de alimentare

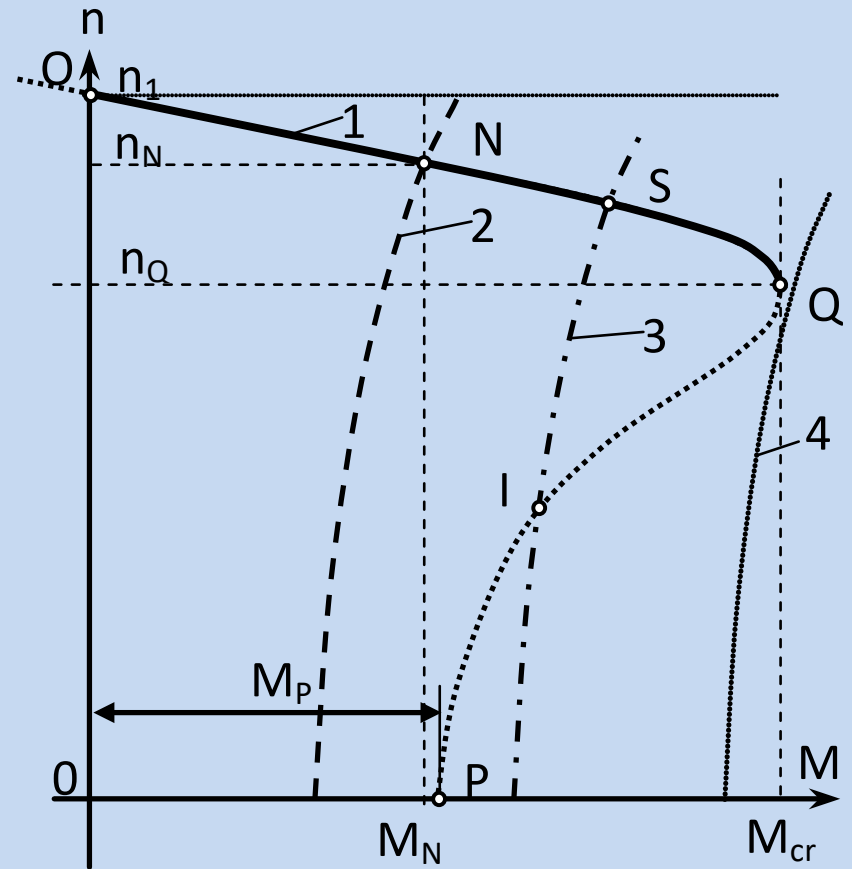
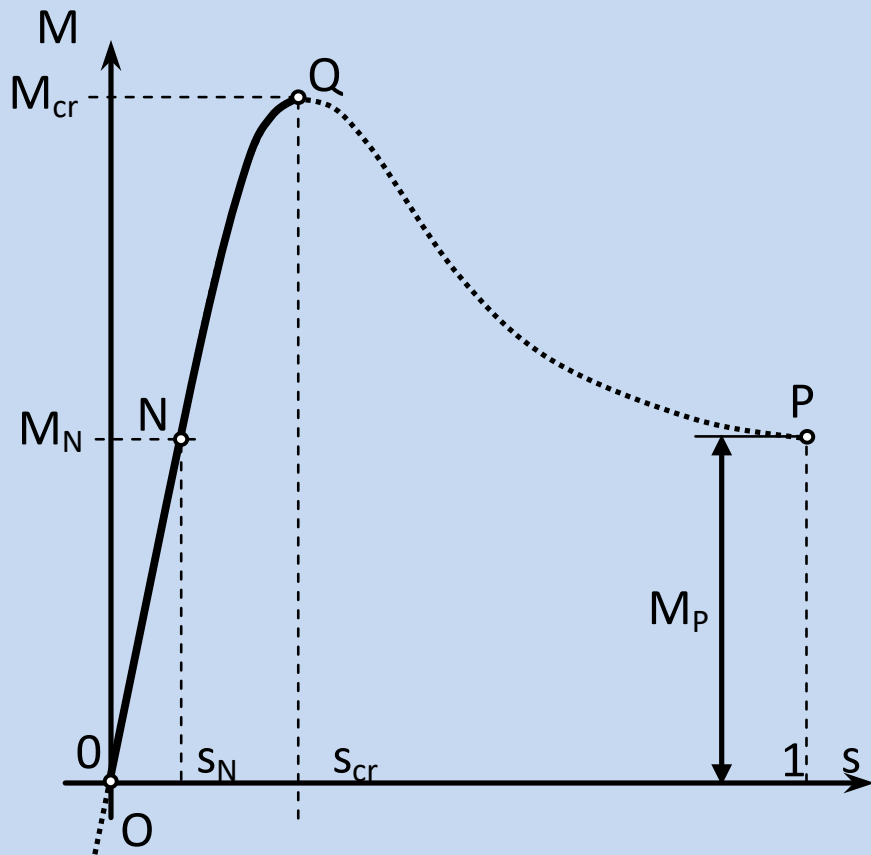


Modificarea numărului de poli ai mașinii



Modificarea alunecării

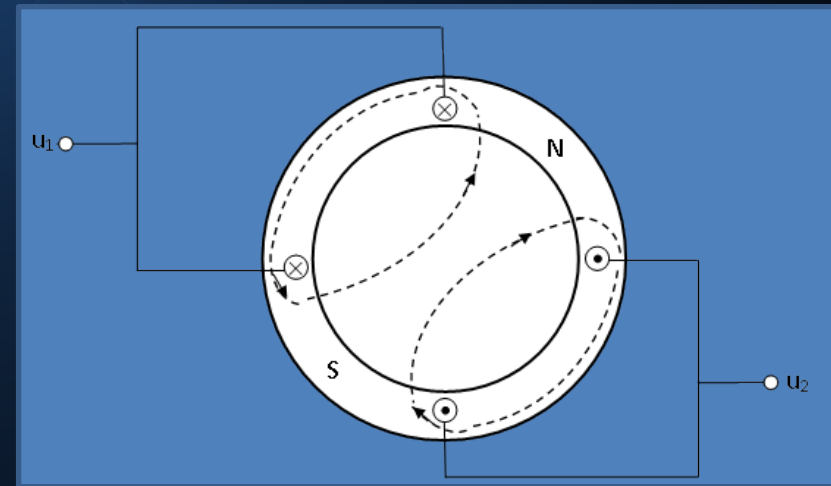
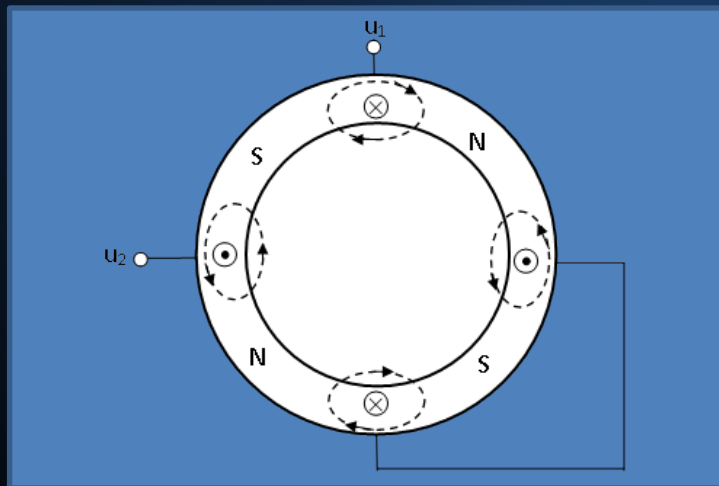
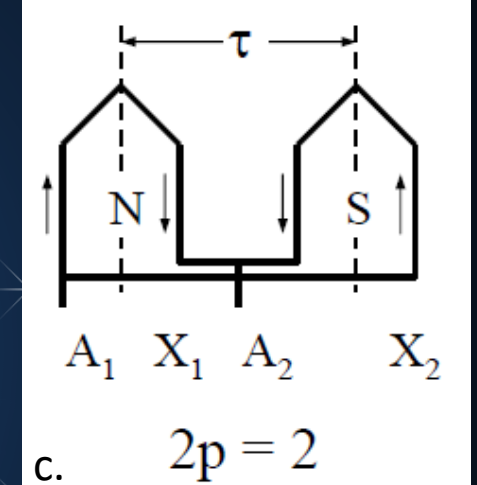
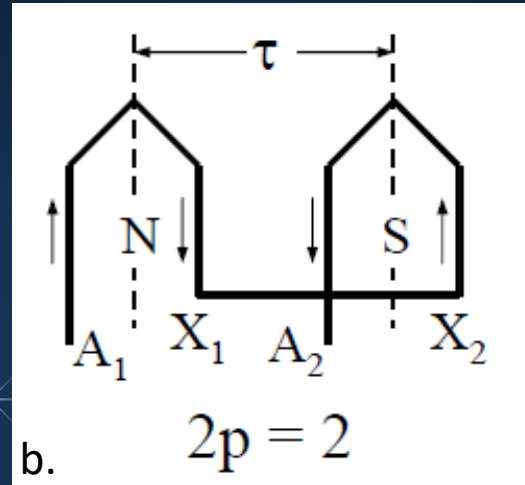
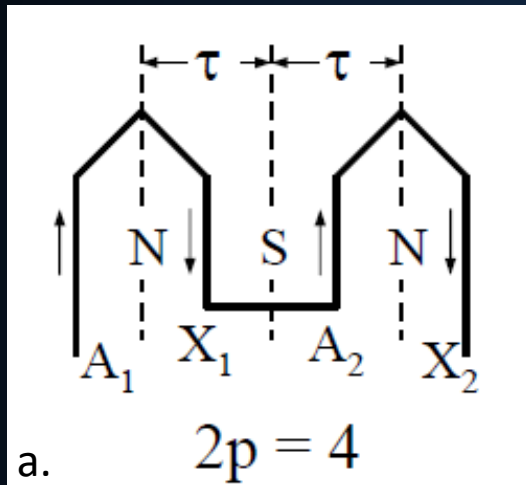
Caracteristica mecanică



Caracteristica 1 – reprezintă variația vitezei odată cu variația cuplului rezistent la arbore. Este caracteristica mecanică. Este ușor căzătoare.

Caracteristicile 2, 3 și 4 – reprezintă variația cuplului rezistent la arbore. Pentru caracteristica 2, intersecția cu caracteristica mecanică a motorului asincron determină funcționarea în punctul N, punctul nominal. Pentru cupluri de sarcină mai mari, punctul de funcționare se poate stabili în S (funcționare la suprasarcină pe perioadă limitată de timp). Caracteristica de cuplu limită la care mașina asincronă poate funcționa este caracteristica 4 (funcționarea are loc în punctul de cuplu maxim).

Reglarea vitezei prin schimbarea numărului de poli - *principiu*



Această metodă este posibilă întrucât polii mașinii asincrone sunt determinați de modul prin care curentul statoric parcurge înfășurarea.

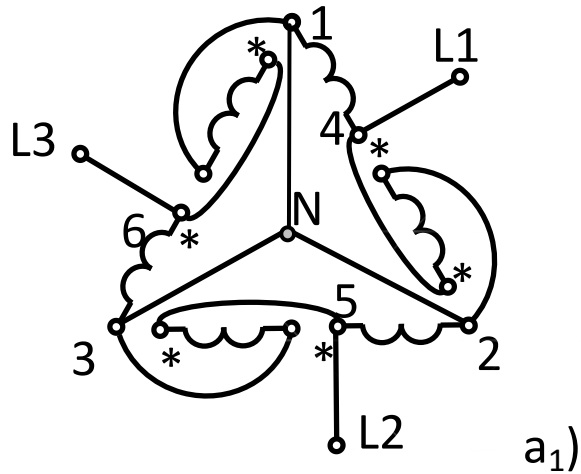
Pentru a putea schimba numărul de poli este necesar ca fiecare înfășurare de fază să conțină un număr par de bobine sau grupe de bobine și să fie posibil accesul la punctul median al acestor înfășurări.



Prin schimbarea sensului curentului prin jumătate de fază (fie prin conectarea „serie-invers” – fig. b, fie prin conectarea în paralel – fig. c), se înjumătățește numărul de poli ai mașinii și deci turația de sincronism.

In plus, se poate schimba tipul de conexiune din Y în D sau invers .

Reglarea vitezei prin schimbarea numarului de poli – tipuri de *conexiuni*



a₁₎

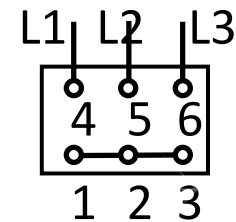
YY

(dublă-stea)

2p

Viteza mica

Conexiuni



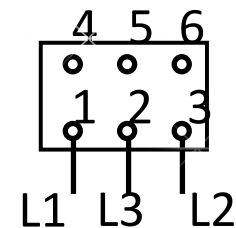
D

(triunghi)

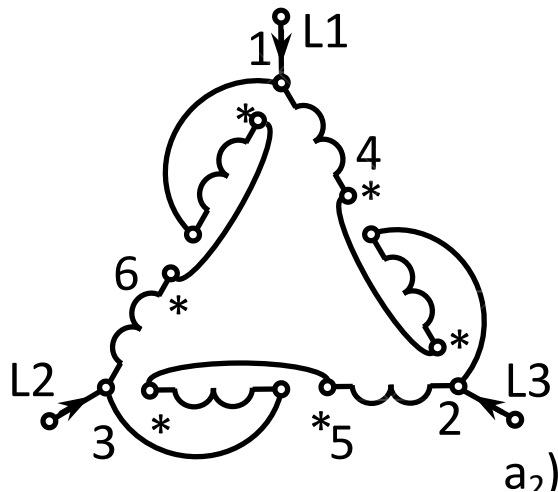
p

Viteza mare

Conexiuni

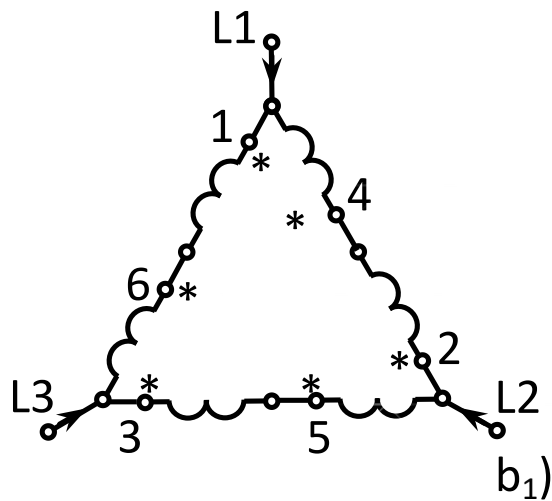


la putere constantă



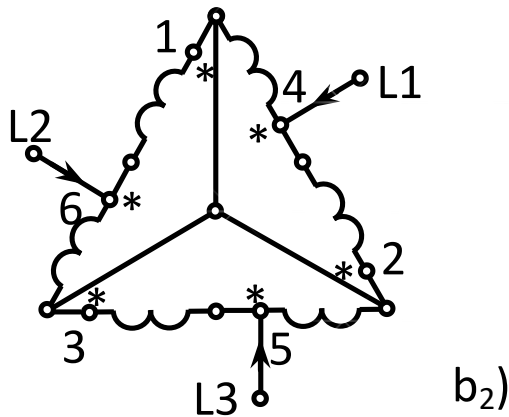
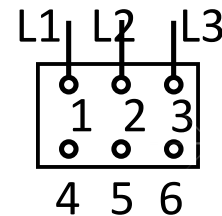
a₂₎

Reglarea vitezei prin schimbarea numarului de poli - *conexiuni*



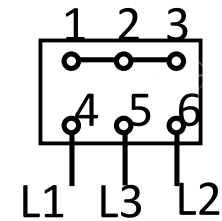
D
(triunghi)
2p
Viteza mica

Conexiuni



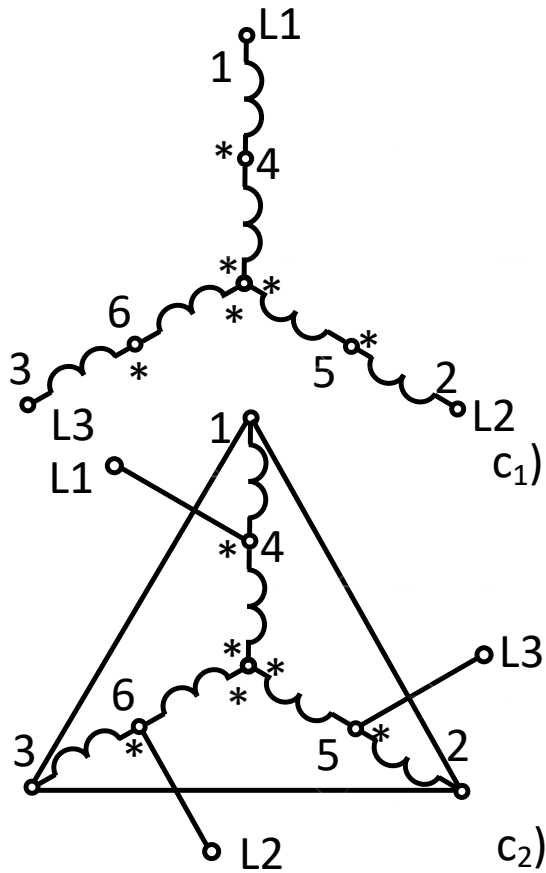
YY
(dublă-steră)
p
Viteza mare

Conexiuni



la cuplu
constant

Reglarea vitezei prin schimbarea numarului de poli - *conexiuni*



Y

(stea)

2p

Viteza mica

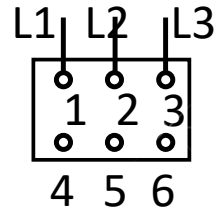
YY

(dublă stea)

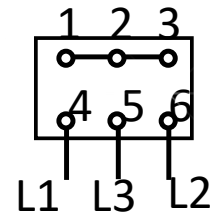
p

Viteza mare

Conexiuni



Conexiuni



la cuplu
variabil

Reglarea vitezei prin schimbarea numărului de poli - *conexiuni*

1. Conexiune YY/ Δ – funcționare la putere constanta

$$2p \quad P_2 = \sqrt{3}U(2I)\eta_2 \cos \varphi_2$$

$$p \quad P_1 = 3UI\eta_1 \cos \varphi_1$$

$$r_P = \frac{P_2}{P_1} = 1,15 \left(\frac{\eta_2 \cos \varphi_2}{\eta_1 \cos \varphi_1} \right)$$

$$r_M = \left(\frac{P_2}{\Omega_2} \right) / \left(\frac{P_1}{\Omega_1} \right) = \frac{P_2}{P_1} \frac{\Omega_1}{\Omega_2} = 2,3 \left(\frac{\eta_2 \cos \varphi_2}{\eta_1 \cos \varphi_1} \right)$$

Reglarea vitezei prin schimbarea numărului de poli - *conexiuni*

2. Conexiune Δ/YY – funcționare la cuplu constant

2p

$$P_2 = 3UI\eta_2 \cos \varphi_2$$

p

$$P_1 = \sqrt{3}U(2I)\eta_1 \cos \varphi_1$$

$$r_P = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{\eta_2 \cos \varphi_2}{\eta_1 \cos \varphi_1} \right)$$

$$r_M = \left(\frac{P_2}{\Omega_2} \right) / \left(\frac{P_1}{\Omega_1} \right) = \frac{P_2}{P_1} \frac{\Omega_1}{\Omega_2} = 1,73 \left(\frac{\eta_2 \cos \varphi_2}{\eta_1 \cos \varphi_1} \right) = 1 \div 1,4$$

Reglarea vitezei prin schimbarea numărului de poli - *conexiuni*

3. Conexiune Y/YY – funcționare la cuplu variabil

2p

$$P_2 = \sqrt{3}UI\eta_2\cos\varphi_2$$

p

$$P_1 = \sqrt{3}U(2I)\eta_1\cos\varphi_1$$

$$r_P = \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_2 \cos \varphi_2}{\eta_1 \cos \varphi_1} \right)$$

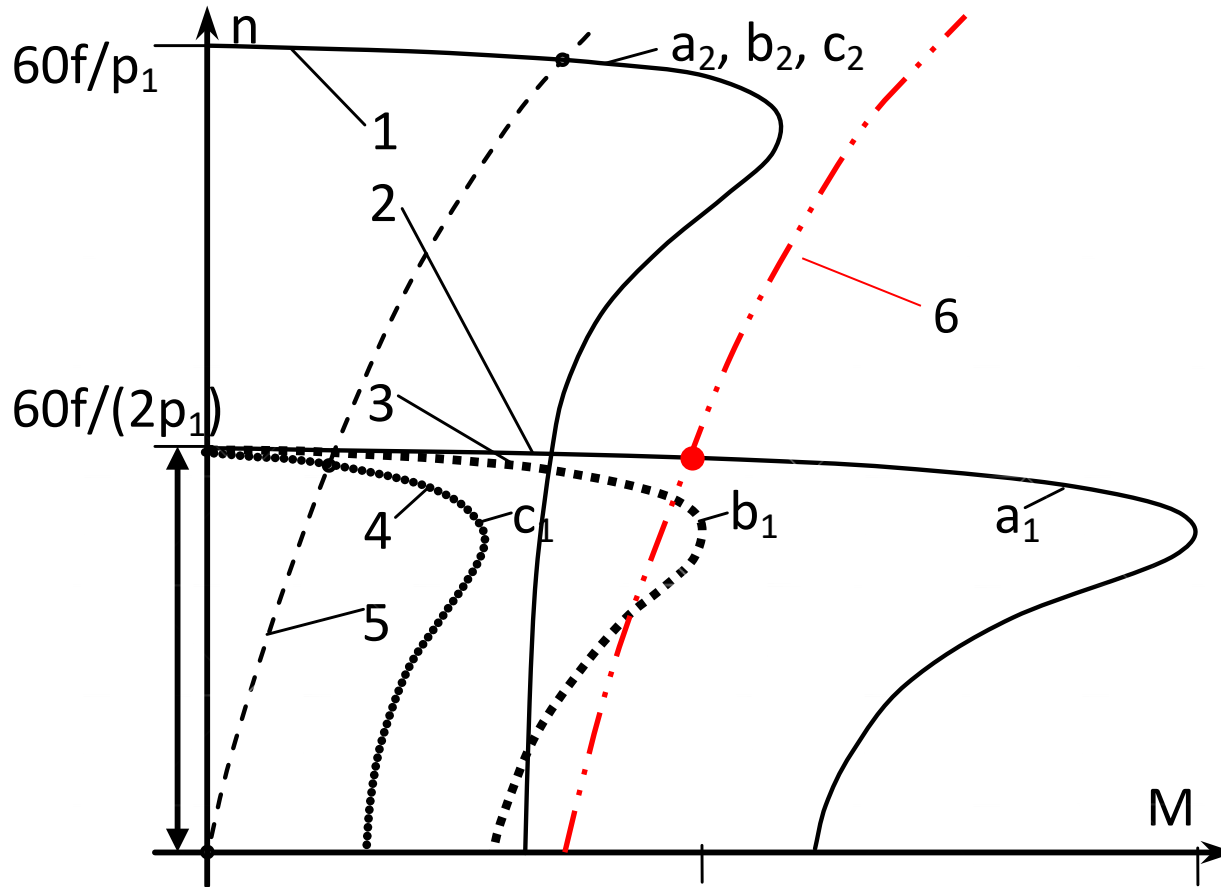
$$r_M = \frac{\eta_2 \cos \varphi_2}{\eta_1 \cos \varphi_1} \in (0,6 \div 0,8)$$

Reglarea vitezei prin schimbarea numărului de poli - *conexiuni*

Schema	Raportul fluxurilor: Φ_2/Φ_1	Raportul inducțiilor în jug: B_{j2}/B_{j1}	Raportul inducțiilor în întrefier $B_{\delta 2}/B_{\delta 1}$
YY/ Δ	1/1,05	1/1,05	1/0,52
Δ /YY	1/1,41	1/1,41	1/0,71
Y/YY	1/2,42	1/2,42	1/1,21

Modificarea numărului de poli aduce modificări însemnate asupra valorii fluxului și a inducțiilor în jug și întrefier. Drept urmare, performanțele mașinii asincrone NU sunt identice pentru cele două turații.

Reglarea vitezei prin schimbarea numărului de poli – *caracteristica mecanică*



a_1 – conexiunea YY, funcționare la putere constantă

b_1 – conexiunea Δ , funcționare la cuplu constant

c_1 – conexiunea Y, funcționare la cuplu variabil

Caracteristicile mecanice (1 și 2), pentru funcționarea la cele două viteze, pun în evidență următorul fapt semnificativ: pot exista situații în care mașina asincronă să funcționeze normal la turație mică dar să nu poată dezvolta același cuplu la turație mare (vezi curba de cuplu 6 care are punct de intersecție cu caracteristica a_1 dar nu se intersectează cu caracteristica a_2).

De regulă, datorită observației anterioare, la pornire se preferă conectarea mai întâi pe conexiunea cu număr mare de poli (turație mică) și apoi trecerea la număr mic de poli (turație mare).



A nu se confunda reglarea vitezei prin schimbarea numărului de poli cu *pornirea stea-triunghi!!!*

Reglarea vitezei prin schimbarea numărului de poli

1. Se aplică NUMAI la motoarele cu rotor în scurtcircuit

2. Constă în schimbarea sensului curentului prin jumătate din fiecare fază

3. Reglarea turației se face ÎN TREPTE

4. Mașinile au DOUĂ sau PATRU turații de funcționare

5. Raportul turațiilor este de regulă $1/2$ dar există soluții și pentru $2/3$ sau $3/4$



Reglarea vitezei prin modificarea frecvenței tensiunii de alimentare

Modificarea frecvenței aduce schimbări MAJORE în valorile parametrilor mașinii asincrone

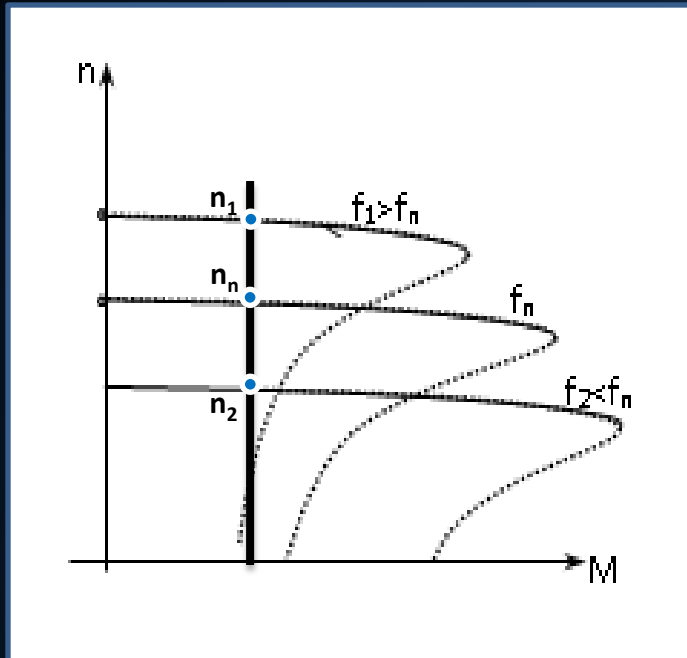
$$\left. \begin{aligned} \underline{E}_1 &= -j\omega_1 \cdot k_{w1} \cdot w_1 \cdot \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} \\ \underline{U}_1 &= R_1 \underline{I}_1 + jX_{\sigma 1} \cdot \underline{I}_1 - \underline{E}_1 \end{aligned} \right\} \longrightarrow \Psi \approx \frac{U_1}{\omega_1} \rightarrow \frac{U_1}{f_1}$$

$$M_{emax} = \pm \frac{3U_1^2 \cdot p}{2c_1 \cdot \omega_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2 \pm R_1}} = M_{cr} \quad \text{Se modifică}$$

$$s_{cr} = \pm \frac{c_1 \cdot R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2}} \quad \text{Se modifică}$$



Reglarea vitezei prin modificarea frecvenței tensiunii de alimentare determină modificarea fluxului magnetic în mașină

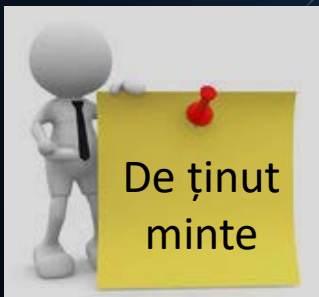


I. La scăderea frecvenței:

- CREȘTE cuplul critic 😊
- CREȘTE capacitatea de suprasarcină 😊
- CREȘTE fluxul magnetic ceea ce duce la saturarea mai rapidă a mașinii 😞

II. La creșterea frecvenței:

- SCADE cuplul mașinii 😞
- SCADE cuplul critic 😞
- SCADE capacitatea de suprasarcină 😞
- SCADE fluxul magnetic ceea ce duce la funcționare în zona nesaturată 😊



Ca metodă de reglare a vitezei, modificarea frecvenței tensiunii de alimentare permite un reglaj larg de viteză (vezi punctele de funcționare n_1 , n_n și n_2) atât *sub* valoarea nominală cât și *peste* valoarea nominală.

Reglarea vitezei prin modificarea tensiunii de alimentare

$$\Psi \approx \frac{U_1}{\omega_1} \rightarrow \frac{U_1}{f_1}$$

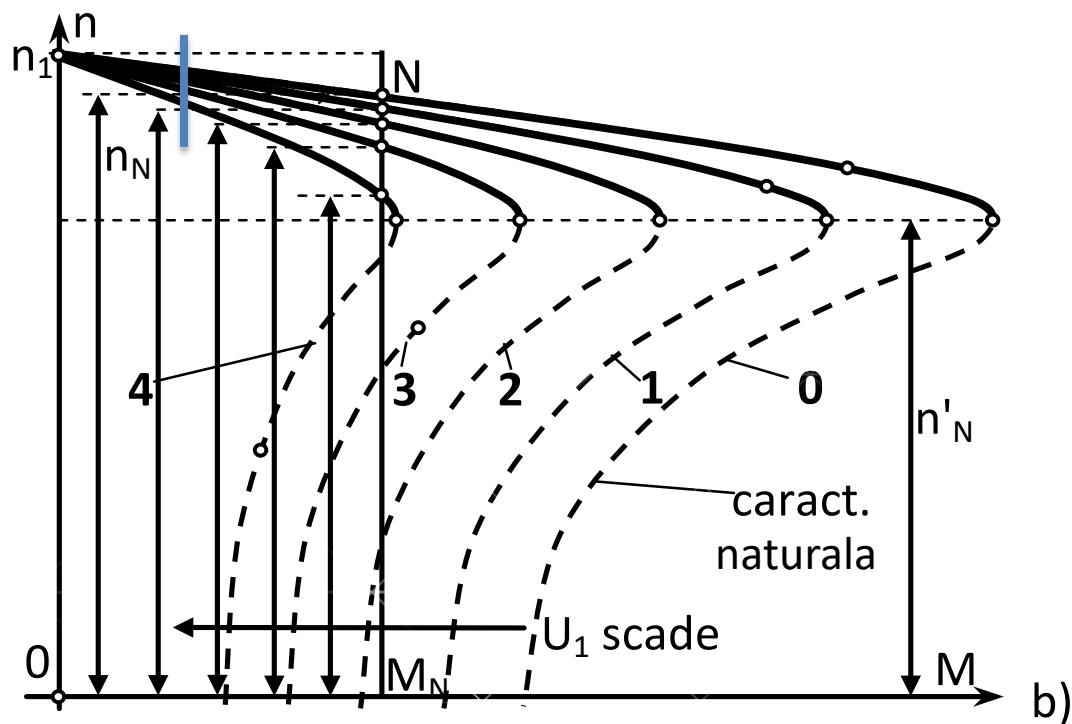
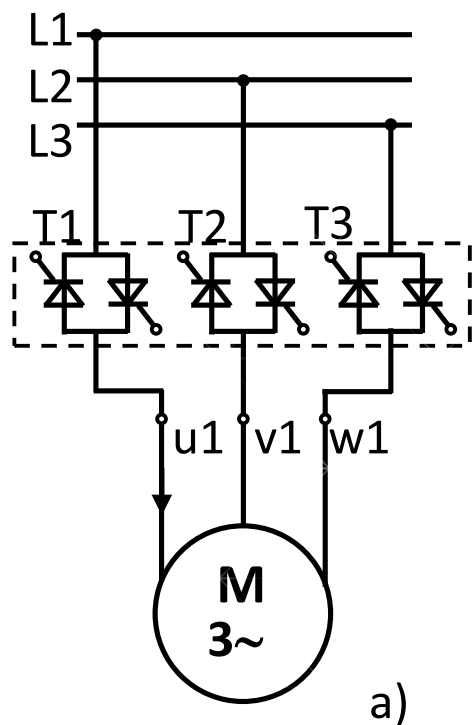
$$M_e = \frac{3U_1^2 \cdot p}{2\pi f_1} \cdot \frac{\frac{R'_2}{s}}{\left[\left(R_1 + c_1 \cdot \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2 \right]} \quad \text{Se modifică}$$

$$M_{emax} = \pm \frac{3U_1^2 \cdot p}{2c_1 \cdot \omega_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2 \pm R_1}} = M_{cr} \quad \text{Se modifică}$$

$$M_p = \frac{3U_1^2 \cdot R'_2}{\Omega_1 \left[\left(R_1 + c_1 \cdot \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2 \right]} \quad \text{Se modifică}$$

$$s_{cr} = \pm \frac{c_1 \cdot R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2}} \quad \text{NU se modifică}$$

Reglarea vitezei prin modificarea tensiunii de alimentare



- a) Schemă de alimentare cu tensiune variabilă (variație electronică a tensiunii);
b) caracteristici mecanice pentru diverse tensiuni de alimentare.

Modificarea tensiunii de alimentare se poate face numai descrescător față de valoarea nominală.

Se obțin caracteristici artificiale (1-4) la care se modifică atât valoarea cuplului maxim cât și a cuplului de pornire.

Este necesar un aparat scump (de regulă variator de tensiune alternativă cu semiconductoare) care, prin performanțele obținute, nu își justifică utilizarea.

Reglarea vitezei prin modificarea tensiunii de alimentare

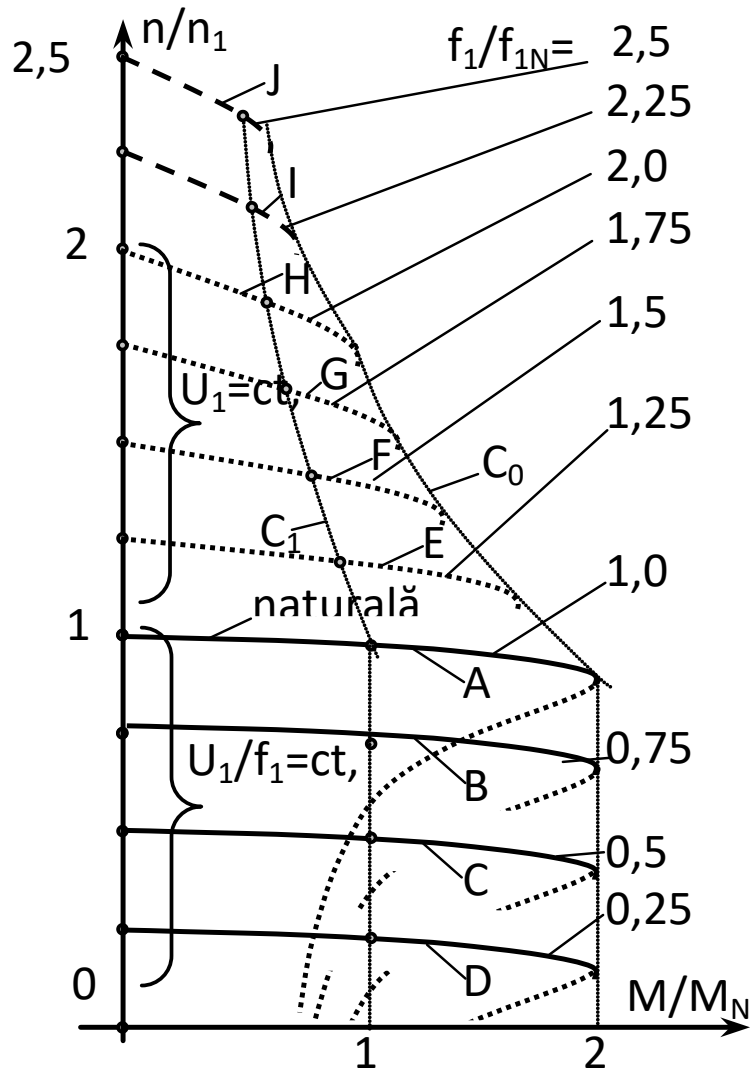
1. Metoda ineficientă - Reglaj de turație în limite mici și numai pentru valori sub viteza nominală

2. Scade capacitatea de suprasarcină a motorului

3. La sarcini mici reglajul de viteză este aproape insesizabil



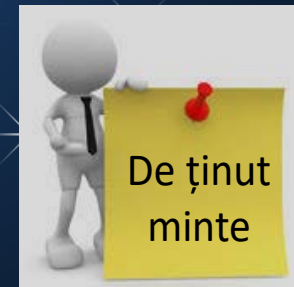
Reglarea vitezei prin modificarea frecvenței și tensiunii de alimentare



1. Reglaj de turație în limite foarte largi (inclusiv peste valoarea de sincronism)

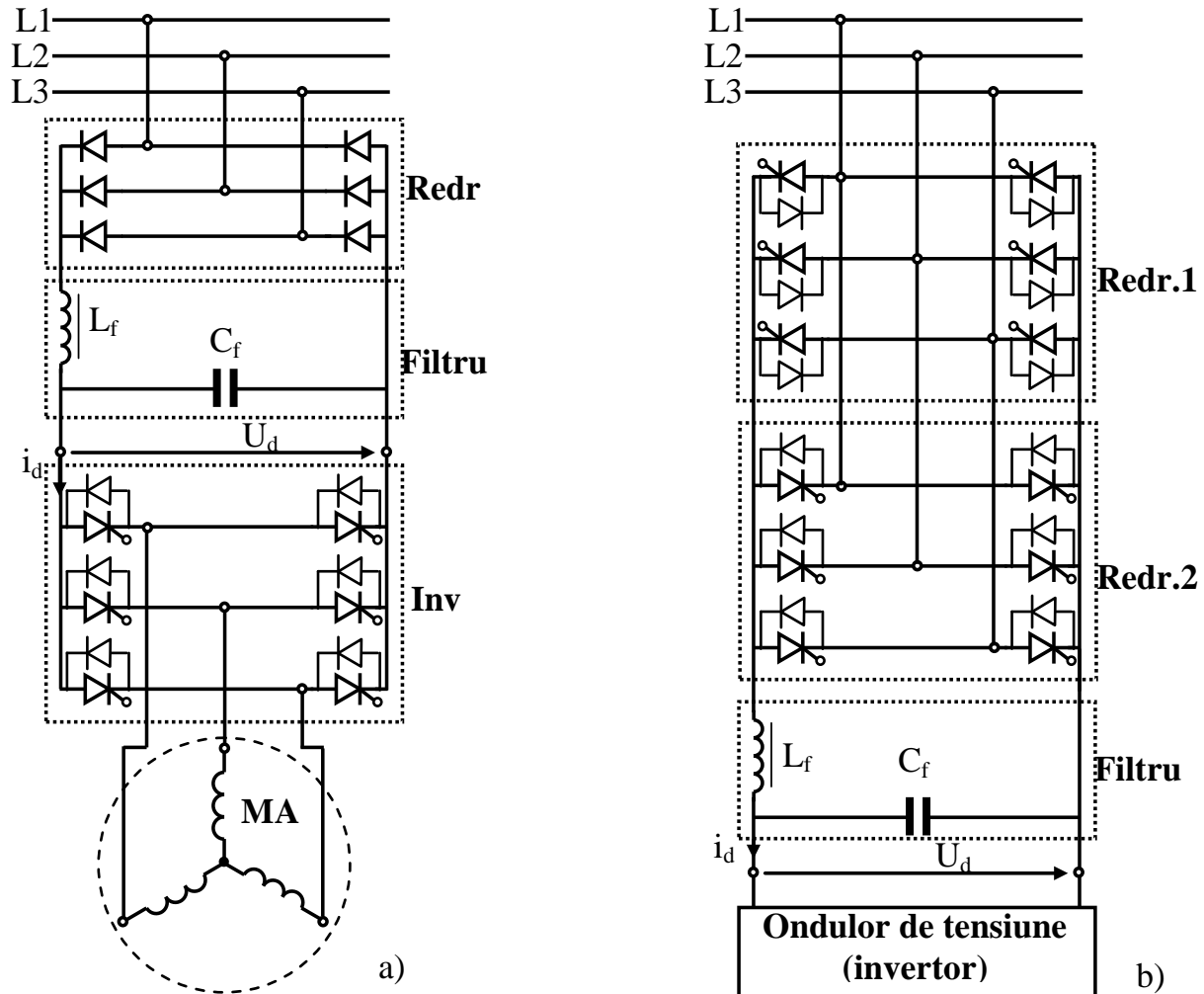
2. Raport $U/f = \text{const.}$ până la frecvența nominală

3. Peste frecvența nominală, tensiunea U_1 rămâne constantă



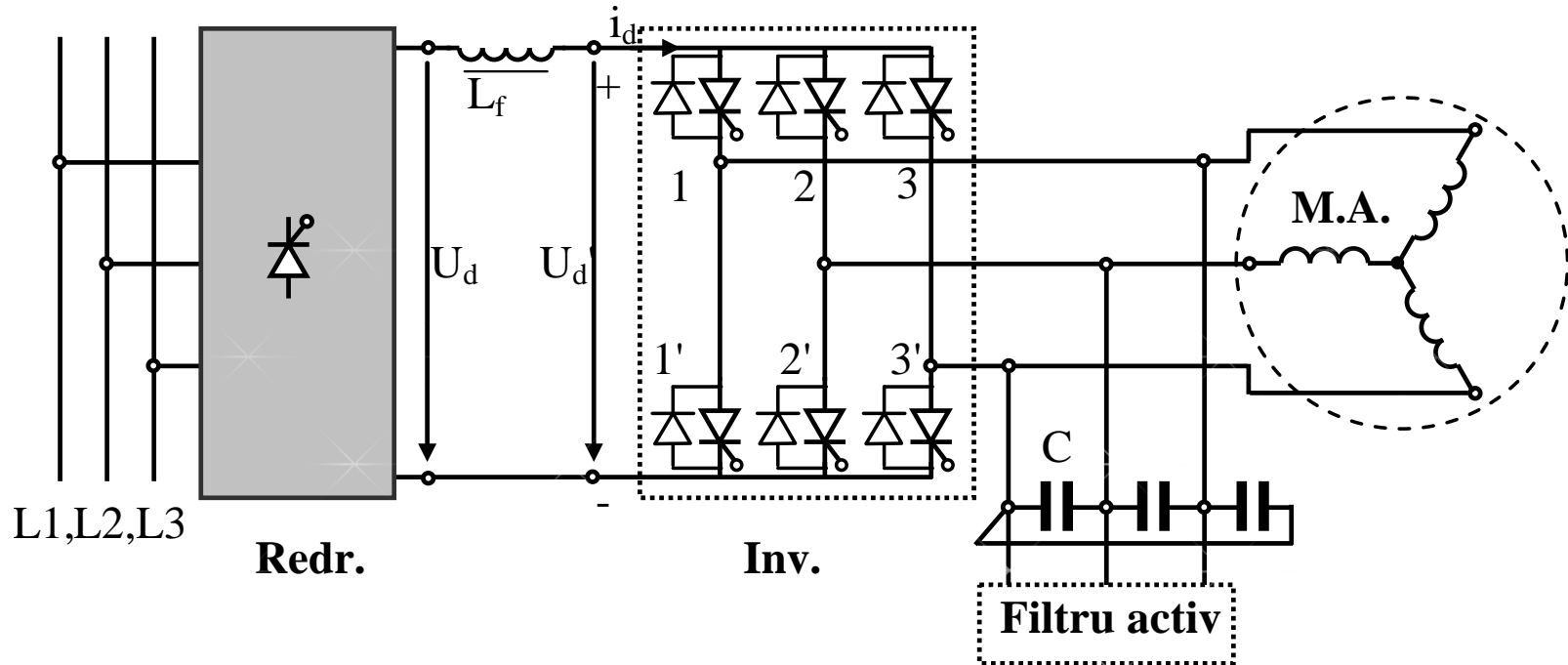
Este metoda cea mai eficientă și cea mai folosită pentru reglarea vitezei motoarelor de c.a.

Reglarea vitezei prin modificarea frecvenței și tensiunii de alimentare



Invertoare de tensiune: a) ireversibil; b) reversibil

Reglarea vitezei prin modificarea frecvenței și tensiunii de alimentare



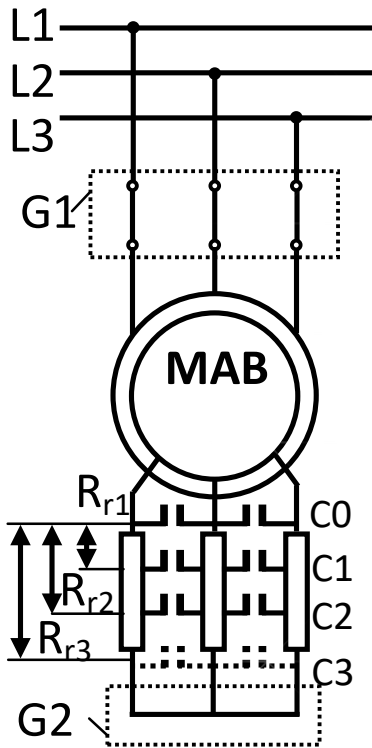
Schemă de alimentare a motorului asincron cu inverter de curent

Reglarea vitezei prin variația rezistenței circuitului rotoric

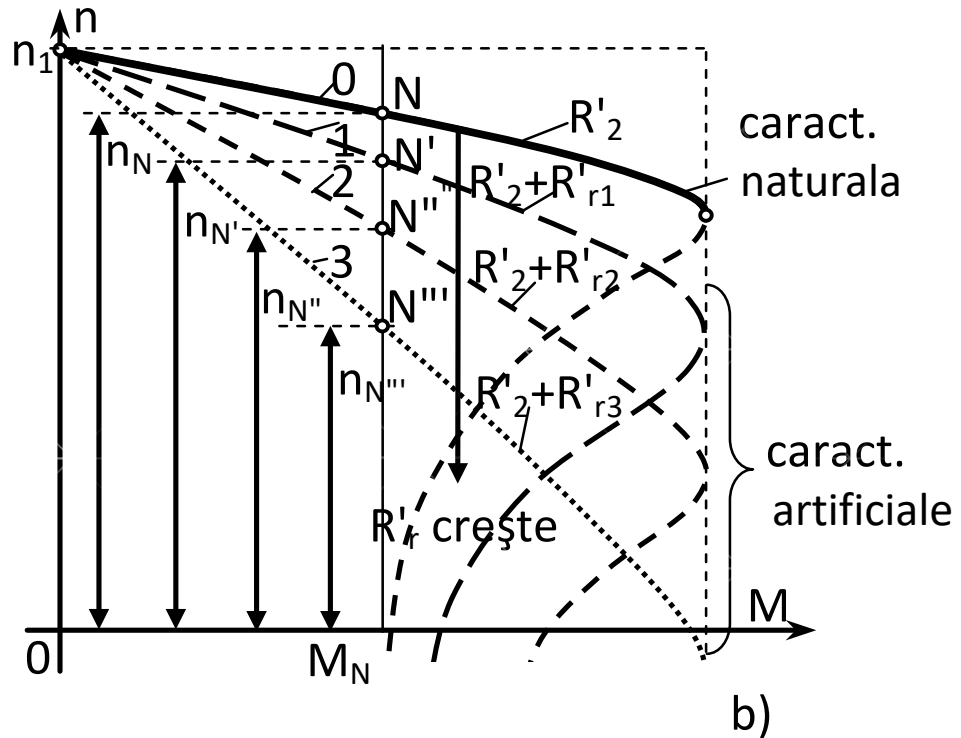
1. Se aplică **NUMAI** la motoarele cu rotor bobinat
2. Rezistența introdusă în circuitul rotoric este voluminoasă pentru că trebuie dimensionată pentru funcționare de durată



Reglarea vitezei prin variația rezistenței circuitului rotoric



a)



b)

- a) Schemă electrică cu introducerea unei rezistențe cu ploturi în circuitul rotoric;
 b) caracteristici mecanice pentru diverse valori ale rezistenței rotorice.

Reglarea vitezei prin variația rezistenței circuitului rotoric

Pentru modificarea vitezei se aduce reostatul R_r pe una dintre pozițiile C1, C2 sau C3 cărora le corespunde o anumită valoare de rezistență. Punctul de funcționare trece de pe caracteristica naturală (notată cu 0) pe una dintre caracteristicile artificiale, ducând la scăderea vitezei (punctele de funcționare de pe caracteristicile 1, 2 sau 3).

Reglarea vitezei prin variația rezistenței circuitului rotoric

1. Reglarea vitezei se poate face **NUMAI** descrescător și chiar până la oprirea mașinii
2. Metoda este eficientă la funcționarea la sarcini mari. La gol, variația vitezei este ne semnificativă
3. Capacitatea de suprasarcină rămâne neschimbată ($M_{\max} = ct.$) însă alunecarea critică se modifică
4. Este o metodă cu pierderi importante pe rezistența rotorică ce duce la scăderea pronunțată a randamentului



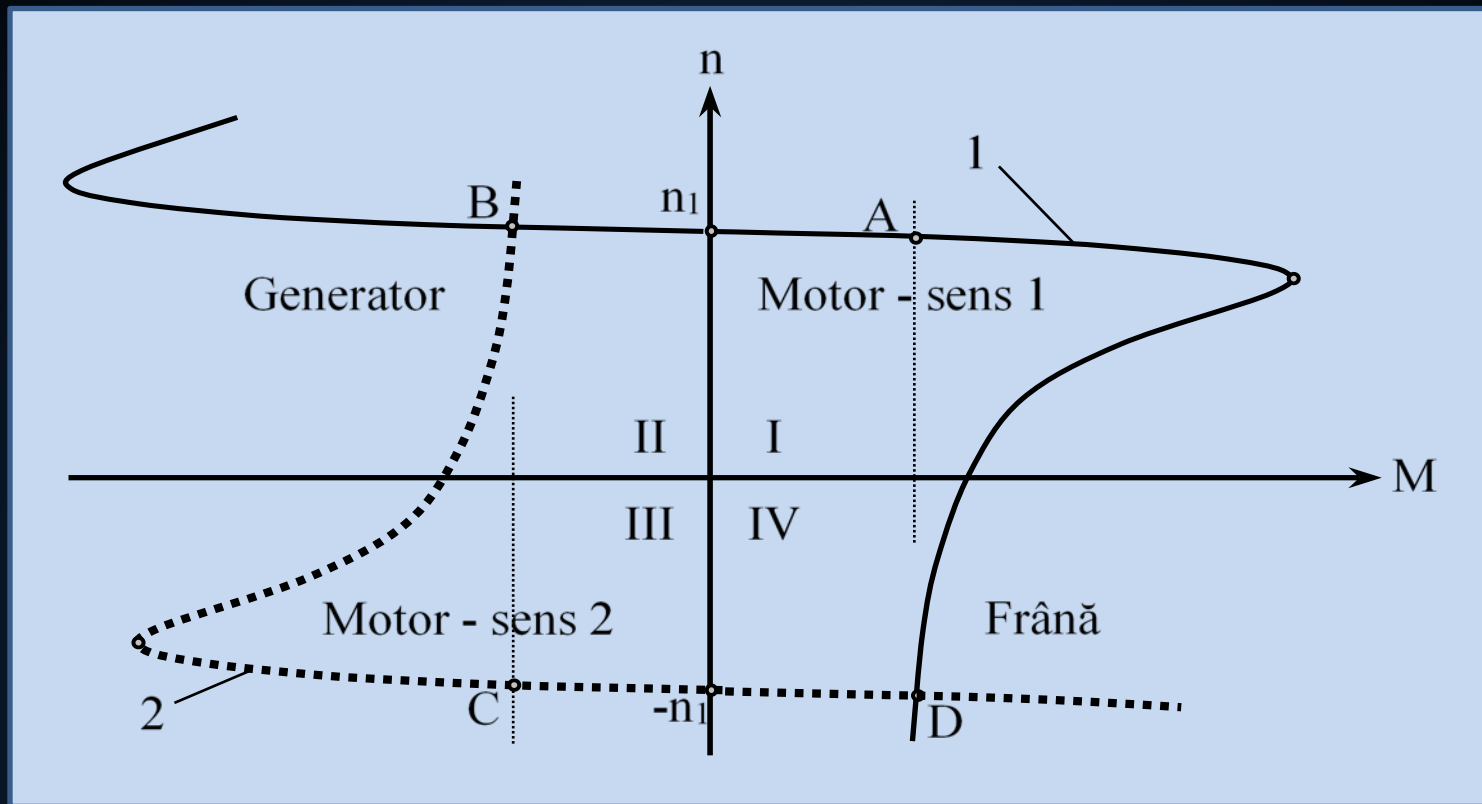
Regimul de frânare a motorului asincron

In general, regimul de frânare a unei mașini electrice desemnează un regim tranzitoriu pe parcursul căruia viteza scade, eventual până la zero.

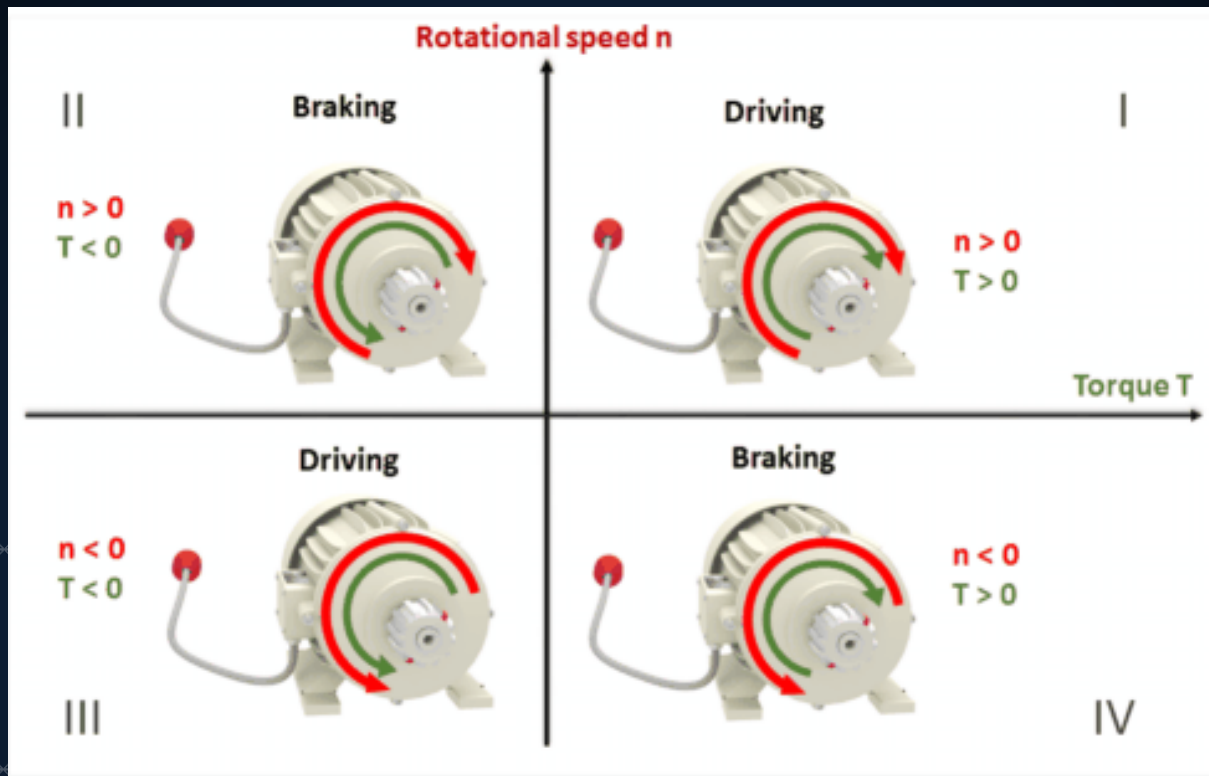
Este de asemenea acceptată și situația în care viteza este limitată prin frânare electromagnetică în tendința ei naturală de creștere.

Frânarea electromagnetică presupune că rotorul și cuplul electromagnetic al mașinii au sensuri de rotire contrare.





Caracteristica mecanică, pentru un anumit sens de rotație (de ex. sensul 1), este reprezentată de curba 1. Atât în cadranul II cât și în cadranul IV, cuplul electromagnetic dezvoltat de mașina asincronă și turația rotorului au sensuri contrare. Însă: în cadranul II alunecarea este negativă ($s < 0$) și avem regim de generator. În cadranul IV, alunecarea este supraunitară ($s > 1$) și avem regim de frână propriu-zisă.



Cadrantul IV reprezintă regim de frână propriu-zisă pentru mașina care funcționează ca motor în cadrantul I. Similar, regimul de motor din cadrantul III are regim de frână în cadrantul II.

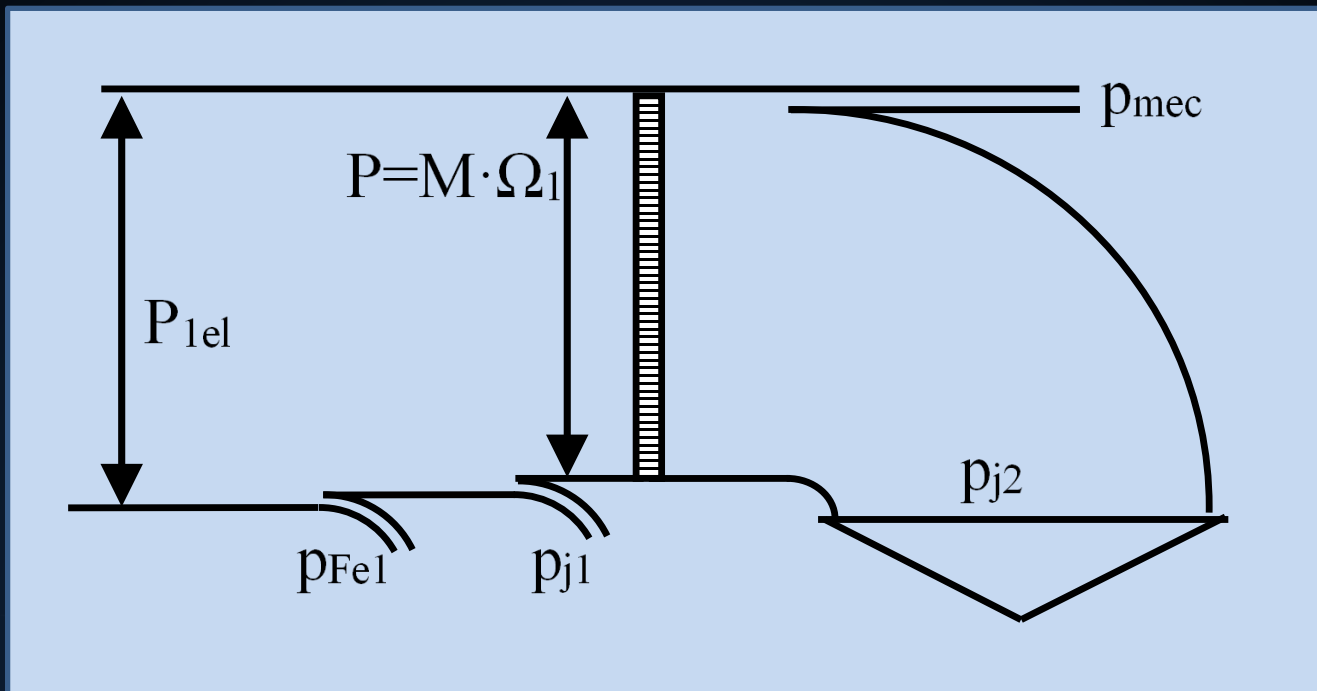


Diagrama bilanțului de puteri la funcționarea în regim de frână

În regim de frână, puterea electrică absorbită de mașina asincronă se transformă în căldură majoritar pe înfășurarea rotorică (p_{j2}). Acest lucru se datorează creșterii pronunțate a curentului prin înfășurări, îndeosebi cea rotorică. Pentru protejarea mașinii, în regim de frână TREBUIE luate măsuri de protecție a mașinii.

Metode de frânare



Frânare contracurent



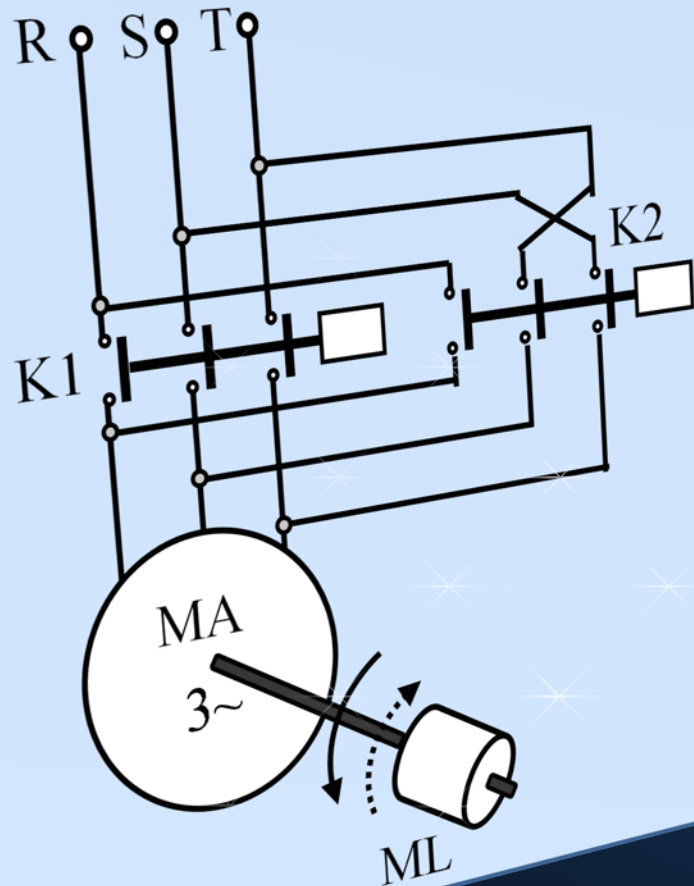
Frânare dinamica

Frânare la schimbare sens rotație



Frânare suprasincrona
(reg. generator)

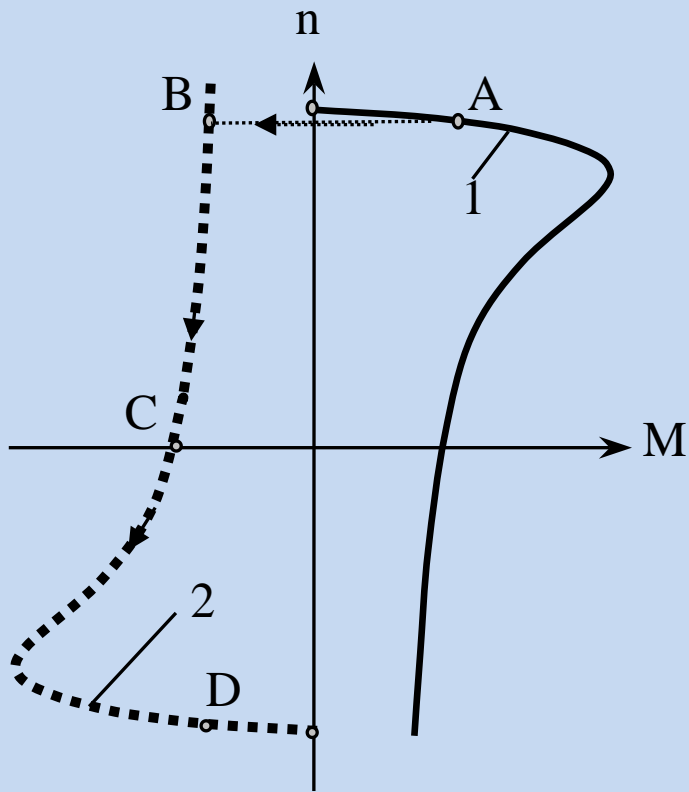




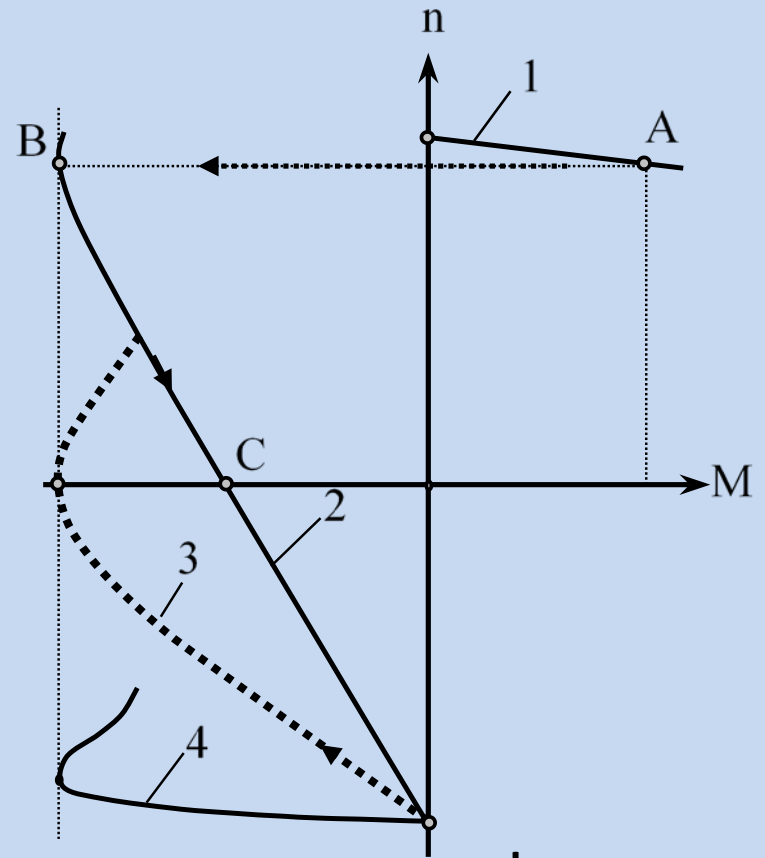
Dacă pe timpul funcționării mașinii asincrone este necesară oprirea bruscă (de urgență), se poate folosi metoda frânării contracurent.

Pentru frânare, se decuplează întrerupătorul principal K1 și se cuplează întrerupătorul K2, care inversează două faze între ele.

Inversarea a două faze înseamnă inversarea sensului de rotație a câmpului învârtitor. Rezultă sensuri contrare pentru câmpul electromagnetic respectiv turația rotorului.



a.



b.

Caracteristicile mecanice la funcționarea în regim de frână:

- a. MAS cu rotor în scurt-circuit
- b. MAS cu rotor bobinat

Să presupunem că motorul asincron funcționează în punctul A de pe caracteristica mecanică (fig. a). La inversarea a două faze de alimentare, sensul câmpului învârtitor, și deci a cuplului electromagnetic dezvoltat de mașină, se inversează și devine negativ în raport cu turația rotorului. Rezultă că punctul de funcționare „sare” din A în B, în cadranul II, respectiv pe caracteristica 2. Aceasta este caracteristica de funcționare în regim de motor, corespunzătoare sensului invers dar, fiind în cadranul 2, ea corespunde zonei de frânare.

Cuplul electromagnetic negativ duce la frânarea mașinii, iar punctul de funcționare se deplasează din B în C, când viteza rotorului devine zero. În acest moment mașina TREBUIE decuplată de la rețea. Dacă nu este decuplată, începe să se rotească în sens invers, iar punctul de funcționare ajunge în D.

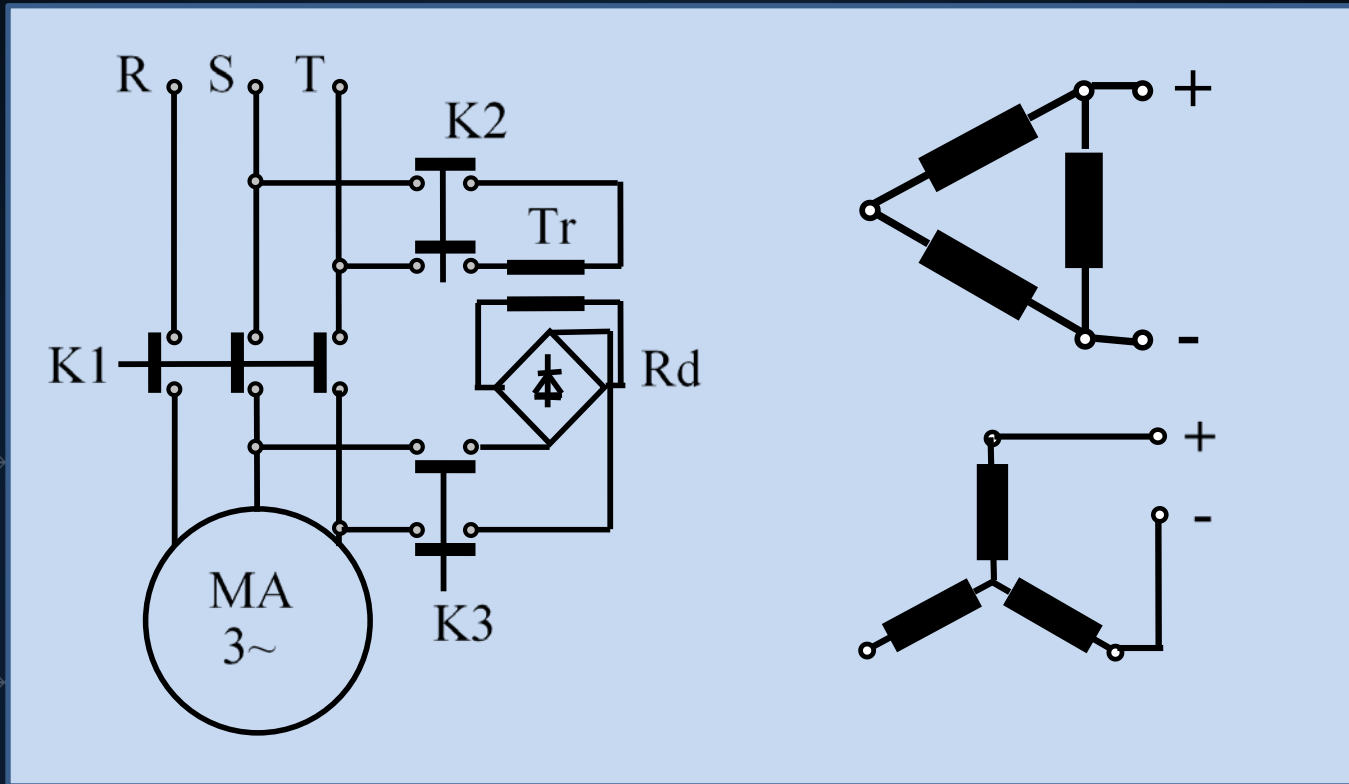


Curenții prin înfășurările mașinii cresc de 5 până la 7 ori peste valoarea nominală, ceea ce produce o încălzire excesivă a mașinii. Pentru a împiedica deteriorarea ei, trebuie luate măsuri de răcire suplimentare (de exemplu răcire forțată cu un ventilator).

În cazul mașinii asincrone cu rotor bobinat, întrucât există acces către înfășurarea rotorică, frânarea contracurent este acompaniată de introducerea unei rezistențe suplimentare, dimensionată în mod particular pentru regimul de frânare.

În momentul inversării celor două faze, punctul de funcționare trece din A în B în mod identic celui de la mașina cu rotor în scurt-circuit (fig. b). Însă, introducerea rezistenței în circuitul rotoric determină transformarea caracteristicii naturale 4 într-o caracteristică artificială, la care punctul B coincide cu *cuplul maxim*. Rezultă o frânare mai rapidă până în punctul C.

Dacă pe timpul frânării se modifică rezistența din circuitul rotoric (de ex. caracteristica 3), se poate menține pe toată durata frânării un cuplu de valoare maximă.

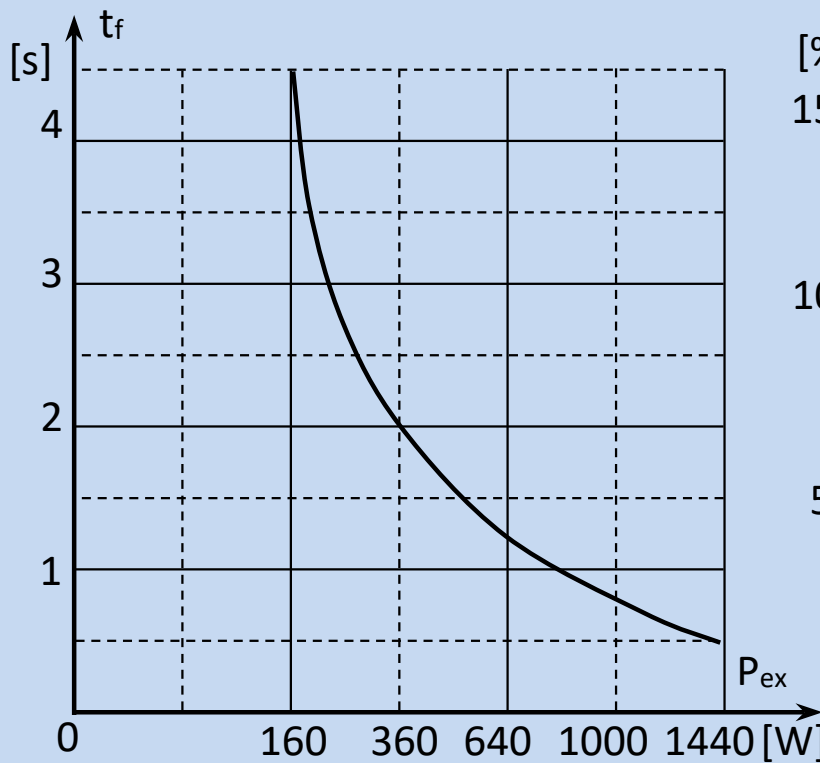


Frânarea dinamică se obține prin decuplarea motorului asincron de la rețea (deschiderea întrerupătorului K1) și conectarea la o sursă de tensiune continuă (vezi în figură cele două variante pentru conexiunile triunghi respectiv stea), prin închiderea întrerupătoarelor K2 și K3.

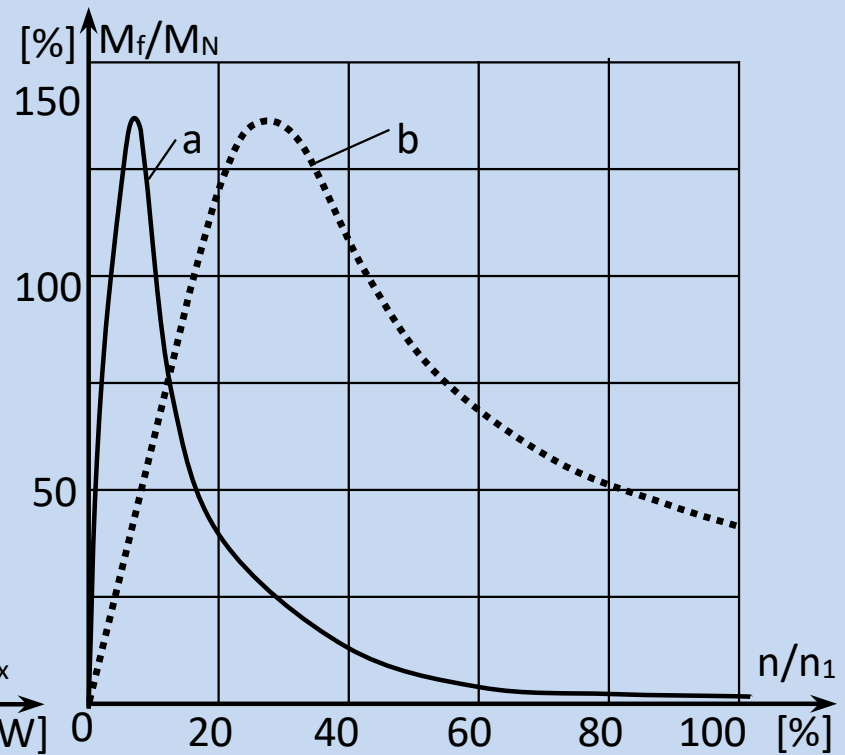
Prin alimentarea înfășurării trifazate statorice de la o sursă de tensiune continuă, ia naștere în mașina asincronă un câmp magnetic fix în spațiu și constant în amplitudine. Mașina asincronă SE TRANSFORMA într-o mașină sincronă de tip inversat (statorul-inductor și rotorul-indus) în scurt-circuit ce funcționează în regim de generator. Deci cuplul electromagnetic este negativ în raport cu turația rotorului ceea ce duce la frânarea mașinii până la oprirea ei.

La această metodă NU mai apare pericolul inversării sensului de rotație dacă, la oprire, nu se întrerupe alimentarea în c.c.

Și această metodă determină creșterea pronunțată a curentului rotoric, adică este necesară, din nou, protejarea mașinii prin răcire forțată.



a)



b)

Curba din fig.a pune în evidență faptul că, timpul de frânare depinde de puterea de excitație. Cu cât puterea este mai mare cu atât timpul de frânare este mai mic. In fig.b se poate observa că valoarea cuplului de frânare este mai pronunțată la valori mici ale turației. Dacă se dorește creșterea cuplului de frânare către valori mai mari ale turației atunci se poate introduce o rezistență de frânare în circuitul rotoric (numai la mașinile cu rotor bobinat).

Cuvinte cheie



Caracteristica
mecanica
 $n = f(M)$



Caracteristica
cuplu-alunecare
 $M = f(s)$



Reglarea vitezei
pe
caracteristici
artificiale



Schimbarea
numărului de
poli



Modificarea U/f



Rezistență in
circuitul rotoric



Frânare contra-
curent



Frânare
dinamica

MOTORUL MONOFAZAT

CURS 8



CUPRINS



Motorul asincron monofazat – particularități

1

Motorul monofazat cu faza auxiliara

2

Motorul monofazat cu condensator de pornire

3

Motorul monofazat cu faza auxiliara permanenta

4

Motorul monofazat cu doua condensatoare

5

Motorul monofazat cu spira in scurt-circuit

6

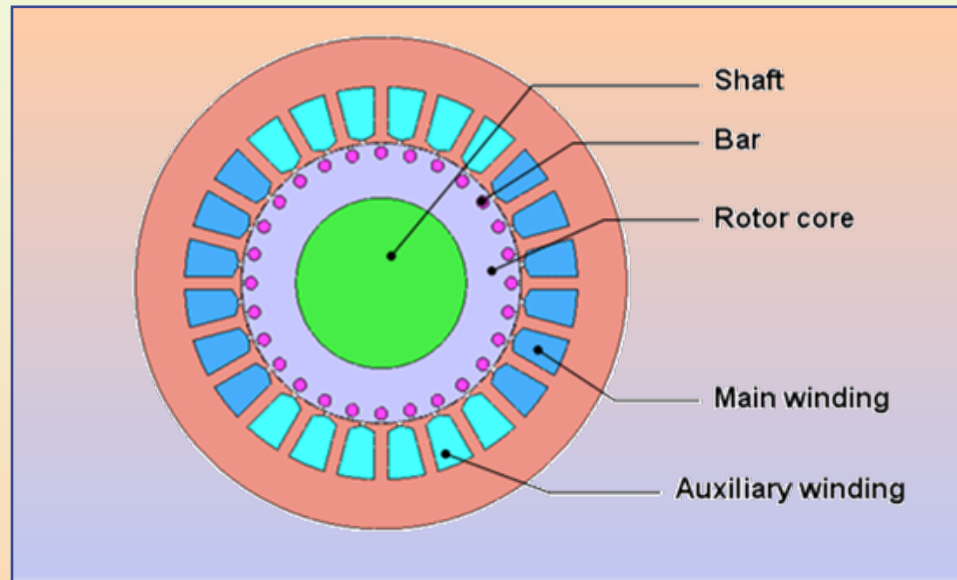
Inversarea sensului de rotație la motorul monofazat

7

1
2
3
4
5
6
7

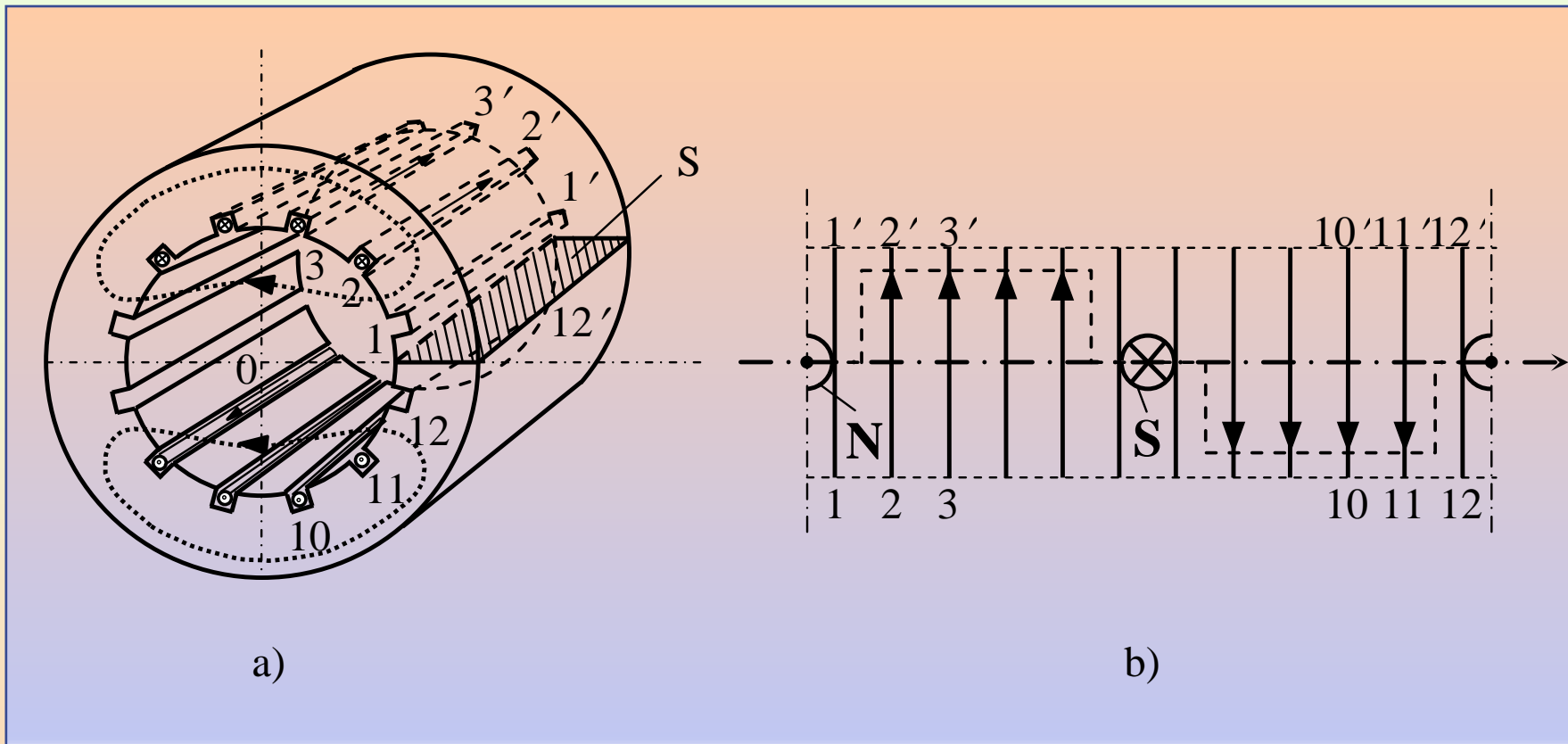


Motorul asincron monofazat este motorul de inducție a cărui alimentare se face de la o sursă de tensiune monofazată.



Din punct de vedere constructiv, motorul monofazat are aceleași elemente ca și motorul trifazat: stator cu creștături uniform distribuite, rotor cu înfășurare în scurt-circuit (variantele cu rotor bobinat nu există la motorul monofazat).

Singurul element diferit este înfășurarea statorică.

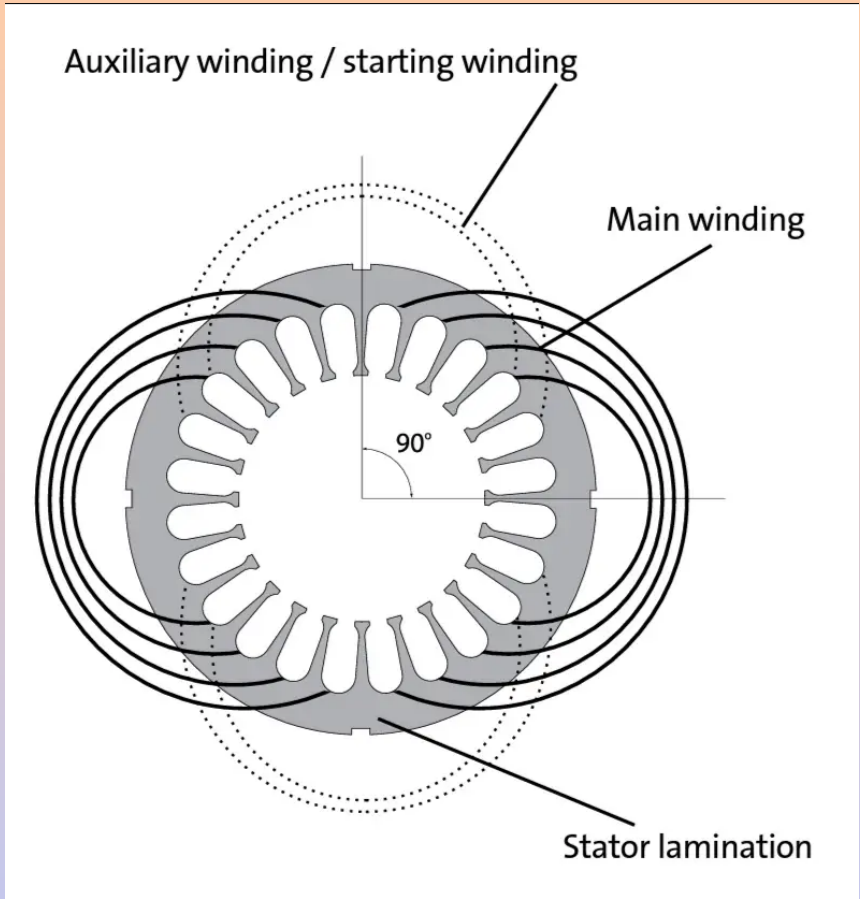


Dispunerea în creștături a înfășurării principale

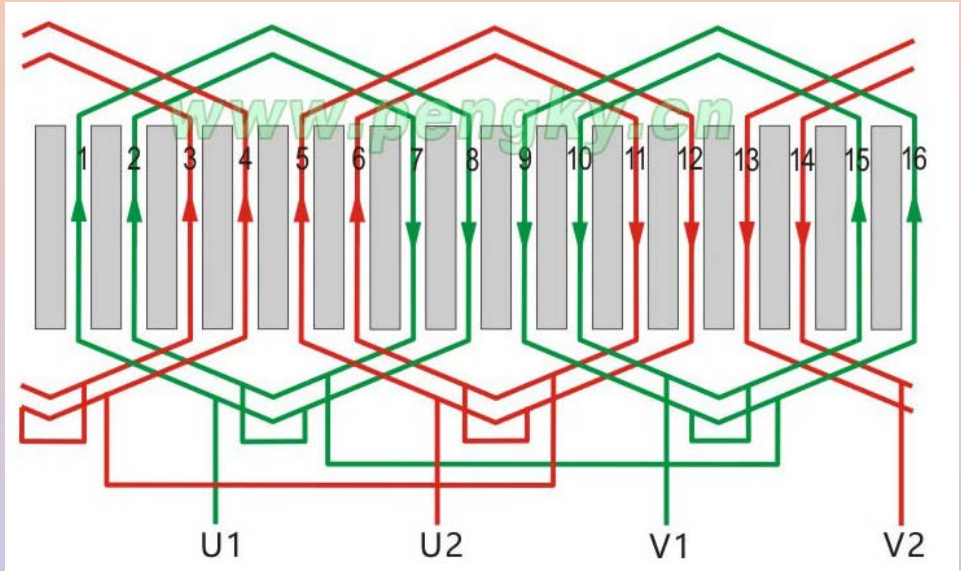
Înfășurarea statorică a motorului monofazat este compusă din două înfășurări de fază distincte:

- Înfășurarea principală – este plasată, de regulă, în 2/3 din creștăturile statorului;
- Înfășurarea auxiliară – este plasată în restul de 1/3 creștături.

Defazajul spațial dintre cele două înfășurări este de 90° electrice.



a.



b.

Înfășurări statorice: a - faze inegale; b - faze identice

Defazajul spațial dintre cele două înfășurări este de 90° electrice.

Expresia câmpului electromagnetic creat de o înfășurare monofazată (situația motorului cu o singura înfășurare):

$$H = H_{max} \cos p\alpha \cdot \sin \omega t \quad \leftarrow \text{câmp alternativ (pulsatoriu)}$$

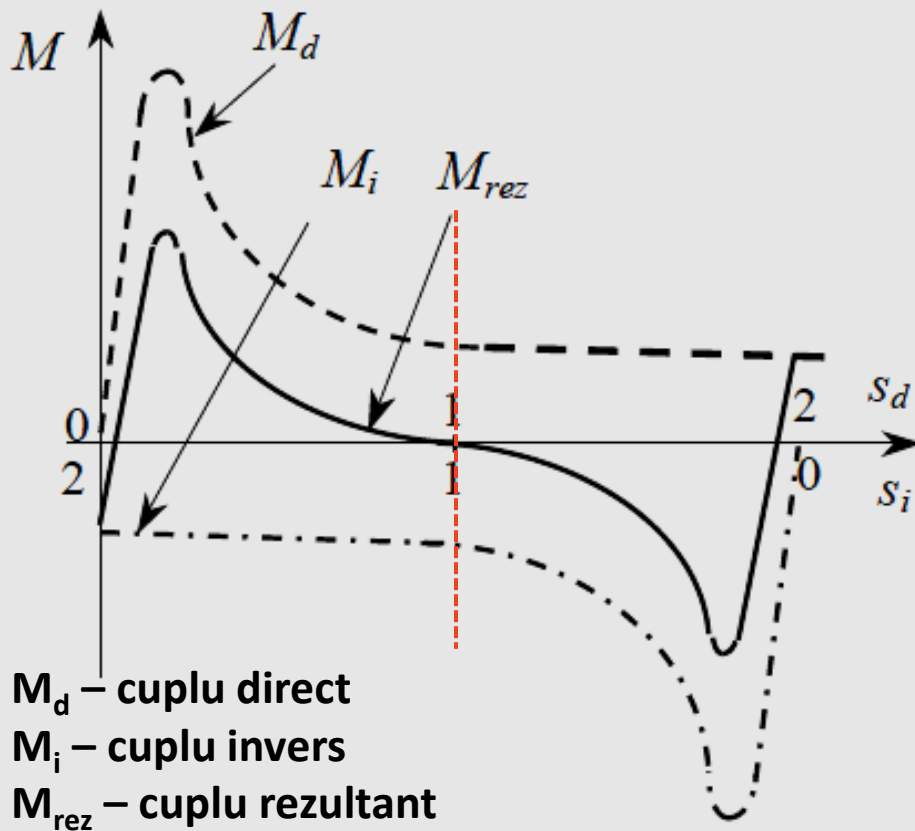
Dacă se aplică teorema lui Leblanc:

$$H = \frac{1}{2} H_{max} \cdot \sin(\omega t - p\alpha) + \frac{1}{2} H_{max} \cdot \sin(\omega t + p\alpha)$$

câmp învârtitor direct

câmp învârtitor invers

Fiecare dintre cele două câmpuri învârtitoare creează câte un cuplu care acționează asupra rotorului în direcții opuse.



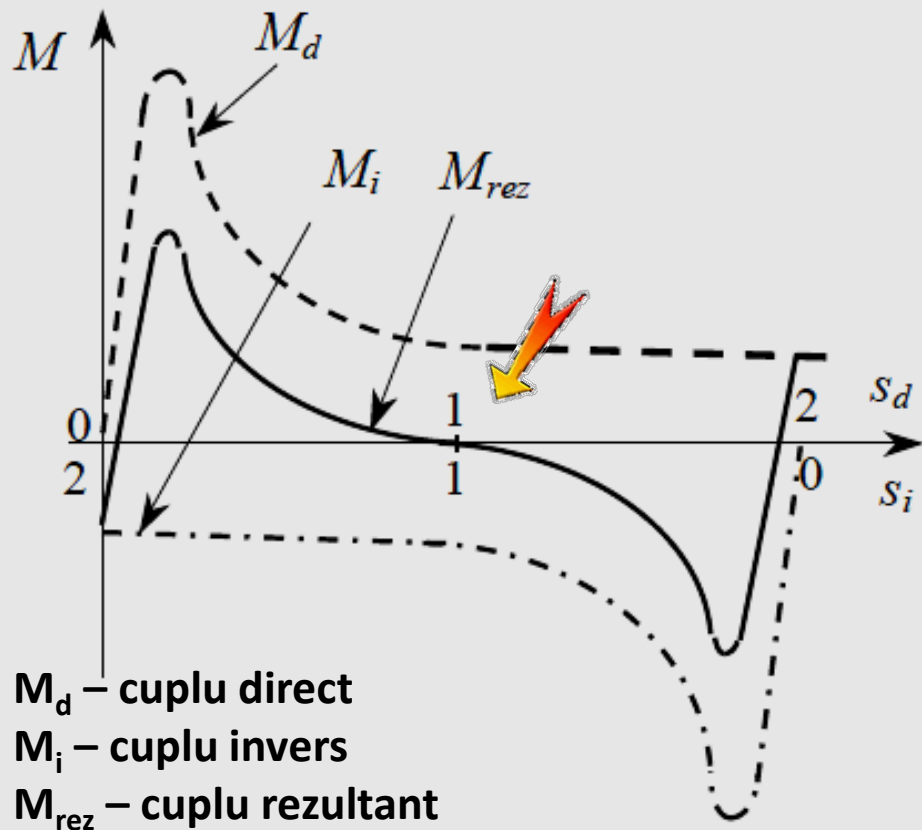
Cele două cupluri (reprezentate de curbele punctate) se compun dând naștere cuplului rezultat, M_{rez} .

Față de câmpul direct, rotorul are o alunecare:

$$s_{dir} = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

iar față de câmpul invers, alunecarea rotorului este:

$$s_{inv} = \frac{n_1 + n}{n_1} = \frac{n_1 + n - n_1 + n_1}{n_1} = \frac{2n_1}{n_1} - \frac{n_1 - n}{n_1} = 2 - s_{dir}$$

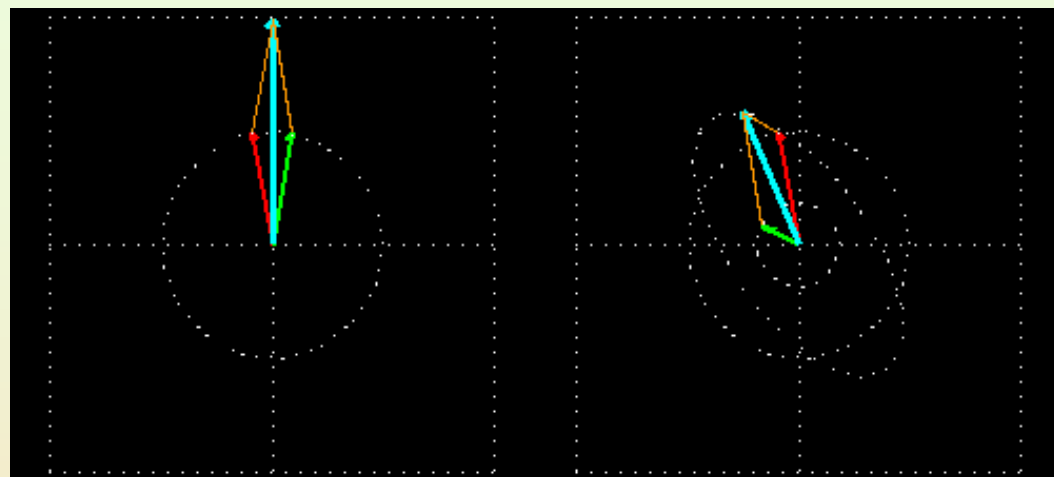
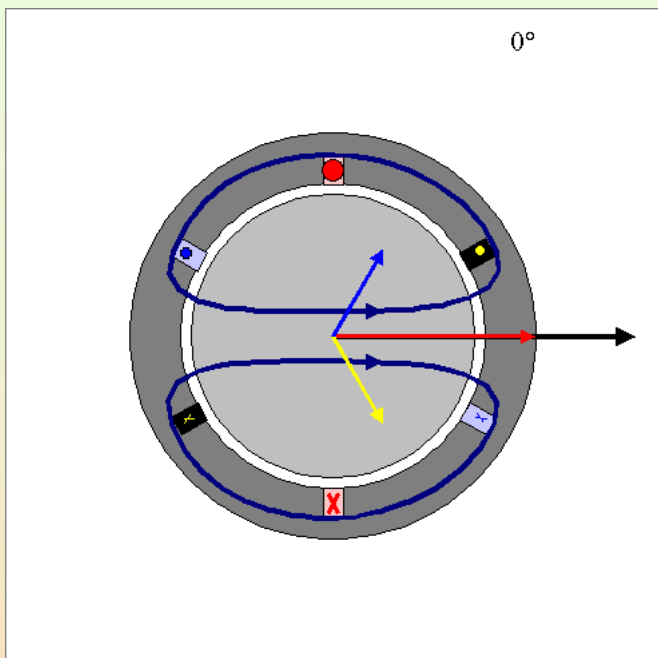


Cuplul rezultat este nul pentru $s=1$



Motorul monofazat (cu o singură fază) NU are cuplu de pornire.

Câmp magnetic învârtitor circular



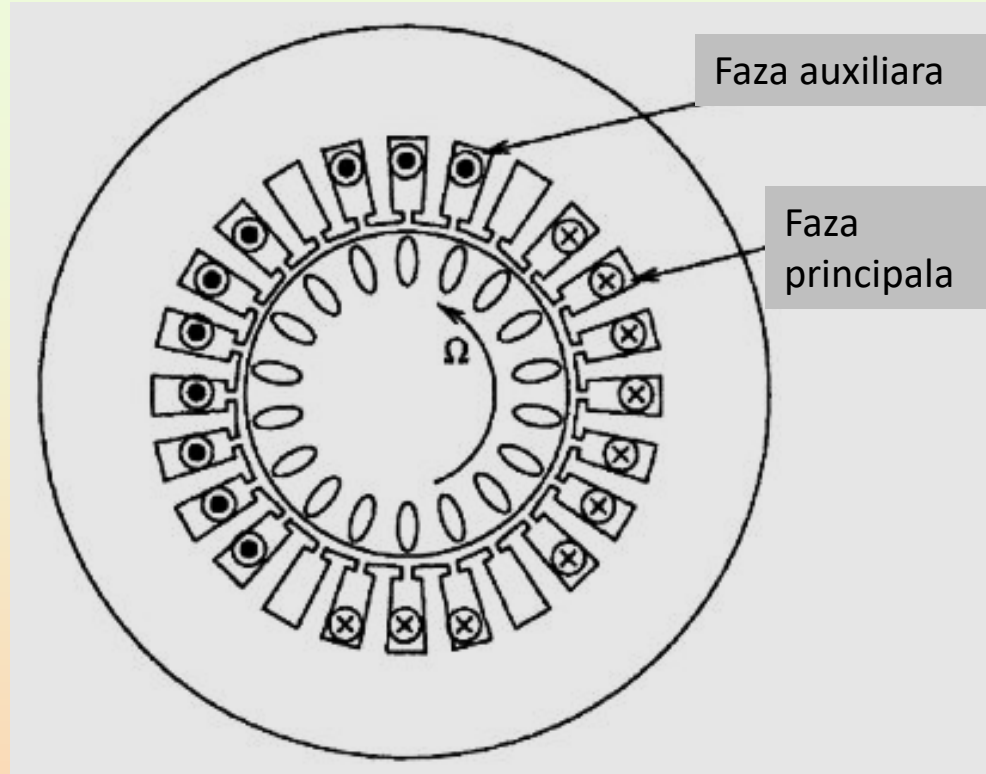
Câmp magnetic alternativ

Câmp magnetic învârtitor eliptic

Câmpul magnetic învârtitor circular este câmpul creat de o înfășurare polifazăată ce respectă toate condițiile de simetrie (spațială și temporală). Pentru înfășurarea trifazăată, de ex., înfășurările de fază sunt plasate la 120° electrice și sunt parcurse de curenți defazați, de asemenea, la 120° .

Atunci când condițiile de simetrie nu sunt riguros respectate, câmpul magnetic învârtitor devine unul eliptic. Orice câmp eliptic se descompune în două câmpuri învârtitoare circulare, care se rotesc în sensuri contrare (ca în cazul câmpului magnetic alternativ) dar care au amplitudini diferite. Câmpul de amplitudine mai mare determină cuplul ce rotește rotorul, iar câmpul de amplitudine mai mică generează un cuplu ce se opune mișcării rotorului.

Motor monofazat cu fază auxiliară



Se adaugă o fază auxiliară pentru a transforma mașina monofazată într-una bifazată (polifazată) capabilă să producă un câmp învârtitor și deci un cuplu de pornire.

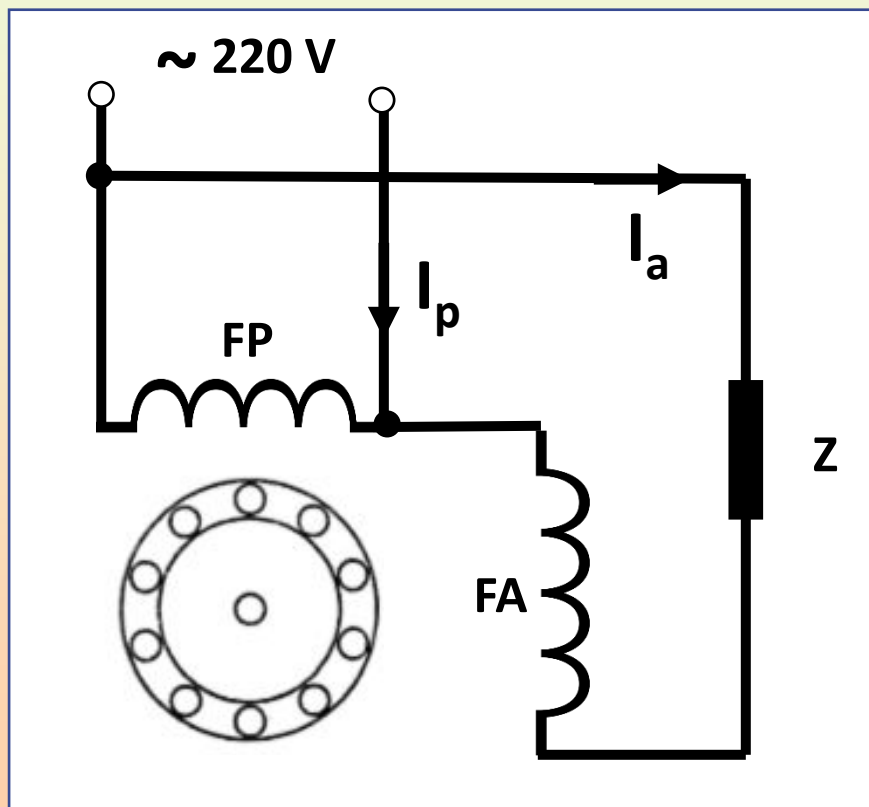


Cele două înfășurări sunt DEFAZATE spațial la 90° electrice



Întrucât sursa de alimentare pentru cele două înfășurări este unică, curenții prin cele două înfășurări TREBUIE defazați temporal (ideal la 90° electrice)

2

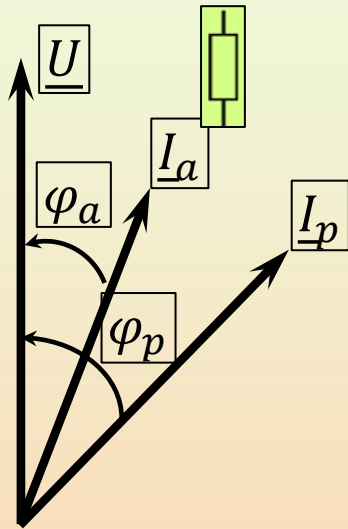


Pentru obținerea defazării curentului prin faza auxiliară față de cel din faza principală, se introduce în circuitul fazei auxiliare o impedanță Z .

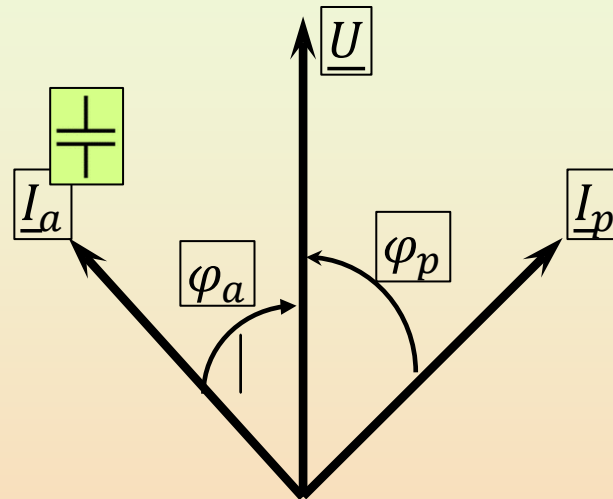
Această impedanță defazoare poate fi constituită din:

- o rezistență
- un condensator
- o bobină
- o combinație de rezistență + condensator

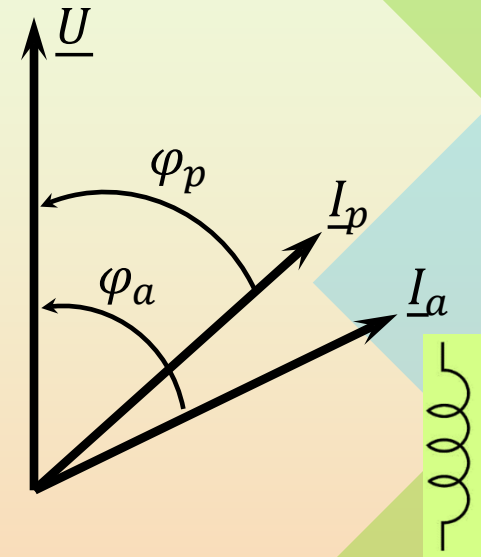
Diagrame fazoriale



a)



b)



c)

- a) Rezistență introdusă în circuitul fazei auxiliare;
- b) Condensator introdus în circuitul fazei auxiliare;
- c) Bobină introdusă în circuitul fazei auxiliare.

a) Prezența rezistenței ca element defazor în circuitul fazei auxiliare face ca defazajul dintre tensiunea de alimentare, U și curentul I_a să fie mai mic decât defazajul dintre U și curentul prin faza principală, I_p . În acest fel apare un defazaj între curenții prin cele două faze. Deși este, ca valoare, departe de unghiul ideal de 90° , rezultă totuși un câmp eliptic și deci un cuplu de pornire.

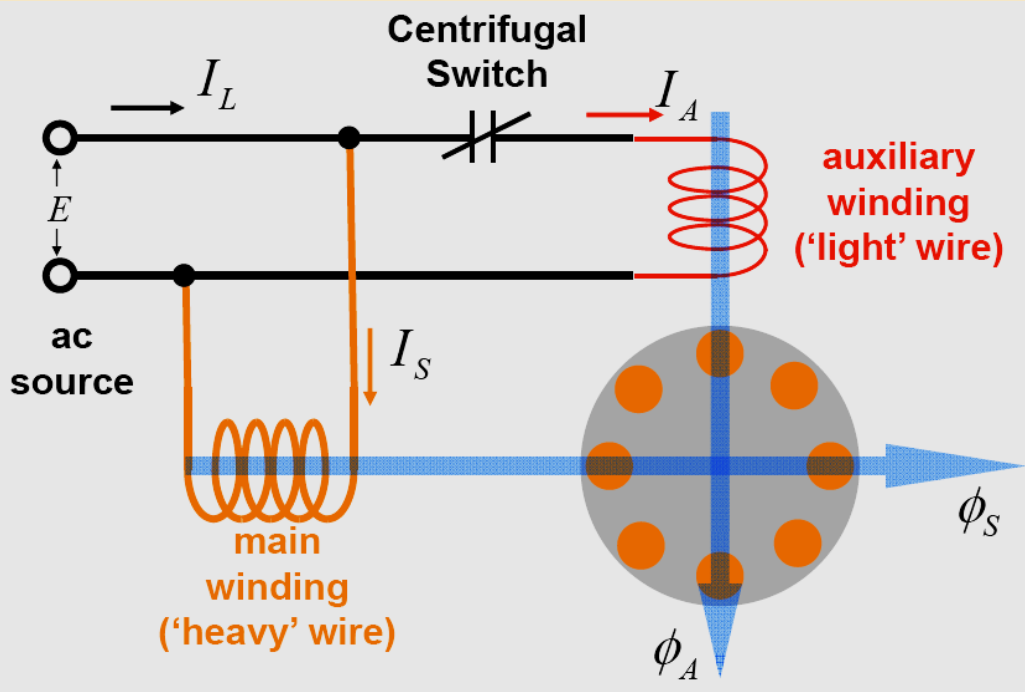
b) Condensatorul introdus ca element defazor în circuitul fazei auxiliare determină un defazaj negativ între tensiunea de alimentare, U și curentul I_a (curentul este în avans față de tensiune). Drept urmare, defazajul dintre I_a și I_p poate atinge chiar 90° . Este situația cea mai favorabilă.

c) Prezența bobinei ca element defazor în circuitul fazei auxiliare determină un defazaj mai mare a curentului I_a față de tensiunea de alimentare, U . Din nou rezultă un mic defazaj între curenții I_a și I_p ce determină un câmp eliptic.

I. Motor cu fază auxiliară

Split-phase motor

CHARACTERISTIC	NOTES
Peak Efficiency	50 to 60%
Power Factor	60 to 70%
Starting Torque	100% Full Load Torque
Noise & Vibration	120 Hz Torque Pulsations
Components	Contains Centrifugal Switch
Other	High Inrush Starting Current
Cost	Moderate



➤ Înfășurarea auxiliară este realizată din conductor mai subțire deci cu rezistență mai mare. Rezultă o defazare a curenților prin cele două faze de circa 30° .

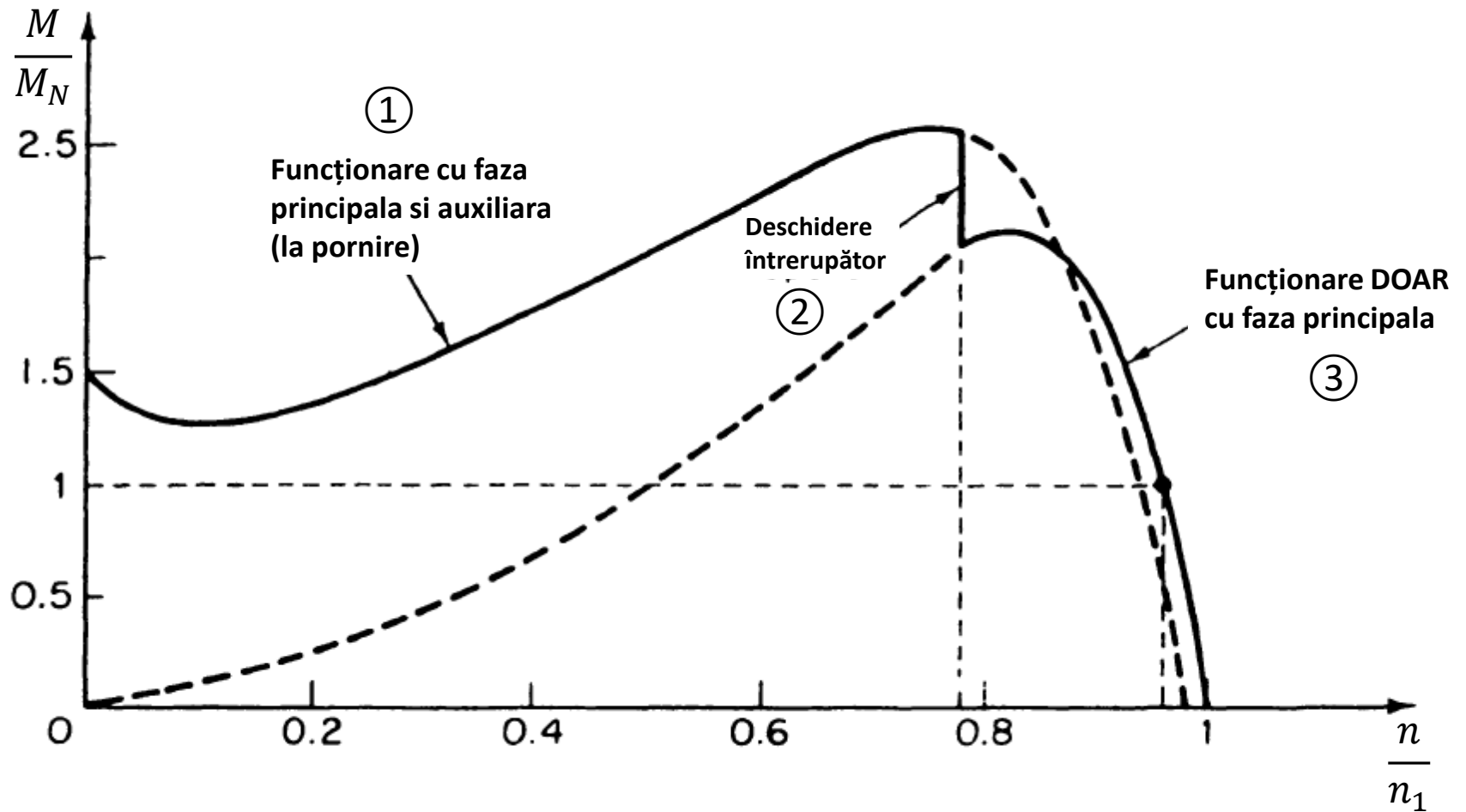
➤ Faza auxiliară este folosită NUMAI la pornire după care este scoasă din circuit de către întrerupătorul centrifugal

➤ Cuplu mediu de pornire

➤ Curent mare de pornire în înfășurarea auxiliară

➤ Configurația este favorabilă pentru motoare de până la 250 W

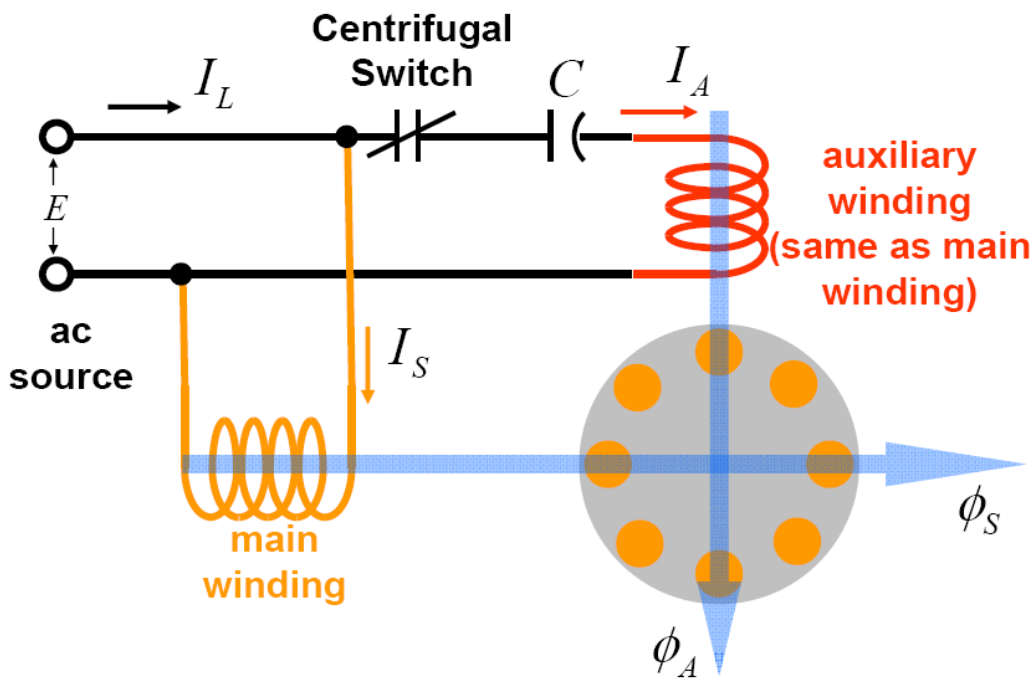
Caracteristica $M=f(s)$ pentru motorul cu fază auxiliară



II. Motor cu condensator de pornire

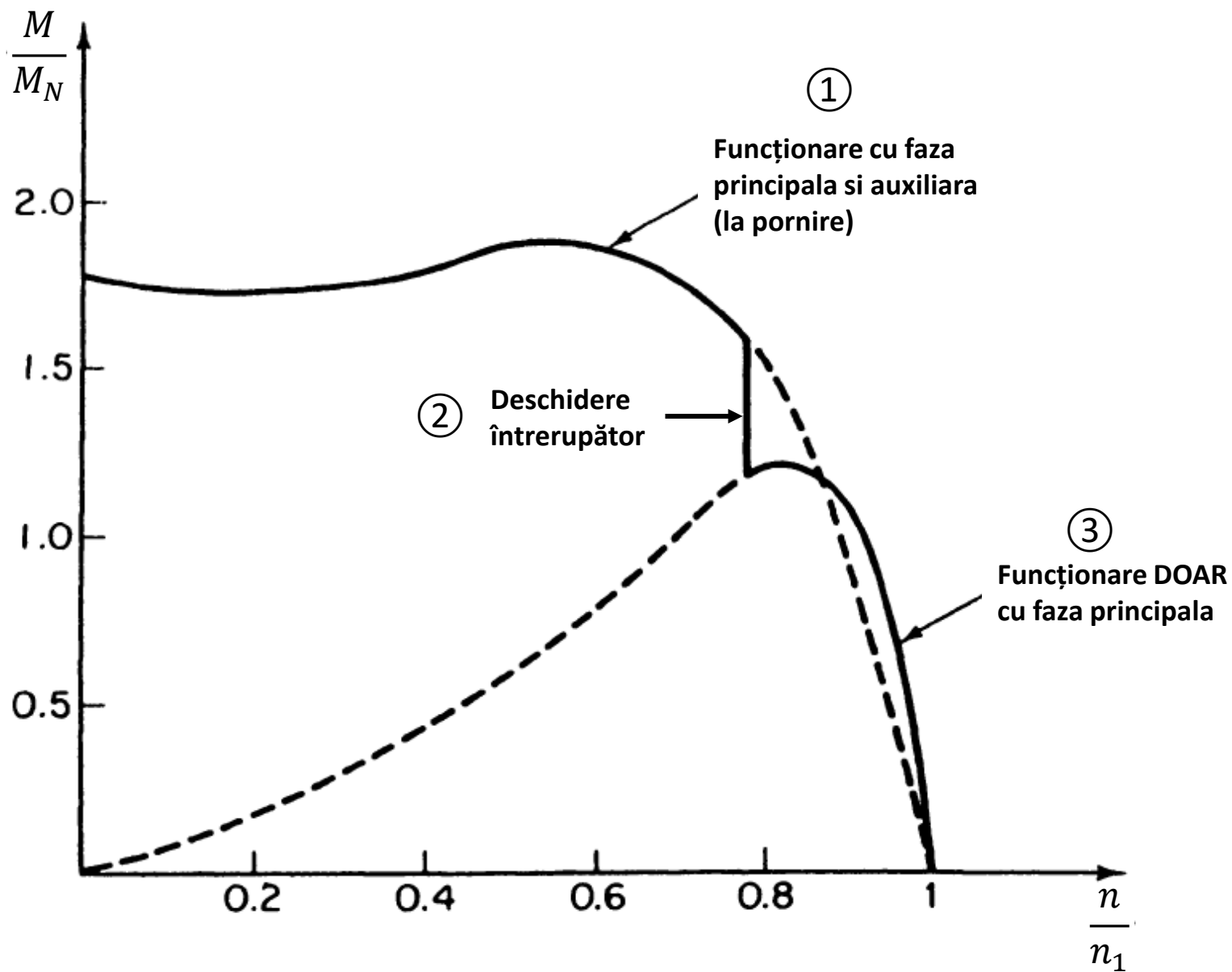
Capacitor-start motor

CHARACTERISTIC	NOTES
Peak Efficiency	50 to 60%
Power Factor	60 to 70%
Starting Torque	Up to 300% Full Load Torque
Noise & Vibration	120 Hz Torque Pulsations
Components	Contains Centrifugal Switch & Capacitor (Intermittent Duty)
Other	Capacitor Controls Inrush Starting Current (Lower Than Split-Phase Type)
Cost	Slightly Higher Than Split-Phase Type



- Cele două înfășurări sunt identice
- Defazarea curenților prin cele două faze este realizată de către condensatorul din faza auxiliară
- Valoare mare a condensatorului folosit NUMAI la pornire
- Cuplu mare de pornire
- Configurația este favorabilă pentru motoare de până la câțiva kW
- Ideal pentru aplicații de cuplu mare ca de ex. compresoare în instalații de aer condiționat



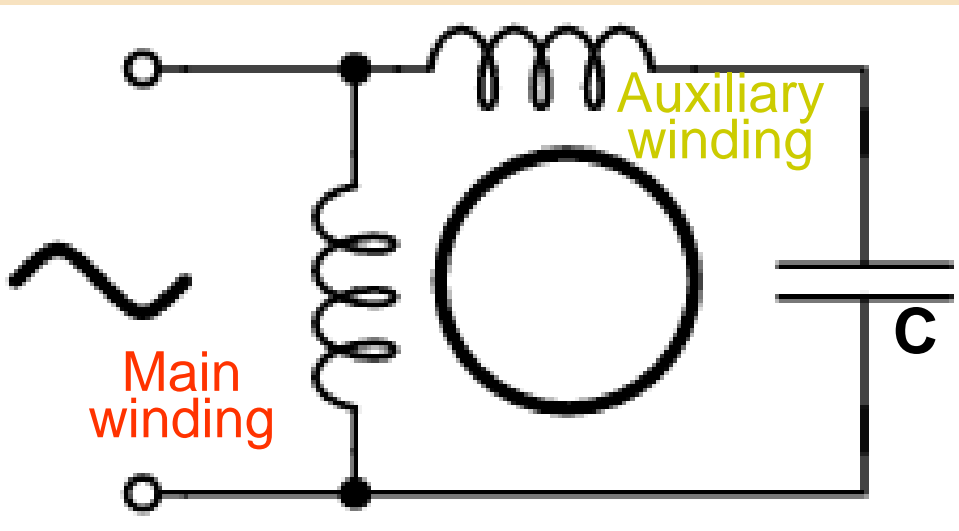


Caracteristica $M=f(s)$ pentru motorul cu condensator de pornire

III. Motor cu fază auxiliară permanentă

Permanently split capacitor motor

CHARACTERISTIC	NOTES
Peak Efficiency	55 to 65%
Power Factor	80 to 100%
Starting Torque	50 to 80% Full Load Torque
Noise & Vibration	120 Hz Torque Pulsations Reduced
Components	Contains Capacitor (Continuous Duty)
Other	Can be used with speed control devices (not possible with SP & CSIR types)
Cost	Smallest motor for given output

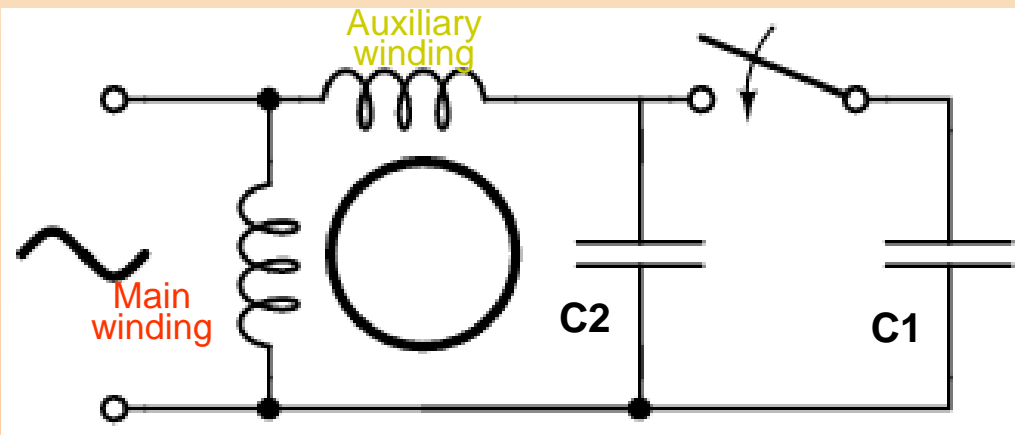


- Cele două înfășurări sunt identice
- Valoarea condensatorului este între cea favorabilă pornirii și cea favorabilă funcționării
- Curentul de pornire este mai mare
- Timpul de pornire este mai mare
- Apar pulsații de cuplu la turație nominală
- Configurația este favorabilă pentru motoare de până la 200 W
- Inversarea sensului de rotație se poate obține ușor prin trecerea condensatorului în circuitul celeilalte faze

IV. Motor monofazat cu două condensatoare

Capacitor-start capacitor-run motor

CHARACTERISTIC	NOTES
Peak Efficiency	55 to 65%
Power Factor	80 to 100%
Starting Torque	Up to 300% Full Load Torque
Noise & Vibration	120 Hz Torque Pulsations Reduced
Components	Contains Centrifugal Switch & Capacitor (Intermittent Duty). Contains 2nd Capacitor (Continuous Duty).
Other	Capacitor controls inrush starting current & run capacitor simulates 2-phase operation.
Cost	The best of the single-phase motor types. Exceptionally quiet. Most expensive motor design type.



➤ Înfășurarea auxiliară RĂMÂNE conectată permanent în circuit

➤ Se folosesc două condensatoare: unul pentru pornire, C1 (ce este scos din circuit cu un întrerupător centrifugal) și altul pentru funcționare, C2.

➤ $C1 > C2$

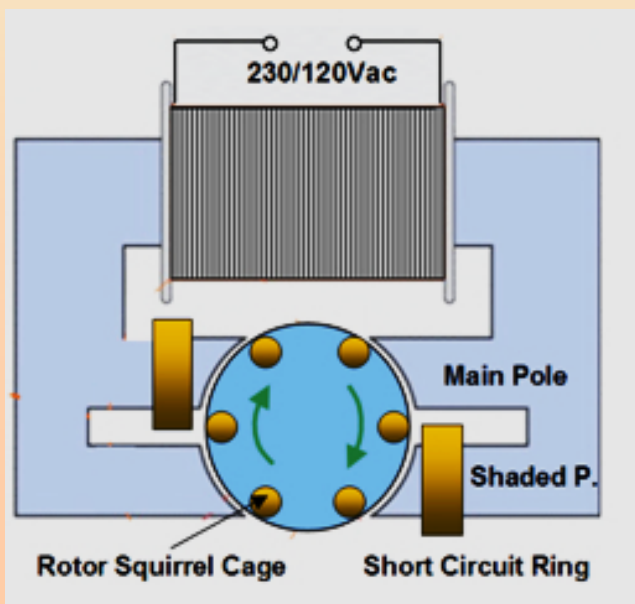
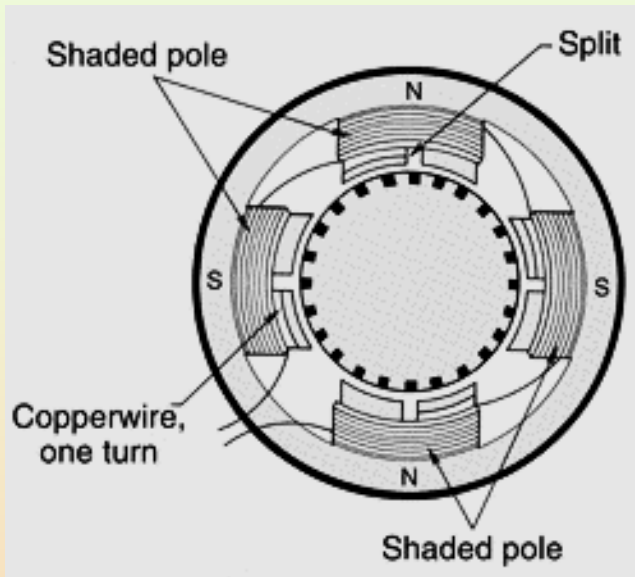
➤ Este configurația cea mai performantă pentru motoare monofazate

➤ Configurația este favorabilă pentru motoare de ordinul kW



V. Motor cu spira în scurtcircuit

Shaded-pole motor



➤ Motor asincron monofazat cu poli APARENȚI pe stator și înfășurare de tip CONCENTRAT

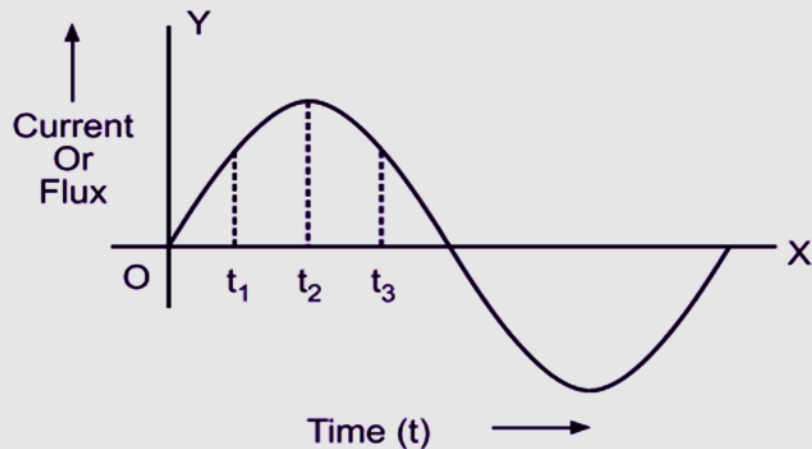
➤ Fiecare pol statoric are o spiră în scurtcircuit ce îmbrățișează cca 1/3 din pol

➤ Motorul are un singur sens de rotație impus de poziția spirei în scurtcircuit (rotorul se rotește dinspre partea necranată spre partea ecranată de spira în sc.)

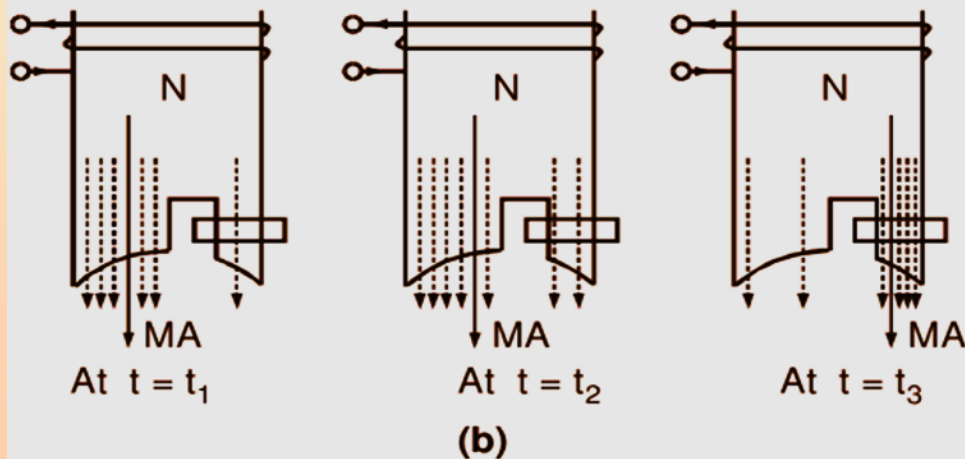
➤ Fiabilitate mare; performanțele cele mai slabe dintre motoarele asincrone monofazate

CHARACTERISTIC	NOTES
Peak Efficiency	20 to 40%
Power Factor	50 to 60%
Starting Torque	40 to 50% full load torque plus third harmonic dip
Noise & Vibration	120 Hz torque pulsations plus winding harmonics
Components	No additional components needed
Other	Can be used with speed control devices (not possible with SP & CSIR types)
Cost	Cheapest of all single-phase motors

Motor cu spira în scurtcircuit - *Principiu de funcționare*



Time (t) →
(a)



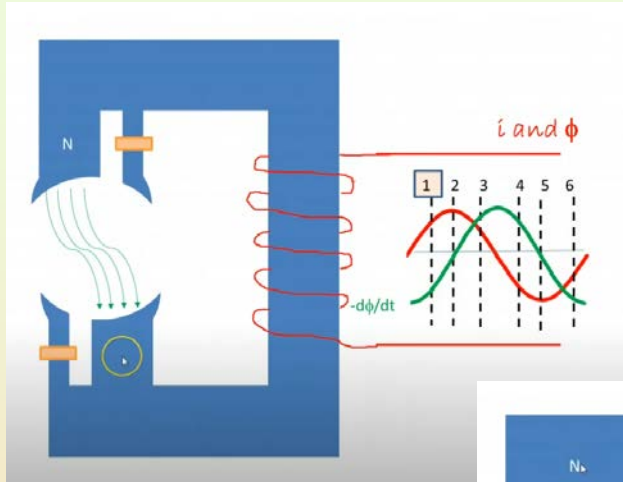
➤ Momentul t_1 : Atunci când curentul crește prin înfășurarea statorică, fluxul ce ia naștere în miezul magnetic se închide cu precădere prin partea necranată a polului. Acest lucru se datorează faptului că în spira în scurtcircuit se induce un curent care creează un flux ce se opune „cauzei care l-a produs”, adică fluxului înfășurării statorice.

➤ Momentul t_2 : Curentul este maxim, $d\Phi/dt$ devine zero iar curentul indus în spira în sc. devine și el zero. Fluxul principal se închide prin ambele porțiuni ale polului dar rezultanta se deplasează (fig. b) către dreapta.

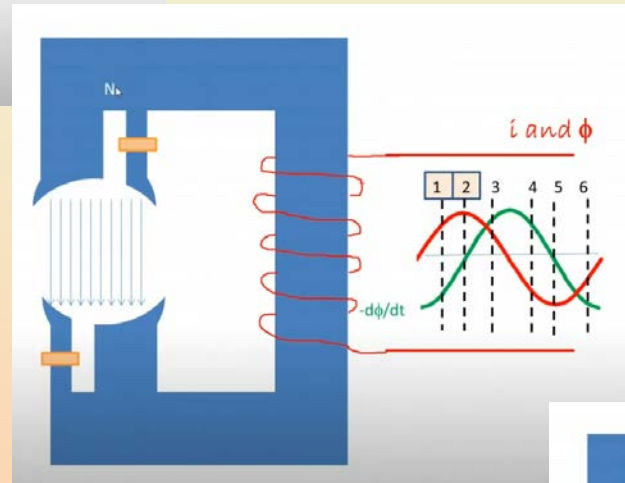
➤ Momentul t_3 : Acum curentul este în scădere prin înfășurarea statorică iar curentul indus în spira în sc. creează un flux care se adună cu fluxul principal. Rezultanta celor două fluxuri este deplasată din nou spre dreapta.

➤ Urmează schimbarea polarității curentului iar etapele se repetă pe polul următor.

Motor cu spira în scurtcircuit - *Principiu de funcționare*

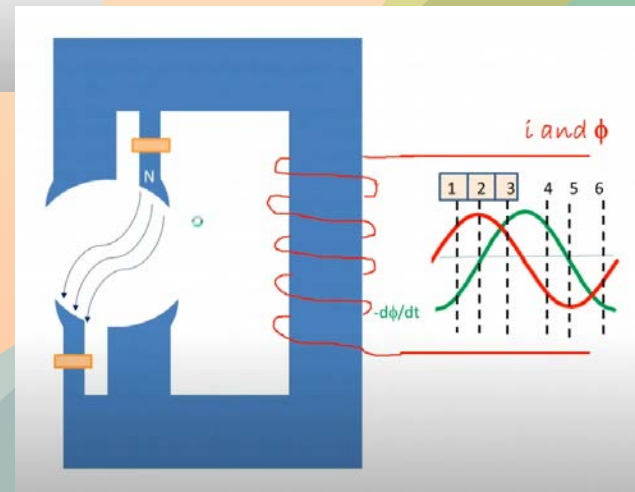


➤ Momentul t_1 : Flux maxim prin partea neecranată.

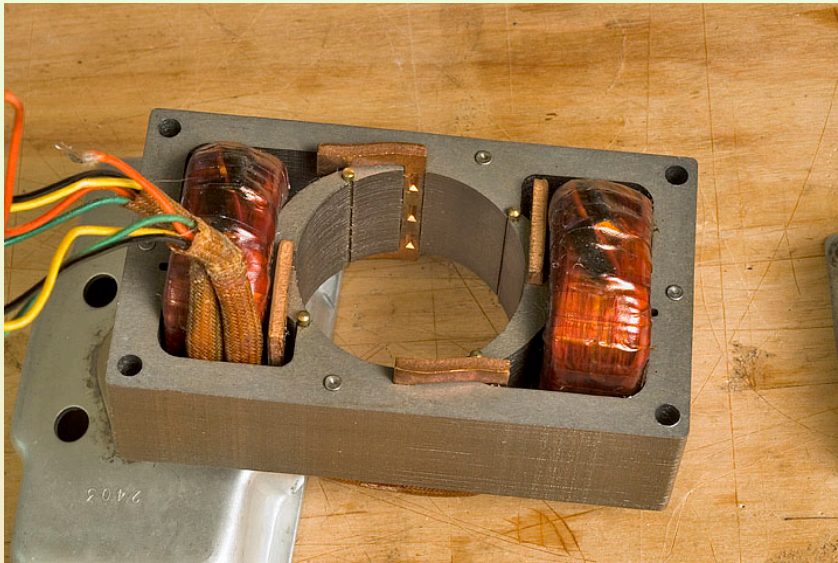


➤ Momentul t_2 : Flux distribuit pe ambele părți ale polului statoric.

➤ Momentul t_3 : Flux maxim pe partea ecranată.



Motor cu spira în sc cu doua bobine inductoare



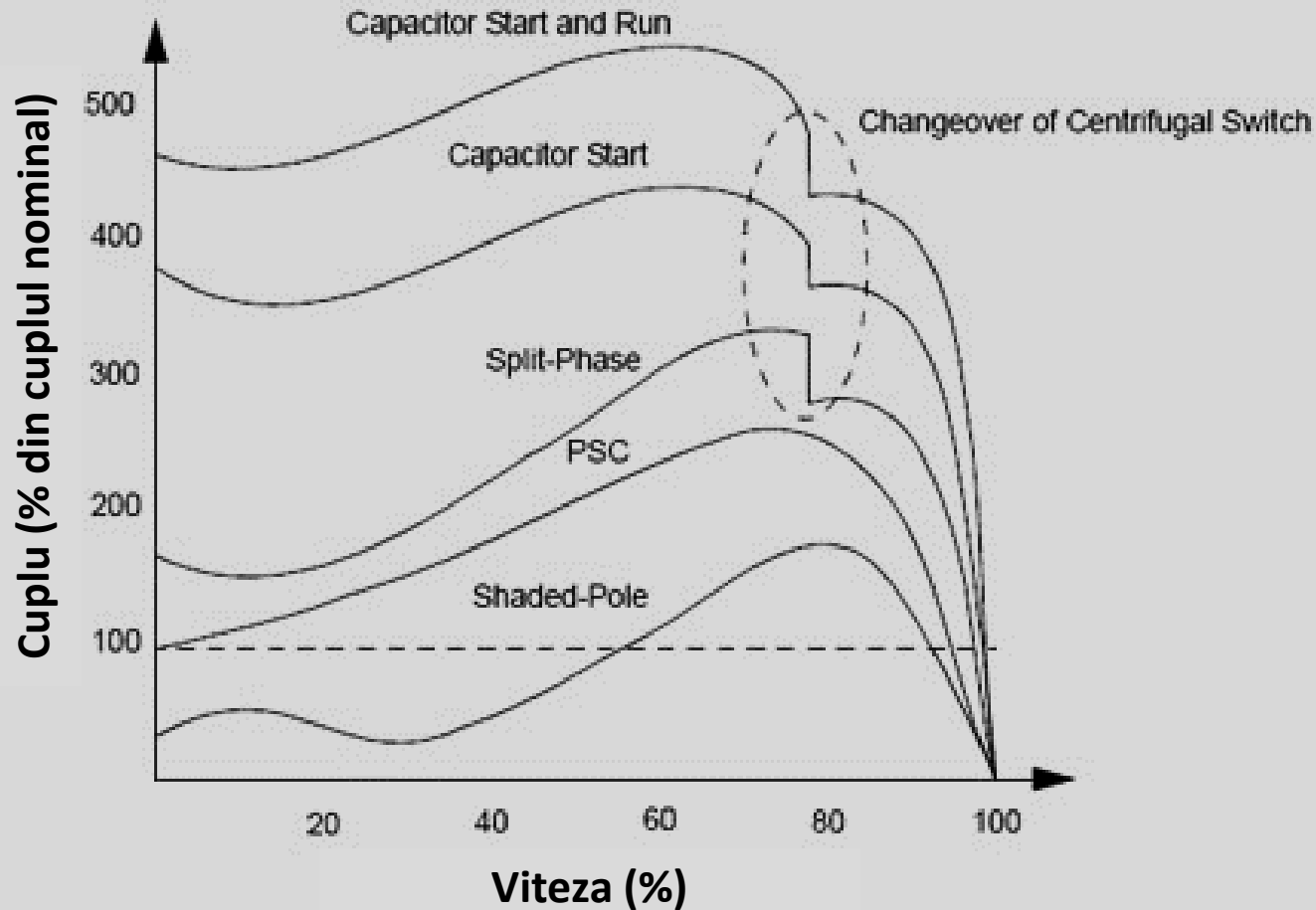
Motor cu spira în sc cu o singura bobina inductoare



Motor cu spira în sc cu $P=1\text{kW}$

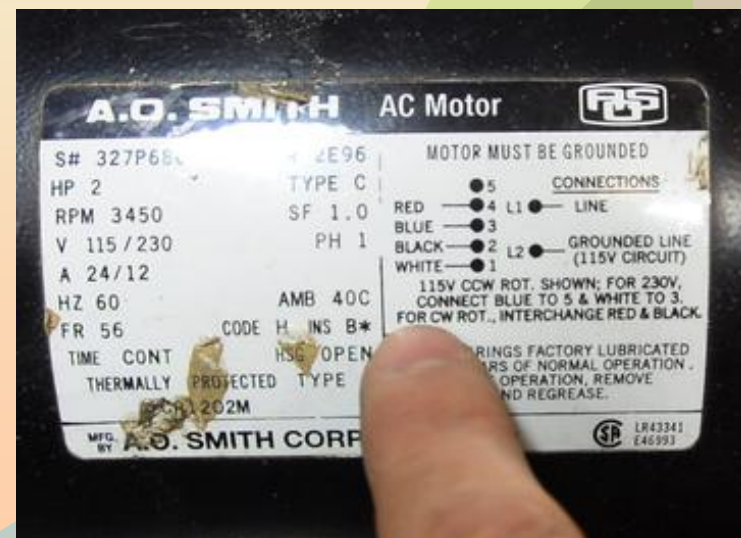
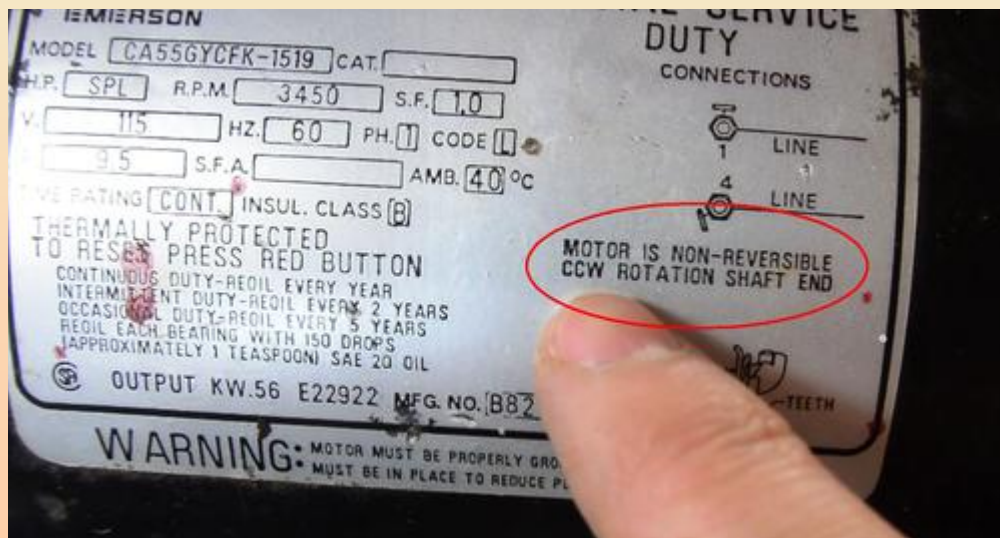
MOTOR TYPE	SPLIT-PHASE	CAPACITOR-START	PERMANENTLY SPLIT CAPACITOR	CAPACITOR START-CAPACITOR RUN	SHADED POLE
DESCRIPTION	Start winding connected in parallel with main winding, connection controlled by centrifugal switch or relay.	Identical to the split-phase design except includes the addition of a capacitor in series with the start winding circuit.	Start winding permanently connected in parallel to main winding with a continuous duty capacitor in the circuit at all times.	Combination of capacitor-start and PSC type motor. Start winding permanently connected in parallel to main winding with a continuous duty capacitor in the circuit at all times and capacitor in series with the start winding circuit.	Single main winding with shading coils for providing starting torque.
HP RANGE	1/6 to 1	1/4 to 2	1/100 to 1	3/4 to 20	1/1000 to 1/4
TYPICAL RATED SPEED (60 HZ)	860, 1140, 1725, 3450	860, 1140, 1725, 3450	1050, 1625, 3250	1725, 3450	1050, 1550, 3100
EFFICIENCY RANGE	50 to 60%	50 to 60%	55 to 65%	55 to 65%	20 to 40%
POWER FACTOR	60 to 70%	60 to 70%	80 to 100%	80 to 100%	50 to 60%
STARTING TORQUE (% OF FULL LOAD)	100%	Up to 300%	50 to 80%	Up to 300%	40 to 50%
TYPICAL APPLICATION	Suitable for frequent starting of fans in both direct and belt driven units.	All-purpose motor for high starting torque, low starting current used in both direct and belt driven units.	Intended for direct drive models and applications requiring speed control.	All-purpose motor for high starting torque, low starting current used mainly in larger belt driven units.	Suitable for direct drive low power fans and multi-speed applications.
ADVANTAGES	<ul style="list-style-type: none"> a. Good starting torque. b. Medium efficiency. 	<ul style="list-style-type: none"> a. High starting torque. b. Lower starting current than split phase design. 	<ul style="list-style-type: none"> a. High running efficiency. b. Capable of multi-speed operation. c. Can be used with speed control devices (i.e., triacs). d. Quietest of all small induction motors. 	<ul style="list-style-type: none"> a. High starting torque. b. Lower starting current than split-phase design. c. Available in larger HP sizes than capacitor-start or PSC motor types. d. High running efficiency. 	<ul style="list-style-type: none"> a. Inexpensive to manufacture. b. Multi-speed operation. c. Compact.
DISADVANTAGES	<ul style="list-style-type: none"> a. Not suited for high starting torque loads. b. Not applicable for speed control. c. High starting current 	<ul style="list-style-type: none"> a. More expensive than split-phase design. b. Not applicable for speed control. 	<ul style="list-style-type: none"> a. Low starting torque. b. Speed varies more under load. 	<ul style="list-style-type: none"> a. Most expensive single-phase motor type. b. Not applicable for speed control. 	<ul style="list-style-type: none"> a. Low efficiency. b. Low starting torque.

Curbele M=f(s) pentru diverse tipuri de motoare asincrone monofazate

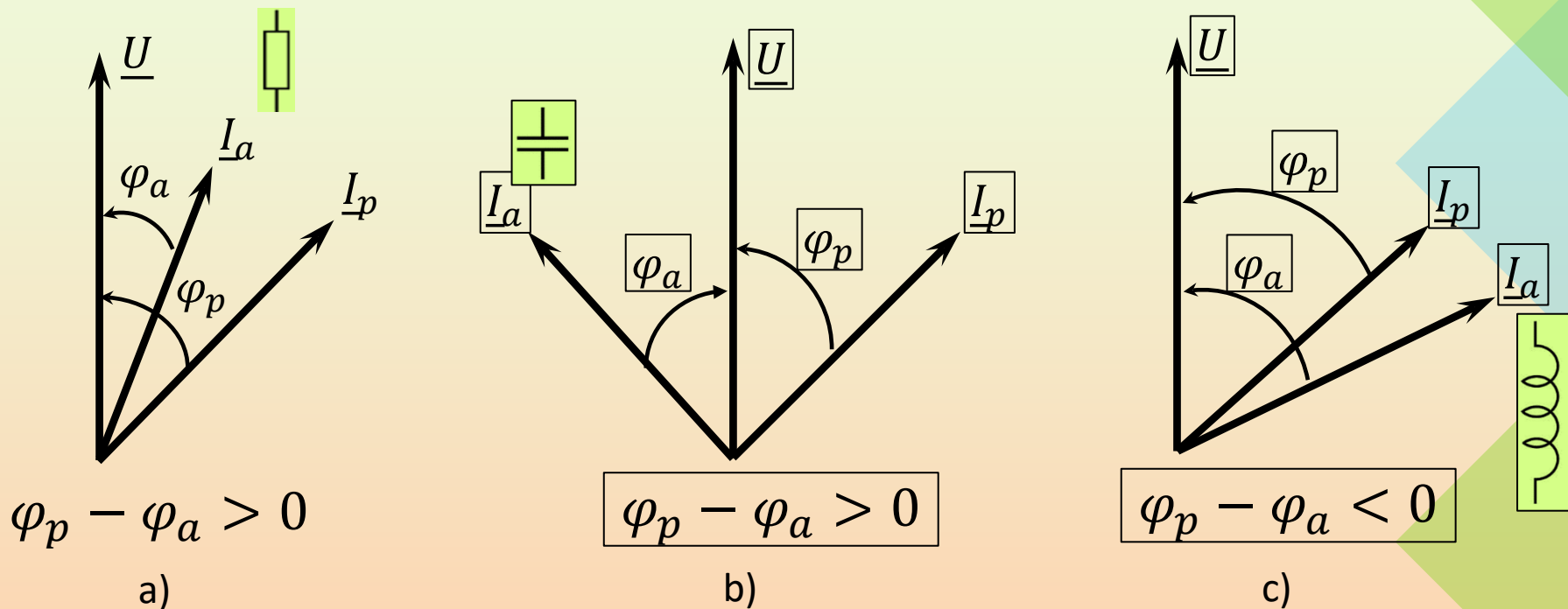


Inversarea sensului de rotație la motorul asincron monofazat

1. Schimbarea sensului curentului prin una dintre cele două faze (fie prin faza principală fie prin faza auxiliară). Pentru acest lucru este necesar ca mașina să aibă scoase la borne toate cele 4 capete ale înfășurărilor).

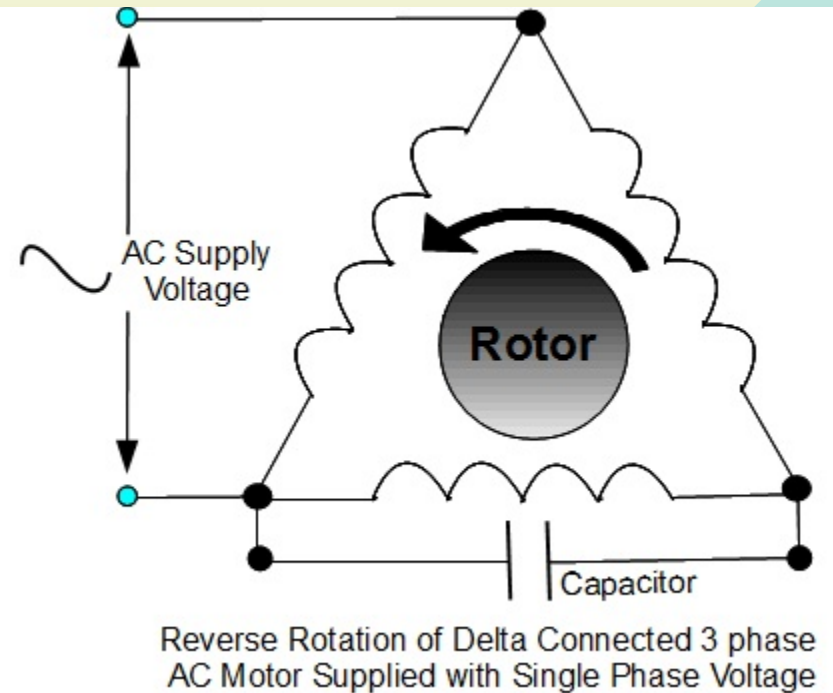
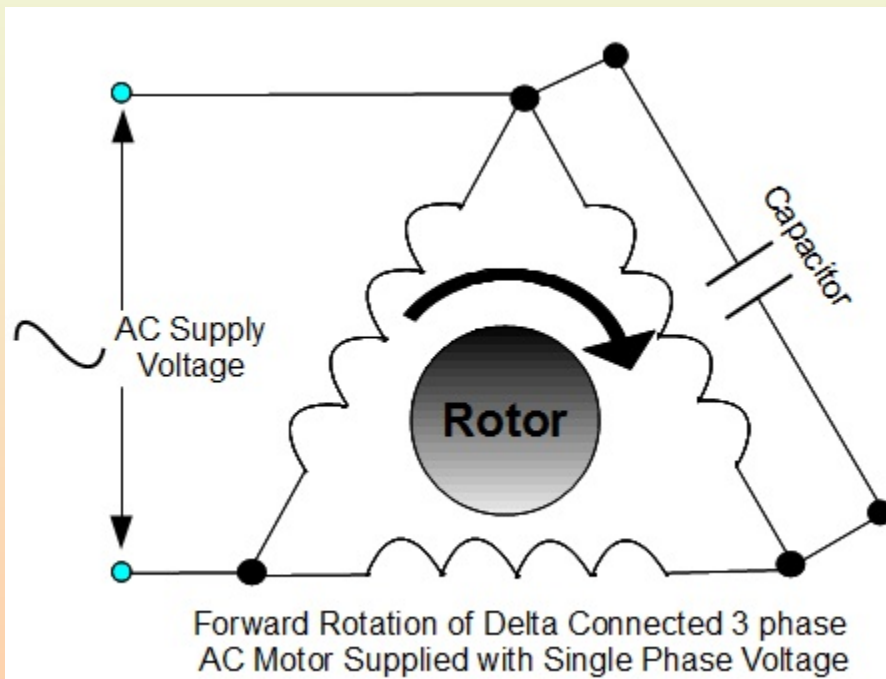


2. Prin schimbarea defazorului (un condensator sau o rezistență folosite ca element defazor se înlocuiesc cu o bobină).

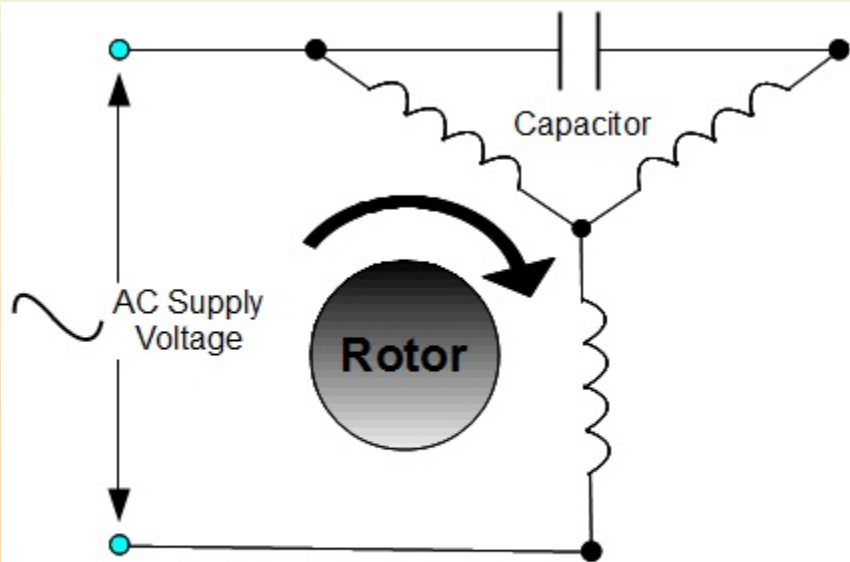


Se remarcă din diagramele fazoriale că defazajul produs de prezența rezistenței sau a condensatorului este pozitiv iar în cazul bobinei, acesta este negativ. Drept consecință, introducerea unui condensator sau a unei rezistențe ca element defazor determină un anumit sens de rotație, iar introducerea bobinei determină un sens de rotație invers.

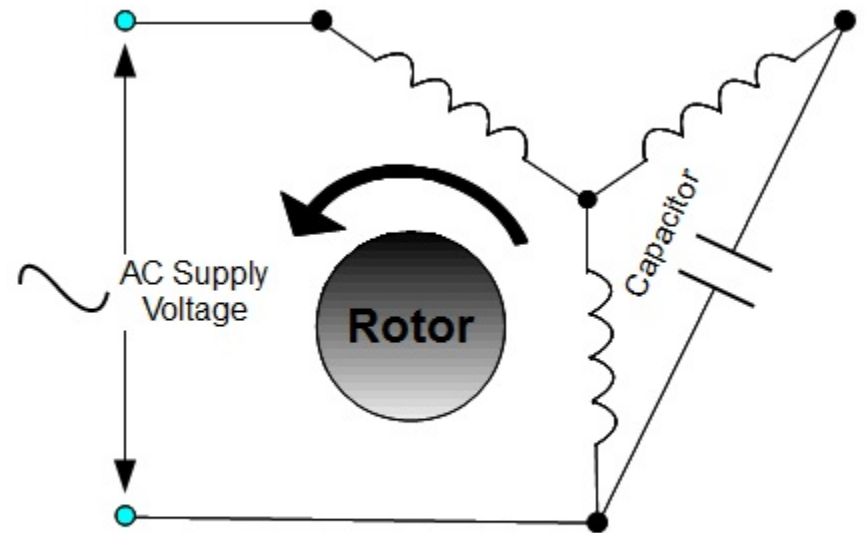
Funcționarea mașinii trifazate (având conexiunea Δ) conectată la o sursă monofazată



Funcționarea mașinii trifazate (având conexiunea Y) conectată la o sursă monofazată



Forward Rotation of Star Connected 3 phase AC Motor Supplied with Single Phase Voltage



Reverse Rotation of Star Connected 3 phase AC Motor Supplied with Single Phase Voltage

Funcționarea mașinii trifazate conectată la o sursă monofazată

Orice mașină asincronă trifazată poate funcționa și dacă este alimentată de la o sursă de tensiune monofazată. Pentru aceasta este suficientă conectarea a două dintre borne la rețeaua monofazată și introducerea unei impedanțe defazoare (de ex. un condensator) între una dintre cele două borne alimentate și cea de-a treia bornă rămasă liberă.

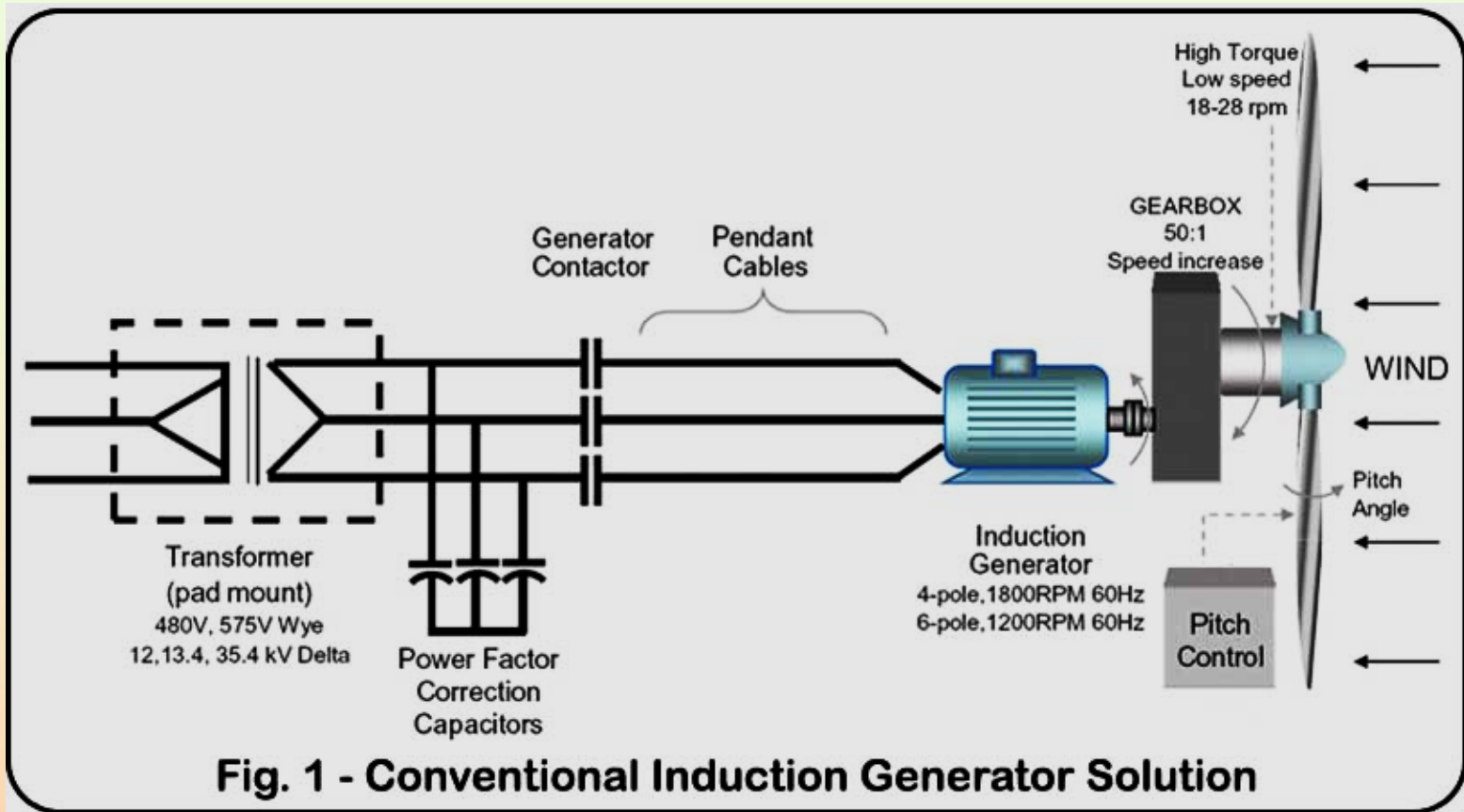
Consecințe:

- scade puterea mașinii cu cel puțin $1/3$
- scade viteza rotorului (crește alunecarea)
- scade randamentul
- scade capacitatea de suprasarcină
- scade cuplul de pornire
- crește înclinarea caracteristicii mecanice (viteza scade mai repede odată cu creșterea sarcinii)
- scade factorul de putere



Generatorul Asincron

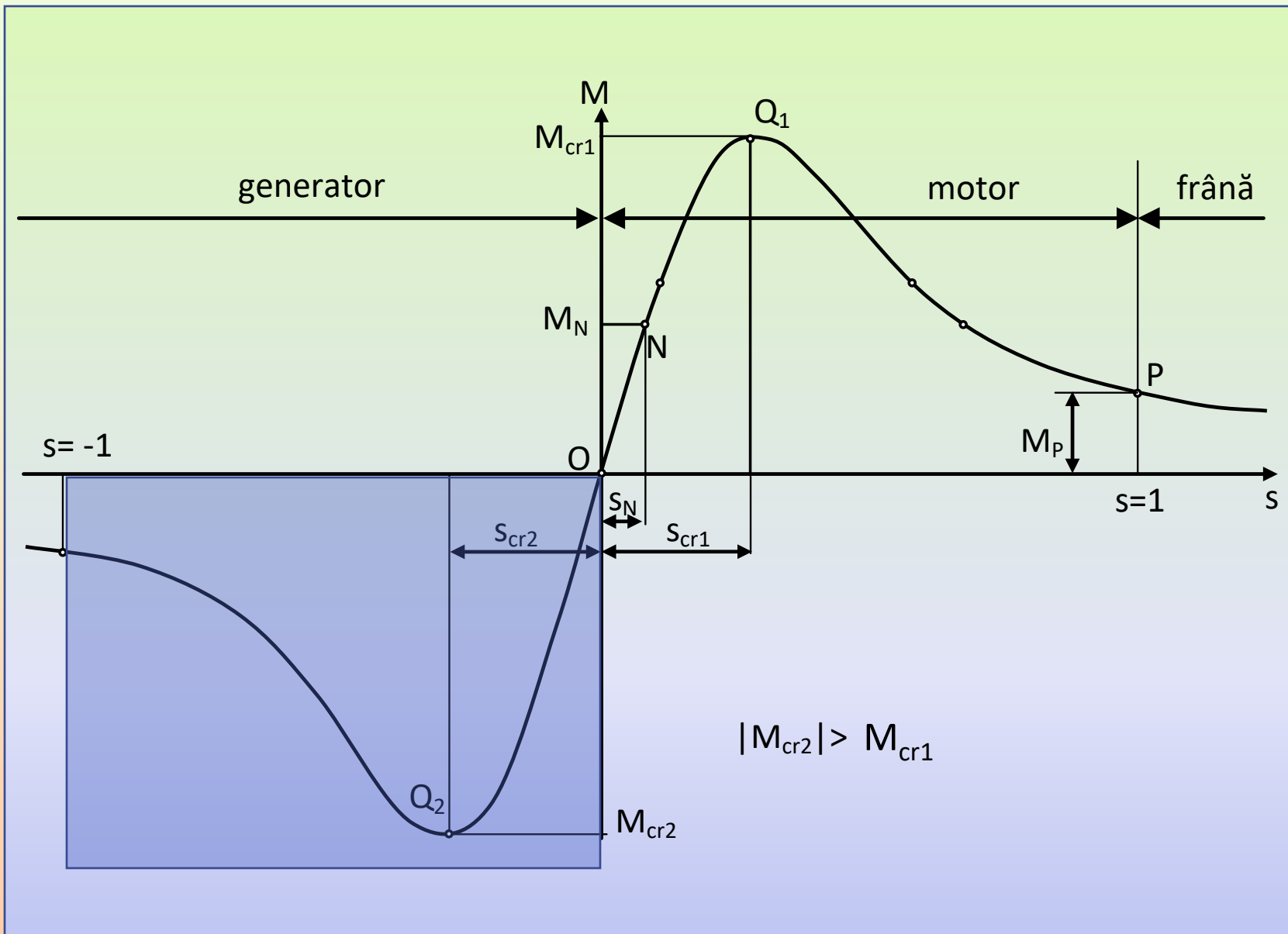




Sistem de producere a energiei electrice, bazat pe forța vântului, cu generator asincron

Particularități de funcționare în regim de generator

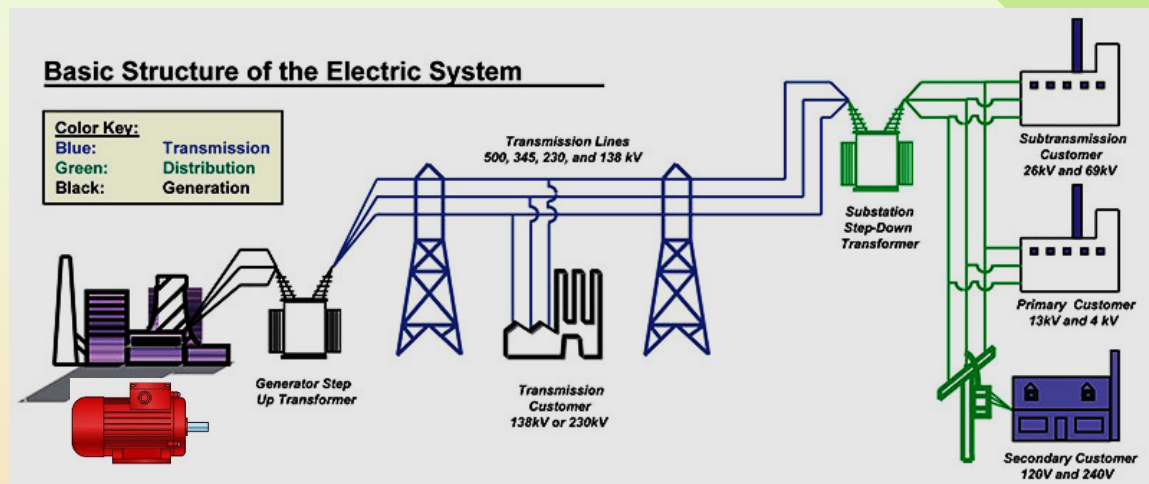
1. **Mașina este antrenată din exterior și primește energie mecanică pe la arbore, respectiv furnizează energie electrică pe la borne;**
2. **Viteza rotorului este MAI MARE decât viteza de sincronism. Prin urmare: $n > n_1$ și $s < 0$.**



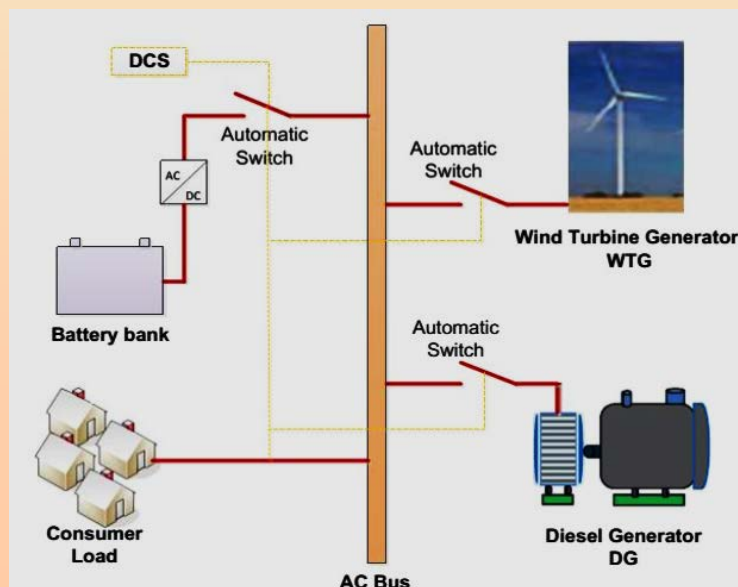
Funcționarea în regim de generator este reprezentată de curba din cadranul 3.

Tipuri de funcționare a generatorului asincron

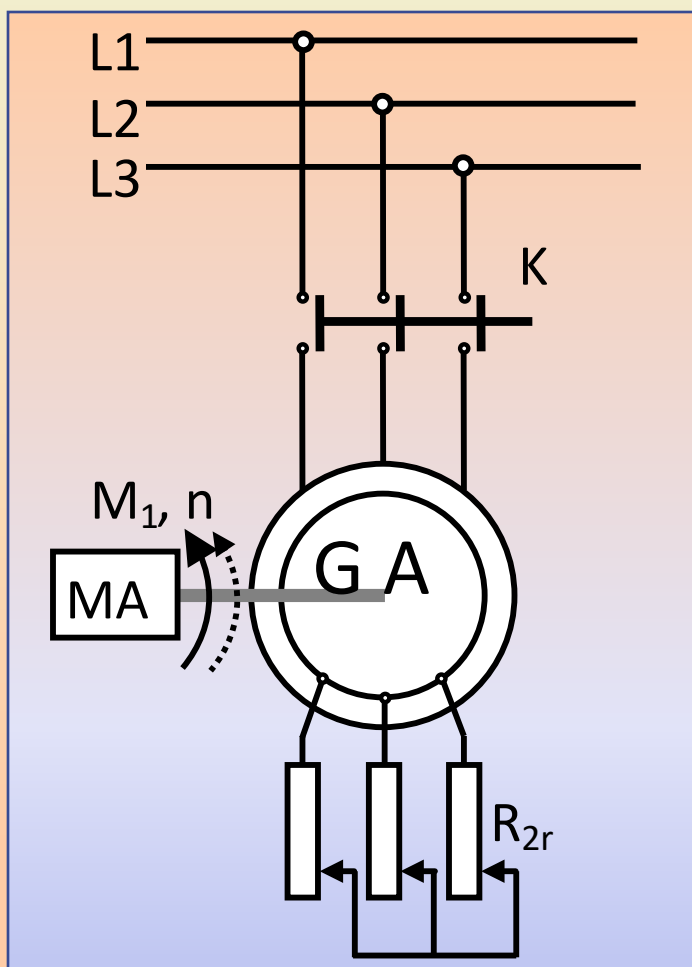
Conectare la rețea de putere
infinită



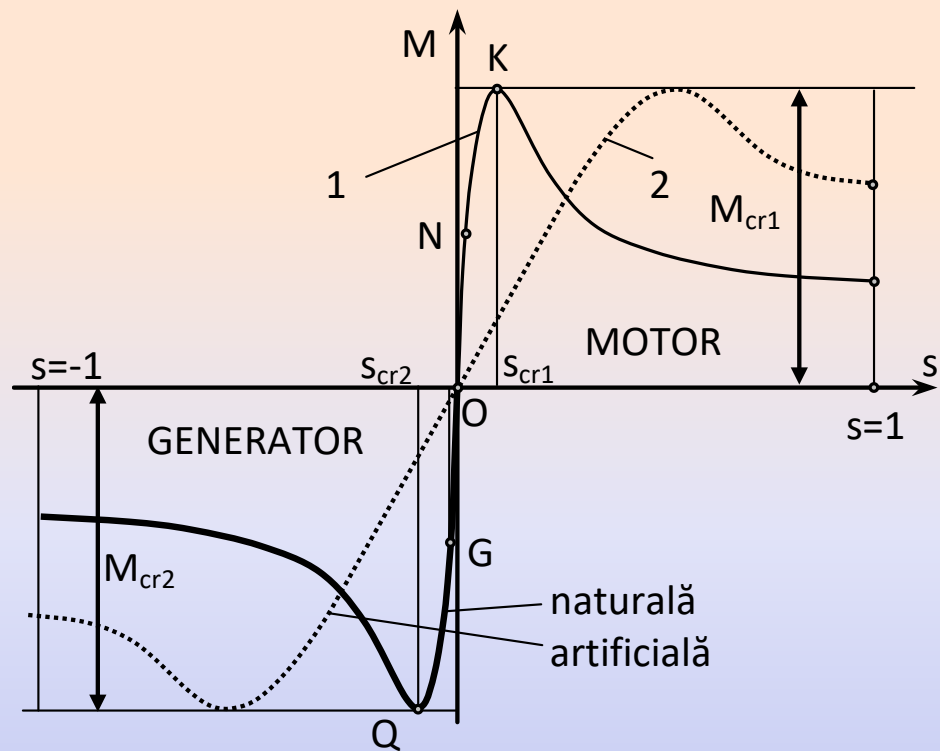
Funcționare independentă



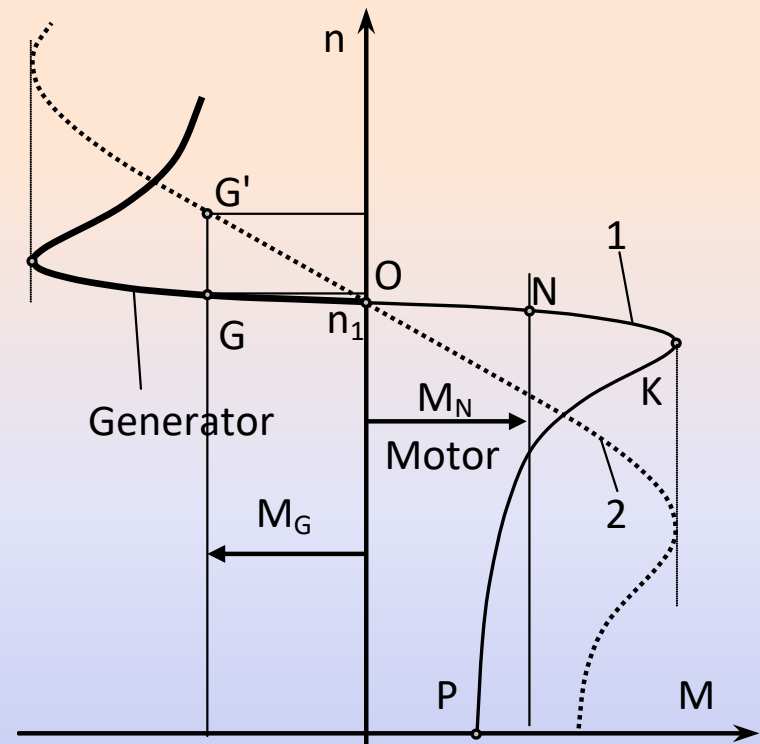
Generatorul asincron conectat la rețea



1. Mașina asincronă conectată la rețea funcționează ca generator atunci când viteza rotorului este **MAI MARE** decât viteza de sincronism.
2. Generatorul asincron **ABSOARBE** putere reactivă de la rețea și totodată furnizează rețelei putere activă.
3. Puterea furnizată rețelei **CREȘTE** odată cu turația mașinii.
4. Tensiunea și frecvența la bornele generatorului rămân constante, indiferent de viteză, și egale cu cele ale rețelei.



Caracteristica $M=f(s)$

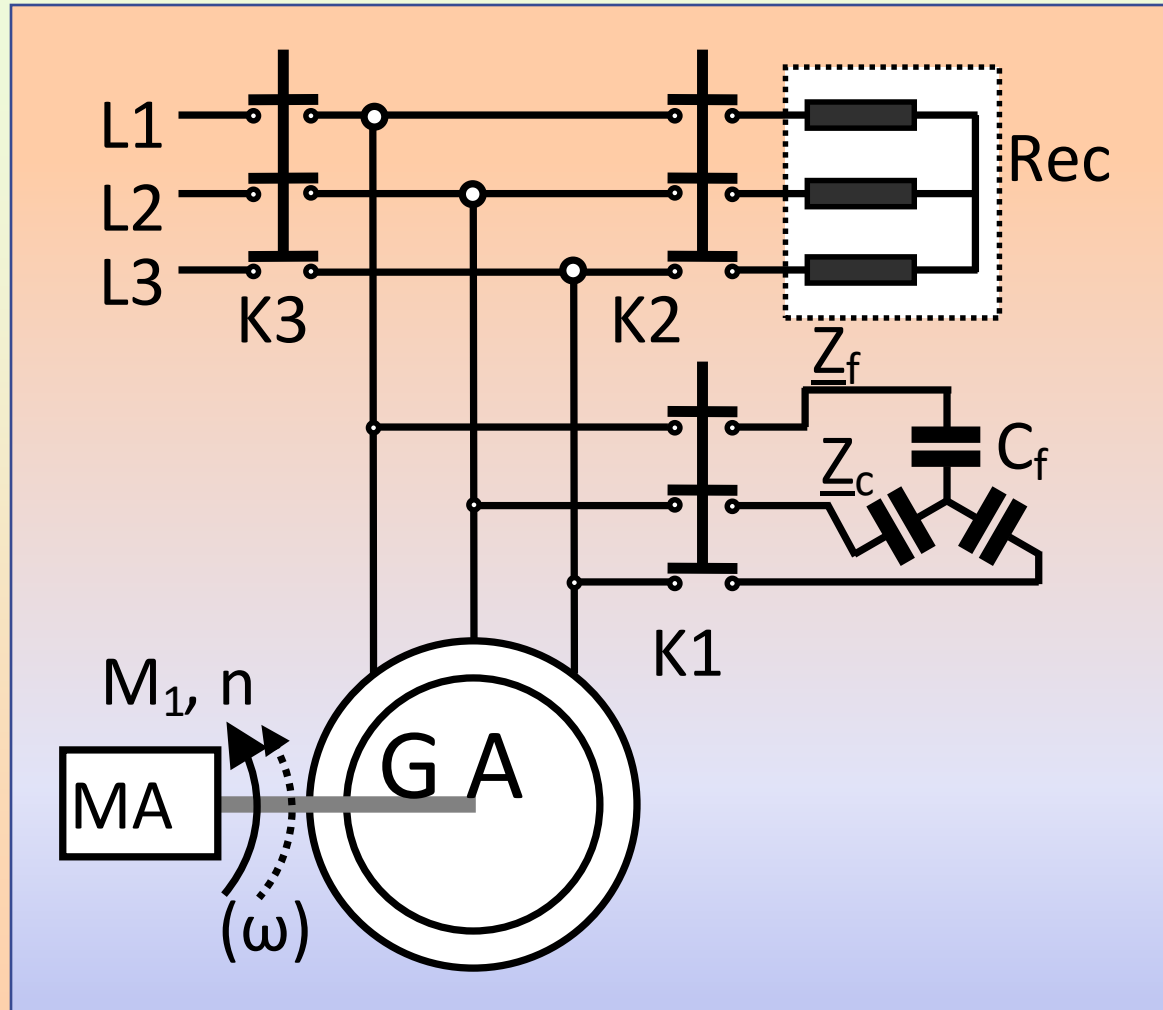


Caracteristica mecanică $n=f(M)$

Caracteristicile artificiale (2) se pot obține NUMAI la mașinile cu rotor bobinat, prin modificarea rezistenței conectată în rotor.

Creșterea rezistenței rotorice permite ca, odată cu creșterea vitezei de rotație să mențină cuplul electromagnetic dezvoltat (cuplu ce se opune mișcării rotorului) la aceeași valoare (vezi punctele G și G' de pe caracteristica mecanică).

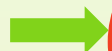
Generatorul asincron independent



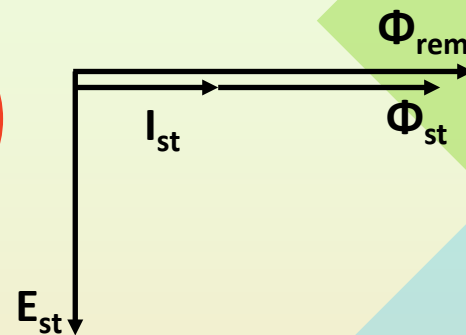
Funcționarea mașinii asincrone ca generator independent (rețea locală sau funcționare individuală) este posibilă numai dacă mașina are posibilitatea să se „amorseze”.

Condiții preliminare indispensabile

Amorsare



Magnetism remanent
Baterie de condensatoare



Fenomenul de *amorsare* înseamnă apariția tensiunii la bornele generatorului odată cu rotirea rotorului. Acest lucru este posibil NUMAI dacă există un magnetism remanent în circuitul magnetic rotoric (rămas de la o funcționare anterioară a mașinii).

Când rotorul este rotit, câmpul magnetic remanent devine unul învârtitor, variabil, și conform legii inducției electromagnetice, induce o tensiune E_{st} în înfășurarea statorică (aceasta este defazată cu 90° în urma fluxului remanent Φ_{rem}).

Prezența bateriei de condensatoare închide circuitul statoric și determină apariția unui curent I_{st} . Acesta este defazat în avans față de tensiunea E_{st} cu un unghi de 90° (situația ideală).

Curentul astfel creat, mic ca valoare întrucât și tensiunea indusă de câmpul remanent este mică, creează un flux, coliniar cu curentul I_{st} dar și cu fluxul remanent, Φ_{rem} .

Cele două fluxuri se adună rezultând un flux general în mașină mai mare. Se induce deci o tensiune mai mare. Curentul I_{st} crește și odată cu el, din nou fluxul Φ_{st} . Fenomenul se repetă până la stabilizare.

Rolul condensatorului

1. Defazează curentul I_{st} în avans față de tensiunea indusă astfel încât fluxul creat de înfășurarea statorică să se ADUNE cu fluxul remanent.
2. Furnizează energie reactivă mașinii asincrone pentru magnetizarea circuitului magnetic.

Particularități de funcționare

1. Mașina poate trece în regim de generator și la viteze mai mici decât viteza de sincronism, în funcție de valoarea bateriei de condensatoare.
2. Tensiunea și frecvența la bornele generatorului sunt variabile în funcție de turația rotorului.

Condiții de amorsare

Curba 1 – reprezintă dependența $\omega\tilde{L}_m I = f(I)$

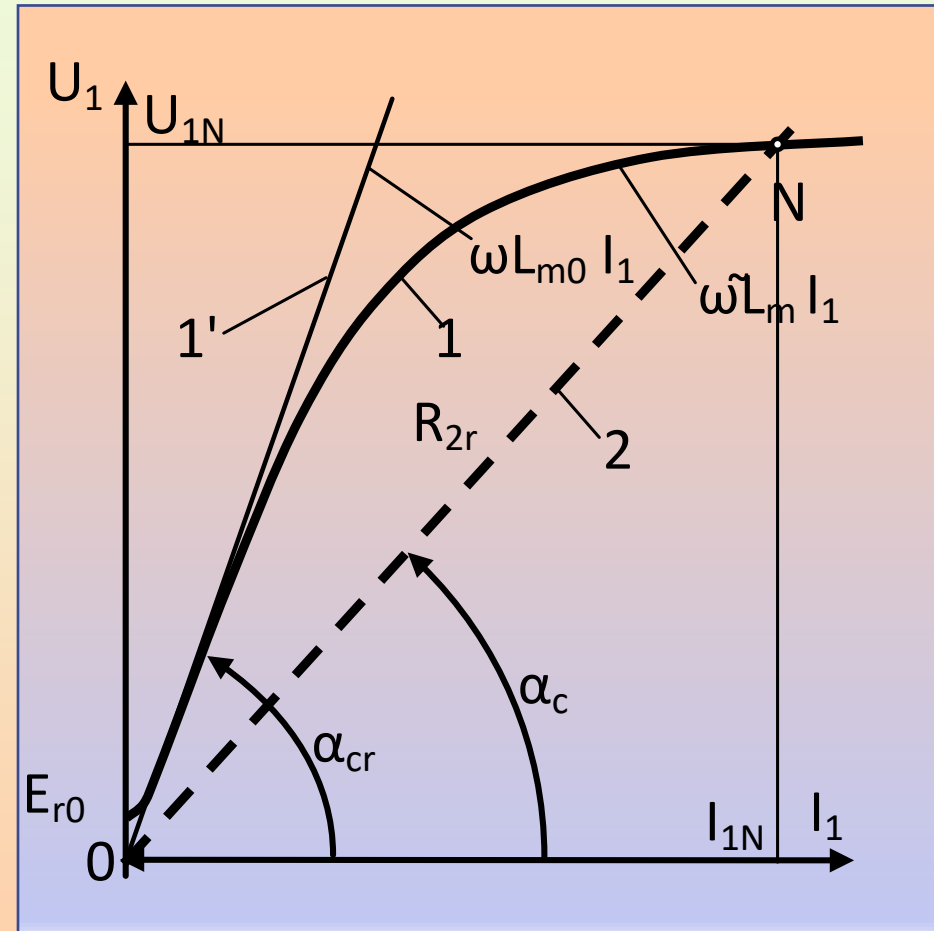
Curba 2 – reprezintă caracteristica tensiune - curent a condensatorului montat la bornele generatorului și este dictată în principal de valoarea condensatorului

Intersecția celor două caracteristici determină punctul de funcționare a generatorului – punctul N

Curba 1' – este caracteristica limită a condensatorului pentru care poate avea loc amorsarea.

Pentru a avea loc amorsarea, valoarea condensatorului trebuie să îndeplinească condiția:

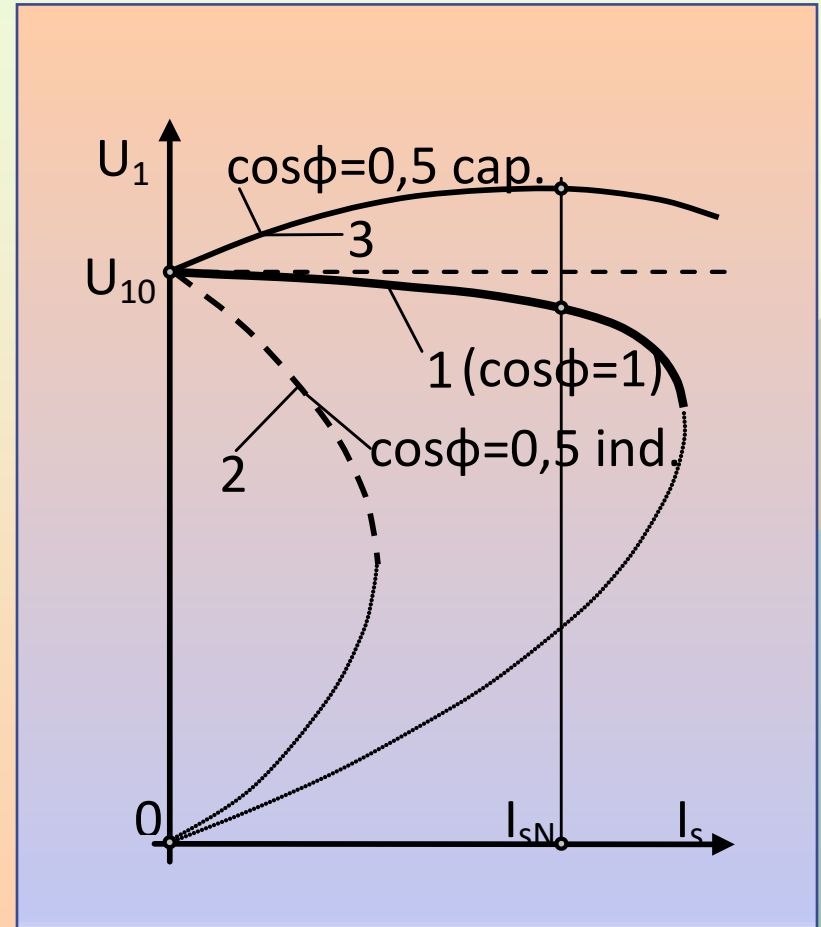
$$\alpha_C < \alpha_{cr} \longrightarrow C > \frac{1}{\omega^2 \cdot L_{m0}}$$

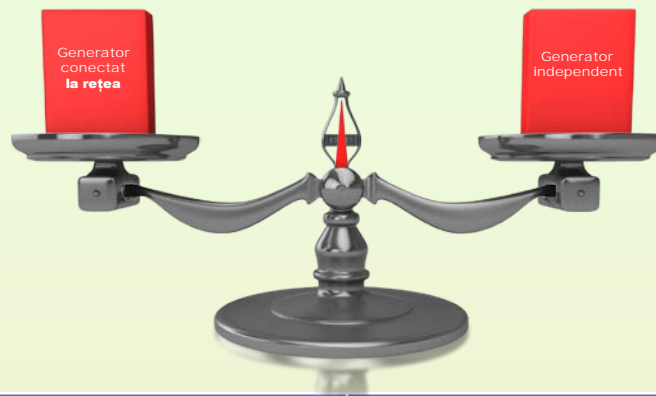


Caracteristici externe, $U=f(I_s)$

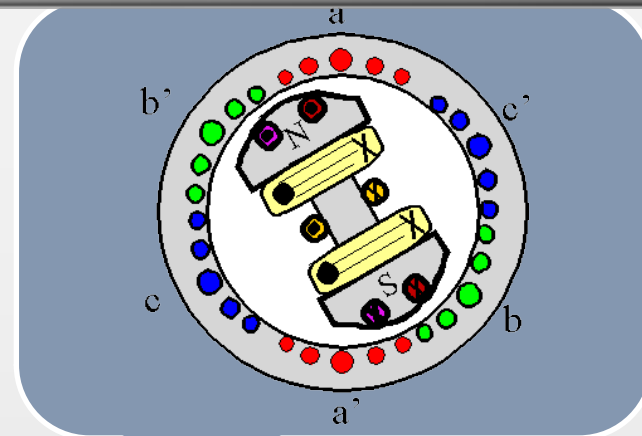
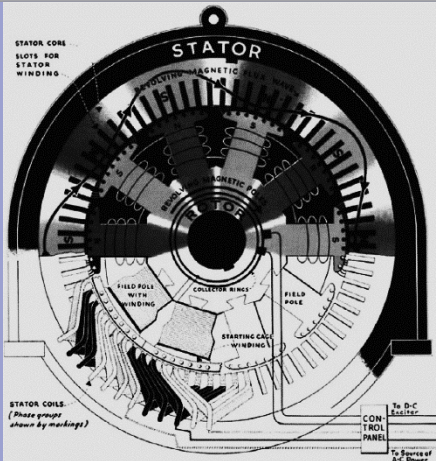
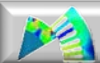
Variația tensiunii la bornele generatorului asincron autonom este puternic influențată de natura sarcinii (respectiv factorul ei de putere).

- Pentru sarcini puternic inductive, căderea de tensiune este extrem de accentuată și trebuie compensată prin creșterea turației generatorului (dacă acest lucru este posibil).
- La sarcini active (caracterizate doar de rezistența R), căderea de tensiune este rezonabilă.
- În cazul sarcinilor capacitive, are loc, o creștere a tensiunii la borne.





<i>Generator asincron conectat la rețea</i>	<i>Generator asincron independent</i>
Tensiune constantă la borne	Tensiune variabilă la borne
Frecvență constantă	Frecvență variabilă
Cedează putere activă și absoarbe putere reactivă	Amorsare Baterie de condensatoare
Puterea activă cedată este proporțională cu viteza	Puterea activă cedată este proporțională cu viteza



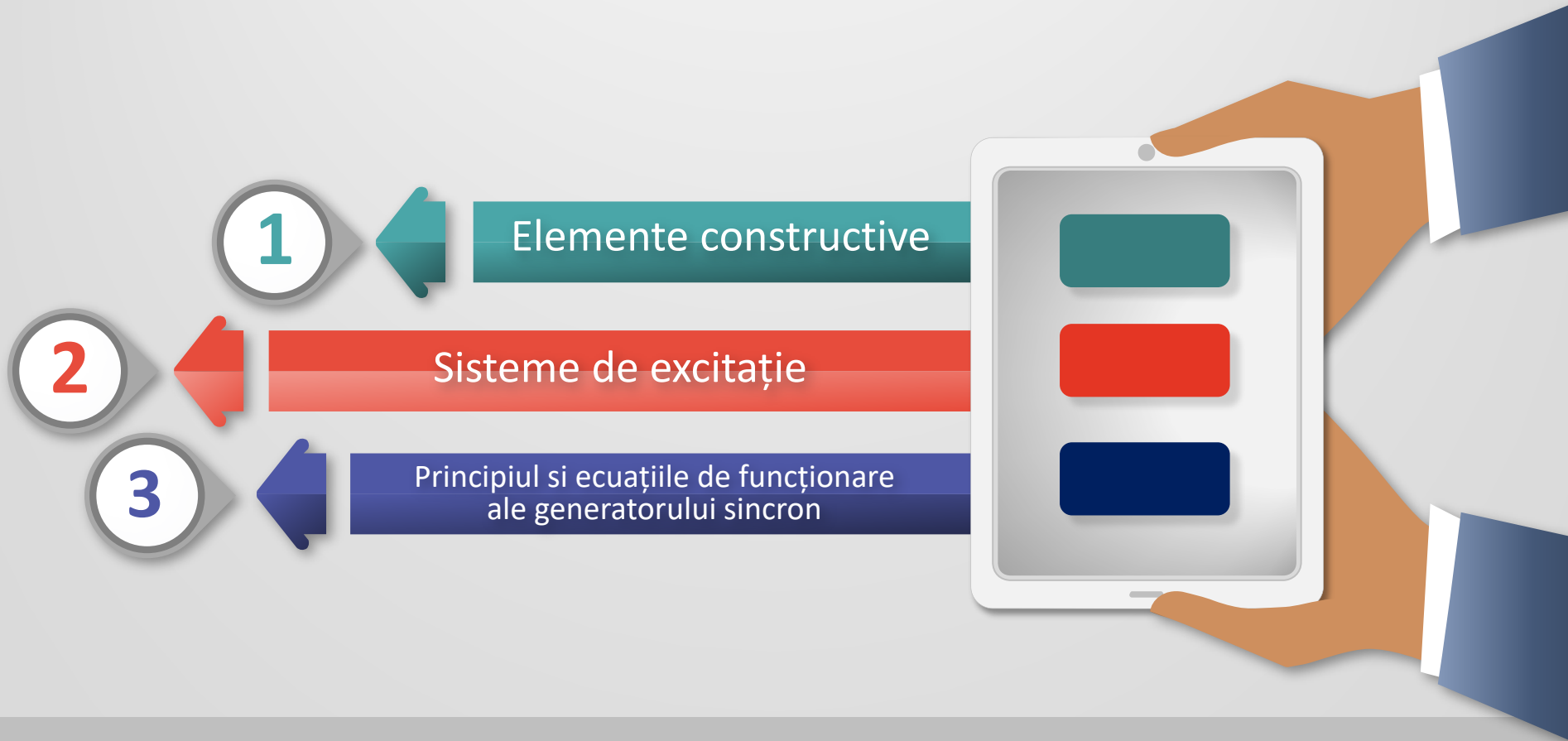
Curs 9

Maşina sincronă

SUBMIT



CUPRINS





„Mașina sincronă este o mașină de curent alternativ la care viteza rotorului NU variază cu sarcina și rămâne într-un raport constant cu frecvența rețelei la care este conectată”

ELEMENTE CONSTRUCTIVE

STATOR

Partea fixa a mașinii

1

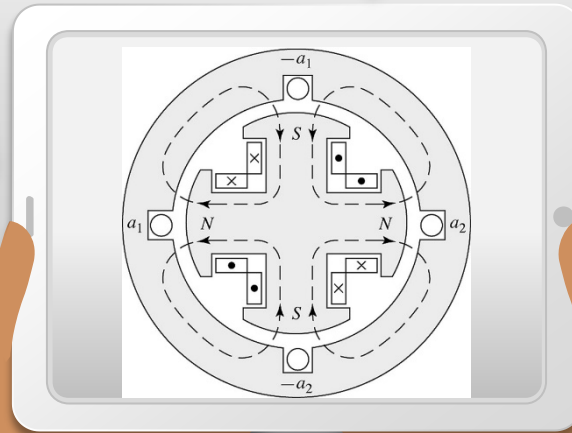
ROTOR

Partea mobila a mașinii

2

*Sistem de
excitație*

3

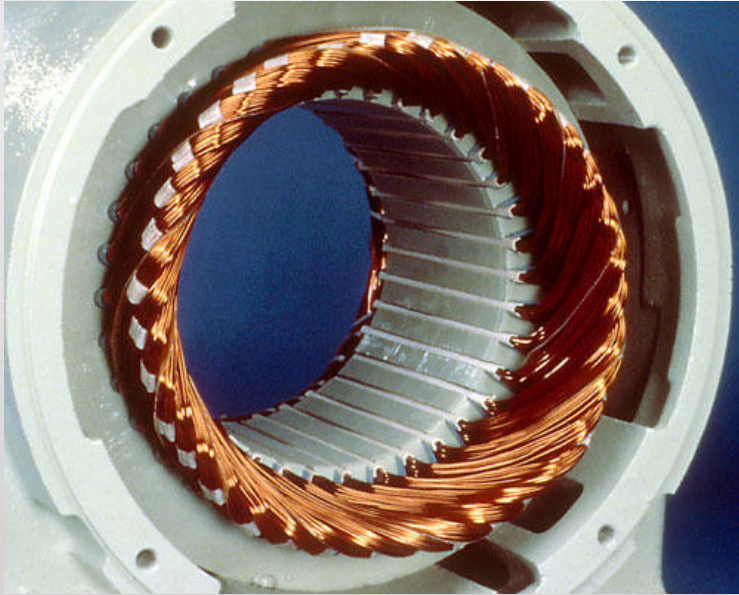


Accesorii

Carcasa, lagăre și
capace laterale, ax,
tălpi de susținere,
cutie de borne

Elemente constructive

Stator



Statorul mașinii sincrone este identic cu cel al mașinii asincrone.

- circuitul magnetic este realizat din tole împachetate axial;
- către întrefier sunt creștături uniform distribuite;
- înfășurarea statorică, realizată din conductor de cupru, este de tip repartizat.



**Miez
magnetic**



Infasurare

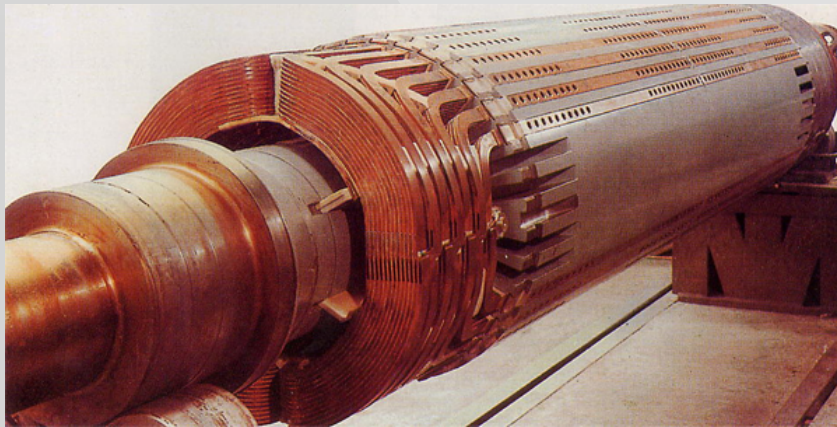
De regulă, statorul este INDUSUL mașinii sincrone.

Elemente constructive

Rotorul mașinii sincrone poate fi construit în două variante: rotor cilindric (sau cu poli înecați) și rotor cu poli aparenti.

Rotorul cilindric are creștături (similare celor de pe stator) în care este plasată o înfășurare de tip repartizat.

Rotorul cu poli aparenti este prevăzut cu piese feromagnetice (asemănătoare cu polii inductori de la mașina de c.c.) pe care sunt plasate înfășurări de tip concentrat.

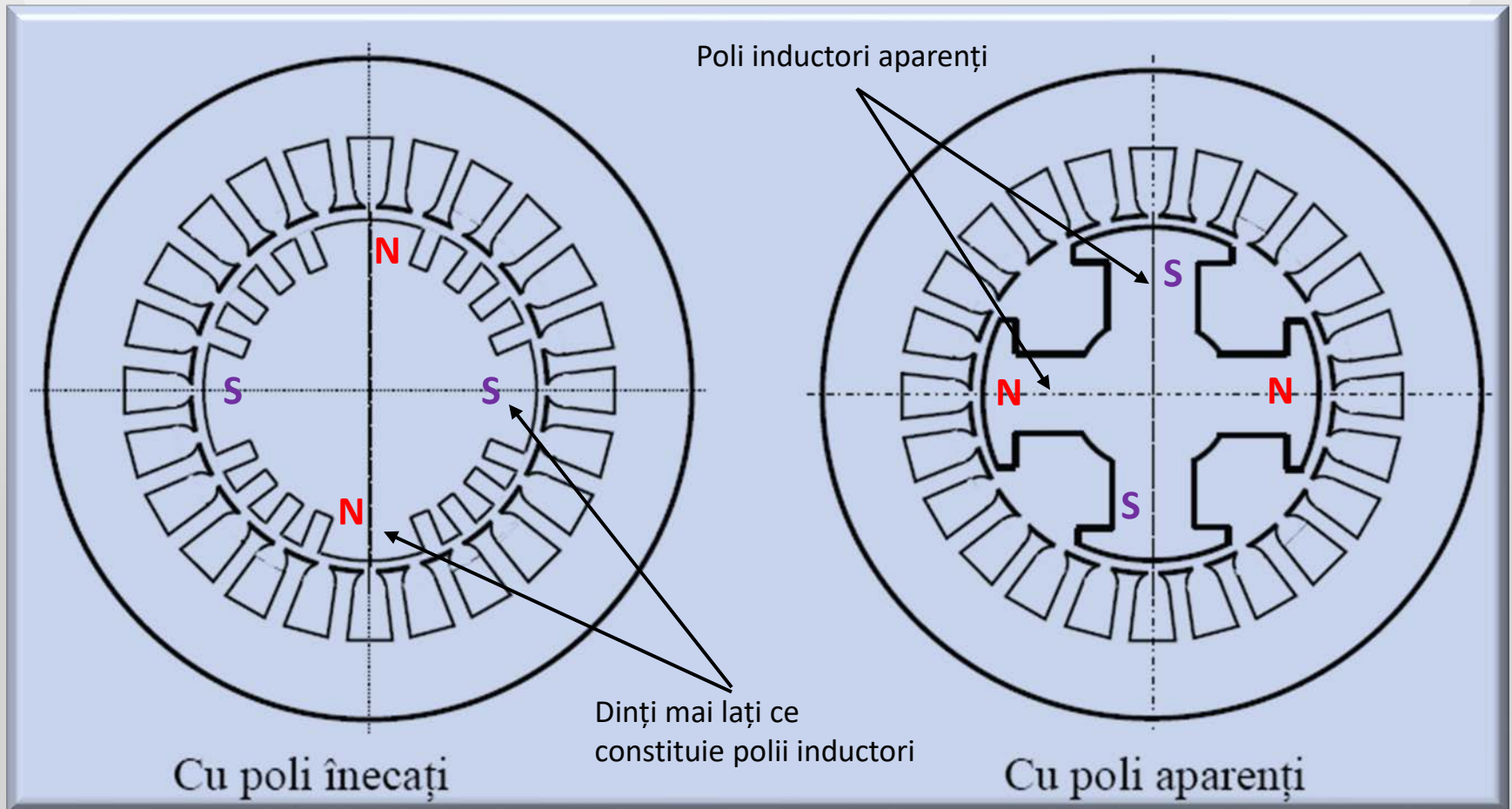


Rotor cu poli înecați



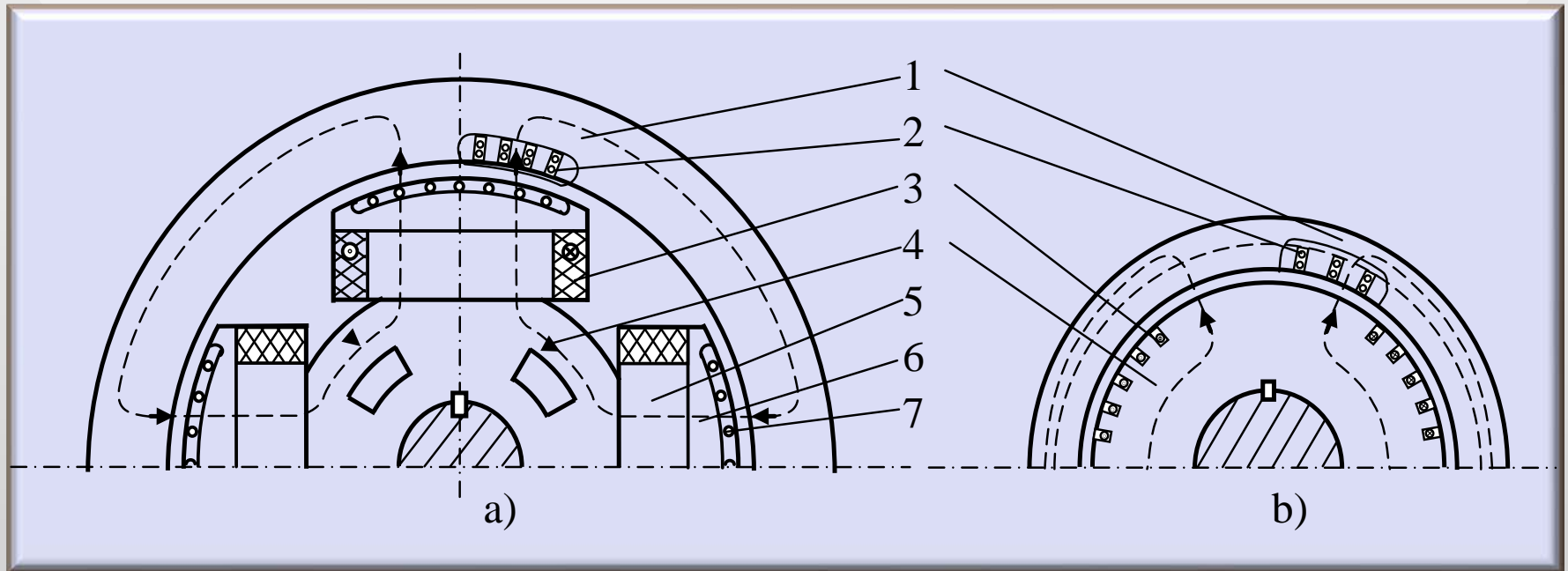
Rotor cu poli aparenti

Tipuri de mașini sincrone



- **Mașina cu poli înecați – are întrefier cvasi-constant**
- **Mașina cu poli aparenti – are întrefier variabil**

Tipuri de mașini sincrone



Elemente constructive de bază ale mașinilor sincrone:

a) cu poli aparenti, b) cu poli înecați.

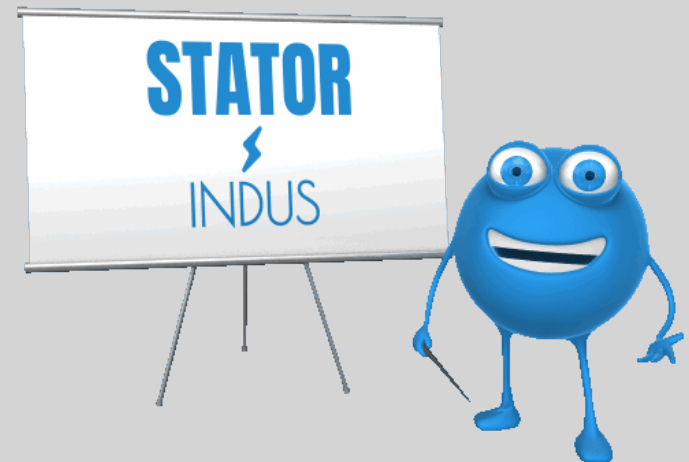
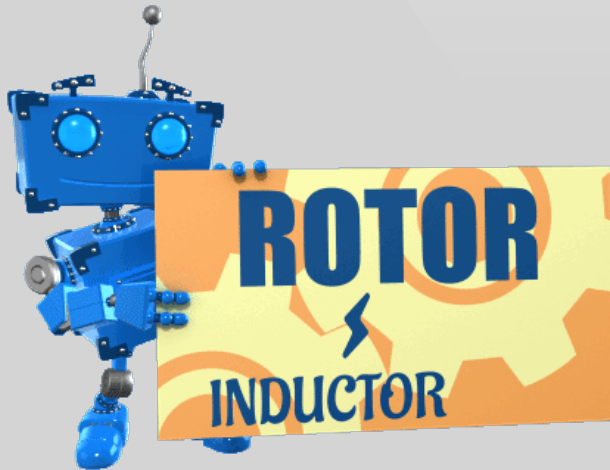
1. Jug statoric, 2. Înfășurare statorică (indusă), 3. Înfășurare rotorică (inductoare), 4. Jug rotoric, 5. Pol rotoric, 6. Piesă polară, 7. Înfășurare de pornire/amortizare

Înfășurarea rotorică

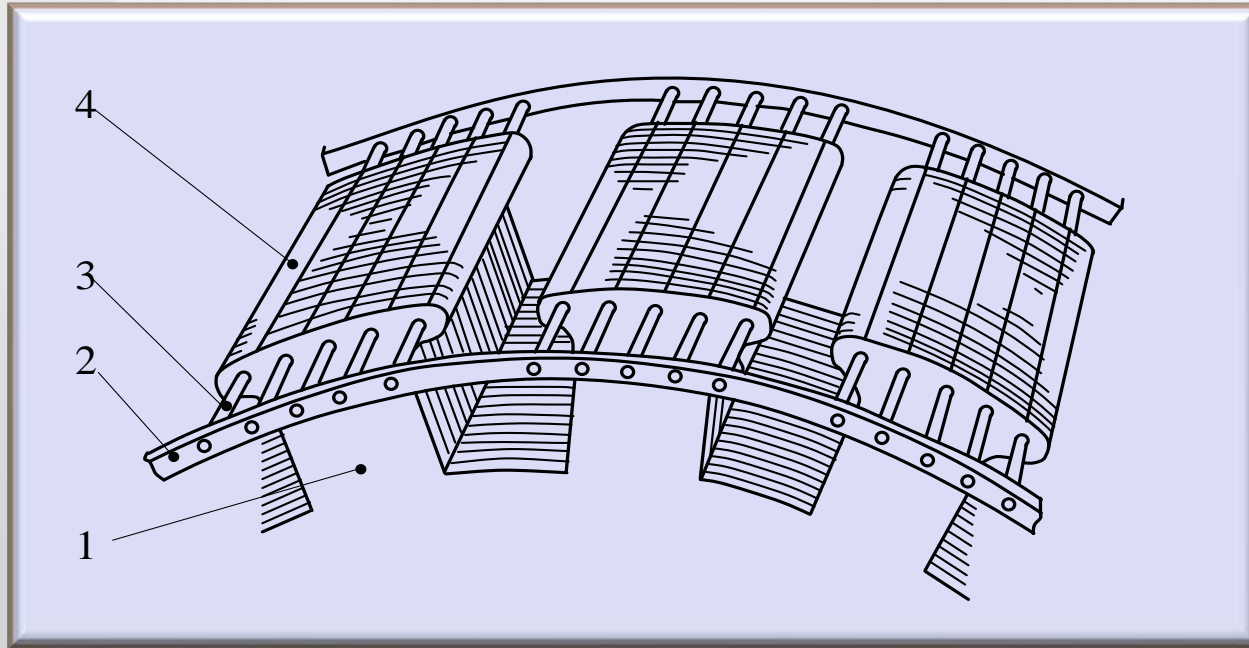
Indiferent de tipul de rotor, înfășurarea rotorică este alimentată în curent continuu. Drept urmare ea creează un câmp magnetic *constant* ca amplitudine și *fix* în spațiu.

Sensul curenților prin înfășurări determină polaritatea alternantă a polilor mașinii.

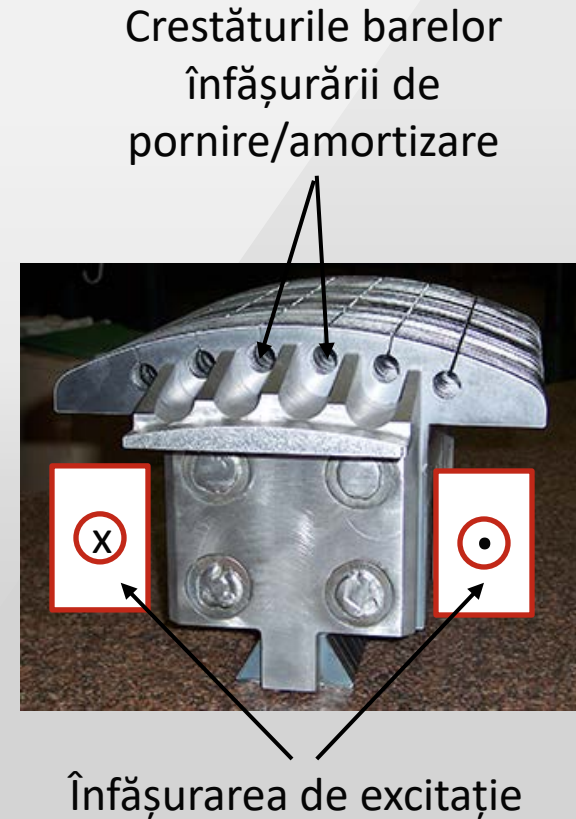
Câmpul creat de înfășurarea rotorică reprezintă câmpul inductor iar rotorul reprezintă inductorul mașinii.



Înfășurarea de pornire (de amortizare)



1- Miez pol rotoric, 2 – Inel de scurtcircuitare,
3 – Bară de colivie, 4 – Piesă polară



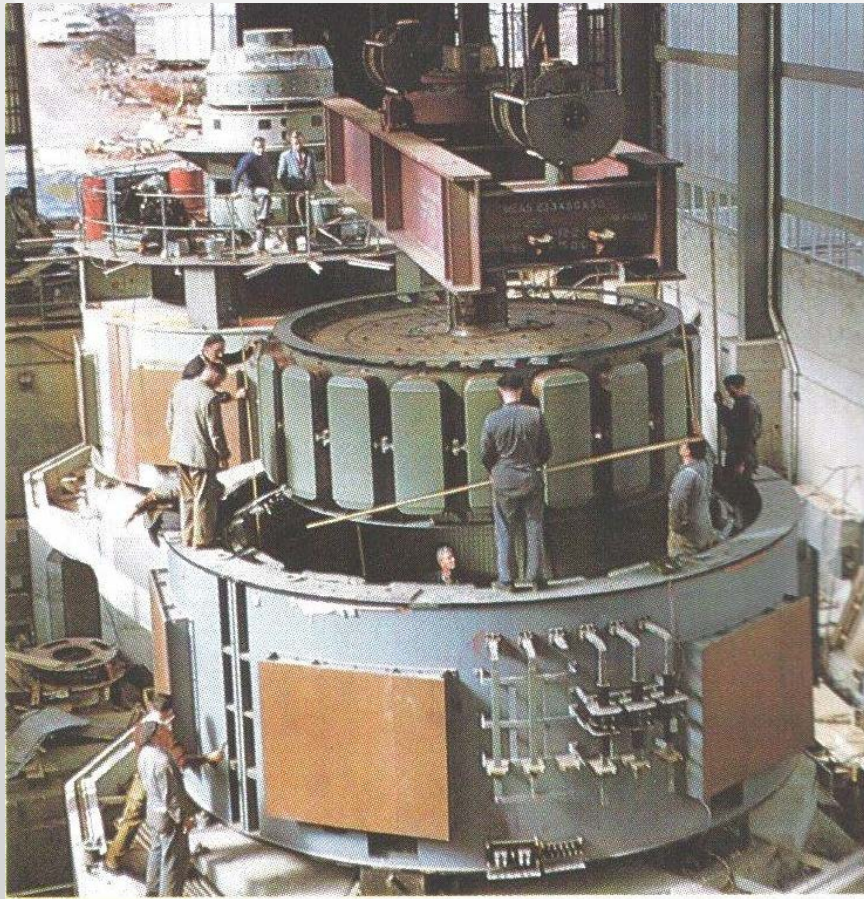
Înfășurarea de pornire este plasată în creștături practicate în piesele polare ale polilor inductori rotorici. Ea permite *pornirea* mașinii sincrone *în asincron* atunci când funcționează ca motor.

Joacă rol și de înfășurare de amortizare atât în regim de motor cât și de generator.

Tipuri de generatoare sincrone

**Generator sincron utilizat in termocentrale
(agentul de antrenare este aburul)**

Turbogenerator



Hidrogenerator

**Generator sincron utilizat in
hidrocentrale (agentul de antrenare este
apa)**

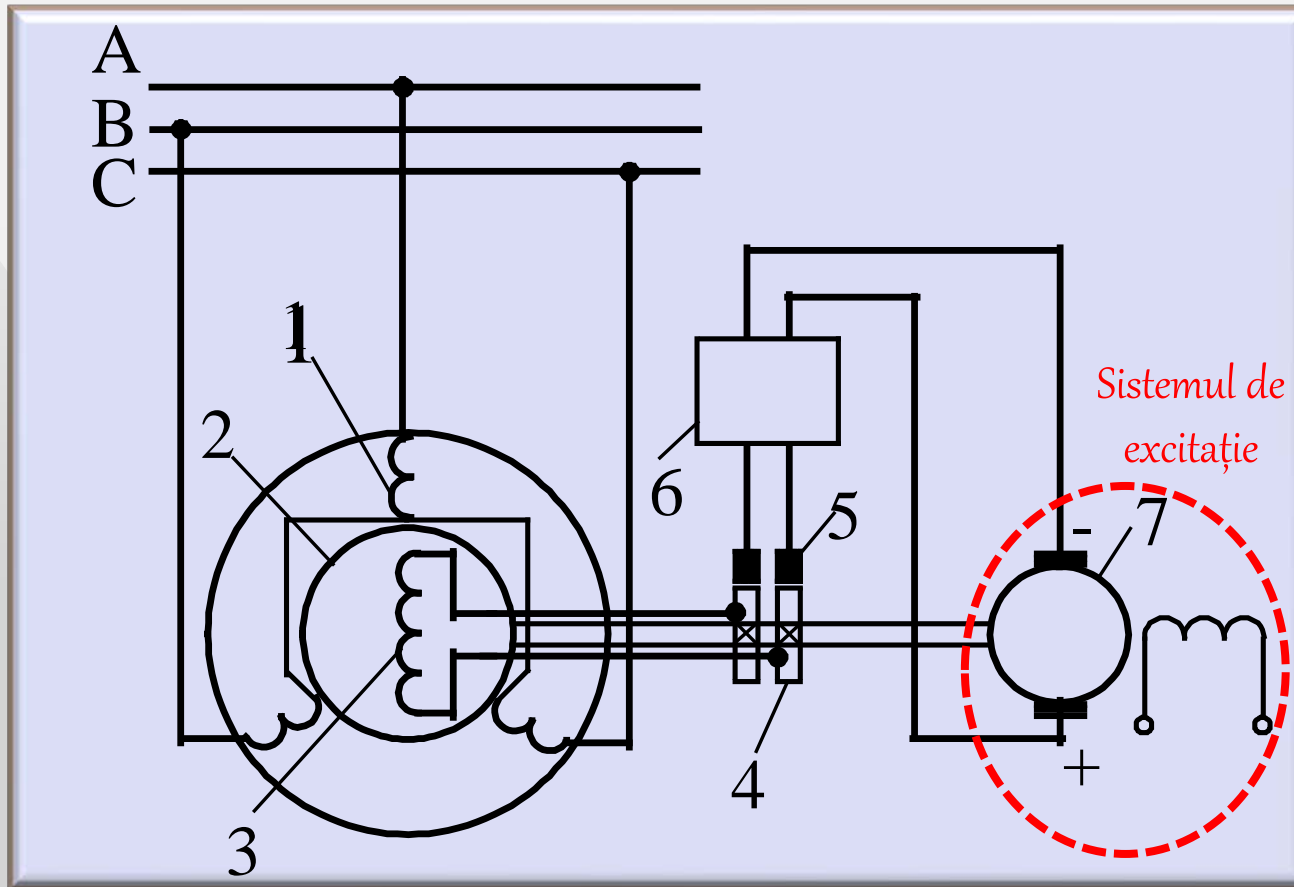


Sisteme de excitație

Sistemul de excitație este cel de-al treilea element vital al mașinii sincrone.

El furnizează tensiunea continuă necesară alimentării înfășurării inductoare, rotorice.

Sisteme de excitație cu excitatrice



1. Înfășurare statorică, 2. Rotor generator sincron, 3. Înfășurare de excitație,
4. Inele rotorice, 5. Perii, 6. Regulator de tensiune, 7. Excitatoare.

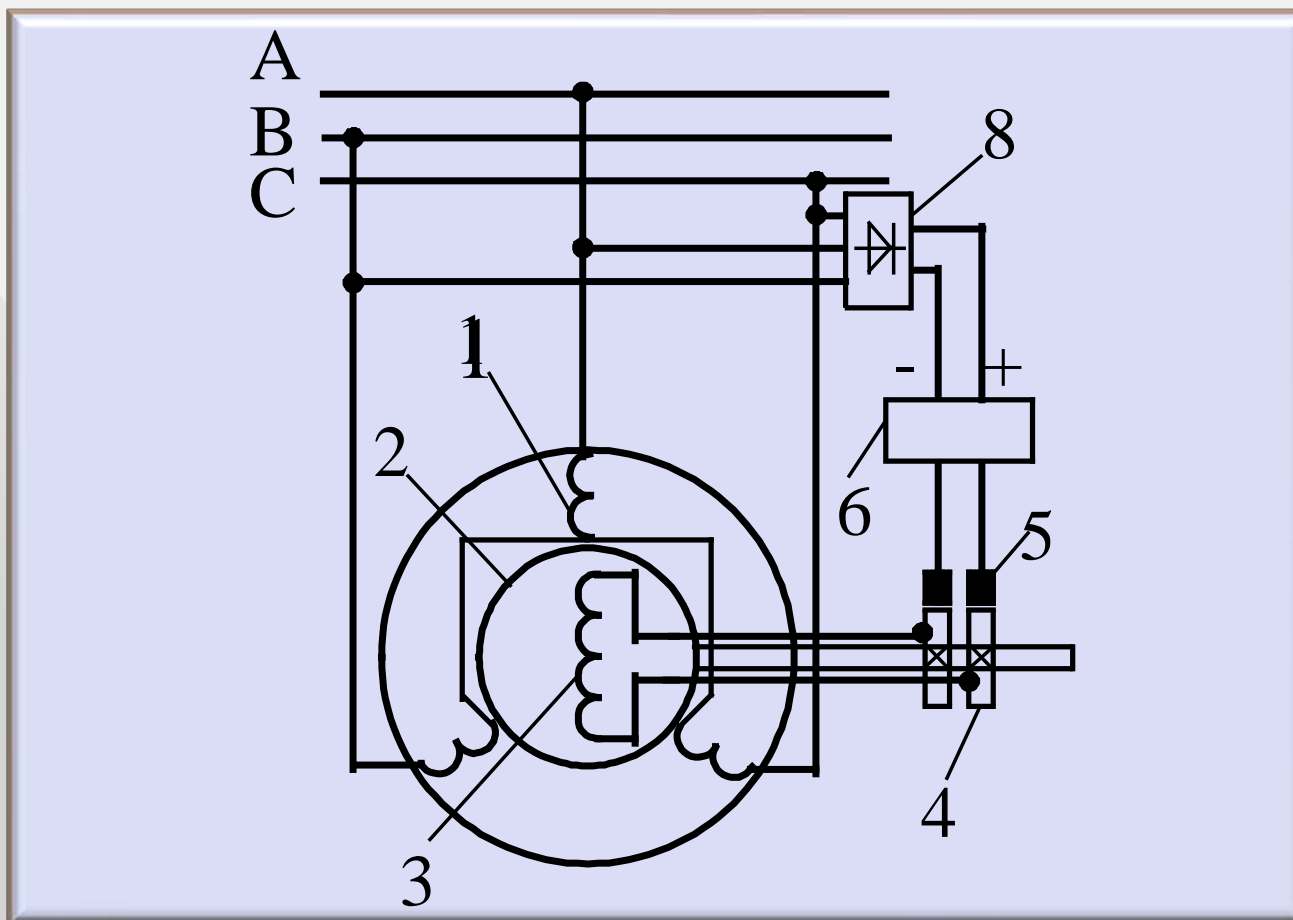
Sisteme de excitație cu excitatrice

Sursa de tensiune continuă este reprezentată de un generator de c.c. (cu excitație separată sau derivație). Acesta este fixat pe axul mașinii sincrone.

Alimentarea înfășurării rotorice a generatorului sincron se face prin intermediul sistemului inele(4)-perii(5).

Regulatorul de tensiune (6) comandă menținerea sau modificarea curentului de excitație în funcție de nevoile sistemului de acționare.

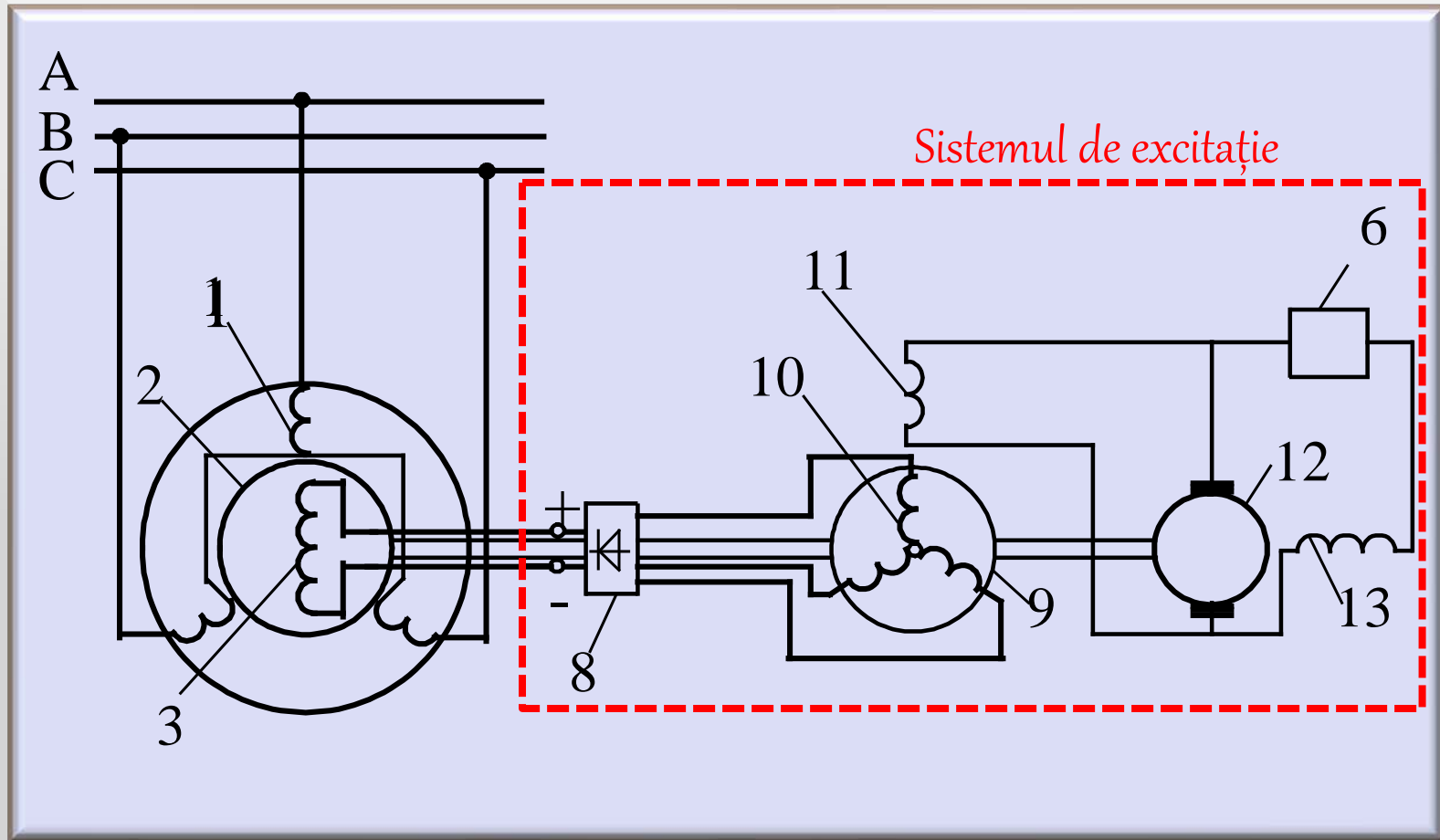
Sisteme de excitație cu redresor



- 1. Înfășurare statorică, 2. Rotor generator sincron, 3. Înfășurare de excitație, 4. Inele rotorice, 5. Perii, 6. Regulator de tensiune, 8. Redresor.**

Atunci când mașina sincronă este conectată la o rețea, tensiunea continuă necesară înfășurării statorice este obținută simplu, prin redresarea tensiunii rețelei.

Sisteme de excitație cu excitatrice și subexcitatrice



1.Înfășurare statorică, 2. Rotor generator sincron, 3. Înfășurare de excitație, 6. Regulator de tensiune, 8. Redresor, 9. Rotor excitatoare, 10. Înfășurare indusă a excitatoarei, 11. Înfășurare de excitație a excitatoarei, 12.Subexcitatoare, 13. Înfășurare de excitație a subexcitatoarei.

Sisteme de excitație cu excitatrice și subexcitatrice

Sistemul de excitație este format din două mașini plasate pe axul mașinii sincrone:

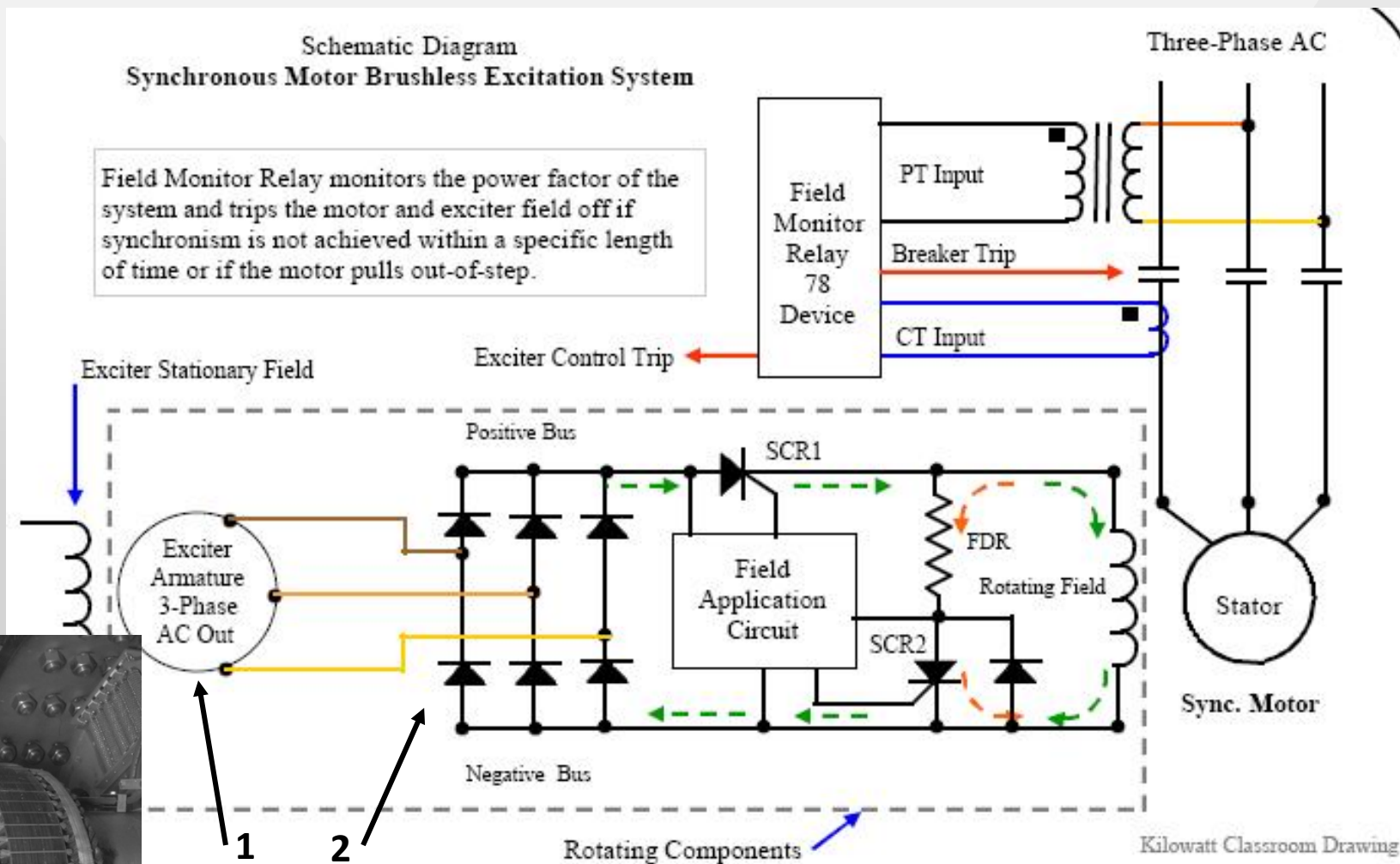
- un generator de c.c cu excitație derivație (12) – reprezintă subexcitatricea;
- un generator sincron în construcție inversată : excitația (11) este plasată pe stator iar înfășurarea indusă (10), de c.a., este plasată pe rotor. Acesta reprezintă excitatricea.

Subexcitatricea produce tensiunea continuă necesară alimentării excitației excitatricei. Tensiunea rezultată la bornele indusului excitatricei (care este o tensiune trifazată) este redresată și aplicată excitației generatorului sincron.

Comanda curentului de excitație a generatorului sincron țintă se face de pe circuitul de excitație al subexcitatricei, adică pe un circuit de curent mic.

Pe aceasta structură se poate elimina sistemul inele-perii.

Sisteme de excitație fără perii (brushless)



Sistem de excitație fără perii cu diode rotative și excitatoare sincronă în construcție inversată

Sisteme de excitație fără perii (brushless)

Pe axul mașinii sincrone principale se află o a doua mașină sincronă (de putere mai mică) în construcție inversată: înfășurarea de c.c. este plasată pe stator iar înfășurarea trifazată pe rotor – poziția 1 pe slide-ul anterior.

Această mașină va funcționa în regim de generator sincron producând o tensiune la bornele înfășurării trifazate aflată pe rotor.

Tensiunea alternativă trifazată este apoi redresată de puntea redresoare 2 care este plasată de asemenea pe rotor.

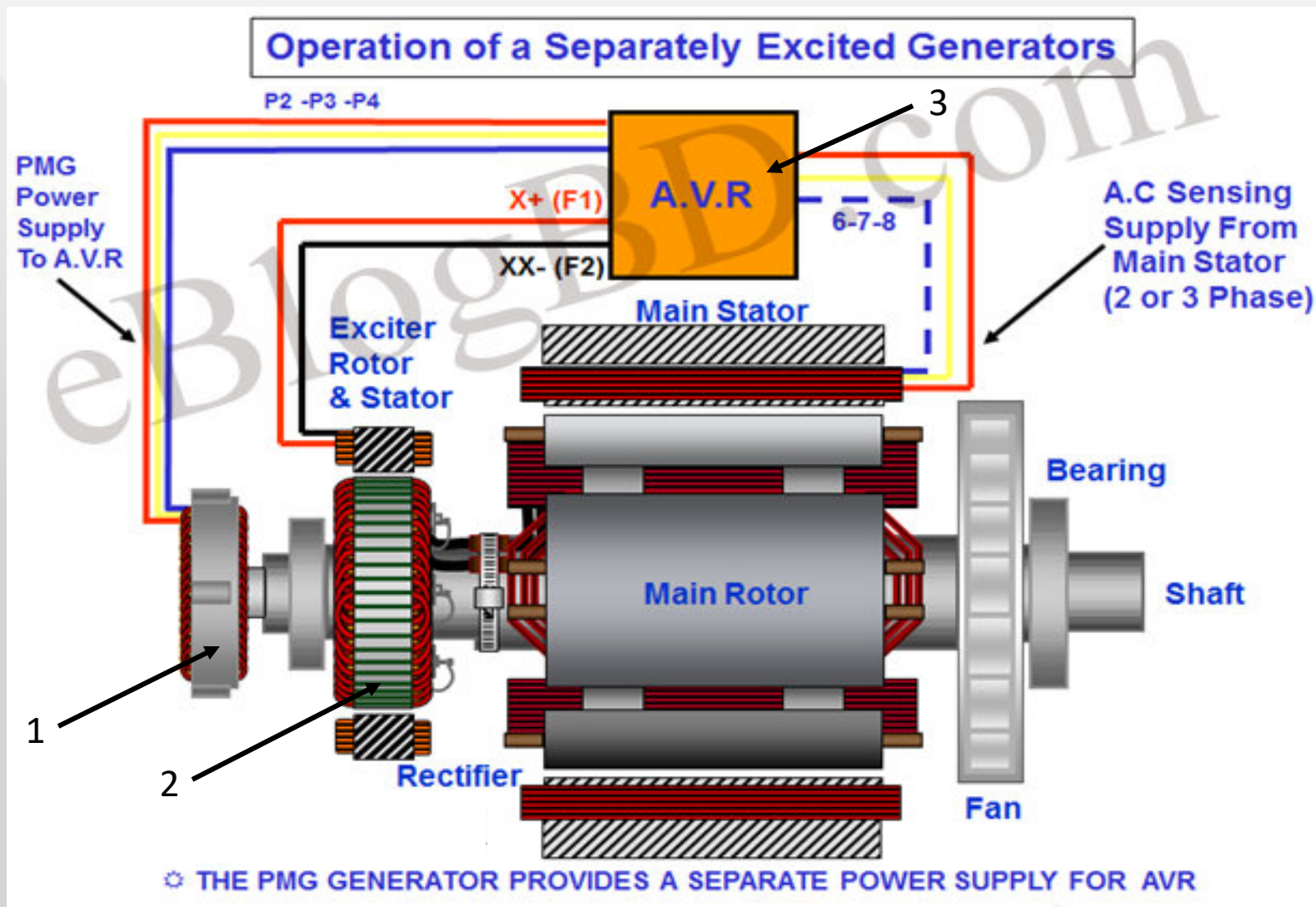
Tensiunea continuă astfel obținută alimentează înfășurarea de excitație a mașinii sincrone din acționarea electrică principală.

În această structură nu mai există inele și perii pentru alimentarea excitației mașinii sincrone principale.



Această soluție necesită existența unei surse externe de c.c.

Sisteme de excitație cu două mașini sincrone



PMG(1)-generator sincron cu magneți permanenți; Exciter rotor&stator(2)-excitatricea principală (mașină sincronă inversată); AVR(3)-regulator automat de tensiune.

Sisteme de excitație cu doua mașini sincrone

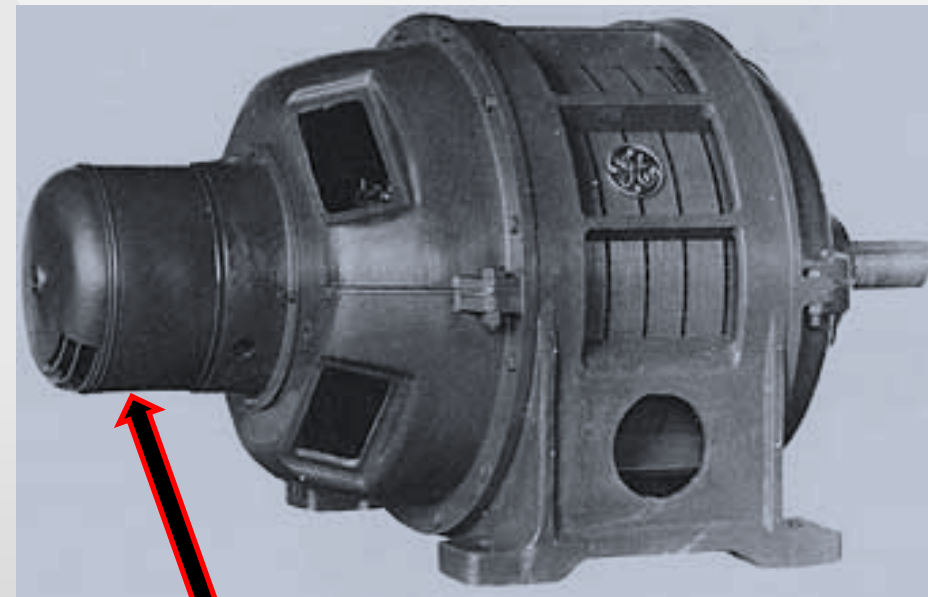
Sistemul de excitație este format din două mașini plasate pe axul mașinii sincrone:

- un generator sincron cu magneți permanenți (1). Aceasta furnizează o tensiune cu care se alimentează „regulatorul automat de tensiune” (3).
- un generator sincron (2), în construcție inversată (cu excitație pe stator) ce reprezintă excitatricea propriu-zisă. Excitația acestuia este alimentată de la regulatorul de tensiune, iar el furnizează tensiunea pentru alimentarea generatorului sincron țintă.

Este necesar, în plus, un sistem de redresare format dintr-o punte de diode (deoarece sunt plasate pe rotor se mai numesc „diode rotitoare”).

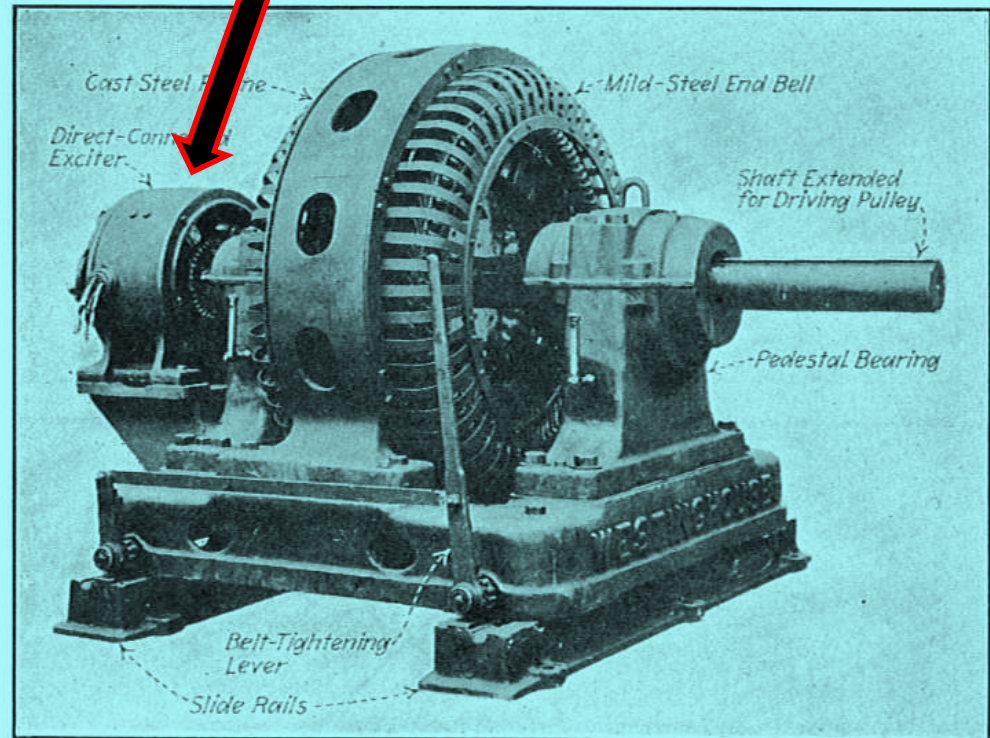


Această soluție elimină existența unei surse externe de c.c.

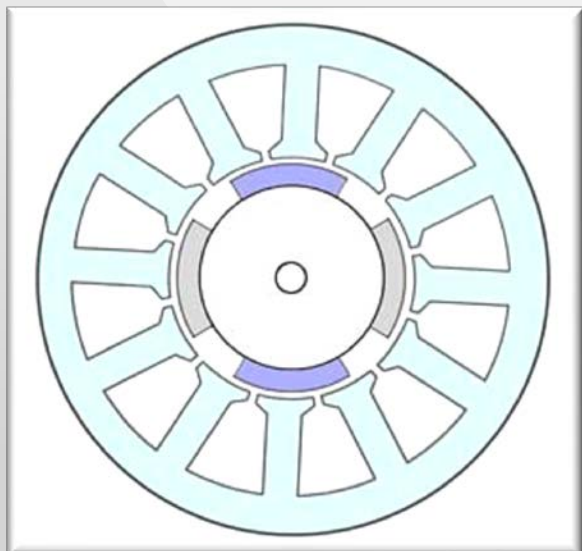


Excitatrice incorporata

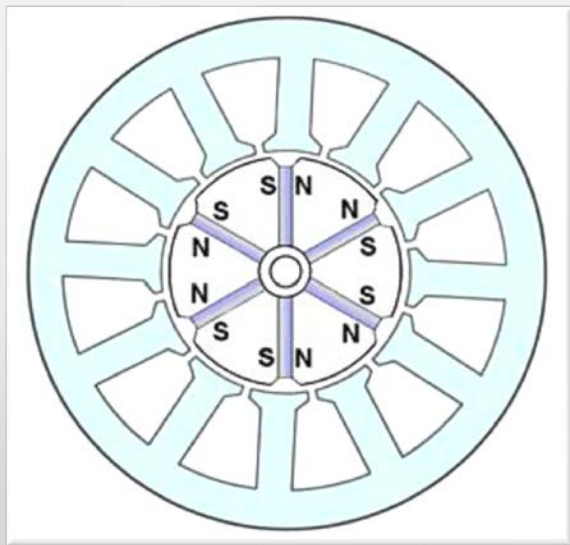
Excitatrice separata



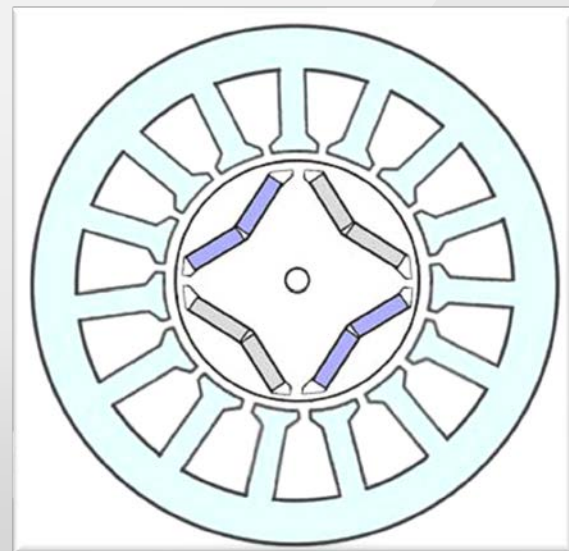
Sisteme de excitație cu magneți permanenți



**Surface mounted
(pe suprafață)**



**Spoke PMs
(tip spiță)**



**Interior PMs
(interiori)**

Sistemul inductor electromagnetic este înlocuit cu magneți permanenți. Soluția este viabilă pentru mașini de putere mică și medie.

Regimuri de funcționare



Generator



Motor

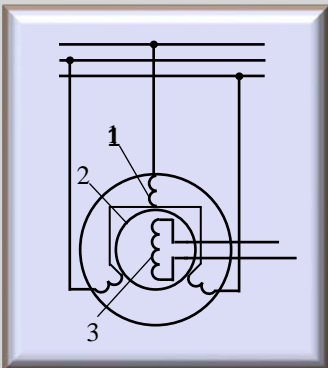
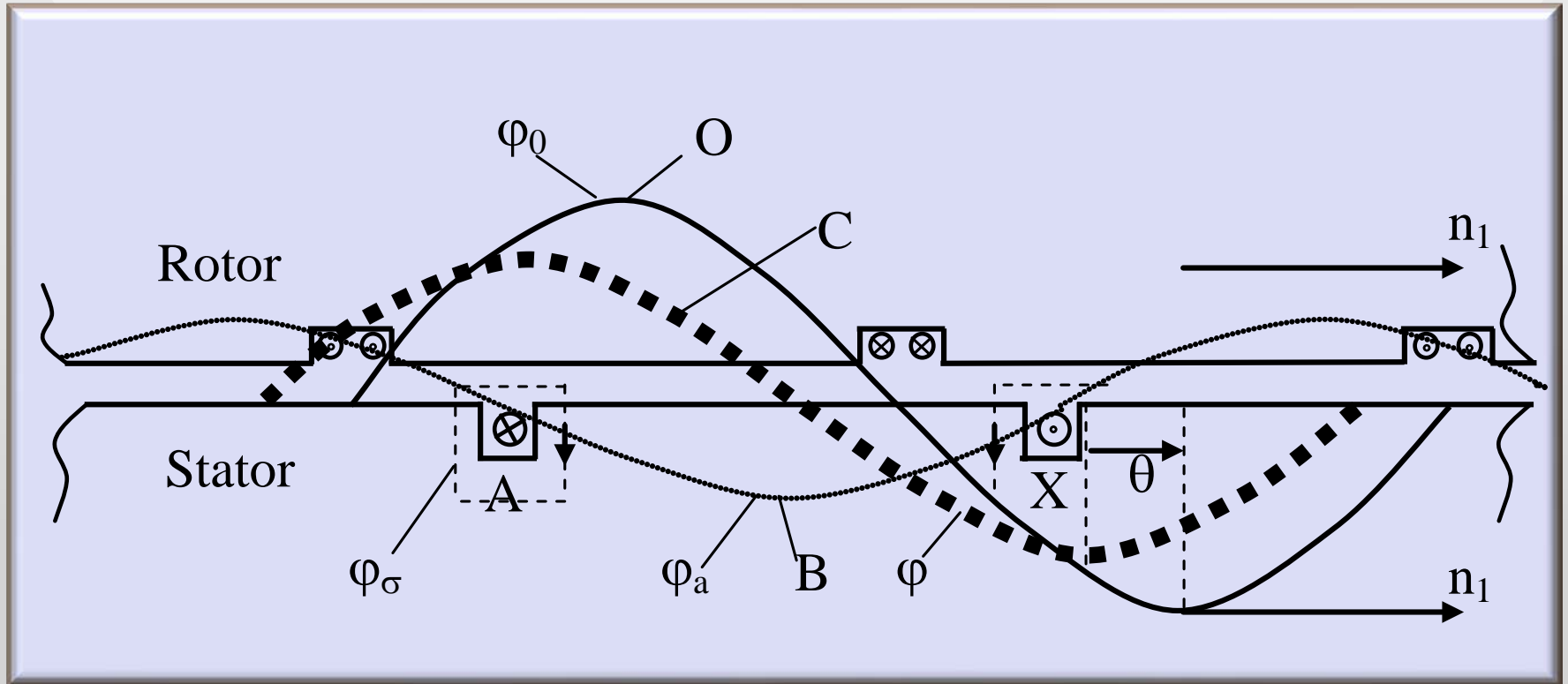


Compensator

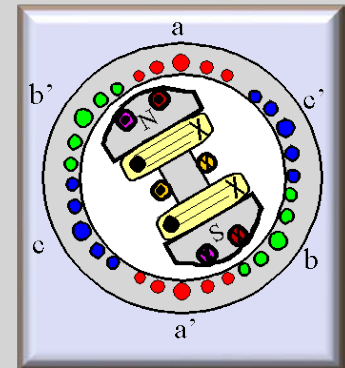
Principiul de funcționare

1. Prin alimentarea înfășurării de excitație de pe rotor de la o sursă de tensiune continuă ia naștere un câmp magnetic inductor, fix în spațiu și constant ca amplitudine - Φ_0
2. Antrenarea rotorului de către agentul sau mașina de antrenare transformă câmpul inductor fix într-unul învârtitor, deci variabil pentru înfășurarea statorică.
3. Conform legii inducției electromagnetice, în înfășurarea statorică se induce tensiune (apare la bornele mașinii un sistem trifazat de tensiuni).
4. Dacă la bornele statorului se conectează o sarcină, prin înfășurarea statorică se stabilește un sistem trifazat de curenți. Acest sistem creează un câmp de reacție, ce este un câmp învârtitor - Φ_a
5. Cele două câmpuri, inductor și de reacție, se rotesc în același sens și cu aceeași viteză. Ele se compun dând naștere câmpului rezultat - Φ
6. Decalajul unghiular dintre câmpul inductor și câmpul rezultat reprezintă UNGHIUL INTERN θ al mașinii

Principiul și ecuațiile de funcționare ale generatorului sincron cu poli înecați



- φ_0 - flux inductor
- φ_a - flux de reacție
- φ - flux rezultat
- φ_σ - flux de dispersie



1+2. Câmp magnetic învârtitor în întrefier (creat pe cale mecanică prin rotirea rotorului):

$$b_0(\alpha, t) = B_1 \sin(\omega t - p\alpha)$$

- unde fluxul fascicular al acestui câmp are expresia:

$$\varphi_0 = \Phi_{01} \sin \omega t$$

3. Tensiunea indusă în înfășurarea statorică (*defazată în urma fluxului cu $\pi/2$*)

$$\begin{aligned} e_{0A} &= -w_1 \cdot k_{w1} \cdot \frac{d\varphi_0}{dt} = -w_1 \cdot k_{w1} \cdot \omega \cdot \Phi_{01} \cos \omega t = \\ &= 2\pi f \cdot w_1 \cdot k_{w1} \cdot \Phi_{01} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned}$$

- având valoarea efectivă

$$E_0 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot w_1 \cdot k_{w1} \cdot \Phi_{01} = 4,44 \cdot f \cdot w_1 \cdot k_{w1} \cdot \Phi_{01}$$

4a. Se conectează la bornele generatorului o sarcină activ-inductivă (*ce determină defazajul β*)

$$i_A = \sqrt{2} \cdot I_a \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \beta\right)$$

- Analog pentru fazele BY și CZ

$$\begin{cases} e_{0B} = E_0\sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3}\right) \\ e_{0C} = E_0\sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad \begin{cases} i_B = I_a\sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \beta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_C = I_a\sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \beta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases}$$

4b. Sistemul trifazat de curenți produce un câmp magnetic învârtitor (de reacție)

$$b_a(\alpha, t) = B_{a1} \sin\left(\omega t - p\alpha - \frac{\pi}{2} - \beta\right)$$

- fluxul fascicular al acestui câmp

$$\varphi_a = \phi_{a1} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \beta\right)$$

- și tensiunea indusă în înfășurarea statorică

$$e_a = -w_1 \cdot k_{w1} \cdot \frac{d\varphi_a}{dt} = E_a\sqrt{2} \cdot \sin(\omega t - \pi - \beta)$$

- având valoarea efectivă

$$E_a = 4,44 \cdot f \cdot w_1 \cdot k_{w1} \cdot \phi_{a1}$$

5. Fluxul rezultat

$$\underline{\phi} = \underline{\phi}_0 + \underline{\phi}_a$$

Diagrama fazorială

Φ_0 - flux inductor

Φ_a - flux de reacție

Φ - flux rezultat

E_0 - tensiunea indusă de fluxul inductor

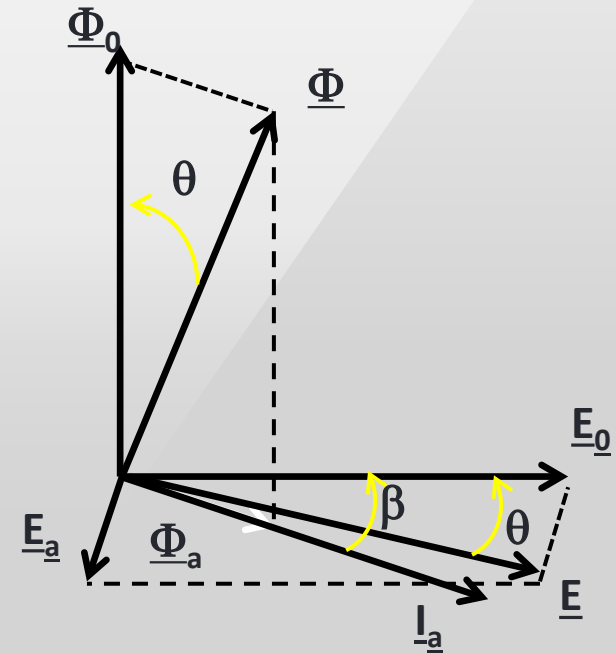
E_a - tensiunea indusă de fluxul de reacție

E - tensiunea indusă rezultată

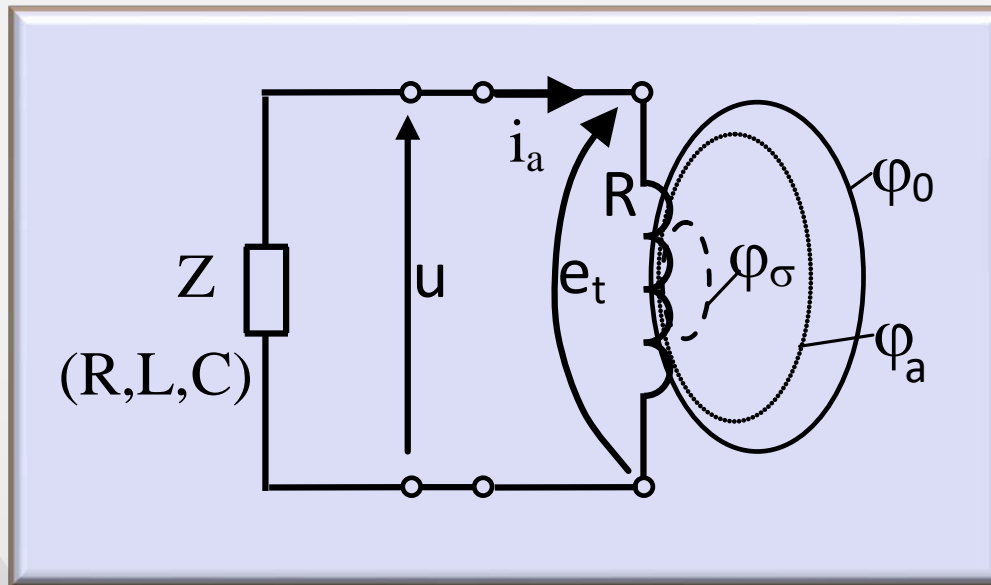
I_a - curentul statoric

θ - unghiul intern

β - unghiul de defazaj dictat de tipul sarcinii



Schema echivalentă



$$u + R \cdot i_a = e_t$$

unde e_t este tensiunea indusă de ϕ_0 , ϕ_a și ϕ_σ

$$u + R \cdot i_a = -w_1 \cdot k_{w1} \cdot \frac{d\phi_0}{dt} - L_a \cdot \frac{di_a}{dt} - L_\sigma \cdot \frac{di_a}{dt}$$

Trecând la scrierea în complex simplificat se obține:

$$\underline{U} + R \cdot \underline{I}_a = -j\omega \cdot w_1 \cdot k_{w1} \cdot \frac{\phi_0}{\sqrt{2}} - j\omega \cdot L_a \cdot \underline{I}_a - j\omega \cdot L_\sigma \cdot \underline{I}_a$$

dar
$$j\omega \cdot w_1 \cdot k_{w1} \cdot \frac{\phi_0}{dt} = -\underline{E}_0 \quad \text{\textbf{\textit{și rezultă}}}$$

$$\underline{U} + R \cdot \underline{I}_a + j(\omega \cdot L_a + \omega \cdot L_\sigma)\underline{I}_a = \underline{E}_0$$

dar
$$\omega \cdot L_a = X_a$$

$$\omega \cdot L_\sigma = X_\sigma$$

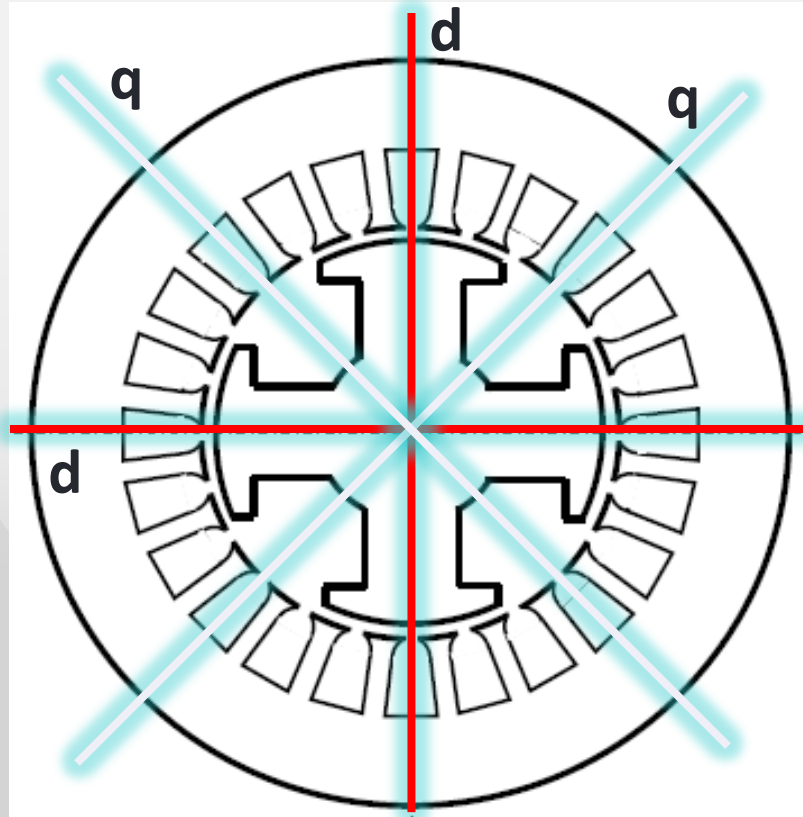
$$\underline{E}_0 = \underline{U} + R \cdot \underline{I}_a + j(X_a + X_\sigma)\underline{I}_a$$

Expresia finală a ecuației de tensiuni pe o fază a generatorului sincron este:

$$\underline{E}_0 = \underline{U} + R \cdot \underline{I}_a + jX_s \cdot \underline{I}_a$$

unde $X_s = X_a + X_\sigma$ reprezintă reactanța sincronă a mașinii

Principiul și ecuațiile de funcționare ale generatorului sincron cu poli aparenti



La mașina sincronă cu poli aparenti există două tipuri de axe de simetrie distincte:

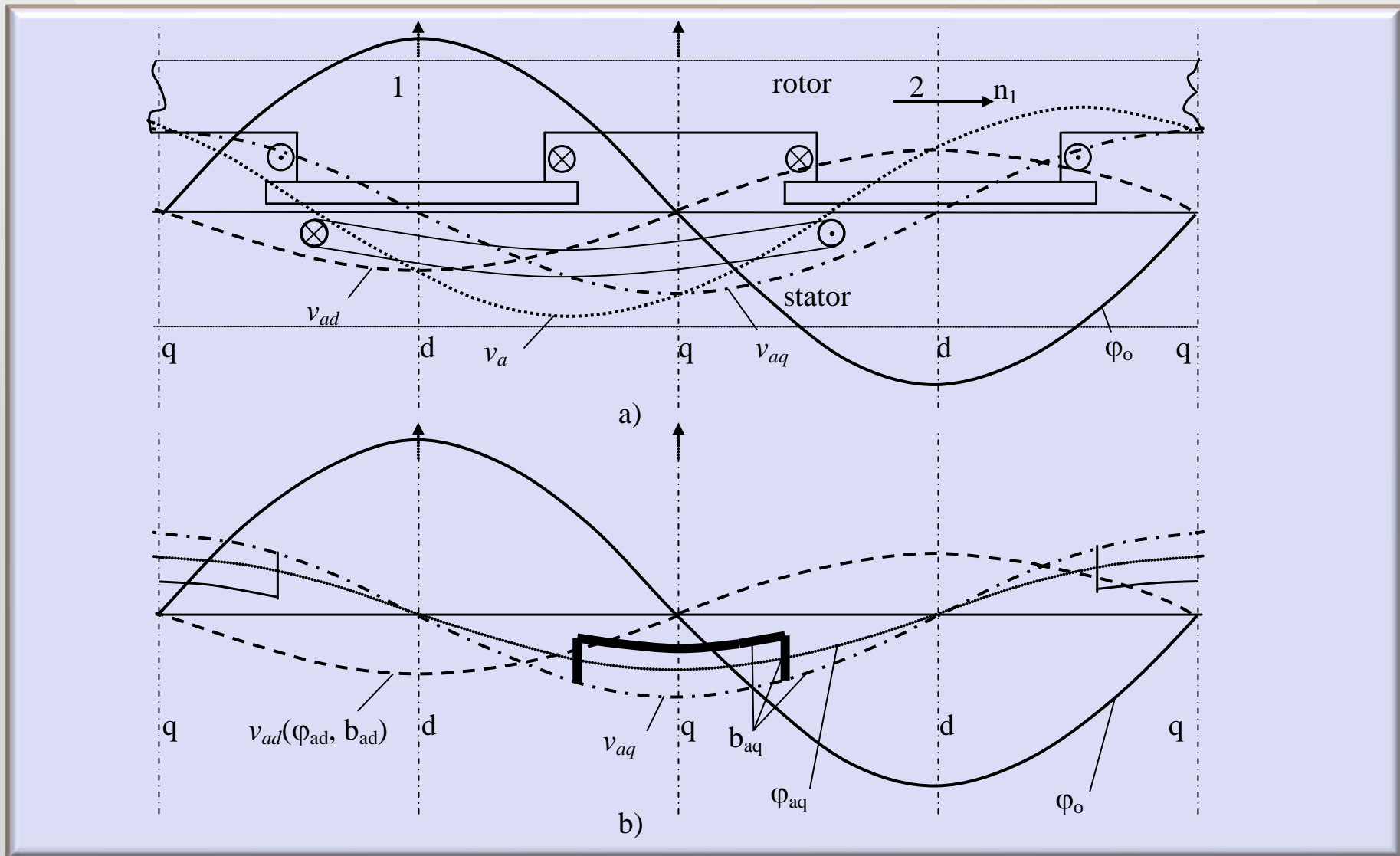
- Axa d – axa longitudinală (axa polilor)
- Axa q – axa transversală (axa interpolară)

Principiul de funcționare

I. Ca și în cazul generatorului cu poli înecați, câmpul inductor induce tensiune în înfășurarea statorică. Câmpul de reacție, caracterizat de această dată de tensiunea magnetică v_a , este de asemenea o undă sinusoidală. Datorită neuniformității întrefierului, câmpul din întrefier nu este sinusoidal dar poate fi descompus după cele două axe de simetrie, în două componente sinusoidale, φ_{ad} și φ_{aq}

II. Câmpurile magnetice din întrefier, create de cele două unde sunt diferite. Distribuția fluxului φ_{ad} este aproximativ sinusoidală în timp ce fluxul φ_{aq} este mult diminuat în axa interpolară (aproape de valoarea zero – zona îngroșată de pe figură).

Generator sincron cu poli aparenti funcționând în sarcină activ-inductivă



1. Prin rotirea rotorului (a cărei înfășurare este alimentată în c.c.), câmpul magnetic fix devine unul învârtitor; inducția în întrefier și fluxul fascicular au expresiile (identic cazul anterior):

$$b_0(\alpha, t) = B_1 \sin(\omega t - p\alpha) \qquad \varphi_0 = \Phi_{01} \sin \omega t$$

2. Conform legii inducției electromagnetice, tensiunea indusă într-o fază statorică este defazată în urma fluxului cu $\pi/2$:

$$e_{0A} = E_0 \sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

3. Dacă se conectează la bornele generatorului o sarcină *activ-inductivă*, atunci curentul statoric este defazat în urma tensiunii induse cu un unghi de defazaj β :

$$i_{0A} = \sqrt{2} \cdot I_a \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \beta\right)$$

4. Acest curent (în fapt sistem trifazat de curenți prin cele trei faze statorice) creează un câmp de reacție învârtitor. Întrucât întrefierul este neuniform, acest câmp se poate exprima prin intermediul tensiunii magnetice de reacție, a cărei variație este sinusoidală:

$$v_a(\alpha, t) = V_{am} \sin\left(\omega t - p\alpha - \frac{\pi}{2} - \beta\right)$$

Câmpul de reacție se rotește în *același sens* și cu *aceeași viteză* ca și câmpul inductor creat de rotor.

Curba de variație a inducției magnetice este însă foarte diferită de cea a tensiunii magnetice întrucât expresia inducției ține cont de lățimea întrefierului:

$$b_a(\alpha, t) = \mu_0 \cdot \frac{v_a(\alpha, t)}{\delta(\alpha)}$$

Unda sinusoidală a tensiunii magnetice se poate descompune, după cele două axe de simetrie d și q , în două componente de asemenea sinusoidale.

$$v_a = v_{ad} + v_{aq}$$

respectiv componentele de inducție b_{ad} și b_{aq} . Componenta b_{ad} păstrează o variație sinusoidală dar componenta b_{aq} are în axa q o cădere aproape de zero a amplitudinii, datorită lățimii mari a întrefierului.

Descompunerea tensiunii magnetice în cele două componente după axele d și q poate fi interpretată ca o înlocuire a înfășurării de fază (având w_1 spire) cu două înfășurări de fază echivalente (fiecare având tot w_1 spire) care sunt parcurse de curenții i_{ad} și i_{aq} și creează fluxurile ϕ_{ad} și ϕ_{aq} . În acest caz se poate scrie:

$$w_1 \cdot i_a = w_1 \cdot i_{ad} + w_1 \cdot i_{aq} \quad i_a = i_{ad} + i_{aq}$$

Ecuatiile de funcționare

Pentru o fază statorică, ecuația de tensiuni este:

$$u + R \cdot i_a = e_t$$

sau exprimând fiecare componentă de tensiune indusă (corespunzătoare fluxului inductor, fluxurilor create de fiecare componentă de curent statoric și fluxului de dispersie):

$$u + R \cdot i_a = -w_1 \cdot k_{w1} \cdot \frac{d\varphi_0}{dt} - L_{ad} \cdot \frac{di_{ad}}{dt} - L_{aq} \cdot \frac{di_{aq}}{dt} - L_\sigma \cdot \frac{di_a}{dt}$$

Se trece la scrierea în complex simplificat:

$$\underline{U} + R \cdot \underline{I}_a = -j\omega \cdot w_1 \cdot k_{w1} \cdot \frac{\varphi_0}{\sqrt{2}} - j\omega \cdot L_{ad} \cdot \underline{I}_{ad} - j\omega \cdot L_{aq} \cdot \underline{I}_{aq} - j\omega \cdot L_\sigma \cdot \underline{I}_a$$

$$\underline{I}_a = \underline{I}_{ad} + \underline{I}_{aq}$$

dar: $j\omega \cdot w_1 \cdot k_{w1} \cdot \frac{\Phi_0}{dt} = -\underline{E}_0$ reprezintă tensiunea indusă de către fluxul inductor

întrucât: $\omega \cdot L_{ad} = X_{ad}$ $\omega \cdot L_{aq} = X_{aq}$ $\omega \cdot L_{\sigma} = X_{\sigma}$

Ecuția de tensiuni devine:

$$\underline{U} + R \cdot \underline{I}_a + jX_{ad}\underline{I}_{ad} + jX_{aq}\underline{I}_{aq} + jX_{\sigma}\underline{I}_a = \underline{E}_0$$

$$\underline{U} + R \cdot \underline{I}_a + j(X_{ad} + X_{\sigma})\underline{I}_{ad} + j(X_{aq} + X_{\sigma})\underline{I}_{aq} = \underline{E}_0$$

$$\underline{U} + R \cdot \underline{I}_a + jX_d\underline{I}_{ad} + jX_q\underline{I}_{aq} = \underline{E}_0$$

unde $X_d = X_{ad} + X_{\sigma}$ reprezintă reactanța sincronă longitudinală a mașinii

$X_q = X_{aq} + X_{\sigma}$ reprezintă reactanța sincronă transversală a mașinii

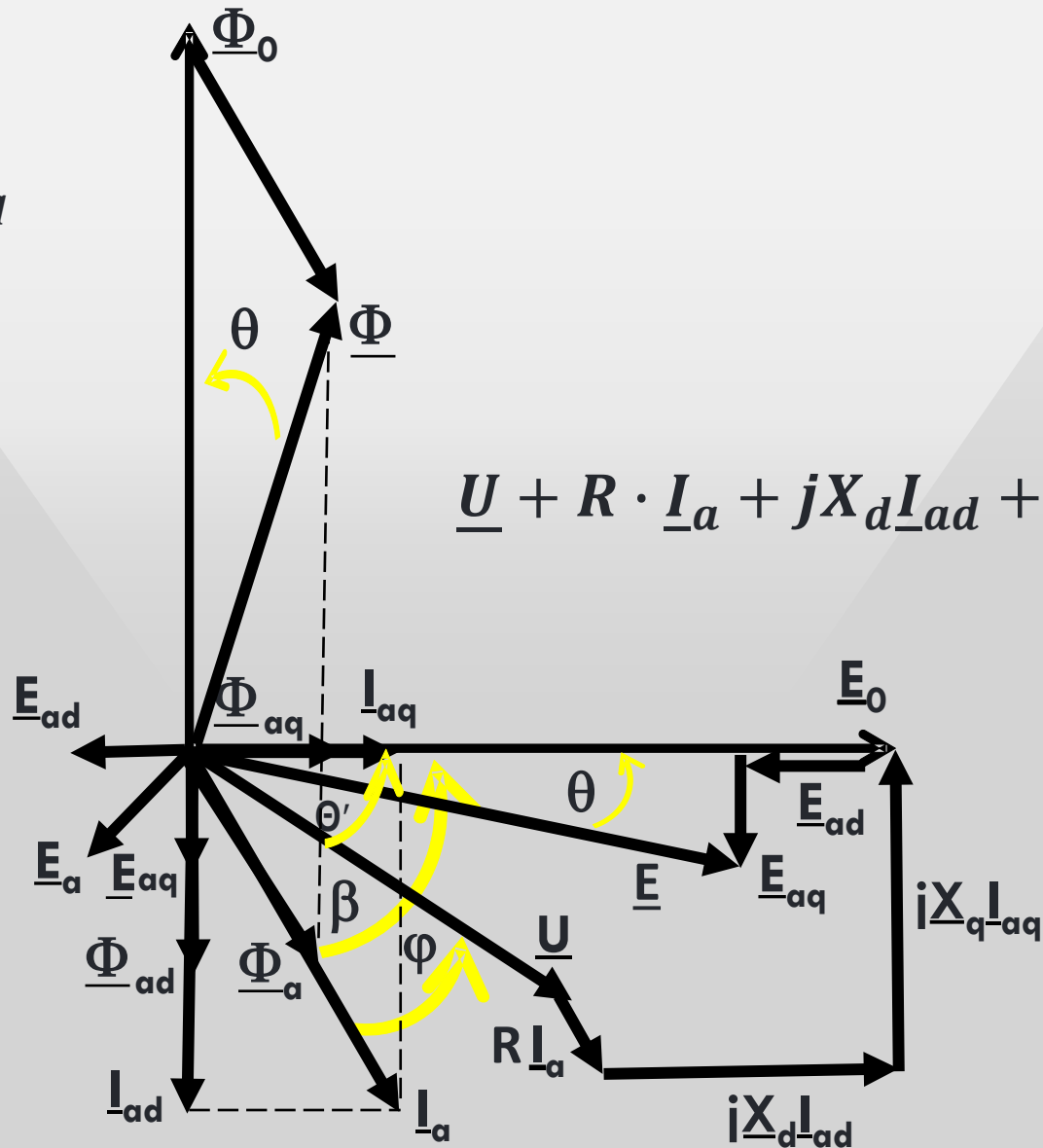
Diagrama fazorială

$$\underline{I}_a = \underline{I}_{ad} + \underline{I}_{aq}$$

$$\underline{E}_a = \underline{E}_{ad} + \underline{E}_{aq}$$

$$E = \underline{E}_0 + \underline{E}_a$$

$$\underline{U} + R \cdot \underline{I}_a + jX_d \underline{I}_{ad} + jX_q \underline{I}_{aq} = \underline{E}_0$$

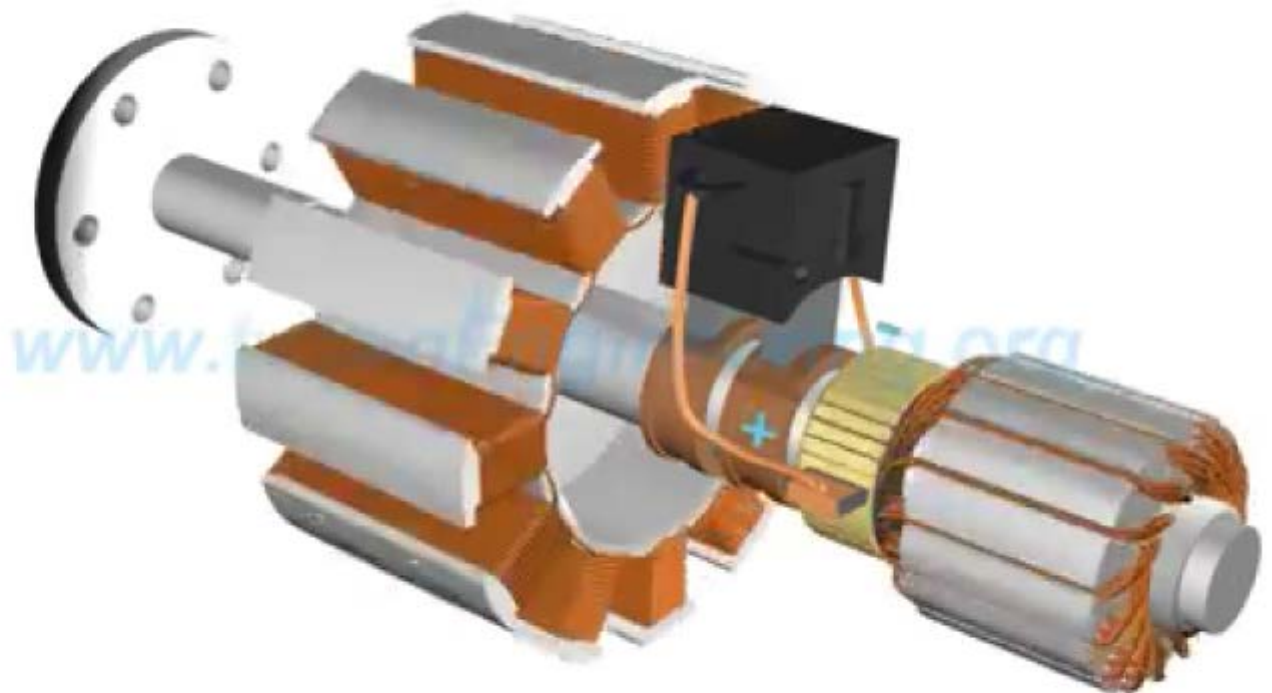


- Φ_0 - flux inductor
- Φ_a - flux de reacție ce se descompune în cele două componente după axele d și q
- Φ - flux rezultat
- E_0 - tensiunea indusă de fluxul inductor
- E_a - tensiunea indusă de fluxul de reacție – se descompune în componente după axele d și q
- E - tensiunea indusă rezultantă
- I_a - curentul statoric cu cele două componente I_{ad} și I_{aq}
- θ - unghiul intern (între tensiunea indusă rezultantă, E și tensiunea indusă E_0 de către fluxul inductor. Același unghi este și între Φ_0 și Φ)
- β - unghiul de defazaj dictat de tipul sarcinii
- φ - unghiul de defazaj dintre tensiunea la borne și curentul prin înfășurarea statorică (desemnează factorul de putere și este variabil cu valoarea curentului de excitație)



- **Stator – indus**
- **Rotor – inductor**
- **Poli înecați**
- **Poli aparenti**
- **Sistem de excitație pentru c.c.**
- **Unghi intern**
- **Axa d ; axa q**

SELF EXCITED GENERATOR



Curs 10

Puterea și cuplul electromagnetic la
mașina sincronă
Generatorul sincron

Cuprins



Expresia puterii și a cuplului electromagnetic

Caracteristica unghiulară

Generatorul sincron autonom



Generatorul sincron conectat la rețea

Cuplarea în paralel a generatoarelor
sincrone

Deducerea expresiilor puterii si cuplului electromagnetic

Dacă în ecuația de tensiuni neglijăm căderea de tensiune pe rezistența înfășurării satorice, adică:

$$\underline{U} + \underline{R} \cdot \underline{I}_a + jX_d \underline{I}_{ad} + jX_q \underline{I}_{aq} = \underline{E}_0 \quad \underline{R} \cdot \underline{I}_a \cong 0$$

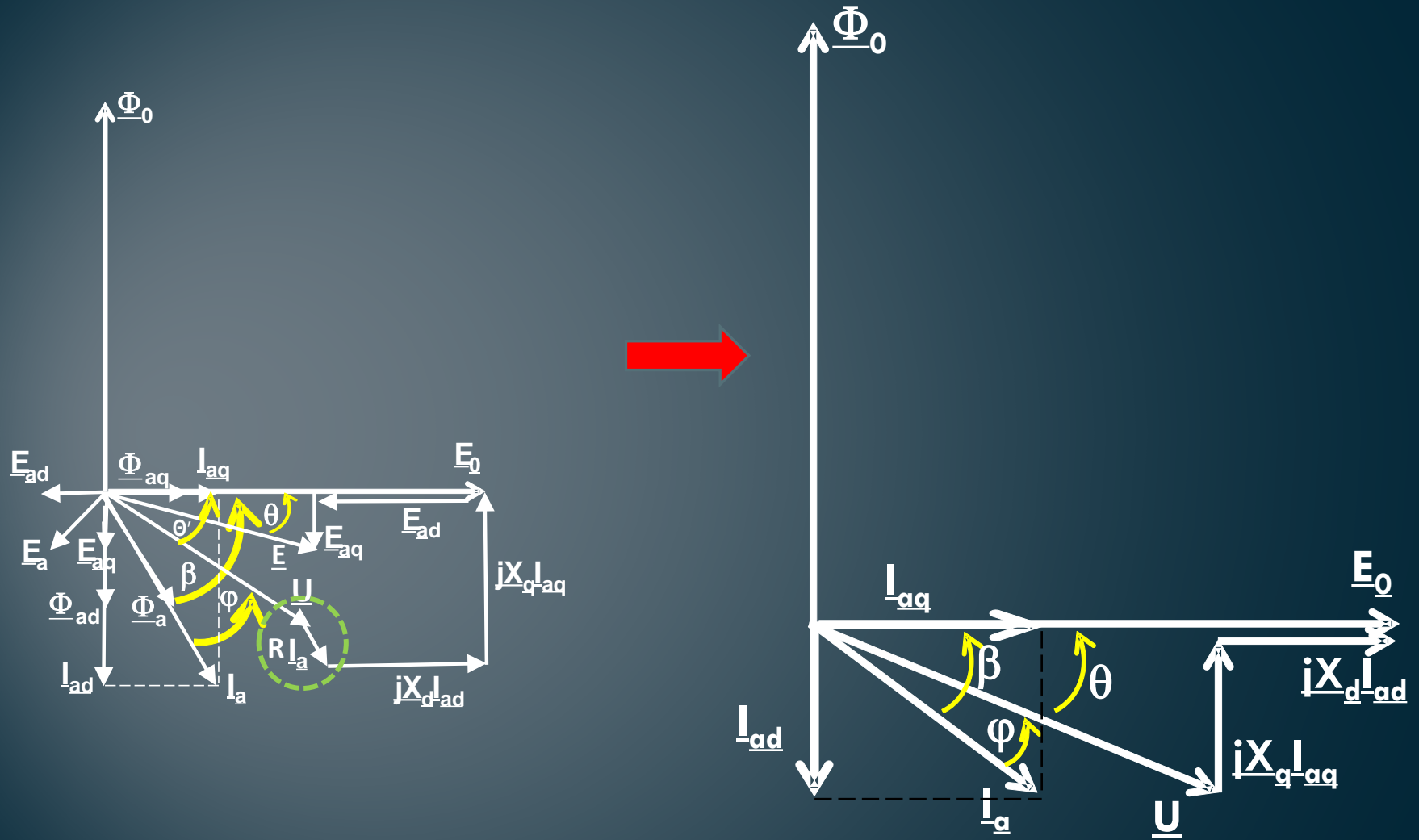

atunci ecuația simplificată devine:

$$\underline{U} + jX_d \underline{I}_{ad} + jX_q \underline{I}_{aq} = \underline{E}_0$$

iar în diagrama fazorială simplificată:

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta = \theta' \\ E \cong U \end{array} \right.$$

Diagrama fazorială (simplificată) a mașinii sincrone cu poli aparenti



Expresia generală pentru determinarea puterii electromagnetice produse în mașina sincronă este:

$$P_e = 3EI_a \cos(\widehat{E, I_a})$$

Din diagrama fazorială simplificată, unghiul dintre tensiunea indusă rezultantă E și curentul statoric I_a este φ , deci:

$$P_e = 3UI_a \cos \varphi$$

dar $\varphi = \beta - \theta$

rezultă: $P_e = 3UI_a \cos(\beta - \theta)$

respectiv: $P_e = 3UI_a \cos \beta \cos \theta + 3UI_a \sin \beta \sin \theta$

Tot din diagrama fazorială, componentele curentului I_a au expresiile:

$$I_a \cos \beta = I_{aq}$$

$$I_a \sin \beta = I_{ad}$$

Înlocuind în expresia anterioară, se obține:

$$P_e = 3UI_{aq} \cos \theta + 3UI_{ad} \sin \theta$$

Însă:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sin \theta = \frac{X_q I_{aq}}{U} \\ \cos \theta = \frac{E_0 - X_d I_{ad}}{U} \end{array} \right. \longrightarrow \begin{array}{l} U \sin \theta = X_q I_{aq} \\ U \cos \theta = E_0 - X_d I_{ad} \end{array}$$

adică:

$$I_{aq} = \frac{U \sin \theta}{X_q} \quad \text{și} \quad I_{ad} = \frac{E_0 - U \cos \theta}{X_d}$$

Deci:

$$P_e = \frac{3U^2 \sin \theta \cos \theta}{X_q} + 3U \frac{E_0 - U \cos \theta}{X_d} \sin \theta$$

$$P_e = \frac{3U^2 \sin \theta \cos \theta}{X_q} - \frac{3U^2 \sin \theta \cos \theta}{X_d} + \frac{3UE_0 \sin \theta}{X_d}$$

dar: $\sin \theta \cos \theta = \frac{1}{2} \sin 2\theta$

$$P_e = \frac{3UE_0}{X_d} \sin \theta + \frac{3U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta$$

$$I. \quad P'_e = \frac{3UE_0}{X_d} \sin \theta$$

- componenta principală: depinde atât de excitație cât și de tensiunea la borne

$$II. \quad P''_e = \frac{3U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta$$

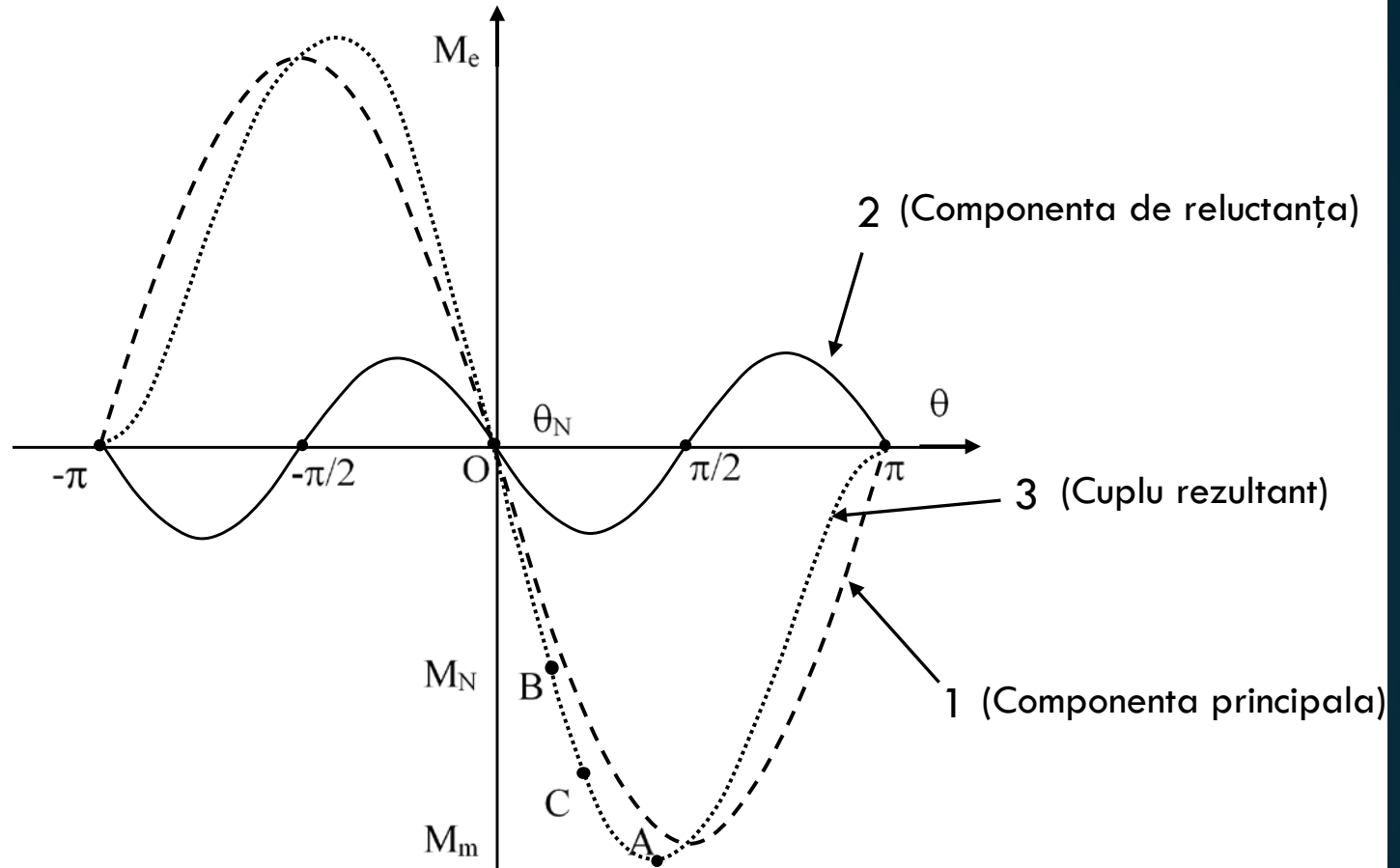
- componenta secundară (de reluctanță): există în absența excitației și este cu atât mai mare cu cât diferența dintre reactanțele sincrone longitudinală și transversală este mai mare

$$M_e = \frac{3}{\Omega} \left[\frac{UE_0}{X_d} \sin \theta + \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta \right]$$



În cazul mașinii cu poli înecați, $X_d = X_q = X_s$. Există DOAR componenta principală de putere respectiv cuplu.

Caracteristica unghiulară



1. $\theta > 0$ – funcționare în regim de generator (câmpul inductor este defazat ÎNAINTEA câmpului rezultat)
2. $\theta < 0$ – funcționare în regim de motor (câmpul inductor este defazat ÎN URMA câmpului rezultat)
3. $\theta = 0$ – funcționare la gol

Caracteristica unghiulară

Este o caracteristică specifică mașinii sincrone și care exprimă dependența *cuplului electromagnetic* dezvoltat de mașina sincronă în funcție de *unghiul intern*.

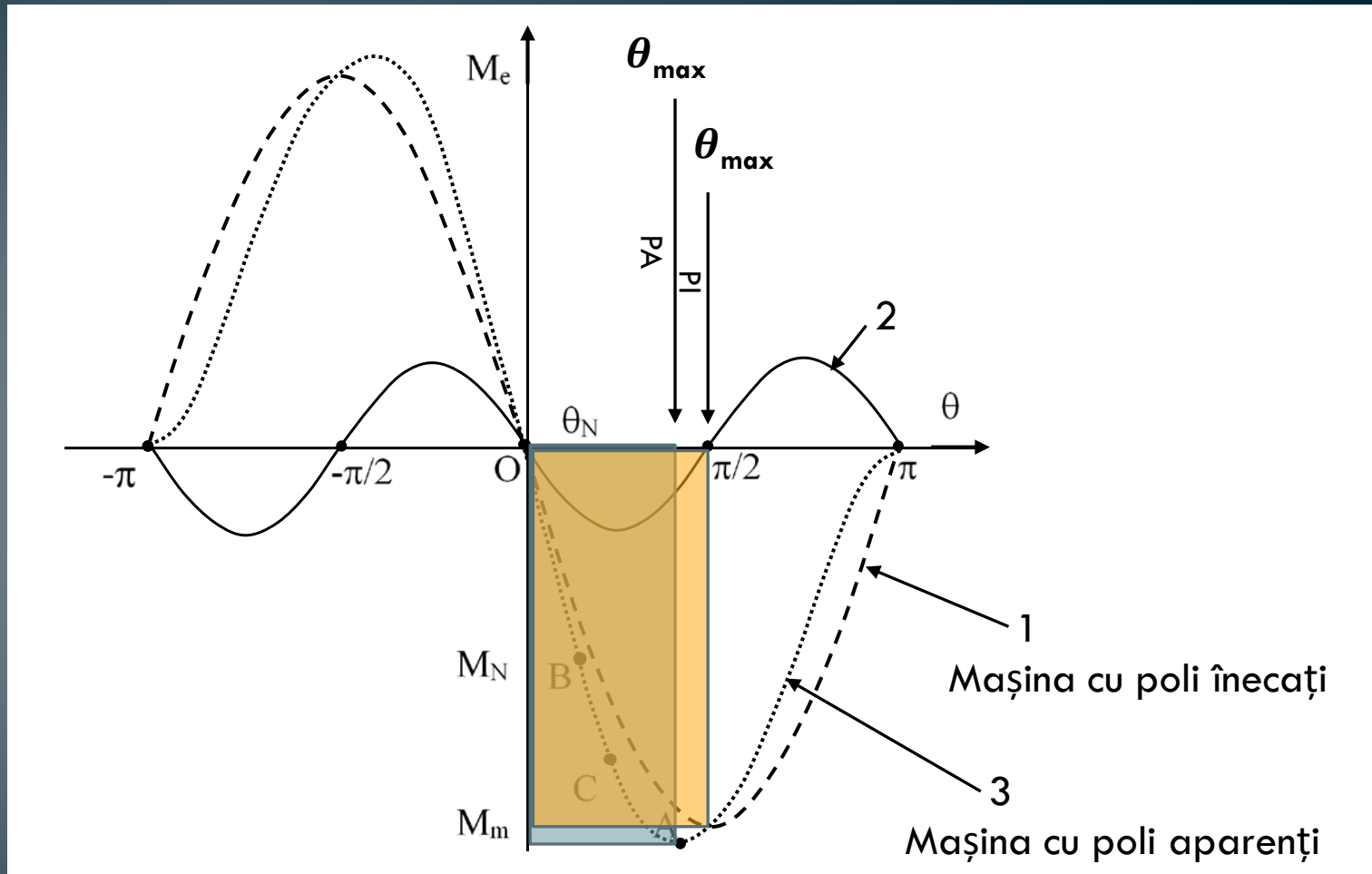
În regim de generator, cuplul electromagnetic se opune mișcării de antrenare a rotorului (și deci este considerat negativ) iar unghiul intern este pozitiv. Caracteristica unghiulară de funcționare este plasată în cadranul IV.

În regim de motor, cuplul electromagnetic antrenează în mișcare de rotație rotorul (și deci este considerat pozitiv) iar unghiul intern este negativ. Caracteristica unghiulară de funcționare este plasată în cadranul II.

Componenta principală a cuplului electromagnetic variază cu $(\sin \theta)$ - curba 1.

Componenta de reluctanță a cuplului electromagnetic variază cu $(\sin 2\theta)$ - curba 2.

Caracteristica unghiulara



Zona de funcționare stabilă (ca generator sau motor) este pentru

$$\theta < \theta_{max}$$

Caracteristica unghiulara

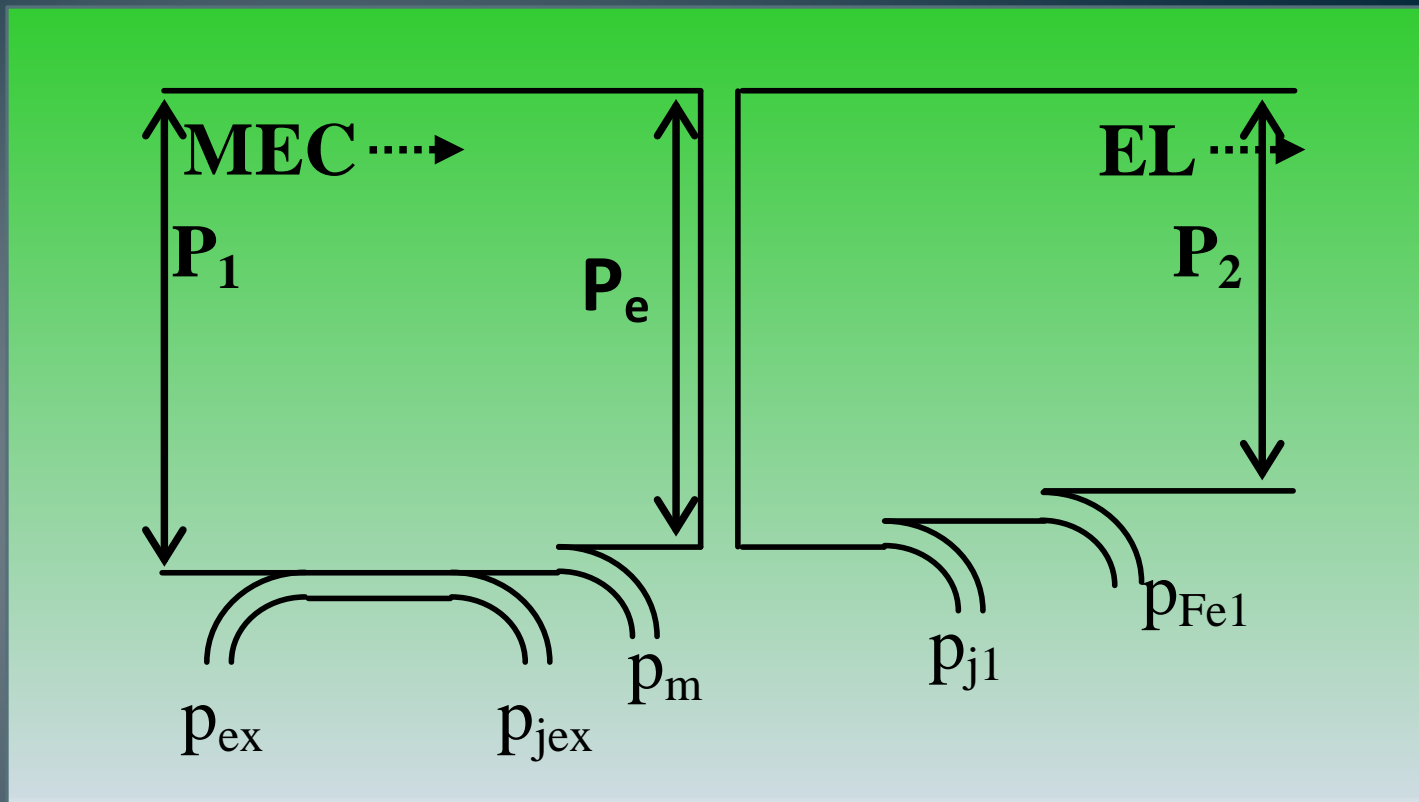
La mașina cu poli înecați ($X_d=X_q=X_s$) există doar componentă principală a cuplului electromagnetic. Caracteristica unghiulară este reprezentată de curba 1.

La mașina cu poli aparenti ($X_d>X_q$), există atât componenta principală a cuplului electromagnetic cât și o componentă de reluctanță. Caracteristica unghiulară se obține prin compunerea curbelor 1 și 2, rezultând curba 3.

În regim de generator, punctul B de pe caracteristica unghiulară a mașinii cu poli înecați reprezintă funcționarea la nominal, de exemplu. Mașina poate funcționa și la suprasarcină (un timp scurt), de exemplu în punctul C. Funcționarea limită la suprasarcină are loc în punctul A. Dacă cuplul rezistent depășește valoarea corespunzătoare punctului A, mașina decroșează (scade turația până la oprire însă, atenție, este un regim de avarie ce poate deteriora mașina electrică).

La mașina cu poli înecați, unghiul intern maxim este de $\pi/2$. La mașina cu poli aparenti, unghiul intern maxim este mai mic de $\pi/2$ (în funcție de amplitudinea componentei de reluctanță).

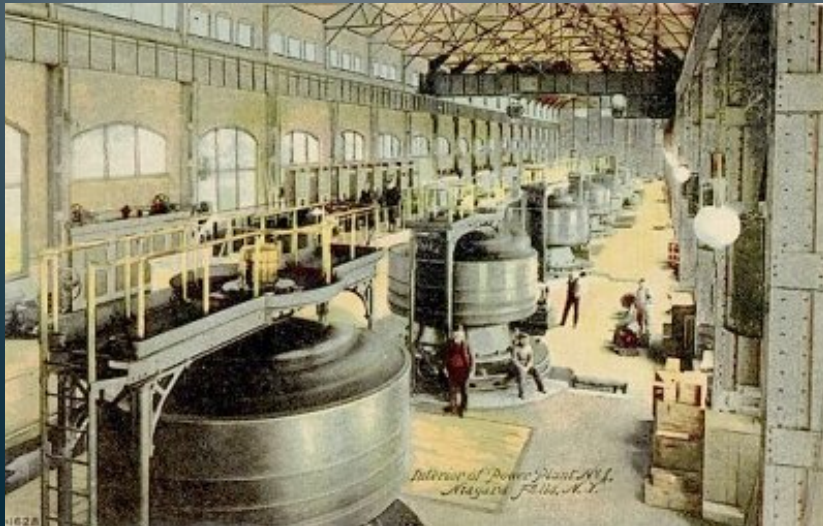
Diagrama echilibrului de puteri pentru regimul de generator



- P_1 – puterea mecanică furnizată generatorului
- P_2 – puterea electrică disponibilă la bornele generatorului
- P_e – putere electromagnetică la nivelul întrefierului
- p_{Fe1} – pierderile în fier (în stator)
- p_{j1} – pierderi Joule în înfășurarea statorică
- p_m – pierderi mecanice
- p_e – pierderi în excitație (de tip Joule)

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum p}$$

Generatorul sincron



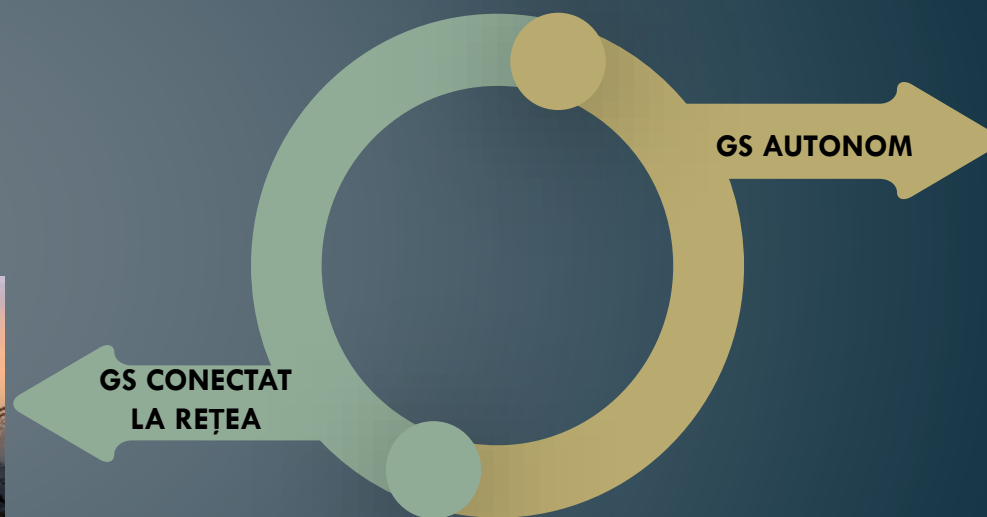
Regimul de generator este caracterizat de:

- Antrenarea mașinii din exterior;
- Primește putere mecanică pe la arbore și cedează putere electrică pe la borne;
- Unghiul intern este pozitiv ($\theta > 0$), respectiv câmpul inductor este în avans față de câmpul rezultat.

TIPURI DE FUNCȚIONARE



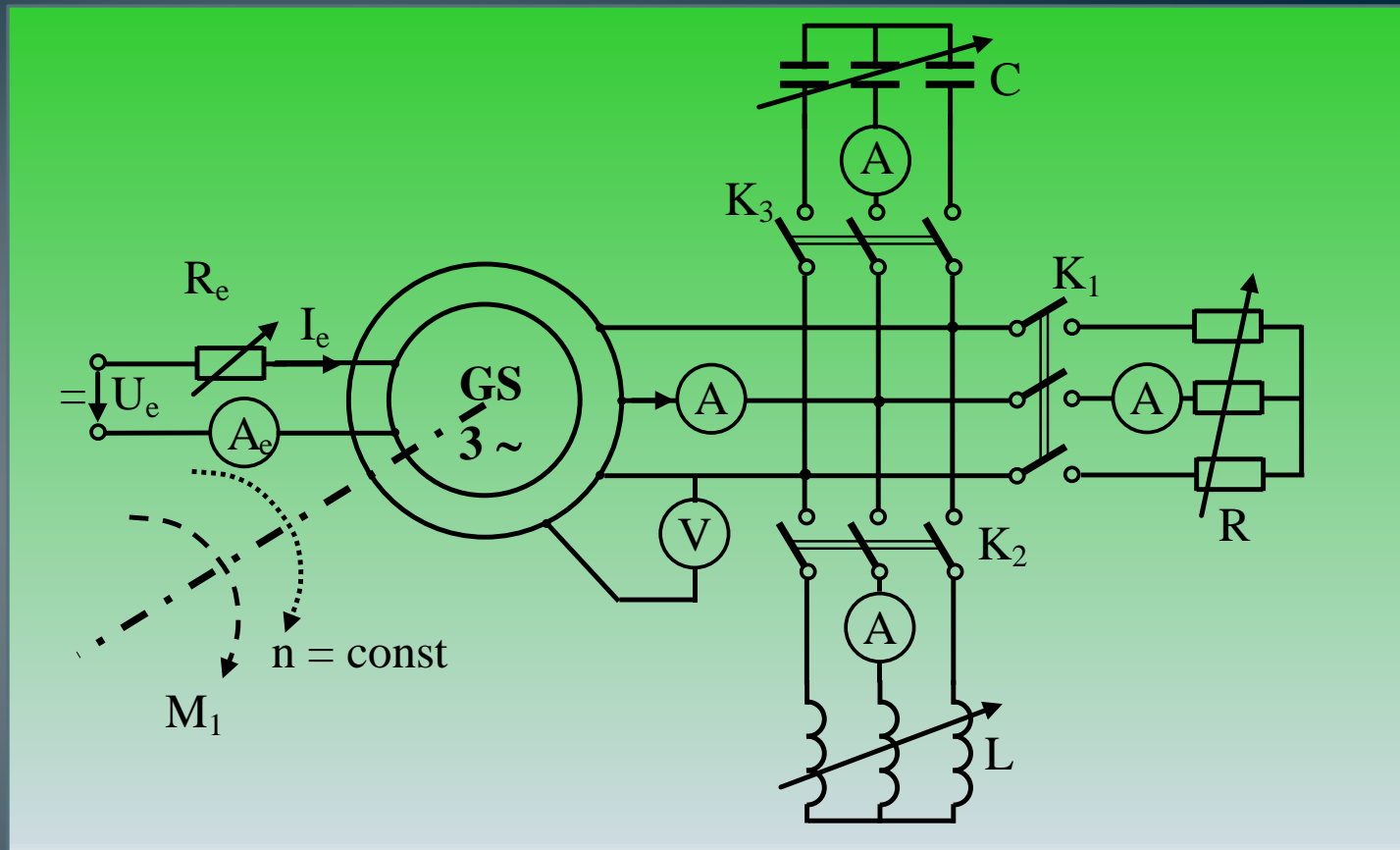
**GS CONECTAT
LA REȚEA**



GS AUTONOM



I. Generator sincron autonom



Este generatorul care alimentează una sau mai multe sarcini independente sau chiar o rețea locală de distribuție.

Caracteristici de funcționare

Acestea pun în evidență modul de variație a două mărimi electrice atunci când celelalte sunt menținute la valoare constantă.

Mărimile electrice care particularizează funcționarea generatorului sincron sunt:

E_0 – tensiunea indusă la mersul în gol;

U – tensiunea la bornele generatorului la funcționarea în sarcină;

I_a – curentul prin înfășurarea statorică (curent de sarcină);

I_e – curentul de excitație (curentul prin înfășurarea rotorică);

P_1 – puterea mecanică absorbită de generator de la mașina de antrenare;

P_2 – puterea electrică disponibilă la bornele generatorului;

Θ - unghiul intern;

$\cos\varphi$ - factorul de putere;

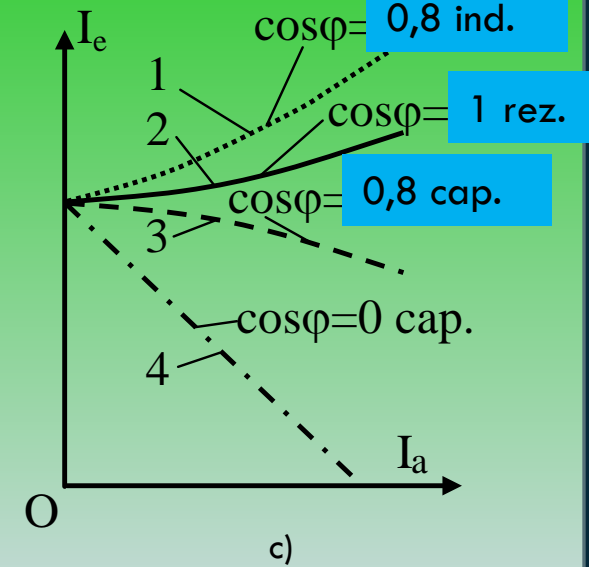
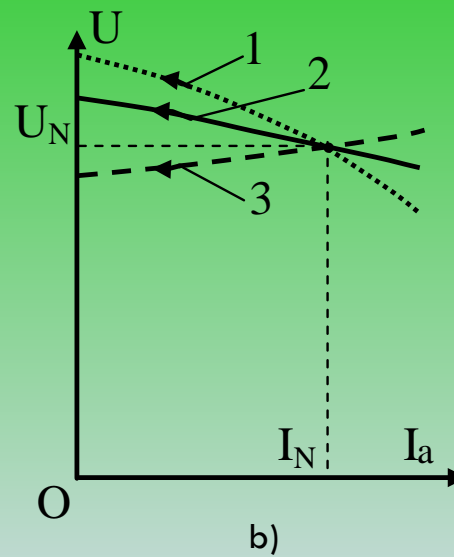
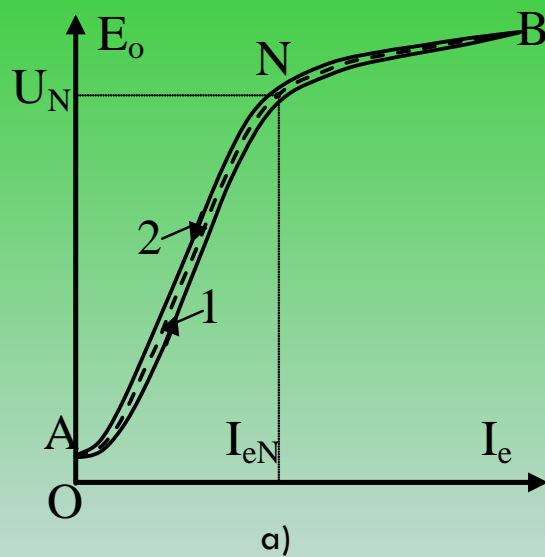
f – frecvența tensiunii la bornele generatorului.

Cele mai importante caracteristici de funcționare:

a) Caracteristica de funcționare in gol $E_0 = f(I_e)$, $n = \text{const.}$, $I_a = 0$

b) Caracteristica externă $U = f(I_a)$, $n = \text{const.}$, $I_e = \text{const.}$, $\cos\varphi = \text{const.}$

c) Caracteristica de reglaj $I_e = f(I_a)$, $n = \text{const.}$, $U_a = \text{const.}$, $\cos\varphi = \text{const.}$



1- sarcina inductiva; 2 – sarcina rezistiva; 3 – sarcina capacitiva.

Cele mai importante caracteristici de funcționare sunt:

a) Caracteristica de funcționare în gol indică modul de variație a tensiunii induse în înfășurarea statorică la modificarea curentului de excitație.

Ea se trasează la turație constantă și, evident, curent de sarcină nul. Modul de variație reproduce caracteristica de magnetizare a circuitului magnetic.

b) Caracteristica externă este caracteristica definitorie a oricărui generator electric. Ea arată modul de variație a tensiunii la borne atunci când variază sarcina (adică curentul statoric).

Atunci când sarcina are un caracter activ (curba 2) sau activ-inductiv (curba 1), tensiunea la bornele generatorului SCADĂ odată cu creșterea sarcinii. Această scădere este cuantificată de mărimea numită „variație de tensiune”, a cărei expresie este:

$$\Delta u_N = \frac{E_0 - U_N}{U_N}$$

Dacă sarcina are un caracter capacitiv (curba 3), tensiunea la bornele generatorului CREȘTE odată cu creșterea sarcinii.

c) Caracteristica de reglaj arată cum trebuie modificat curentul de excitație astfel încât, atunci când sarcina variază, tensiunea la bornele generatorului să rămână CONSTANTĂ.

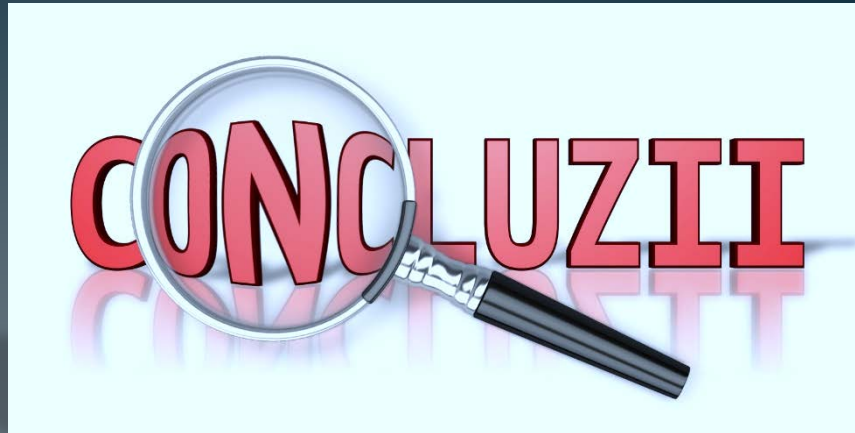
Evident, curentul de excitație trebuie crescut odată cu sarcina, dacă aceasta are caracter activ sau activ-inductiv, respectiv trebuie scăzut pentru sarcini capacitive.

Particularitățile funcționării autonome

- Generatorul sincron autonom poate funcționa la orice turație, mai precis turația impusă de mașina sau agentul de acționare. Frecvența tensiunii generate va fi însă dependentă de turația rotorului.

$$f = \frac{p \cdot n}{60}$$

- Caracteristica externă pune în evidență faptul că, pentru sarcini active sau activ-inductive, tensiunea la bornele generatorului SCAD. Pentru menținerea ei CONSTANTĂ trebuie MĂRIT curentul de excitație (așa cum se vede pe caracteristica de reglaj, $I_e = f(I_a)$).

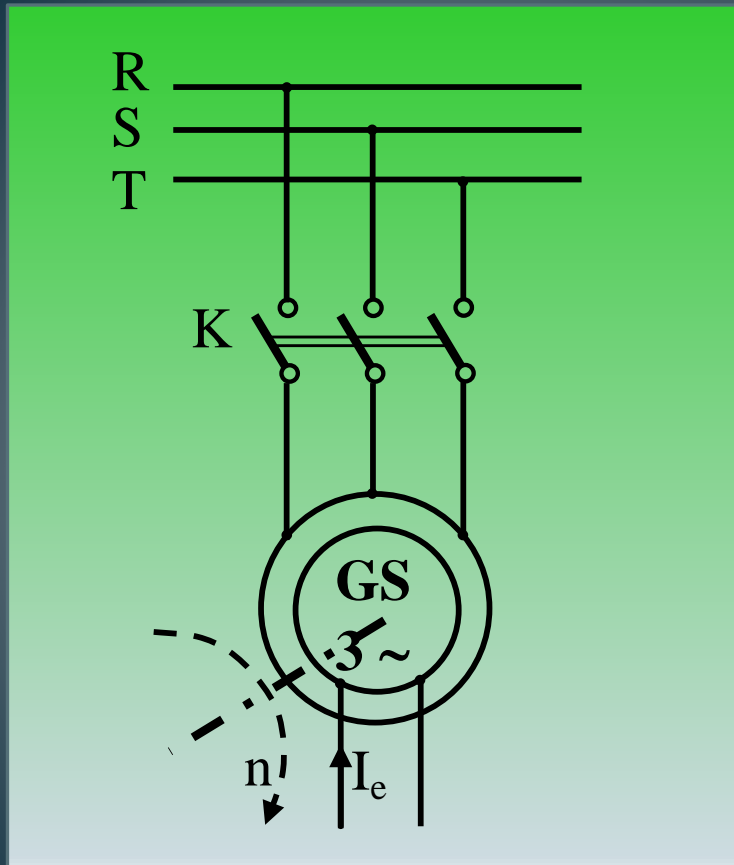


- a) Generatorul sincron autonom poate funcționa la **ORICE** turație. „Funcționarea la sincronism” a generatorului sincron autonom rămâne un concept valabil cu mențiunea că viteza de sincronism este fixată de mașina de antrenare la orice valoare

- b) **TENSIUNEA** la bornele mașinii variază odată cu turația

- c) **FRECVENȚA** tensiunii de la borne variază odată cu turația

II. Generator sincron conectat la rețea (funcționare în paralel)



Atunci când generatorul sincron este conectat la o rețea de transport și distribuție a energiei electrice, el funcționează în paralel pe acea rețea, respectiv în paralel cu alte generatoare sincrone conectate la acea rețea.

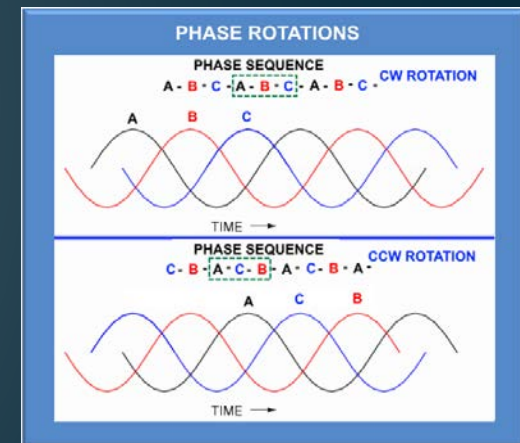
Închiderea întrerupătorului K, de cuplare a generatorului la rețea, nu se poate face decât dacă energia electrică produsă de generator este compatibilă cu cea a rețelei.

Cu alte cuvinte, înainte de închiderea întrerupătorului K, trebuie îndeplinite anumite condiții denumite *condiții de cuplare în paralel*.

II. Funcționarea în paralel pe o rețea

Condiții de cuplare in paralel

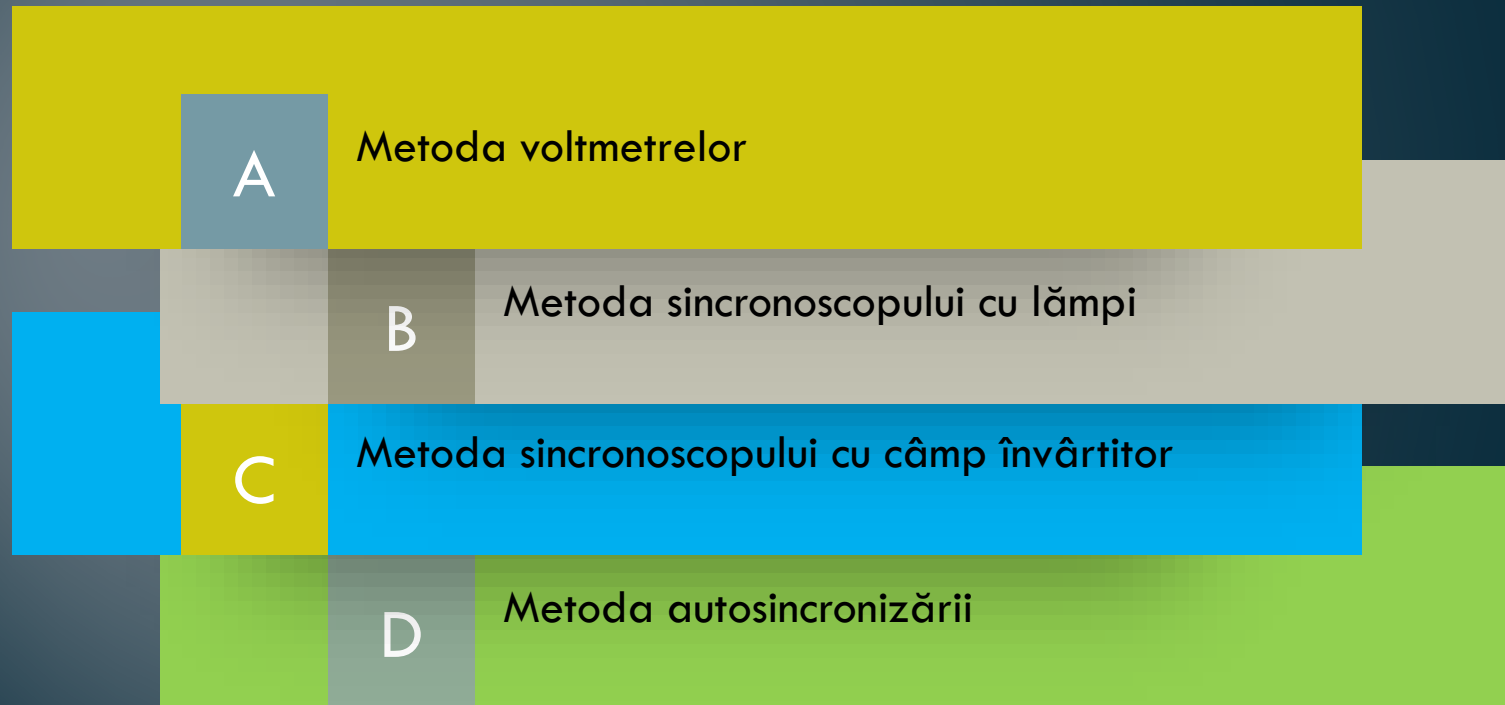
1. Egalitatea valorilor efective ale TENSIUNILOR (rețelei și generatorului)
2. Egalitatea FRECVENȚELOR tensiunilor
3. Aceeași ordine de succesiune a fazelor
4. Același tip de variație a tensiunilor (de preferință sinusoidală)



Momentul cuplării: când tensiunile sunt în fază

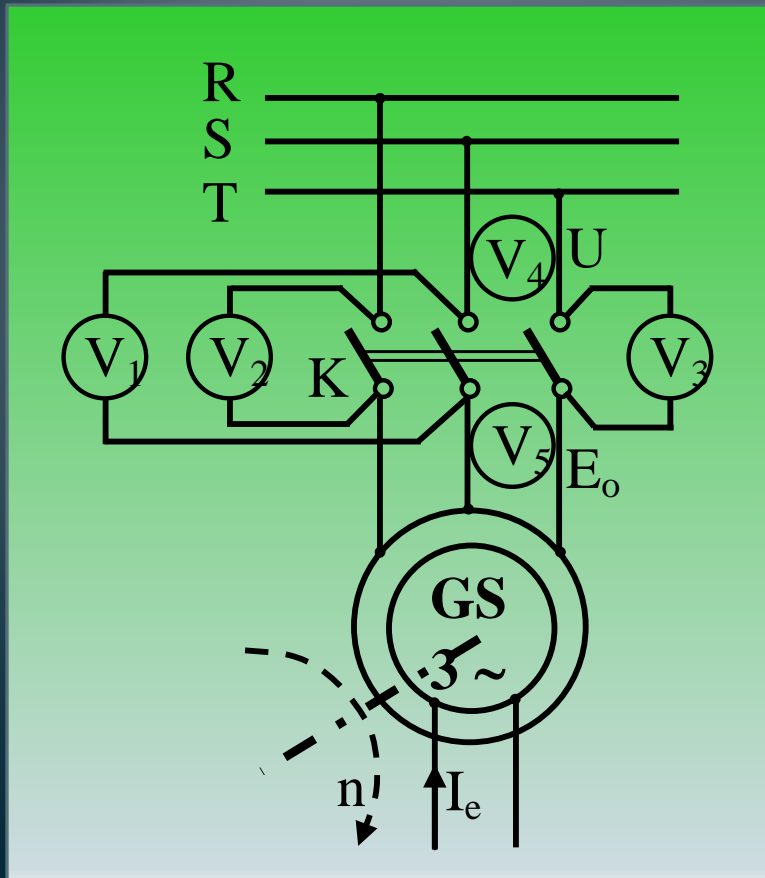
METODE DE SINCRONIZARE

Realizarea condițiilor de cuplare în paralel a generatoarelor sincrone reprezintă operația de „sincronizare”.



A. Metoda voltmetrelor

Această metodă presupune utilizarea DOAR a 5 voltmetre pentru verificarea condițiilor. Voltmetrele V1, V2 și V3 sunt montate pe bornele omoloage ale întrerupătorului K. Voltmetrele V4 și V5 măsoară tensiunea rețelei respectiv tensiunea produsă de generatorul sincron.



1. V4 și V5 indică aceeași valoare

2. Acele voltmetrelor V1, V2 și V3 oscilează încet (o oscilație la 3-4 secunde) – asta înseamnă că frecvențele celor două tensiuni sunt apropiate

3. Acele voltmetrelor oscilează simultan în același sens (adică succesiunea fazelor este aceeași pentru generator și rețea)



4. Moment conectare : când acele voltmetrelor ajung la valoarea zero

În cazul în care una sau mai multe condiții nu sunt îndeplinite, trebuie modificate mărimile generatorului sincron după cum urmează:

1'. Dacă tensiunile V4 și V5 nu sunt egale: *Se modifică tensiunea V5 prin modificarea turației generatorului sau prin modificarea curentul de excitație.*

2'. Dacă acele voltmetrelor V1-V3 nu oscilează foarte rar: *Frecvența tensiunii generatorului se modifica prin modificarea turației.*

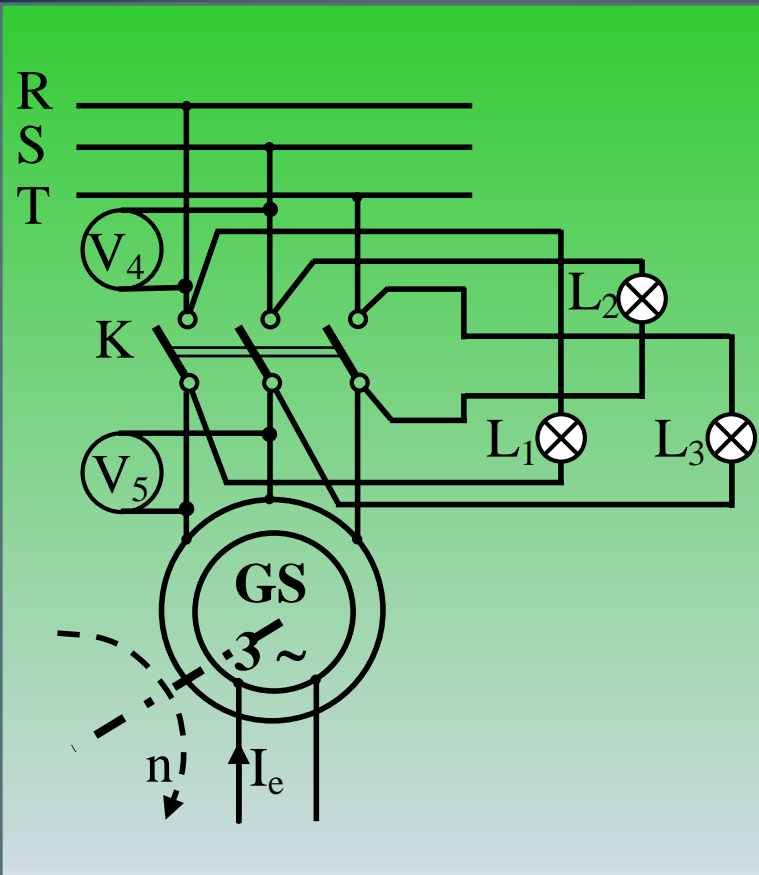
3'. Dacă acele voltmetrelor nu oscilează toate în același sens, simultan: *Se inversează două faze la bornele întrerupătorului K, fie de la generator fie de la rețea.*



Îndeplinirea condițiilor presupune o modificare simultană a turației și curentului de excitație ale generatorului.

B. Metoda sincronoscopului cu lămpi

Sincronoscopul cu lămpi este un dispozitiv simplu ce are 3 „becuri” montate în forma de triunghi echilateral. Unul din becuri este montat la bornele omoloage ale unei faze iar celelalte două sunt montate la borne din faze diferite



1. V_4 și V_5 indică aceeași valoare

2. Lămpile L_1 , L_2 și L_3 se aprind și se sting încet (o dată la 3-4 secunde)

3. Lămpile se aprind și sting **SUCCESIV** (senzația vizuală este de „foc învârtitor”)



4. Moment conectare: când lampa L_1 se stinge

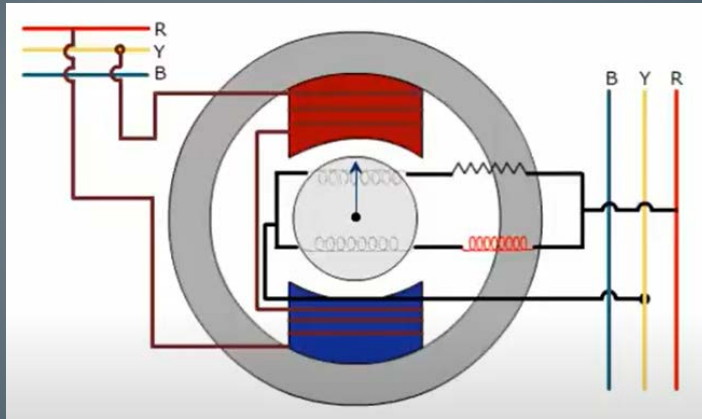
1'. Tensiunea V_5 se modifică din turație și din curentul de excitație

2'. Frecvențele se aduc la aceeași valoare din turație

3'. Se inversează două faze la generator sau rețea

C. Metoda sincronoscopului cu câmp învârtitor

Sincronoscopul cu câmp învârtitor este un dispozitiv asemănător unui motor asincron cu rotor bobinat. El este prevăzut cu DOI poli aparenti pe stator, pe care sunt plasate două bobine înseriate în așa fel încât să formeze poli de polaritate opusă. Rotorul este prevăzut cu creștături uniform distribuite în care sunt plasate două înfășurări defazate la 90° . În plus, pe una din fazele rotorice este înseriată o rezistență iar pe cealaltă o inductanță astfel încât să apară un defazaj al curenților ce străbat cele două înfășurări rotorice.



Înfășurarea de pe stator este conectată la două faze ale generatorului ce urmează a fi conectat în paralel. Fazele omoloage ale rețelei sunt conectate la înfășurările de pe rotor. Aceste înfășurări creează un câmp magnetic învârtitor care interacționează cu câmpul alternativ creat de înfășurarea statorică. Drept urmare, rotorul se rotește într-un sens sau celălalt, lucru pus în evidență de acul indicator ce este solidar cu rotorul.

C. Metoda sincronoscopului cu câmp învârtitor

Rotirea rotorului arată că există o diferență de frecvență între cele două tensiuni (ale generatorului și ale rețelei). Cu cât viteza de rotație este mai mare cu atât diferența de frecvență este mai mare.

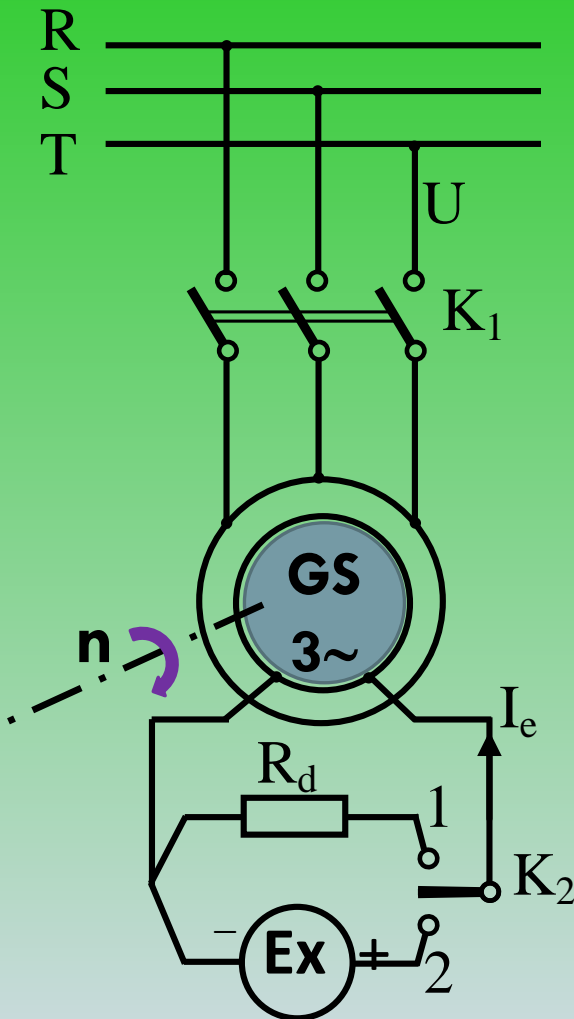
Modificând turația generatorului se obține încetinirea rotirii acului indicator.

Cuplarea generatorului la rețea se face în momentul în care acul ajunge în dreptul punctului marcat corespunzător orei 12, adică atunci când defazajul dintre tensiuni este zero.



Aparatele moderne sunt de tip digital având și posibilitatea indicării valorii tensiunilor generatorului și rețelei.

D. Metoda autosincronizării



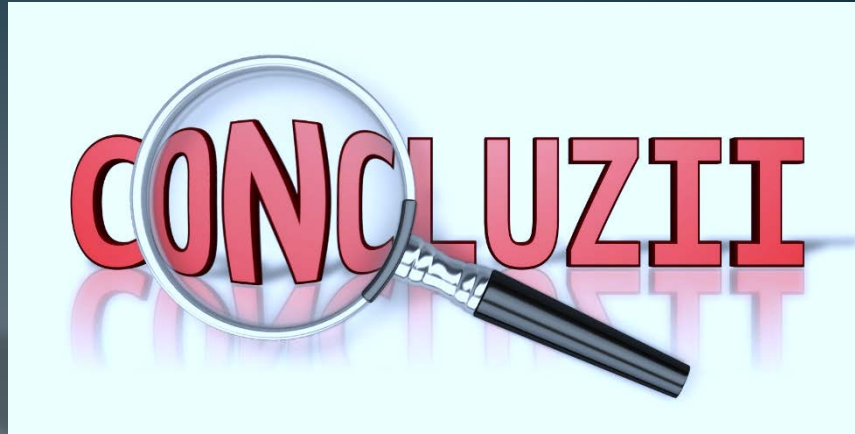
1. Se conectează înfășurarea de excitație pe o rezistență de protecție – K_2 poziția 1
2. Se antrenează generatorul până la o turație apropiată de sincronism
3. Se conectează K_1
4. Se conectează excitația – K_2 pe poziția 2
5. Apar oscilații ale rotorului după care mașina se sincronizează



Metoda se poate aplica NUMAI dacă, în prealabil, s-a creat aceeași succesiune a fazelor (pentru generator și rețea).

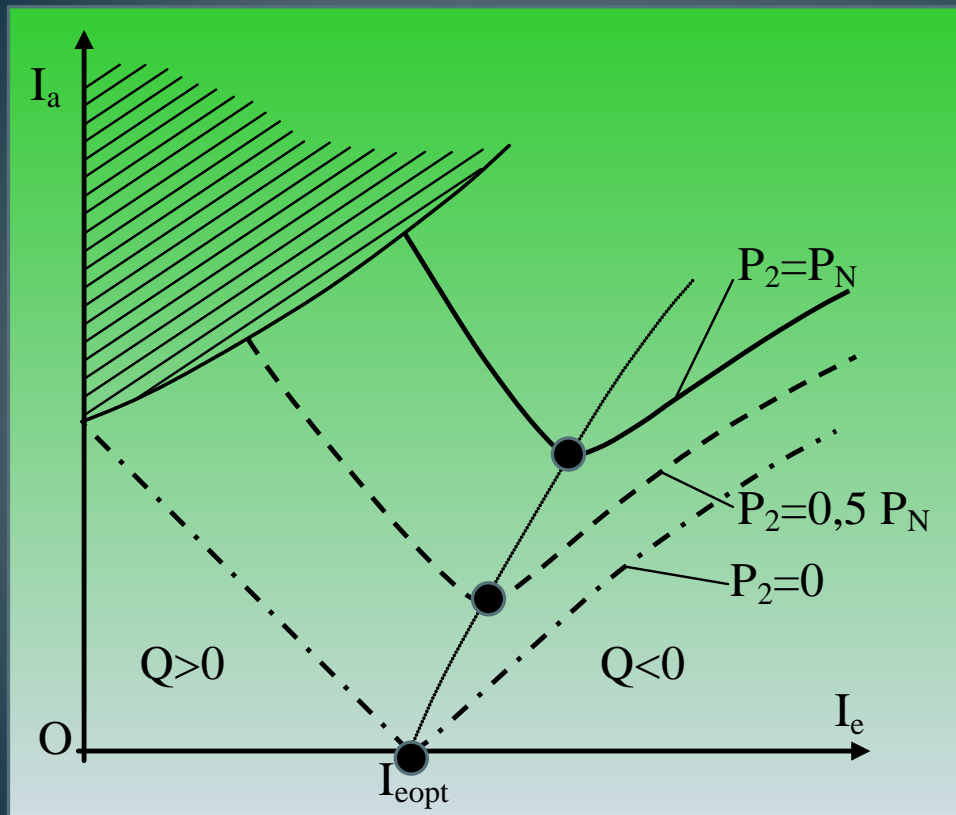
Consecințe ale nerespectării condițiilor de cuplare în paralel

1. Tensiunile NU sunt egale: la cuplare apar curenți de egalizare (componente inductive) ce au un efect magnetizant (demagnetizant) asupra generatorului. Efectele sunt destul de mici.
2. Frecvențele NU sunt egale: pot apărea cupluri puternice de accelerare sau frânare cu solicitări mecanice puternice.
3. Tensiunile NU sunt în fază: apar curenți de egalizare ce creează solicitări electrodinamice importante respectiv șocuri de cuplu (accelerare sau decelerare bruscă a mașinii sincrone).
4. Succesiune diferită a fazelor: **INACCEPTABIL.**



- a) Generatorul sincron conectat la rețea poate funcționa NUMAI la sincronism și anume valoarea impusă de frecvența tensiunii rețelei
- b) TENSIUNEA la bornele mașinii este constantă și egală cu tensiunea rețelei
- c) FRECVENȚA la bornele mașinii este constantă și egală cu frecvența rețelei

Funcționarea la putere constantă și curent de excitație variabil

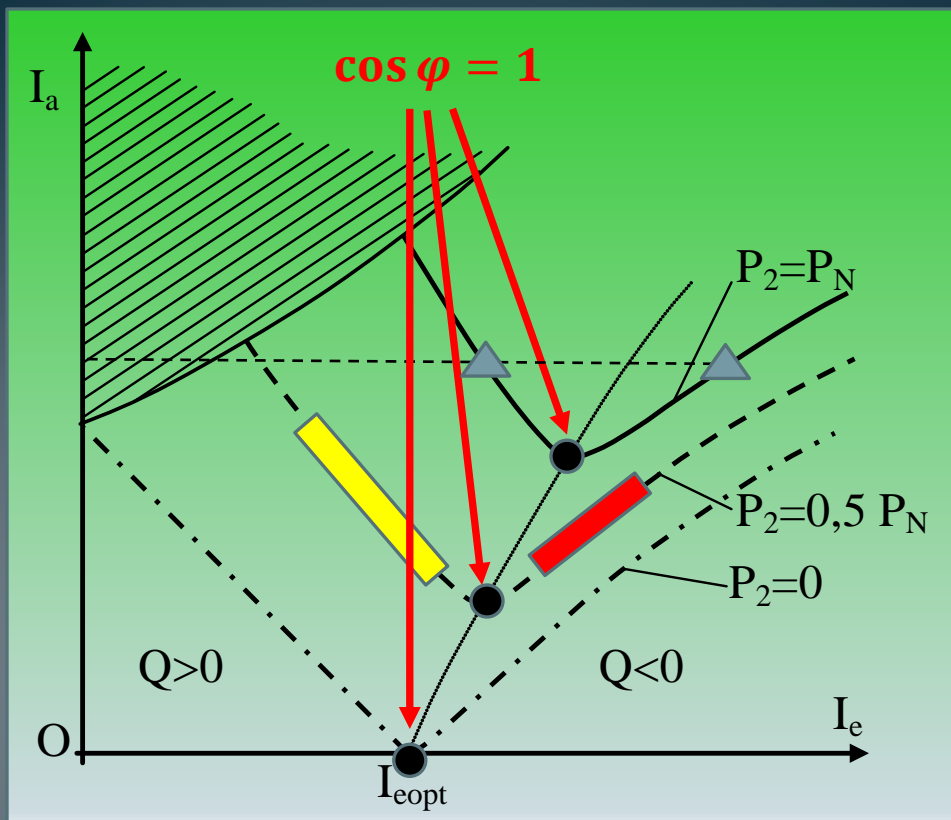


Curbele în V

Acest tip de funcționare arată dependența $I_a=f(I_e)$ atunci când mașina funcționează la putere furnizată constantă.

Se obțin așa numitele „curbe în V” pentru diverse valori ale puterii P_2 .

Punctul de funcționare situat în vârful curbelor (punctul cu valoarea minimă pentru I_a) se numește punct de funcționare la curent de excitație optim.



Curbele in V

1. Funcționare la I_{eopt} : Factor de putere unitar; mașina furnizează putere activă rețelei
2. Funcționare la $I_e < I_{eopt}$: Comportare inductivă; mașina furnizează putere activă rețelei dar absoarbe putere reactivă
3. Funcționare la $I_e > I_{eopt}$: Comportare capacitivă; mașina furnizează putere activă rețelei precum și putere reactivă

Funcționarea la putere constantă și curent de excitație variabil

- comentarii -

1. Generatorul sincron poate furniza aceeași putere (tensiunea menținându-se constantă la borne) pentru diverse valori ale curentului din înfășurarea statorică.
2. Situația cea mai favorabilă corespunde unei valori minime a curentului I_a , ce se obține pentru așa numitul curent de excitație optim, I_{eopt} .
3. Opțiunea de funcționare la $I_e > I_{eopt}$ poate fi justificată de necesitatea furnizării în rețea și a unei componente reactive de energie. Soluția este utilă pentru îmbunătățirea factorului de putere în rețea.
4. Funcționare la $I_e < I_{eopt}$ este o opțiune dezavantajoasă întrucât mașina funcționează la un curent statoric mai mare și în plus absoarbe putere reactivă din rețea.



Caracteristică unghiulară



Unghi intern pozitiv



Curent de excitație optim



Curbe în V



Sincronizare la rețea



Motorul sincron

Curs 11



Cuprins Be Here

» Principiul de funcționare

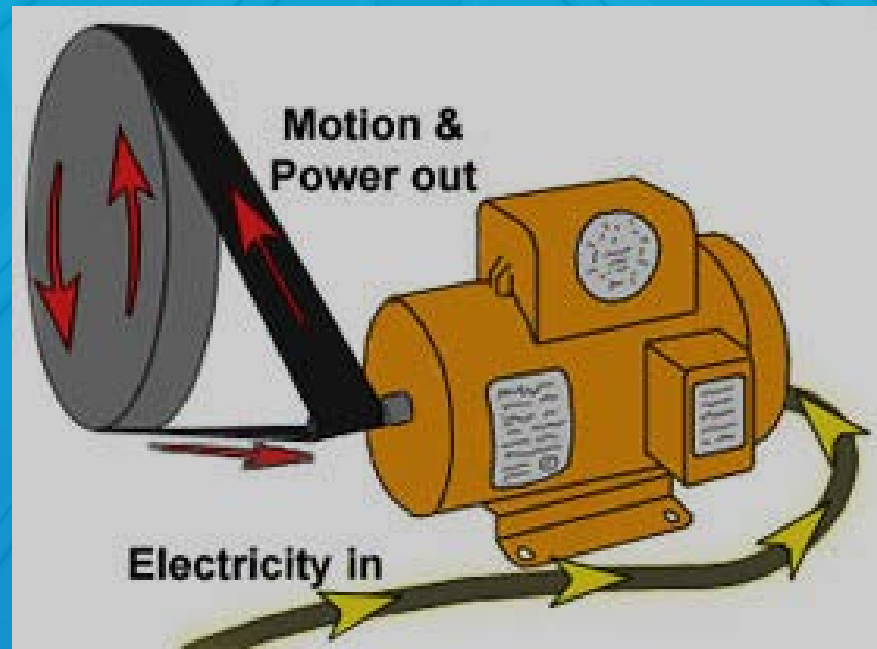
» Caracteristici de funcționare

» Pornirea motorului sincron



» Stabilitatea motorului sincron

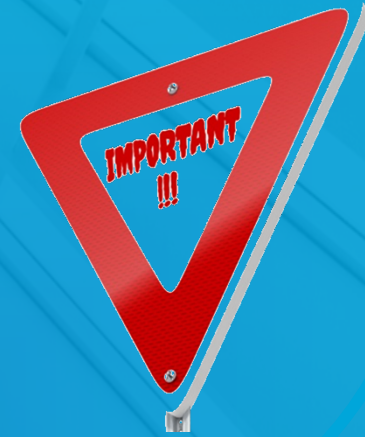
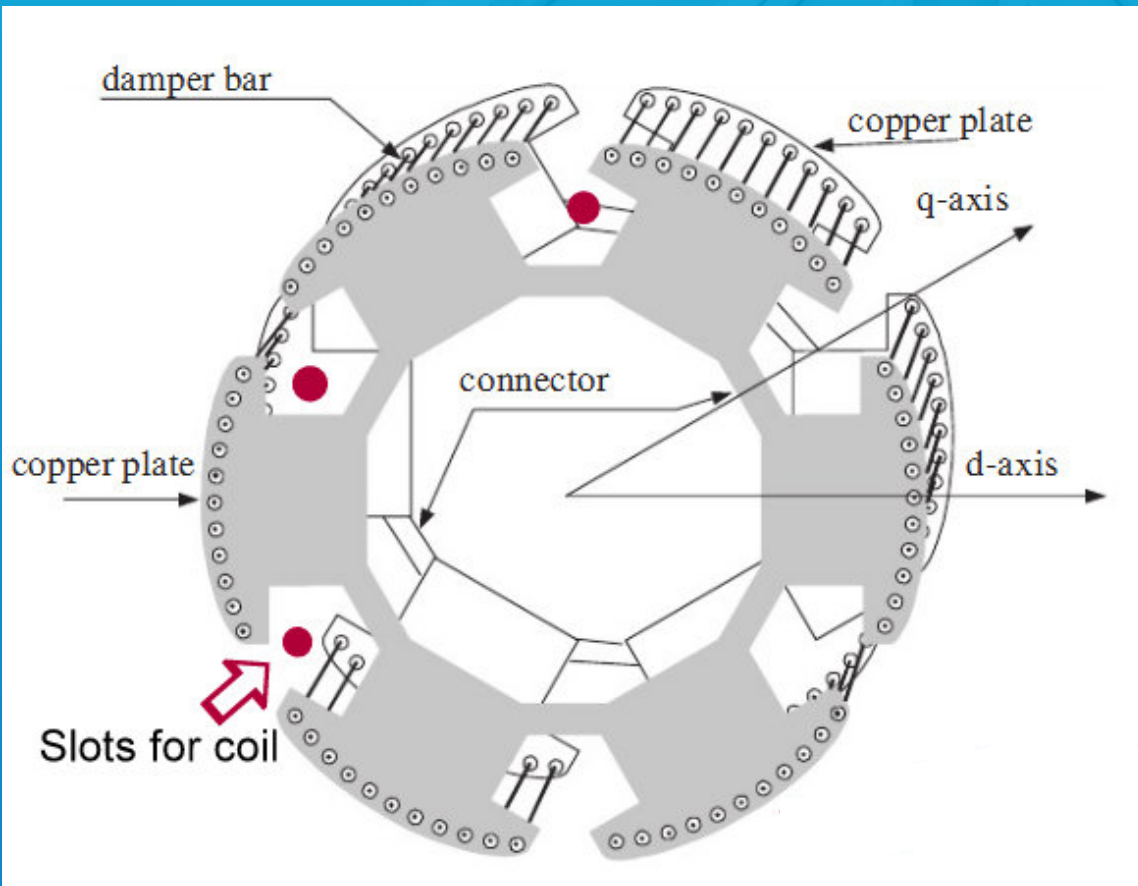
» Frânarea motorului sincron



În regim de motor, mașina absoarbe energie electrică pe la borne și furnizează energie mecanică la ax.

Prin urmare, în regim de motor, mașina sincronă este conectată la o rețea de energie electrică.

În regim de motor, unghiul intern θ este negativ. Deci, câmpul rezultat Φ este defazat înaintea câmpului inductor Φ_0 .



Element constructiv important

Înfășurare de pornire/amortizare

Înfășurare de pornire/amortizare este o înfășurare opțională ce apare în construcția mașinilor sincrone (există mașini sincrone la care această înfășurare NU este prezentă). Ea are însă un rol determinant atunci când mașina este destinată să funcționeze în regim de motor.

In cazul mașinii sincrone cu poli aparenti, sunt practicate crestături în piesele polare ale polilor inductori rotorici, în care sunt plasate bare de Cu sau Al, scurtcircuitate la capete (construcția este similară înfășurării în scurtcircuit de la mașina asincronă).

La mașina cu poli înecați, în istmurile crestăturilor rotorice sunt plasate pene feromagnetice. Acestea formează, de asemenea, o structură în scurtcircuit.

Cele două structuri descrise formează **înfășurarea de pornire** a mașinii sincrone funcționând în regim de motor.

Ele joacă, de asemenea, și rol de **înfășurare de amortizare** în ambele regimuri de funcționare a mașinii sincrone.

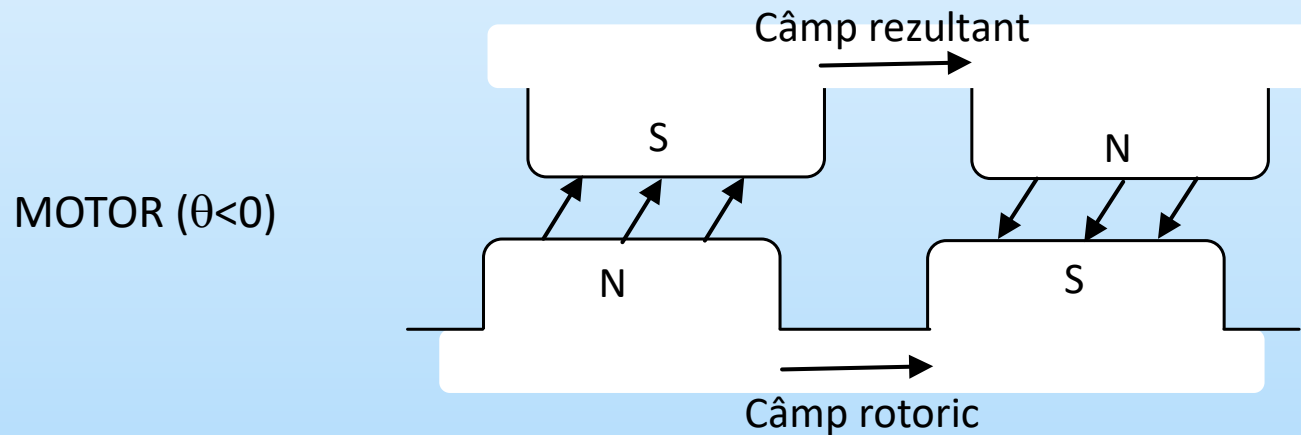
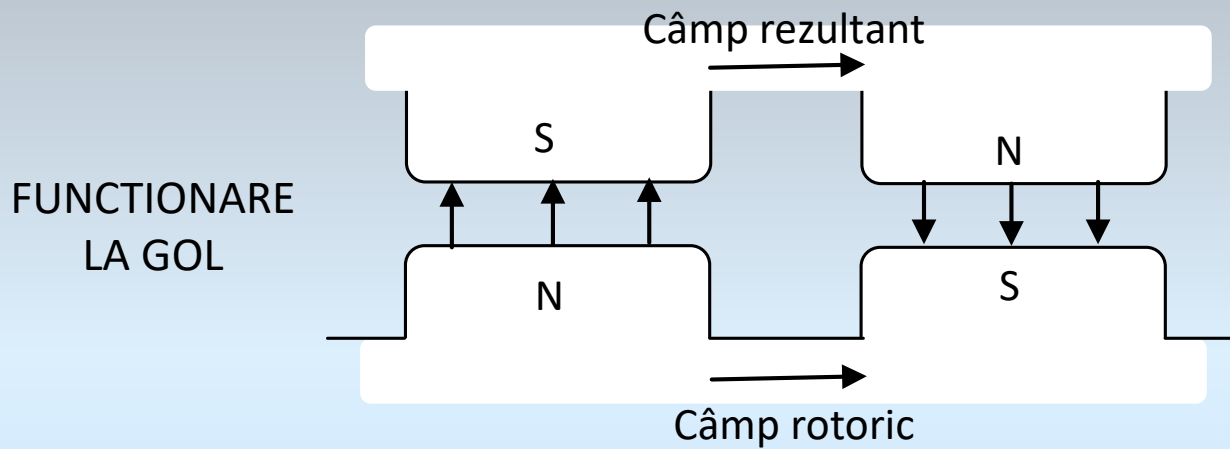
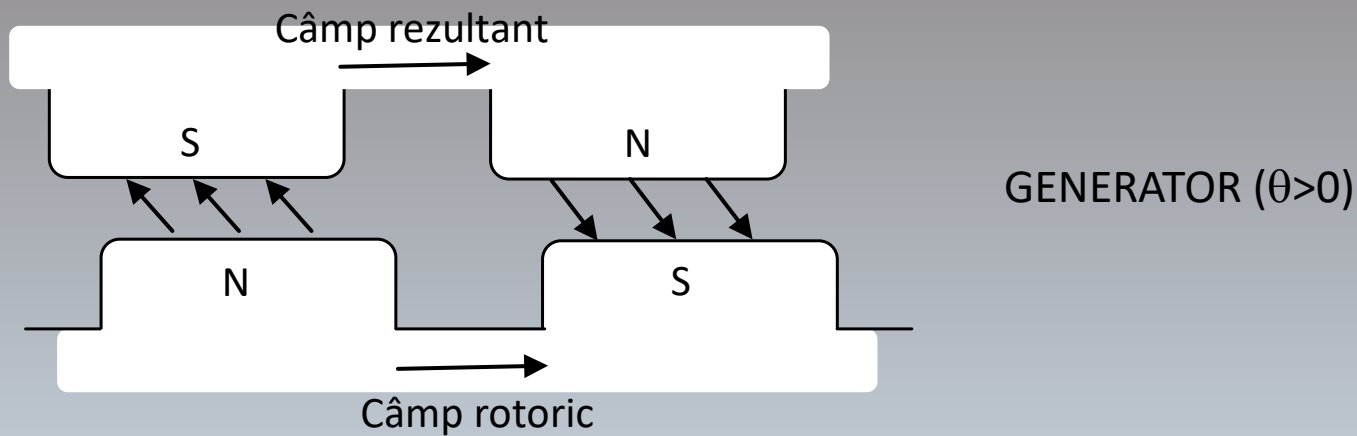
Această înfășurare NU joacă nici un rol atâta vreme cât mașina funcționează la sincronism (viteza relativă dintre câmpul învârtitor și rotor este zero, prin urmare nu se induc tensiuni și nu apar curenți).

Principiul de funcționare

1. Se alimentează înfășurare statorică de la o sursă de tensiune trifazată. Drept urmare, ia naștere un câmp magnetic învârtitor (creat pe cale electrică).
2. Rotorul (a cărui înfășurare este alimentată și produce câmpul inductor fix în spațiu) se rotește cu viteza de sincronism a câmpului creat de înfășurarea statorică (condiție obligatorie), și în același sens cu acesta. Astfel, cele două câmpuri magnetice, rotoric și statoric, se rotesc cu aceeași viteză.
3. Cele două câmpuri magnetice învârtitoare se cuplează magnetic: polii de polaritate opusă se plasează față în față. Cuplul de atracție mutuală dintre polii de polaritate opusă determină rotirea rotorului și funcționarea mașinii în regim de motor.
4. Câmpul magnetic rezultat „conduce”, în regim de motor, câmpul magnetic rotoric de excitație (unghiul intern este negativ).



5. Motorul sincron dezvoltă cuplu electromagnetic NUMAI la sincronism.



Expresia puterii electromagnetice dezvoltate de motorul sincron:

$$P_e = \frac{3UE_0}{X_d} \sin \theta + \frac{3U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta$$

Componenta principală a puterii electromagnetice:

$$P'_e = \frac{3UE_0}{X_d} \sin \theta$$

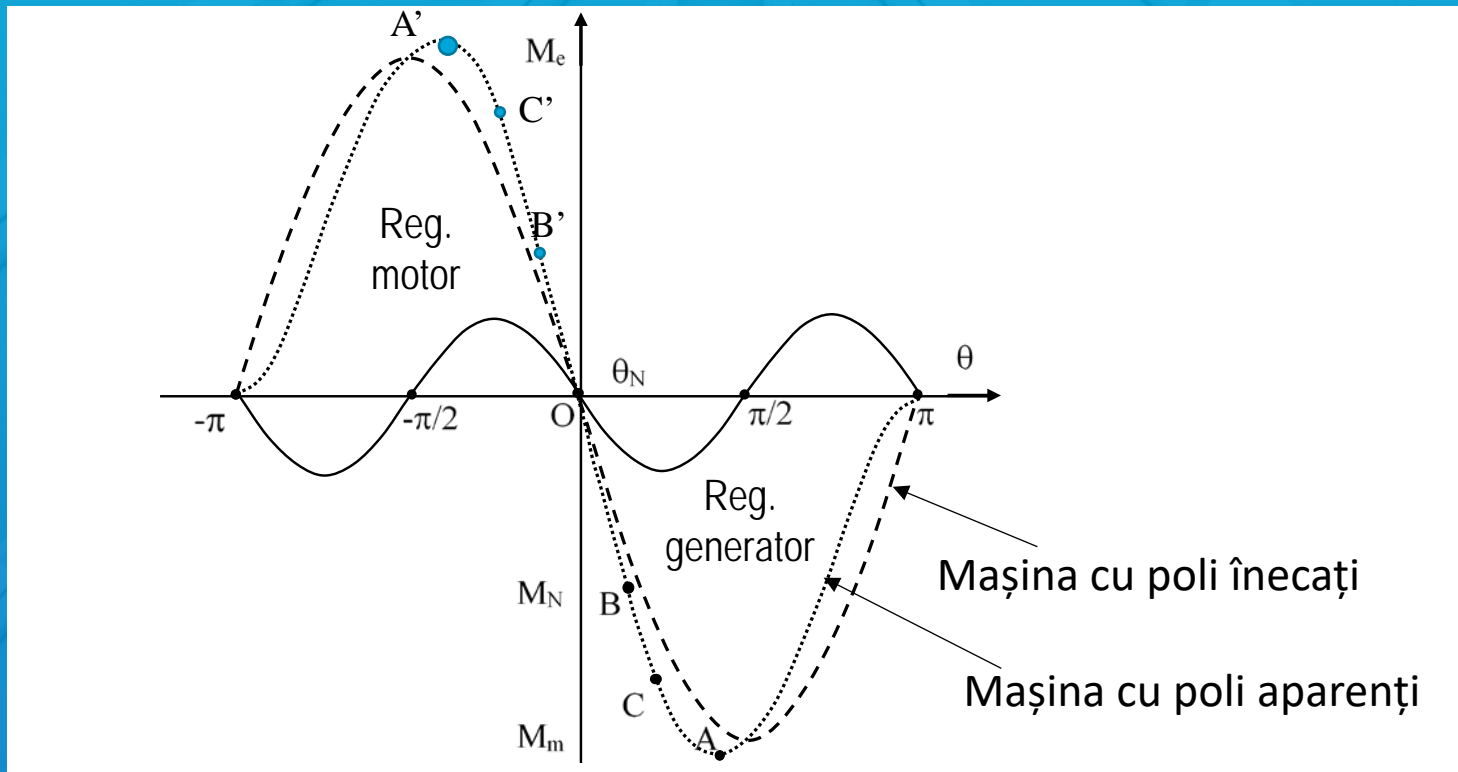
Componenta secundară (de reluctanță) a puterii electromagnetice ce apare numai la mașina cu poli aparenti:

$$P''_e = \frac{3U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta$$

Expresia cuplului electromagnetic dezvoltat de motorul sincron:

$$M_e = \frac{3}{\Omega} \left[\frac{UE_0}{X_d} \sin \theta + \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta \right]$$

Caracteristica $M_e=f(\theta)$



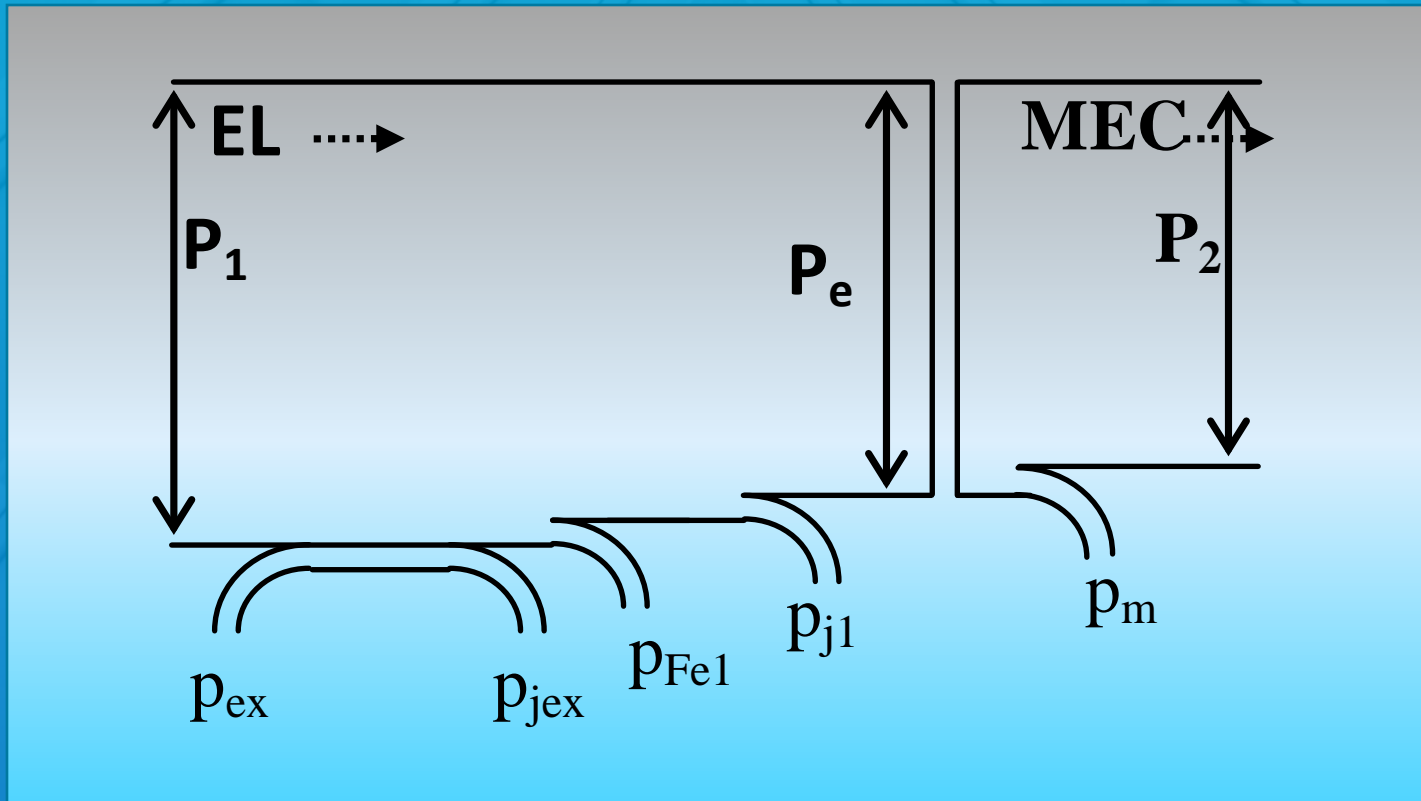
Zona de funcționare în regim de motor este situată în cadranul II ($M_e > 0$ și $\theta < 0$)

Pentru mașina cu poli aparenti, de exemplu, B' reprezintă un punct de funcționare ce poate fi cel nominal, C' este un punct de funcționare la suprasarcină, iar A' este punctul de funcționare la cuplu maxim. Dincolo de punctul A' mașina iese din sincronism.

Funcționarea mașinii sincrone în regim de **motor**, la **gol**, și **supraexcitat**, constituie regimul de COMPENSATOR SINCRON. El are drept scop îmbunătățirea factorului de putere al rețelei la care este conectată mașina sincronă.



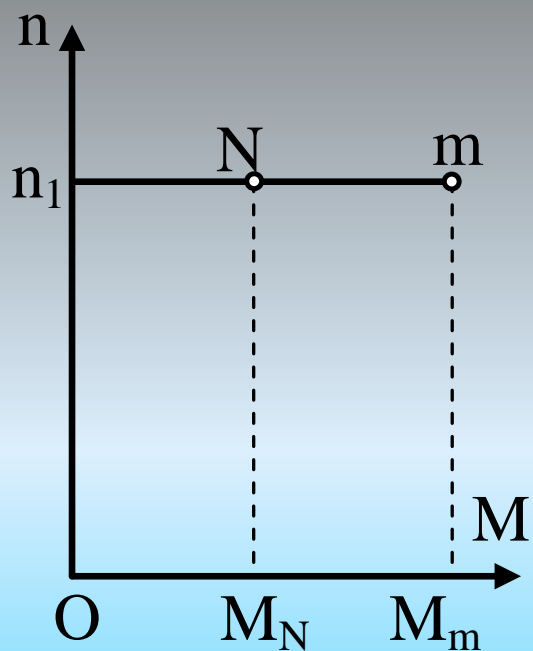
Diagrama bilanțului de puteri



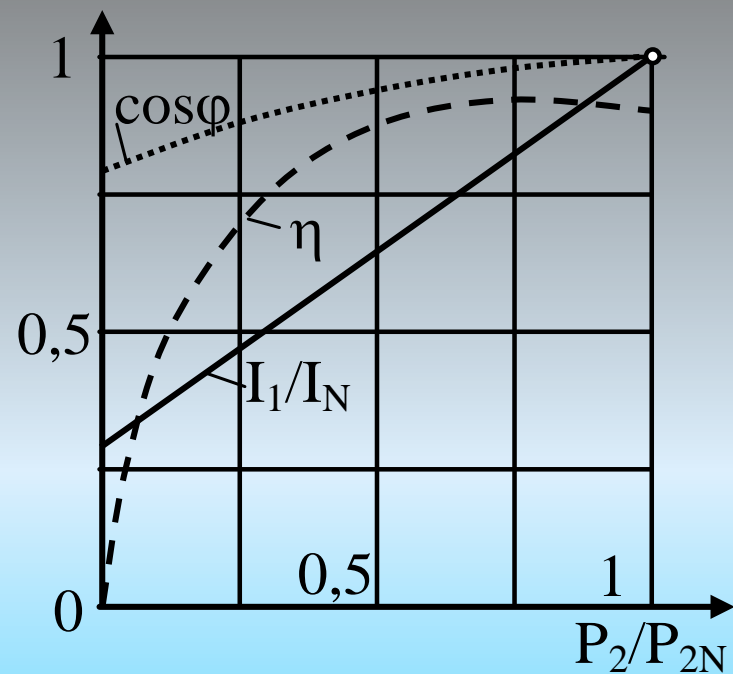
P_1 -puterea electrică absorbită; P_e -puterea electromagnetică; P_2 -puterea mecanică la ax;
 p_{jex} - pierderi în înfășurarea de excitație; p_{Fe1} -pierderi în fierul statoric; p_{j1} -pierderi în înfășurarea statorică; p_m -pierderi mecanice.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum p}{P_1}$$

Caracteristicile de funcționare ale motorului sincron



a.



b.

- a. Caracteristica mecanică
- b. Caracteristici de performanță

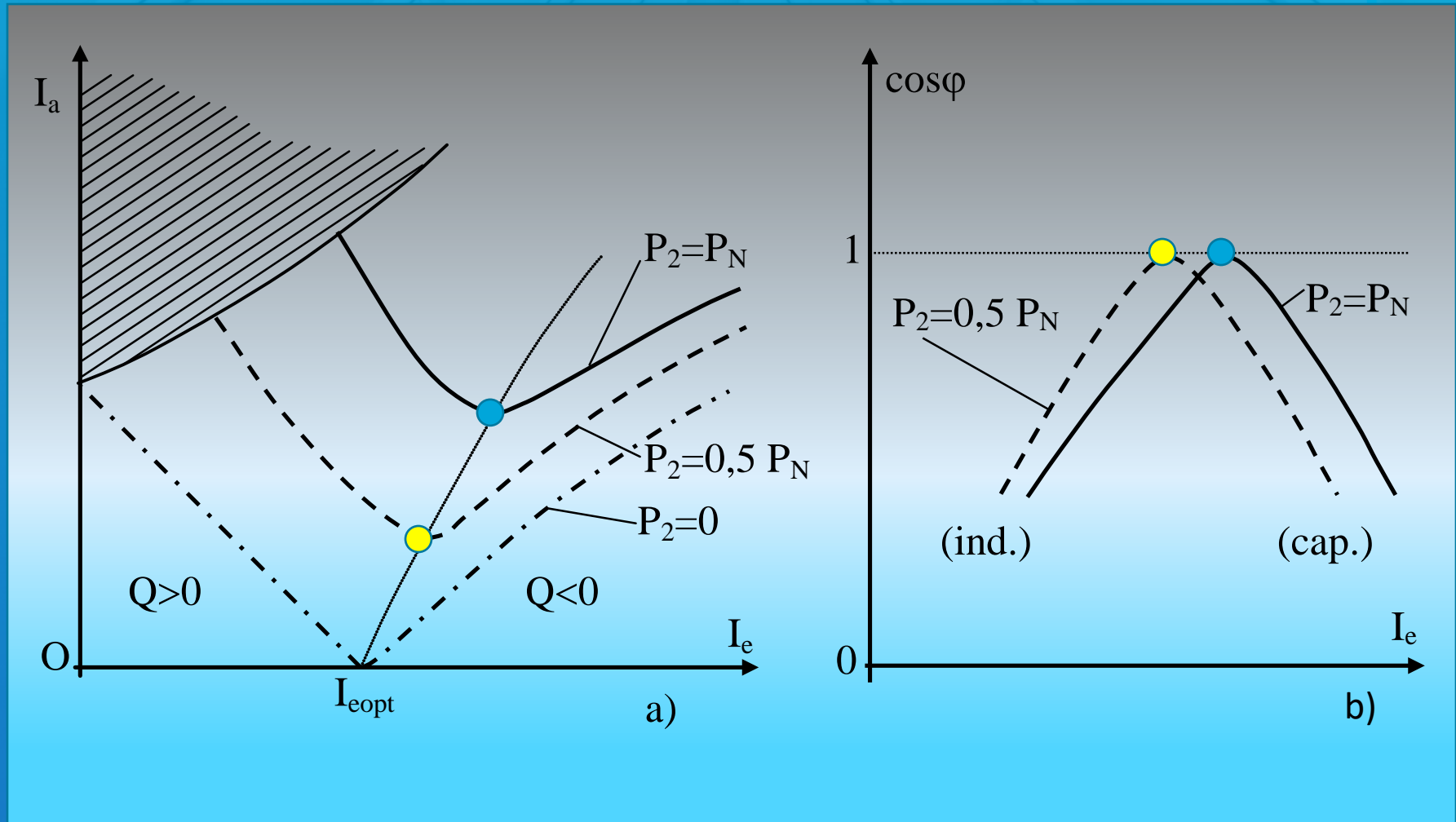
Caracteristica mecanică (fig. a) este o dreaptă paralelă cu abscisa, care subliniază faptul că motorul sincron își menține turația constantă indiferent de variația sarcinii între limitele „zero-cuplu maxim”. Punctul N corespunde funcționării la nominal iar punctul m semnalează funcționarea la cuplu maxim (între N și m este zona de funcționare la suprasarcină).



Caracteristica factorului de putere evidențiază că motorul sincron poate funcționa și la factor de putere unitar.

Caracteristicile in "V"

- funcționare la putere constantă și curent de excitație variabil -



Când motorul sincron funcționează la putere electrică absorbită **CONSTANTA**, variația curentului de excitație, I_e , plasează punctul de funcționare pe o curba în formă de V (fig. a).

Funcționarea optimă a mașinii (adică la un curent minim prin înfășurarea statorică), are loc la curentul de excitație I_{eopt} .

Dacă valoarea curentului de excitație este peste I_{eopt} (funcționare supraexcitată), mașina sincronă furnizează rețelei de alimentare putere reactivă.

Dacă valoarea curentului de excitație este sub I_{eopt} (funcționare subexcitată), mașina sincronă absoarbe din rețeaua de alimentare putere reactivă.

Funcționarea la curent de excitație optim I_{eopt} determină un factor de putere unitar (fig. b).

Pentru toate cele trei situații de funcționare (optimală, supraexcitată și subexcitată), motorul sincron absoarbe din rețea putere activă.

Pornirea motorului sincron



Întrucât mașina sincronă dezvoltă cuplu electromagnetic NUMAI la sincronism, motorul sincron NU are cuplu de pornire.

A

Pornirea cu motor de antrenare (se antrenează mașina sincronă până în apropierea sincronismului; se îndeplinesc condițiile de cuplare în paralel; se sincronizează mașina și se trece în regim de motor)

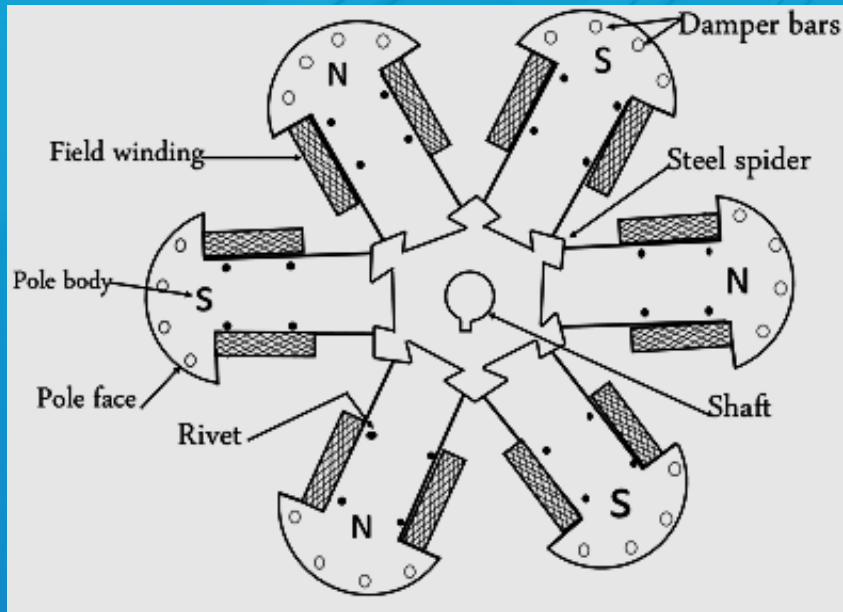
B

Pornirea cu frecvență și tensiune variabile (Se alimentează mașina sincronă, inițial, cu o tensiune de valoare mică și frecvență cât mai mică după care, dacă se reușește sincronizarea, se cresc valorile tensiunii și frecvenței până la nominal)

C

Pornirea în asincron

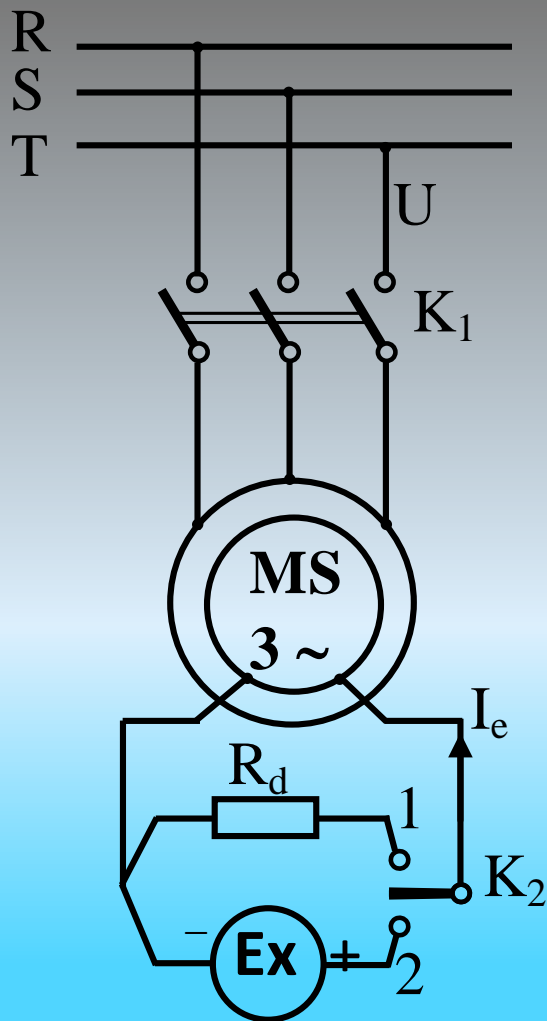
Pornirea în asincron



Pentru a putea fi pornită în asincron, mașina sincronă **TREBUIE** să aibă înfășurare de pornire.

Prin alimentarea înfășurării statorice de la rețea și apariția câmpului învârtitor, sunt create condițiile similare existente în motorul asincron.

Problema suplimentară ce trebuie rezolvată constă în protejarea înfășurării inductoare de pe polii rotorici și respectiv a sursei de alimentare a acesteia (excitatricea) întrucât, conform legii inducției electromagnetice, și în această înfășurare se induce tensiuni care pot distruge fie înfășurarea, fie excitatricea. In acest scop, este **OBLIGATORIE** deconectarea înfășurării rotorice de la sursa de alimentare cu c.c.



Pentru protecție se conectează înfășurarea de excitație pe o rezistență (special calculată) R_d . Aceasta trebuie să asigure un curent care să nu deterioreze înfășurarea de excitație.

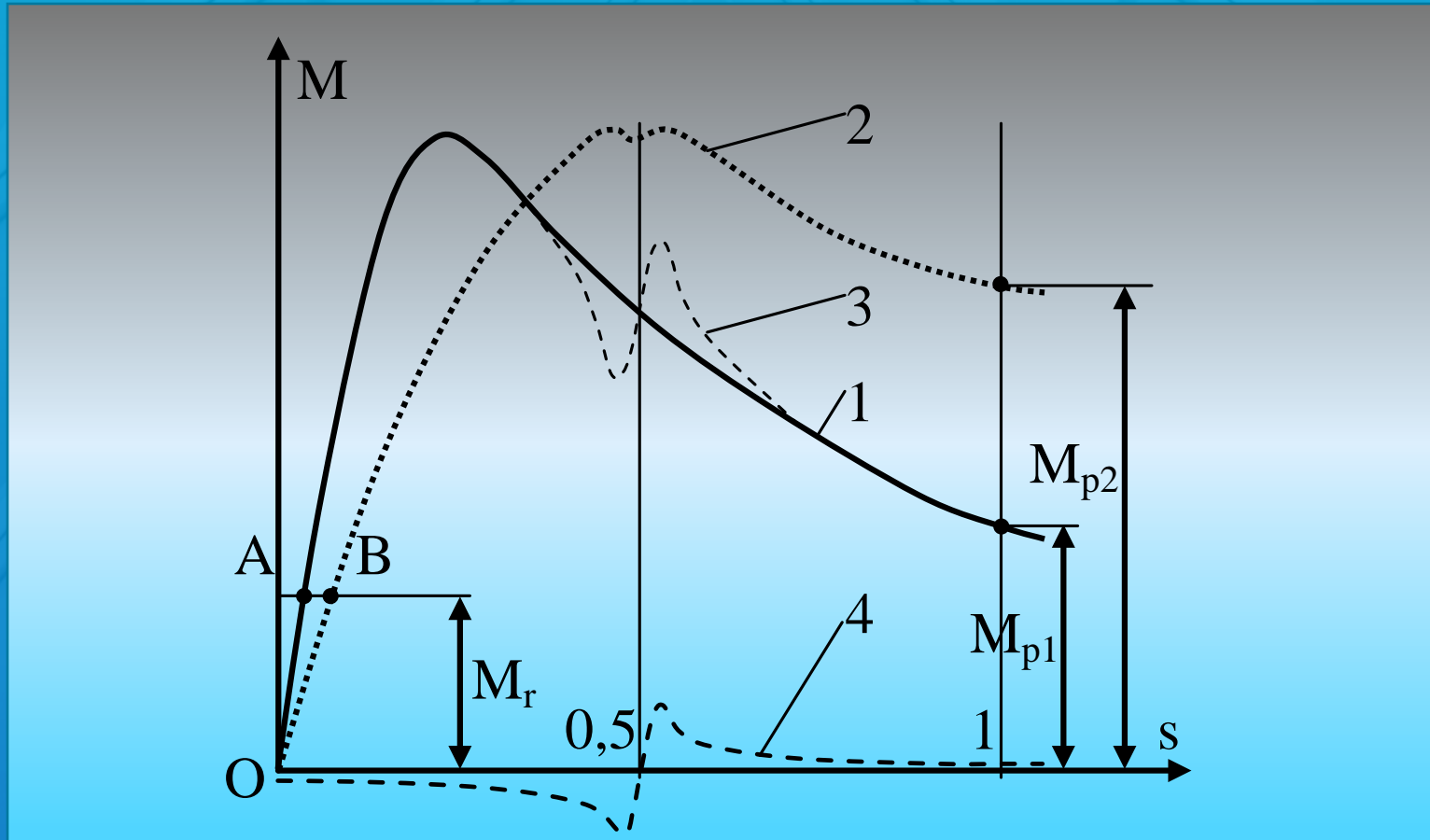
Pornirea se face în următorii pași:

1. Se decuplează înfășurarea de excitație de la sursa de tensiune continuă și se cuplează pe rezistența R_d (K_2 pe poziția 1).
2. Se alimentează înfășurarea statorică (se închide K_1).
3. Mașina sincronă pornește ca motor asincron accelerând până la cca. 95% din turația de sincronism.
4. Se conectează înfășurarea de excitație la sursa de c.c. (K_2 pe poziția 2). Mașina se sincronizează (turația crește până la sincronism) și funcționează ca motor sincron.



Sincronizare poate fi însoțită de oscilații care sunt influențate de: valoarea vitezei rotorului la care se cuplează excitația; valoarea unghiului intern la momentul cuplării; momentul de inerție al sistemului; valoarea cuplului rezistent la arbore.

Caracteristica de pornire în asincron



1. Curba de pornire (funcționare) în asincron
2. Curba de pornire în asincron pentru colivie de pornire de rezistență mare
3. Curba rezultantă (1+4)
4. Curba cuplului monoaxial creat de înfășurarea de excitație conectata în s.c. sau pe o rezistență prea mică

La pornirea în asincron, punctul de funcționare se deplasează pe caracteristica 1 (este caracteristica $M=f(s)$ a unei mașini asincrone) până în punctul A.

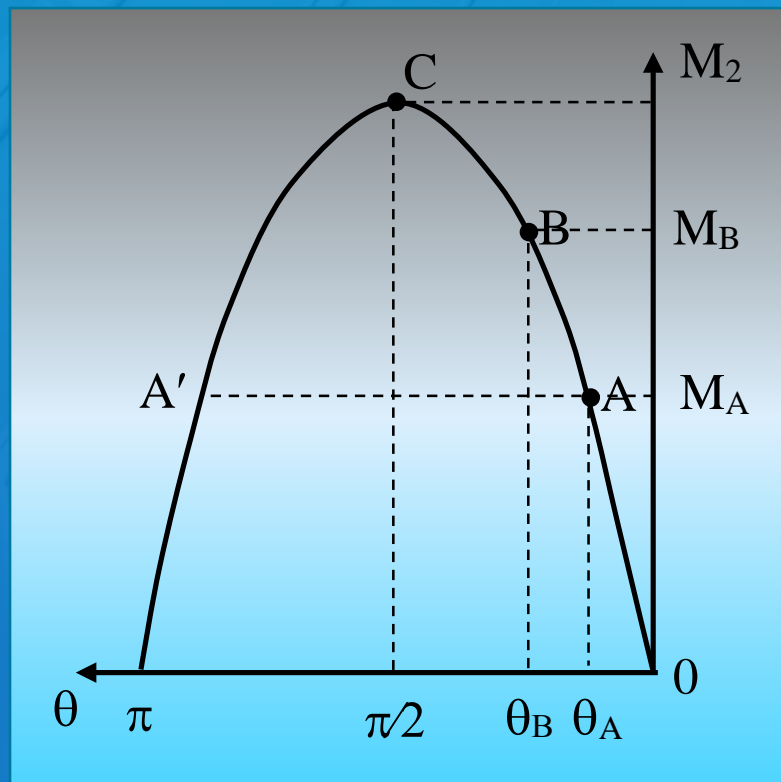
Dacă rezistența coliviei de pornire are o valoare mare, atunci caracteristica $M=f(s)$ este descrisă de curba 2. Se observă, cuplul de pornire este mai mare, deci este o soluție potrivită pentru porniri în sarcină grea. Punctul de funcționare evoluează până în B.

Pe perioada pornirii în asincron, în înfășurarea rotorică (de excitație) se induc tensiuni. Este necesar ca rezistența R_d , pe care este conectată înfășurarea de excitație, să limiteze curentul ce se stabilește prin înfășurarea de excitație. În acest fel, cuplul monoaxial generat (curba 4) nu influențează semnificativ procesul de pornire.

Uneori, dacă acest cuplu monoaxial este prea mare, este posibilă fixarea funcționării mașinii sincrone la o turație egală cu jumătatea turației de sincronism. În acest caz trecerea în sincronism nu mai este posibilă.

Funcționare la putere variabilă și curent de excitație constant a mașinii sincrone – Stabilitate și oscilații

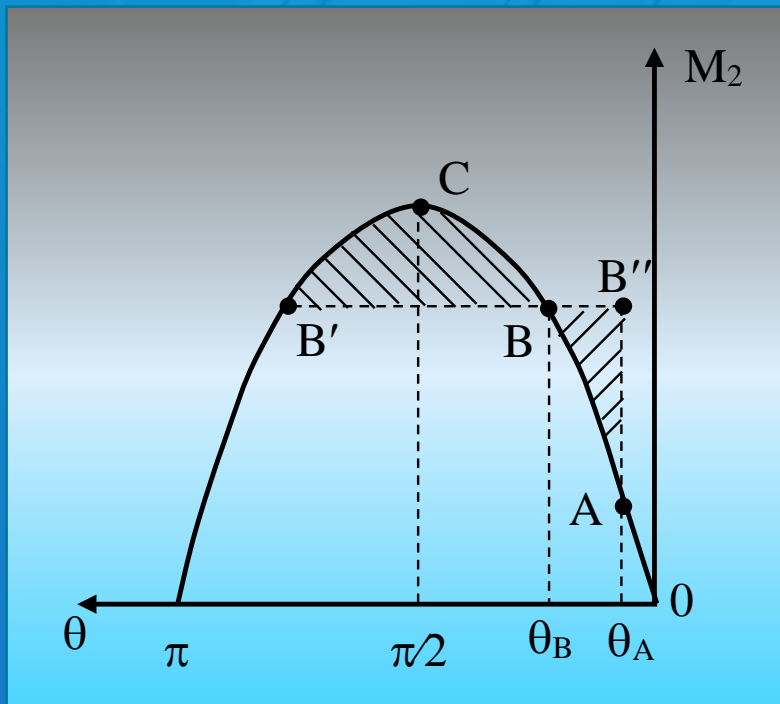
- a) *Stabilitate statică – capacitatea mașinii de a funcționa normal la trecerea dintr-o stare staționară în alta (modificarea puterii la borne, în cazul generatorului sau modificarea cuplului rezistent la arbore, în cazul motorului)*



Dacă are loc o majorare a cuplului rezistent la arbore, mașina trece din punctul de funcționare A în punctul B măriru-și unghiul intern. Stările intermediare de funcționare sunt staționare.

Funcționare la putere variabilă și curent de excitație constant a mașinii sincrone – *Stabilitate și oscilații*

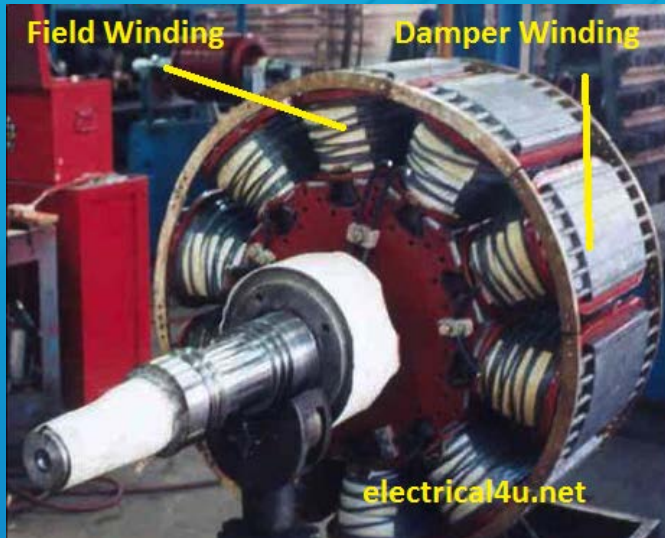
b) *Stabilitate dinamică - capacitatea mașinii de a funcționa normal la variații bruște a sarcinii (înfășurare de amortizare)*



Să presupunem o creștere bruscă a sarcinii motorului sincron ce ar duce punctul de funcționare din A în B. Datorită inerției rotorului, practic are loc o depășire a punctului B. Stabilirea funcționării în B (adică corespunzător sarcinii reale) are loc după niște oscilații în jurul lui B, oscilații ce sunt amortizate de înfășurarea de amortizare.

Sunt posibile oscilații care chiar depășesc punctul C, punctul limită de stabilitate, fără ca totuși mașina să decroșeze. Acest lucru are loc doar dacă aria suprafeței ABB'' este mai mică decât aria CBB'.

Rolul înfășurării de amortizare

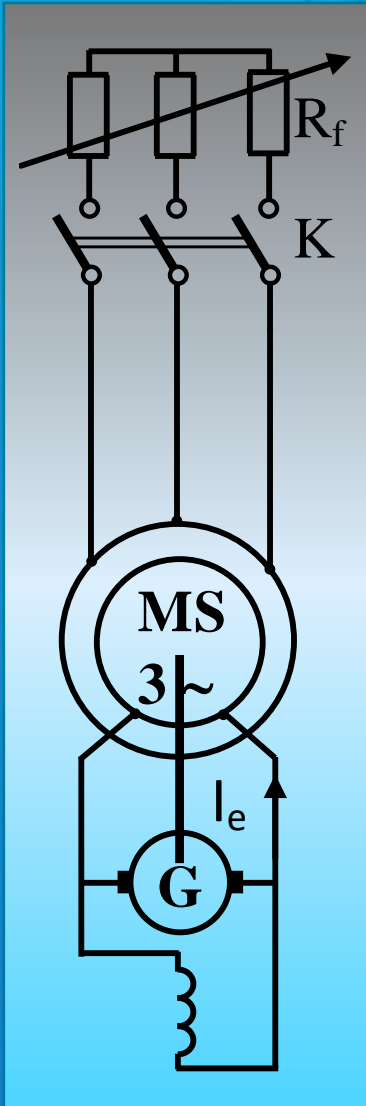


In timpul funcționării la sincronism, întrucât viteza rotorului este egală cu viteza câmpului învârtitor statoric, nu se induc tensiuni în înfășurarea de amortizare, deoarece nu există viteză relativă între înfășurare și câmp. Practic, înfășurarea de amortizare NU joacă nici un rol.

Să presupunem că, în timpul funcționării în regim de motor, cuplul mecanic rezistent la arbore crește brusc. Efectul constă în scăderea turației sub valoarea de sincronism. In acest moment mașina funcționează ca una asincronă. Drept urmare, se induc tensiuni în înfășurarea de amortizare, apar curenți și respectiv un cuplu electromagnetic ce accelerează mașina, din nou, până la turația de sincronism (mașina funcționează ca motor asincron). Ea revine la funcționarea de mașină sincronă eventual după câteva oscilații în jurul vitezei de sincronism (adică creșteri și scăderi ale vitezei peste și sub viteza de sincronism din ce în ce mai mici până la anulare).

Situația este identică dacă, în timpul funcționării în regim de motor, cuplul mecanic rezistent la arbore scade brusc. Apare o creștere a turației peste valoarea de sincronism. Mașina funcționează ca una asincronă, dar în regim de generator. Cuplul electromagnetic produs are efect de frânare a mașinii. Aceasta revine la turația de sincronism putând, de asemenea, să apară eventuale oscilații.

Frânarea motorului sincron



1. Frânarea se utilizează ca regim de funcționare doar pentru oprirea controlată a mașinii (într-o perioadă de timp impusă).
2. Se deconectează mașina de la rețea și se conectează pe o rezistență de frânare (valoarea rezistenței determină timpul de frânare). Excitația RĂMÂNDE conectată.
3. Frânarea este optimă dacă rezistența scade odată cu viteza mașinii (astfel cuplul de frânare se menține la o valoare ridicată).
4. Frânarea reprezintă, de fapt, o funcționare în regim de generator pe baza inerției mașinii.



Unghi intern negativ



Lipsa cuplu pornire



Înfășurare de pornire/amortizare



Pornire în asincron



Compensator sincron

Introduction



You Tube learnchannel

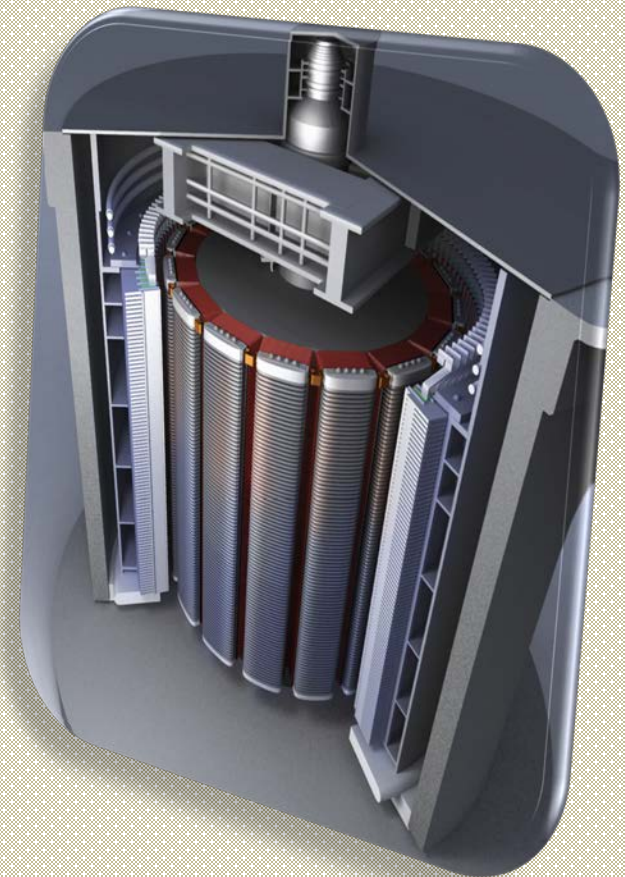
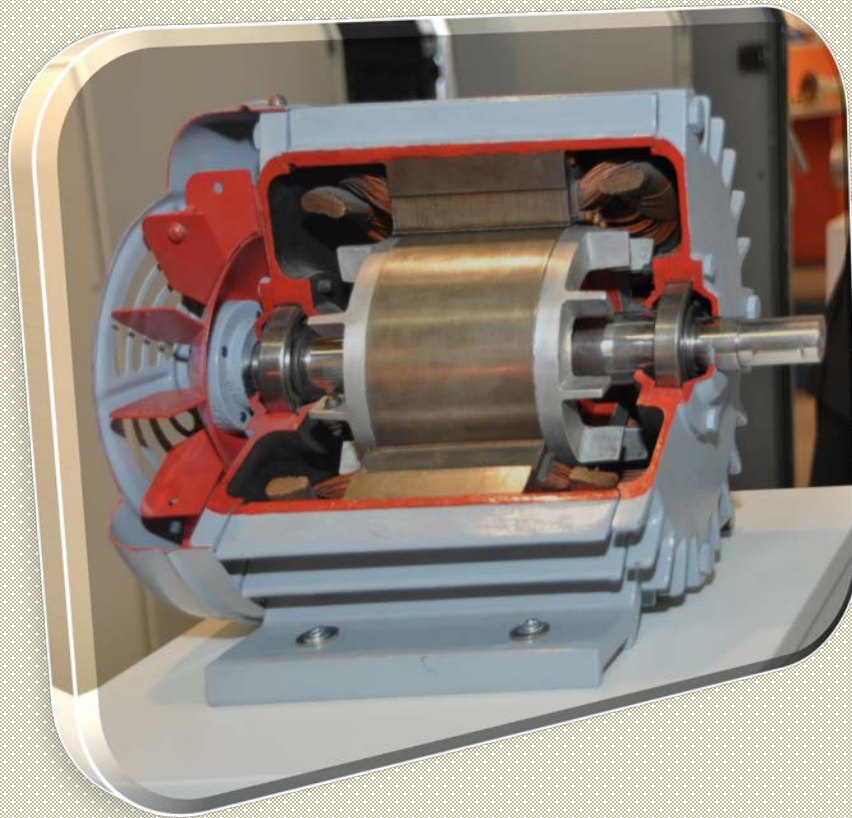
www.Learnchannel-TV.com

Mașina Asincronă

vs.

CURS 12

Mașina sincronă



Definiție

MAS

Mașina de CA a cărei viteză de rotație este ÎNTOTDEAUNA DIFERITA de viteza de sincronism

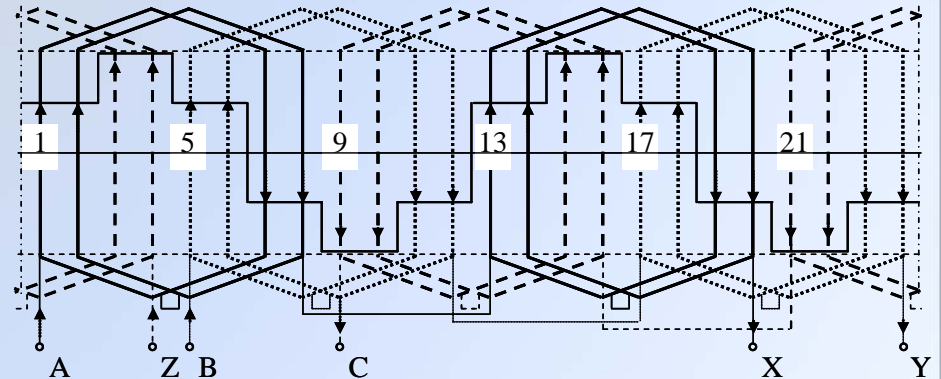
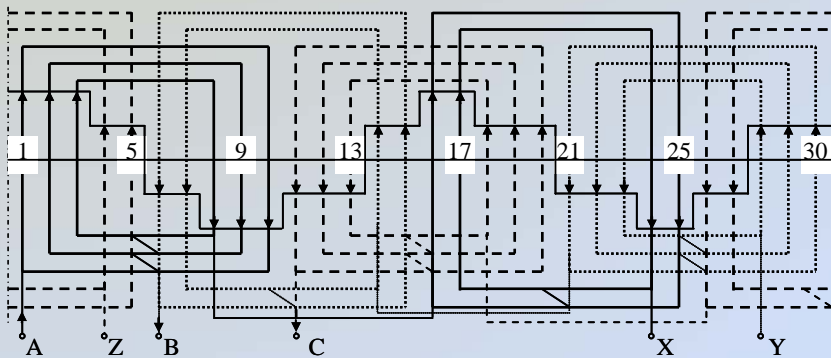
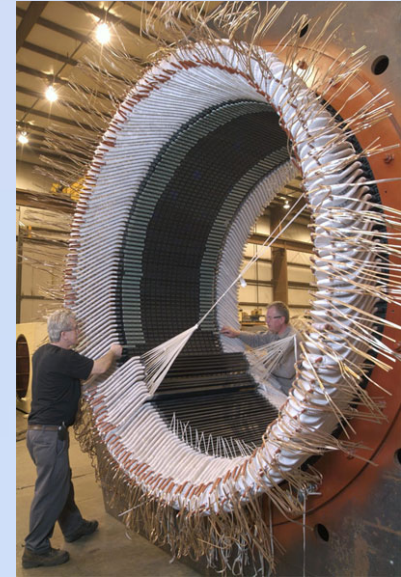
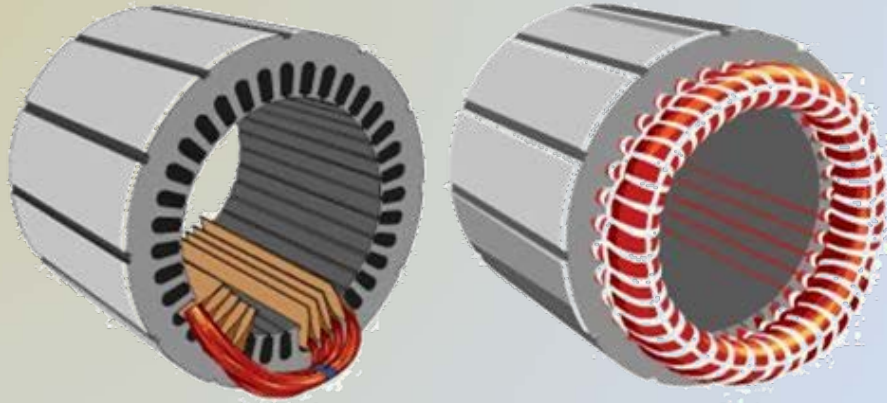
MS

Mașina de CA a cărei viteză de rotație este ÎNTOTDEAUNA EGALA cu viteza de sincronism

Construcție stator

MAS

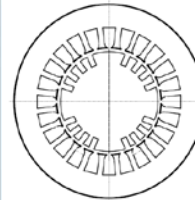
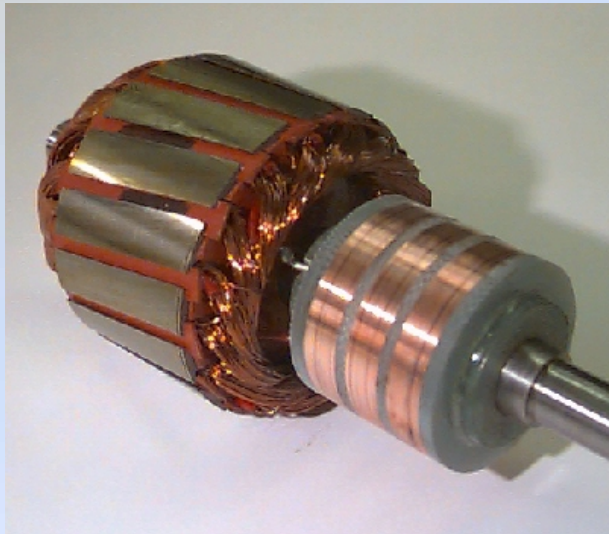
MS



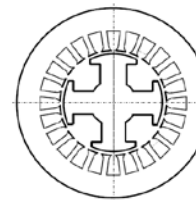
Construcție rotor

MAS

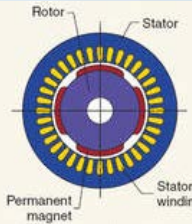
MS



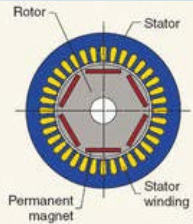
Cu poli inecați



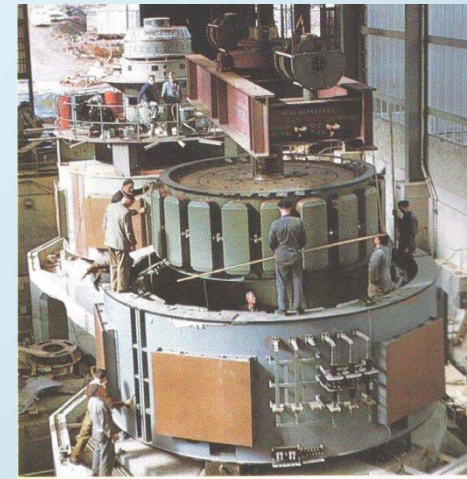
Cu poli apărați



Permanent magnet



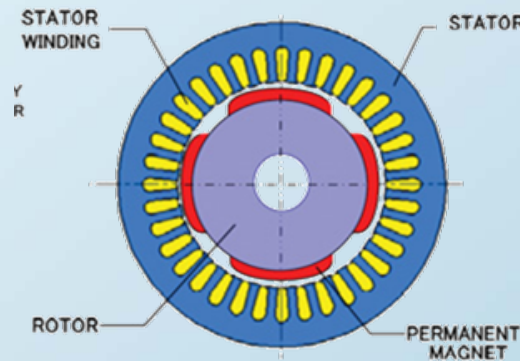
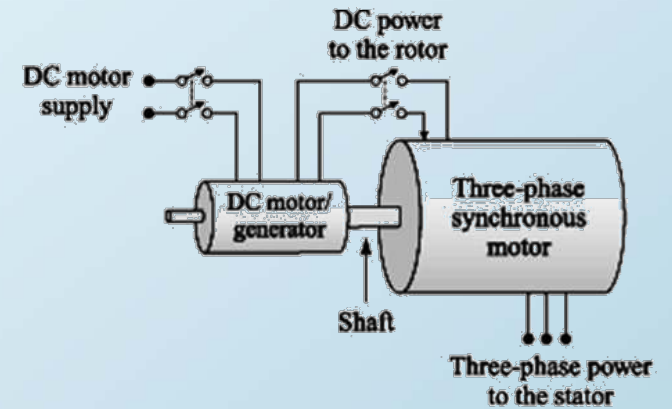
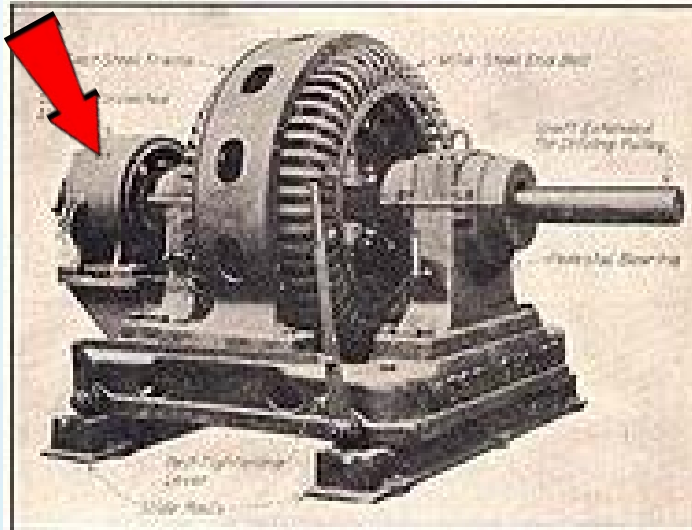
Permanent magnet



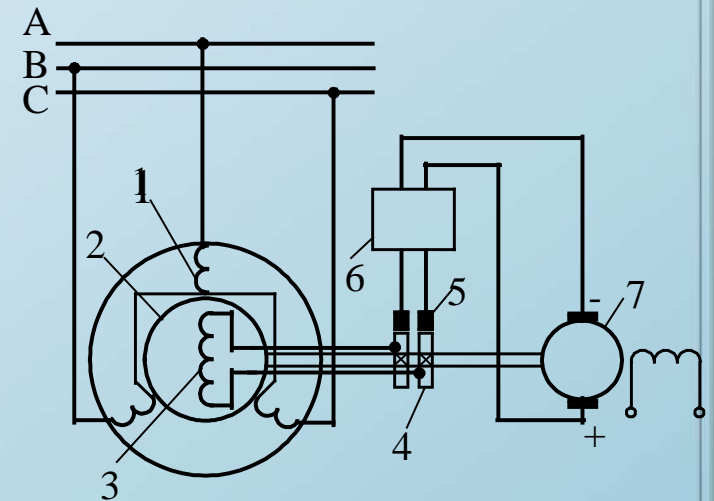
Sistem excitație

MAS

MS

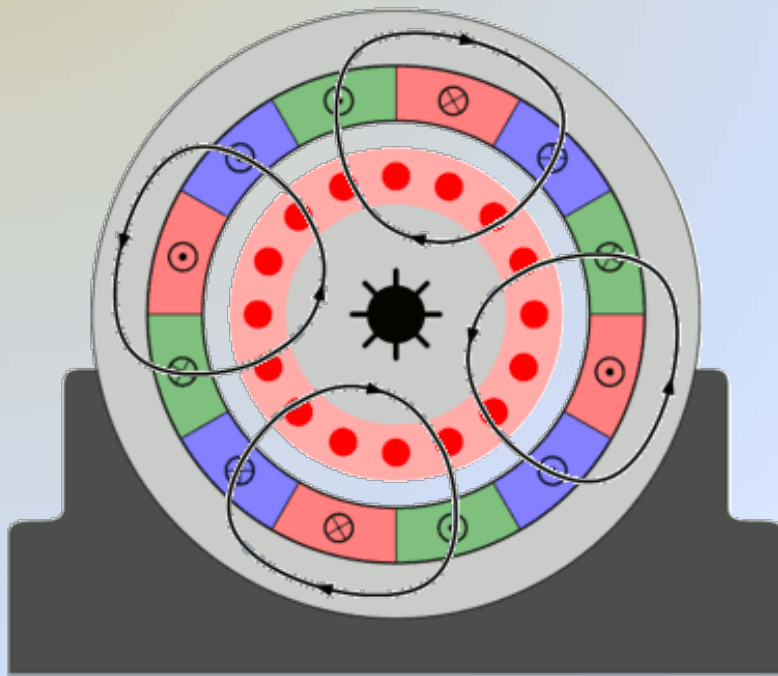


SPM Motor



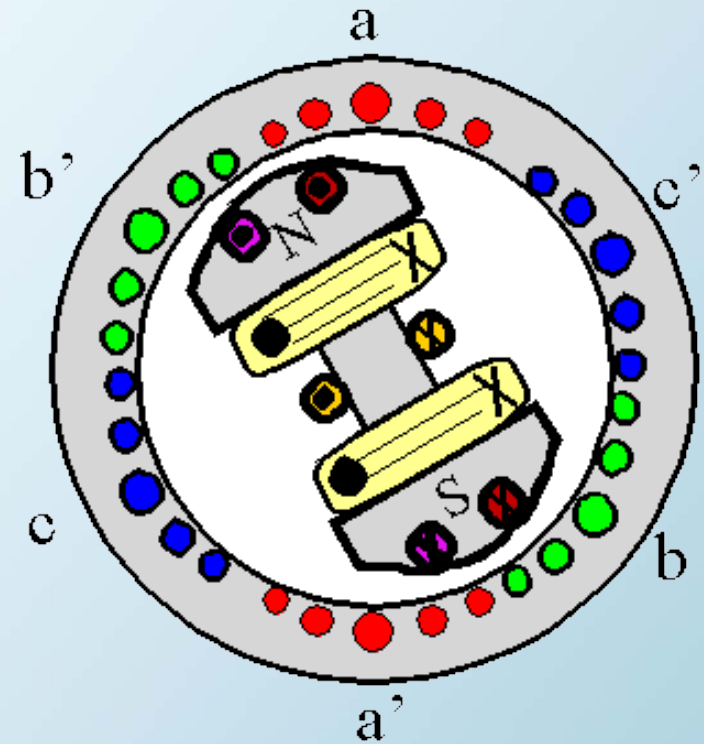
Producere câmp magnetic învârtitor

MAS



Câmp magnetic învârtitor produs pe cale ELECTRICA

MS



Câmp magnetic învârtitor produs pe cale MECANICA

Principiu de funcționare

MAS

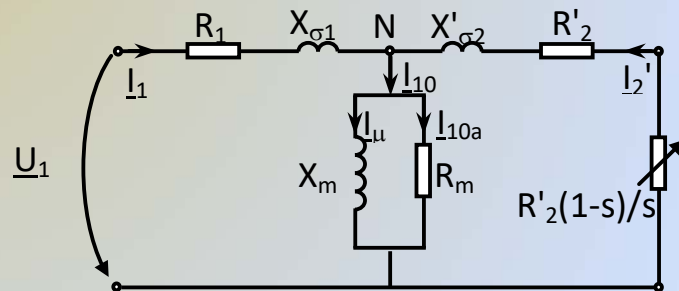
1. Producere câmp magnetic învârtitor (câmp inductor) pe cale electrică
2. Conform legii inducției electromagnetice → tensiune indusa in inf. ROTORICA
3. Apariția curentului in inf. rotorică
4. Interacțiune câmp-curent → cuplu electromagnetic

MS

1. Producere câmp magnetic învârtitor (câmp inductor) pe cale mecanică
2. Conform legii inducției electromagnetice → tensiune indusă in inf. STATORICĂ
3. Câmp de reacție produs de infasurarea statorică
4. Cuplu de atracție mutuală între cele doua câmpuri

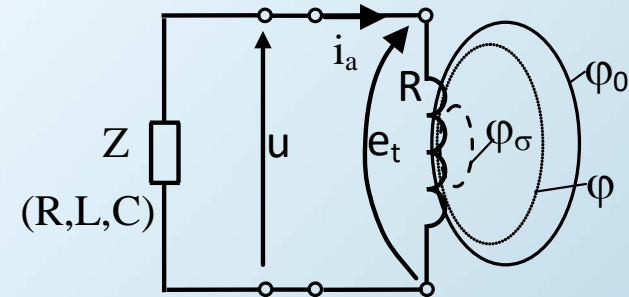
Schema echivalenta, ecuații de circuit

MAS



$$\begin{cases} \underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_{\sigma 1} \cdot \underline{I}_1 - \underline{E}_1 \\ 0 = \frac{R'_2}{s} \underline{I}'_2 + jX'_{\sigma 2} \cdot \underline{I}'_2 - \underline{E}_1 \\ \underline{I}_{1\mu} = \underline{I}_{10} = \underline{I}_1 + \underline{I}'_2 \end{cases}$$

MS



MS-pi

$$\underline{E}_0 = \underline{U} + R \cdot \underline{I}_a + jX_s \cdot \underline{I}_a$$

MS-pa

$$\underline{U} + R \cdot \underline{I}_a + jX_d \underline{I}_{ad} + jX_q \underline{I}_{aq} = \underline{E}_0$$

Expresia cuplului electromagnetic

MAS

$$M_e = \frac{3U_1^2 \cdot R'_2}{s \cdot \Omega_1 \left[\left(R_1 + c_1 \cdot \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2 \right]}$$

$$M_{emax} = \pm \frac{3U_1^2}{2c_1 \cdot \Omega_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2 \pm R_1}}$$

$$M_p = \frac{3U_1^2 \cdot R'_2}{\Omega_1 \left[\left(R_1 + c_1 \cdot \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 \cdot X'_{\sigma 2})^2 \right]}$$

MS

MS-pi

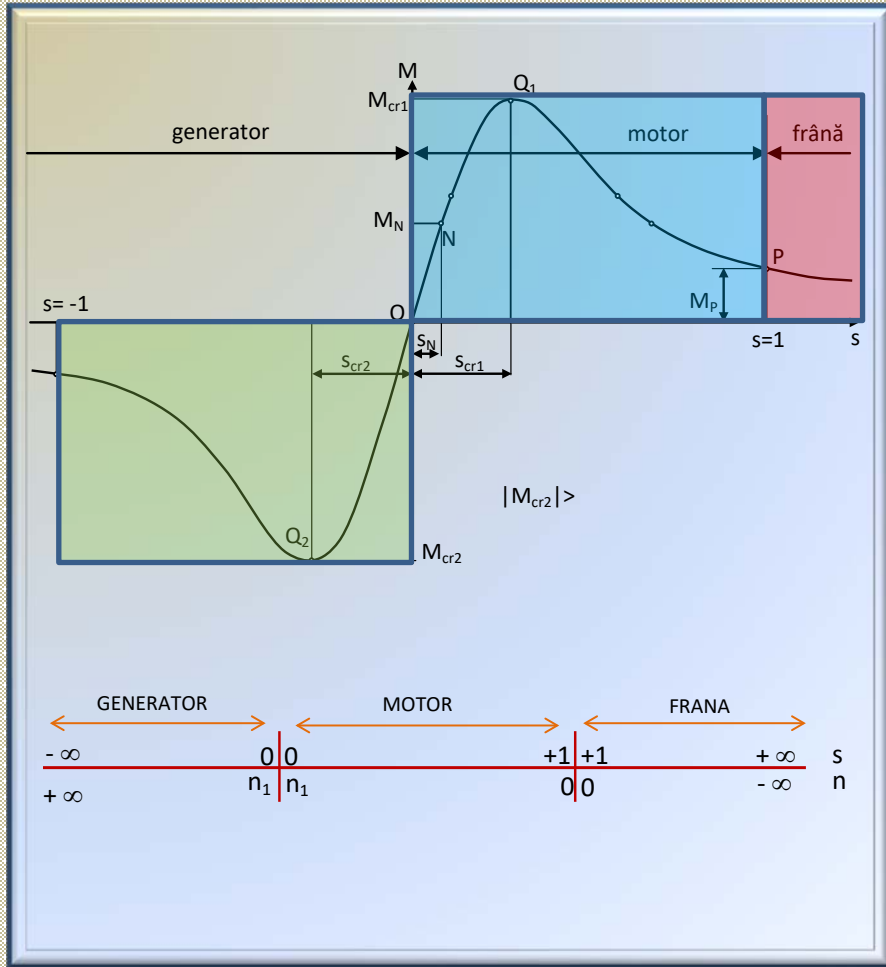
$$M_e = \frac{3}{\Omega} \cdot \left[\frac{UE_0}{X_s} \sin \theta \right]$$

MS-pa

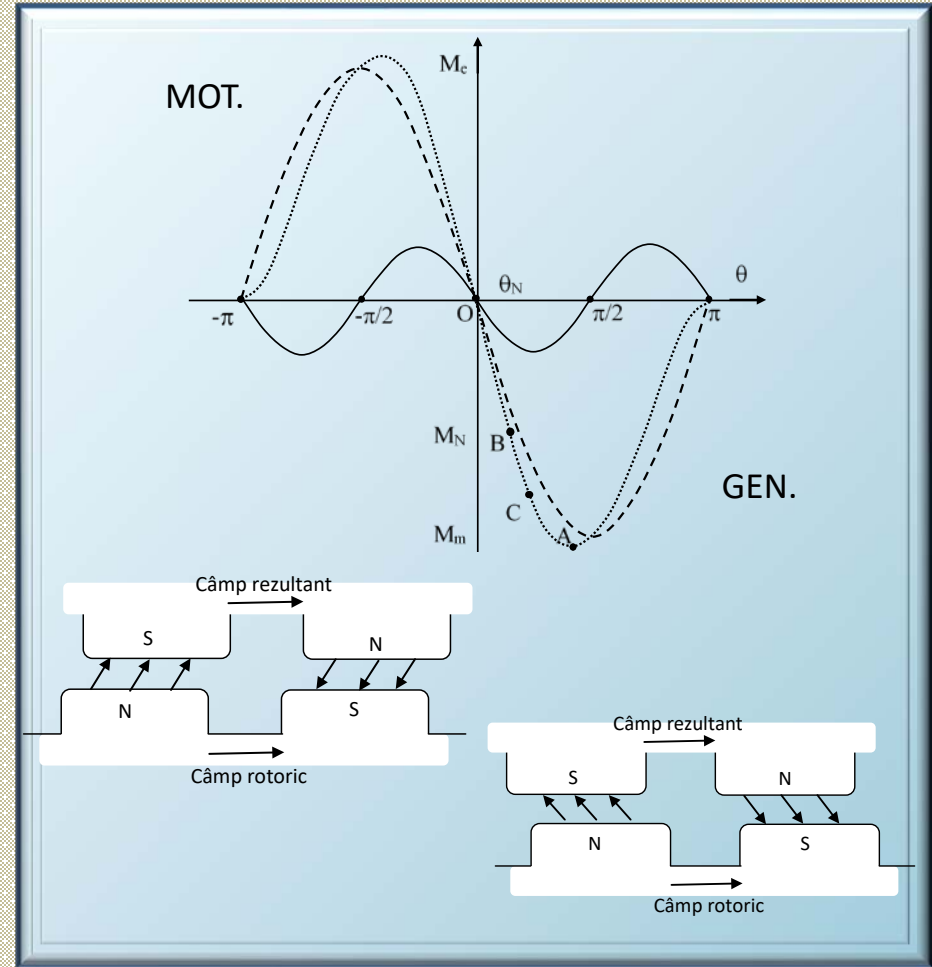
$$M_e = \frac{3}{\Omega} \left[\frac{UE_0}{X_d} \sin \theta + \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta \right]$$

Caracteristica de cuplu

MAS



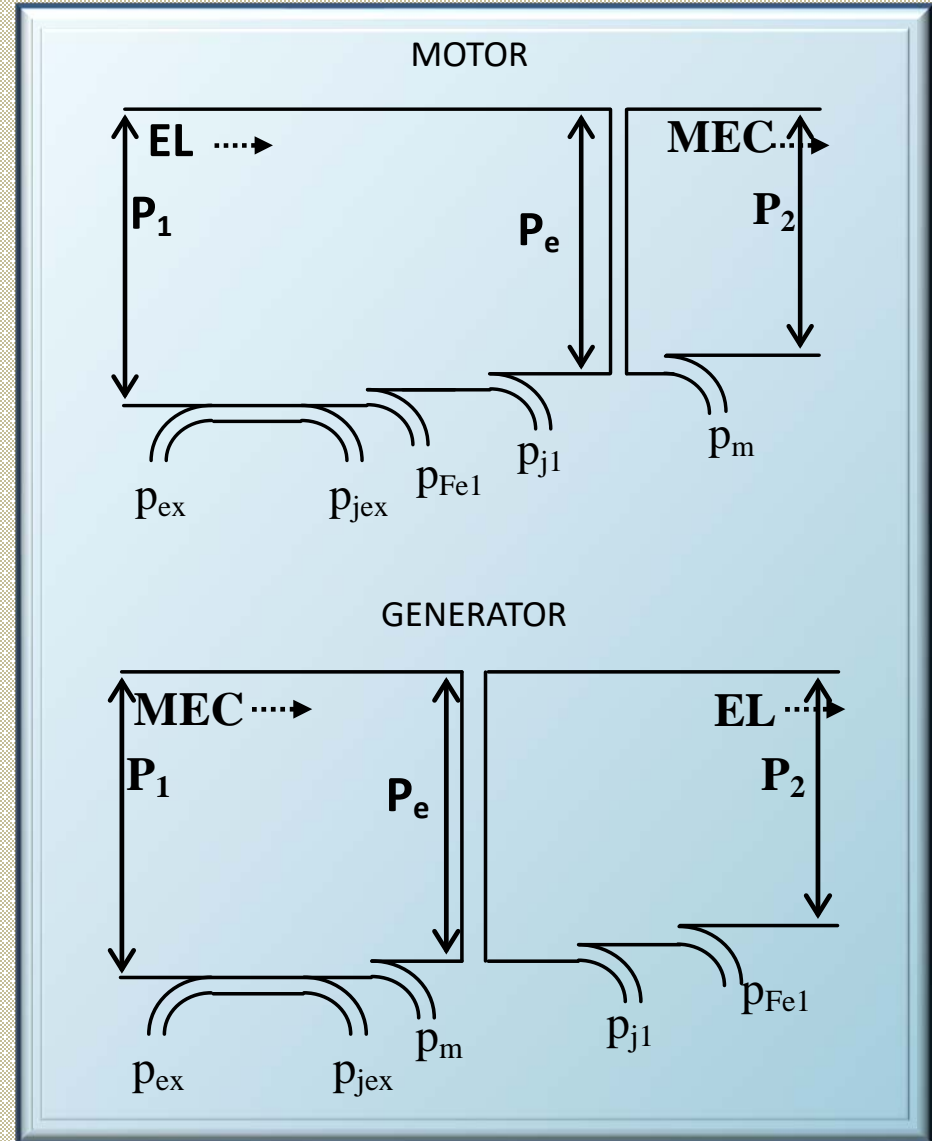
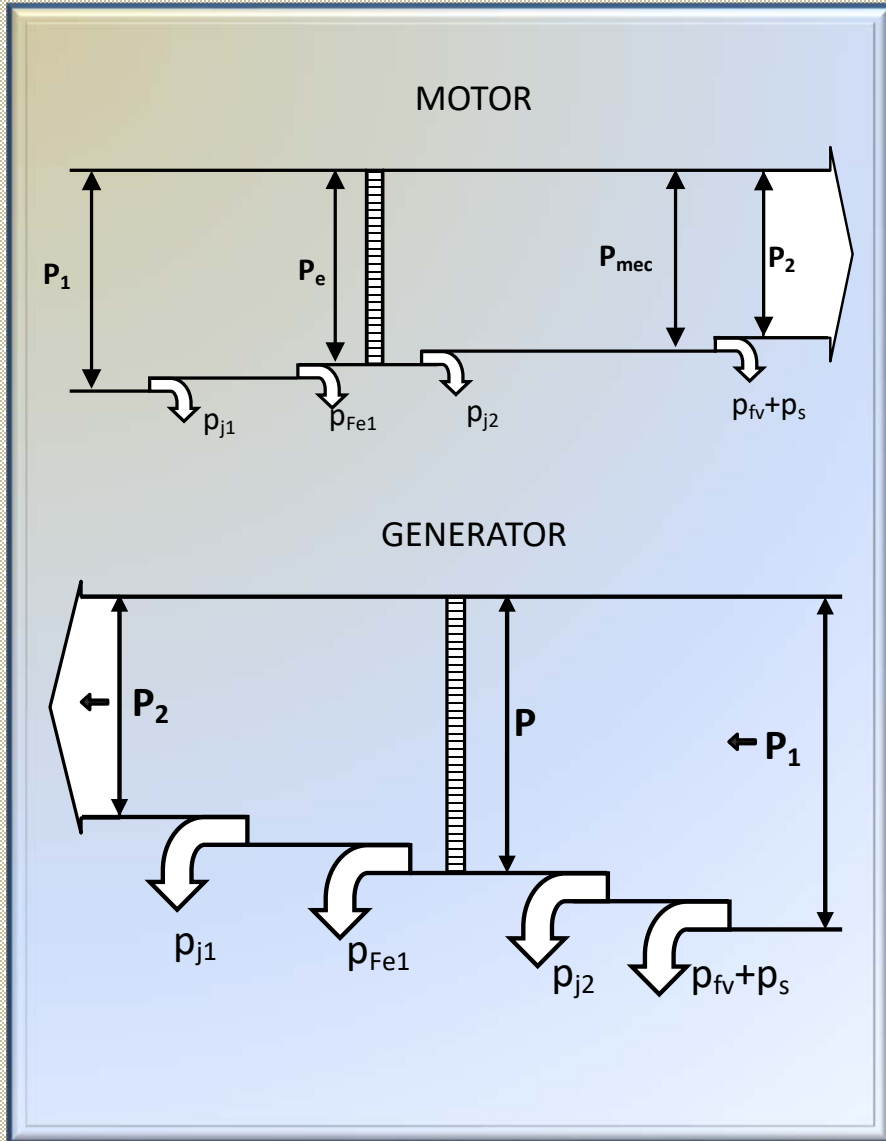
MS



Bilanțul puterilor

MAS

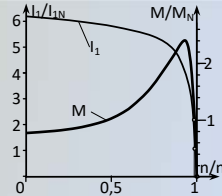
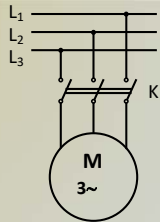
MS



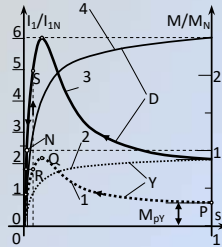
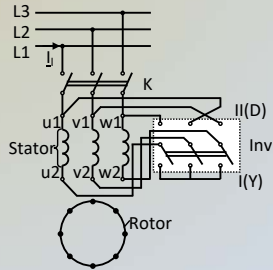
Pornirea in regim de motor

MAS

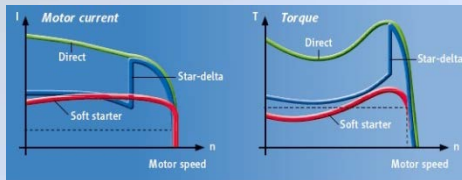
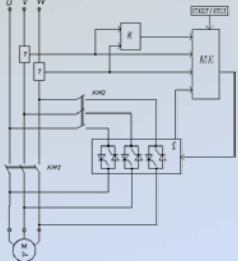
1. Direct



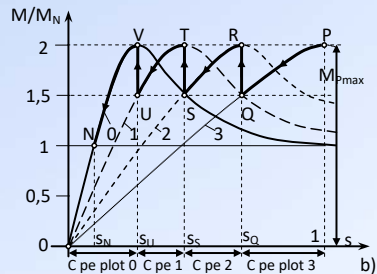
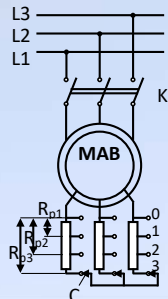
2. Y / Δ



3. Softstarter

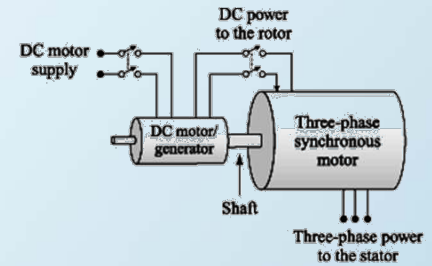


4. Cu Rp

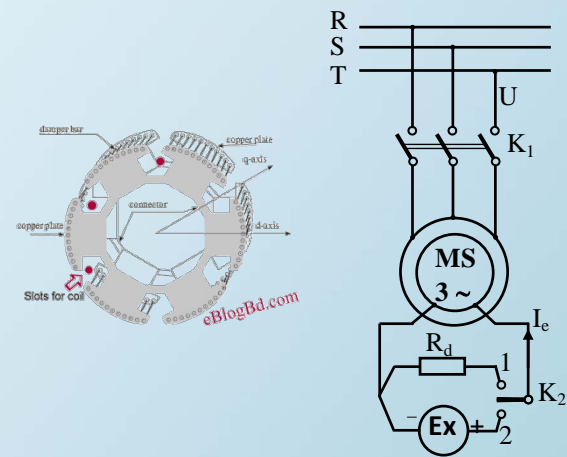


MS

1. Cu motor de antrenare



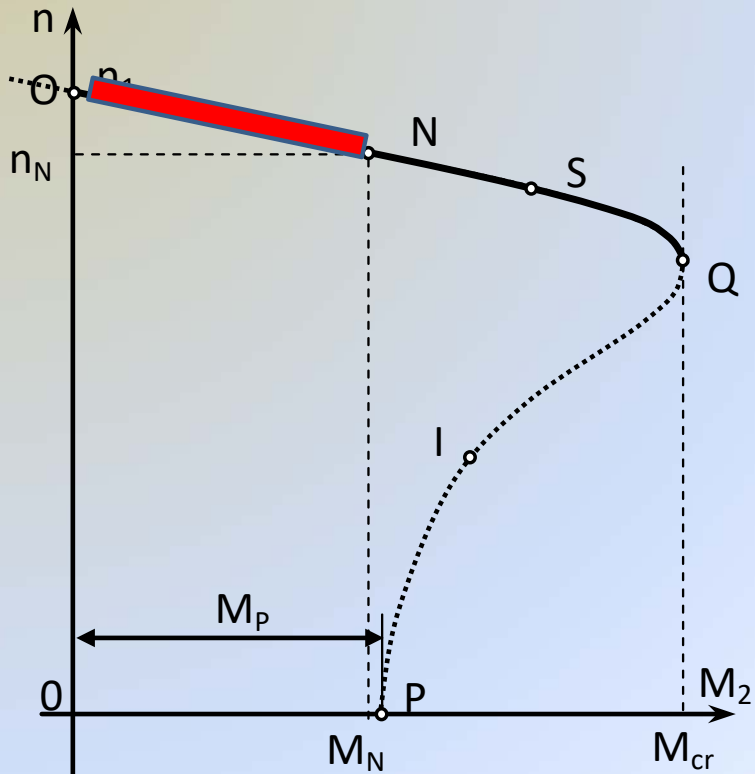
2. In asincron



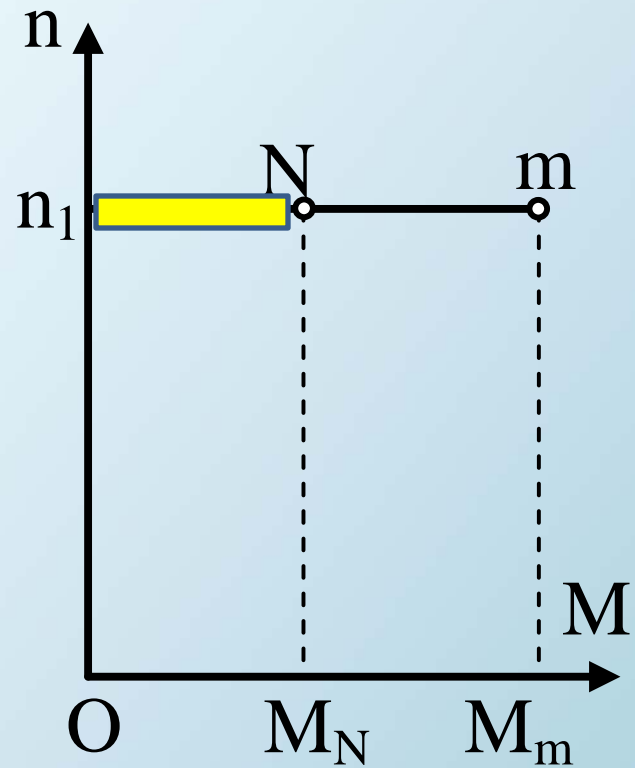
3. Cu U si f variabile

Característica mecánica

MAS

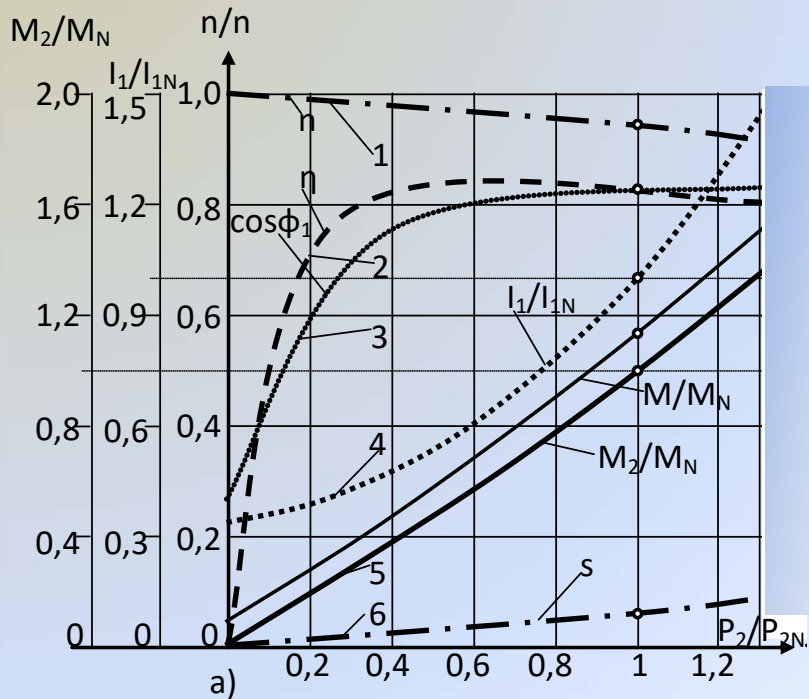


MS

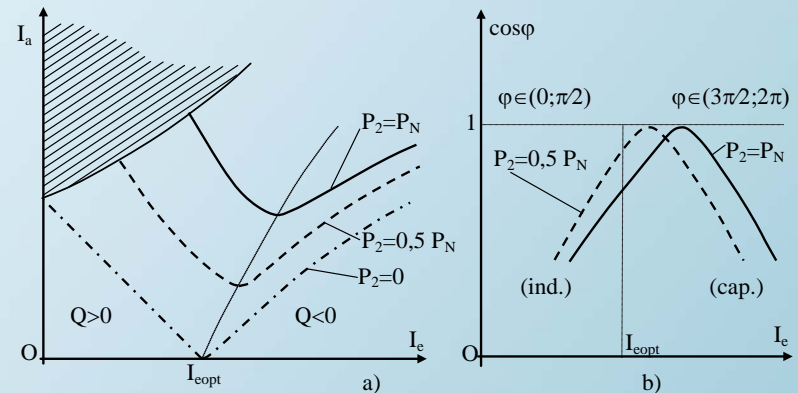
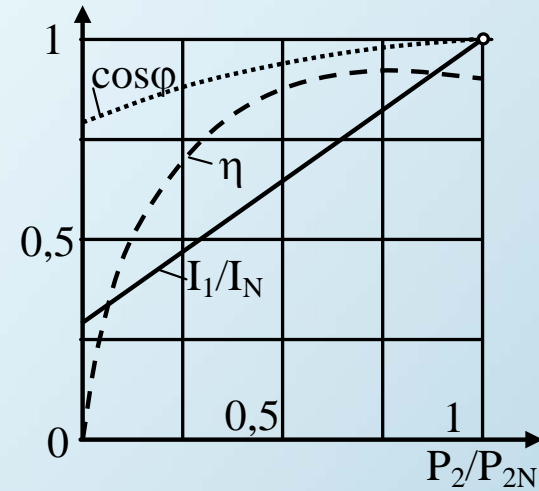


Caracteristici de funcționare

MAS



MS



Reglarea vitezei

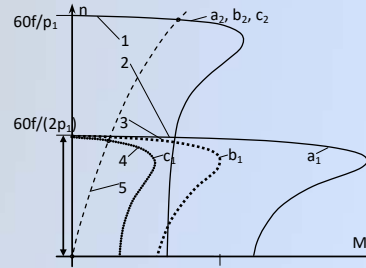
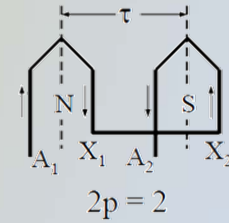
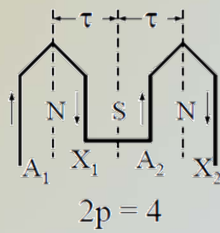
MAS

MS

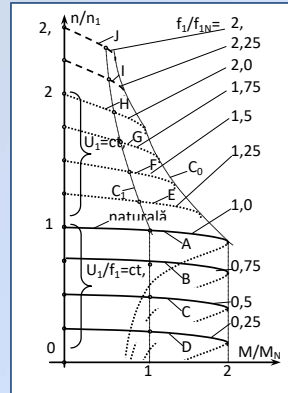
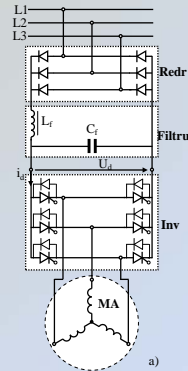
$$n = \frac{60 \cdot f_1}{p} \cdot (1 - s)$$

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}$$

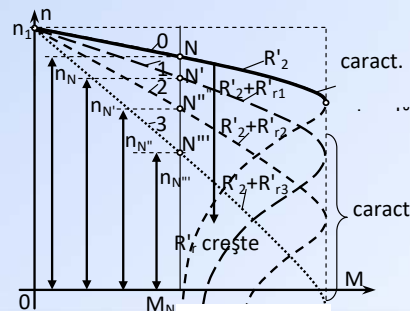
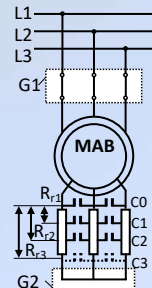
1. Dahlander



2. U si f - variabile

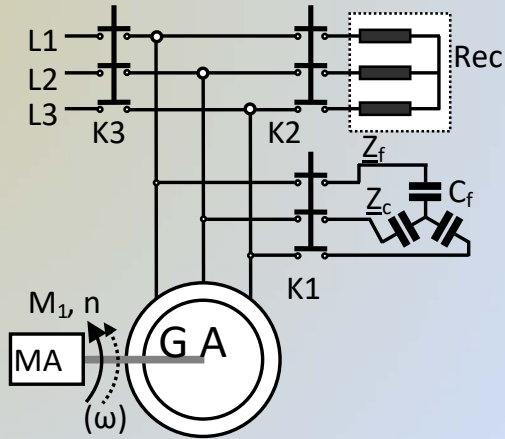


3. R in circ. rotoric



Funcționare ca generator autonom

MAS



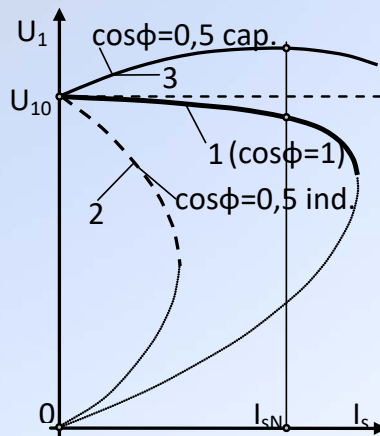
Amorsare → **Magnetism remanent**
Baterie de condensatoare

Tensiune variabilă la borne

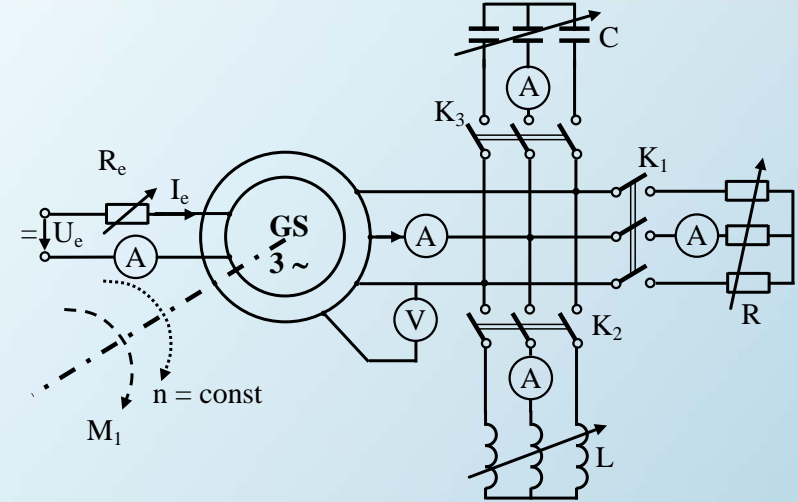
Frecvență variabilă

Amorsare
Baterie de condensatoare

Puterea activă cedată este proporțională cu viteza



MS

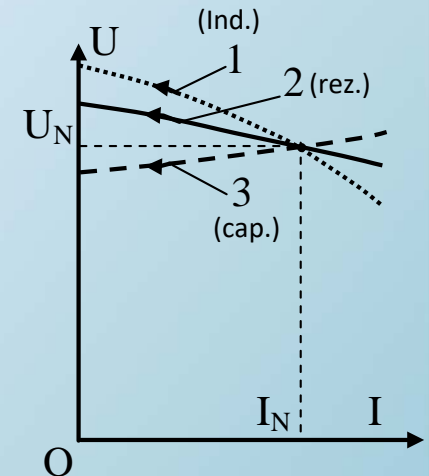


Tensiune variabilă la borne

Frecvență variabilă

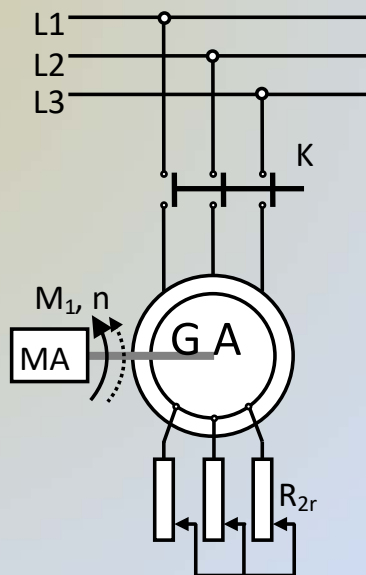
Generatorul sincron autonom poate funcționa la ORICE turație

Puterea activă cedată este proporțională cu viteza



Funcționare ca generator conectat la rețea

MAS



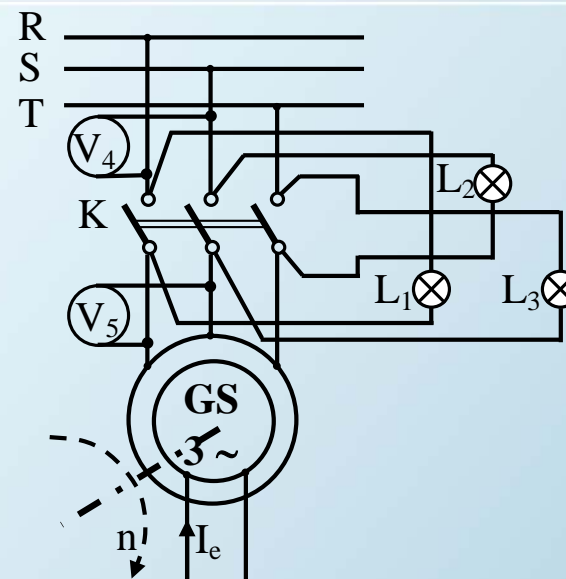
Tensiune constantă la borne

Frecvență constantă

**Cedează putere activă și absoarbe
putere reactivă**

**Puterea activă cedată este
proporțională cu viteza**

MS



Tensiune constantă la borne

Frecvență constantă

**Cedează putere activă și absoarbe
sau cedează putere reactivă**

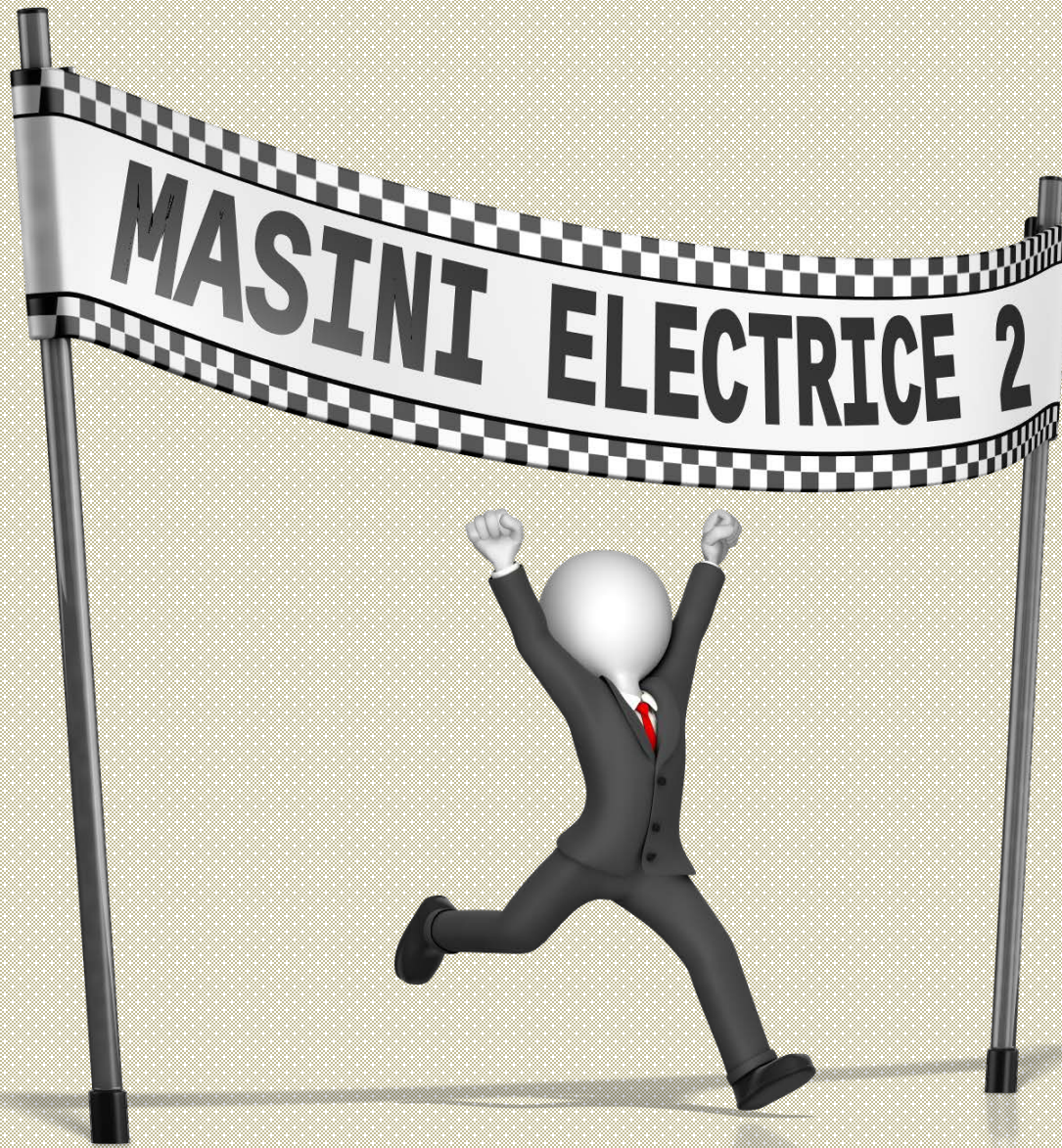
**Funcționarea are loc la turație
constantă (de sincronism)**



Thank You!

Email: livadaru@tuiiasi.ro

Technical University "Gh. Asachi". Iași, Romania



**PRODUCATOR,
SCENARIST
REGIZOR**

