

# Determinarea parametrilor pentru frânarea acțiunilor electromecanice cu motoare asincrone trifazate

## 1. Alegerea metodei de frânare.

Alegerea metodei se face în funcție de tipul constructiv al motorului, de performanțele tehnice cerute (limitarea vitezei, oprirea acțiunii, oprirea și reversarea de sens) respectiv în funcție de aspectele economice.

În practică se utilizează una dintre următoarele metode:

- frânarea recuperativă, dacă se cere limitarea vitezei acțiunii prin recuperarea energiei cinetice sau potențiale a mașinii de lucru;
- frânarea contracurent, dacă se cere oprirea acțiunii, reversarea sensului de rotație a motorului, iar motorul este cu rotorul bobinat;
- frânarea dinamică sau frânarea în regim de generator sincron, dacă motorul este cu rotorul în scurt-circuit și nu se cere reversarea de sens din mișcare;
- frânarea prin alimentare nesimetrică, nu mai este utilizată ca atare dar poate să apară în practică prin întreruperea accidentală a unei faze.

## 2. Determinarea parametrilor la frânarea recuperativă.

Frânarea recuperativă se obține prin antrenarea rotorului mașinii electrice de către mașina de lucru la o viteză mai mare decât viteza de sincronism (fig.1.a.).

Această situație apare la mașinile de lucru care au acumulat energie potențială sau cinetică în timpul procesului tehnologic (ex.:o garnitură de tren la coborârea unei pante în sensul de mers, un vehicul de transport din parcurile de distracții pentru prefrânarea la apropierea de stația de coborâre). De asemenea, apare uzual la reducerea vitezei unei acțiuni cu motor asincron prin comutarea numărului de perechi de poli (fig.1.b) sau prin micșorarea tensiunii și frecvenței (fig.1.c)

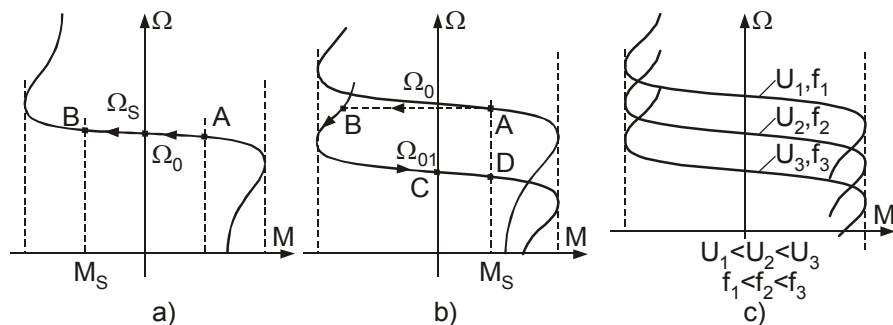


Figura 1. Caracteristicile mecanice la frânarea recuperativă

a) în cazul limitării vitezei;

b) în cazul reducerii vitezei prin comutarea numărului de perechi de poli;

c) în cazul reducerii tensiunii și frecvenței

Parametrii care pot fi determinați:

a) valoarea la care este limitată viteza.

În acest scop se particularizează ecuația caracteristicii statice pentru punctul  $(-M_S, \Omega_A)$ . Rezultă:

$$-M_S = \frac{2M_k}{\frac{s_{kf}}{s_A} + \frac{s_A}{s_{kf}}}; \quad s_A = s_{kf} \left( \frac{M_k}{M_S} - \sqrt{\left( \frac{M_k}{M_S} \right)^2 - 1} \right)$$

$$\Omega_A = \Omega_0 (1 + s_A); \quad s_{kf} = -s_k$$

b) energia recuperată la reducerea vitezei între două valori  $\Omega_{init}$ ,  $\Omega_{fin}$ .

În acest scop se calculează:

$$\Omega_B = \Omega_A = \Omega_0 (1 - s_A); \quad \Omega_D = \Omega_0 (1 - s_D)$$

$$s_A = s_k \left( \frac{M_k}{M_S} - \sqrt{\left( \frac{M_k}{M_S} \right)^2 - 1} \right); \quad s_D = s_k \left( \frac{M_k}{M_S} - \sqrt{\left( \frac{M_k}{M_S} \right)^2 - 1} \right)$$

Energia recuperată. 
$$W_{recup} = J \frac{\Omega_B^2 - \Omega_{01}^2}{2}$$

### 3. Determinarea parametrilor pentru frânarea contracurent.

În cazul mașinilor de lucru care dezvoltă cuplul static pasiv, frânarea contracurent se obține prin schimbarea ordinii de succesiune a fazelor și introducerea unei rezistențe suplimentare în circuitul rotoric.

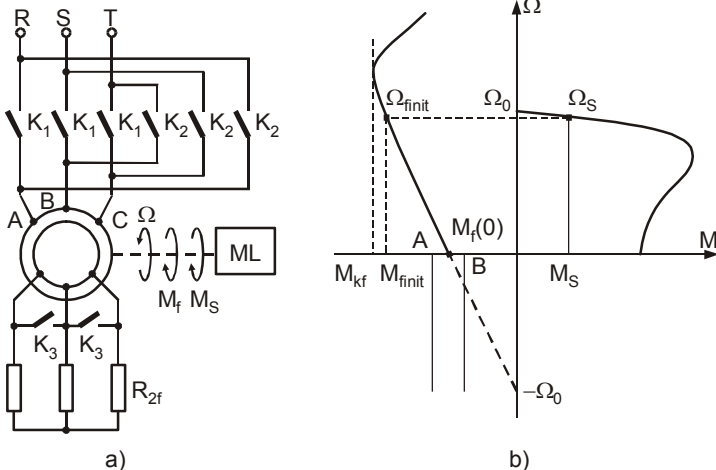


Figura 2. Schema de principiu pentru frânarea contracurent și caracteristicile mecanice pentru cupluri statice pasive

Principiul de determinare a rezistenței de frânare  $R_{2f}$  constă în particularizarea caracteristicii statice de frânare pentru punctul de coordonate  $(\Omega_{\text{initial}}, M_f \text{ initial})$

$$\Omega_{\text{init}} = \begin{cases} \Omega_S \\ \Omega_0 \end{cases} \quad M_{\text{finit}} = \begin{cases} 0,81M_{kf} \\ (1,8 \div 2,1)M_N < M_{kf} \end{cases}$$

$$S_{\text{finit}} = \frac{-\Omega_0 - \Omega_{\text{init}}}{-\Omega_0}$$

$$M_{\text{finit}} = \frac{2M_{kf}}{\frac{S_{\text{finit}}}{S_{kf}} + \frac{S_{kf}}{S_{\text{finit}}}} \Rightarrow S_{kf} = S_{\text{finit}} \left( \frac{M_{kf}}{M_{\text{finit}}} + \sqrt{\left( \frac{M_{kf}}{M_{\text{finit}}} \right)^2 - 1} \right)$$

$$R_{2f} = \frac{S_{kf}}{S_k} \cdot R_{20}$$

Rezistența de frânare poate fi determinată și din condiția ca acționarea să se oprească într-un interval de timp impus. Pentru aceasta se calculează

$$-M_{\text{fimed}} = M_S - J \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$$

unde

$$\Delta t = t_{f \text{ impus}}$$

$$\Delta\omega = \Omega_{\text{init}} - \Omega_{\text{fin}}$$

Într-un caz particular când  $\Omega_{\text{fin}} = 0$

$$\Delta\omega = \Omega_{\text{init}}$$

Se consideră că  $M_{\text{fimed}}$  este media geometrică între cuplul inițial și cel final

$$M_{f \text{ med}} = \sqrt{M_{\text{finit}} \cdot M_f(0)}$$

Se adoptă

$$|M_f(0)| > |M_S| \text{ sau } |M_f(0)| > |M_S(0)|, \quad M_{f \text{ init}} = \frac{M_{f \text{ med}}^2}{M_f(0)}$$

În funcție de valoarea lui  $M_f(0)$  și valoarea cuplului static, pot să intervină în funcționare următoarele două cazuri:

1.  $M_f(0) < M_S(0)$  ( caracteristica A ).Punctul de funcționare se obține pentru viteză 0, rotorul fiind calat.
2.  $M_f(0) > M_S(0)$  (caracteristica B),punctul de funcționare ajunge în cadranul III.

În cazul cuplurilor statice active frânarea contracurent se obține prin introducerea unei rezistențe suplimentare în circuitul rotoric și inversarea sensului de rotație sub acțiunea cuplului static.

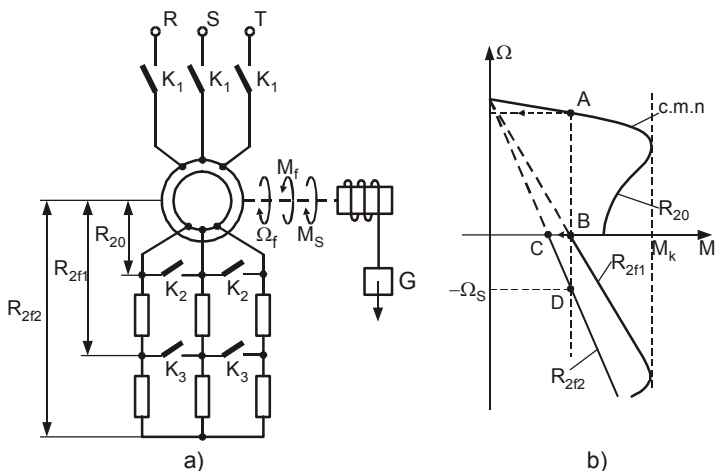


Figura 3. Schema de principiu pentru frânarea contracurent și caracteristicile mecanice pentru cupluri statice active

Punctul B corespunde cazului în care greutatea  $G$  este menținută în echilibru la viteza zero, iar punctul D corespunde cazului în care greutatea  $G$  este coborâtă cu o viteză mică  $-\Omega_s$ , impusă de procesul tehnologic.

Parametrii necunoscuți sunt rezistențele  $R_{2f1}$  și  $R_{2f2}$

Principiul de determinare este același - se particularizează ecuația caracteristicii statice pentru:

- punctul B

$$M_S = \frac{2M_k}{\frac{1}{s_{kR_1}} + \frac{s_0}{s_0}}$$

Rezultă alunecarea critica

$$s_{kR_1} = 1 \cdot \left( \frac{M_k}{M_S} + \sqrt{\left( \frac{M_k}{M_S} \right)^2 - 1} \right)$$

respectiv rezistența

$$R_{2f1} = \frac{s_{kR_1}}{s_k} \cdot R_{20}$$

- punctul D

$$M_S = \frac{2M_k}{\frac{s_D}{s_D} + \frac{s_{kR_2}}{s_D}}$$

Rezultă

$$R_{2f1} = \frac{s_{kR_2}}{s_k} \cdot R_{20}$$

#### 4. Determinarea parametrilor pentru frânarea în regim de generator sincron fără recuperarea energiei.

Acest regim de frânare se obține prin deconectarea statorului de la rețeaua trifazată și alimentarea acestuia cu tensiune continuă.

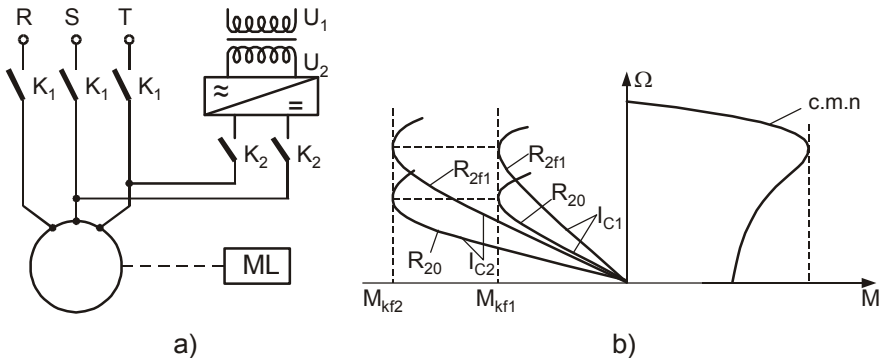


Figura 4. Schema de principiu pentru frânarea în regim de generator fără recuperarea energiei: a) schema de principiu; b) caracteristicile statice

Se poate demonstra că, în acest caz, ecuația caracteristicii mecanice are o formă asemănătoare formulei lui Kloss pentru regimul de motor:

$$M_f = \frac{-2M_{\max}}{\frac{v}{v_{\max}} + \frac{v_{\max}}{v}}$$

unde

$$v = -\frac{\Omega}{\Omega_0}; \quad v_{\max} = \frac{R_2'}{X_\mu + X_{\sigma 2}}; \quad M_{\max} = -\frac{3}{2\Omega_0} \cdot \frac{I_1^2 x_\mu^2}{X_\mu + X_{\sigma 2}}$$

$I_1$  – valoarea efectivă a curentului de fază statoric la funcționarea în gol a motorului.

Alunecarea de frânare

$$s_f = \frac{0 - \Omega}{\Omega_0}$$

Dacă  $\Omega = \Omega_{\text{ini}} = \Omega_0$  rezultă  $s_{f \text{ ini}} = -1$ , iar dacă  $\Omega = \Omega_{\text{fin}} = 0$  rezultă  $s_{f \text{ fin}} = 0$

Curentul continuu cu care trebuie alimentat statorul se calculează din condiția ca tensiunea magnetomotoare produsă de curentul continuu să fie egală cu tensiunea magnetomotoare produsă de curentul alternativ, ceea ce corespunde unei solicitări termice echivalente

$$U_{mca} = \frac{3}{\sqrt{2}} \cdot k_{w1} \cdot w_1 \cdot I_1$$

$$U_{mcc} = \sqrt{3} \cdot k_{w1} \cdot w_1 \cdot I_c$$

În funcție de schema de conectare a înfășurărilor statorice rezultă diferite relații pentru calculul curentului continuu .

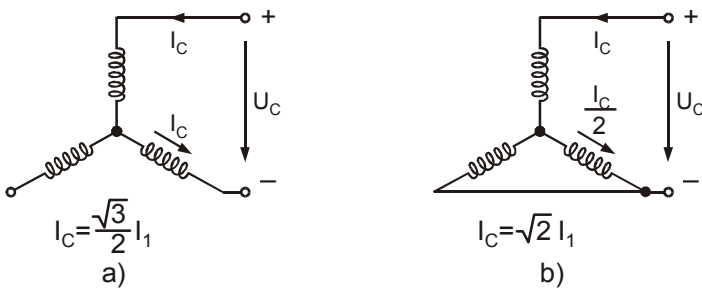


Figura 5. Variante de alimentare cu tensiune continuă a înfășurărilor statorice

Tensiunea continuă

$$U_c = 2R_1 I_c$$

unde  $R_1$  rezistența unei faze statorice.

Tensiunea din secundarul transformatorului

$$U_2 = U_c \cdot \frac{\pi}{p} \cdot \frac{1}{\sqrt{2} \sin \frac{\pi}{p}}$$

unde  $p$  este numărul de semialternațe redresate, iar raportul de transformare

$$k = \frac{U_1}{U_2}$$

În funcție de acești parametri se alege redresorul monofazat și se dimensionează transformatorul.

## 5. Frânarea prin alimentare nesimetrică.

Acest regim se obține prin alimentarea nesimetrică a statorului fie printr-o schemă de automatizare adecvată fie prin întreruperea accidentală a unei faze.

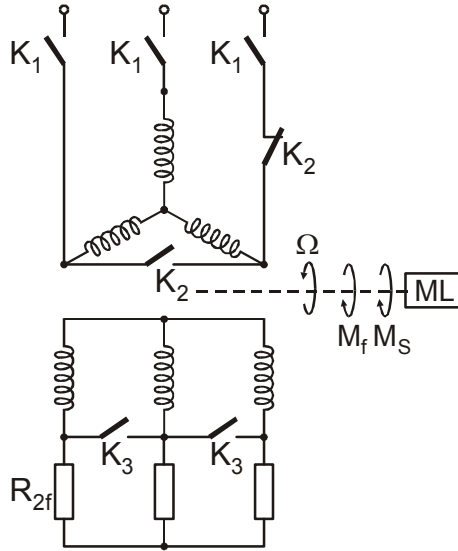


Figura 6. Schema de principiu pentru frânarea prin alimentare nesimetrică

Ținând seama că sistemul de tensiuni nesimetrice se descompune în trei sisteme simetrice (de succesiune directă \$U\_d\$, de succesiune inversă \$U\_i\$ și homopolară \$U\_o\$), pentru schema din fig. 6 rezultă că ecuația caracteristicii statice este de forma:

$$M = \frac{2M_{kd}}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} - \frac{2M_{ki}}{\frac{2-s}{s_k} + \frac{s_k}{2-s}}$$

unde:

$$M_{kd} = M_k \left( \frac{U_d}{U_N} \right)^2; \quad M_{ki} = M_k \left( \frac{U_i}{U_N} \right)^2$$

Caracteristica mecanică rezultantă (fig. 7) pune în evidență funcționarea motorului în regim de frână și modul în care rezistența rotorică influențează existența domeniului de frânare. Astfel, dacă rezistența rotorică este mică efectul de frânare se manifestă numai în apropierea vitezei de sincronism, adică dacă motorul funcționează în gol și rămâne accidental în două faze, el continuă să se rotească dar cu o viteză mai mică decât cea corespunzătoare pe caracteristica mecanică naturală.

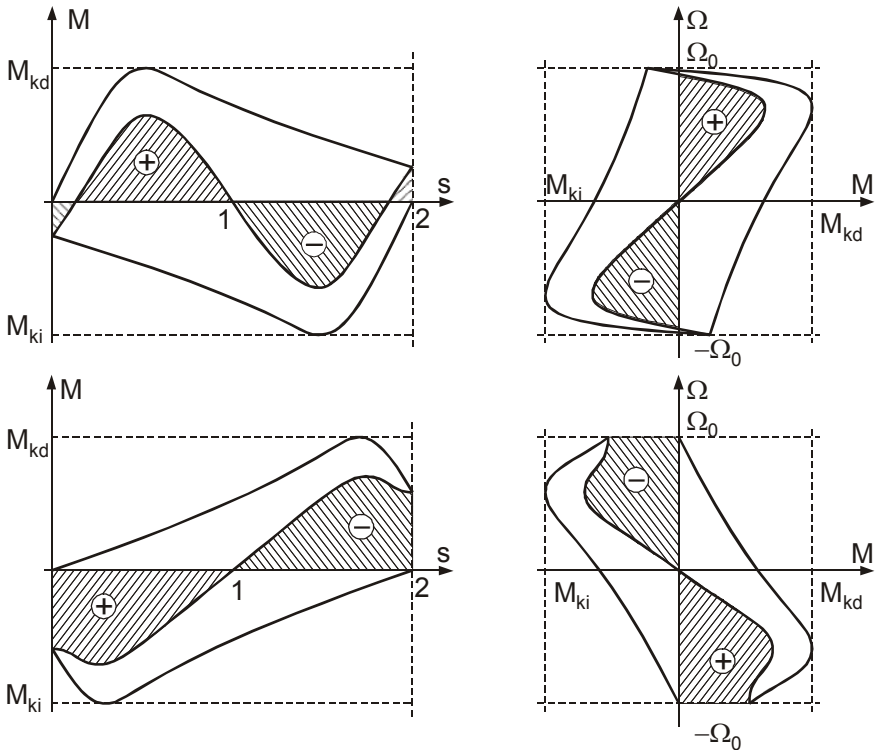


Figura 7. Caracteristicile mecanice de frânare prin alimentare nesimetrică

Dacă rezistența rotorică este mare din proiectare și construcție sau dacă este mărită artificial (se deschid contactele K3) caracteristica mecanică rezultantă se găsește în cadranul II, deci acționarea funcționează în regim de frână. De asemenea, din analiza acestora, se poate formula explicația funcționării unui motor asincron trifazat în două faze.