

Schéma équivalent et caractéristique mécanique du moteur asynchrone

La constitution d'un moteur triphasé à rotor bobiné (aussi appelé moteur à bagues) est similaire à un transformateur triphasé. Ainsi, le moteur possède 3 enroulements identiques montés sur le stator, et 3 enroulements sur le rotor, soit un enroulement par phase. A cause de cette symétrie parfaite, on peut comme pour le transformateur, analyser le comportement du moteur en considérant seulement un enroulement primaire et un enroulement secondaire.

Lorsque le rotor ne tourne pas, le moteur fonctionne exactement comme un transformateur conventionnel.

Afin de simplifier les calculs, nous supposons que les enroulements du stator sont branchés en étoile et que le rapport de transformation est de 1 : 1 (fig. 2.1). le moteur est au repos et les bagues sont raccordés à une résistance extérieure R_{ext} . Les paramètres du circuit sont comme suit :

E_s = tension de la source d'alimentation, ligne à neutre [V].

r_1 = résistance du stator [Ω].

r_2 = résistance du rotor [Ω].

x_1 = réactance de fuite du stator [Ω].

x_2 = réactance de fuite du rotor [Ω].

X_m = réactance de magnétisation [Ω].

R_f = résistance représentant les pertes dans le fer et par frottement et aération [Ω].

T = transformateur idéal ayant un rapport de transformation 1 : 1.

f = fréquence de la source [Hz].

n_s = vitesse synchrone du moteur [tr/mn].

Φ_m = flux mutuel dans le rotor [Wb].

Φ_{f1} = flux de fuite du stator [Wb].

Φ_{f2} = flux de fuite du rotor [Wb].

$\Phi_s = \Phi_m + \Phi_{f1}$ = flux total accroché par le stator [Wb].

E_1 = tension induite dans le stator par le flux mutuel [V].

E_2 = tension induite dans le rotor par le flux mutuel [V]

$E_v =$ tension induite dans le stator par Φ_m et Φ_{f1} [V]

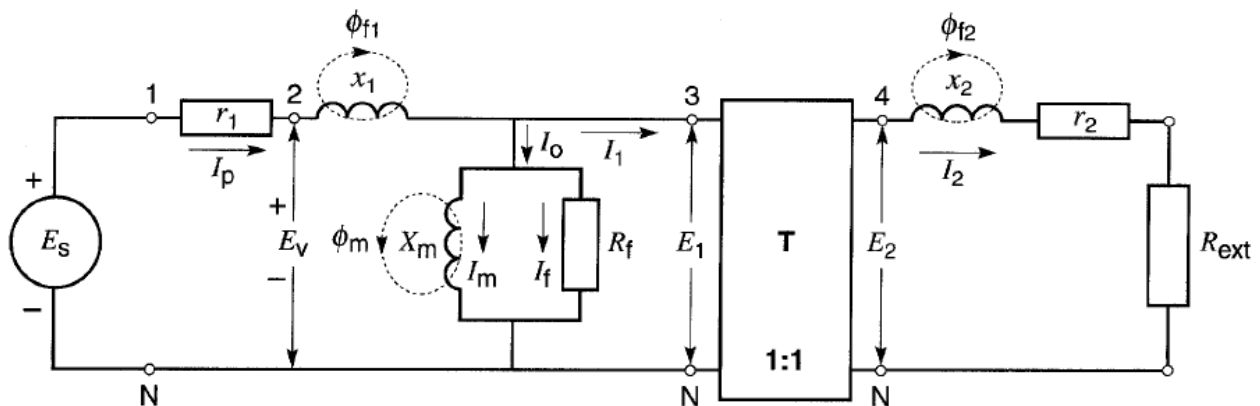


Fig 2-1 Circuit équivalent d'un moteur à rotor bobiné à l'arrêt. Les bagues sont connectées à une résistance extérieure.

La fig 2-2 représente le circuit du moteur lorsque le rotor est bobiné, avec les bagues sont en court-circuit.

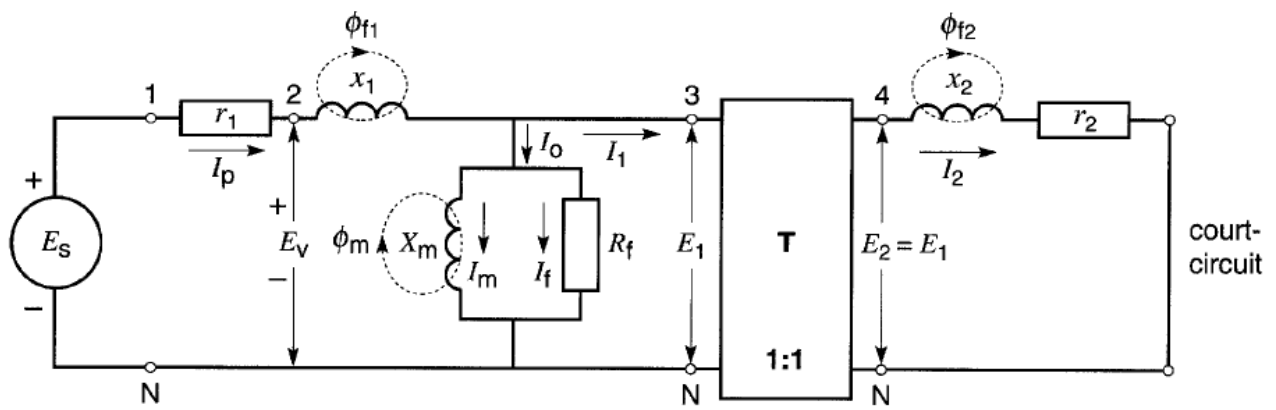


Fig 2-2 Circuit équivalent d'un moteur à rotor bobiné lorsque le rotor est bloqué. Les bagues sont en court-circuit.

Que devient-il lorsque le rotor commence à tourner ?

Supposons que le rotor tourne avec un glissement s de sorte sa vitesse n soit :

$$n = n_s(1 - s)$$

Si le moteur était au repos, la tension E_2 induite au secondaire du transformateur idéal T serait égale à la tension E_1 au primaire (Fig 2-3). Mais comme le moteur tourne avec un glissement s , la tension efficace au secondaire est :

$$E_2 = sE_1$$

De plus la fréquence du côté secondaire devient sf , où f est la fréquence de la source, Cela a pour effet de changer la réactance de fuite du rotor de x_2 à sx_2 . La valeur de r_2 n'est évidemment pas affectée par ce changement de fréquence.

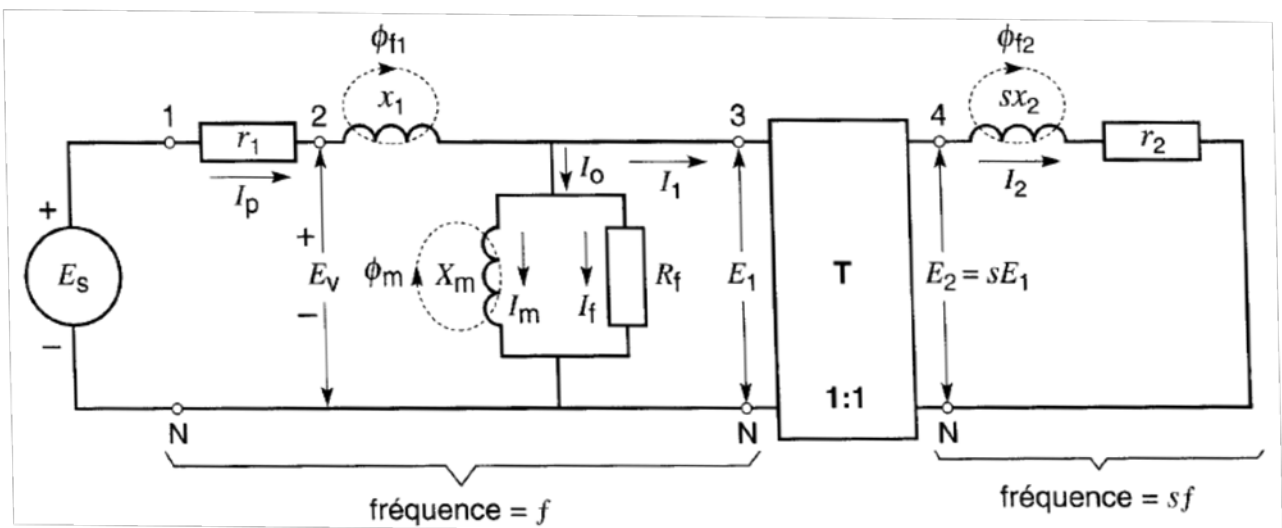


Fig 2-3 Circuit équivalent d'un moteur à rotor bobiné pour un glissement s . La fréquence au primaire est f , mais celle au secondaire est sf .

Comme r_2 et sx_2 sont en série, le courant I_2 dans le rotor est donné par :

$$I_2 = \frac{sE_2}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}}$$

Et I_2 est en retard sur $E_2 (= sE_1)$ d'un angle β donné par :

$$\beta = \arctan \frac{sx_2}{r_2}$$

Le diagramme vectoriel du circuit du rotor est donné à la Fig. 2-4a. il est important de se rappeler que ce diagramme est basé sur la fréquence rotorique sf ; il ne peut donc pas s'intégrer du côté primaire où la fréquence est toujours f . Néanmoins, il existe une relation directe entre la valeur efficace de I_2 (fréquence sf) et la valeur efficace de I_1 (fréquence f). en effet, on peut démontrer que, même si les fréquences sont différentes au stator et au rotor, le rapport de transformation de 1 : 1 impose que ces courants efficaces soient égaux.

De plus, on peut prouver que le déphasage entre E_1 et I_1 est exactement le même que le déphasage entre E_2 et I_2 , soit β degrés. Cela nous permet de tracer le diagramme vectoriel du côté primaire (Fig. 3-4b).

$$I_1 = I_2 = \frac{sE_1}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}}$$

En divisant le numérateur et le dénominateur par s , cette équation peut s'exprimer sous forme :

$$I_1 = \frac{E_1}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_2^2}}$$

Soit

$$\frac{E_1}{I_1} = \sqrt{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_2^2}$$

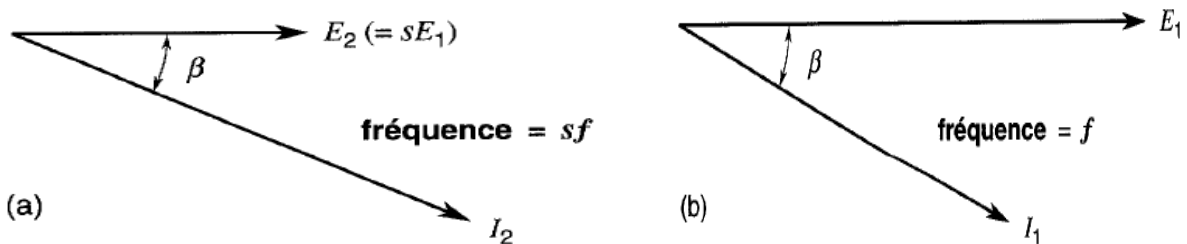


Fig 2-4

- Diagramme vectoriel du circuit du rotor. La fréquence est sf .
- Diagramme vectoriel du circuit du stator. La fréquence est f et le déphasage β est le même que celui du rotor.

Le rapport E_1/I_1 est équivalent à une impédance composée d'une résistance r_2/s en série avec une réactance x_2 placée entre les points 3 et N (Fig. 2-3). Par conséquent, le circuit de la Fig. 2-3 se simplifie beaucoup pour donner celui monté à la Fig. 3-5.

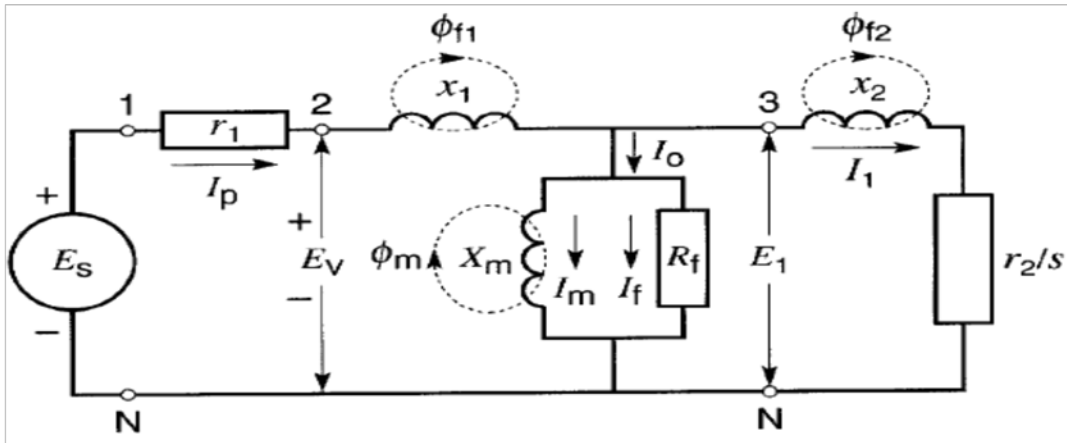


Fig. 2-5 Circuit équivalent d'un moteur à rotor bobiné où tous les éléments sont rapportés au primaire (stator).

Dans le cas d'un transformateur, on peut souvent négliger la branche d'excitation (X_m et R_f) car le courant d'excitation I_0 . Cependant, à cause de la présence de l'entrefer, le courant I_m d'un moteur peut parfois atteindre 50 % de I_p . par conséquent on ne peut pas éliminer la branche d'excitation. Toutefois, pour des moteurs de 2 kW et plus, on peut la déplacer aux bornes de l'alimentation, comme l'indique la Fig. 2-6. Cela permet aussi de combiner les réactances de fuite x_1 et x_2 en une seule réactance de fuite x . Cette dernière est la réactance de fuite totale du moteur, rapportée au stator.

Le circuit résultant, et le diagramme vectoriel correspondant, sont montrés à la Fig. 2-6. Avec ce circuit, les équations décrivant la performance du moteur deviennent plus simples, sans affecter de façon significative la précision des calculs.

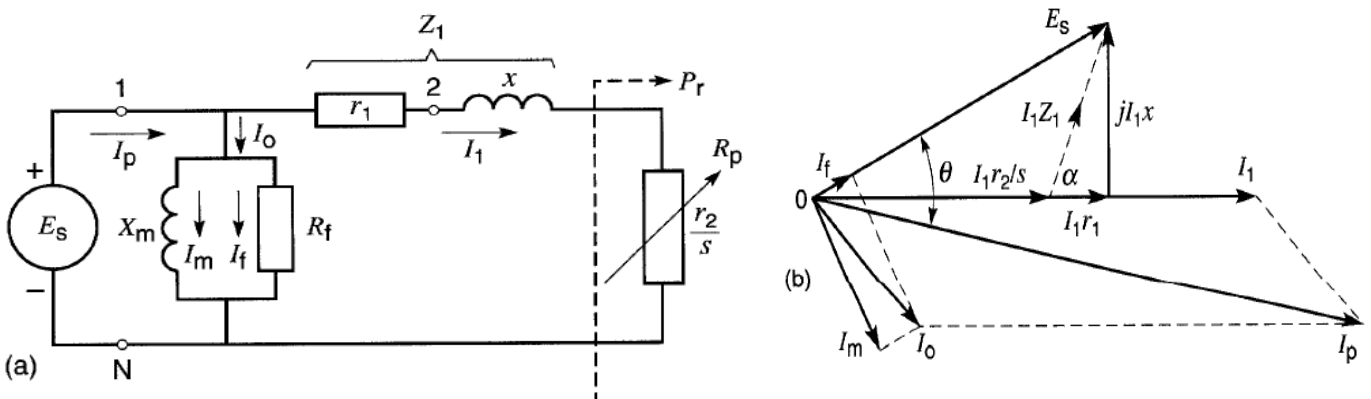


Fig. 2-6

- a- Circuit équivalent d'un moteur à rotor bobiné où la branche d'excitation est déplacée à la source (circuit équivalent simplifié).
- b- Diagramme vectoriel du circuit.

Remarque : les résistances de fuite du rotor et du stator sont combinées pour donner la réactance de fuite totale, rapportée au stator. La puissance active fournie au rotor (puissance transmise au rotor) correspond à la puissance absorbée par la résistance r_2/s .

Dans ce diagramme vectoriel, ainsi que pour les calculs futurs, nous définissons l'impédance Z_1 et l'angle α comme suit :

$$Z_1 = \sqrt{r_1^2 + x^2}$$

$$\alpha = \arctan x/r_1$$

Puisque, pour un moteur donné, r_1 (résistance du stator) et x (réactance de fuite totale) sont constantes, il s'ensuit que Z_1 et α sont constants, quels que soient la vitesse ou le sens de rotation du moteur.

Remarque : dans les moteurs de 1000 kW et plus, la valeur de x est beaucoup plus grande que r_1 ; par conséquent, la valeur de Z_1 devient simplement x , et l'angle α s'approche de 90° .

Puissances électrique, mécanique et thermique :

Le circuit équivalent de la Fig. 2-6 nous permet d'établir quelques relations fondamentales concernant les puissances électromécaniques. Par simple inspection du circuit, on déduit les équations suivantes, par phase :

- 1- Puissance active absorbée par le moteur :

$$P = \frac{E_s^2}{R_f} + I_1^2 r_1 + I_1^2 \frac{r_2}{s}$$

- 2- Puissance réactive absorbée par le moteur

$$Q = \frac{E_s^2}{x_m} + I_1^2 x$$

- 3- Puissance apparente absorbée par le moteur

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

- 4- Facteur de puissance du moteur

$$\cos \theta = \frac{P}{S}$$

- 5- Courant de ligne

$$I_p = \frac{S}{E_s}$$

- 6- Puissance fournie au rotor

$$P_r = I_1^2 \frac{r_2}{s}$$

- 7- Pertes Jules dissipées dans le rotor

$$P_{jr} = I_1^2 r_2 = s P_r$$

- 8- Puissance mécanique P_{mc} fournie à la charge

$$P_{mc} = P_r - P_{jr}$$

$$P_{mc} = P_r (1 - s)$$

Remarque : la puissance mécanique interne P_m est égale à la puissance P_{mc} fournie à la charge plus les pertes P_v par frottement et aération. Dans la Fig. 2-6 les pertes P_v sont déjà incluses dans les pertes $I_f^2 R_f$.

9- Rendement du moteur

$$\eta = \frac{P_{mc}}{P}$$

10- Couple du moteur

$$T = \frac{9.55 P_{mc}}{n} = \frac{9.55 P_r (1 - s)}{n_s (1 - s)} = \frac{9.55 P_r}{n_s}$$

Remarque : Noter que le couple interne est égal au couple T plus le couple exercé par le frottement et l'aération.

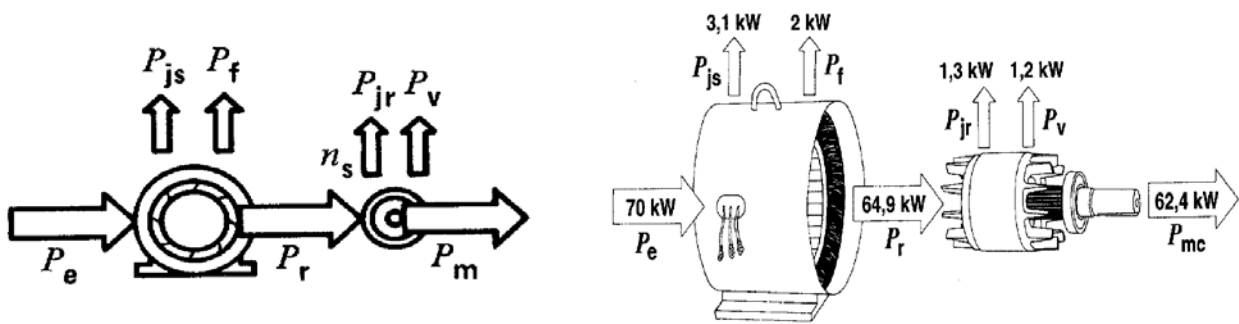


Fig. 2-7 Bilan énergétique du moteur asynchrone.

Puissance transmise au rotor et puissance mécanique :

La puissance absorbée par la résistance r_2/s correspond à la puissance P_r transmise au rotor. Cette puissance représente la puissance mécanique P_{mc} plus les pertes joule dans le rotor. Cette répartition des puissances est mise en évidence à la figure 2-8. On a subdivisé la résistance r_0/s en deux composantes r_2 et R_{mc} où :

$$R_{mc} = \frac{r_2}{s} - r_2 = r_2 \left(\frac{1}{s} - 1 \right) \text{ et la puissance mécanique : } P_{mc} = I_1^2 R_{mc} = I_1^2 r_2 \left(\frac{1}{s} - 1 \right)$$

On constate que le circuit équivalent d'un moteur asynchrone est semblable à celui d'un transformateur conventionnel ayant comme charge une résistance variable R_{mc} .

Lorsque $s=1 \Rightarrow \frac{r_2}{s} = r_2$ (transformateur en court-circuit).

A vide $s \ll 1$ (transformateur à vide)

Si $s < 0$ (la machine se comporte comme une génératrice. Ça signifie que le rotor fournit de la puissance au stator à travers l'entrefer.

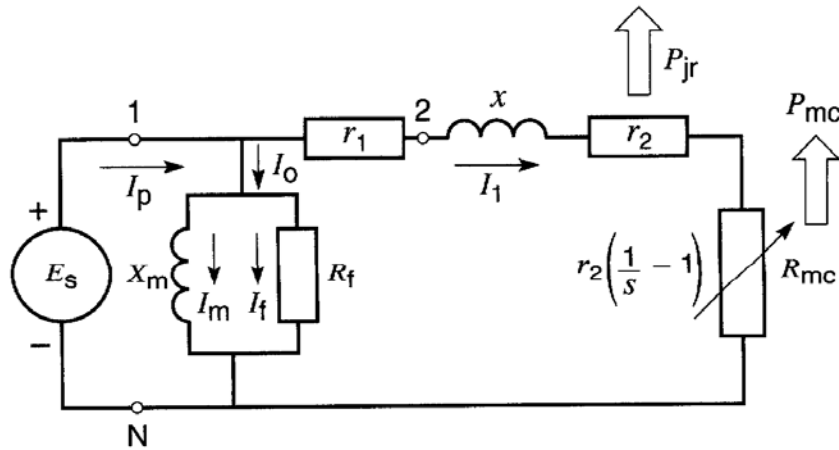


Fig. 2-8 Circuit équivalent mettant en évidence la résistance R_{mc}

Vitesse et couple de décrochage et couple de démarrage (Caractéristique mécanique de MAS) :

Afin de tracer la caractéristique mécanique de la machine asynchrone, dans cette section, nous donnons les formules pratiques permettant de calculer le couple de décrochage ainsi que le courant et le glissement correspondant.

Au décrochage, comme le couple est maximum, la puissance par phase P_r fournie au rotor est nécessairement au maximum. (la puissance peut être positive ou négative, selon que la machine fonctionne en moteur ou en générateur).

En ce référant au circuit de la figure 2-6 a, la puissance P_r est celle dissipée dans la résistance $\frac{r_2}{s}$ est égale à \pm la valeur de l'impédance $(r_1 + jx)$ situé en amont de $\frac{r_2}{s}$ cette impédance est donnée par :

$$Z_1 = \sqrt{r_1^2 + x^2}$$

Désignons par s_d le glissement lors du décrochage. On peut donc écrire :

$$\frac{r_2}{s_d} = \pm Z_1 \quad \text{avec} \quad s_d = + \frac{r_2}{Z_1} \quad (\text{moteur})$$

$$s_d = - \frac{r_2}{Z_1} \quad (\text{générateur})$$

Couple du décrochage :

Pour un moteur, le courant I_1 lors du décrochage, désigné par le symbole I_d , est donné par :

$$I_d = \frac{E_s}{\sqrt{(r_1 + Z_1)^2 + x^2}} = \frac{E_s}{\sqrt{r_1^2 + 2r_1 Z_1 + Z_1^2 + x^2}} = \frac{E_s}{\sqrt{2Z_1^2 + 2r_1 Z_1}}$$

$$\text{D'où} \quad \frac{E_s}{\sqrt{2Z_1(Z_1 + r_1)}} \quad (\text{moteur}) \quad \text{et} \quad \frac{E_s}{\sqrt{2Z_1(Z_1 - r_1)}} \quad (\text{générateur}).$$

La puissance fournie au rotor lors du décrochage est :

$$P_r = I_1^2 \frac{r_2}{s_d}$$

D'après les équations précédentes, on déduit la valeur du couple de décrochage par phase :

$$T_d = \frac{9.55 E_s^2}{2n_s(r_1+Z_1)} \quad (\text{moteur})$$

ou

$$T_d = \frac{9.55 E_s^2}{2n_s(r_1-Z_1)} \quad (\text{générateur})$$

On déduit que $T_{\text{dgén}} > T_{\text{dmot}}$ et que I_d et T_d ne dépendent pas de r_2 .

Couple du démarrage :

Il est facile de démontrer par simple inspection sur le circuit simplifié, que le courant I_1 et le couple de démarrage ($s=1$) sont donnés par :

$$I_{dém} = \frac{E_s}{(r_1+r_2)^2+x^2}$$

Et

$$T_{dém} = \frac{9.55 r_2}{n_s} I_{dém}^2 = \frac{9.55 r_2 E_s^2}{n_s [(r_1+r_2)^2+x^2]}$$

Expressions du couple :

$$T = \frac{9.55 E_s^2 r_2}{n_s s [(r_1+r_2)^2 + (x_1+x_2)^2]}$$

On peut obtenir l'équation du couple en fonction du couple de décrochage T_d :

$$T = \frac{2T_d (1 + a s_d)}{\frac{s}{s_d} + \frac{s}{s_d} + 2 a s_d} \quad \text{où} \quad a = \frac{r_1}{r_2}$$

Si on néglige r_1 on obtient :

$$T = \frac{2T_d}{\frac{s}{s_d} + \frac{s_d}{s}}$$

On peut écrire aussi $T_{dém}$ en fonction de T_d

$$T_{dém} = \frac{2T_d s_d}{1+s_d^2}$$

Caractéristique mécanique de la MAS :

Les caractéristiques d'un moteur sont généralement représentées par les diagrammes vitesse - couple ou vitesse - puissance. Les courbes caractéristiques du moteur asynchrone Figure.2.9, nous permettent de comprendre son fonctionnement ainsi que ses limitations. Au démarrage, la vitesse du moteur est nulle et l'on se trouve sur l'axe $n/n_s = 0$. Cela nous permet de comprendre qu'au démarrage le moteur asynchrone fournit un couple représenté par T_a sur la figure. Il s'agit du couple développé par le moteur, à l'arrêt, lorsqu'on lui applique la tension et la fréquence nominales. Au fur et à mesure que le moteur prend de la vitesse, on voit que le couple est croissant et passe par un maximum aussi appelé le couple de décrochage du moteur (T_d). Le fonctionnement du moteur se stabilise alors à une vitesse légèrement inférieure à la vitesse de synchronisme ($n/n_s < 1$) et présente alors ses caractéristiques nominales (vitesse nominale n_N , couple nominal T_N , courant nominal I_N).

La plage de fonctionnement du moteur est divisée en deux zones : la zone d'accélération $0 < n/n_s < n_d/n_s$ et la zone d'utilisation $n_d/n_s < n/n_s < 1$.

Le rendement d'un tel moteur varie en fonction de sa puissance et du nombre de pôles mais se situe généralement entre 0,7 et 0,9.

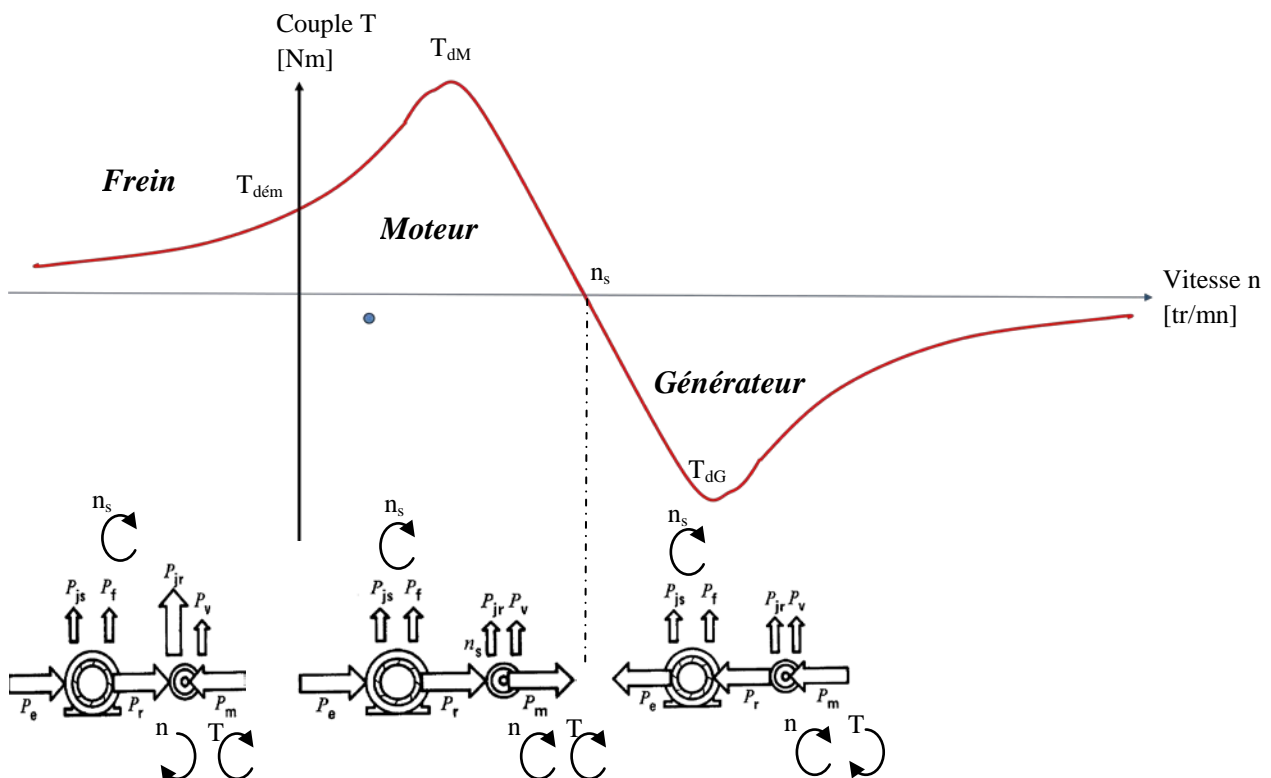


Fig. 2-9 courbe généralisée donnant le couple en fonction de la vitesse d'une machine asynchrone