

Chapitre V

Machines Asynchrones

- I) **Généralités :** Elles sont ainsi appelées parce que le rotor ne tourne pas à la vitesse de synchronisme. Elles sont généralement utilisées en moteur asynchrone triphasé, même si elles sont parfaitement réversibles, elles sont aussi très utilisées en moteur monophasé dans les appareils électroménager.
- II) **Constitution :** La machine asynchrone est constituée d'un (stator, rotor, entrefer)
- 1) **Le stator :** c'est un cylindre creux encoché à l'intérieur et dans lequel il y a un enroulement généralement triphasé (stator identique à celui de la machine synchrone)
 - 2) **Le Rotor :** En fonctionnement normal le rotor des machines asynchrones est en court-circuit. Il existe deux types de rotor, le rotor bobiné et le rotor à cage d'écureuil.
 - a) **Le rotor bobiné :** C'est un cylindre encoché à l'extérieur et contenant un bobinage triphasé, accessible grâce à un système de trois (bague+balai) qui sont reliés à trois bornes sur la plaque à bornes. Ces trois bornes permettent d'insérer éventuellement un rhéostat de démarrage.

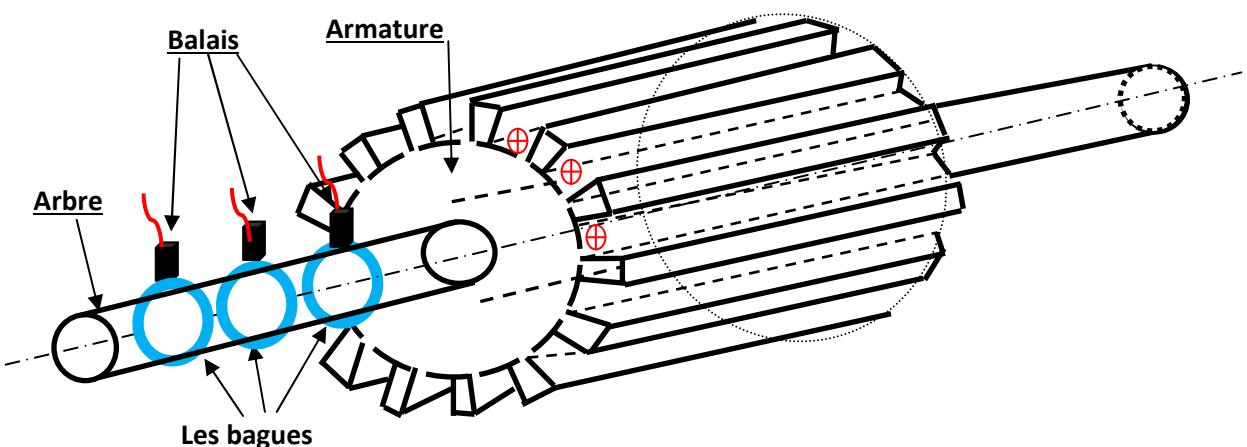


Figure 1 : Schéma d'un rotor bobiné

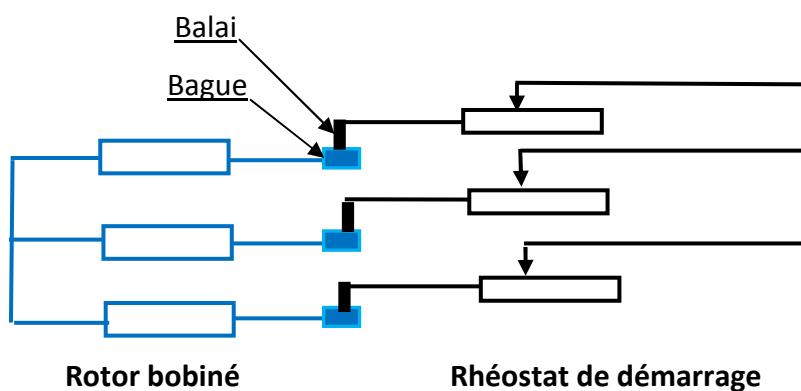


Figure 2 : Schéma de principe d'un rotor bobiné avec rhéostat de démarrage

- b) **Rotor à cage d'écureuil** : Dans ce genre de rotor l'enroulement est constitué de barres de cuivre nus soudées à chaque extrémité à deux anneaux qui les court-circuitent. Ces rotors ne sont pas accessibles, il n'y a pas de bornes au rotor.

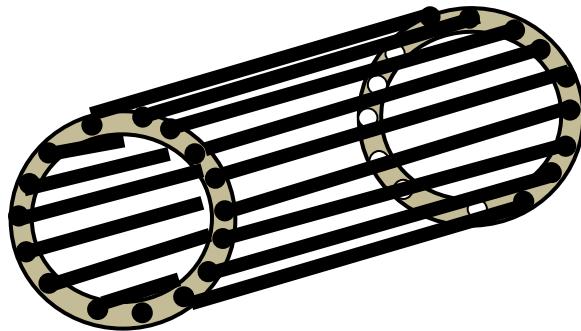


Figure 3 : Schéma d'un rotor à cage d'écureuil

III) Principe de fonctionnement

Le fonctionnement de la machine asynchrone (MAS) est basé sur l'effet du champ tournant statorique sur les courants rotoriques qu'il a lui-même créé. Les forces de Laplace qui s'appliquent sur les barres (brins) du rotor, entraînent celui-ci dans le sens du champ tournant, mais sans jamais atteindre la vitesse du champ (synchronisme).

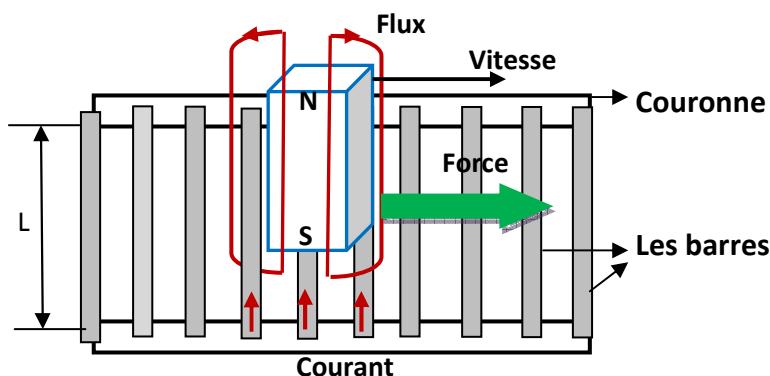


Figure 3 : Aimant + échelle

Le déplacement de l'aimant à la vitesse V au dessus de l'échelle fait que le champ magnétique d'induction B de l'aimant coupe les barres de longueur L de l'échelle d'où une f.e.m $e = B \cdot L \cdot V$ sera induite dans chaque barre.

Puisque le circuit est fermé par les deux couronnes (court-circuit), un courant I se met à circuler dans la barre qui est momentanément au dessous de l'aimant.

La barre traversée par un courant I et se trouvant dans un champ magnétique d'induction B sera soumise à la force de Laplace $F = I \cdot L \cdot B$. La force exercée sur chaque barre va entraîner l'échelle dans le sens de déplacement de l'aimant.

Dans les MAS l'aimant permanent et son déplacement sont remplacés par trois bobines identiques placées à $\pm 2\pi/3$ sur le stator et alimentées par un système de courants triphasés. Elles créent trois champs alternatifs qui, lorsqu'ils sont composés, forment un champ tournant. L'échelle est remplacée par un rotor en cage d'écureuil ou bobiné.

Le champ tournant créé par le stator agit sur le disque (ou les brins (barres) du rotor) et l'entraîne dans sa rotation à une vitesse légèrement inférieure à celle du champ.

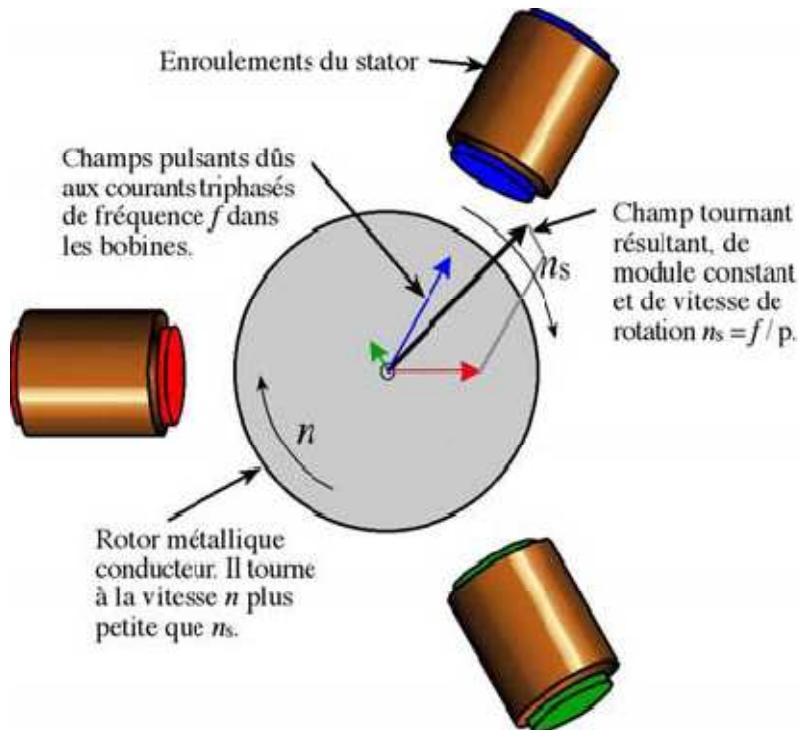


figure 4 : Principe de fonctionnement d'une MAS

NB : Les bobinages du stator et du rotor doivent avoir le même nombre de pôles (2p), leurs nombres de phases peuvent être différents. Le rotor à cage a un nombre infini de phases.

1) Glissement :

La vitesse du champ tournant créé par les courants statoriques de pulsation $\omega=2\pi f$ ($f=50$ Hz, $2P$ = nombre de pôles par phase) est :

$$\Omega_s = \omega/P = 2\pi f / P \text{ en rd/S ou } n_s = f/P \text{ en tours/S}$$

Le rotor tourne à une vitesse Ω_r légèrement inférieur à Ω_s , on dit qu'il y a un glissement du rotor. Le glissement est d'autant plus important que la charge mécanique est grande. On définit le glissement par :

$$g = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s}$$

2) Fréquence des courants rotoriques :

Le stator (ayant 2P pôles par phase) crée un champ qui tourne à la vitesse de synchronisme

$$\Omega_s = \omega/P \text{ ou } n_s = f/P \Rightarrow f = P n_s$$

Le rotor tourne à la Ω_r ou n_r donc chacun de ses brins (ou barres) sera balayé par le flux (champ statorique) à la vitesse $(\Omega_s - \Omega_r)$ ou $(n_s - n_r)$

$$f_r = P(n_s - n_r) = P \left(\frac{n_s - n_r}{n_s} \right) n_s = P g n_s = g f$$

Et le glissement devient

$$g = \frac{f_r}{f} = \frac{\omega_r}{\omega}$$

NB :

-En fonctionnement nominal la fréquence des courants rotoriques est très faible car la vitesse du rotor est proche de celle du champ (synchronisme).

Exemple Pour $P=2$ et $(f=50 \text{ Hz}) \Rightarrow n_s = 60 \text{ f}/P = 60*50/2 = 1500 \text{ tours/minute}$

n_r est de l'ordre de 1470 tr/mn et $g = (n_s - n_r)/n_s = (1500 - 1470)/1500 = 0.02$

et $f_r = g \cdot f = 0.02 * 50 = 1 \text{ Hz}$

-Au démarrage la vitesse du rotor $n_r=0 \Rightarrow g=1$ et $f_r=f$, donc la fréquence des courants rotoriques est maximale, puis elle commence à diminuer au fur et à mesure que le rotor prend de la vitesse.

-Si la vitesse du rotor devient trop proche (à vide par exemple) de celle du champ $\Rightarrow g \rightarrow 0$ (le flux à travers chaque spire du rotor sera constant) \Rightarrow la f.e.m $e=0$ et donc pas de courant ni de couple.

IV) Puissances pertes et rendement

Nous allons suivre l'acheminement de la puissance active d'un moteur asynchrone. Une fois alimenté ce moteur absorbe une puissance $P_a = 3 V_1 I_1 \cos\varphi_1$, une partie de cette puissance sera dissipée par effet Joule dans les enroulements du stator $P_{js} = 3 R_1 I_1^2$ (R_1 =résistance d'une phase du stator), une autre partie P_{fer} sera perdue dans le fer.

Le reste de la puissance sera transmise au rotor par induction P_r . Une troisième partie va se dissiper par effet Joule dans les enroulements du rotor P_{jr} (on montre que $P_{jr}=g P_r$)

$P_m = P_r - P_{jr} =$ puissance mécanique développée par le moteur. Une autre partie de cette puissance va se dissiper par frottement sur l'arbre et par ventilation P_v .

Le reste de la puissance sera fournie à la charge sous forme de puissance mécanique qu'on peut appeler puissance utile P_u

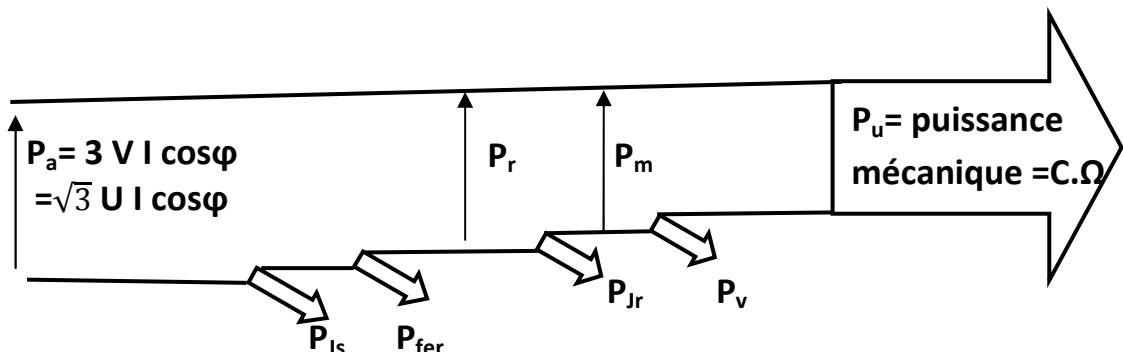


Figure 4 : Bilan de puissance d'un moteur asynchrone

$$P_m = P_r - P_{Jr} \quad P_m = C_m \Omega_r \quad \text{et} \quad P_r = C_r \Omega_s$$

D'après la loi de l'action et de la réaction, le couple mécanique est nécessairement égal au couple électromagnétique $C_r = C_m = C$

$$P_{Jr} = P_r - P_m = C_r \Omega_s - C_m \Omega_r = C(\Omega_s - \Omega_r) = C \Omega_s (\Omega_s - \Omega_r) / \Omega_s = g P_r$$

$$P_m = P_r - P_{Jr} = P_r - g P_r = P_r(1-g) \quad \text{et le couple} \quad C = P_r / \Omega_s = P_m / \Omega_s$$

Le rendement $\eta = P_u / P_a$

V) Schéma Electrique Équivalent

1) Flux à vide

Supposons qu'on ouvre le circuit du rotor (rotor bobiné) figure 4 :

Si on alimente le stator du réseau ils y auraient des courants statoriques mais il ne peut y avoir de courants rotoriques donc le moteur ne tourne pas $g=1$ et $f_r=g f=f$; il se comporte comme un **transformateur** à vide ($I_2=0$). Primaire =stator ; secondaire = Rotor

Les courants statoriques (primaires) de fréquence f créent une FMM tournante origine d'un flux tournant ϕ dont la majeure partie est commune aux deux enroulements (primaire et secondaire).

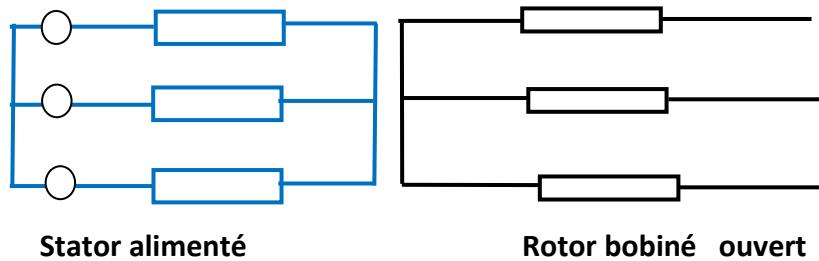


Figure 4 : MAS avec stator alimenté et rotor ouvert

Ce flux induit dans chaque phase primaire une f.c.e.m d'auto-induction E_1 et dans chaque phase du secondaire une f.e.m E_2

Pour évaluer E_1 et E_2 en fonction du flux utile on peut utiliser la relation établie pour les alternateurs (N_1 et N_2 sont les nombres de conducteurs en série par phase respectivement primaire et secondaire)

$$E_1 = \frac{\pi}{\sqrt{2}} K_1 N_1 f \phi \quad \text{et} \quad E_2 = \frac{\pi}{\sqrt{2}} K_2 N_2 f \phi$$

K_1 et K_2 sont respectivement les coefficients de bobinage des deux enroulements et comme le rotor ne tourne pas $f_r = g f = f$ d'où le rapport de transformation $m = \frac{E_2}{E_1} = \frac{K_2 N_2}{K_1 N_1}$

2) **En charge** : En charge les courants rotoriques auront une fréquence $f_r = g f$ et

$$E_2 = \frac{\pi}{\sqrt{2}} K_2 N_2 f_r \phi = \frac{\pi}{\sqrt{2}} K_2 N_2 g f \phi \Rightarrow \frac{E_2}{E_1} = \frac{g K_2 N_2}{K_1 N_1} = g m$$

3) Schéma Electrique Équivalent

Pour simplifier les calculs on suppose que les enroulements du stator et du rotor sont branchés en étoile et que le rapport de transformation $m=1$ donc $E_2=g E_1$

Les paramètres du schéma électrique équivalent sont

-(r_1 et r_2) résistance interne du stator et du rotor

-(x_1 et x_2) réactance de fuite du stator et du rotor

-(R_f et X_m) X_m représente la réactance de magnétisation et R_f les pertes fer ainsi que les pertes par frottement et ventilation

Pour un moteur asynchrone à rotor bloqué ($g=1$ et donc $f_r=f$) on aura le circuit électrique équivalent suivant :

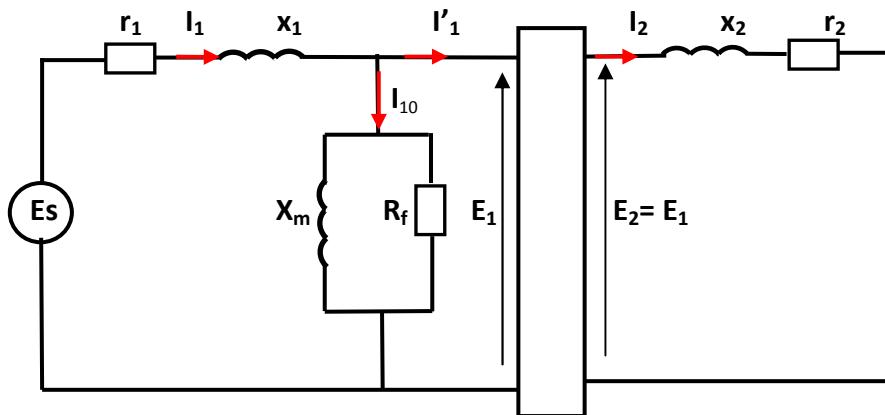


Figure 5 : Circuit électrique équivalent d'un moteur à rotor bobiné bloqué

Des que le rotor commence à tourner, on aura une vitesse rotorique n_r et un glissement g , la f.e.m induite au rotor devient $E_2=g E_1$ et le courant rotorique aura une fréquence $f_r=g f$ et la réactance de fuite au secondaire devient $x_2'=L_{f2} \omega_2 = L_{f2} 2\pi f_r = L_{f2} 2\pi g f = g x_2$ et le schéma électrique équivalent devient :

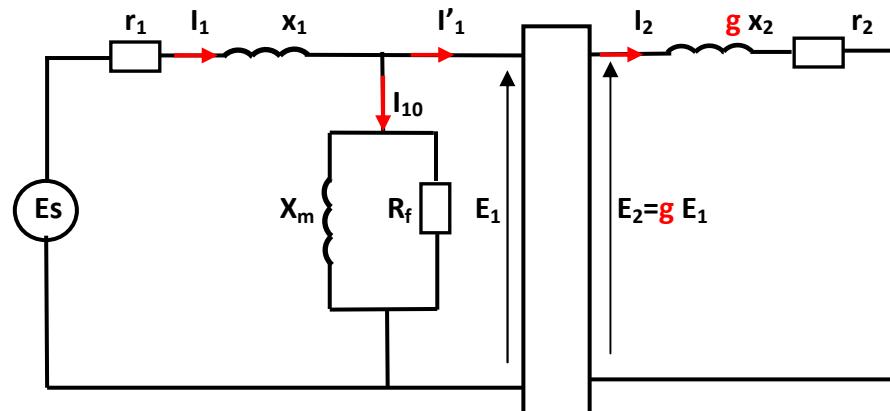


Figure 5 : Circuit électrique équivalent d'un moteur à rotor bobiné pour un glissement g

$$E_2 = gE_1 = I_2 * \sqrt{(gx_2)^2 + r_2^2}$$

Pour un transformateur avec rapport unité ($m=1$) on a $\mathbf{I}'_1 = \mathbf{m}\mathbf{I}_2 = \mathbf{I}_2$

$$I'_1 = I_2 = \frac{gE_1}{\sqrt{(gx_2)^2 + r_2^2}} = \frac{E_1}{\sqrt{x_2^2 + \left(\frac{r_2}{g}\right)^2}}$$

Le rapport $\frac{E_1}{I'_1} = \sqrt{x_2^2 + \left(\frac{r_2}{g}\right)^2}$ équivaut à une impédance composée d'une réactance x_2 en série avec une résistance r_2/g , placée au primaire.

Le circuit électrique équivalent devient :

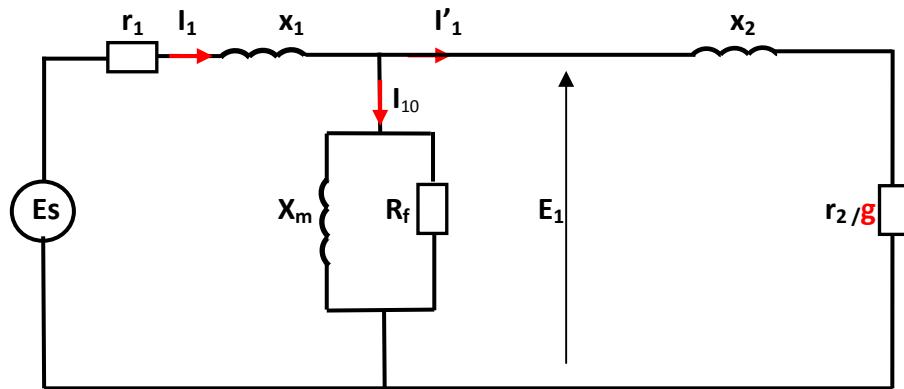


Figure 6 : Circuit équivalent où tous les éléments sont rapportés au primaire

Pour pouvoir rassembler les deux réactances (x_1 et x_2) on fait passer la branche magnétisante à l'entrée de transformateur.

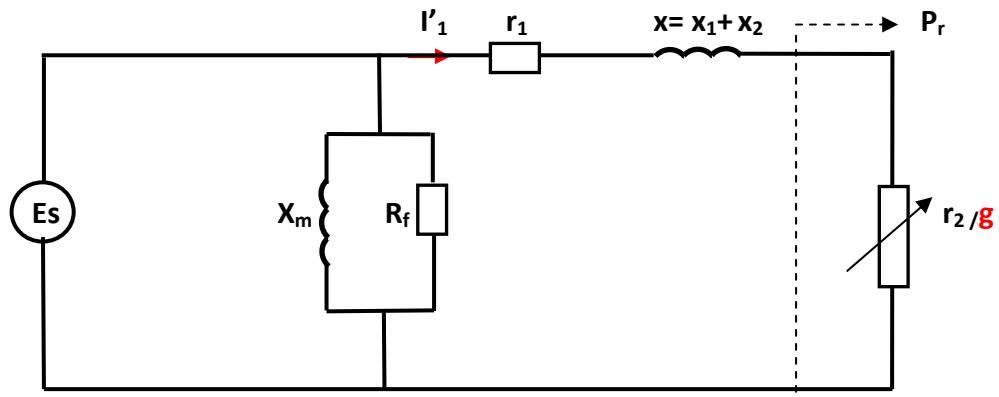


Figure 6 : Circuit équivalent avec réactances de fuite rassemblées

La puissance P_r est la puissance fournie au rotor (ici on considère que les pertes par frottement et ventilation sont comprises dans R_f)

$$P_r = 3 I_1'^2 \cdot r_2/g , \quad P_{Jr} = 3 I_1'^2 \cdot r_2 = g P_r \quad P_u = P_r - P_{Jr} = P_r(1-g)$$

Si on subdivise la résistance r_2/g en deux composantes r_2 et R_u , $r_2/g = r_2 + R_u$

$$R_u = \frac{r_2}{g} - r_2 = r_2 \left(\frac{1-g}{g} \right)$$

La puissance utile devient $P_u = 3R_u I_1'^2 = 3r_2 \left(\frac{1-g}{g} \right) I_1'^2$

Le circuit équivalent devient semblable à celui d'un transformateur conventionnel ayant comme charge une résistance variable R_u qui absorbe une puissance thermique égale à la puissance mécanique fournie à la charge P_u

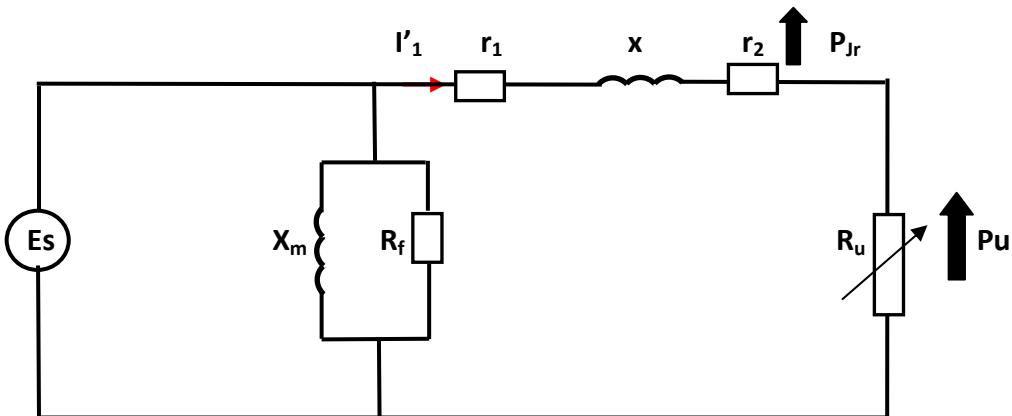


Figure 6 : Circuit équivalent avec mise en évidence de la puissance utile

VII) Construction du diagramme circulaire

La construction du diagramme se détermine à partir des essais suivants :

- 1) **Essai à vide :** On alimente le moteur sous sa tension nominale V_1 et on relève le courant I_{10} et la puissance $P_{10} = 3V_1 I_{10} \cos\phi_{10}$. On place le point A de coordonnées $(I_{10}, \cos\phi_{10})$
Pour plus de précision on peut faire l'**essai à glissement nul ($g=0$)** : cet essai est obtenu en alimentant le moteur sous sa tension nominale et en faisant tourner le rotor (par un moteur auxiliaire) à la vitesse synchrone. On relève alors le point A' de glissement ($g=0$)
- 2) **Essai à rotor bloqué :** Cet essai doit se faire à tension réduite pour éviter des courants excessifs. On alimente le moteur sous une tension réduite en gardant le rotor bloqué ($g=1$) et on relève V_{1cc} , I_{1cc} et $P_{1cc} = 3V_{1cc} I_{1cc} \cos\phi_{1cc}$ et on détermine $\cos\phi_{1cc} = P_{1cc}/3V_{1cc} I_{1cc}$
Pour plus de précision on peut déterminer le courant de court-circuit à tension nominale en faisant le rapport suivant : $I_d = (V_{1N}/V_{1cc})I_{1cc}$

3) **Essai en charge glissement quelconque (g)** : En fonctionnement normale le glissement est assez faible ($g=0.1$). On relève le point $M(I_1 , \varphi_1)$

Tracé simplifié du diagramme du cercle :

- 1-On prend une échelle pour les courants 1 cm= x Ampères.
- 2-On place le point $A(I_{10} , \varphi_{10})$ tel que $OA = I_{10}$,
- 3-On trace $Ax' // OX$,
- 4- On place le point $M(I_1 , \varphi_1)$ avec $I_1 = I_{10} + I'_1$
- 5-On trace la perpendiculaire à AM , elle coupe OX' en B
- 6- On trace le cercle de diamètre AB , AMB étant rectangle

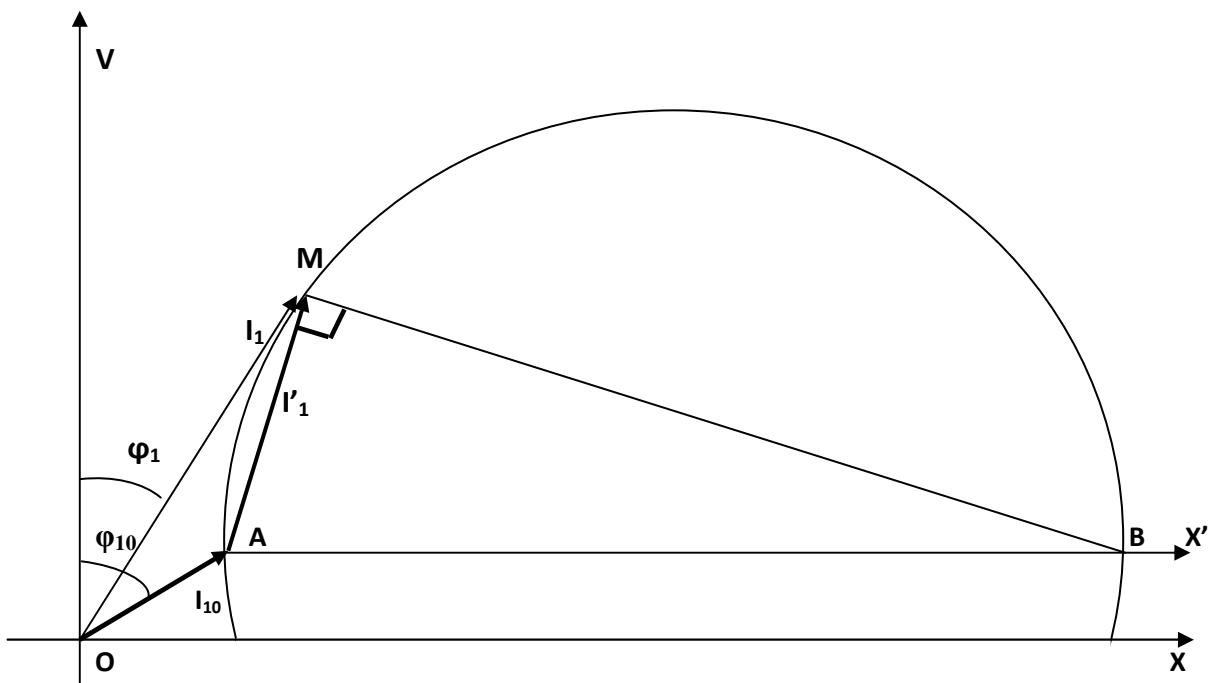


Fig 7 : Diagramme du cercle

VII) Emploie et Exploitation du diagramme du cercle

Points Particuliers Théoriques

- 1) **Fonctionnement à vide** En marche à vide le moteur absorbe un courant I_v qui est peu différent de celui de la marche à glissement nul I_{10} . Dans cet essai les pertes Joules statorique et rotoriques sont négligeables, le moteur absorbe une puissance pour compenser les pertes fer et les pertes mécaniques. Point M_v
- 2) **Fonctionnement à glissement nul g=0** : En marche à glissement nul le rotor étant entraîné par un moteur auxiliaire à la vitesse de synchronisme, le moteur absorbe tout juste une puissance pour compenser les pertes fer. Point A

- 3) **Fonctionnement à glissement unité $g=1$** : En marche à rotor calé, le moteur absorbe une puissance active pour compenser les pertes Joules rotoriques et statoriques ainsi que les pertes fer. Point M_c
- 4) **Fonctionnement à glissement infini $g = \infty$** : C'est un point purement théorique, le moteur est entraîné à une très grande vitesse. La résistance rotorique r_2/g serait nulle et le moteur ne consomme que la puissance nécessaire pour compenser les pertes fer et les pertes joules statoriques. Point M_∞

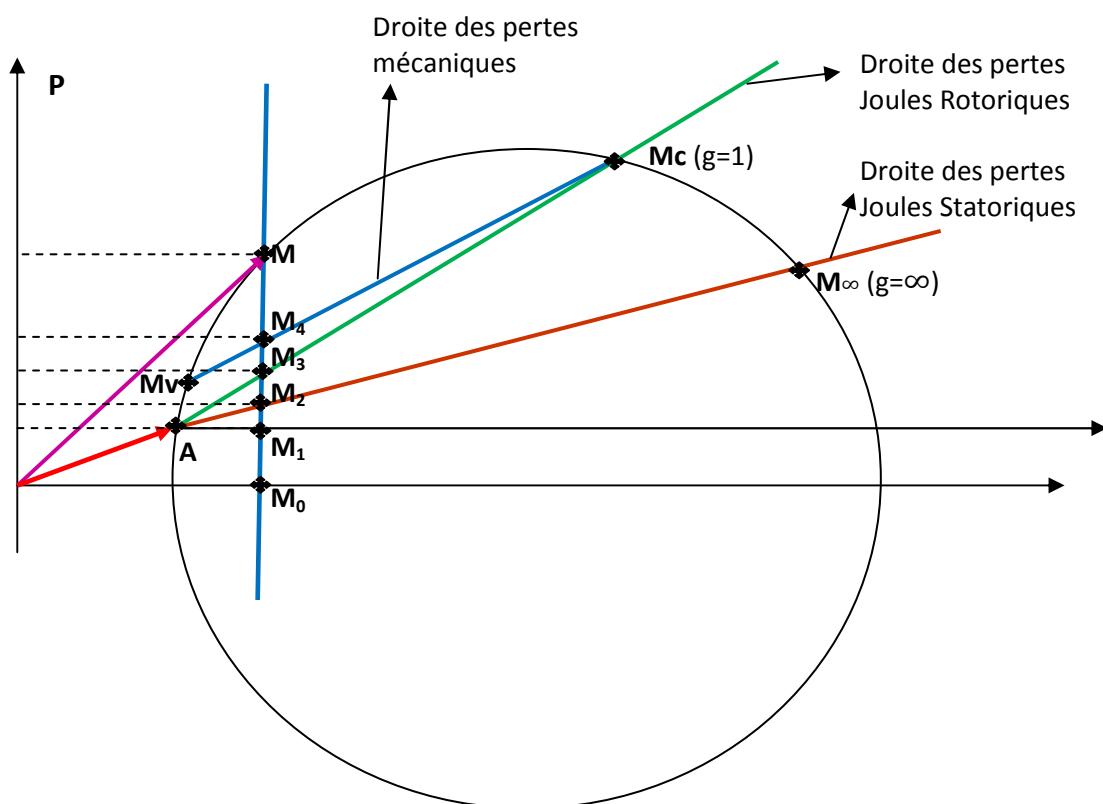


Figure 8 Exploitation du diagramme du cercle

A partir d'un point de fonctionnement on peut déterminer le bilan de puissance du moteur Asynchrone. En faisant une projection sur l'axe des puissances actives et en adoptant les échelles appropriées.

M_0M_1 =pertes fer
 M_1M_2 = pertes joules statoriques
 M_2M_3 = pertes joules rotoriques
 M_3M_4 = pertes mécaniques
 M_4M = Puissance utile
 M_0M = puissance absorbée

VIII) Caractéristique Mécanique d'un Moteur Asynchrone

Le plus important pour le fonctionnement d'un moteur asynchrone est sa caractéristique mécanique $C_e=f(nr)$ ou $C_e=f(g)$

La puissance électromagnétique transmise au rotor (en négligeant les pertes mécaniques ou en les comptabilisant avec les pertes fer) est $P_e = P_u + P_{jr}$

$$P_e = P_u + P_{jr} = 3r_2 \left(\frac{1-g}{g} \right) I_1'^2 + 3r_2 I_1'^2 = 3 \frac{r_2}{g} I_1'^2$$

$$C_e = \frac{P_e}{\Omega} = \frac{p}{\omega} P_e = \frac{p}{\omega} 3 \frac{r_2}{g} I_1'^2$$

A partir de la figure 6 on tire le courant I'_1

$$I'_1 = \frac{V_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2}{g}\right)^2 + X^2}}$$

$$C_e = 3 \frac{p r_2}{\omega g} I_1'^2 = 3 \frac{p r_2}{\omega g} \frac{V_1^2}{\left(r_1 + \frac{r_2}{g}\right)^2 + X^2}$$

En fonctionnement normale le glissement est faible ($g=0.1$) et $\frac{r_2}{g} \gg r_1 \Rightarrow$

$$C_e = 3 \frac{p r_2}{\omega g} \frac{V_1^2}{\left(\frac{r_2}{g}\right)^2 + X^2} = \frac{3p \frac{r_2}{g} V_1^2}{\omega \left(\left(\frac{r_2}{g}\right)^2 + X^2\right)}$$

Donc le couple varie en fonction du glissement :

Au démarrage $n_r=0 \Rightarrow g=1$ et le couple de démarrage sera : $C_d = \frac{3p r_2 V_1^2}{\omega (r_2^2 + X^2)}$

$$\frac{dC_e}{dg} = 0 \Rightarrow g_{max} = \frac{r_2}{X} \text{ et } C_{max} = \frac{3p V_1^2}{2\omega X}$$

1-La courbe $C_e=f(g)$ présente 2 branches, l'une stable pour $0 \leq g \leq g_{max}$;
l'autre partie instable pour $g_{max} \leq g \leq 1$

Si le couple dépasse C_{max} ; le moteur s'arrête (il décroche).

2- Le moteur asynchrone peut supporter des surcharges de courtes durées qui correspondent à un couple normal $0,2 C_{max} \leq C_e \leq 0,4 C_{max}$

3- Puisque $C_{max} = \frac{3p V_1^2}{2\omega X}$ est indépendant de la résistance r_2 ; on peut augmenter g_{max} en augmentant la résistance r_2 sans faire changer ce couple maximal

4- Le couple maxi est directement proportionnel à la tension d'alimentation

5- On peut tracer la caractéristique mécanique $C_e=f(g)$ ou $C_e=f(nr)$

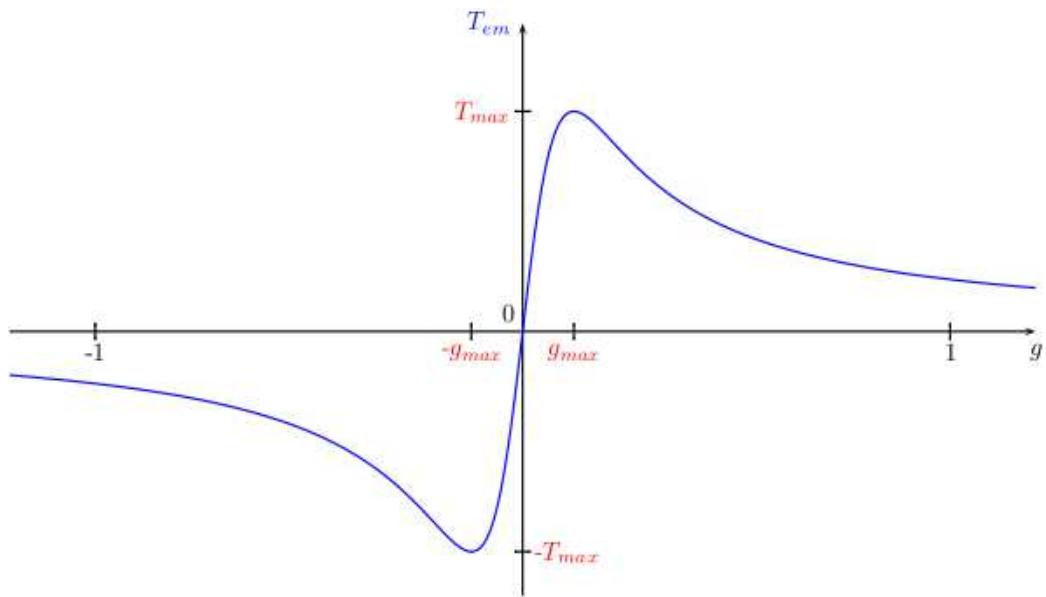


Figure :9 Caractéristique mécanique en fonction du glissement

IX) Démarrage du moteur Asynchrone triphasé

L'emploi du moteur à rotor bobiné permet de démarrer dans les meilleures conditions du couple et du courant.

Sans rhéostat de démarrage le point de fonctionnement à $g=1$ est en M_d qui correspond à un courant très fort et un couple faible (figure 9), avec rhéostat de démarrage on l'amène entre le point de fonctionnement nominal (C_n) et celui du couple maximum (C_{max}) qui correspond à un couple fort et un courant acceptable.

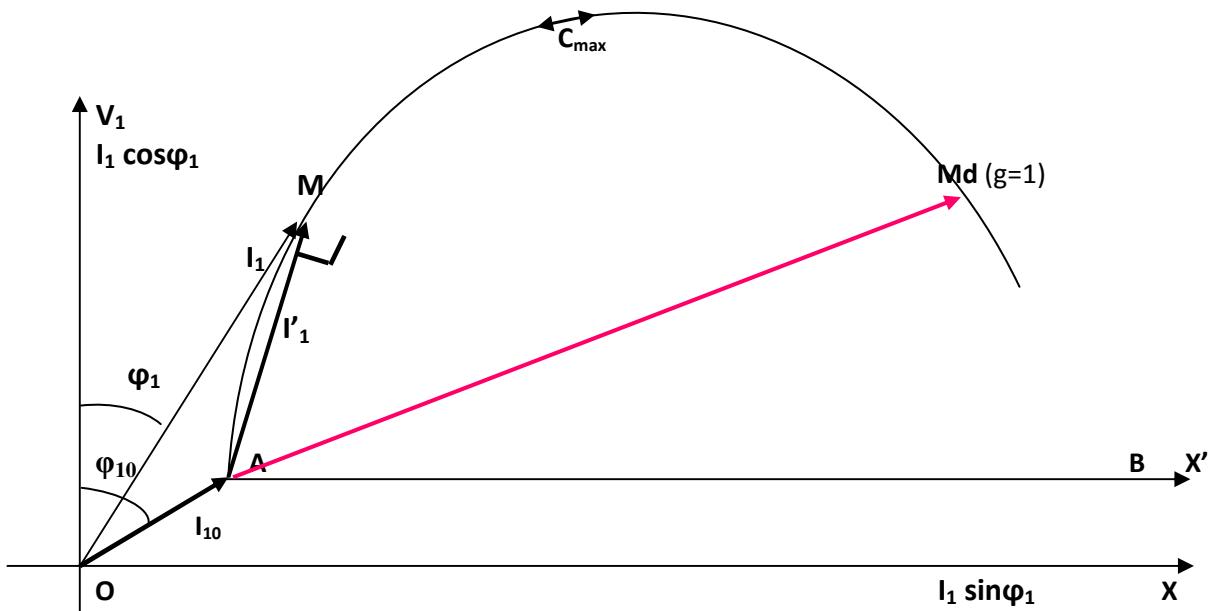


Fig 10 : Diagramme du cercle lors du démarrage