

CHAPITRE VI

Diagramme de Cercle et Caractéristiques de la Machine Asynchrone

I. Introduction

Comme pour tous les systèmes de l'électrotechnique, le but recherché est, à partir d'essais sous puissance réduite, d'élaborer un diagramme vectoriel ou un modèle simple permettant de prédéterminer le comportement en charge du système. En effet, l'établissement du schéma équivalent et des équations du chapitre précédent ont permis d'aboutir à la loi d'évolution du couple de la MAS en fonction des paramètres de la machine et le glissement. Cette démarche est analogue à celle utilisée dans l'étude du transformateur. Cependant, il est préférable de raisonner graphiquement en construisant un diagramme vectoriel propre à la MAS dit le diagramme de cercle.

Avant de continuer, signalons que tout ce qui suit suppose que la machine est alimentée par un réseau de tension de valeur efficace fixe et de fréquence constante.

II. Construction Diagramme de cercle

Traçons le diagramme vectoriel correspondant à l'équation (VI.1) tirée du schéma équivalent simplifié de la figure V.7.

$$\left(R_s + \frac{R_r'}{g}\right) \vec{I}_r + j l'_s \omega_s \vec{I}_r = \vec{V}_s \quad (\text{VI.1})$$

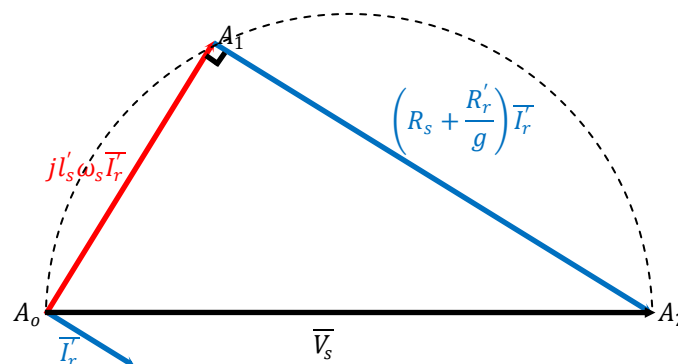


Figure VI.1 : diagramme vectoriel correspondant à l'équation VI.1.

Pour un moteur asynchrone alimenté sous tension et fréquence constantes, lorsque le glissement (la vitesse) varie, le point "A₁" correspondant à l'extrémité du vecteur $\vec{A}_0\vec{A}_1$ et caractérisant le courant rotorique se déplace selon un cercle de diamètre "A₀A₂" car les deux vecteurs $\vec{A}_0\vec{A}_1$ et $\vec{A}_1\vec{A}_2$ sont perpendiculaires quelque soit le glissement.

En divisant par " $j l'_s \omega_s$ " les deux membres de l'équation (VI.1), on retrouvera le nouveau diagramme dont les directions des vecteurs sont choisies indépendamment au premier :

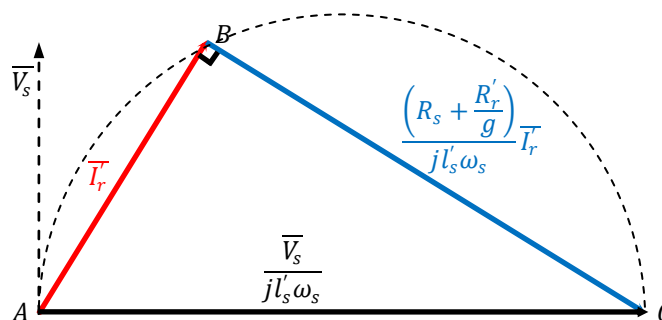


Figure VI.2 : diagramme vectoriel correspondant à l'équation VI.2.

$$\vec{I}_r + \frac{(R_s + \frac{R_r'}{g})}{j l_s' \omega_s} \vec{I}_r = \frac{\vec{V}_s}{j l_s' \omega_s} \quad (VI.2)$$

D'autre part, on a le courant magnétisant $\vec{I}_{s\mu}$ qui est d'amplitude constante (d'après le schéma équivalent simplifié) et est déphasé d'un angle proche de $\frac{\pi}{2}$. On trace ensuite la somme vectorielle de ces deux courants donnant le courant statorique absorbé par le moteur comme le montre l'équation suivante :

$$\vec{I}_s = \vec{I}_{s\mu} + \vec{I}_r \quad (VI.3)$$

Les directions des vecteurs courant sont tracées relativement à celle de la tension \vec{V}_s qui est perpendiculaire à \vec{AC} .

$$\vec{AC} = \frac{\vec{V}_s}{j l_s' \omega_s} \quad (VI.4)$$

D'où le diagramme de cercle donné par la figure VI.3.

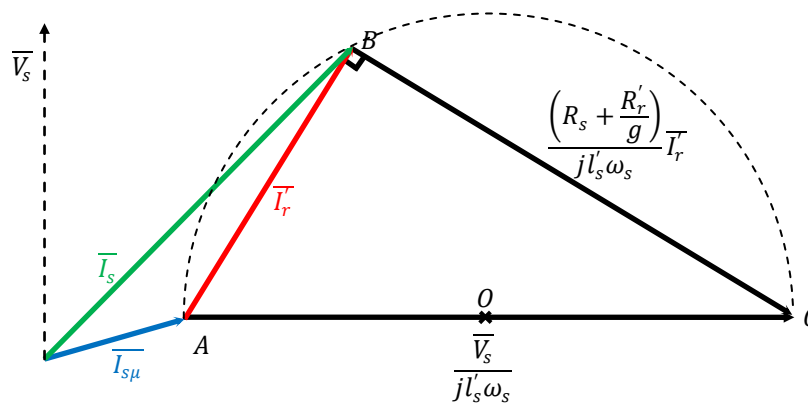


Figure VI.3 : diagramme circulaire des courants

Lorsque le glissement est nul, le courant statorique sera égale au courant magnétisant. Le point "B" est confondu avec le point "A". Lorsque le glissement augmente, le point "B" qui caractérise le point de fonctionnement se déplace selon le cercle de centre "O" situé au milieu du segment AC.

III. Représentation des puissances

III. 1. Puissances absorbées

La projection du point de fonctionnement "M" sur l'axe "OP" porté par le vecteur tension \vec{V}_s donne le point "M₁" et sur l'axe perpendiculaire "OQ" donne le point "M₂" (figure VI.4) tel que :

$$AM_1 = I_s \cos(\varphi_s) \text{ et } AM_2 = I_s \sin(\varphi_s) \quad (VI.5)$$

Ces deux grandeurs sont égales aux puissances active et réactive à $3V_s$ près comme suit :

$$P_s = 3V_s AM_1 \text{ et } Q_s = 3V_s AM_2 \quad (VI.6)$$

Ces pour cette raison que les axes "OP" et "OQ" sont dits axes de puissances active et réactive successivement.

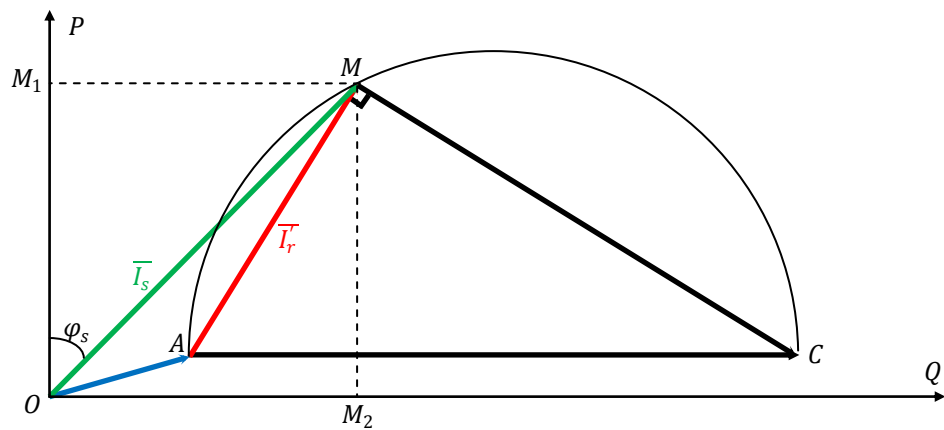


Figure VI.4 : diagramme circulaire des courants

III. 2. Pertes Joule rotoriques

Soient différents point de fonctionnement C_1, C_2, C_3 et C_4 ayant différentes valeur du courant rotorique $I'_{r1}, I'_{r2}, I'_{r3}$ et I'_{r4} et la projection de ces points selon l'axe des puissances actives donne D_1C_1, D_2C_2, D_3C_3 et D_4C_4 . Ces derniers représentent les pertes Joule rotoriques à $3V_s$ près. On montre que les points D_1, D_2, D_3 et D_4 sont alignés sur la même droite. Pour cette raison, il suffit de montrer que :

$$\frac{D_1C_1}{AC_1} = \frac{D_2C_2}{AC_2} = \frac{D_3C_3}{AC_3} = \frac{D_4C_4}{AC_4} = \text{constant}$$

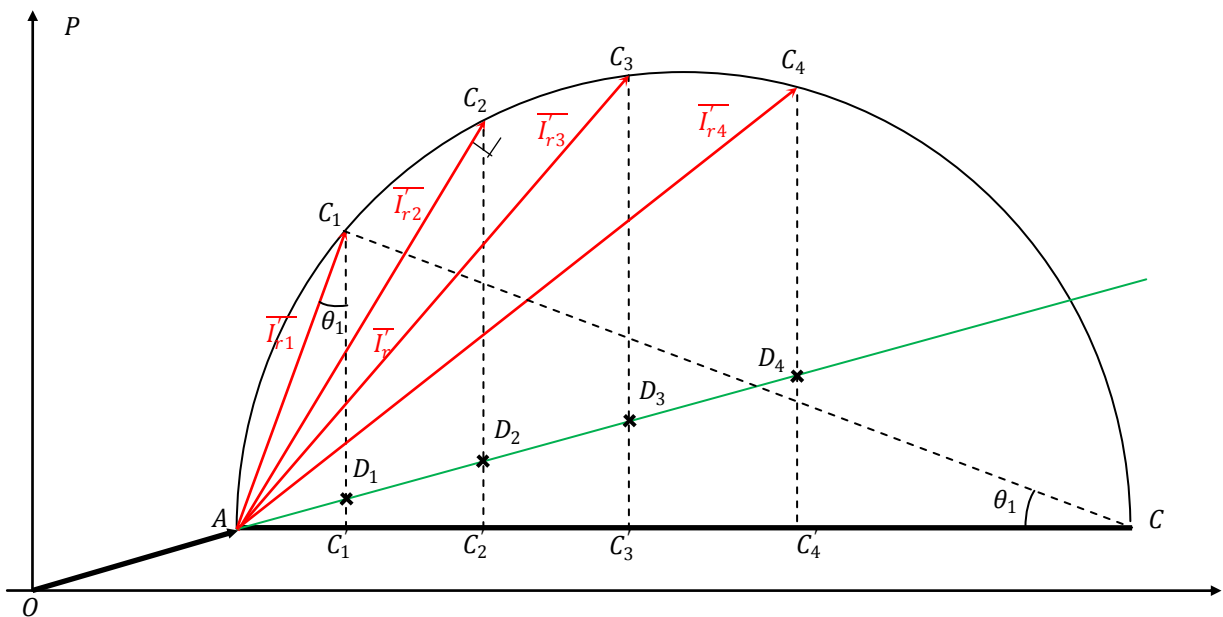


Figure VI.5 : Représentation des pertes Joule statoriques pour différents point de fonctionnement

Pour le point C_1 , on a : $p_{jr} = 3R'_r(I'_{r1})^2 = 3R'_r I'_{r1} AC \cdot \sin(\theta_1)$

Puisque les deux triangles $(AC_1C'_1)$ et (ACC_1) sont semblables, on a :

$$AC'_1 = I'_{r1} \cdot \sin(\theta_1)$$

D'où

$$p_{jr} = 3R'_r \cdot AC \cdot AC'_1$$

Les pertes Joule rotoriques correspondent à $3V_s$ près à C'_1D_1 tel que :

$$p_{jr} = 3V_s \cdot C'_1D_1$$

Ainsi :

$$\frac{D_1C'_1}{AC'_1} = \frac{\frac{p_{jr}}{3V_s}}{\frac{p_{jr}}{3R'_r \cdot AC}} = \frac{AC \cdot R'_r}{V_s}$$

Avec $AC = \frac{V_s}{l'_s \omega_s}$ d'où

$$\frac{D_1C'_1}{AC'_1} = \frac{R'_r}{l'_s \omega_s} \tag{VI.7}$$

Ce quotient ne dépend pas du glissement. Il est fonction uniquement des paramètres internes de la machine. Le calcul des autres quotients correspondants aux autres points de fonctionnement mène au même résultat. Ainsi, les points D_1, D_2, D_3 et D_4 sont alignés sur la même droite qui est dite la droite des pertes Joule rotoriques.

III. 3. Pertes Joule statoriques

Les points correspondants aux pertes Joule statoriques ne forment pas une droite, car le vecteur courant \bar{I}_s ne part pas du point "A" mais du point "O". Cependant, on accepte cette approximation car les pertes dues au courant de la branche magnétisante $\bar{I}_{s\mu}$ devant celle du courant \bar{I}_s sont négligeables.

Similairement aux pertes Joule rotoriques, on donne donc la pente de la droite des pertes Joule statoriques par :

$$tg(\alpha) = \frac{R'_r + R_s}{l'_s \omega_s} \text{ et } tg(\beta) = \frac{R_s}{l'_s \omega_s} \tag{VI.8}$$

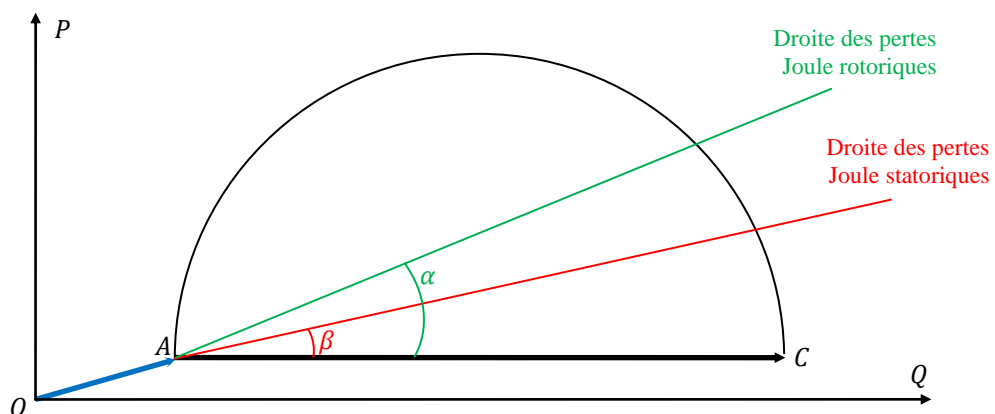


Figure VI.6 : Représentation des droites des pertes Joule statoriques et rotoriques

IV. Points particuliers du diagramme

Lorsque le glissement varie, le point de fonctionnement se déplace entre les points "A" et "C" selon le cercle ayant le centre au milieu du segment "AC" passant par des points particuliers du diagramme.

IV. 1. Points particuliers théoriques

IV. 1. 1. Point à glissement nul M_0

A un glissement nul, le courant absorbé par le moteur asynchrone n'est que le courant de la branche magnétisante, car l'impédance $(R_s + \frac{R'_r}{g} + j l'_s \omega_s)$ en aval de la branche magnétisante est infinie. Le point de fonctionnement " M_0 " à $g = 0$ est confondu avec le point "A" tel que :

$$\overline{I_{s0}} = \overline{I_{s\mu}} \Leftrightarrow \overline{OA} = \overline{OM_0}$$

Les puissances absorbées pour ce point de fonctionnement peuvent être déduites par la projection sur les axes de puissances active et réactive.

La composante active du courant magnétisant donne les pertes dans le fer à $3V_s$ près.

$$OM'_0 = I_{s\mu a} = I_{s\mu} \cos(\varphi_{s\mu}) = \frac{p_{fer}}{3V_s} \quad (VI.9)$$

$$p_{fer} = 3V_s I_{s\mu} \cos(\varphi_{s\mu}) = 3R_\mu (I_{s\mu a})^2 = 3 \frac{V_s^2}{R_\mu} \quad (VI.10)$$

La composante réactive du courant magnétisant donne la puissance magnétisante à $3V_s$ près.

$$OM''_0 = I_{s\mu r} = I_{s\mu} \sin(\varphi_{s\mu}) = \frac{Q_m}{3V_s} \quad (VI.11)$$

$$Q_m = 3V_s I_{s\mu} \sin(\varphi_{s\mu}) = 3X_\mu (I_{s\mu r})^2 = 3 \frac{V_s^2}{X_\mu} \quad (VI.12)$$

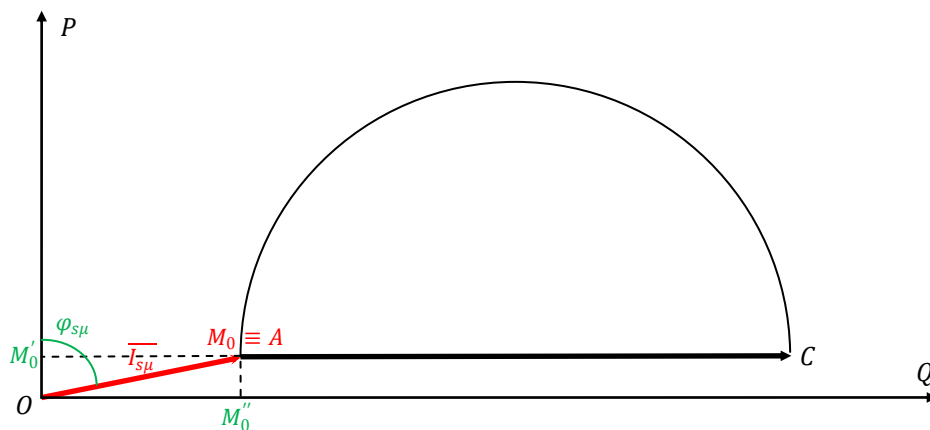


Figure VI.7 : Représentation du point à glissement nul

IV. 1. 2. Point à glissement infini M_∞

C'est un point purement théorique dont le moteur tourne dans le sens inverse du champ tournant avec une très grande vitesse. A un glissement infini, la puissance absorbée par le moteur asynchrone n'est que les pertes Joule au stator en plus des pertes dans le fer, car la

résistance " $\frac{R_r'}{g}$ " qui est en aval de la branche magnétisante est nulle. Le point de fonctionnement " M_∞ " à $g = \infty$ est un point de l'axe de pertes Joule statoriques. On déduit donc que l'axe (AM_∞) est l'axe des pertes Joule statoriques.

La composante active du courant en ce point de fonctionnement doit donner la somme des pertes dans le fer et les pertes Joule au stator à $3V_s$ près.

$$OM'_{\infty r} = I_{s\infty r} = I_{s\infty} \sin(\varphi_{s\infty}) = OM''_{\infty} \quad (VI.13)$$

avec

$$M_\infty M''_{\infty} = I_{s\infty a} = I_{s\infty} \cos(\varphi_{s\infty}) = \frac{p_{fer} + p_{js}}{3V_s} \quad (VI.14)$$

et $p_{js} = 3R_s(I_{s\infty})^2$

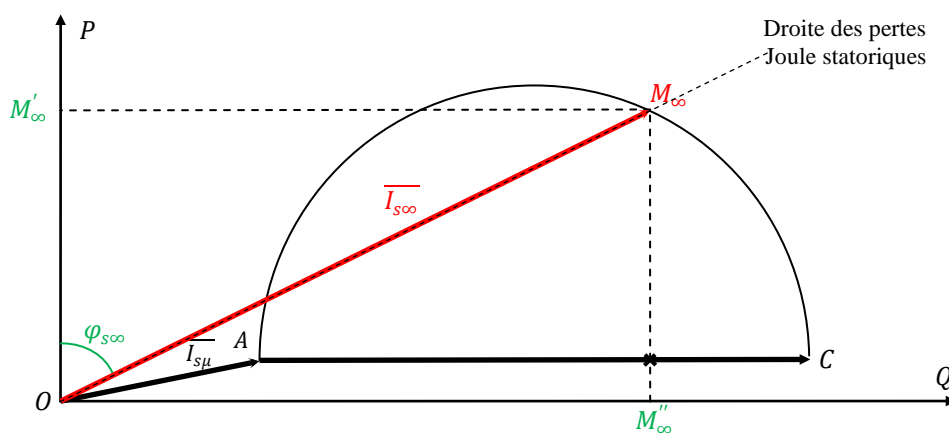


Figure VI.8 : Représentation du point à glissement infini

IV. 2. Points particuliers pratiques

IV. 2. 1. Point de fonctionnement à vide M_v

En marche à vide, le moteur absorbe un courant $\overline{I_{sv}}$ qui diffère que très peu du courant de fonctionnement à glissement nul. La composante réactive du courant $\overline{I_{sv}}$ est supposée la même. Seule la composante active qui est relativement plus importante. Outre les pertes dans le fer, le moteur absorbe un courant pour compenser les pertes mécaniques. Les pertes Joule statoriques et rotoriques sont pratiquement négligeables.

La composante réactive du courant à vide donne la puissance magnétisante à $3V_s$ près.

$$OM''_v = OM'_0 = I_{svr} = I_{sv} \sin(\varphi_{sv}) = \frac{Q_m}{3V_s} \quad (VI.15)$$

La composante active du courant à vide donne les pertes dans le fer plus les pertes mécaniques à $3V_s$ près.

$$OM'_v = I_{sva} = I_{sv} \cos(\varphi_{sv}) = \frac{p_{fer} + p_{mec}}{3V_s} = OM'_0 + M'_0 M'_v$$

Avec

$$M'_0 M'_v = \frac{p_{mec}}{3V_s} \quad (VI.16)$$

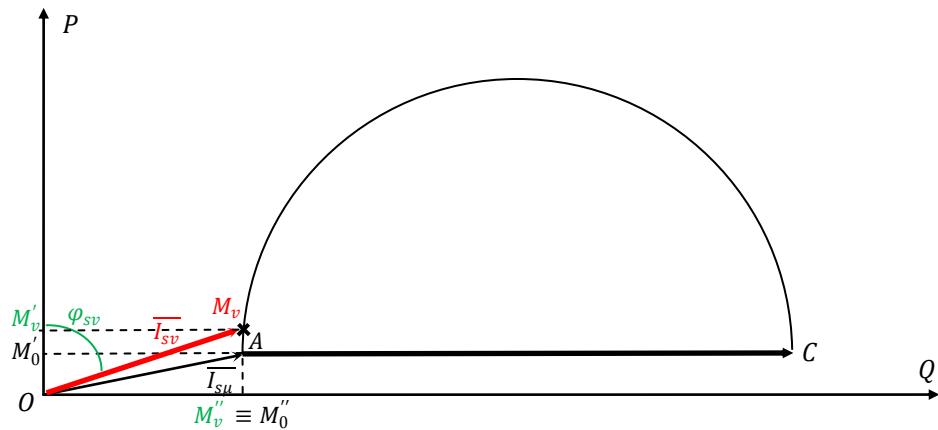


Figure VI.9 : Représentation du point de fonctionnement à vide

IV. 2. 2. Point de fonctionnement à rotor calé M_c

En marche à rotor calé (bloqué), le moteur asynchrone se comporte exactement comme un transformateur à secondaire en court-circuit. Le moteur absorbe en plus des pertes totales au stator (les pertes dans le fer et les pertes Joule au stator), une puissance qui se transforme totalement en pertes Joule au rotor ($P'_s = p_{jr}$). La composante active du courant $\overline{I_{sc}}$ représente la somme de ces pertes à $3V_s$ près.

La composante active du courant statorique à rotor calé est :

$$OM'_c = I_{sca} = I_{sc} \cos(\varphi_{sc}) = \frac{p_{fer} + p_{js} + p_{jr}}{3V_s} = OM'_0 + M'_0 M''_c + M''_c M'_c$$

Avec

$$OM'_0 = \frac{p_{fer}}{3V_s}, \quad M'_0 M''_c = \frac{p_{js}}{3V_s}, \quad M''_c M'_c = \frac{p_{jr}}{3V_s} \tag{VI.17}$$

Puisque le point M_c du cercle caractérise les pertes Joule au rotor, la droite (OM_c) est la droite des pertes Joule rotorique.

Le couple de démarrage est déduit directement du diagramme de cercle comme suit :

$$\Gamma_d = \frac{p_{jr}}{\Omega_s} = \frac{3V_s M''_c M'_c}{\Omega_s} \tag{VI.18}$$

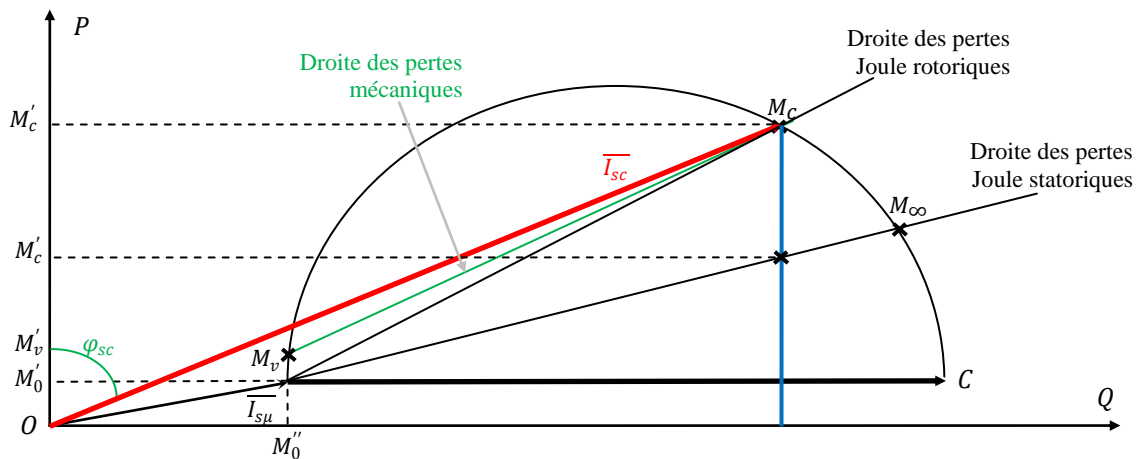


Figure VI.10 : Représentation du point de fonctionnement à rotor calé

Similairement aux pertes Joule statoriques et rotoriques, on peut faire une approximation en supposant que les pertes mécaniques forment aussi une droite qui passe par les points M_v et M_c et est dite la droite des pertes mécaniques (figure VI.10).

IV. 3. Points de fonctionnement quelconques

Un de point de fonctionnement quelconque "M" est caractérisé par une puissance active égale à la somme de la puissance utile augmentée des différentes pertes, à savoir les pertes Joule statoriques, les pertes dans le fer, les pertes Joule rotoriques et les pertes mécaniques.

La composante active du courant statorique pour un point de fonctionnement quelconque est :

$$\begin{aligned} OM' = M_0M &= I_{sa} = I_s \cos(\varphi_s) = \frac{p_{fer} + p_{js} + p_{jr} + p_{mec} + P_u}{3V_s} \\ &= M_0M_1 + M_1M_2 + M_2M_3 + M_3M_4 + M_4M \end{aligned} \quad (VI.19)$$

Tel que la projection du point de fonctionnement M sur l'axe de puissance réactive:

- donne le point M_0
- coupe le diagonal du cercle (AC) au point M_1
- coupe la droite des pertes Joule statoriques au point M_2
- coupe la droite des pertes Joule rotoriques au point M_3
- coupe la droite des pertes mécaniques au point M_4

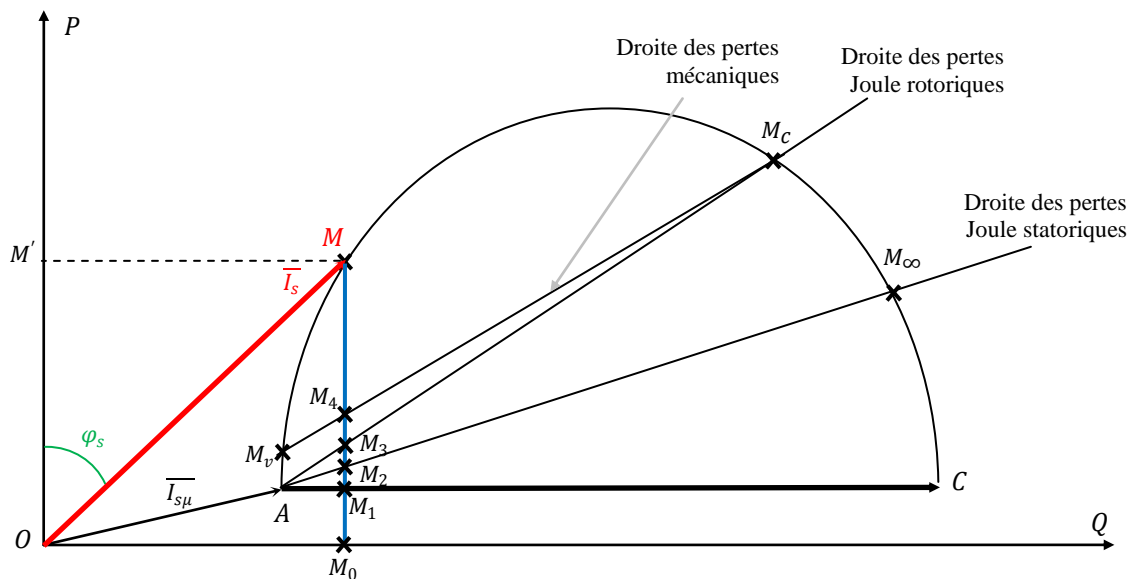


Figure VI.11 : Représentation d'un point de fonctionnement quelconque

Lorsqu'on réussit à tracer le diagramme de cercle, on peut lire tous les grandeurs caractérisant le moteur asynchrone depuis ce diagramme comme suit:

- Les pertes dans le fer : $p_{fer} = 3V_s \cdot M_0M_1$
- Les pertes Joule au stator : $p_{js} = 3V_s \cdot M_1M_2$
- Les pertes Joule au rotor : $p_{jr} = 3V_s \cdot M_2M_3$
- Les pertes mécaniques : $p_{mec} = 3V_s \cdot M_3M_4$
- La puissance utile : $P_u = 3V_s \cdot M_4M$
- La puissance absorbée : $P_s = 3V_s \cdot M_0M$

- les pertes totales au stator : $p_{js} = 3V_s \cdot M_0 M_2$
- la puissance transmise au rotor : $P'_s = 3V_s \cdot M_2 M$
- la puissance mécanique : $P_{mec} = 3V_s \cdot M_3 M$
- le couple mécanique : $\Gamma_{mec} = 3V_s \cdot M_2 M / \Omega_s$
- le glissement : $g = M_2 M_3 / M_2 M$
- le rendement : $\eta = M_4 M / M_0 M$

Remarques

- La droite (AM_∞) est dite aussi la droite des couples mécaniques car la distance $M_2 M$ donne à $3V_s / \Omega_s$ près le couple mécanique.
- La droite ($M_v M_\infty$) est dite la droite des puissances utiles car la distance $M_4 M$ donne à $3V_s$ près la puissance utile.
- Le point de fonctionnement à couple maximum est déterminé par le tangent du cercle parallèle à l'axe (AM_∞).
- Le point de fonctionnement à puissance utile maximum est déterminé par le tangent du cercle parallèle à l'axe ($M_v M_\infty$).
- La puissance utile passe par son maximum pour un glissement légèrement supérieur à celui donnant le couple maximum.

IV. 4. Lecture du glissement

Proche de la zone du fonctionnement nominale, les différentes pertes sont réduites et les points M_1 , M_2 , M_3 et M_4 sont très proches l'un de l'autre. Ceci rend la lecture de quelques pertes difficile et imprécise en particulier la lecture du glissement qui doit être très précise. Nous montrons donc une autre méthode utilisant une échelle commode de lecture.

Si on joint un point "N" quelconque du cercle au point "A" et "M". Ensuite, on trace le parallèle à ($M_\infty N$) passant par " M_c ", il coupe l'axe (NM) au point "K" et l'axe (NA) au point "K'". Le glissement peut être donné par :

$$g = \frac{KK'}{M_c K'} \quad (\text{VI.20})$$

Normalement, on :

$$g = \frac{D_1 D'_1}{D_1 M} \quad (\text{VI.21})$$

Les triangles (AMD_1) et (NKK') sont semblables car :

- L'angle $\widehat{MAD}_1 = \widehat{K'KN}$ car :

$$(\widehat{K'KN} = \widehat{KNM_\infty}) \text{ angles alternés internes}$$

$$\text{et } (\widehat{KNM_\infty} = \widehat{M_\infty AM}) \text{ elle sous-tendent la même corde } M_\infty M$$

- L'angle $\widehat{AMD}_1 = \widehat{K'NK}$ car :

$$(\widehat{AMD}_1 = \widehat{MCA}) ; \text{ les triangles } (AMD) \text{ et } (ACM) \text{ sont semblables}$$

$$\text{et } (\widehat{MCA} = \widehat{KNK'}) ; \text{ elle sous-tendent la même corde } AM$$

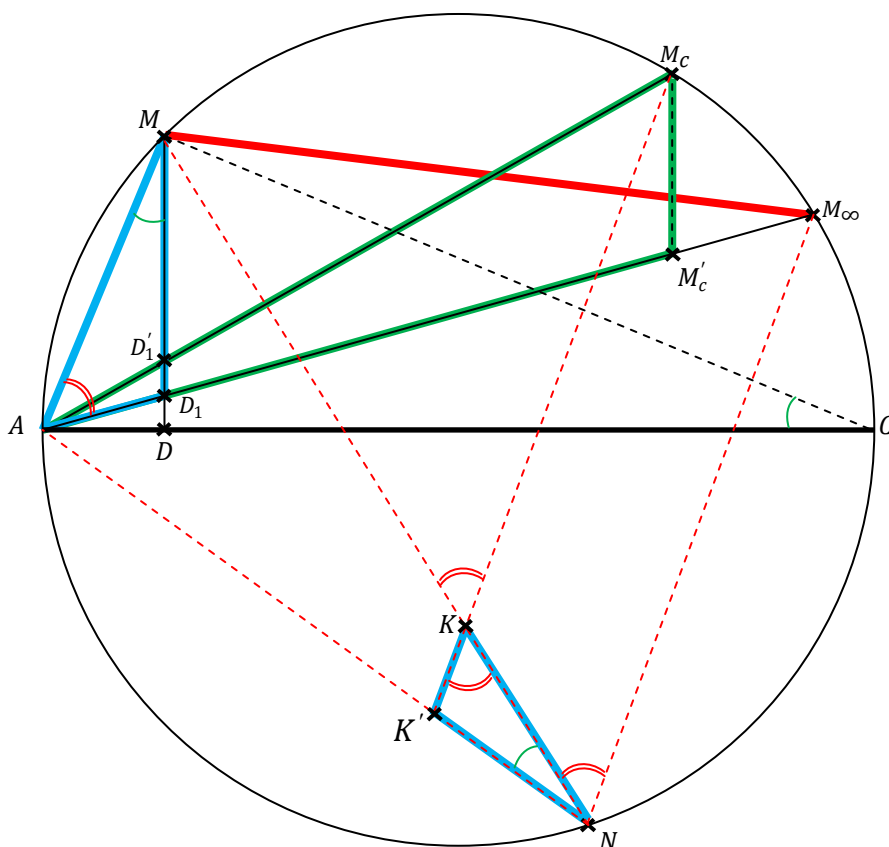


Figure VI.12 : Représentation d'une nouvelle méthode pour la lecture du glissement

D'où,

$$\frac{D_1M}{D_1A} = \frac{K'N}{K'K}$$

Donc,

$$g = \frac{D_1D_1'}{D_1M} = \frac{D_1D_1' \cdot K'K}{D_1A \cdot K'N}$$

Au point "M_c", le glissement $g = 1$ et les points "K" et "D'₁" sont confondus avec le point "M_c" et le point "D₁" est confondu avec le point "M'_c", ce qui donne :

$$1 = \frac{M'_cM_c \cdot K'M_c}{M'_cA \cdot K'N}$$

Ensuite, si on calcule $g = \frac{g}{1}$, on trouve ;

$$g = \frac{K'K}{K'M_c} \cdot \frac{D_1D_1' \cdot M'_cA}{D_1A \cdot M'_cM_c}$$

Puisque les deux triangles (AD₁D'₁) et (AM'_cM_c) sont semblables, on peut écrire que :

$$\frac{D_1D_1'}{D_1A} = \frac{M'_cM_c}{AM'_c} \Rightarrow \frac{D_1D_1' \cdot M'_cA}{D_1A \cdot M'_cM_c} = 1$$

Effectivement, le glissement peut être donné par : $g = \frac{KK'}{M_cK'}$

IV. 5. Echelle du glissement

Si le point "N" est choisi sur le point " M_∞ ", le parallèle de la tangente du cercle au point " M_∞ " et passant par le point " M_c " coupe l'axe ($M_\infty M$) au point "K" et l'axe ($M_\infty A$) au point "K'" donnant le glissement $g = \frac{KK'}{M_c K'}$

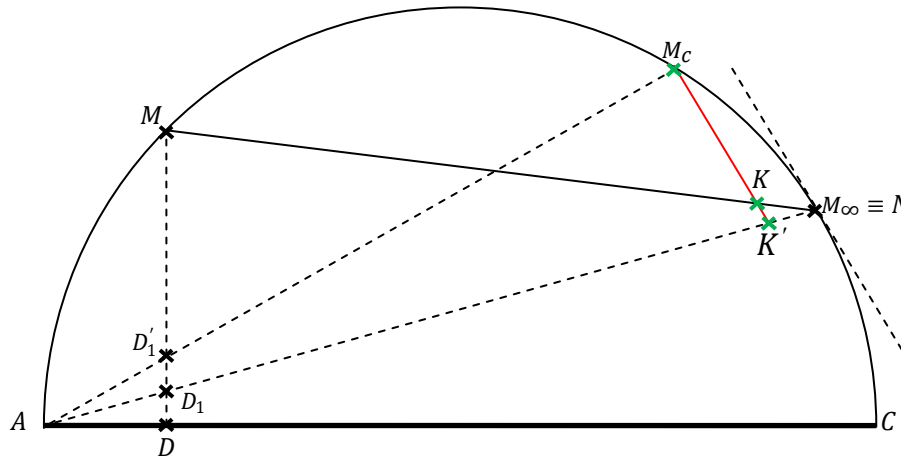


Figure VI.13 : Présentation de la première étape pour la nouvelle échelle de lecture du glissement

On prolonge l'axe ($M_\infty A$) à gauche du diagramme. Le parallèle à la tangente du cercle au point " M_∞ " coupe l'axe ($M_\infty A$) au point "O" formant l'échelle de glissement de sorte que:

- L'axe ($M_\infty M$) coupe l'échelle de glissement au point " G_1 "
- L'axe ($M_\infty M_c$) coupe l'échelle de glissement au point " G_2 "

Donnant le glissement ainsi:

$$g = \frac{O'G_1}{O'G_2}$$

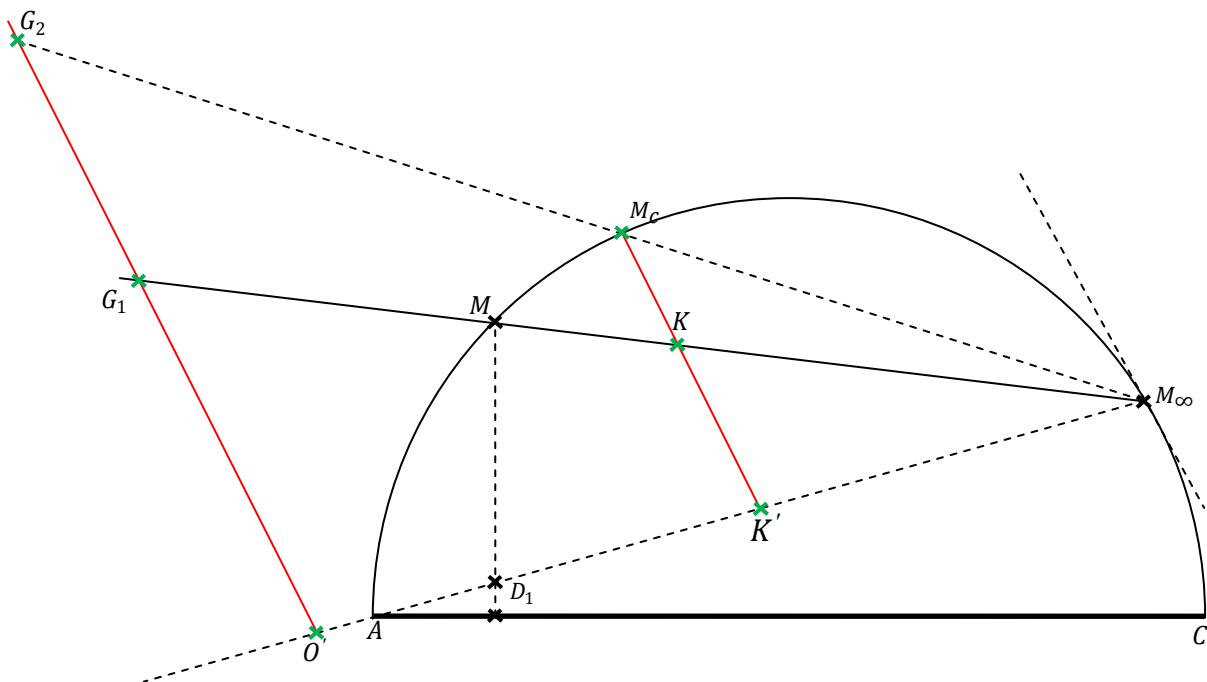


Figure VI.14 : Présentation de la deuxième étape pour la nouvelle échelle de lecture du glissement

En pratique, le point "G₂" est très loin du diagramme car le point "M_c" est proche du point "M_∞". Ceci rend cette méthode de lecture n'est pas pratique. La méthode utilisée en pratique est de prendre le point M_c' de sorte que :

$$K'M_c'' = \frac{K'M_c}{10} \tag{VI.22}$$

Enfin, l'axe (M_∞M_c'') coupe l'échelle de glissement au point "G₂'" donnant ainsi le glissement à 10% près.

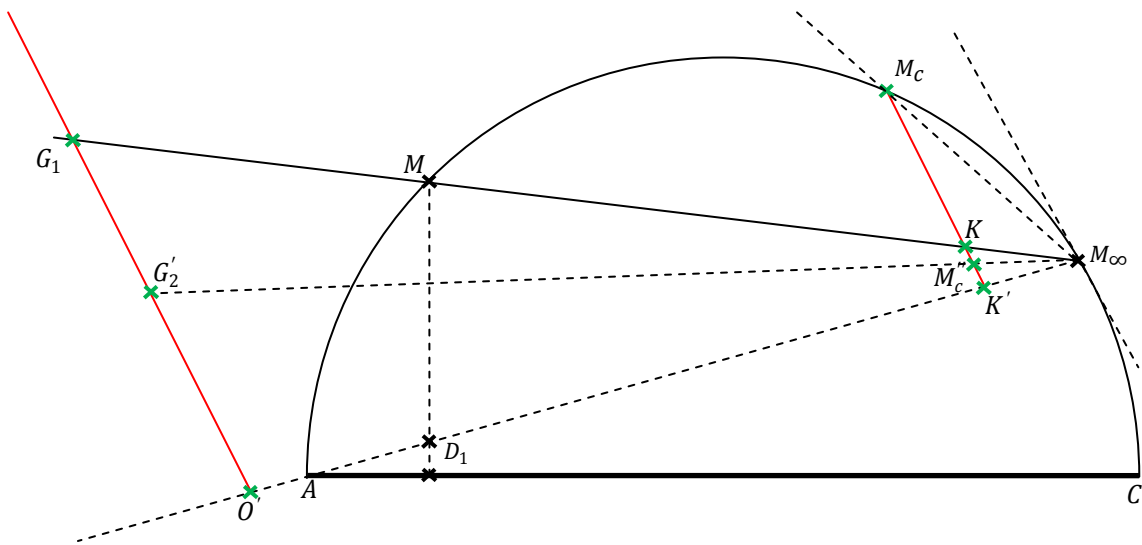


Figure VI.15 : Présentation de l'échelle commode pour la lecture du glissement

V. Caractéristiques du moteur asynchrone

L'utilisation du diagramme de cercle permet de compléter les observations faites à partir des relations déduites du schéma équivalent.

La puissance utile est nulle à vide ($g \cong 0$), Elle croit lorsque le glissement croit et passe par un maximum, puis elle diminue pour s'annuler à nouveau quand le glissement sera égale à 1. Ceci montre que la caractéristique du MAS possède deux parties (figure VI.16).

La première partie qui est **stable** (trait continue) située entre le point de fonctionnement à vide et le point de fonctionnement à puissance maximum. La deuxième partie qui est **instable** (trait discontinue) située entre le point de fonctionnement à puissance maximum et le point de fonctionnement à rotor bloqué. En pratique, si la puissance mécanique demandée par la charge augmente, le MAS est prêt pour développer cette puissance. Au-delà de la puissance maximum, le moteur n'est pas prêt pour développer une telle puissance, donc, il est freiné pour ensuite s'arrêter.

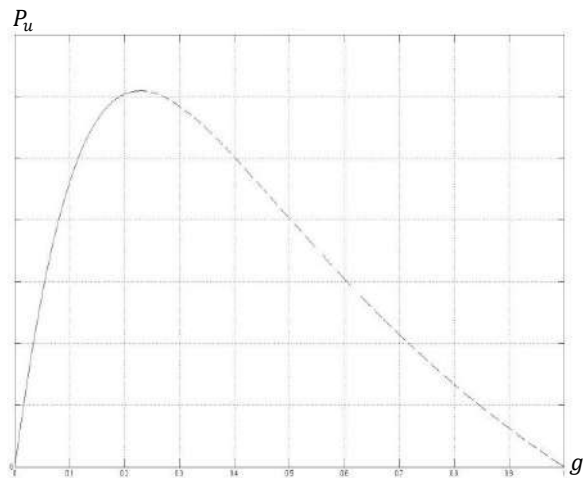


Figure VI.16. Caractéristiques de la puissance utile en fonction du glissement

En pratique le moteur n'est utilisé que dans sa partie de fonctionnement stable.

V. 1. Le courant absorbé

Le courant statorique part d'une valeur non nul (courant de la branche magnétisante " $I_{s\mu}$ "). Il augmente au fur et à mesure que la puissance utile augmente jusqu'à la puissance utile maximum. Si la puissance demandée continue à croître même si la puissance utile diminue, le courant absorbé augmente aussi en même temps que la vitesse diminue (zone d'instabilité). En pratique on doit couper l'alimentation pour éviter la détérioration du moteur.

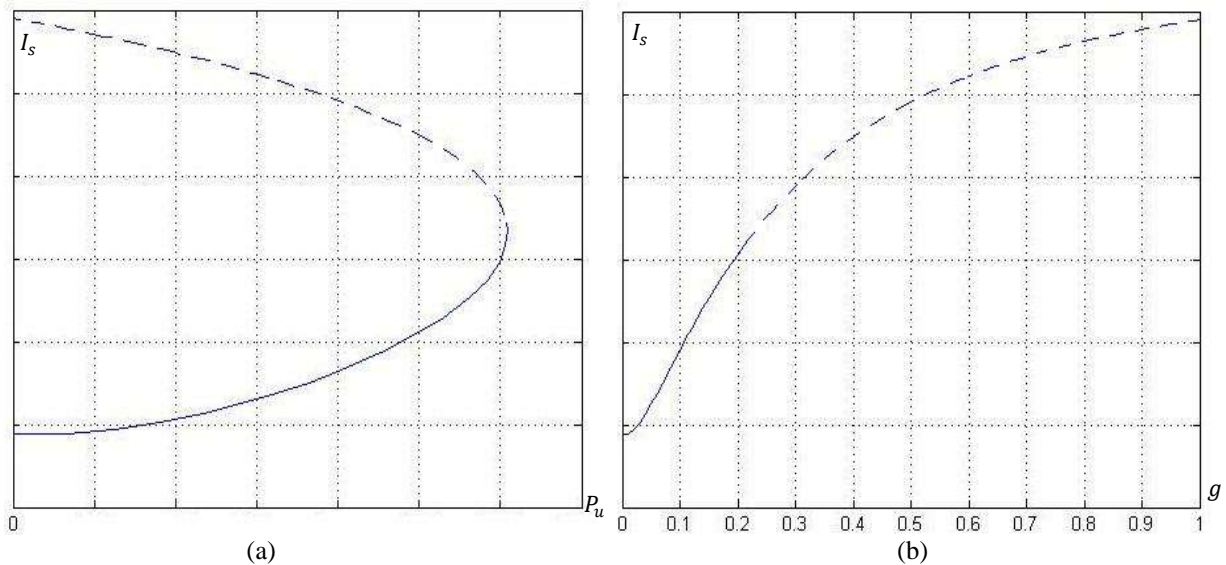


Figure VI.17. Caractéristiques du courant absorbé au stator
(a) en fonction de la puissance utile (b) en fonction du glissement

V. 2. Le facteur de puissance

A vide, le facteur de puissance est faible. Il augmente rapidement au fur et à mesure que la puissance augmente. Il passe par son maximum à un faible glissement quand le vecteur de courant statorique est tangent au cercle (au voisinage du point de fonctionnement nominal). Ensuite, il diminue pour revenir à une valeur assez faible à l'arrêt.

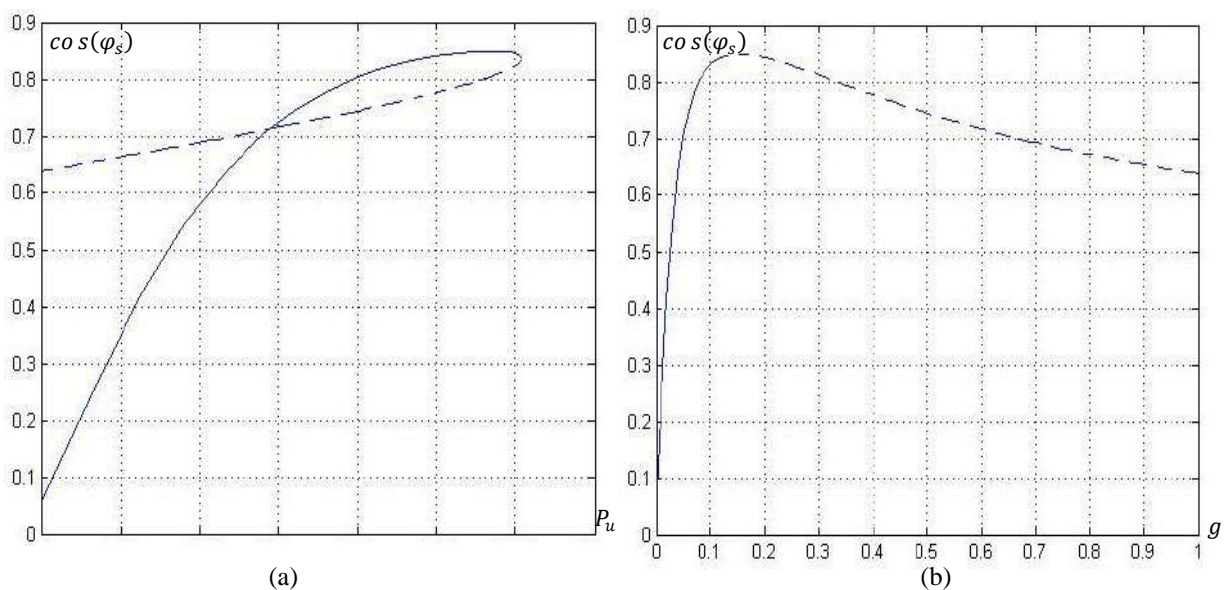


Figure VI.18. Caractéristiques du facteur de puissance
(a) en fonction de la puissance utile (b) en fonction du glissement

V. 3. Le couple électromagnétique

Il est nul à glissement nul. Ensuite, il augmente proportionnellement en fonction de la puissance utile, surtout proche de la zone de fonctionnement nominale. Puis il s'incurve pour passer par son maximum lorsque le tangent du cercle est parallèle à l'axe des couples. Si la puissance demandée continue à croître même si la puissance utile diminue, le couple diminue jusqu'à atteindre sa valeur au démarrage.

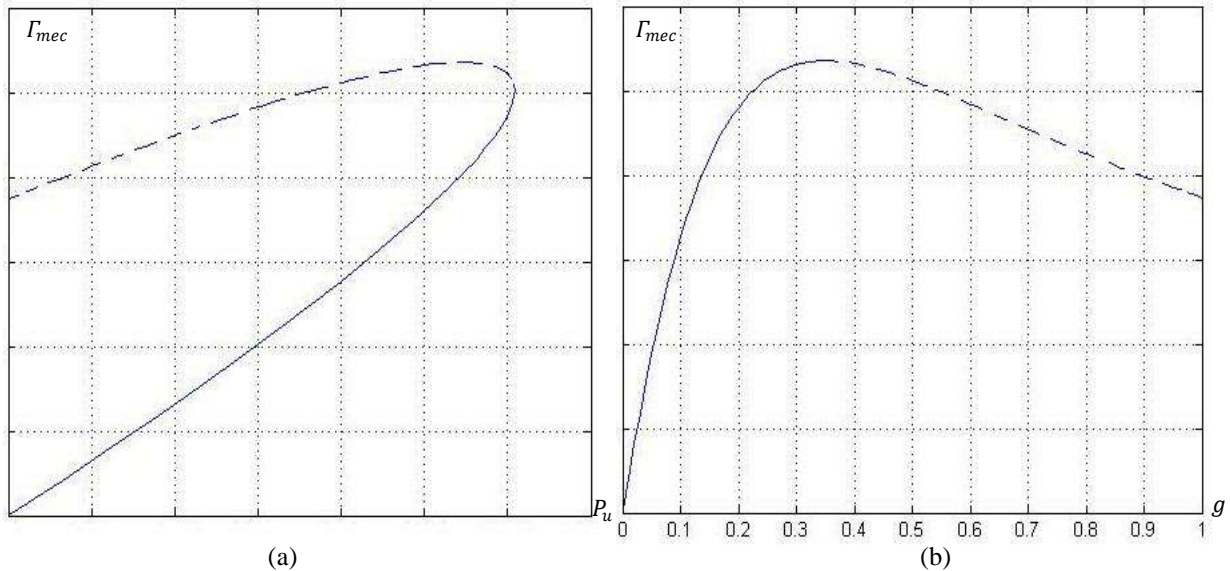


Figure VI.19. Caractéristiques du couple électromagnétique
(a) en fonction de la puissance utile (b) en fonction du glissement

V. 4. Le rendement

Le rendement part d'une valeur nulle et croît en fonction de la puissance utile. Il a un maximum au voisinage du point de fonctionnement nominal (à un glissement faible). Il diminue ensuite pour s'annuler en fonctionnement à rotor bloqué. Le rendement est d'autant meilleur que le moteur est refroidi efficacement.

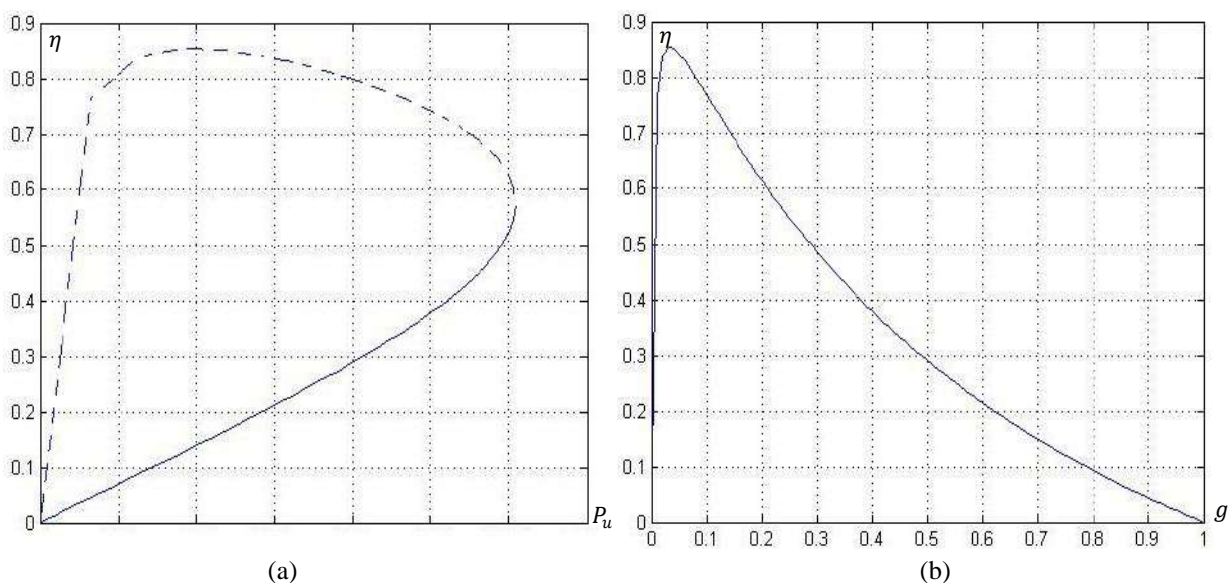


Figure VI.20. Caractéristiques du facteur de puissance
(a) en fonction de la puissance utile (b) en fonction du glissement

VI. Modification des caractéristiques du moteur asynchrone

On peut modifier les caractéristiques du moteur asynchrone par action sur :

- La résistance de l'enroulement du rotor
- La valeur efficace de la tension d'alimentation du moteur
- La fréquence de la tension d'alimentation du moteur

VI. 1. Action sur la résistance rotorique

La mise en série d'une résistance " R_h " avec la résistance de l'enroulement du rotor ne modifie ni le courant magnétisant (donc le point "A" reste inchangé), ni le point à glissement infini (la droite des pertes Joule statoriques). Ceci montre que le cercle reste aussi inchangé. Seul, le point à rotor calé qui caractérise les pertes Joule rotoriques est changé.

A glissement unitaire, si pour " R_r ", les pertes Joule rotoriques étaient " $M_c M_c'$ " correspondant à " $3R_r'(I_r')^2$ ", pour " $R_r' + R_h$ ", les pertes Joule rotoriques seraient " $M_{ch} M_{ch}'$ " correspondant à " $3(R_r' + R_h)(I_{rh}')^2$ ". Le courant rotorique (et par conséquent le courant statorique) se réduit et le point " M_{ch} " doit être du cercle donc se rapproche du point de fonctionnement nominal.

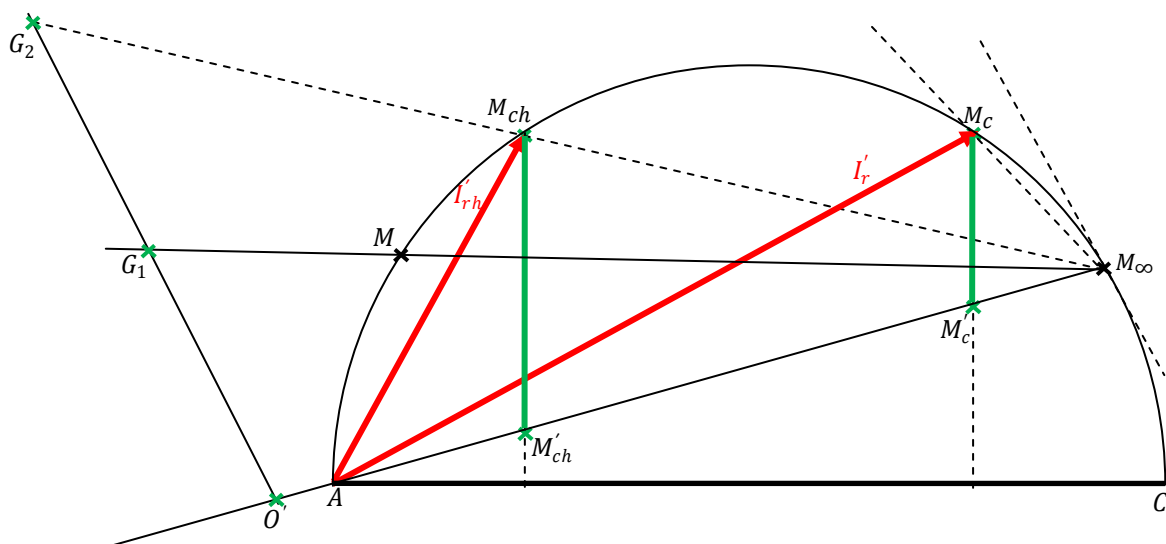


Figure VI.21 : Diagramme de cercle à résistance rotorique modifiée

L'échelle de glissement se resserre, car le point " G_2 " se rapproche du point " G_1 ". Cette échelle se resserre plus d'autant que la résistance du rhéostat rotorique est plus importante.

A un couple mécanique constant, le glissement est proportionnel à la résistance du rhéostat rotorique car :

$$g = \frac{p_{jr}}{P_s'} = \frac{3R_r'(I_r')^2}{P_s'} \quad (\text{VI.23})$$

Le courant rotorique " I_r' " et la puissance transmise au rotor " P_s' " restent inchangés pour le même couple mécanique.

Pour un glissement g_1 correspondant à une résistance rotorique R_r' et un glissement g_2 correspondant à une résistance rotorique $R_r' + R_h$, on aura :

$$\frac{g_1}{g_2} = \frac{R_r'}{R_r' + R_h} \tag{VI.24}$$

VI. 2. Action sur la valeur efficace de la tension du stator

Le moteur asynchrone possède pour un glissement donné, une impédance correspondante. Si la valeur efficace de la tension du stator se réduit de " V_{s1} " à " V_{s2} ", le diagramme de cercle sera réduit du rapport " $\frac{V_{s2}}{V_{s1}}$ ". Si on veut développer le même couple mécanique sous la tension " V_{s1} " correspondant au glissement " g_1 ", Sous la tension réduite " V_{s2} ", le glissement correspondant " g_2 " est plus grand que le glissement " g_1 " par un rapport égale au carré de l'inverse du rapport de réduction de la tension $\left(\frac{V_{s1}}{V_{s2}}\right)^2$ car :

$$\Gamma_{mec} = \frac{P_s'}{\Omega_s} = \frac{3R_r'(I_r')^2}{g\Omega_s} \tag{VI.25}$$

A couple constant, on aura :

$$\frac{(I_{r1}')^2}{g_1} = \frac{(I_{r2}')^2}{g_2} \tag{VI.26}$$

Sachant que $I_r' = \frac{g V_s}{\sqrt{(gR_s + R_r')^2 + (g l_s' \omega_s)^2}}$, on peut négliger " gR_s " et " $g l_s' \omega_s$ " devant " R_r' " en fonctionnement nominal car le glissement est très faible. Ainsi, on aura :

$$\frac{g_2}{g_1} \cong \left(\frac{V_{s1}}{V_{s2}}\right)^2 \tag{VI.27}$$

Le glissement augmente d'un rapport égal au carré du rapport de diminution des tensions.

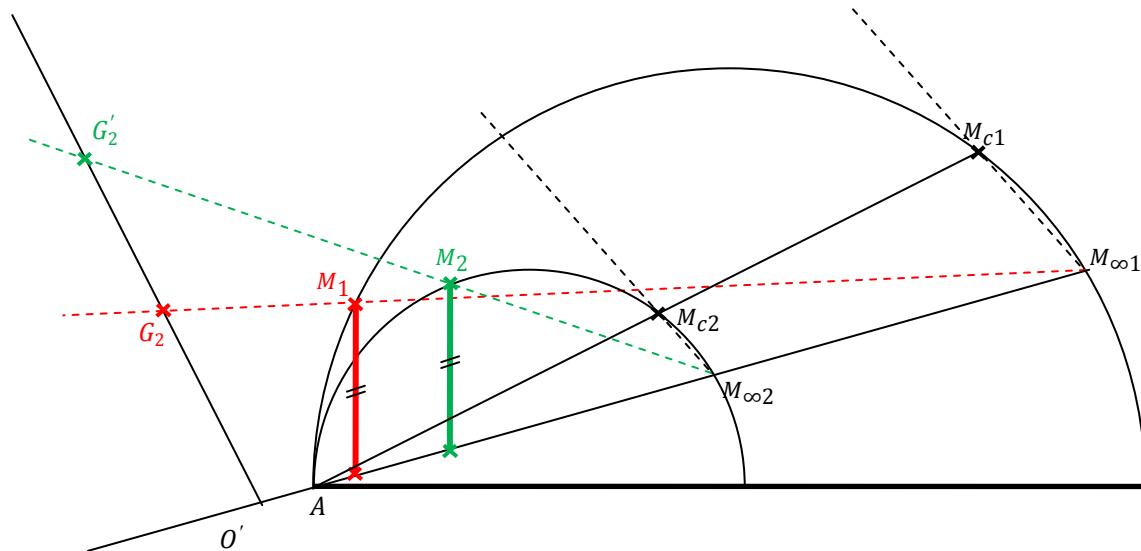


Figure VI.22 : Diagramme de cercle à tension statorique réduite.

Comme l'illustre la figure IV.22, Il est clair que l'échelle de glissement est modifiée. Pour un même couple développé, " $O'G_2$ " correspondante à la tension " V_{s1} " est plus faible que " $O'G_2'$ " correspondante à la tension " V_{s2} ".

VI. 3. Action sur la fréquence de la tension du stator

Si la valeur efficace de la tension d'alimentation reste constante alors que sa fréquence diminue de " f_{s1} " à " f_{s2} ", le diagramme s'agrandie d'un rapport $\left(\frac{f_{s1}}{f_{s2}}\right)$ égale l'inverse du rapport de diminution de la fréquence. Cet agrandissement est dû au diamètre du cercle qui est proportionnel inverse avec la pulsation (VI.4). Ainsi :

$$OA' = OA \frac{f_{s1}}{f_{s2}} ; \text{ car la réactance à vide du moteur vue de l'entrée diminue.}$$

$$A'C' = AC \frac{f_{s1}}{f_{s2}} ; \text{ car la réactance totale ramenée au primaire diminue.}$$

La pente de la droite des pertes par effet Joule statoriques s'agrandie du même rapport $\left(\frac{f_{s1}}{f_{s2}}\right)$

$$tg(\alpha') = tg(\alpha) \frac{f_{s1}}{f_{s2}} \tag{VI.28}$$

La pente de la droite des pertes par effet Joule rotoriques s'agrandie du même rapport $\left(\frac{f_{s1}}{f_{s2}}\right)$

$$tg(\beta') = tg(\beta) \frac{f_{s1}}{f_{s2}} \tag{VI.29}$$

D'où les pertes par effet Joule deviennent plus importantes ce qui diminue les performances du moteur. Une réduction importante de la fréquence d'alimentation provoque un échauffement important du moteur même à vide.

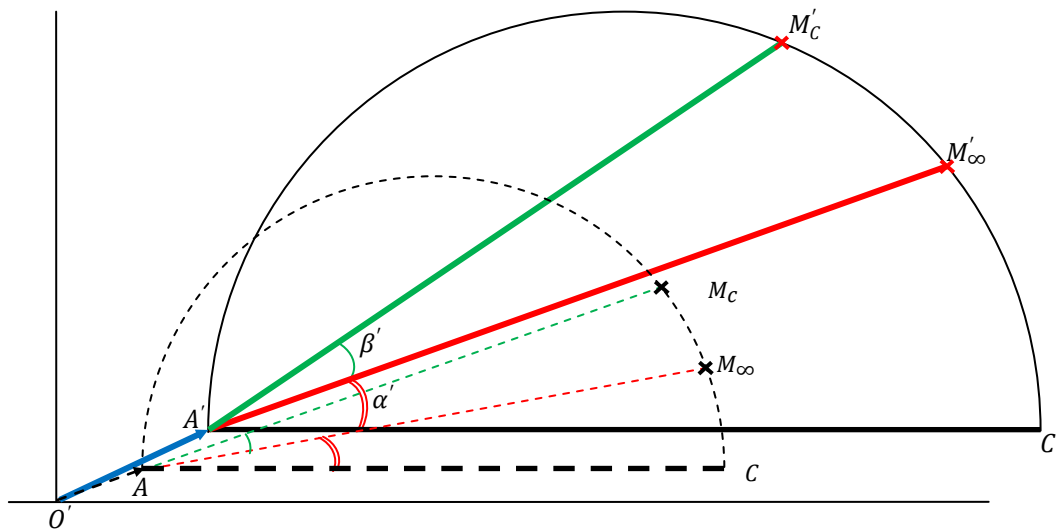


Figure VI.23 : Diagramme de cercle à tension statorique réduite.

Table des matières

I.	Introduction.....	87
II.	Construction Diagramme de cercle	87
III.	Représentation des puissances	88
III. 1.	Puissances absorbées	88
III. 2.	Pertes Joule rotoriques.....	89
III. 3.	Pertes Joule statoriques.....	90
IV.	Points particuliers du diagramme	91
IV. 1.	Points particuliers théoriques.....	91
IV. 1. 1.	Point à glissement nul	91
IV. 1. 2.	Point à glissement infini.....	91
IV. 2.	Points particuliers pratiques.....	92
IV. 2. 1.	Point de fonctionnement à vide.....	92
IV. 2. 2.	Point de fonctionnement à rotor calé	93
IV. 3.	Points de fonctionnement quelconques	94
IV. 4.	Lecture du glissement.....	95
IV. 5.	Echelle du glissement	97
V.	Caractéristiques du moteur asynchrone.....	98
V. 1.	Le courant absorbé	99
V. 2.	Le facteur de puissance	99
V. 3.	Le couple électromagnétique.....	100
V. 4.	Le rendement.....	100
VI.	Modification des caractéristiques du moteur asynchrone	101
VI. 1.	Action sur la résistance rotorique	101
VI. 2.	Action sur la valeur efficace de la tension du stator.....	102
VI. 3.	Action sur la fréquence de la tension du stator.....	103

Bibliographie

- G. Séguier, F. Notelet, "Electrotechnique industrielle", Téché et Doc, 1987.
- M. Kostenko et L. Piotrovski, "Machines Electriques : Machines à Courant Alternatif " Tome II, 3ème édition, Édition MIR, 1979.
- A. Ivanov-Smolensky, "Electrical Machines", Édition MIR, 1982.
- J.L. Dalmasso, "Cours d'électrotechnique 1 : Machines tournantes à courants alternatifs", Éditions Belin, 1985.
- A. Fouillé, "Électrotechnique à l'usage des ingénieurs : Machines électriques", Tome II, Édition Dunod, 1957.
- L. Lagron, "les Moteurs à Courants Alternatifs", Éditions Dunod, 1949.
- J. Châtelain, "Machines Electriques", Traité d'Electricité, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Éditions Georgi, 1983.

CHAPITRE VII

Essais, Démarrage et Freinage du Moteur Asynchrone

I. Introduction

Afin de trouver les paramètres du diagramme de cercle ou du schéma équivalent permettant de prédéterminer le comportement de la machine asynchrone en charge, on doit réaliser des essais à basse puissance. L'essai à vide et l'essai à rotor bloqué vont permettre de connaître les lieux de deux points particuliers et nécessaires pour tracer parfaitement le diagramme.

Lors d'un démarrage d'une machine asynchrone, le courant peut atteindre 8 fois le courant nominal de la machine. Si l'application utilise un variateur, c'est ce dernier qui se chargera d'adapter les tensions appliquées à la machine afin de limiter ce courant. En l'absence de variateur de vitesse, il existe plusieurs méthodes permettant de limiter le courant de démarrage. Elles ont été développées avant l'apparition de l'électronique de puissance mais sont encore utilisées de nos jours dans les installations anciennes ou par mesure d'économie pour des applications ne nécessitant pas de variateur en dehors du démarrage.

II. Essai à vide

Alimentée sous tension et fréquence nominales, le moteur étant à vide, on mesure la puissance à vide " P_{sv} " et le courant absorbé " I_{sv} ".

$$P_{sv} = \sqrt{3}U_s I_{sv} \cos(\varphi_{sv}) \quad (\text{VII.1})$$

D'autre part :

$$P_{sv} = p_{js} + p_{fer} + p_{jr} + p_{mec} \quad (\text{VII.2})$$

Avec :

$$p_{js} = 3R_s I_{sv}^2 \text{ et } p_{jr} = 3R'_r I'_{rv}{}^2$$

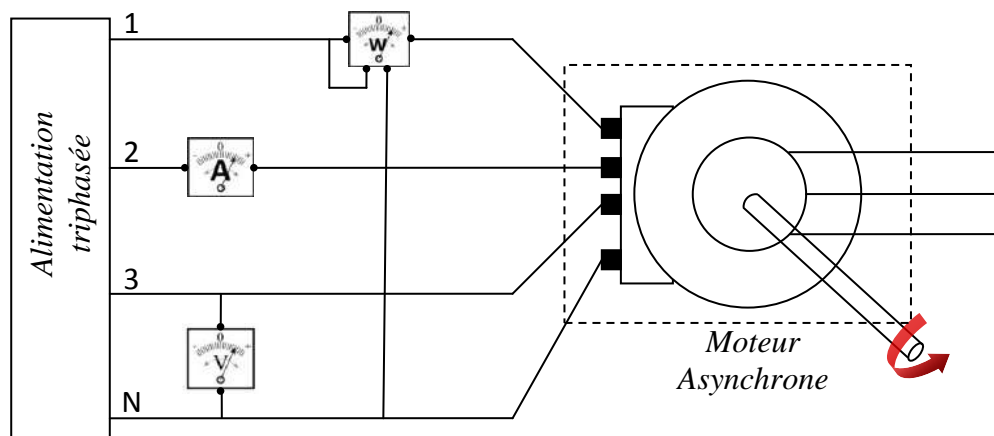


Figure VII.1 : Schéma de principe de la marche vide du moteur asynchrone.

A vide le courant statorique " I_{sv} " est faible et le courant rotorique " I'_{rv} " est plus faible que le courant statorique. En pratique, on néglige les deux pertes Joule " p_{js} " et " p_{jr} ". Cette approximation mène à conclure que la puissance absorbée à vide n'est que la somme des pertes dans le fer et les pertes mécaniques.

$$P_{sv} \cong p_{fer} + p_{mec} \quad (\text{VII.3})$$

La projection du courant statorique " I_{sv} " sur les deux axes de puissance active et réactive donne les coordonnées du point de fonctionnement " M_v " tel que :

La composante active du courant à vide donne les pertes dans le fer plus les pertes mécaniques à $3V_s$ près.

$$I_{sva} = I_{sv} \cos(\varphi_{sv}) = \frac{p_{fer} + p_{mec}}{3V_s} \tag{VII.4}$$

La composante réactive du courant à vide donne la puissance magnétisante à $3V_s$ près.

$$I_{svr} = I_{sv} \sin(\varphi_{sv}) = \frac{Q_m}{3V_s} \tag{VII.5}$$

Pour séparer les pertes mécaniques de celles dans le fer, on relève la caractéristique de variation de la somme de ces deux pertes en fonction de la tension efficace de l'alimentation. L'intersection de la courbe avec l'axe des ordonnées ($V_s = 0$) donne les pertes mécaniques car ces derniers ne dépendent pas de la tension (figure VII.2.a).

Durant l'essai, on ne peut pas réduire la tension d'alimentation au dessous d'une certaine valeur (généralement la moitié de la tension nominale), sinon la vitesse de rotation diminue remarquablement et les pertes mécaniques ne restent plus constantes. La déduction des pertes mécaniques sera par l'extrapolation graphique (Partie discontinue).

Puisque la forme de la courbe de variation de ces deux pertes est parabolique (les pertes dans le fer sont proportionnelles au carré de la tension d'alimentation), l'extrapolation rend l'erreur sur la lecture importante. On trace donc la courbe de variation de la somme des deux pertes en fonction du carré de la tension. Ceci rend la courbe une droite et facilite la déduction des pertes mécaniques (figure VII.2.b).

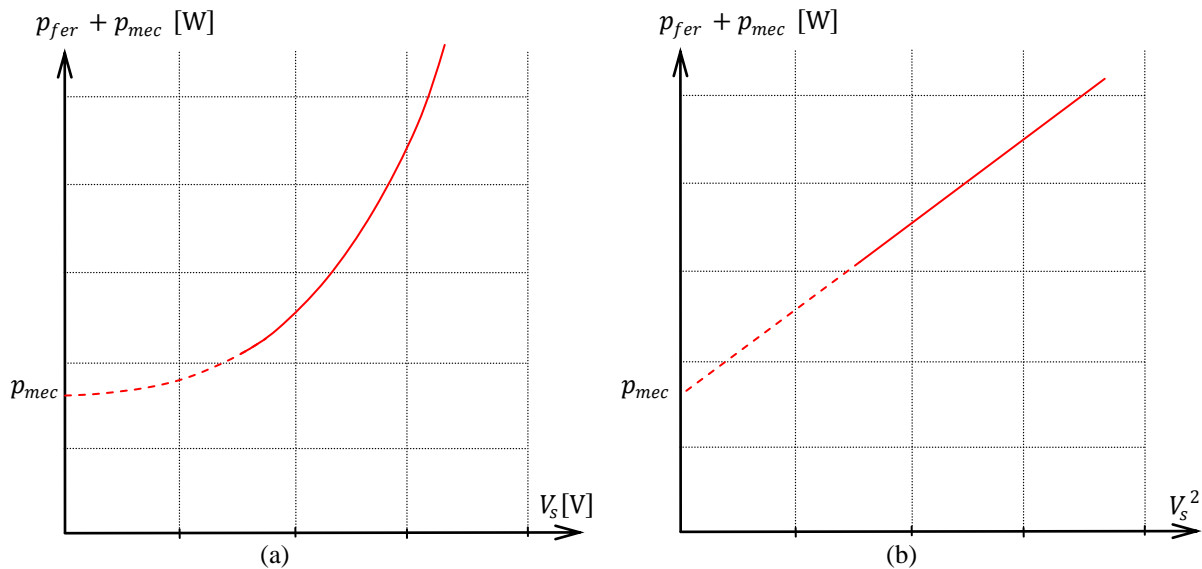


Figure VII.2 : diagramme vectoriel correspondant à l'équation VI.2.

Remarque

Pour les moteurs à rotor bobiné, on peut procéder par ouverture du circuit du secondaire. Sans que la vitesse diminue, on relève la nouvelle puissance à vide " P_{sv}^0 ". Lorsque le rotor est ouvert, le stator ne lui fournira pas la même puissance qu'à vide. Donc, la puissance absorbée n'est que les pertes dans le fer augmentées des pertes Joule statoriques qui sont négligeables.

$$P_{sv}^o = p_{js}^o + p_{fer} \cong p_{fer} \quad (VII.6)$$

D'où, la différence entre les deux puissances donne approximativement les pertes mécaniques.

$$P_{sv} - P_{sv}^o \cong p_{mec} \quad (VII.7)$$

III. Essai à rotor calé

Le rotor étant immobilisé, on alimente le moteur par une tension réduite " U'_{sc} " et la fréquence nominale de sorte qu'il absorbe un courant " I'_{sc} " proche du courant nominal. On relève ensuite la puissance absorbée correspondante " P'_{sc} ".

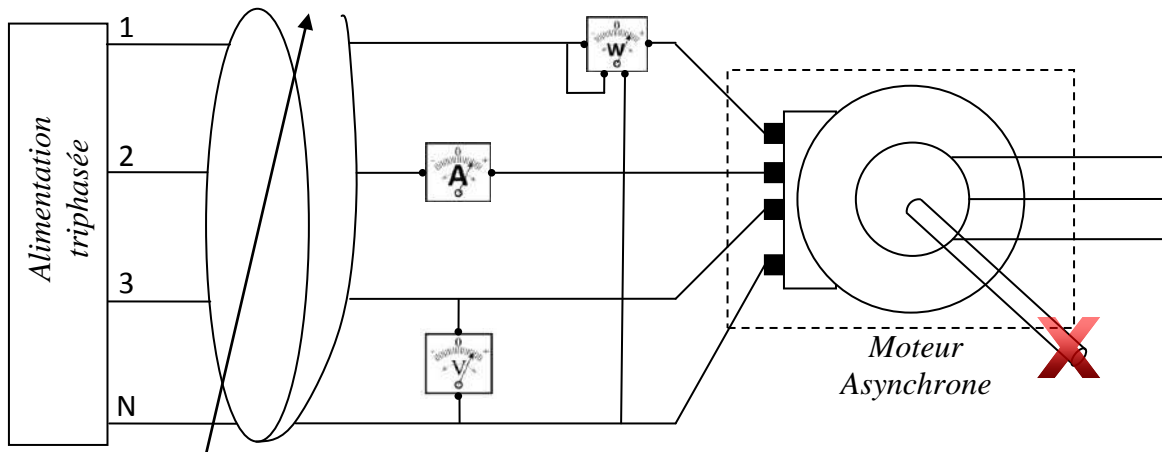


Figure VII.3 : Schéma de principe de l'essai à rotor calé du moteur asynchrone.

Ensuite, on ramène le courant " I'_{sc} " et la puissance absorbés " P'_{sc} " correspondants à " I_{sc} " et " P_{sc} " sous la tension nominale comme suit :

$$I_{sc} = I'_{sc} \frac{U_s}{U'_{sc}} \text{ et } P_{sc} = P'_{sc} \left(\frac{U_s}{U'_{sc}} \right)^2 \quad (VII.8)$$

La projection du courant statorique " I_{sc} " sur les deux axes de puissance active et réactive donne les coordonnées du point de fonctionnement " M_c " tel que :

La composante active du courant à rotor calé donne les pertes dans le fer plus les pertes joule statoriques et rotoriques à $3V_s$ près.

$$I_{sca} = I_{sc} \cos(\varphi_{sc}) = \frac{p_{fer} + p_{jsc} + p_{jrc}}{3V_s} \quad (VII.9)$$

La composante réactive du courant à rotor calé donne la puissance réactive à $3V_s$ près.

$$I_{scr} = I_{sc} \sin(\varphi_{sc}) = \frac{Q_{sc}}{3V_s} \quad (VII.10)$$

Remarques

- Durant l'essai à rotor calé, on doit relever plusieurs fois pour plusieurs positions du rotor par rapport au stator selon la position des encoches et ensuite prendre la valeur moyenne de celles-ci.
- Le calcul du couple de démarrage allant de sa valeur à tension réduite est parfois imprécis. On relève plusieurs valeurs à basse tension puis on trace la courbe de variation " $\Gamma_d =$

$f(U_s)^2$ ". Puisque cette dernière est une droite, on peut avoir le couple à pleine tension par extrapolation du graphe.

IV. Essai en charge

Le moteur étant alimenté sous sa tension et fréquence nominales, on lui applique un couple résistant allant du fonctionnement à vide jusqu'à la pleine charge. A cette fin, on le charge par une dynamo débitant sur une charge résistive variable. Pour chaque valeur du courant statorique " I_s ", on relève la puissance active " P_s " et réactive " Q_s " correspondantes par la méthode de deux wattmètres (Figure VII.4).

" P_1 " et " P_2 " sont les lectures sur les deux wattmètres, elles peuvent être de signes différents. Sachant que la puissance absorbée " P_s " est une puissance active, elle est nécessairement positive. Il est donc indispensable de donner à l'indication " P_1 " du wattmètre de la ligne 1 la valeur positive correspondant à la plus grande des deux indications en valeurs absolues. La valeur prise par " P_2 " sera l'indication de l'autre wattmètre, affublé du signe « plus » si les deux grandeurs étaient de même signe et du signe « moins » dans le cas contraire.

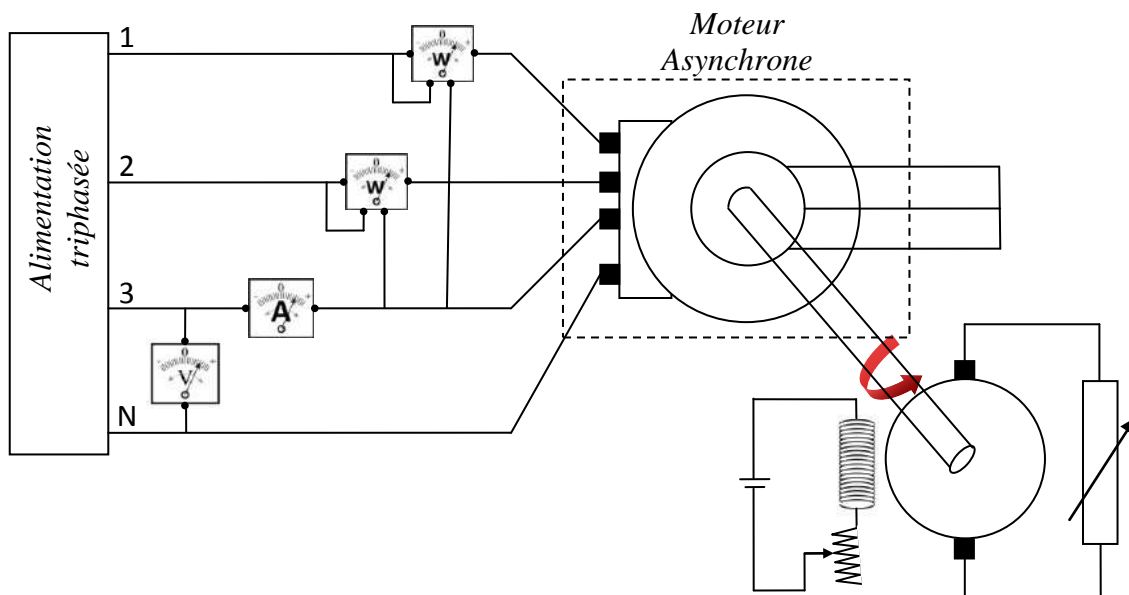


Figure VII.4 : Schéma de principe de la marche en charge du moteur asynchrone.

V. Bilan de puissance

Un moteur asynchrone couplé au réseau fonctionne donc sous la tension et la fréquence du réseau supposées constantes. Nous nous contenterons ici d'un bilan simplifié qui décline toutes les puissances, depuis la puissance absorbée d'origine électrique jusqu'à la puissance utile de nature mécanique.

V. 1. Puissances absorbées

La puissance active " P_s " absorbée par le moteur se calcule à partir des informations des wattmètres, en utilisant la relation suivante :

$$P_s = P_1 + P_2 \quad (\text{VII.11})$$

La puissance réactive " Q_s " absorbée par le moteur se calcule à partir des informations des wattmètres, en utilisant la relation suivante :

$$Q_s = \sqrt{3}(P_1 - P_2) \quad (\text{VII.12})$$

La puissance apparente du moteur peut se déduire des deux calculs précédents par la relation :

$$S_s = \sqrt{P_s^2 + Q_s^2} \quad (\text{VII.13})$$

Le facteur de puissance peut se déduire des deux calculs précédents par la relation :

$$\cos(\varphi_s) = \frac{P_s}{\sqrt{P_s^2 + Q_s^2}} \quad (\text{VII.14})$$

V. 2. Pertes localisées au stator

- Le courant de ligne " I_s " étant mesuré à l'aide de l'ampèremètre et la résistance " R_{eq} " entre deux bornes du stator par un ohmmètre, les pertes Joule au stator seront calculées par la relation suivante:

$$p_{js} = \frac{3}{2} R_{eq} I_s^2 \quad (\text{VII.15})$$

Dans le cas où la résistance " R_s " d'une phase de l'enroulement de l'induit est connue, le montage des trois bobines est aussi connu, les pertes Joule au stator seront calculées par la relation suivante :

- **Montage étoile**

$$p_{js} = 3R_s I_s^2 \quad (\text{VII.16})$$

- **Montage triangle**

$$p_{js} = R_s I_s^2 \quad (\text{VII.17})$$

- Les pertes magnétiques, dans les tôles de l'armature du stator sont pratiquement indépendantes de la charge, elles sont liées à la valeur efficace et à la fréquence de la tension d'alimentation. Pour un réseau donné, ces pertes sont considérées comme constantes, elles sont déduites par l'essai à vide.

V. 3. Puissance transmise au rotor

C'est la puissance électromagnétique au niveau de l'entrefer. Elle est transmise du stator au rotor magnétiquement sous forme du couple électromagnétique et la vitesse synchrone. Elle n'est pas mesurable mais elle est calculable comme suit :

$$P'_s = P_s - p_{fer} - p_{js} = \Gamma_{em} \Omega_s \quad (\text{VII.18})$$

V. 4. Pertes localisées au rotor

Les pertes localisées au rotor ont également plusieurs origines :

- les pertes Joule au rotor qui ne sont mesurables que dans le cas d'un moteur à rotor bobiné. Elles dépendent de l'intensité du courant et la résistance des conducteurs rotoriques. Or l'intensité dans les conducteurs rotoriques résulte de la différence de la

vitesse du champ tournant et la vitesse de rotation du moteur. Elles sont généralement évaluées à partir du glissement par la relation suivante :

$$p_{jr} = g \cdot P'_s \tag{VII.19}$$

- Le rotor est également le siège d'un autre type de pertes. Les pertes fer ou magnétiques. Cependant ces pertes seront toujours négligées devant les autres car la fréquence des grandeurs rotoriques est très faible.
- Les pertes mécaniques dans le rotor ne sont pas mesurables mais elles sont calculables. Elles sont données, ou calculées depuis l'essai à vide. Puisque la vitesse du moteur asynchrone en fonctionnement nominal reste presque constante, ces pertes seront considérées comme constantes. Très souvent elles sont égales aux pertes dans le fer du stator, la somme de ces deux types de pertes sera communément appelée les pertes constantes.

$$P_{sv} = p_{fer} + p_{mec} = P_{cs} \tag{VII.20}$$

V. 5. La puissance utile

La puissance utile d'un moteur asynchrone est la puissance mécanique développée sur son arbre sous forme d'une vitesse peu variable en fonctionnement normal (glissement faible) et un couple mécanique variable :

$$P_u = \Gamma_u \cdot \Omega \tag{VII.21}$$

En régime permanent, où l'équilibre est établi, le couple utile " Γ_u " délivré par le moteur sera égal au couple résistant " Γ_r " que lui oppose la charge mécanique.

$$\Gamma_u = \Gamma_r \tag{VII.22}$$

Sur sa partie utile, la caractéristique mécanique du moteur asynchrone est un segment de droite. Le point de fonctionnement se trouve sur l'intersection de la caractéristique mécanique du moteur et de la courbe qui caractérise le couple résistant de la charge qui peut être constante, une droite ou une parabole (Figure VII.5).

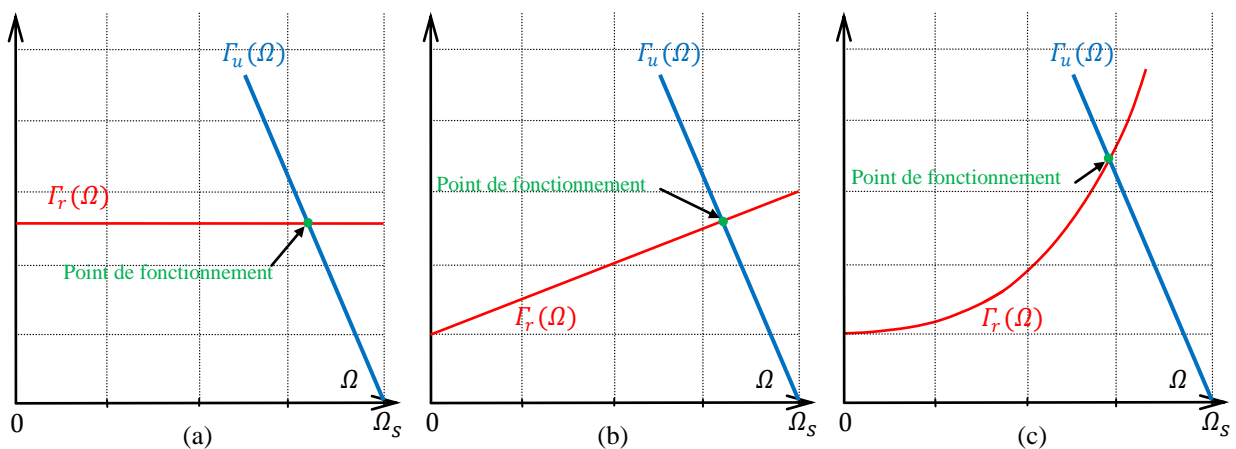


Figure VII.5 : Représentation du point d'équilibre pour les trois cas de charge.

V. 6. Représentation du bilan de puissances

Le bilan met en évidence le fait que la puissance absorbée est obligatoirement la puissance la plus importante, elle ne cesse de diminuer en progressant vers la puissance utile qui est évidemment la plus faible.

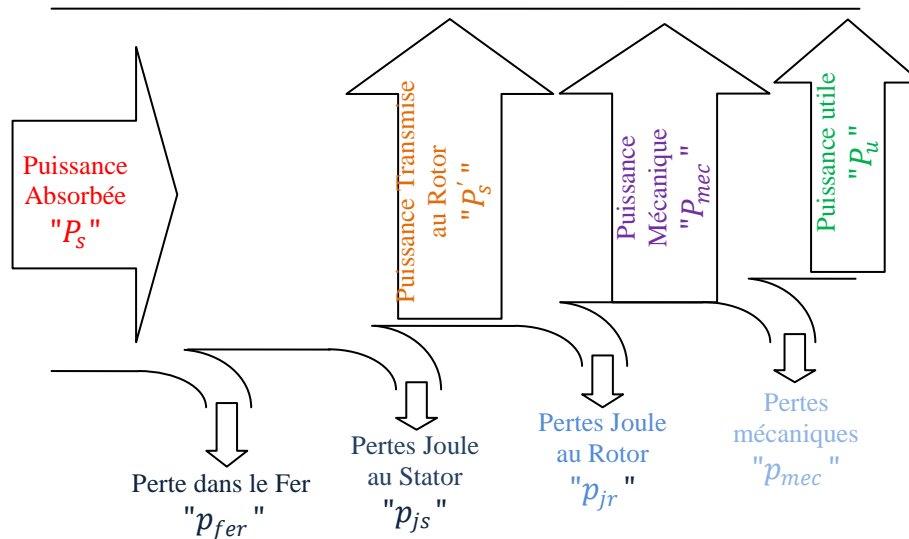


Figure VII.6. Représentation du bilan de puissances du moteur asynchrone

V. 7. Rendement

Le rendement " η " est le rapport entre la puissance mécanique utile et la puissance électrique absorbée par, d'où :

$$\eta = \frac{P_u}{P_s} \quad (\text{VII.23})$$

Le rendement des moteurs asynchrones varie en fonction de leur puissance. Plus la puissance est élevée, meilleur est le rendement (Il peut atteindre 95% pour un moteur de 100kW).

VI. Démarrage des moteurs asynchrones

L'appel du courant au démarrage d'un moteur asynchrone peut provoquer une chute de tension excessive surtout en cas des moteurs puissants. Les différentes techniques de démarrage ont pour objectif fondamental de limiter l'intensité du courant de démarrage tout en maintenant les performances mécaniques de l'ensemble "moteur-charge" conformes au cahier des charges.

VI. 1. Démarrage par rhéostat secondaire

Pour les moteurs à rotor bobiné, le rhéostat secondaire permet de réduire le courant absorbé au démarrage tout en ayant un couple de démarrage très élevé. Sans le rhéostat, le courant est très fort et le couple est faible. Avec rhéostat, on amène le point de fonctionnement à rotor calé " M_c " au point " M_{ch} " dont le courant et le couple sont au voisinage de ces valeurs nominales. Le courant est diminué et le couple est élevé. En pratique, le nouveau point de fonctionnement à rotor calé est choisi entre le point de fonctionnement nominal et celui à couple maximum (Figure VII.7).

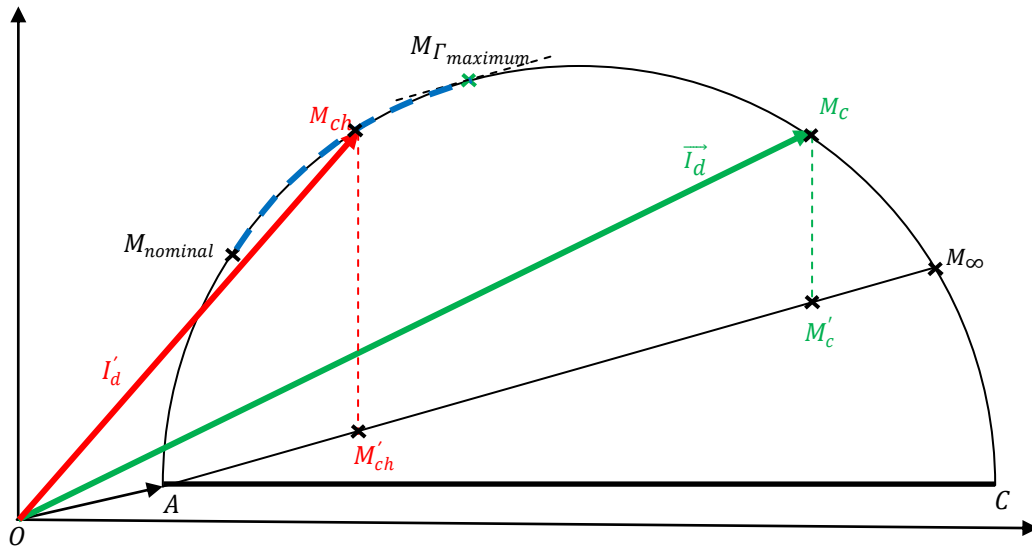


Figure VII.7. Représentation du point de fonctionnement avant et après l'insertion du rhéostat de démarrage

Il est clair que le courant de démarrage est atténué ($OM_{ch} \gg OM_c$) et le couple de démarrage est renforcé ($M'_c M_c \ll M'_{ch} M_{ch}$).

Par une division convenable de la résistance totale du rhéostat et une élimination de ses éléments à des vitesses adéquates, on démarre le moteur entre deux limites de courant donc de couple. Au démarrage, le point de fonctionnement du moteur est au point " D_M ". Quand le moteur prend de la vitesse, son point de fonctionnement se déplace vers le point " D_m ". Ensuite, on élimine le premier élément du rhéostat " R_1 " de sorte qu'on ramène le point de fonctionnement au point " D_M " de nouveau. Puis le point de fonctionnement se déplace vers le point " D_m ". Ensuite, on élimine le deuxième élément du rhéostat " R_2 " de sorte qu'on ramène le point de fonctionnement de nouveau au point " D_M ". Et ainsi de suite jusqu'à la suppression totale de tous les éléments du rhéostat et le point de fonctionnement s'établit au voisinage du point de fonctionnement à vide " M_v ".

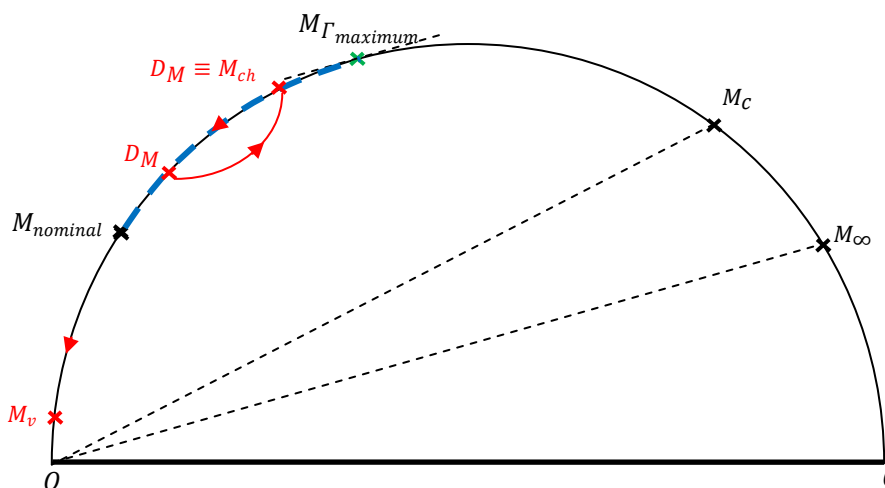


Figure VII.8. Représentation du démarrage à l'aide de rhéostat à plots

Plus le rhéostat est fractionné, plus le point " D_M " est voisin de " D_m " et plus la montée de vitesse est rapide.

Pour le calcul de la résistance des éléments du rhéostat de démarrage, on utilise la relation de proportionnalité entre le glissement et la résistance du rotor à couple constant (Figure VII.9).

à Γ_M , on a :

$$\frac{R_r + R_h}{R_r + R_h - R_1} = \frac{1}{g_1}; \frac{R_r + R_h - R_1}{R_r + R_h - R_1 - R_2} = \frac{g_1}{g_2}; \dots; \frac{R_r + R_h - R_1 - R_2 - \dots - R_{n-1}}{R_r} = \frac{g_{n-1}}{g_n}$$

à Γ_m , on a :

$$\frac{R_r + R_h}{R_r + R_h - R_1} = \frac{g_1}{g_2}; \frac{R_r + R_h - R_1}{R_r + R_h - R_1 - R_2} = \frac{g_2}{g_3}; \dots; \frac{R_r + R_h - R_1 - R_2 - \dots - R_{n-1}}{R_r} = \frac{g_{n-2}}{g_{n-1}}$$

Depuis ces relations, on remarque que :

$$\frac{1}{g_1} = \frac{g_1}{g_2} = \frac{g_2}{g_3} = \dots = \frac{g_{n-2}}{g_{n-1}} = \frac{g_{n-1}}{g_n} = k$$

Avec "k" est un rapport caractérisant le rhéostat de sorte que connaissant le nombre "n" des éléments de ce rhéostat, on déduit les valeurs de la résistance de ses éléments comme suit :

$$k^n = \sqrt{\frac{R_r + R_h}{R_r}} \tag{VII.24}$$

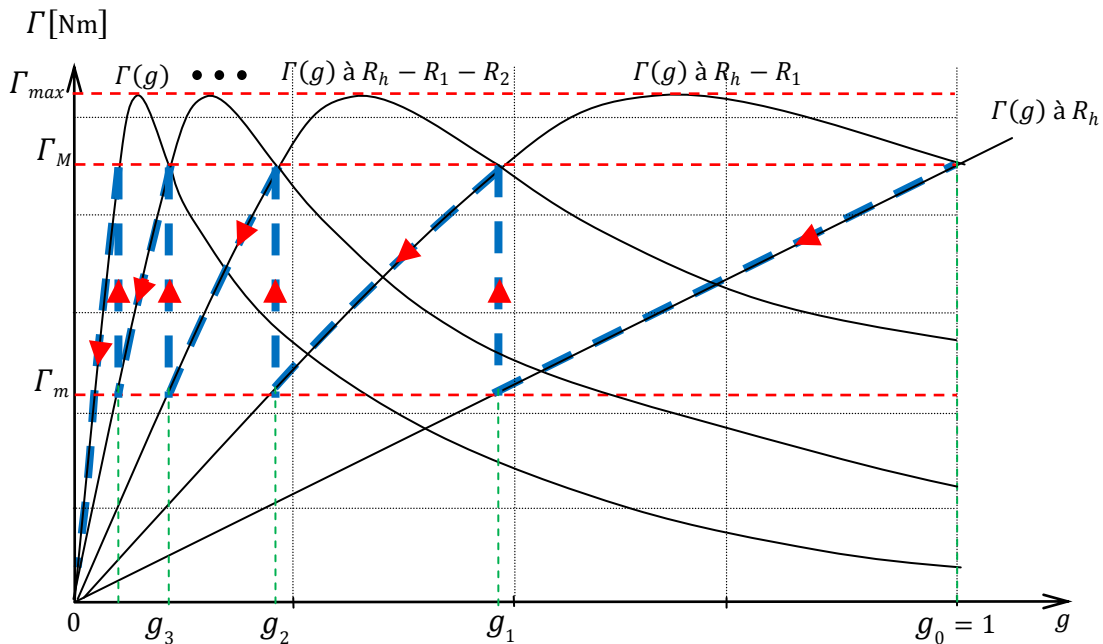


Figure VII.9. Représentation de la caractéristique mécanique lors du démarrage à l'aide de rhéostat à plot

VI. 2. Démarrage par réduction de la tension au primaire

Il existe différents méthodes pour réduire l'appel du courant au démarrage des moteurs à cage dont le circuit rotorique n'est pas accessible. Deux méthodes sont utilisées en pratique.

- Insertion d'une résistance entre la source d'alimentation et le stator du moteur.
- Démarrage en étoile-triangle des moteurs destinés à travailler en triangle.

VI. 2. 1. Démarrage à l'aide d'une résistance statorique

On insère donc une résistance triphasée entre le réseau et le moteur. Si on désigne par " R_s " et " X_s ", la résistance et la réactance par phase du moteur à l'arrêt vues de l'entrée. A pleine tension " V_s ", le moteur absorbe au démarrage un courant " I_d " et développe un couple " Γ_d " tel que :

$$I_d = \frac{V_s}{\sqrt{R_s^2 + X_s^2}} \quad (\text{VII.25})$$

Après la mise en série d'une résistance " R_h " par phase;

$$I'_d = \frac{V_s}{\sqrt{(R_h + R_s)^2 + X_s^2}} \quad (\text{VII.26})$$

La tension simple appliquée au moteur se réduit et devient :

$$V'_s = \frac{\sqrt{R_s^2 + X_s^2}}{\sqrt{(R_h + R_s)^2 + X_s^2}} V_s \quad (\text{VII.27})$$

Le couple de démarrage se réduit aussi et devient :

$$\Gamma'_d = \left(\frac{V'_s}{V_s}\right)^2 \Gamma_d = \left(\frac{I'_d}{I_d}\right)^2 \Gamma_d \quad (\text{VII.28})$$

Cette méthode n'est pas performante, car si on réussit à réduire le courant par un certain rapport, le couple de démarrage se réduit automatiquement d'un rapport égal au carré de celui de réduction du courant.

VI. 2. 2. Démarrage étoile-triangle

Lors du démarrage d'un moteur destiné à fonctionner en triangle, on le couple en étoile jusqu'à l'établissement du régime permanent puis on rend le couplage triangle.

En triangle, la tension appliquée aux bornes de chaque phase est la tension composée " U_s ", le moteur absorbe un courant de démarrage " I_d " et développe un couple " Γ_d ". En étoile, la tension appliquée aux bornes de chaque phase est la tension simple " V_s ". Il y a donc une réduction de la tension d'un rapport " $\sqrt{3}$ ". Le courant sera réduit du même rapport alors que le couple sera réduit d'un rapport égal au carré de ce rapport.

$$I'_d = \frac{I_d}{\sqrt{3}} \text{ et } \Gamma'_d = \frac{\Gamma_d}{3} \quad (\text{VII.29})$$

VI. 3. Démarrage des moteurs à cage spéciaux

Les moteurs à cage permettant d'avoir un courant faible au démarrage tout en ayant un bon couple au démarrage sont des moteurs à cage spécial. A savoir les moteurs à double cage et les moteurs à cage profonde.

VI. 3. 1. Moteurs à double cage

Ce type de moteur porte deux séries d'encoches. Une première série d'encoches voisine de l'entrefer contenant les barres de la cage extérieure. Puis une deuxième série d'encoches profonde contenant les barres de la cage intérieure. Les deux cages peuvent être reliées entre eux via un étroit passage (Figure VII.10).

La cage extérieure possède une résistance plus grand que celle de la cage intérieure en agissant sur la section des barres ($R_{re} \gg R_{ri}$). De plus, la réactance de fuite de la cage extérieure est plus faible que la réactance de fuite de la cage intérieure ($l_{re} \omega_s \ll l_{ri} \omega_s$) car cette dernière est plus noyée dans le fer ce qui rend le flux de fuite de la cage extérieure moins important que celui de la cage intérieure. On compare maintenant les diagrammes du moteur muni de l'une ou de l'autre des deux cages.

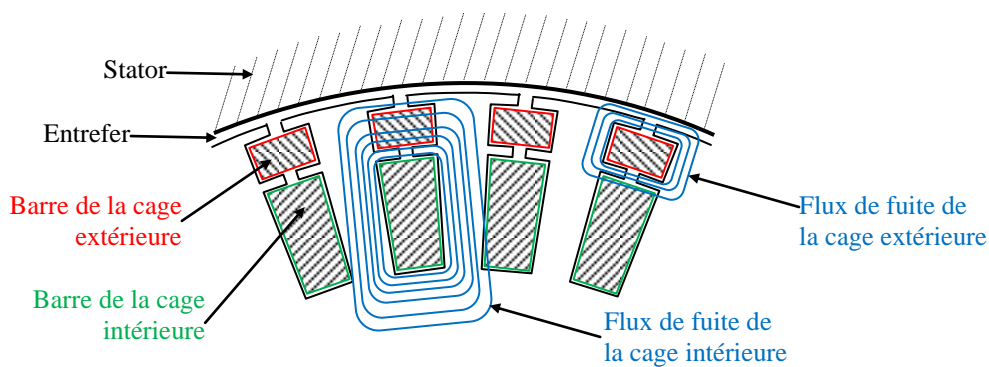


Figure VII.10. Représentation du rotor à double cage

Avec la cage extérieure, l'inductance de fuite totale est plus faible. Ainsi le diamètre du cercle est plus grand que le cas de la cage intérieure car :

$$AC_{ex} \gg AC_{in} \text{ car } \frac{V_s}{l_{ex} \omega_s} \gg \frac{V_s}{l_{in} \omega_s}$$

Avec la cage extérieure, La pente de la droite des pertes Joule rotorique est plus grande que celle de la cage intérieure car la résistance de la cage extérieure est plus grande que celle de la cage intérieure.

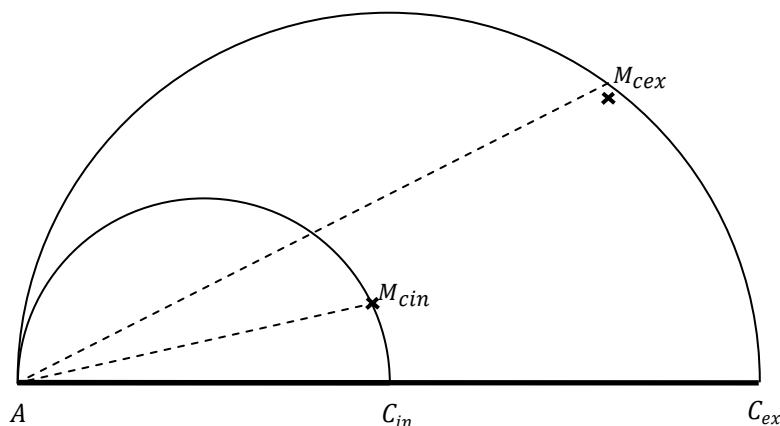


Figure VII.11. Représentation des deux diagrammes correspondants aux deux cages séparément

D'après ces deux diagrammes, la caractéristique mécanique du moteur à double cage (en rouge) se déduit ainsi :

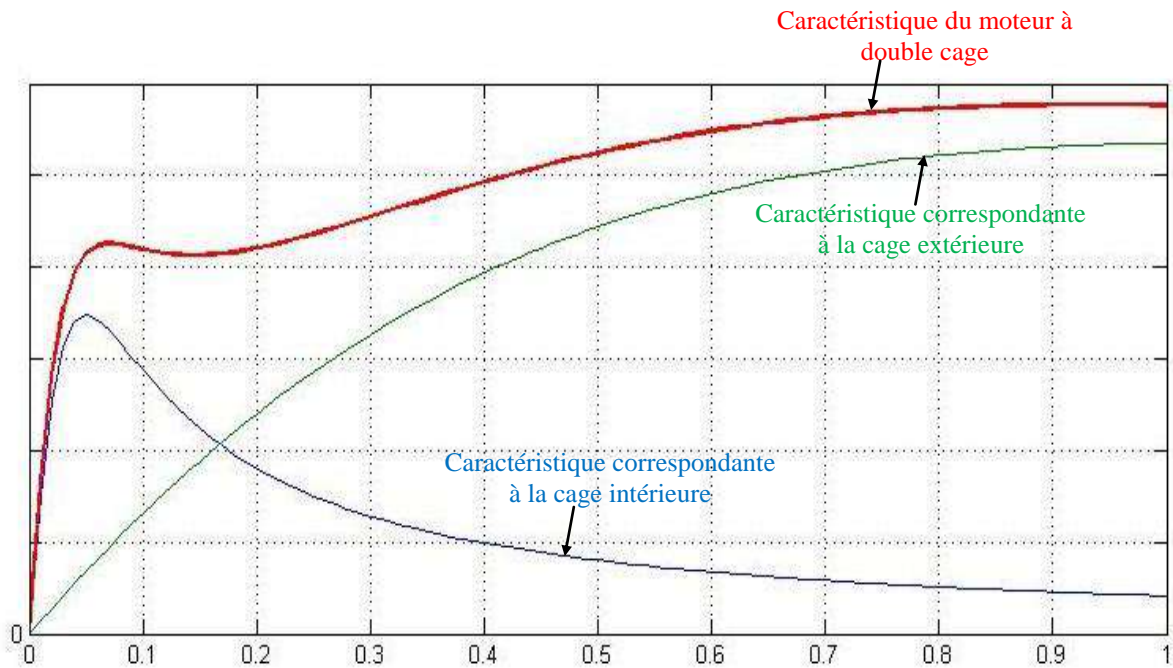


Figure VII.12. Représentation des caractéristiques correspondantes aux deux cages séparément et la caractéristique équivalente du moteur à double cage

Au fonctionnement normal, le glissement est très faible, la caractéristique du moteur à double cage se rapproche de celle correspondante à la cage intérieure. D'où le nom de cette dernière : **cage de travail**. Cependant, elle se rapproche de celle correspondante à la cage extérieure à glissement proche de "1" (au démarrage). D'où le nom : **cage de démarrage**.

VI. 3. 2. Moteurs à encoches profondes

Afin d'améliorer les caractéristiques de démarrage du moteur à cage, on utilise aussi des encoches profondes où les barres sont de section rectangulaire ou trapézoïdale.

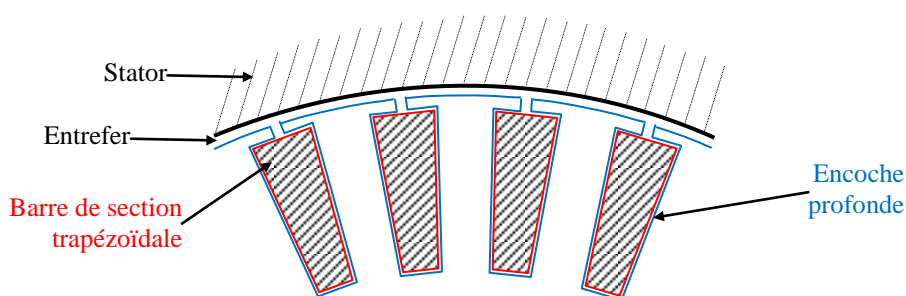


Figure VII.13. Représentation du rotor à encoches profondes

Au démarrage, la fréquence des courants rotoriques égale à la fréquence d'alimentation. Les barres sont le siège de courant de Foucault important donc les pertes correspondantes sont importantes. Ces pertes diminuent au fur et à mesure que le moteur prend de la vitesse où la fréquence des courants rotoriques diminue. Ceci est traduit par une résistance apparente variable.

Au démarrage, elle est importante à cause des pertes par courant de Foucault importantes en provoquant un couple de démarrage important. En fonctionnement normal, elle est faible à cause des pertes par courant de Foucault faible pour travailler avec un bon rendement.

VII. Freinage des moteurs asynchrones

Il y a différents modes de freinage du moteur asynchrone. On s'intéresse ici beaucoup plus en deux types à savoir le freinage par inversion du sens de flux et le freinage par fonctionnement en génératrice asynchrone.

VII. 1. Freinage par inversion du sens de flux

En inversant le sens du champ tournant alors que le moteur tourne, celui-ci est freiné jusqu'à s'arrêter puis il repart dans le sens de rotation inverse. Ceci est réalisé en permutant l'alimentation de deux phases. Le glissement passe alors de sa valeur " g " à " $g = 1$ " puis à " $2 - g$ ". Comme il est illustré par le diagramme (Figure VII.14), le point de fonctionnement passe du point " M " à " M_c " puis à " M' ".

- Le courant absorbé est OM' .
- Le couple de freinage est $M'M''$ à $3V_s/\Omega_s$ près.

En ce mode de freinage, le courant absorbé est plus important que le courant de démarrage sans rhéostat et le couple de freinage est plus faible que le couple de démarrage sans rhéostat. Afin d'améliorer le courant et le couple de freinage, on introduit un rhéostat rotorique de sorte que le point de fonctionnement " M' " devienne dans la zone située entre le point de fonctionnement nominal et le point de fonctionnement à couple maximum. Au fur et à mesure que le moteur ralentit, on réduit le rhéostat rotorique comme pour le démarrage. Ce freinage est dit freinage à contre courant ou bien freinage rhéostatique.

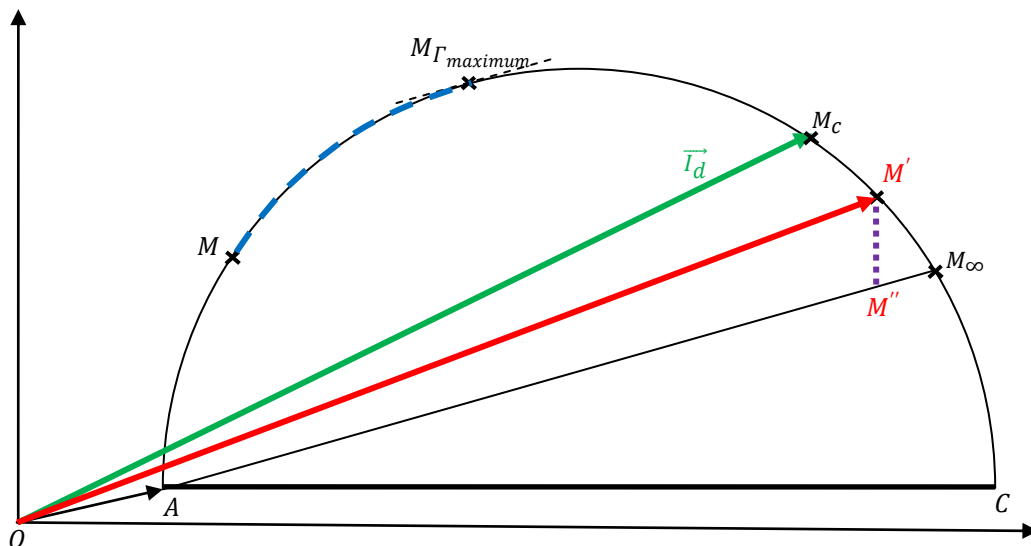


Figure VII.14. Représentation du point de fonctionnement après l'inversion du sens du flux

VII. 2. Freinage par fonctionnement en génératrice asynchrone

Lorsque la vitesse de la machine asynchrone est supérieure à la vitesse synchrone, elle fonctionne comme générateur en freinant la charge mécanique et renvoyant une puissance active au réseau qui l'alimente. Le glissement devient négatif et le diagramme reste toujours le même où le point de fonctionnement doit donner une projection négative sur l'axe de puissance active (Figure VII.15).

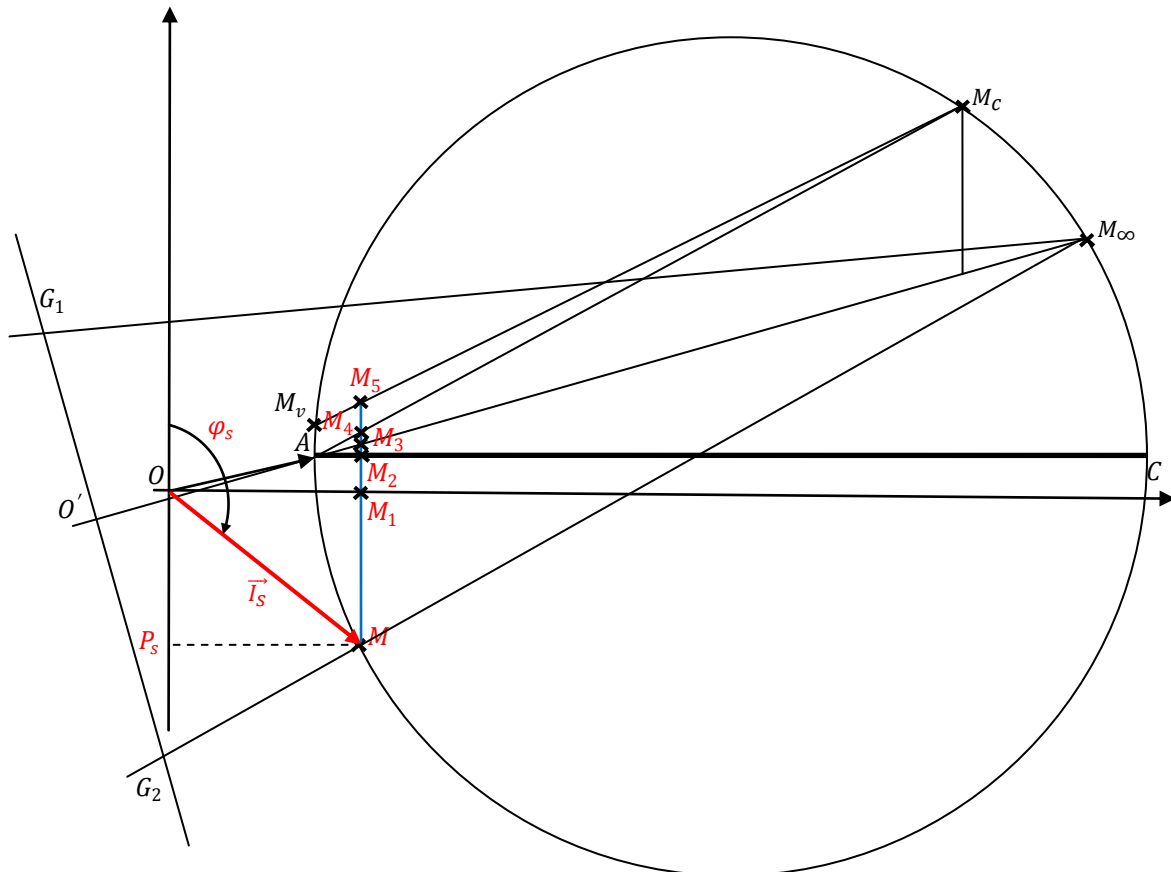


Figure VII.15. Représentation du point de fonctionnement en fonctionnement générateur

Depuis la figure VII.15, il est clair que le glissement est négatif (en utilisant l'échelle de glissement). Le déphasage du courant statorique est supérieur à $\pi/2$. La machine fournit la puissance active au réseau mais absorbe toujours la puissance réactive car la projection sur l'axe de puissance réactive est toujours positive.

Le parallèle de l'axe de puissance active passant par le point de fonctionnement coupe :

- L'axe de puissance réactive au point "M₁" donnant la puissance utile renvoyée au réseau qui alimente la machine asynchrone à $3V_s$ près tel que :

$$MM_1 = I_{sa} = I_s \cos(\varphi_s) = \frac{P_s}{3V_s} \tag{VII.30}$$

- Le diagonal du cercle "AC" au point "M₂" donnant les pertes dans le fer au stator de la machine asynchrone à $3V_s$ près tel que :

$$M_1M_2 = \frac{p_{fer}}{3V_s} \tag{VII.31}$$

- L'axe des pertes Joule statorique " AM_∞ " au point " M_3 " donnant les pertes Joule au stator de la machine asynchrone à $3V_s$ près tel que :

$$M_2 M_3 = \frac{p_{js}}{3V_s} \quad (\text{VII.32})$$

- L'axe des pertes Joule rotorique " AM_c " au point " M_4 " donnant les pertes Joule au rotor de la machine asynchrone à $3V_s$ près tel que :

$$M_3 M_4 = \frac{p_{jr}}{3V_s} \quad (\text{VII.33})$$

- L'axe des pertes mécanique " $M_v M_c$ " au point " M_5 " donnant les pertes mécanique de la machine asynchrone à $3V_s$ près tel que :

$$M_4 M_5 = \frac{p_{mec}}{3V_s} \quad (\text{VII.34})$$

Remarques

- On peut déduire les grandeurs et les caractéristiques depuis le diagramme de la même manière que le cas du moteur asynchrone.
- Le moteur asynchrone peut être freiné en lui injectant du courant continu dans son circuit rotorique. Sa vitesse reste donc égale à la vitesse synchrone quelque soit la charge mécanique. La machine asynchrone fonctionne alors comme alternateur.

Table des matières

I.	Introduction.....	105
II.	Essai à vide.....	105
III.	Essai à rotor calé	107
IV.	Essai en charge	108
V.	Bilan de puissance	108
V. 1.	Puissances absorbées.....	108
V. 2.	Pertes localisées au stator	109
V. 3.	Puissance transmise au rotor	109
V. 4.	Pertes localisées au rotor	109
V. 5.	La puissance utile	110
V. 6.	Représentation du bilan de puissances	111
V. 7.	Rendement.....	111
VI.	Démarrage des moteurs asynchrones	111
VI. 1.	Démarrage par rhéostat secondaire.....	111
VI. 2.	Démarrage par réduction de la tension au primaire.....	113
VI. 2. 1.	Démarrage à l'aide d'une résistance statorique.....	114
VI. 2. 2.	Démarrage étoile-triangle	114
VI. 3.	Démarrage des moteurs à cage spéciaux	114
VI. 3. 1.	Moteurs à double cage	115
VI. 3. 2.	Moteurs à encoches profondes.....	116
VII.	Freinage des moteurs asynchrones	117
VII. 1.	Freinage par inversion du sens de flux	117
VII. 2.	Freinage par fonctionnement en génératrice asynchrone	118

Bibliographie

- G. Séguier, F. Notelet, "Electrotechnique industrielle", Téch et Doc, 1987.
- M. Kostenko et L. Piotrovski, "Machines Electriques : Machines à Courant Alternatif " Tome II, 3ème édition, Édition MIR, 1979.
- A. Ivanov-Smolensky, "Electrical Machines", Édition MIR, 1982.
- J.L. Dalmaso, "Cours d'électrotechnique 1 : Machines tournantes à courants alternatifs", Éditions Belin, 1985.
- A. Fouillé, "Électrotechnique à l'usage des ingénieurs : Machines électriques", Tome II, Édition Dunod, 1957.
- L. Lagron, "les Moteurs à Courants Alternatifs", Éditions Dunod, 1949.
- J. Châtelain, "Machines Electriques", Traité d'Electricité, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Éditions Georgi, 1983.