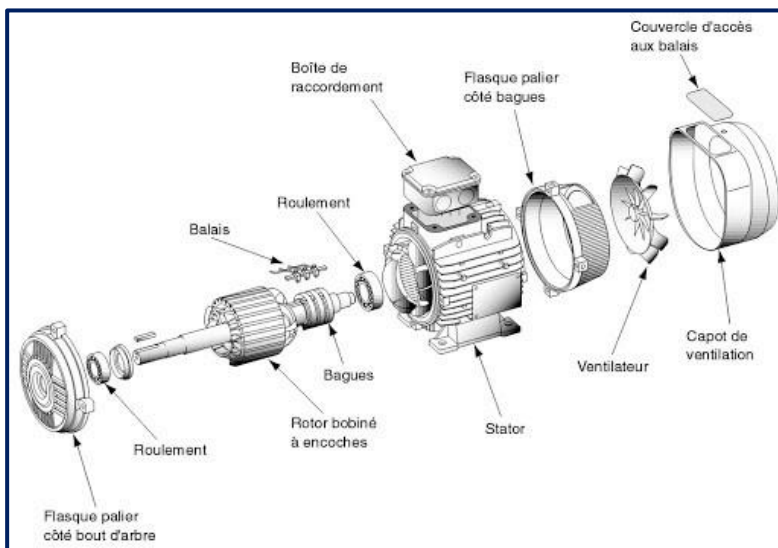


**C.E.D.T. LE G15**

# **MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASE**



**M. Oumar DIOR**

**Ingénieur Electromécanicien**

## TABLE DES MATIERES

1. Définition.....	1
2. Constitution et classification .....	1
2.1. Le stator .....	1
2.2. Le rotor .....	3
2.2.1. Le moteur asynchrone à cage .....	3
2.2.2. Le moteur asynchrone à bagues .....	3
3. Principe de fonctionnement général et ces différents régimes .....	3
3.1. Le régime de court-circuit.....	4
3.2. Le régime générateur .....	4
3.3. Le régime de freinage électromagnétique.....	4
4. Fonctionnement du moteur asynchrone à rotor bloqué .....	5
5. Fonctionnement du moteur asynchrone à rotor tournant.....	7
5.1. La f.é.m. induite dans un rotor tournant .....	7
5.2. Le schéma équivalent d'un moteur asynchrone à rotor tournant (forme $\Gamma$ ) .....	7
5.3. Le diagramme énergétique du moteur asynchrone triphasé .....	8
5.4. Bilan des puissances .....	9
6. Le diagramme circulaire.....	11
6.1. Introduction.....	11
6.2. Principe de construction.....	12
6.3. Détermination des grandeurs du moteur asynchrone triphasé .....	15
7. Les caractéristiques mécaniques du moteur asynchrone .....	17
7.1. Introduction.....	17
7.2. Détermination de $T = f(g)$ .....	17

## 1. Définition

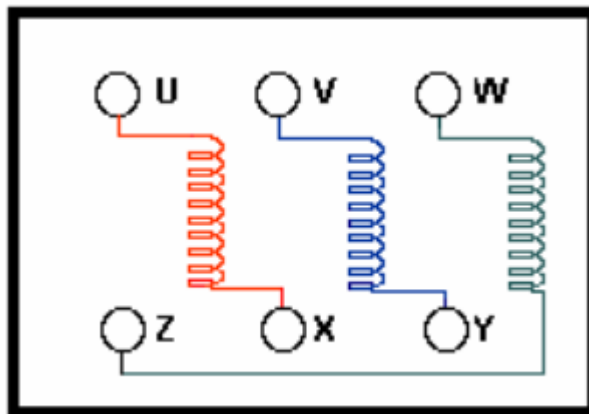
Un moteur asynchrone est une machine électrique dynamique qui transforme l'énergie électrique en énergie mécanique servant à entraîner un mécanisme

## 2. Constitution et classification

Le moteur asynchrone est constitué de deux parties essentielles le **stator** et le **rotor**

### 2.1. Le stator

C'est la partie fixe du moteur. Il est constitué d'une carcasse sur laquelle est fixée une couronne de tôles d'acier de qualité spéciale munies d'encoches. Des bobinages de section appropriée sont répartis dans ces dernières et **forment un ensemble d'enroulements** qui aboutissent au niveau de la plaque à bornes où ils sont **couplés soit en triangle, soit étoile** pour faire adopter la tension du moteur asynchrone à celle du réseau disponible.



*Figure 1: Les enroulements du stator*

#### ▪ Couplage

Si la tension entre phase du réseau correspond à la tension simple ou phase du moteur on choisit le couplage triangle

Si la tension entre phase du réseau correspond à la tension composé ou ligne du moteur on choisit le couplage étoile

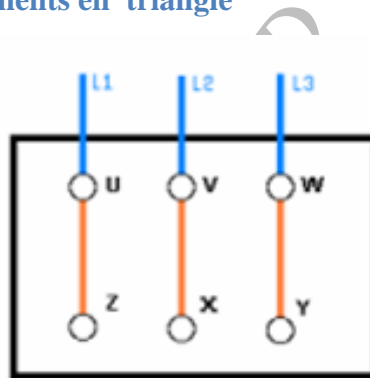
**Exemple :**

*Tableau 1: Choix du type de couplage des enroulements du stator*

Moteur Réseau	127V / 230V	230V / 400V	400V / 690V
127V / 230V	Etoile	Triangle	Aucun
230V / 400V	Aucun	Etoile	Triangle
400V / 690V	Aucun	Aucun	Etoile

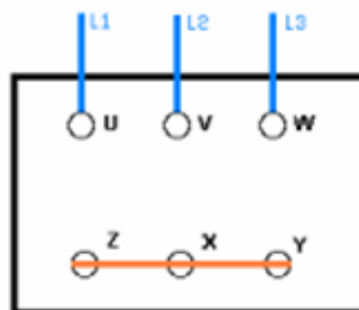
**NB :** les couplages sont effectués à l'aide de barrettes (couleur orange)

▪ **Couplage des enroulements en triangle**



*Figure 2: Couplage triangle (Δ)*

▪ **Couplage des enroulements étoile**



*Figure 3: Couplage étoile (Y)*

## 2.2. Le rotor

C'est la partie mobile du moteur. Il est placé à l'intérieur du stator et est constitué d'un empilage de tôles d'acier formant un cylindre claveté sur l'arbre du moteur. Parmi les types les plus utilisés on distingue:

### 2.2.1. Le moteur asynchrone à cage

Le moteur asynchrone à cage **communément appelé** encore **moteur asynchrone à rotor court-circuité** est constitué de tôles ferromagnétiques et de barres conductrices méplates généralement en aluminium régulièrement réparties à la périphérie du rotor. A l'aide de couronnes les extrémités de ces barres méplates sont reliées de part et d'autre. Le moteur asynchrone à cage est très fiable et très rentable avec son moyen de court-circuit. Il est le plus utilisé en entreprise, cependant il n'entraîne que des mécanismes ayant de faibles couples.

### 2.2.2. Le moteur asynchrone à bagues

Le rotor d'une machine à bagues est constitué de trois bobines (on parle aussi de rotor bobiné). Chaque bobine est reliée à une bague. Les bagues permettent d'avoir une liaison électrique avec les bobines du rotor. Ce type de rotor a été conçu pour permettre la variation de résistance du rotor en insérant des résistances en série avec les bobines afin d'atténuer les forts courants au démarrage (réaliser un démarrage rotorique). Le moteur asynchrone à bagues entraîne donc des mécanismes ayant de grands couples tels que les monte-charges et les grus. C'est un moteur avec d'énormes pertes électriques, donc moins rentable que le moteur à cage ; avec ce moteur nous assistons fréquemment à des court-circuits qui entraînent la destruction fréquente des enroulements de l'induit et de l'inducteur.

## 3. Principe de fonctionnement général et ces différents régimes

Le moteur asynchrone est alimenté par une source de tension sinusoïdale dépendant du type de moteur (monophasé ou triphasé).

Si le moteur est triphasé, trois bobines identiques sont placées dans les encoches du stator, de sorte que leurs axes soient déphasés l'un par rapport à l'autre de  $120^\circ$ . Ce moteur est alimenté par un système de tensions symétrique et équilibré. Des courants variables formant également un système symétrique parcourent les enroulements. Ces courants créent un champ magnétique tournant à la vitesse synchrone  $n_s = 60f_1/p$  où  $f_1$  la fréquence du réseau et  $p$  le nombre de paires de pôles du stator. La variation du champ permet d'induire des f.é.m. dans chaque enroulement du stator. Ces f.é.m. forment également un système symétrique et équilibré. Le champ magnétique tournant embrasse également les enroulements du rotor et à

leurs seins sont induites des f.é.m. qui produisent des courants induits réagissant avec le champ, ils créent une force magnétique (couple électromagnétique), qui met le rotor en mouvement. Le rotor tourne alors avec une vitesse asynchrone  $n$  inférieure à la vitesse synchrone  $n_s$ .

Cette différence de vitesse  $n' = n_s - n = \frac{f_2 \cdot 60}{p}$  (Où  $f_2$  la fréquence des courants dans le rotor et  $p$  le nombre de paires de pôles du moteur), permet de créer le glissement

$g = \frac{n'}{n_s} = \frac{n_s - n}{n_s}$ , qui n'est rien d'autre que le % de transmission de la vitesse du stator au rotor. Tant que on est en régime moteur,  $0 < g < 1$  car à vide  $n$  ne peut égaler  $n_s$  puisque l'inertie du rotor constitue déjà une certaine charge que le couple moteur doit vaincre. D'autre part le moteur doit être chargé avec une charge maximale inférieure ou égale au couple moteur si non on serait en court-circuit.

En plus du régime moteur il existe d'autres régimes soient accidentels ou supervisés. Il s'agit des régimes suivants :

### 3.1. Le régime de court-circuit

Pour obtenir ce régime il faut alimenter le moteur et lui couplé à une charge tel que le couple de charge  $T_{ch}$  soit supérieur au couple moteur  $T_M$ , ainsi la vitesse du rotor est nul  $n = 0$  ; cela implique le glissement  $g = 1$ .

### 3.2. Le régime générateur

Durant ce régime, le moteur se comporte comme un générateur et fournit de l'énergie électrique à son réseau d'alimentation ; cela veut dire que le moteur absorbe de l'énergie mécanique du mécanisme entraîné (en régime moteur), qu'il transforme en énergie électrique transférée au réseau. Dans ce cas la vitesse du rotor  $n$  est supérieure à la vitesse de synchronisme  $n_s$ . Cela entraîne  $g < 0$

### 3.3. Le régime de freinage électromagnétique

Pour atteindre ce régime il faut changer le sens de rotation du rotor ; pour cela il suffit de permuter deux fils de phase (réseau d'alimentation), ainsi la vitesse du rotor  $n$  devient négative et le glissement supérieur à un.

$$g = \frac{n'}{n_s} = \frac{n_s - (-n)}{n_s} = \frac{n_s + n}{n_s} > 1$$

#### 4. Fonctionnement du moteur asynchrone à rotor bloqué

Si le rotor est bloqué  $n = 0 \Rightarrow g = 1$

$$n_s = \frac{f_1 \cdot 60}{p} \Rightarrow f_1 = \frac{p n_s}{60} \quad n' = \frac{f_2 \cdot 60}{p} \Rightarrow f_2 = \frac{p n'}{60} = \frac{p (n_s - n)}{60} = \frac{p n_s (n_s - n)}{60 n_s}$$

$$f_2 = f_1 \cdot g$$

Pour le cas d'un rotor bloqué  $g = 1 \Rightarrow f_2 = f_1$ . Les courants du stator ont même fréquence que celle du rotor, donc il n'existe pas de rotation. Le moteur asynchrone se comporte comme un transformateur court-circuité et l'énergie électrique absorbée par le moteur est convertie en énergie électrique.

Le schéma équivalent du MAS à rotor bloqué est celui d'un transformateur court-circuité

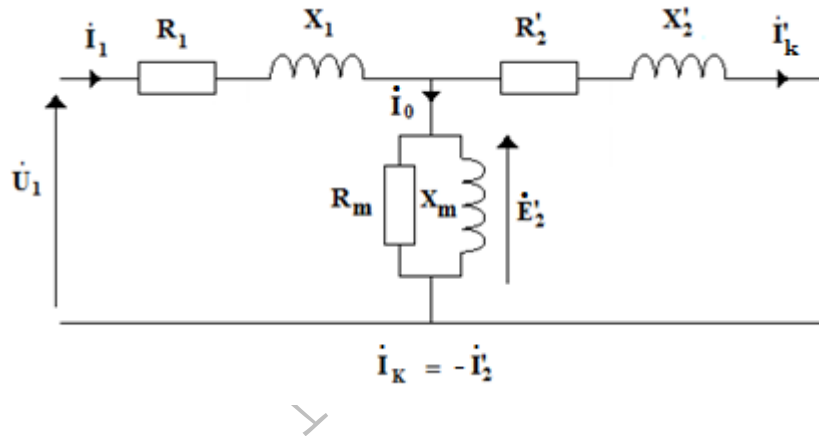


Figure 4: Schéma équivalent du MAS à rotor bloqué

Déterminons les rapports de transformation

##### ❖ Le rapport de transformation

$$E_1 = 4,44 N_1 f_1 \Phi_m \quad \text{or} \quad N_1 = \frac{K_1 N'_1}{2}$$

$$E_1 = 2,22 K_1 N'_1 f_1 \Phi_m$$

$N'_1$  : Le nombre de conducteurs (brins) dans un enroulement du stator

$K_1$  : Le coefficient d'enroulement du stator

Identiquement  $E_2 = 2,22 K_2 N'_2 f_2 \Phi_m$  avec  $f_2 = f_1$  car  $g = 1$

$N'_2$  : Le nombre de conducteurs (brins) actif dans un enroulement du rotor

$K_2$  : Le coefficient d'enroulement du rotor

▪ **Le rapport de transformation en f.é.m. ( $m_E$ )**

$$m_E = \frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{K_E} \text{ avec } K_E = \frac{E_2}{E_1} \Rightarrow E_1 = m_E E_2 = \frac{E_2}{K_E} = E'_2$$

$$m_E = \frac{E_1}{E_2} = \frac{K_1 N'_1}{K_2 N'_2} = \frac{1}{K_E} \Rightarrow K_E = \frac{E_2}{E_1} = \frac{K_2 N'_2}{K_1 N'_1}$$

$$E'_2 = m_E E_2 = \frac{E_2}{K_E}$$

▪ **Le rapport de transformation en courant ( $K_I$ )**

La puissance électromagnétique du rotor  $m_2 \cdot E_2 \cdot I_2$  est égale à la puissance électromagnétique du rotor ramenée au stator  $m_1 \cdot E'_2 \cdot I'_2$  où  $m_1$  le nombre de phases du stator et  $m_2$  le nombre de phases du rotor

$$m_1 E'_2 I'_2 = m_2 E_2 I_2 \Rightarrow I'_2 = \frac{m_2 E_2 I_2}{m_1 E'_2}$$

$$I'_2 = \frac{m_2 E_2}{m_1 m_E E_2} I_2 = \frac{m_2}{m_1 \frac{K_1 N'_1}{K_2 N'_2}} I_2 = \frac{m_2 K_2 N'_2}{m_1 K_1 N'_1} I_2 = K_I I_2$$

$$K_I = \frac{m_2 K_2 N'_2}{m_1 K_1 N'_1}$$

▪ **Le rapport de transformation en impédance ( $K_Z$ )**

Les pertes électriques du rotor  $m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2$  sont égales aux pertes électriques du rotor ramenées au stator  $m_1 \cdot R'_2 \cdot I'^2_2$

$$m_1 R'_2 I'^2_2 = m_2 R_2 I_2^2 \Rightarrow R'_2 = \frac{m_2 R_2 I_2^2}{m_1 I'^2_2} = \frac{m_2 R_2 I_2^2}{m_1 (K_I I_2)^2} = \frac{m_2 R_2}{m_1 (K_I)^2}$$

$$R'_2 = \frac{m_2 R_2}{m_1 \frac{m_2 K_2 N'_2}{m_1 K_1 N'_1} \cdot \frac{m_2 K_2 N'_2}{m_1 K_1 N'_1}} = \frac{R_2}{K_E K_I} = \frac{R_2}{K_Z}$$

$$K_Z = \frac{R_2}{R'_2} = \frac{X_2}{X'_2} = \frac{Z_2}{Z'_2}$$

$R'_2, X'_2$  et  $Z'_2$  sont respectivement la résistance, la réactance et l'impédance d'un enroulement du rotor ramenées au stator.



## 5. Fonctionnement du moteur asynchrone à rotor tournant

### 5.1. La f.é.m. induite dans un rotor tournant

A rotor tournant  $g \neq 1$  et  $0 < g < 1$  par conséquent la fréquence  $f_2$  des courants induits dans le rotor est  $f_2 = g f_1$ , la f.é.m. induite dans un enroulement du rotor est fonction de  $f_2$  donc du glissement et a pour expression

$$E_{2g} = 4,44 N_2 f_2 \Phi_m = 4,44 N_2 f_1 g \Phi_m = g E_2 \text{ avec } E_2 = 4,44 N_2 f_1 \Phi_m$$

$E_2 = 4,44 N_2 f_1 \Phi_m$  la f.é.m. induit dans un enroulement d'un rotor bloqué

### 5.2. Le schéma équivalent d'un moteur asynchrone à rotor tournant (forme $\Gamma$ )

Le schéma équivalent du MAS de la forme  $\Gamma$  est représenté par la figure ci-après :

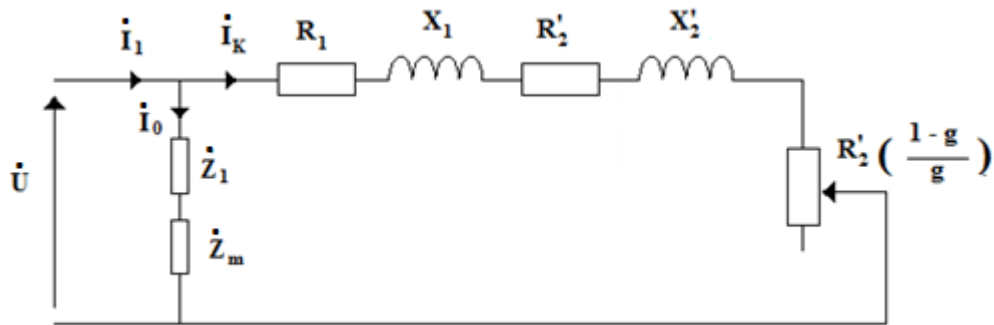


Figure 5: schéma équivalent du moteur asynchrone de la forme Gama

C'est cette représentation qui est utilisée pour déterminer les différentes grandeurs du moteur asynchrone où :

$U$  – la tension de phase.

$I_1$  – le courant absorbé du réseau.

$I_0$  – le courant magnétique.

$\vec{Z}_1 = (R_1 + jX_1)$  – impédance d'un enroulement du stator

$\vec{Z}_m = (R_m + jX_m)$  – impédance du circuit magnétique

$I_K = I_2' = K I_2$  – le courant dans le rotor qui dépend de la charge appliquée avec ( $K$  – le rapport de transformation).

On peut écrire  $K = K_I = \frac{m_1 K_1 N_1'}{m_2 K_2 N_2'}$  le rapport de transformation en courant démontré dans le paragraphe précédent.

$R_2'$  - la résistance d'un enroulement du rotor ramenée au stator. Elle sert à couvrir les pertes joules dans le rotor.

$X_2'$  - la réactance d'un enroulement du rotor.

$R_2' \left( \frac{1-g}{g} \right)$  - la résistance variable du rotor qui dépend du glissement, donc de la charge appliquée au moteur. Elle permet de développer la puissance mécanique du moteur permettant d'entraîner un mécanisme.

On peut globaliser la résistance totale du rotor :  $R_T = R_2' + R_2' \left( \frac{1-g}{g} \right) = \frac{gR_2' + R_2' - gR_2'}{g}$

$$R_T = \frac{R_2'}{g}$$

$R_1$  - la résistance d'un enroulement du stator.

$X_1$  - la réactance d'un enroulement du stator.

La puissance transmise au rotor, qui est la puissance électromagnétique

$$P_{elmag} = 3R_T I_K^2 = 3 \frac{R_2' (I_2')^2}{g} = \frac{\Delta P_{elr}}{g} \text{ avec } \Delta P_{elr} = 3R_2' (I_2')^2$$

Cette puissance transmise est composée des pertes par effet joule au rotor et la puissance mécanique transmise à l'arbre du rotor.

$$P_{TR} = \Delta P_{elr} + P_{mec} \Rightarrow P_{mec} = P_{elmag} - \Delta P_{elr}$$

$$P_{mec} = 3 \frac{R_2'}{g} (I_2')^2 - 3R_2' (I_2')^2 = 3R_2' \left( \frac{1}{g} - 1 \right) (I_2')^2 = 3R_2' \left( \frac{1-g}{g} \right) (I_2')^2$$

$$P_{mec} = 3R_2' \left( \frac{1-g}{g} \right) (I_2')^2$$

### 5.3. Le diagramme énergétique du moteur asynchrone triphasé

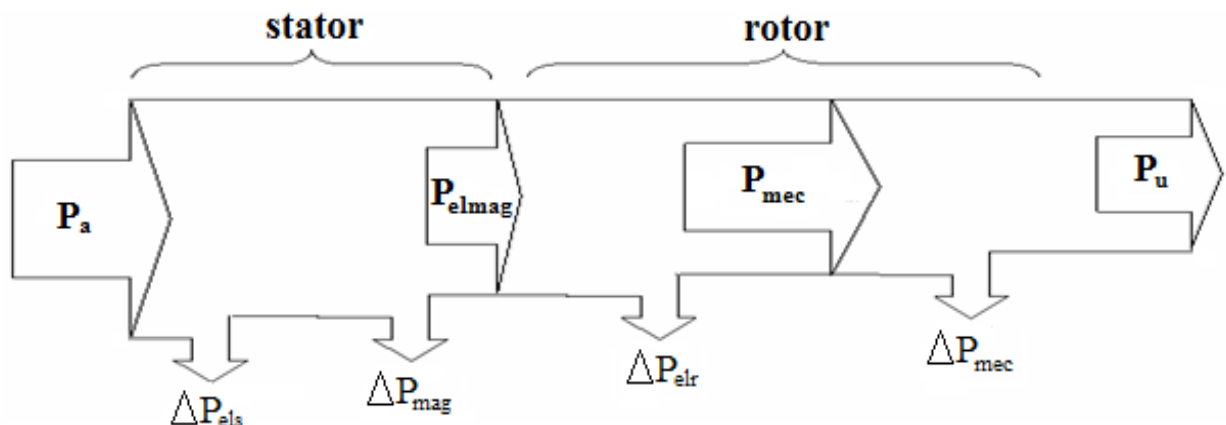


Figure 6: le diagramme énergétique du moteur asynchrone

#### 5.4. Bilan des puissances

Le bilan des puissances est déduit du diagramme énergétique du moteur asynchrone

##### ❖ Puissance absorbée ( $P_a$ )

Le moteur reçoit la puissance électrique  $P_a = \sqrt{3} U_L I_L \cos\varphi$  (quel que soit le couplage).

**Pour le couplage étoile :**  $I_L = \sqrt{3} I_{ph}$  et  $U_L = I_{ph}$

**Pour le couplage triangle :**  $I_L = \sqrt{3} I_{ph}$  et  $U_L = I_{ph}$

Cette puissance est transmise au stator de la machine qui est le siège de deux types de pertes ( $P_{js}$  et  $P_{fs}$ )

##### ❖ Pertes Joules statoriques ( $P_{js}$ ) ou Pertes électriques au stator ( $\Delta P_{els}$ )

Si on appelle  $r$  la résistance d'un enroulement du stator,  $R$  la résistance mesurée entre deux bornes du stator et  $I_L$  l'intensité en ligne

Couplage en étoile :  $\Delta P_{els} = 3 r (I_L)^2 = \frac{3}{2} R (I_L)^2$  avec  $I_L = I_{ph}$  et  $U_L = \sqrt{3} U_{ph}$

Couplage en triangle  $\Delta P_{els} = r (I_L)^2 = \frac{1}{2} R (I_L)^2$  avec  $I_L = \sqrt{3} I_{ph}$  et  $U_L = I_{ph}$

Quel que soit le couplage  $\Delta P_{els} = 3 r (I_{ph})^2 = \frac{3}{2} R (I_{ph})^2$

##### ❖ Les pertes fer ( $P_{fs}$ ) ou perte magnétique au stator ( $\Delta P_{mag}$ )

Ces pertes ne dépendent que de la tension  $U$  et de la fréquence  $f$ , elles sont considérées comme constantes si  $U$  et  $f$  constantes et sont toujours déduites des calculs (des pertes collectives ou pertes statoriques)

##### ❖ Puissance transmise au rotor ( $P_{tr}$ ) ou puissance électromagnétique ( $P_{elmag}$ )

$$\Delta P_{elmag} = P_a - \Delta P_{els} - \Delta P_{mag} = T_{elmag} \Omega_s \quad \text{Avec} \quad \Omega_s = 2 \pi n_s / 60$$

Cette puissance est transmise du stator au rotor. Le rotor est lui aussi soumis au couple  $T_{elmag}$  mais tourne à la vitesse  $\Omega$ .

❖ Pertes par effet Joule rotoriques ( $P_{jr}$ ) ou Pertes électriques au rotor ( $\Delta P_{elr}$ )

Les pertes fer au rotor sont souvent négligeables :  $\Delta P_{mag} \approx 0$  donc les pertes par effet Joule au rotor sont :

$$\Delta P_{elr} = g \cdot P_{elmag}$$

❖ Puissance transmise à l'arbre du rotor sous forme mécanique ( $P_{mec}$ )

$$P_{mec} = \Delta P_{elmag}(1 - g) = T_{elmag} \Omega \quad \text{Avec } \Omega = 2\pi n/60$$

Le rotor étant constitué de conducteurs qui possèdent des résistances, est le siège de pertes par effet Joule ainsi que de pertes mécaniques.

❖ Pertes mécanique  $\Delta P_{mec}$  et puissance utile( $P_u$ )

Le rotor est fixé à l'arbre du moteur par l'intermédiaire de roulements, il y a donc des pertes mécanique  $\Delta P_{mec}$  et une puissance utile  $P_u$

$$\Delta P_{mec} = T_f \Omega \quad \text{Où } T_f \text{ le couple de frottement}$$

$$P_u = P_{mec} - \Delta P_{mec} = T_u \Omega = T_{elmag} \Omega - T_f \Omega$$

$$P_u = P_{mec} - \Delta P_{mec}$$

$$T_u = T_{elmag} - T_f \quad \text{Où } T_u \text{ le couple utile}$$

❖ Pertes collectives ( $\Delta P_c$ )

Lors d'un essai à vide, le moteur absorbe la puissance à vide  $P_{a0}$

A vide :  $g \approx 0 \Rightarrow \Delta P_{elr} = 0, P_u = 0$ , et  $\Delta P_{els0} = \frac{3}{2} R I_0^2$  pour le couplage étoile. Le bilan des puissances à vide s'écrit :

$$P_{a0} = \sqrt{3} U_{L0} I_{L0} \cos \varphi_0 = \Delta P_{els0} + \Delta P_{mag} + \Delta P_{mec}$$

On appelle pertes collectives

$$\Delta P_c = \Delta P_{mag} + \Delta P_{mec} = P_{a0} - \Delta P_{els0}$$

❖ Rendement  $\eta$  du moteur asynchrone  $\eta$

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

**NB :** Pour que le moteur asynchrone avec une charge nominale ait un bon rendement le glissement doit être comprise entre 0,01 et 0,06 soit  $1\% \leq g \leq 6\%$

En prenant la moyenne de 0,01 et 0,06 le glissement nominal  $g_n = 0,03$  soit 3%, on en déduit la vitesse nominale du rotor en fonction de la vitesse du champ et le nombre de paires de pôles  $p$

$$g = \frac{n_s - n_{nom}}{n_s} \Rightarrow n_{nom} = (1 - g)n_s$$

$$n_{nom} = (1 - 0,03)n_s = 0,97n_s$$

$n_{nom} = 0,97n_s$  est une approximation. On peut déterminer en fonction du nombre de paires de pôles l'ensemble des vitesses normalisées des moteurs asynchrones

**Rappel :**  $n_s = \frac{60 f_1}{p}$  avec  $f_1 = 50\text{H}$  la fréquence du réseau et  $n_s$  en tr/mn

*Tableau 2: Variation de la vitesse asynchrone( $n$ ) en fonction du nombre de paires de pôles( $p$ )*

P	1	2	3	4	5
$n_s(\text{tr/mn})$	3000	1500	1000	750	600
$n_{nom}(\text{tr/mn})$	2910	1455	970	728	582

## 6. Le diagramme circulaire

### 6.1. Introduction

Le diagramme circulaire traduit les différentes positions du vecteur  $\vec{I}_K$  du courant dans le rotor, lorsque la charge varie du régime à vide jusqu'au régime en court-circuit ; c'est un arc de cercle qui est tracé par le vecteur  $\vec{I}_K$ , dont le diamètre est égal à  $I_{Kmax}$  et le glissement= 1.

Pour tracer le diagramme circulaire, on se réfère sur le schéma équivalent du moteur asynchrone de la forme Gama (  $\Gamma$  ) où on a  $\vec{I}_1 = \vec{I}_0 + \vec{I}_K$ ; le vecteur magnétisant  $\vec{I}_0$  ne change pas de position ; si on varie la charge, seul le vecteur  $\vec{I}_K$  change de position en entraînant la variation du vecteur  $\vec{I}_1$ . Il faut donc déterminer les positions de  $\vec{I}_0$  et  $\vec{I}_K$ . La position de  $\vec{I}_K$  se déplace à chaque fois en fonction du glissement donc de la charge appliquée au moteur

## 6.2. Principe de construction

On se sert du schéma équivalent du MAS de la forme Gama (  $\Gamma$  ) de la figure 5

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_0 + \vec{I}_K$$

Pour construire le diagramme circulaire on procède comme suit :

On trace le vecteur  $\vec{I}_0$ , puis le vecteur  $\vec{I}_K$  pour une charge donnée et on déduit le vecteur  $\vec{I}_1$ . En faisant varier la charge allant du régime à vide jusqu'au régime en court-circuit, on va tracer ainsi un arc de cercle de diamètre  $I_{Kmax}$ . Cet arc de cercle est le diagramme circulaire du moteur asynchrone.

Pour tracer  $\vec{I}_0$ , on détermine sa position  $\varphi_0$  par rapport au vecteur  $\vec{U}$  et son module  $I_0$ .

### Maille 1 :

$$\vec{U} = (\vec{Z}_1 + \vec{Z}_m) \vec{I}_0 \Rightarrow I_0 = \left| \frac{U}{Z_1 + Z_m} \right| = \frac{U}{\sqrt{(R_1 + R_m)^2 + (X_1 + X_m)^2}}$$

$$I_0 = \frac{U}{\sqrt{(R_1 + R_m)^2 + (X_1 + X_m)^2}}$$

$$\varphi_0 = \varphi_U - \varphi_{i0} = \arctg \left( \frac{X_1 + X_m}{R_1 + R_m} \right)$$

$\varphi_U$  - la phase à l'origine de  $\vec{U}$ .

$\varphi_{i0}$  - la phase à l'origine de  $\vec{I}_0$

$$\varphi_0 = \arctg \left( \frac{X_1 + X_m}{R_1 + R_m} \right)$$

**NB :** Pour que le moteur soit performant  $\varphi_0 \approx \pi/2$

Au bout du vecteur  $\vec{I}_0$  on fait une translation du vecteur  $\vec{U}$ . A partir de cette translation on trace le vecteur  $\vec{I}_K$ .

Pour tracer  $\vec{I}_K$  pour une charge donnée, on détermine la position  $\varphi_K$  par rapport à la translation du vecteur  $\vec{U}$  et son module  $I_K$ .

### Maille 2 ou maille fonctionnelle

$$\vec{U} = \left[ R_1 + R_2' \left( \frac{1-g}{g} \right) + j (X_1 + X_2') \right] \vec{I}_K$$

Mais on sait que  $\frac{R_2'}{g} = R_2' + R_2' \left( \frac{1-g}{g} \right)$

$$\vec{U} = \left[ \left( R_1 + \frac{R_2'}{g} \right) + j (X_1 + X_2') \right] \vec{I}_K$$

$$I_K = \frac{U}{\sqrt{\left( R_1 + \frac{R_2'}{g} \right)^2 + (X_1 + X_2')^2}}$$

$$\varphi_K = \arctg \left( \frac{X_1 + X_2'}{R_1 + \frac{R_2'}{g}} \right)$$

$I_K$  et  $\varphi_K$  vont varier en fonction du glissement  $g$ , donc de la charge. Or la charge varie du régime à vide jusqu'au régime en court-circuit.

**A vide** la vitesse de synchronisme est égale à la vitesse rotation  $n_s = n$  pour le vide idéal.

$$g = \frac{n_s - n}{n_s} \approx 0$$

**En court-circuit** la vitesse de rotation est nulle = 0 .

C'est la valeur **maximal** du glissement ( $g = \frac{n_s - n}{n_s} = 1$ ), qui va correspondre à la valeur

$$\text{maximal de } I_K = \frac{U}{\sqrt{\left( R_1 + \frac{R_2'}{g} \right)^2 + (X_1 + X_2')^2}} = I_{Kmax}$$

La valeur de  $\vec{I}_K$  en changeant de position trace un arc de cercle de diamètre  $I_{Kmax}$  et partant du bout du vecteur  $\vec{I}_0$  jusqu'à sa valeur maximale  $I_{Kmax}$

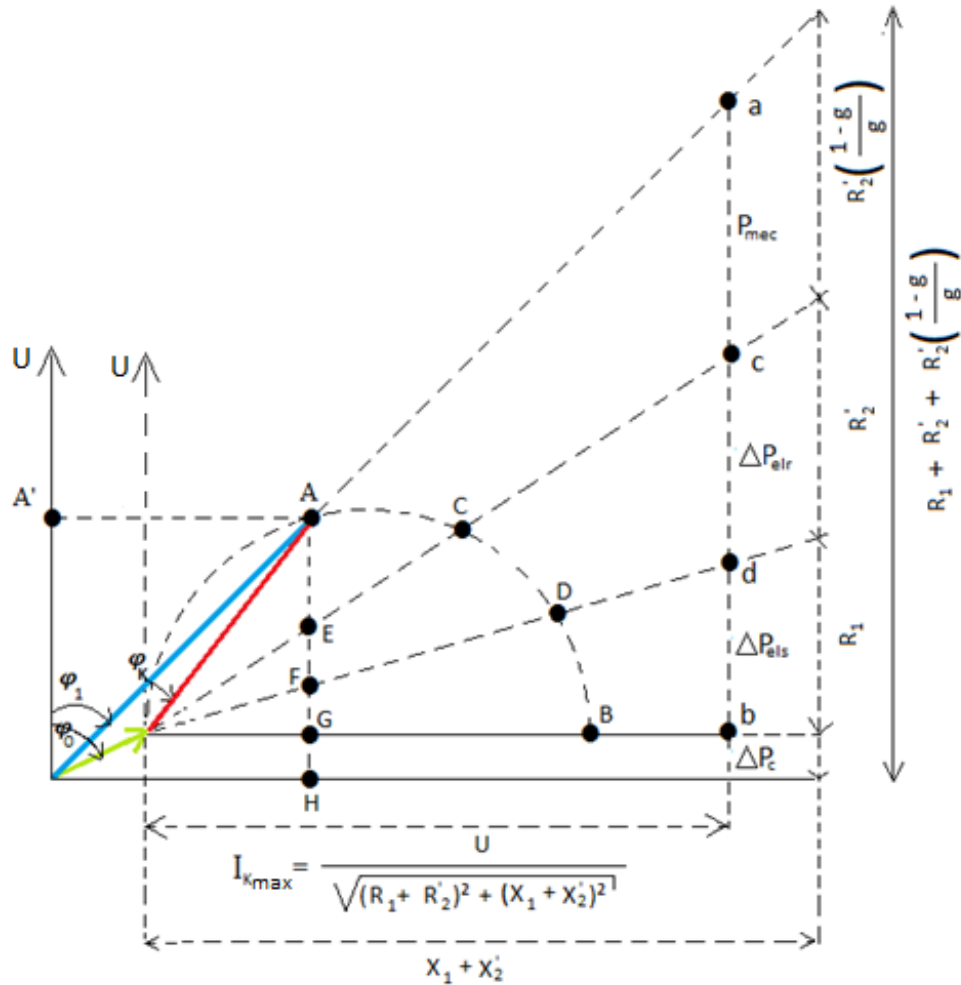


Figure 7: le diagramme circulaire du moteur asynchrone

En pratique le diagramme circulaire est tracé l'aide des essais à vide et en court-circuit.

L'essai à vide permet de tracer le vecteur  $\vec{I}_0$

### Essai à vide

$$P_{a0} = \sqrt{3} U_{L0} I_{L0} \cos \varphi_0 = 3 U_{ph0} I_{ph0} \cos \varphi_0 \Rightarrow \cos \varphi_0 = \frac{P_0}{3 U_{ph} I_{ph} \cos \varphi}$$

$$\varphi_0 = \cos^{-1} \left( \frac{P_0}{3 U_{ph0} I_{ph0}} \right)$$

$P_0$  – Puissance mesurée à vide

$I_{ph0}$  – Courant de phase mesuré à vide

$U_{ph0}$  – Tension de phase mesurée à vide



### Essai en court-circuit

$$R'_2 = R_{cc} - R_1 \quad \text{avec} \quad R_{cc} = \frac{P_{cc}}{(I_{cc})^2} = R_1 + R'_2$$

$$U_{cc} = Z_{cc} I_{cc} \Rightarrow Z_{cc} = \frac{U_{cc}}{(I_{cc})^2} = \sqrt{(R_{cc})^2 + (X_{cc})^2}$$

$$X_{cc} = \sqrt{(Z_{cc})^2 - (R_{cc})^2} = X_1 + X'_2$$

$P_{cc}$  Puissance mesurée en court-circuit

$I_{cc}$  Courant de phase mesurée en court-circuit

$R_1$  la résistance d'un enroulement du rotor mesurée à chaud

Puissance mesurée en court-circuit

$U_{cc}$  Tension de phase ou tension mesurée entre phase et neutre en court-circuit

Pour une charge donné (glissement donné) on détermine  $\varphi_k$ ,  $I_k$ ,  $R'_2 \left( \frac{1-g}{g} \right)$ . Cela nous permet de déterminer le point A.

### 6.3. Détermination des grandeurs du moteur asynchrone triphasé

#### ❖ Puissance absorbée

$$A'O = AH = A_0 \cos \varphi_1 = I_1 \cos \varphi_0 = I_{1a}$$

$$P_a = 3 U_{ph} I_{ph} \cos \varphi = 3 U_{ph} I_{1a}$$

En identifiant les expressions, on en déduit que la puissance absorbée est proportionnelle au segment AH. Le coefficient de proportionnalité est supposé être l'échelle des puissances si les courants et les résistances sont tracés avec leurs échelles respectives.

Soit **mp** l'échelle des puissances

$$P_a = AHmp$$

#### ❖ Les pertes électriques du stator

$$\Delta P_{els} = 3 R_1 (I_{ph1})^2 = FG mp$$

$$\Delta P_{els} = FG mp$$

❖ Les pertes électriques du rotor

$$\Delta P_{elr} = 3 R_2' (I_2')^2 = EF \text{ mp}$$

$$\Delta P_{elr} = EF \text{ mp}$$

❖ La puissance mécanique transmise à l'arbre

$$P_{mec} = R_2' \left( \frac{1-g}{g} \right) I_k^2 = AE \text{ mp}$$

$$P_{mec} = AE \text{ mp}$$

❖ Le couple mécanique

$$T_{mec} = \frac{P_{elmag}}{\Omega} = AF \frac{mp}{\Omega} = AF \text{ mb} \text{ Avec } mb = \frac{mp}{\Omega}$$

$$T_{mec} = AF \text{ mb}$$

❖ La puissance électromagnétique ou puissance transmise au rotor

$$P_{elmag} = P_{mec} + \Delta P_{elr} = (EA + EF)mp = AF \text{ mp}$$

$$P_{elmag} = AF \text{ mp}$$

❖ Le couple électromagnétique

$$T_{elmag} = \frac{P_{elmag}}{\Omega_s} = AF \frac{mp}{\Omega_s} = AF \text{ mc} \text{ Avec } mc = \frac{mp}{\Omega_s}$$

$$T_{elmag} = AF \text{ mc}$$

❖ Les pertes constantes ou pertes collectives

$$\Delta P_c = \Delta P_{mag} + \Delta P_{mec} = GH \text{ mp}$$

$$\Delta P_c = GH \text{ mp}$$

❖ Le glissement

$$\Delta P_{elr} = g P_{elmag} \Rightarrow g = \frac{\Delta P_{elr}}{P_{elmag}} = \frac{EF \text{ mp}}{AF \text{ mp}} = \frac{EF}{AF}$$

$$g = \frac{EF}{AF}$$

❖ Le rendement

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_a} = \frac{AE \text{ mp}}{AH \text{ mp}} = \frac{AE}{AH}$$

$$\eta = \frac{AE}{AH}$$

## 7. Les caractéristiques mécaniques du moteur asynchrone

### 7.1. Introduction

Les caractéristiques mécaniques du moteur asynchrone sont définies par l'une de ces relations suivantes

$$T = f(g); \quad T = f(n); \quad T = f(\alpha)$$

$$g = \frac{n_s - n}{n_s} = 1 - \frac{n}{n_s} = 1 - \alpha \quad \text{avec} \quad \alpha = \frac{n}{n_s}$$

$T$ - couple moteur ou électromagnétique

$g$ - glissement

$n$ - vitesse asynchrone

$\alpha$  - vitesse relative

### 7.2. Détermination de $T = f(g)$

$$P_{elmag} = P_{tr} = T \Omega_s = \frac{\Delta P_{elr}}{g} = \frac{3 R_2 I_2'^2}{g} = \frac{3 R_2' (I_2')^2}{g}$$

$I_2' = I_K$  le courant du rotor ramené au stator

$$T \Omega_s = \frac{3 R_2' (I_2')^2}{g} \Rightarrow T = \frac{3 R_2'}{\Omega_s} \frac{(I_2')^2}{g}$$

$$\Omega_s = \frac{60 f_1}{p}$$

Dans l'expression de  $T$ ,  $I_2'$  est trouvé à partir du schéma équivalent du MAS de la forme Gama ( $\Gamma$ ) de la figure 5

La maille fonctionnelle nous permet de déduire  $I_2'$

$$I_2' = \frac{U}{\sqrt{\left(R_1 + R_2' + \frac{R_2'}{g}(1-g)\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad \text{Or} \quad R_2' + \frac{R_2'}{g}(1-g) = \frac{R_2'}{g}$$

$$I_2' = \frac{U}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{g}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}}$$

$$T = \frac{3 R_2'}{\Omega_s} \frac{U^2}{g \left[ \left(R_1 + \frac{R_2'}{g}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]}$$

$$g < 0 < 1 \Rightarrow \frac{R_2'}{g} \gg R_1 \Rightarrow R_1 + \frac{R_2'}{g} \cong \frac{R_2'}{g}$$

$$T = \frac{3 R_2' U^2}{\Omega_s} \frac{1}{g \left[ \left(R_1 + \frac{R_2'}{g}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]}$$

Le moteur à l'arrêt se trouve au régime de freinage ou  $g \rightarrow +\infty$

**Au démarrage**  $n = 0 \Rightarrow g = 1 \Rightarrow T = T_d$  le couple de démarrage

$$T_d = \frac{3 R_2' U^2}{\Omega_s} \frac{1}{(R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2}$$

Avec ce couple de démarrage, qui est supérieure au couple nominal, le moteur s'accélère et son couple atteint rapidement sa valeur maximale  $T_{max}$ , correspondant à un glissement égal au glissement critique ( $g = g_{cr}$ ) ; c'est donc un extremum

Pour trouver ce point extremum, il faut annuler  $\frac{dT}{dg}$

$$\frac{dT}{dg} = 0 \Rightarrow \left( \frac{1}{g \left[ \left(R_1 + \frac{R_2'}{g}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]} \right)' = 0$$

$$\left( \frac{1}{\frac{g}{g^2} [(R_2')^2 + g^2(X_1 + X_2')^2]} \right)' = 0$$

$$\left( \frac{g}{[(R_2')^2 + g^2(X_1 + X_2')^2]} \right)' = 0$$

$$\left( \frac{U}{v} \right)' = \frac{U'v - Uv'}{v^2} = 0$$

$$U = g \Rightarrow U' = 1$$

$$v = (R_2')^2 + g^2(X_1 + X_2')^2 \Rightarrow v' = 2g^2(X_1 + X_2')^2$$

$$\frac{(R_2')^2 + g^2(X_1 + X_2')^2 - 2g^2(X_1 + X_2')^2}{[(R_2')^2 + g^2(X_1 + X_2')^2]^2} = 0$$

$$(R_2')^2 - g^2(X_1 + X_2')^2 = 0 \Rightarrow g^2 = \frac{(R_2')^2}{(X_1 + X_2')^2}$$

$$g = g_{cr} = \pm \frac{R_2'}{X_1 + X_2'}$$

En remplaçant  $g = g_{cr} = \pm \frac{R_2'}{X_1 + X_2'}$  on trouve  $\pm T_{max}$

$$T = \frac{3 R_2' U^2}{\Omega_s} \frac{1}{g \left[ \left( \frac{R_2'}{g} \right)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]} = \pm \frac{3 R_2' U^2}{\Omega_s} \frac{1}{g_{cr} \left[ \left( \frac{R_2'}{g_{cr}} \right)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]}$$

$$T_{max} = \pm \frac{3 R_2' U^2}{\Omega_s} \frac{1}{g_{cr} \left[ \frac{(R_2')^2}{(g_{cr})^2} + (X_1 + X_2')^2 \right]} = \pm \frac{3 R_2' U^2}{\Omega_s} \frac{1}{\frac{(R_2')^2}{g_{cr}} + g_{cr}(X_1 + X_2')^2}$$

$$= \pm \frac{3 R_2' U^2}{\Omega_s} \frac{g_{cr}}{(R_2')^2 + (g_{cr})^2(X_1 + X_2')^2} = \pm \frac{3 R_2' U^2}{\Omega_s} \frac{\frac{R_2'}{X_1 + X_2'}}{(R_2')^2 + \left( \frac{R_2'}{X_1 + X_2'} \right)^2 (X_1 + X_2')^2}$$

$$T_{max} = \pm \frac{3 (R_2')^2 U^2}{\Omega_s} \frac{\frac{1}{X_1 + X_2'}}{(R_2')^2 + \left( \frac{R_2'}{X_1 + X_2'} \right)^2 (X_1 + X_2')^2} = \pm \frac{3 (R_2')^2 U^2}{\Omega_s (R_2')^2} \frac{\frac{1}{X_1 + X_2'}}{1 + 1}$$

$$T_{max} = \pm \frac{3 (R'_2)^2 U^2}{2 \Omega_s (R'_2)^2} \frac{1}{X_1 + X'_2}$$

$$T_{max} = \pm \frac{3}{2} * \frac{U^2}{\Omega_s} * \frac{1}{X_1 + X'_2}$$

Avec l'accélération et la présence de la vitesse, il apparait des couples résistants internes (couple due à l'inertie du rotor  $j \frac{d\Omega}{dt}$  et couple dus aux frottements  $f\Omega$ ) qui se rajoutent au couple de charge  $T_{ch}$  pour s'opposer à la progression du couple moteur. La somme des couples résistants est :  $(\varepsilon T_r = T_{ch} + f\Omega + j \frac{d\Omega}{dt})$ . A l'égalité parfaite de  $T$  et  $\varepsilon T_r$  [ $T = \varepsilon T_r$ ] la vitesse devient constante. Le moteur atteint alors son point de fonctionnement. Ce point est traduit par l'équation dynamique du moteur :

$$T_{mot} = j \frac{d\Omega}{dt} + T_{ch} + f\Omega$$

$j$  - le moment d'inertie du rotor

$\frac{d\Omega}{dt}$  - l'accélération

$f$  - coefficient de frottement

$\Omega$  - la vitesse angulaire en rad/s

$T_{ch}$  - couple de charge qui est généralement égale à zéro en décrochant la charge

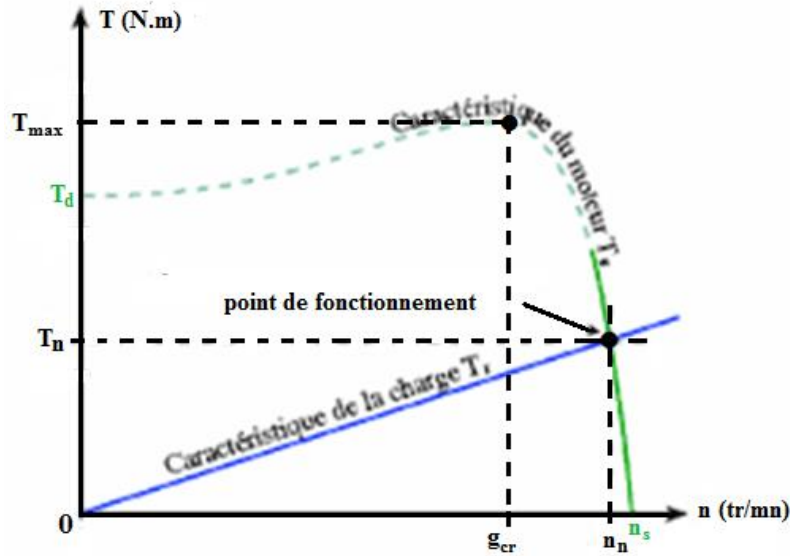


Figure 8: la caractéristique mécanique  $T = f(n)$  du MAS

Pour  $n > n_s \Rightarrow g < 0$  : le moteur passe au régime générateur

Pour  $n < 0 \Rightarrow g > 1$  : le moteur passe au régime freinage

La caractéristique montre que le moment du couple :

- est important au démarrage;
- présente un maximum;
- varie de façon presque linéaire au voisinage de la fréquence de rotation nominale.

Cette zone correspondant au fonctionnement normal du moteur, nous y établissons l'équation de la caractéristique mécanique :

$$T_u = a \cdot n + b$$

**A vide :**

$$T_U = 0 \text{ et } n_s = n_0 \Rightarrow a \cdot n_s + b = 0 \Rightarrow b = -a \cdot n_s$$

**En charge nominal:**

$$T_U = T_{Un} \text{ et } n = n_n \Rightarrow a \cdot n_n + b = T_{Un} = a \cdot n_n - a \cdot n_s = a (n_n - n_s)$$

$$n_n = n_s(1 - g)$$

$$T_{Un} = a (n_n - n_s) = a \cdot n_s(1 - g) - n_s = a \cdot n_s g = k g \text{ avec } k = a \cdot n_s$$

$$T_{Un} = k g$$

Au voisinage du point de fonctionnement nominal, le moment du couple utile est proportionnel au glissement

## Exercices d'applications

### Exercice 1 :

Sur la plaque signalétique d'un moteur asynchrone triphasé à cage, on lit les indications suivantes : 220/380V ; 50hz ; 70/40A ;  $\cos(\varphi) = 0.86$  et  $n = 725tr/mn$ .

Sachant que la résistance d'un enroulement du stator est  $r = 0.15\Omega$ , que les pertes fer du stator sont de 500W et que la tension du réseau est de 380V entre phases, déterminer :

- Le mode de couplage des enroulements du stator
- La vitesse de synchronisme et le nombre de paires de pôles par phase
- Les pertes par effet joule du stator
- Le glissement
- Les pertes par effet joule dans le rotor
- Le rendement du moteur

Les pertes mécaniques sont négligeables

### Exercice 2 :

Un moteur asynchrone triphasé tétrapolaire est alimenté par un réseau 380V- 50hz. La résistance du stator mesurée entre deux fils de phase est de  $0.9\Omega$ . En fonctionnement à vide, le moteur absorbe un courant de 9.1A et une puissance de 420W

1- Déterminer les pertes fer du stator et les pertes mécaniques en les supposant égales.

2- En charge nominale, la puissance utile sur l'arbre du rotor est de 4KW, le facteur de puissance est 0.85 et le rendement est égal à 0.87. Déterminer :

- L'intensité de courant absorbé
- Les pertes joule au stator
- Les pertes joule au rotor
- Le glissement et la vitesse de rotation
- Le couple utile

### Exercice 3 :

Un moteur asynchrone tétrapolaire, stator monté en triangle, fonctionne dans les conditions suivantes : tension entre phases :  $U = 380V$ , fréquence  $f = 60hz$ , puissance utile

$P_u = 5KW$ , vitesse de rotation  $n = 1710tr/mn$ , facteur de puissance  $\cos\varphi = 0.9$  et intensité en ligne  $I_L = 10A$ . La résistance du stator mesurée entre deux fils de phase est de  $0.8\Omega$ . On admettra pour ce fonctionnement, que les pertes dans le fer sont égales aux pertes par effet joule dans le stator.



Pour ce régime de fonctionnement, calculer :

- a) Le glissement
- b) Le couple utile
- c) L'intensité de courant dans chaque phase du stator
- d) Les pertes par effet joule au stator
- e) La puissance absorbée par le moteur
- f) Les pertes joule du rotor
- g) Le rendement du moteur

### **Exercice 4 :**

Un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné et à bagues est alimenté par un réseau triphasé 50 Hz dont la tension entre phases est  $U = 380 \text{ V}$ . Les enroulements du stator et du rotor sont en étoile. La résistance mesurée à chaud entre deux bornes de phases du stator est  $R_s = 0,2\Omega$ , celle mesurée à chaud entre deux bagues du rotor est  $R_r = 0,08\Omega$ .

A vide, le moteur tourne pratiquement à 1500 tr/min et la méthode des deux wattmètres donne:  $P_1 = 900\text{W}$  et  $P_2 = -410\text{W}$ .

- 1) Calculer le nombre de pôles du stator, le facteur de puissance et l'intensité en ligne à vide.
- 2) Les pertes mécaniques sont constantes et égales à 100 W. Calculer les pertes dans le fer du stator. Ces pertes seront considérées comme constantes.
- 3) Lors d'un essai en charge, on obtient :  $n = 1440 \text{ tr/min}$ ;  $P_1 = 4500\text{W}$ ;  $P_2 = 2000\text{W}$ . Calculer :

Le glissement, le facteur de puissance, le courant au stator, le rendement et le moment du couple utile.

- 4) Le moteur entraîne une machine dont la caractéristique mécanique est une droite d'équation :  $C_r = 20 + 0.01n$  ( $n$  s'exprime en tr/min et  $C_r$  en N.m).

- a) Calculer la vitesse de rotation du groupe et la puissance utile du moteur sachant que sa caractéristique mécanique est une droite en fonctionnement normal.
- b) Quelle résistance doit-on mettre en série avec chacun des enroulements du rotor pour que la vitesse du groupe précédent devienne 1410 tr/min.

## Exercice 5 :

On considère une machine dont les caractéristiques sont les suivantes :

$U = 220/380V$  ;  $f = 50Hz$   $P = 4$  *poles* ; Rotor bobiné couplé en étoile, en court-circuit ;

Un essai à vide, sous tension nominale, a permis de mesurer l'intensité du courant en ligne :

$I_0 = 10,5 A$ , et la puissance absorbée :  $P_0 = 1,16 kW$ .

Un essai en charge nominale, sous tension nominale, a permis de mesurer l'intensité du

courant en ligne :  $I_{Ln} = 23A$ , la puissance absorbée :  $P_a = 12,6 kW$  et le glissement

$g = 0,038$ . On néglige dans ce qui suit les résistances et inductances de fuites statoriques ainsi que les pertes mécaniques. On donne ci-contre, le schéma équivalent simplifié d'une phase de la machine.

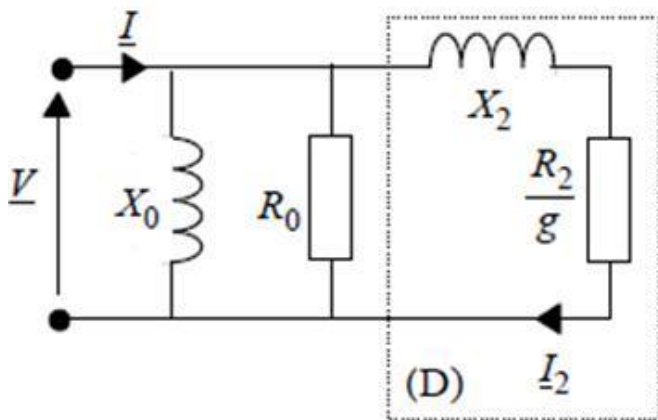
1. Fonctionnement nominal

a) Quel est le couplage des enroulements statoriques ?

b) calculer les grandeurs suivantes : vitesse de rotation (en tr/min), facteur de puissance, moment du couple utile et rendement.

2. Exploitation de l'essai à vide Calculer :

le facteur de puissance de la machine à vide et les valeurs de  $R_0$  et  $X_0$ .



3. Exploitation de l'essai nominal :

3.1. En raisonnant sur une phase, calculer :

La puissance active  $P_2$ , réactive  $Q_2$  et apparente  $S_2$  consommée par le dipôle (D).

3.2. Calculer les valeurs de  $R_2$  et  $X_2$ .

**Exercice 6 :**

Un moteur asynchrone triphasé tétrapolaire 220/380 V à rotor bobiné et à bagues est alimenté par un réseau 127-220V /50 Hz. Un essai à vide à une vitesse de rotation très proche du synchronisme a donné une puissance absorbée, mesurée par la méthode des deux wattmètres :

$$P_1 = 1160W \text{ et } P_2 = -660$$

Un essai en charge a donné :

- courant absorbé :  $I = 12,2 \text{ A}$ ,
- glissement :  $g = 6 \%$ ,
- puissance absorbée mesurée par la méthode des deux wattmètres :  
 $P_1 = 2500W \text{ et } P_2 = -740W$ .

La résistance d'un enroulement statorique est  $R = 1\Omega$ .

- 1) Quelle est, des deux tensions indiquées sur la plaque signalétique, celle que peut supporter un enroulement du stator. En déduire le couplage du stator sur un réseau 220 V.
- 2) Dans le fonctionnement à vide, supposé équilibré, calculer :
  - la vitesse de rotation (égale à la vitesse de synchronisme).
  - la puissance réactive  $Q_0$  absorbée
  - l'intensité du courant en ligne  $I_0$
  - le facteur de puissance 0 vide  $\cos\phi$
  - les pertes constantes. En déduire les pertes fer dans le stator supposées égales aux pertes mécaniques.
- 3) Dans le fonctionnement en charge, calculer :
  - la fréquence de rotation
  - la puissance transmise au rotor
  - la puissance utile, le rendement
  - le moment du couple utile sur l'arbre  $C_u$
  - le facteur de puissance.
- 4) Calculer la capacité des condensateurs qui, montés en triangle, relèveraient à 0,86 AR le facteur de puissance du moteur en charge.
- 5) Quelle serait alors la nouvelle intensité en ligne ?
- 6) Ce moteur entraîne une machine dont le moment du couple résistant  $C_r$  en N.m est donné en fonction de la vitesse de rotation  $n$  en tr/min par la relation :  $C_r = 8 \cdot 10^{-6} n^2$ . La partie utile de la caractéristique  $C_u = f(n)$  du moteur est une droite.
  - a) Donner l'expression de  $C_u = f(n)$

- b) Déterminer la vitesse de rotation du groupe et calculer la puissance utile du moteur.
- c) Les enroulements du rotor sont couplés en étoile et la résistance mesurée entre deux bagues est  $1, 2\Omega$ . Quelle résistance doit-on mettre en série avec chacun des enroulements du rotor pour que la vitesse de rotation du groupe devienne 1300 tr/min.

M. DIOR

## Correction exercices d'applications

**Exercice 1 :**

a) La tension supportée par chaque enroulement est égale à la tension simple du réseau triphasé. Les enroulements statiques doivent être couplés en étoile

b) La vitesse de synchronisme

$$n = 725 \text{ tr/mn} \Rightarrow n_s = 750 \text{ tr/mn} \Rightarrow P = 4$$

c) Les pertes par effet joule au stator

$$\Delta P_{els} = 3r(I_{ph})^2 = 720W$$

d) Le glissement

$$g = (n_s - n)/n_s = 3,3\%$$

e) Les pertes joule rotorique

$$\Delta P_{elr} = g[P_a - (\Delta P_{els} + \Delta P_{mag})] = 707W$$

f) Le rendement du moteur

$$\eta = P_u/P_a = 91\%$$

**Exercice 2 :**

1- les pertes fer du stator et les pertes mécaniques

$$P_{mag} = P_{mec} = (P_{a0} - \Delta P_{els0})/2 = 154W$$

2-Fonctionnement nominal

a) Le courant absorbé

$$I = P_u/(\eta \cdot \sqrt{3}U \cdot \cos\varphi) = 8.2A$$

b) Les pertes joule statoriques

$$\Delta P_{els} = \frac{3}{2}R(I_{ph})^2 = 90,7W$$

c) Les pertes joule au rotor

$$\Delta P_{elr} = [P_a - (P_u + \Delta P_{els} + \Delta P_{mag} + \Delta P_{mec})] = 199W$$

d) le glissement

$$g = \frac{\Delta P_{elr}}{[P_a - (\Delta P_{els} + \Delta P_{mag})]} = 4.5\%$$

La vitesse de rotation

$$n = n_s(1 - g) = 1432 \text{ tr/mn}$$

e) Le couple utile

$$T_u = P_u/\Omega = 26.6N.m$$