

## Étude d'une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné

### I - Objectifs poursuivis

#### 1.1 Relevé des caractéristiques électromécaniques.

Il s'agit ici de charger le moteur asynchrone (ce qui signifie en termes de mécanique de lui opposer un couple résistant) afin d'être renseigné sur son comportement en vitesse, sur son rendement, son facteur de puissance, son couple utile etc... en fonction de la charge sur l'arbre.

Une fois ces renseignements obtenus (et consignés sur des courbes) on peut alors savoir si ce moteur est susceptible de convenir ou non à une application donnée.

La partie expérimentale correspondante sera développée à partir de la partie 3.

#### 1.2 Recherche d'un modèle

Les liens qui existent entre courants, tensions, flux,... dans un moteur permettent d'imaginer des associations de composants simples et connus qui tiennent compte du fonctionnement du moteur, d'apparence complexe. Ces associations constituent un modèle. C'est dans la partie 5 que seront faites les mesures spécifiques permettant de trouver les éléments du modèle. Le rôle d'un modèle est de pouvoir chiffrer, c'est à dire de prévoir les valeurs des diverses grandeurs caractérisant le fonctionnement du moteur.

Un exemple de modèle : Une diode à l'état passant se comporte comme une f.c.é.m. de 0,7 V environ en série avec une résistance de quelques milliohms.(mΩ)

### II - généralités sur la machine asynchrone

Une étude détaillée sera faite en cours. Nous nous bornerons ici à une présentation succincte qui, souhaitons-le, sera suffisante pour une bonne compréhension de l'ensemble des manipulations à effectuer.

#### 2.1 - Stator

La machine asynchrone est une machine à champ tournant (on dit aussi à force magnétomotrice tournante). Ce champ tournant est obtenu par application de tensions triphasées de pulsation  $w$  aux enroulements polyphasés statoriques à  $2p$  pôles par phase. Ce champ est constitué d'une succession de  $2p$  pôles alternativement nord et sud. Ce champs magnétique tourne à la vitesse de synchronisme  $\Omega_s = \frac{w}{p}$ . On obtient ainsi un champ magnétique tournant par un processus purement statique.( EDF :  $\omega_{edf} = 2 * F_{edf}$  avec  $F_{edf} = 50$  Hz ; AVION :  $\omega_{avon} = 2 * F_{avion}$  avec  $F_{avion} = 400$  Hz )

## 2.2 - Rotor

Le rotor est formé d'enroulements polyphasés répartis sur un cylindre magnétique. Ces enroulements constituent une succession de  $2p$  pôles comme ceux du stator. La machine des T.P. est à rotor bobiné, il existe d'autres rotors dits à "cage d'écureuil". Dans tous les cas, les enroulements ainsi constitués sont fermés sur eux-mêmes. (Rotor en court-circuit).

Admettons que le rotor tourne. La vitesse angulaire  $\mathbf{W}$  du rotor est nécessairement différente de la vitesse du champ tournant qu'il voit donc défiler. En effet : s'il y a rotation c'est qu'il s'est développé un couple, ce dernier résulte de l'interaction des champs statorique et champ rotorique. Or le champ rotorique est induit, c'est à dire qu'il résulte de la génération de courants polyphasés induits par le stator dans le rotor. Cela signifie que chaque enroulement rotorique est le siège d'une fém induite donc d'une variation de flux, ceci n'est possible que dans la mesure où la vitesse du champ tournant ("inducteur") se déplace à une autre vitesse que celle de l'enroulement ("induit") rotorique.

## 2.3 - Fréquences - Vitesses

Le champ statorique tourne à la vitesse  $\mathbf{w}_s = \frac{\mathbf{w}}{p} = 2p \frac{f}{p} = 2p \cdot N_s$ ,

Avec  $f$  la fréquence du réseau d'alimentation,  $N_r$  la vitesse du rotor en tr/s (RPM), et  $\mathbf{W}_r$  la vitesse du rotor en rad/s. On notera la pulsation des courants rotoriques  $\mathbf{w}_r$ . En fonctionnement moteur, la vitesse relative du champ statorique par rapport à la vitesse du rotor est  $\mathbf{W}_s - \mathbf{W}_r > 0$ . On définit alors le **glissement**  $g$  de la manière suivante:

$$g = \frac{\mathbf{W}_s - \mathbf{W}_r}{\mathbf{W}_s}$$

Les courants polyphasés induits dans le rotor circulent dans des enroulements polyphasés, leur fréquence est  $f_r = gf$ . Ils engendrent un champ tournant dont la vitesse absolue est  $N_s$  (ou  $\mathbf{W}_s$ ), c'est à dire que la machine asynchrone est en fait synchrone du point de vue magnétique (synchronisme des champs magnétiques et rotoriques). C'est le rotor qui glisse par rapport à son propre champ, d'où le qualificatif de "asynchrone".

Les champs statorique et rotorique tournent à la vitesse de synchronisme  $\mathbf{W}_s$ . Il se composent pour former un champ magnétique tournant résultant, ou un flux tournant résultant. Si on pose  $\mathbf{f}$  la valeur efficace du flux dans un enroulement statorique et dans un enroulement rotorique, alors les fém qui y sont induites ont respectivement pour valeurs efficaces :

$$E_1 = K_1 N_1 \mathbf{f} \quad (e_1(t) \text{ en instantané})$$

$$E_2 = K_2 N_2 \mathbf{f} \quad (e_2(t) \text{ " " "})$$

$K_1$  et  $K_2$  sont des coefficients de bobinage,  $N_1$  et  $N_2$  des nombres de spires.

Ces deux relations font penser à celles obtenues pour un transformateur. Mais dans le cas de la machine asynchrone la f.e.m.  $e_1(t)$  a pour fréquence  $f$  alors que la f.e.m.  $e_2(t)$  a une fréquence  $f_r = gf$  qui varie en fonction de la charge. Dans un transformateur, la fréquence qui apparaît au secondaire est fixe et égale à celle imposée au primaire. le rapport de

transformation  $m$  de la machine asynchrone se définit à partir de la relation suivante:  $\frac{E_2}{E_1} = \frac{K_2 N_2}{K_1 N_1} g = mg$

## 2.4 - Modèle équivalent monophasé

Afin de se raccrocher à des choses connues, il a été établi une représentation schématique de la machine asynchrone que l'on appellera "modèle".

Sachant que stator et rotor fonctionnent en régime alternatif et qu'ils sont magnétiquement couplés, il est tentant de modéliser la machine asynchrone à partir du transformateur monophasé auquel on associera les inductances de fuites  $l_1$  et  $l_2$  puis les résistances  $r_1$  et  $r_2$ , les pertes fer et le courant magnétisant ayant pour supports  $R_0$  et  $L_0$  respectivement. On définira ainsi les impédances de fuites  $z_1 = r_1 + j l_1 \omega$  et  $z_2 = r_2 + j l_2 \omega_r = r_2 + j l_2 g \omega$ .

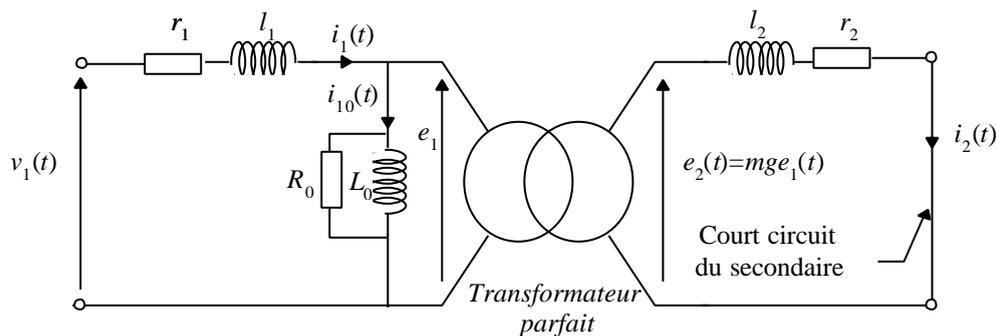
Une difficulté persiste cependant car, comme nous l'avons vu, les fréquences  $f_r$  des courants rotoriques sont différentes de  $f$  contrairement à ce qui se passe pour le transformateur. Pour tenir compte de la spécificité de la machine asynchrone, on avance les arguments suivants :

$\alpha$  - La valeur efficace du champ tournant rotorique ne dépend que de la valeur efficace des ampères-tours (AT) rotoriques, c'est à dire  $N_2 I_2$ , quelle que soit la fréquence  $f_r$  de ces courants.

$\beta$  - La vitesse de rotation  $N_s$  du champ tournant résultant est obtenue par des courants rotoriques polyphasés de fréquence  $f_r = g f$  entraînés par le rotor à la vitesse  $N_r$ .

$\gamma$  - On peut également créer un même champ tournant rotorique tournant à la vitesse  $N_s$  en bloquant le rotor et en l'alimentant par des courants de fréquence  $f$  et de même valeur efficace.

Ces arguments sont exploités pour utiliser le schéma équivalent du transformateur. Le stator devient primaire alimenté sous une tension  $v_1(t)$  de fréquence  $f$ . Le rotor devient secondaire, il développe une fém induite de valeur efficace  $E_2 = m g E_1$  de fréquence  $f$ , l'impédance des fuites  $z_2$  conservant sa valeur  $r_2 + j l_2 g \omega$ .



Remarques :

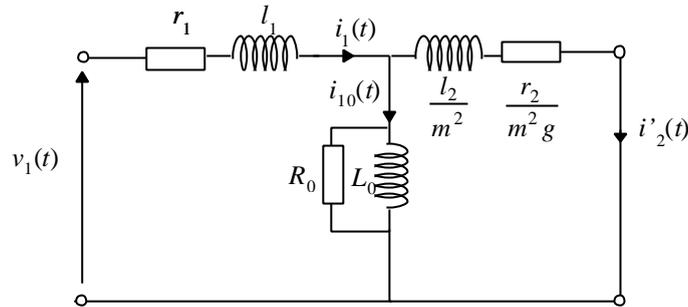
◆ On suppose que la machine asynchrone fonctionne en régime équilibré. Cela signifie que les trois phases sont équivalentes, d'où la représentation monophasée qui en découle.

◆ Lorsque le glissement  $g$  est égal à un ce qui correspond à une vitesse du rotor  $N_r$  nulle (rotor bloqué), la machine asynchrone se comporte alors comme un transformateur dont le secondaire est court-circuité, dans ce cas  $f_r = f$ .

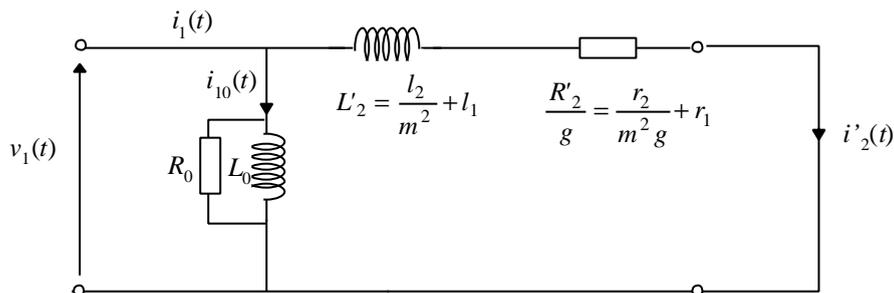
## 2.5 - Schéma électrique simplifié

Nous allons dans un premier temps supprimer le transformateur parfait en utilisant la même démarche que pour le transformateur, c'est à dire "ramener" au stator (primaire) les éléments du rotor (secondaire). On cherche donc à déterminer l'impédance équivalente parcourue par le courant  $i'_2 = mi_2$ , sous la tension  $e_1$ .

$$Z_{eq} = \frac{E_1}{I_1 - I_{10}} = \frac{E_1}{I'_2} = \frac{E_2}{mg} * \frac{1}{mI_2} = \frac{E_2}{I_2} * \frac{1}{m^2} = (r_2 + jl_2g\omega) * \frac{1}{m^2} \Rightarrow Z_{eq} = \frac{r_2}{m^2g} + j \frac{l_2}{m^2} \omega$$



Afin de s'affranchir du diviseur de tension ( $z_1, L_0, R_0$ ) on opère une ultime transformation qui constitue une approximation souvent grossière. On déplace le circuit de magnétisation en aval de l'impédance  $z_1$ . On obtient le schéma suivant:



Remarque :

Dans les applications courantes de la machine asynchrone, il arrive généralement que  $r_1 \ll \frac{r_2}{m^2g}$  alors  $\frac{R'_2}{g} \cong \frac{r_2}{m^2g}$

## 2.6 - Bilans énergétiques du modèle simplifié

### 2.6.1 - Puissance et couple électromagnétique

La résistance  $R_0$  modélise les pertes électromagnétiques et dissipe une puissance constante pour une tension d'alimentation fixée. La résistance  $R'_2/g$  du modèle dissipe la puissance électromagnétique, notée  $P_{em}$ . Elle transite du stator au rotor via l'entrefer. Sachant que le champ magnétique résultant tourne à la vitesse angulaire  $\mathbf{W}_s = \omega p$ , on déduit le couple électromagnétique  $C_{em}$  de l'expression de la puissance électromagnétique  $P_{em} = C_{em} \mathbf{W}_s$  Soit :

$$C_{em} = \frac{1}{\mathbf{W}_s} \frac{3R'_2}{g} I_2'^2$$

avec  $I_2'^2 = \frac{V_1^2}{\left(\frac{R_2'}{g}\right)^2 + (L_2' \omega)^2}$  on obtient l'expression du couple électromagnétique suivante:

$$C_{em} = \frac{2C_{max}}{\frac{g}{g_{max}} + \frac{g_{max}}{g}} \quad \text{avec} \quad C_{max} = \frac{3}{2} \frac{V_1^2}{W_s} \frac{1}{L_2' \omega}; \quad g_{max} = \frac{R_2'}{L_2' \omega}$$

### 2.6.2 - Couple mécanique

On peut également rechercher l'expression du couple mécanique. La puissance mécanique est  $P_{mec} = P_{em} - P_{JR}$  en appelant  $P_{JR}$  les pertes joules rotoriques. Les pertes joules effectives au rotor sont  $P_{JR} = 3R_2' I_2'^2$ . D'où :

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

Cette puissance est distribuée à la vitesse angulaire rotorique  $\omega_r = \omega_s(1-g)$ . Le couple mécanique  $C_{mec}$  est donné par:

$$C_{mec} = \frac{P_{mec}}{\omega_r} = 3 \frac{R_2'}{g} I_2'^2 \frac{1}{\omega_s} = \frac{P_{em}}{\omega_s}$$

Il y a donc égalité entre les couples mécanique et électromagnétique. On obtient de plus les relations suivantes entre les puissances:

$$P_{meca} = \frac{\omega_r}{\omega_s} P_{em} = (1-g) P_{em}; \quad P_{JR} = P_{em} - P_{meca} = g P_{em}$$

### 2.6.3 - Puissance utile - Couple utile

La puissance mécanique utile est définie par la relation suivante:  $P_u = P_{mec} - P_p$ , en désignant par  $P_p$  les pertes mécaniques. Le couple utile s'en déduit de la manière suivante:

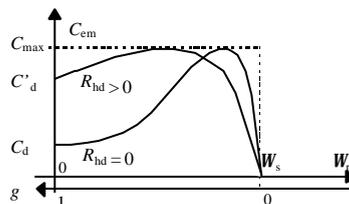
$$C_u = \frac{P_u}{\omega_r} = \frac{P_{mec} - P_p}{\omega_r}$$

### 2.6.4 - Couple au démarrage de la machine asynchrone

Le couple instantané au démarrage est obtenu en remplaçant dans l'expression du couple électromagnétique  $g$  par un. On obtient l'approximation du couple de démarrage  $C_d$  suivante sachant que  $g_{max}$  est de l'ordre de 10%.

$$C_d \cong 2C_{max} g_{max} = \frac{3}{2} \frac{V_1^2}{W_s} \frac{R_2'}{L_2'^2 \omega^2}$$

Cette quantité est généralement faible (20% du couple max.), et lorsque le moteur est chargé il peut ne pas démarrer. Une solution consiste à augmenter artificiellement la résistance rotorique (par un rhéostat extérieur) pour accroître le couple au démarrage. Le rhéostat est progressivement court-circuité au fur et à mesure que le rotor prend de la vitesse.

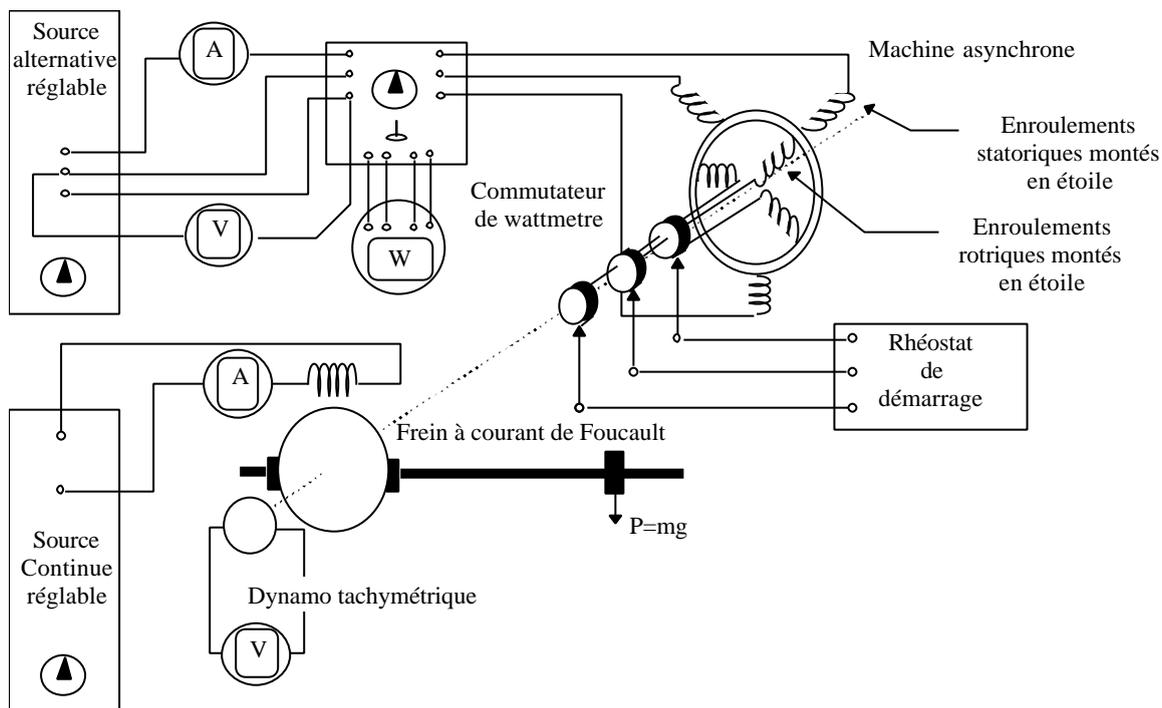


### III - Environnement expérimental : attention DANGER ELECTRIQUE ⚡ .

**Demandez au professeur avant toute mise sous tension.**

**Utiliser le matériel en bon état. Faire constater toute anomalie.**

La machine des T.P. possède quatre pôles (sous entendu par phase) soit  $p = 2$ . Ceci assure à 50 Hz une vitesse de synchronisme  $N_s = 50/2 = 25$  tr/s soit 1500 tr/mn. La plaque signalétique de la machine indique la vitesse nominale. Cette plaque indique également les tensions à appliquer selon que le montage du stator est triangle ou étoile ainsi que les intensités nominales correspondantes (à ne pas dépasser). La machine sera alimentée en 220/380 (240/400V) au moyen de l'alimentation isolée variable. Chaque enroulement du stator ayant une tension nominale de 220 V, Il faut donc effectuer un câblage étoile du stator.4



Le courant de ligne est mesuré par un ampèremètre. On travaillera avec une tension d'alimentation constante. Un voltmètre placé entre deux phases indique la valeur de la tension appliquée. Un commutateur rotatif permet la mesure de puissance selon la méthode des deux wattmètres.

La mise en rotation du moteur se fait en court-circuitant progressivement le rhéostat de démarrage  $R_{hd}$ . Ce rhéostat n'est pas conçu pour dissiper en permanence l'énergie rotorique de la machine. Sa position de fonctionnement après démarrage est celle en court-circuit.

**Ne pas oublier de ramener le rhéostat  $R_{hd}$  à sa position initiale après coupure de l'alimentation.**

La charge du moteur peut être a priori quelconque. La charge est ici constituée par un frein à courant de Foucault fixé sur une carcasse oscillante dont le débattement est limité par deux butées. Sur cette carcasse se trouve deux bras de levier. Un bras court sur lequel coulisse un contre poids  $CP$  permettant d'équilibrer le frein. Le bras long comporte un poids  $P$  coulissant et une règle graduée. L'équilibre se fait à l'arrêt, le poids  $P$  enlevé du bras de levier, en déplaçant le contre

poids  $CP$ . En rotation, le courant d'excitation du frein impose un couple de charge à la machine asynchrone. Ce couple de charge se mesure en équilibrant le bras de levier à l'horizontale à l'aide du poids  $P$ . Le moment utile de la machine asynchrone est alors égal au produit de la distance à l'axe indiquée sur la règle graduée par le poids  $P$ .

## IV - Caractéristiques électromécaniques

### 4.1 - Variables à mesurer

Le moteur est donc chargé par un frein à courant de Foucault. l'excitation du frein est réglée à l'aide de la source continue réglable. On veillera à ne pas dépasser le courant d'excitation nominal ( $I_{en} = 1.5A$ ). La vitesse est mesurée à l'aide d'un tachymètre branché sur un voltmètre électronique. La constante de la dynamo est de 20 mV/(tr/mn)

La valeur du couple utile de la machine asynchrone est égale au produit de la distance à l'axe indiquée sur la règle graduée par le poids  $P$  si le frein a été correctement équilibré.

La mesure de la puissance  $P_2$  sur l'arbre se déduit du couple moteur (ou couple utile)  $C_{mec}$  et de la vitesse du rotor  $N_R$ :

$$P_2 = \frac{2\pi N_R}{60} * C_{mec} \text{ avec } (N_R \text{ en tr/mn})$$

La mesure de la puissance électrique absorbée  $P_1$  est effectuée à l'aide du commutateur de wattmètre. On mesure  $W_1$  et  $W_2$ , et on en déduit  $P_1 = W_1 + W_2$  (On appellera  $W_1$  le terme qui reste toujours de même signe).

Le calcul du facteur de puissance se déduit de  $\tan j$  donnée par l'expression  $\tan j = \sqrt{3} \frac{W_1 - W_2}{W_1 + W_2}$

Le calcul du rendement du moteur est donné par  $r = \frac{P_{mec}}{P_{abs}} = \frac{P_2}{P_1}$

### 4.2 - Mesures et exploitation

#### 4.2.1 - Mesures

On relèvera à vide puis pour des couples de charges croissant jusqu'à la charge nominale:

- le courant de ligne  $I$
- les puissances partielles  $W_1$  et  $W_2$
- la vitesse  $N_R$
- Le couple utile  $C_u$ .

#### 4.2.2 - Tracer les courbes:

- a - du courant de ligne  $I$  en fonction de  $P_2$ .
- b - du couple  $C_{mec}$  en fonction de  $P_2$ .
- c - du facteur de puissance  $\cos j$  en fonction du courant de ligne  $I$ .
- d - du rendement  $r$  en fonction de  $P_2$ .
- e - du couple  $C_{mec}$  en fonction de  $N_R$ .

#### 4.2.3 - Exploitation:

Chaque courbe devra être commentée avec pertinence.

## V - Détermination du modèle équivalent

C'est à l'aide d'un ensemble de mesures que l'on va déterminer les éléments du modèle simplifié. La justification des mesures qui suivent sera faite dans la partie 5-2.

### 5.1 - Expérimentation

#### 5.1.1 Mesures en court-circuit

Court-circuiter le circuit rotor à l'aide du rhéostat de démarrage, la tension d'alimentation étant nulle. Bloquer le rotor. Ensuite, appliquer par l'intermédiaire de l'autotransformateur une tension croissante jusqu'à ce que l'intensité de ligne atteigne sa valeur nominale :  $I_{1CC} = I_{1N}$

- Mesurer  $U_{1CC}$ ,  $I_{1CC}$ .

- Mesurer  $W_{1CC}$ ,  $W_{2CC}$ .

#### 5.1.2 Mesures à vide

*a - A l'arrêt*

- Ramener le rhéostat rotorique à la position "arrêt".

- Appliquer la tension nominale.

- Mesurer la puissance statorique  $P_{10}$  ainsi que l'intensité de ligne  $I_{10}$ .

- Mesurer les tensions  $U_{20}$ , et  $U_{10}$  entre deux phases au rotor et au stator.

- En déduire la valeur du rapport de transformation  $m = \frac{U_{20}}{U_{10}} \cong \frac{E_2}{E_1}$ .

### 5.2 - Exploitation

#### 5.2.1 Essai en court-circuit : détermination de $R'_2$ et $L'_2$

La tension primaire étant faible, les pertes fer sont réduites, on admettra donc que  $P_{1CC} = W_{1CC} + W_{2CC}$  n'est dépensée que sous forme Joule dans le rotor. Le rotor étant bloqué,  $g$  vaut 1. L'élément chauffant vaut:  $\frac{R'_2}{g} = R'_2 = r_1 + \frac{r_2}{m^2}$

De la mesure de la puissance absorbée on déduit la valeur de la résistance  $R'_2$  :

$$R'_2 = r_1 + \frac{r_2}{m^2} = \frac{P_{1CC}}{3I_{1CC}^2}$$

Comparer la résistance calculée et celle obtenue à l'aide des valeurs portées sur la machine.

Montrer que l'inductance  $L'_2$  sous la même hypothèse peut s'écrire:  $L'_2 = l_1 + \frac{l_2}{m^2} = \frac{\sqrt{(3V_{1CC} I_{1CC})^2 - P_{1CC}^2}}{3\omega I_{1CC}^2}$

Il est rappelé que  $V_{1CC}$  est la valeur efficace de la tension aux bornes d'une phase et diffère de  $U_{1CC}$  d'un facteur  $\sqrt{3}$ .

Déterminer la valeur de l'inductance  $L'_2$ .

### 5.2.2 Essai à vide sous tension nominale rotor ouvert : détermination de $R_0, L_0$

La puissance absorbée à vide correspond aux pertes fer dans le rotor et le stator d'une part et aux pertes joules dans le stator d'autre part. Soit :  $P_{10} = W_{10} + W_{20} = 3r_1 I_{10}^2 + P_{fer}$ . Les pertes mécaniques sont nulles. On montre que les pertes fer ainsi calculées ( $P_{fer} = P_{10} - 3r_1 I_{10}^2$ ) sont supérieures à celles que l'on a effectivement en charge. On gardera

cependant cette valeur. Dans ces conditions:  $R_0 = \frac{3V_{10}^2}{P_{10} - 3r_1 I_{10}^2}$  et  $L_0 \omega = \frac{3V_{10}^2}{\sqrt{(3V_{10} I_{10})^2 - P_{10}^2}}$

### 5.2.3 Tracé du couple électromagnétique

Le modèle ainsi élaboré permet de calculer  $C_{em}$ . Le calcul littéral a été effectué dans la partie II.

- Tracer  $C_{em} = f(g)$  pour  $0 < g < 1$ . Coter la courbe.
- Tracer  $C_{em} = f(N_R)$  pour  $1400 \text{ RPM} < N_R < 1500 \text{ RPM}$  sur la même feuille que la caractéristique expérimentale.

Pour ce faire on utilisera la relation  $N_R = (1-g) N_s = (1-g) 1500$ .