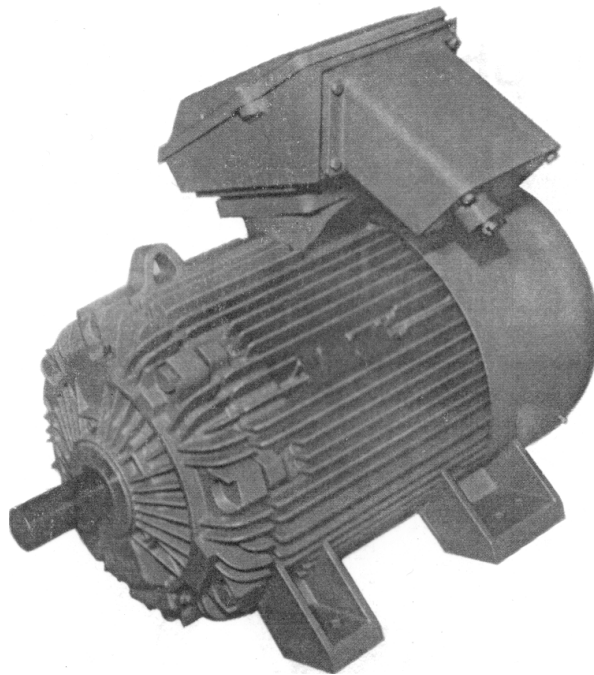


# **Cours d'électrotechnique**

**MACHINE TOURNANTE A COURANT ALTERNATIF**

**LES MACHINES ASYNCHRONES**



PARTIE N°2 :

**LE MOTEUR**

## TABLE DES MATIERES

|          |   |    |
|----------|---|----|
| 1.       | Le principe de fonctionnement .....                             | 3  |
| 2.       | Les modifications au sein de la machine lors du démarrage ..... | 5  |
| 2.1.     | Diagramme vectoriel .....                                       | 6  |
| 2.2.     | Conclusion.....   | 7  |
| 3.       | Les différentes caractéristiques d'un moteur asynchrone.....    | 8  |
| 3.1.     | Schéma de câblage .....   | 8  |
| 3.2.     | Fonctionnement à vide .....                                     | 8  |
| 3.2.1.   | $I_s=f(g)$ .....  | 8  |
| 3.2.1.1. | Mode opératoire .....   | 8  |
| 3.2.1.2. | Courbe .....  | 8  |
| 3.2.1.3. | Explication .....   | 9  |
| 3.2.2.   | $C=f(g)$ .....  | 9  |
| 3.2.2.1. | Mode opératoire .....   | 9  |
| 3.2.2.2. | Courbe .....  | 9  |
| 3.2.2.3. | Explication .....   | 10 |
| 3.3.     | Fonctionnement en charge.....                                   | 10 |
| 3.3.1.   | $\cos\phi=f(P_{ut})$ .....                                      | 10 |
| 3.3.1.1. | Mode opératoire .....   | 10 |
| 3.3.1.2. | Courbe .....  | 10 |
| 3.3.1.3. | Explication .....   | 11 |
| 3.3.2.   | $\eta=f(P_{ut})$ .....  | 11 |
| 3.3.2.1. | Mode opératoire .....   | 11 |
| 3.3.2.2. | Courbe .....  | 11 |
| 3.3.2.3. | Explication .....   | 11 |
| 3.3.3.   | $I_{st}=f(P_{ut})$ .....  | 12 |
| 3.3.3.1. | Mode opératoire .....   | 12 |
| 3.3.3.2. | Courbe .....  | 12 |
| 3.3.3.3. | Explication .....   | 12 |
| 3.3.4.   | $g=f(P_{ut})$ .....   | 13 |
| 3.3.4.1. | Mode opératoire .....   | 13 |
| 3.3.4.2. | Courbe .....  | 13 |
| 3.3.4.3. | Explication .....   | 13 |
| 3.3.5.   | $C=f(P_{ut})$ .....   | 14 |
| 3.3.5.1. | Mode opératoire .....   | 14 |
| 3.3.5.2. | Courbe .....  | 14 |
| 3.3.5.3. | Explication .....   | 14 |
| 4.       | Bilan énergétique.....  | 15 |
| 5.       | Les formules liées au moteur asynchrone.....                    | 15 |
| 6.       | Le diagramme du cercle (avec les hypothèses) .....              | 18 |
| 7.       | Les différents mode de démarrage d'un moteur asynchrone .....   | 19 |
| 7.1.     | Par action sur le stator .....                                  | 19 |
| 7.1.1.   | Placement de résistance statorique .....                        | 19 |
| 7.1.2.   | Sous tension d'alimentation réduite .....                       | 20 |
| 7.1.3.   | Placement d'un rhéotor au stator.....                           | 20 |
| 7.1.4.   | Démarrage étoile triangle .....                                 | 21 |
| 7.2.     | Par action sur le rotor .....                                   | 22 |
| 8.       | Calcul d'un rhéostat de démarrage .....                         | 24 |

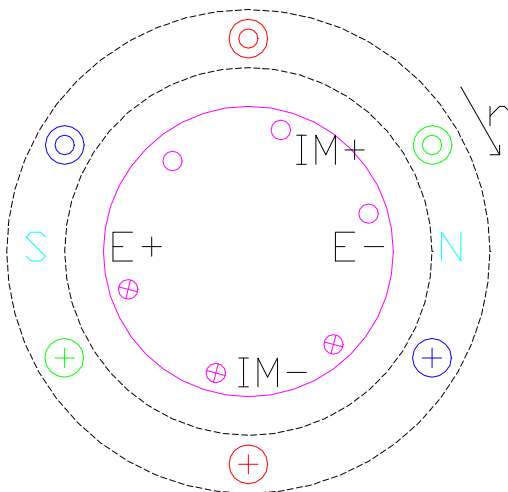
|       |   |    |
|-------|---|----|
| 9.    | Les moteurs spéciaux.....   | 26 |
| 9.1.  | Moteur à double cage .....  | 26 |
| 9.2.  | Moteur à plusieurs vitesses .....   | 26 |
| 9.3.  | Moteur à fréquence de rotation réglable ou encore appelé cascade<br>hyposynchrone | 26 |
| 9.4.  | Moteur avec variateur de fréquence .....  | 27 |
| 9.5.  | Moteur à enroulements séparés .....   | 27 |
| 9.6.  | Moteur Dalhander .....  | 27 |
| 10.   | Freinage des moteurs asynchrones .....  | 28 |
| 10.1. | Freinage à contre courant .....   | 28 |
| 10.2. | Freinage par injection de courant continu .....                                   | 28 |
| 10.3. | Freinage par fonctionnement en hypersynchrone .....                               | 28 |
| 10.4. | Fonctionnement en génératrice asynchrone .....                                    | 28 |
| 11.   | Exercices.....  | 29 |

## 1. Le principe de fonctionnement

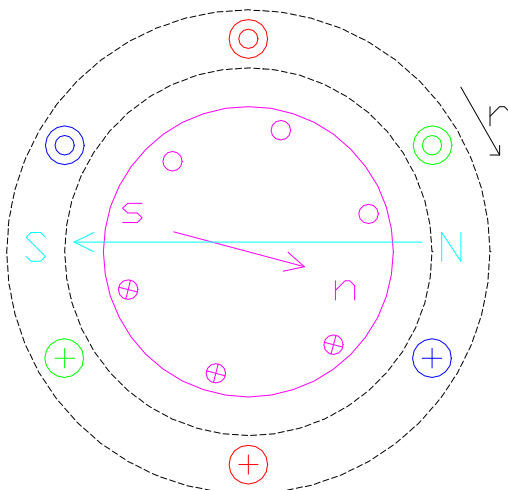
Si nous cumulons toutes les informations que nous venons de développer, nous pouvons écrire

Ce résumé nous montre les tenants et les aboutissants des différents phénomènes que l'on retrouve au sein de notre machine, mais ne nous prouve pas que le rotor va se mettre en mouvement. Voyons réellement ce qui se passe au sein de la machine et analysons l'évolution par la suite afin de voir les modifications.

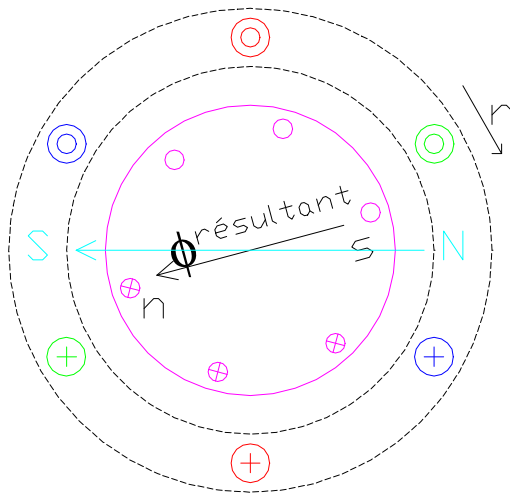
Nous avons jusqu'à présent pris comme hypothèse que la résistance au sein du rotor était négligeable, si nous voulons être complet nous ne pouvons prendre cette hypothèse ce qui veut dire que le courant rotorique n'est plus en quadrature arrière sur la FEM rotorique. Voyons comment ce comporte dès lors notre machine.



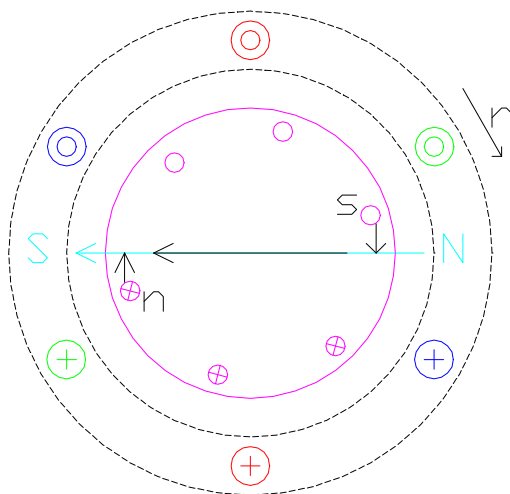
Connaissant la circulation des courants au sein des conducteurs, nous pouvons déduire la polarisation fictive du rotor.



Au vu du schéma ci-dessus, on peut déduire le champs tournant rotorique résultant et découvrir que ce dernier n'est plus en opposition parfaite avec le champ tournant statorique.



Nous pouvons voir clairement en décomposant le CTR résultant que nous avons une composante en phase avec le CTS, cette dernière engendre la FCEM au stator. L'autre composante en quadrature va participer à la création du couple moteur qui va mettre le rotor en rotation. J'attire encore votre attention sur le fait que les deux composantes du CTR résultant ne seront jamais nulle.

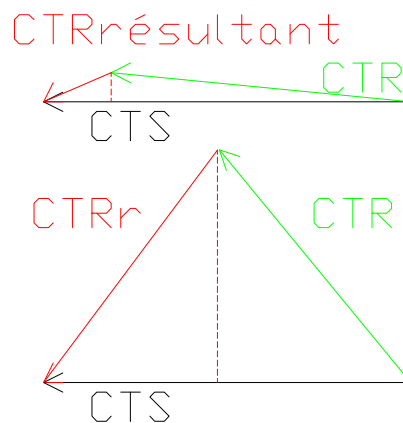


Nous pouvons encore remarquer que le pôle sud du CTS est un rien en avance sur le nord du CTR résultant et que le pôle nord du CTS est également en avance sur le sud du CTR résultant. Nous pouvons donc clairement comprendre que le CTR court derrière le CTS, à la même vitesse mais avec un certain retard qui sera le siège de la naissance du couple. On peut encore expliquer la mise en rotation en partant sur le principe que le CTR résultant va vouloir rattraper le sud du CTS et que la seule façon pour lui d'y parvenir c'est que le rotor se mette en mouvement pour combler cette distance.

## 2. Les modifications au sein de la machine lors du démarrage

Nous venons de découvrir ce qui se passe dans la machine à l'arrêt. Voyons ce qui se passe lors de la mise en mouvement.

Si le rotor se met en rotation, une série de modifications vont apparaître dans la machine. Voyons tout d'abord ce qui se passe au sein du rotor. Si le rotor se met en rotation, les conducteurs du rotor vont voir moins de variation de flux. En effet, si nous nous plaçons à ce moment sur le rotor, la vitesse du champ tournant statorique ne sera plus la vitesse du synchronisme mais bien une vitesse inférieure qui sera la différence entre la vitesse du synchronisme et la vitesse du rotor. On peut voir directement l'influence sur la fréquence de la FEM rotorique qui va diminuer. Si la fréquence diminue, cela veut dire que la réactance du rotor va elle aussi diminuer. J'en déduis encore que le déphasage entre le courant rotorique et la FEM rotorique va diminuer. On peut déduire que le champ tournant rotorique va lui prendre un retard plus important sur le champ tournant statorique. J'attire l'attention sur le fait que les deux champs tournants tournent toujours vu du stator à la même vitesse. Les graphes ci-dessous illustrent l'évolution du champ tournant rotorique et l'évolution du champ tournant résultant.



Une remarque sur les dessins ci-dessus, les deux graphes non pas été réalisés à la même échelle, pour le second graphe nous avons amplifié les vecteurs. Nous pouvons toutefois dire que les deux courants sont liés par un rapport de transformation fixe.

Je peux déduire sur ces graphes que les composantes du champ tournant résultant vont augmenter.

Si ces composantes augmentent, cela sous entend que la FCEM au stator va augmenter mais que le couple va aussi augmenter. Si la FCEM au stator augmente, cela veut encore dire que le courant statorique va diminuer. La diminution de ce dernier va bien entendu se répercuter sur tous les autres éléments de l'équation

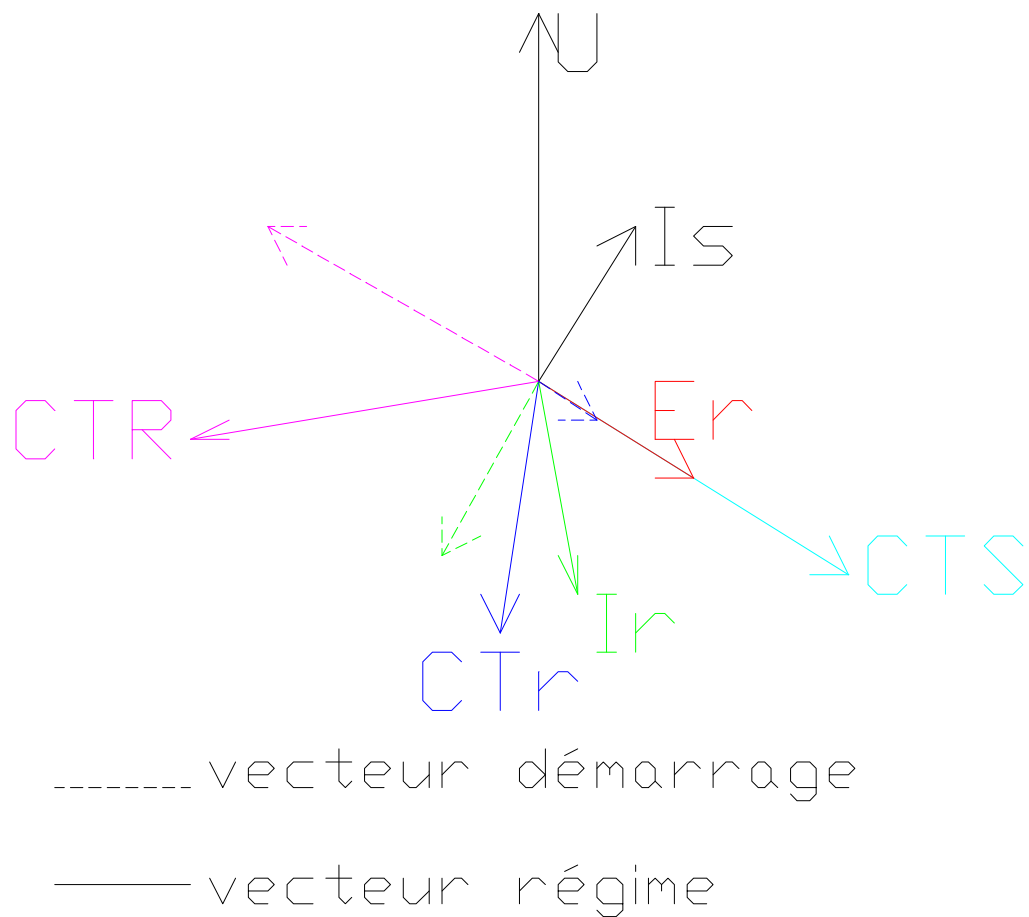
Il est évident que tous ces phénomènes vont se produire en même temps et que la machine va rétablir en permanence un équilibre.

Il faut être bien conscient qu'énormément de choses évoluent au sein de la machine, les amplitudes, les déphasages et que multitudes de phénomènes non décrit dans ce cours doivent encore être tenu en compte.

Je peux toutefois déduire les renseignements suivants :

- Le couple au démarrage n'est pas nul et est non négligeable de part la valeur de l'impédance rotorique.
- Le couple augmente lorsque le rotor démarre (diminution de la fréquence au rotor, diminution de la réactance rotorique, changement de la phase et du module du courant rotorique)
- Le couple passera par une valeur maximum pour redescendre à l'approche de la vitesse nominale.
- La FCEM statorique augmentera durant tout le démarrage du moteur (changement de module et de la phase)
- Le courant statorique va diminuer durant tout le démarrage (changement de module et de phase)

### 2.1. Diagramme vectoriel



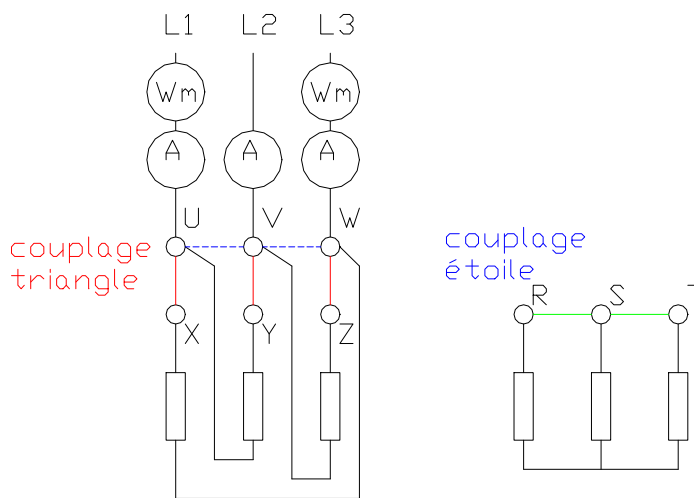
## 2.2. Conclusion

Soit une tension triphasée alternative sinusoïdale appliquée aux bornes du stator du moteur, en relation à la loi d'ohm et en relation avec la résistance et la réactance des bobinages nous avons circulation d'un courant statorique dans chaque bobine. Ce courant génère donc un flux au sein de chaque bobine. Ce flux entraînera au droit des bobines une FEM d'auto induction. La combinaison de ces flux va former une polarisation fictive du stator tournant autour du stator, nous l'appellerons le champ tournant statorique. Les conducteurs rotoriques vont être soumis à une variation de flux et induire une FEM rotorique. Vu le court circuit du rotor, notre FEM rotorique va pousser un courant rotorique dans les conducteurs du rotor. Ces courants vont donc créer au droit des conducteurs des flux rotorique. La combinaison de ces flux va aussi créer un champ tournant rotorique. La combinaison des champs tournants rotorique et statorique va nous donner un champ tournant résultant. Ce dernier peut être décomposé en deux vecteurs dont l'un ira induire une FCEM au stator et le second participera à la formation du couple. Le couple ainsi créé mettra notre rotor en rotation.



### 3. Les différentes caractéristiques d'un moteur asynchrone

#### 3.1. Schéma de câblage



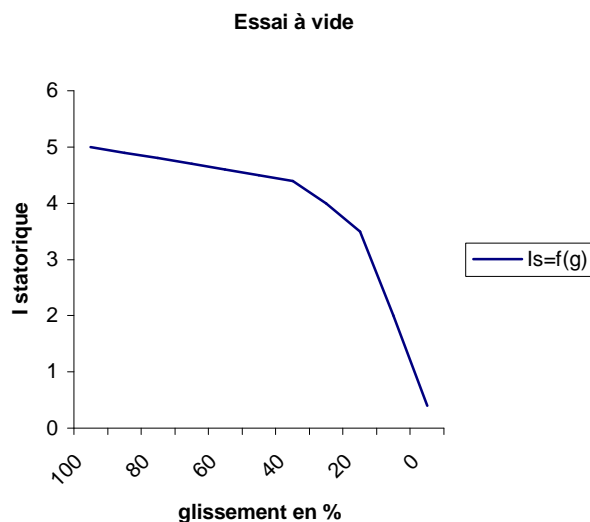
#### 3.2. Fonctionnement à vide

##### 3.2.1. $I_s=f(g)$

##### 3.2.1.1. Mode opératoire

- Câblage du moteur et positionnement des ampèremètres
- Afin de relever les valeurs automatiquement durant le démarrage et ce à intervalle régulier, régler l'enregistreur pour les prises de mesures. Il sera relevé la vitesse dont sera déduit le glissement et le courant statorique.

##### 3.2.1.2. Courbe



### 3.2.1.3.Explication

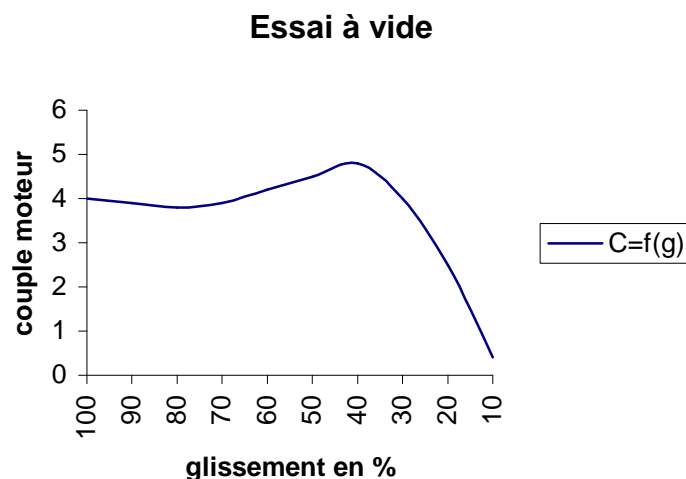
Une première remarque, il faut comprendre glissement de 100% comme étant le moteur à l'arrêt et glissement de 0% comme étant le moteur en régime. Le premier point particulier que l'on peut soulever est la valeur maximum du  $I_s$  au démarrage. Cela s'explique par le fait que en ce point, la FCEM statorique est faible, la résultante du CTr étant fonction de la réactance du rotor et cette dernière fonction de la fréquence. Hors nous savons que la fréquence est maximum donc le déphasage FEM rotorique et  $I_r$  est proche de  $90^\circ$ . La composante en phase du CTr est faible. Par la suite, la valeur du  $I_s$  diminue au départ proportionnellement et ensuite en suivant une courbe. Par le même raisonnement nous pouvons comprendre, la diminution de la fréquence rotorique, donc déphasage  $E_r$  et  $I_r$  moins important et augmentation de la composante en phase du CTr. Cela entraîne une augmentation de la FCEM statorique et donc diminution du courant statorique. Plus loin dans la courbe, nous avons une courbe car si les modules varient sur l'ensemble des termes caractérisant la machine, les déphasages vont aussi varier et c'est le cas entre la tension d'alimentation et le  $I_s$ . Un autre phénomène apparaissant également et ayant une répercussion sur l'allure, est que l'accélération du rotor n'est pas constante, elle est lente au départ, il faut vaincre le couple résistant de notre moteur et est rapide par la suite pour se stabiliser en régime. Cette état de chose se répercute bien sur au niveau du changement de la fréquence au rotor.

### 3.2.2. C=f(g)

#### 3.2.2.1.Mode opératoire

- Câblage du moteur
- Afin de relever les valeurs automatiquement durant le démarrage et ce à intervalle régulier, régler l'enregistreur pour les prises de mesures. Il sera relevé le couple et la vitesse dont sera déduit le glissement.

#### 3.2.2.2.Courbe



### 3.2.2.3.Explication

Cette courbe offre une allure particulière, son allure peut toutefois s'expliquer en regard au principe énoncé ci-avant. Nous remarquons que le couple n'est pas nul au démarrage, et qu'il n'est pas égale à la valeur maximum. Nous savons que le couple est fonction de la composante en quadrature du CTr. Cette valeur n'est pas nulle au démarrage et augmente lorsque le moteur se met en rotation. Nous savons encore que cette composante du CTr est fonction de la fréquence au rotor et que cette dernière diminue lors de la mise en rotation. Le CTr se déphase donc de plus en plus du CTS lors de la mise en rotation. Si ce déphasage passe par un maximum, cela induit automatiquement que la composante du CTr va elle aussi passer par un maximum. Nous savons que si les amplitudes des caractéristiques de notre moteur varient, les déphasages varient aussi. L'ensemble de ces interactions sera tel que le déphasage entre le CTr et le CTS va diminuer. Je rappelle que le déphasage entre le courant statorique et la tension d'alimentation va avoir une conséquence sur le CTS qui va voir son déphasage vis à vis du CTr varier (diminution).

## 3.3. Fonctionnement en charge

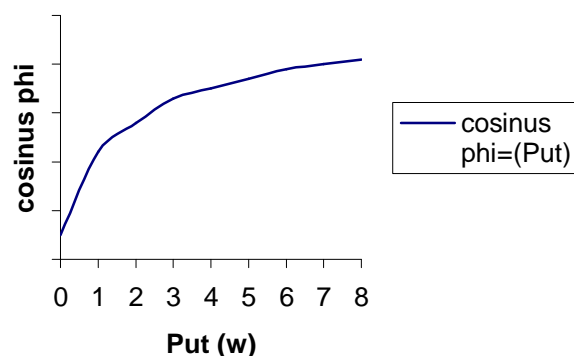
### 3.3.1. $\cos\phi=f(P_{ut})$

#### 3.3.1.1.Mode opératoire

- Câblage du moteur et positionnement des ampèremètres et wattmètres.
- Mettre le moteur en marche et attendre que ce dernier se soit stabilisé en vitesse.
- Il sera relevé le couple et la vitesse qui permettront de trouver la puissance utile et encore le relevé de la puissance absorbée et le courant statorique qui permettront de trouver les cosinus  $\phi$ .

#### 3.3.1.2.Courbe

### Essai en charge



### 3.3.1.3.Explication

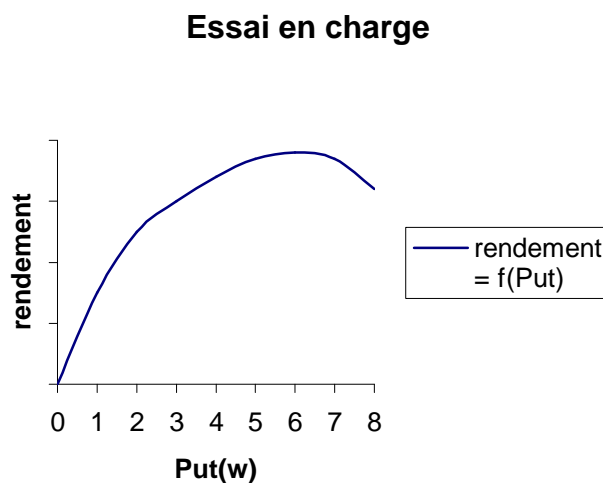
Nous savons que le cosinus  $\varphi$  représente le déphasage entre la tension d'alimentation et le courant statorique. Je peux dire également que ce déphasage est fonction de la FCEM. Sachant que cette dernière est fonction de la composante en phase du  $C_{Tr}$ , et que ce dernier est fonction de la fréquence au rotor et donc de la vitesse du rotor. Hors nous savons que la mise en charge entraîne une chute de vitesse et par conséquent une augmentation de la fréquence rotorique. Noter que nous n'avons pas à faire à une droite car toute modification au rotor reçoit par interaction au stator une nouvelle influence.

### 3.3.2. $\eta=f(P_{ut})$

#### 3.3.2.1.Mode opératoire

- Câblage du moteur et positionnement des ampèremètres et wattmètres.
- Mettre le moteur en marche et attendre que ce dernier se soit stabilisé en vitesse.
- Il sera relevé le couple et la vitesse qui permettront de trouver la puissance utile et le relevé de la puissance absorbée qui ensemble permettront de trouver le rendement.

#### 3.3.2.2.Courbe



#### 3.3.2.3.Explication

Nous savons que lorsque nous chargeons notre moteur, de part la chute de vitesse nous avons augmentations des courants rotorique et statorique. Cette augmentation entraîne bien entendu une augmentation des pertes, mais aussi de la puissance absorbée de part le courant statorique. Il est donc normal de voir le rendement évoluer de la sorte. Sur notre courbe, nous avons toutefois un point particulier. A quoi correspond le maximum de rendement ? Nous savons que notre moteur est capable de fournir un couple moteur maximum qui correspond à une charge utile maximum. Si nous demandons à notre moteur de fournir plus que cette valeur

maximum, nous avons décrochage du moteur sous entendu perte de puissance utile et effondrement de la courbe du rendement. Les courants s'emballent, et les pertes également. Rappeler vous en mécanique que la  $P_{ut}$  est fonction du couple (qui diminue) et de la vitesse (qui diminue). Toute augmentation du courant statorique donc de la puissance absorbée ne suffit plus pour reprendre la charge.

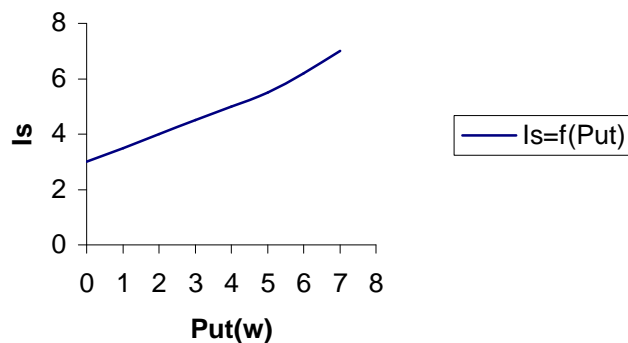
### 3.3.3. $I_{st}=f(P_{ut})$

#### 3.3.3.1. Mode opératoire

- Câblage du moteur et positionnement des ampèremètres et wattmètres.
- Mettre le moteur en marche et attendre que ce dernier se soit stabilisé en vitesse.
- Il sera relevé le couple et la vitesse qui permettront de trouver la puissance utile et encore le relevé du courant statorique.

#### 3.3.3.2. Courbe

##### Essai en charge



#### 3.3.3.3. Explication

Nous savons que lorsque l'on charge un moteur, la vitesse diminue entraînant une augmentation de la fréquence au rotor. Cette augmentation entraîne une amplification du déphasage entre le courant rotorique et la FEM rotorique. Le déphasage entre le CTS et le CTR est donc réduit ce qui entraîne une diminution des composantes et donc de la composante en phase. Cette dernière participant à la génération de la FCEM au stator, je déduis que cette dernière diminue et que le courant statorique augmente. On peut aisément comprendre que plus on charge le moteur, et plus difficilement il parviendra à reprendre la charge ce qui veut dire que la vitesse diminuera par pallier plus important plus on chargera la machine.

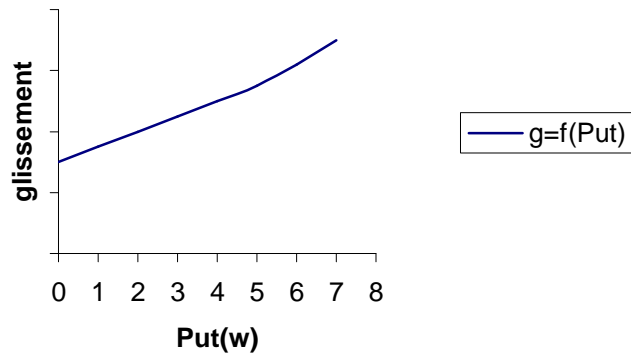
### 3.3.4. $g=f(P_{ut})$

#### 3.3.4.1. Mode opératoire

- Câblage du moteur et positionnement des ampèremètres et wattmètres.
- Mettre le moteur en marche et attendre que ce dernier se soit stabilisé en vitesse.
- Il sera relevé le couple et la vitesse qui permettront de trouver la puissance utile et le glissement.

#### 3.3.4.2. Courbe

##### Essai en charge



#### 3.3.4.3. Explication

Nous savons que le glissement est lié à la vitesse de rotation du rotor. Il sera d'autant plus grand que le rotor tourne moins vite. On peut aisément comprendre que plus on charge le moteur, et plus difficilement il parviendra à reprendre la charge ce qui veut dire que la vitesse diminuera par palier de plus en plus important avec l'augmentation de charge. On retrouve ce phénomène sur notre courbe.

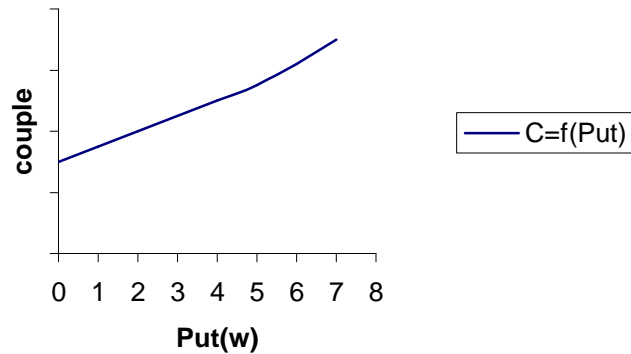
### 3.3.5. $C=f(P_{ut})$

#### 3.3.5.1. Mode opératoire

- Câblage du moteur et positionnement des ampèremètres et wattmètres.
- Mettre le moteur en marche et attendre que ce dernier se soit stabilisé en vitesse.
- Il sera relevé le couple et la vitesse qui permettront de trouver la puissance.

#### 3.3.5.2. Courbe

##### Essai en charge



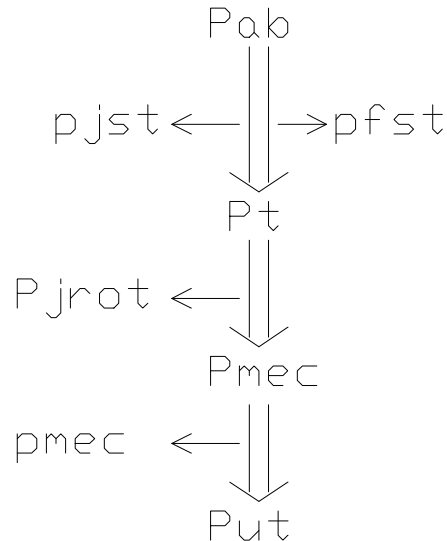
#### 3.3.5.3. Explication

Nous savons que le couple moteur évoluera de la même façon que le couple résistant offert par la charge. SI on prend comme principe que nous chargeons notre moteur par pallier constant, je peux dire que si on ne dépasse pas le couple moteur maximum, notre couple moteur va augmenter de façon proportionnel. Pourquoi dès lors n'avons nous pas une droite ? Nous pouvons dire que la puissance utile est fonction du couple moteur et de la vitesse. Si le couple évolue dans notre hypothèse de façon constante, il n'en est pas de même pour la vitesse. En effet, nous savons que cette dernière diminuera d'autant plus vite que la charge devient importante.

#### 4. Bilan énergétique

Nous pouvons écrire ce qui suit :

$$P_{ab} = P_{ut} + p_{mec} + p_{jrot} + p_{jst} + p_{fst}$$



#### 5. Les formules liées au moteur asynchrone

Afin de simplifier quelque peu notre machine, nous prendrons les hypothèses suivantes :

- Les pertes par courant de Foucault sont nulles
- Les pertes mécaniques sont nulles
- La résistance du stator est nulle

$P_t = P_{ab}$  - pertes au stator. Comme nous prenons comme hypothèse que ces pertes sont nulles,  $P_t = P_{ab}$ .

$$P_t = P_{ab} = C \times \omega_s$$

$$P_t = P_{mec} + p_{jrot}$$

$$p_{jr} = P_t - P_{mec}$$

$$p_{jr} = C \cdot \omega_s - C \cdot \omega_r$$

$$p_{jr} = C \cdot (\omega_s - \omega_r)$$

$$\text{si } g \cdot \omega_s = \omega_s - \omega_r$$

$$p_{jr} = g \cdot \omega_s \cdot C$$

$$p_{jr} = g \cdot P_t$$

$$p_{mec} = P_t - g \cdot P_t = (1 - g) \cdot P_t$$

$$X_r = L_r \cdot \omega_r \quad \omega_r = 2 \cdot \pi \cdot f_r \quad f_r = g \cdot f_s$$

$$X_r = g \cdot L_r \cdot \omega_s$$



$$Z_r = \sqrt{R_r^2 + g^2 \cdot L_r^2 \cdot \omega_s^2}$$

$$I_r = g \cdot \frac{E_r}{Z_r} = \frac{g \cdot E_r}{\sqrt{R_r^2 + g^2 \cdot L_r^2 \cdot \omega_s^2}}$$

$$\cos \varphi_r = \frac{R_r}{\sqrt{R_r^2 + g^2 \cdot L_r^2 \cdot \omega_s^2}}$$

$$p_{jr} = g \cdot P_t = 3 \cdot R_r \cdot I_r^2$$

$$p_{jr} = g \cdot C \cdot \omega_s = 3 \cdot R_r \cdot I_r^2$$

$$C = \frac{3 \cdot R_r}{g \cdot \omega_s} \cdot \frac{g^2 \cdot m^2 \cdot U^2}{\sqrt{R_r^2 + g^2 \cdot L_r^2 \cdot \omega_s^2}}$$

La formule générale du couple devient :

$$C = \frac{3 \cdot m^2 \cdot U^2}{\omega_s} \cdot \frac{\frac{R_r}{g}}{\left(\frac{R_r}{g}\right)^2 + X_s^2}$$

Sachant que le couple sera maximum lorsque le déphasage entre la tension d'alimentation et le courant statorique sera de  $45^\circ$ , je peux écrire :

$$\operatorname{tg} \varphi = 1 = \frac{g \cdot X_s}{R_r}$$

$$g = \frac{R_r}{X_s}$$

$$C = \frac{3 \cdot m^2 \cdot U^2}{\omega_s} \cdot \frac{\frac{X_s \cdot R_r}{R_r}}{\left(\frac{X_s \cdot R_r}{R_r}\right)^2 + X_s^2}$$

$$C_{\max} = \frac{3 \cdot m^2 \cdot U^2}{2 \cdot X_s \cdot \omega_s}$$

Le couple au démarrage quant à lui vaudra :

$$C_{dém} = \frac{3 \cdot m^2 \cdot U^2}{\omega_s} \cdot \frac{R_r}{R_r^2 + X_s^2}$$

A l'arrêt :

$$E_r = N_r \cdot \omega_s \cdot \Phi_s$$

En marche :

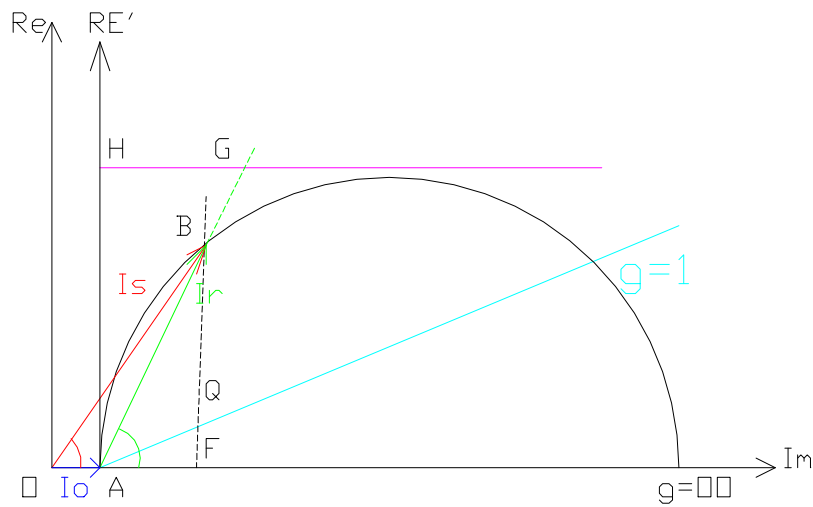
$$E'_r = N_r \cdot \omega_s \cdot \Phi_s \qquad \omega_r = g \cdot \omega_s$$

$$E'_r = N_r \cdot g \cdot \omega_s \cdot \Phi_s$$

$$E'_r = g \cdot E_r$$

$$E'_s = N_s \cdot \omega_s \cdot \Phi_r$$

**6. Le diagramme du cercle (avec les hypothèses)**



Le diagramme du cercle nous donnent les valeurs suivantes :

- OB est proportionnel au courant statorique
- OA est proportionnel au courant statorique à vide si  $g=0$
- Le point A est équivalent à un fonctionnement à  $g=0$
- AB est proportionnel au courant rotorique
- HG est proportionnel au glissement
- BQ est proportionnel au  $p_{méc}$
- BF est proportionnel à la  $P_{ab}$
- BF est proportionnel au couple
- QF est proportionnel au  $p_{jr}$
- Les angles des courants sont réels

## 7. Les différents mode de démarrage d'un moteur asynchrone

Le but des démarrages que nous allons analyser est de parvenir par des artifices de diminuer la valeur du courant absorber sans toutefois abaisser la valeur du couple. On veillera toujours à ce que le couple moteur au démarrage soit toujours supérieur au couple résistant de la machine.

### 7.1. Par action sur le stator

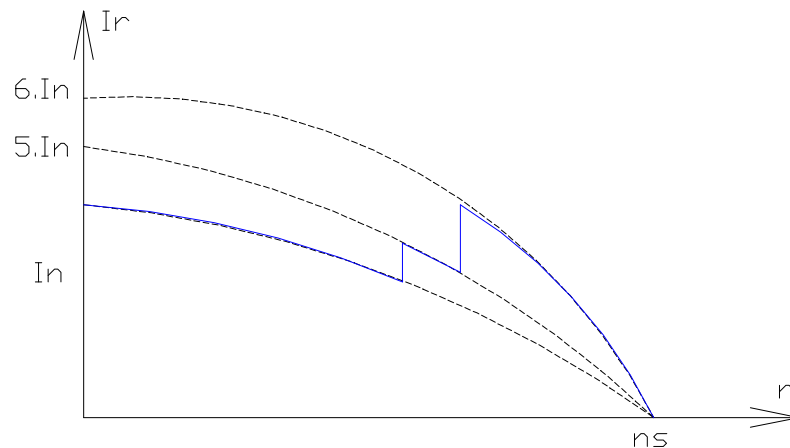
#### 7.1.1. Placement de résistance statorique

Le but de cette méthode est de créer par l'insertion de résistances en série avec les enroulements statoriques une chute de tension ayant pour but de diminuer la tension aux bornes des enroulements proprement dit et ainsi réduire le courant. Cette méthode à quelques inconvénients, la puissance absorbée par les résistances que nous ajoutons est perdue sous forme de chaleur. Lors du retrait des résistance statorique, nous avons des à-coups de courant. Ce système sera écarté si le couple de démarrage doit rester important.

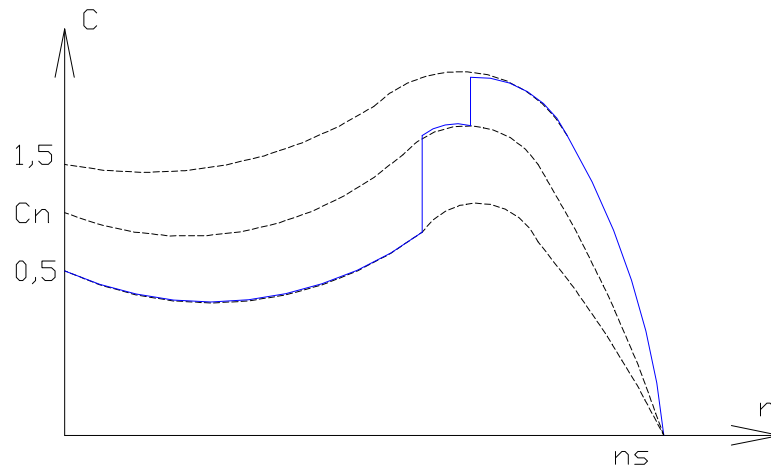
Voyons ce que deviennent le courant rotorique et le couple. En fin de démarrage, la cascade de résistance statorique court-circuitée et la pleine tension est appliquée aux bobinages statoriques.

$$I_r = \frac{g \cdot m \cdot U}{Z_r} \text{ Si } U \text{ diminue, } I_r \text{ diminue CQFD.}$$

La courbe ci-dessous nous montre l'évolution du courant lors du passage des différents palliers de notre cascade de résistance statorique.



$$C = \frac{3 \cdot m^2 \cdot U^2}{\omega_s} \cdot \frac{\frac{R_r}{g}}{\left(\frac{R_r}{g}\right)^2 + X_s^2} \text{ si } U \text{ diminue, le couple diminue en fonction du carré de la tension.}$$



### 7.1.2. Sous tension d'alimentation réduite

En lieu et place d'une cascade de résistances, nous utiliserons ici un auto transformateur possédant un nombre plus ou moins important de plot correspondant chacun à une tension différente. On voit tout de suite que cet auto transformateur va me permettre d'augmenter plot par plot le potentiel au niveau des bobinages du stator. En fin de démarrage, l'auto transformateur est court-circuité et la pleine tension est appliquée aux bobinages statoriques. Cette méthode offre l'inconvénient d'entraîner lors du changement de plot des pointes de courant. Cette méthode reste toutefois moins brusque que celle reprise ci-dessus. On peut encore dire que plus il y aura de plots et plus la différence de tension entre plot sera faible. Si les variations de tension sont plus faible, les pointes de courant seront plus faible. Ce système ne pourra être utilisé que pour de faible couple au démarrage.

Les allures des courbes et les formules restent identiques que pour la méthode précédente.

### 7.1.3. Placement d'un rhéotor au stator

Cette méthode est de loin la meilleur pour ce qui est d'un démarrage sous tension réduite avec limitation de variation de courant tout au long du démarrage.

Le rhéotor nous permettra d'augmenter potentiel faible et constant la tension aux bornes des bobinages du stator. Bien que cette méthode n'offre plus de pointe de courant, elle ne permettra pas de garantir un couple important. On ne pourra utiliser ce système que sur des charges à couple réduit. Il faut encore signaler le prix élevé d'un tel système.

#### 7.1.4. Démarrage étoile triangle

L'ensemble des méthodes vu plus haut offre deux inconvénients dans leur mise en œuvre. Premièrement, le coût de ce type de système est non négligeable.

Deuxièmement, il est nécessaire d'adjoindre un système de commutation automatisé ou nécessite la présence d'un opérateur.

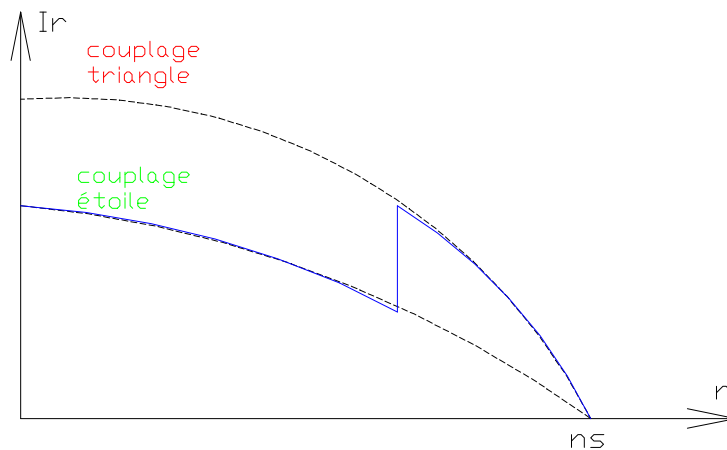
Il est donc utilisé dans le monde industriel une autre méthode de loin moins coûteuse et pouvant être facilement automatisée. Il s'agit d'exploiter le couplage même des enroulements statorique. Nous savons que le stator offre 6 bornes pour trois bobines statoriques.

Nous avons donc la possibilité de coupler notre stator soit en étoile soit en triangle. Pour rappel, lors d'un couplage triangle, nous appliquons aux bornes de notre stator la tension entre phase du réseau et donc la tension maximum. En étoile par contre, nous appliquons un potentiel entre phase et neutre. Cette valeur est plus faible avec un rapport  $\sqrt{3}$ .

Voyons ce que donne ce système

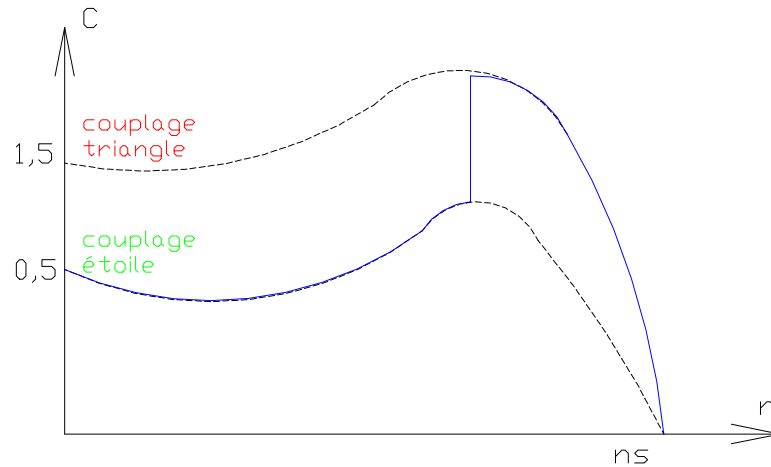
$$I_{rY} = \frac{g \cdot m \cdot \frac{U}{\sqrt{3}}}{Z_r} \rightarrow I_{rY} = \frac{I_r}{\sqrt{3}}$$

$$I_{r\Delta} = \frac{g \cdot m \cdot U}{Z_r} \rightarrow I_{r\Delta} = I_r$$



$$C_Y = \frac{3 \cdot m^2 \cdot \left(\frac{U}{\sqrt{3}}\right)^2}{\omega_s} \cdot \frac{\frac{R_r}{g}}{\left(\frac{R_r}{g}\right)^2 + X_s^2} \rightarrow C_Y = \frac{C}{3}$$

$$C_{\Delta} = \frac{3 \cdot m^2 \cdot U^2}{\omega_s} \cdot \frac{\frac{R_r}{g}}{\left(\frac{R_r}{g}\right)^2 + X_s^2} \rightarrow C_{\Delta} = C$$



## 7.2. Par action sur le rotor

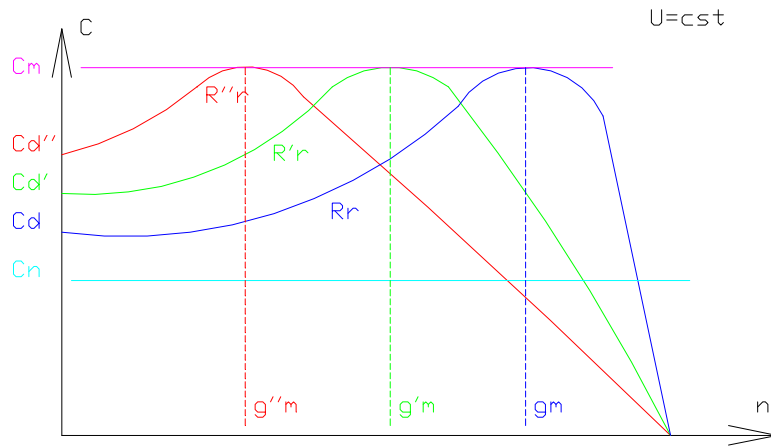
Cette partie ne s'applique que pour un moteur asynchrone bobiné. Pour le moteur à cage, aucune influence du rotor ne peut être possible.

Nous savons que les bobinages du rotor sont câblés en étoile au sein du moteur et que dès lors seul trois bornes sont reprises sur la plaque à bornes et ce pour un moteur bipolaire.

Nous savons que toute diminution du courant rotorique se répercute sur le courant statorique. Si nous parvenons à réduire le courant rotorique le courant absorbé au réseau sera également réduit. Nous savons que le courant au rotor est limité par d'une part par la FEM induite et d'autre part par l'impédance des bobines. Nous ne pouvons pas modifier cette valeur, mais nous pourrions modifier l'impédance du rotor. En effet, pour diminuer le courant rotorique nous devons augmenter l'impédance et pour parvenir à cela, nous allons insérer via les bornes des résistances supplémentaires en série avec chacune des bobines. L'impédance globale va donc augmenter et ainsi réduire le courant rotorique et donc le courant statorique. Comment va réagir le couple ?

$$C = \frac{3 \cdot m^2 \cdot U^2}{\omega_s} \cdot \frac{\frac{R_r}{g}}{\left(\frac{R_r}{g}\right)^2 + X_s^2} \quad \text{si } R_r \text{ augmente, le couple lui a tendance à augmenter.}$$

Le graphique ci-dessous nous montre l'évolution du couple pour une cascade de résistances rotoriques.





## 8. Calcul d'un rhéostat de démarrage

Vous trouverez ci-dessous le calcul complet d'un rhéostat de démarrage. Afin de se raccrocher à un cas pratique, il s'agira de placer un rhéostat sur la machine suivante.

Moteur 230V – 400V  
Réseau triphasé 400V 50Hz  
Puissance absorbée : 3,6Kw  
Facteur de puissance : 0,64  
 $E_r = 105V$  lorsque  $U_s = 230V$   
 $R_r = 0,1482$  ohm  
 $K = 2$   
 $X_s = 0,9218$  ohm  
 $N = 1410$  t/min

$$I_n = \frac{P_{ab}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\phi} = 8,5463A$$

Comme le moteur est du type 230-400 volts, cela veut dire que la tension maximum applicable aux bornes des bobines est de 230V donc si le réseau est du 400V, je suis obligé de faire fonctionner mon moteur en couplage étoile.

$$m = \frac{U_r}{U_s} = 0,4565$$

$$I_{rd} = \frac{0,9 \cdot K \cdot I_n}{m} = 33,6984A$$

$$R_{rd} = \frac{U_r}{I_{rd}} = 3,1159ohms$$

$$R_{dém} = R_{rd} - R_r = 3,0418ohms$$

$$g = \frac{n_s - n_r}{n_s} = 0,06$$

$$\text{Nb plots} = \frac{\log\left(\frac{1}{g}\right)}{\log(K)} = 4,0589plots$$

Soit un rhéostat de 4 plots.

Recalculons la valeur du facteur K

$$K = 10^{\left(\frac{\log\left(\frac{1}{g}\right)}{4}\right)} = 2,0205$$

$$g_1 = \frac{1}{K} = 0,4949$$

$$g_2 = \frac{g_1}{K} = 0,2449$$

$$g_3 = \frac{g_2}{K} = 0,1212$$

$$g_4 = \frac{g_3}{K} = 0,06$$

Cette dernière valeur correspond bien au glissement du moteur lorsqu'il travail sans les résistances rotoriques.

$$R_1 = \frac{R_r}{g^3} = 0,6114 \text{ ohm}$$

$$R_2 = g_1 \cdot R_1 = 0,3025 \text{ ohm}$$

$$R_3 = g_2 \cdot R_1 = 0,1497 \text{ ohm}$$

$$R_4 = g_3 \cdot R_1 = 0,0756 \text{ ohm}$$

$$R_{1-2} = 0,3089 \text{ ohm}$$

$$R_{2-3} = 0,1528 \text{ ohm}$$

$$R_{3-4} = 0,0756 \text{ ohm}$$

## 9. Les moteurs spéciaux

### 9.1. Moteur à double cage

Ce moteur à l'avantage d'être robuste et de bénéficier également au démarrage de qualité proche de celle d'un rotor bobiné. Le rotor de ce moteur possède en réalité deux cages concentriques. Une des cages est externe et l'autre interne. Toutes deux sont toutefois placées dans les encoches du rotor. Parce qu'elle est entourée de fer, la cage interne est plus inductive que l'externe. On donnera par contre plus de résistance à la cage externe en utilisant un matériaux plus résistif (laiton).

Au démarrage la fréquence des courants rotoriques est grande et la réactance de la cage interne combinée à l'effet pelliculaire conduit à un courant faible dans cette cage. Le démarrage s'effectue donc sur la cage externe plus résistante donc un courant statorique réduit. A la vitesse nominale, la fréquence du rotor est faible et la réactance de la cage interne est donc également faible ce qui entraîne un courant plus important dans cette cage moins résistante.

Le couple moteur est équivalent à la somme des couples développé par chaque cage.

### 9.2. Moteur à plusieurs vitesses

Un des inconvénients des moteurs asynchrones est que leur gamme de vitesse est fonction du nombre de bobinage et donc très réduite . Leur utilisation est donc également limité pour des utilisation à vitesse précise. Un autre inconvénient, il est impossible de réaliser de façon économique une régulation de la vitesse. Notons que cette dernière possibilité n'est de toute façon pas applicable au moteur à cage.

Pour pallier à ce problème, on a mis au point des moteurs à deux vitesses, le stator de ces machines est identique à un moteur classique, le rotor lui a une forme de couronne. L'intérieur du rotor porte un deuxième enroulement triphasé statorique qui alimenté par des bagues produit un champ tournant à 3000 t/min par rapport à lui, donnant ainsi 6000 t/min environ par rapport à un point fixe du stator.

### 9.3. Moteur à fréquence de rotation réglable ou encore appelé cascade hyposynchrone

Plutôt que de court-circuiter le rotor, on alimente un pont redresseur triphasé qui délivre une tension unidirectionnelle. Celle-ci est ensuite convertie via un pont de thyristor en une tension triphasé de même fréquence que le réseau. Cette tension ainsi fournie est renvoyée au réseau soit directement soit par l'intermédiaire d'un transformateur. Cette méthode permet de régler le glissement du moteur de 1 à 100%. L'avantage de cette méthode en comparaison avec les résistances rotoriques c'est que l'énergie n'est pas perdue sous forme de chaleur mais restituée au réseau. La régulation se fait donc en jouant sur le renvois de puissance sur le réseau et donc en réglant le courant au sein du rotor.

#### **9.4. Moteur avec variateur de fréquence**

Nous savons qu'un moteur asynchrone possède une vitesse fixe fonction du nombre de bobinage mais aussi fonction de la fréquence. Si nous utilisons un générateur à fréquence variable, nous aurons la possibilité de régler la vitesse de notre moteur. Il faudra veiller dans ce cas à ce que notre générateur puisse absorber le courant de démarrage sans que la chute de tension ne soit trop importante.

#### **9.5. Moteur à enroulements séparés**

Nous savons que si le nombre d'enroulement varie au stator, la vitesse du rotor va varier. Il est aisé de comprendre dès lors que nous pourrions envisager un moteur ayant plusieurs bobinages statoriques que l'on pourraient câbler de façon différente en fonction de la vitesse souhaitée. Noter que nous serons toujours liés à des vitesses bien précises sans possibilité de réglage fin. L'inconvénient de ce moteur on sans doute est son poids de 1,5 à 2 fois celui d'un moteur normal.

#### **9.6. Moteur Dalhander**

Ce type de moteur offre sur le bornier en plus des extrémités de chaque bobines du stator le point milieu de ces dernières. Nous nous retrouvons en quelque sorte avec 6 bobines pour un moteur bipolaire.

Cela va nous permettre de câbler au droit de chaque bobinage les deux demi bobine en série ou en parallèle. Je peux donc dire que j'ai deux couplage donc deux vitesses. Comme souvent mon moteur peut encore être couplé soit en étoile soit en triangle, je me retrouve avec 4 vitesses distinctes. Pour un même couplage, on peut dire que la grande vitesse sera le double de la petite vitesse.

## **10. Freinage des moteurs asynchrones**

### **10.1. Freinage à contre courant**

Il s'agit dans notre cas d'exploiter le principe même de la rotation du rotor pour le freiner. Nous savons que notre moteur se met en rotation parce que le stator génère un CTS et que en combinaison avec le CTR, il y accrochage du rotor et mise en rotation de ce dernier. Nous savons encore que le rotor ce mettra en rotation dans le même sens que le CTS. Nous pouvons donc comprendre que pour freiner le rotor nous pourrions inverser le CTS. Pour parvenir à cela, nous inverserons deux phases du stator. Cette inversion devra être de courte durée, car les efforts au droit du rotor seront très important. On ne doit pas non plus voir le rotor se mettre en rotation en sens inverse. On peut encore comprendre que cette manœuvre va entraîner de brusque variation de couple et de courant statorique. Pour limiter celle-ci, nous inséreront lors de la permutation des phases des résistance en série avec les enroulements statoriques. Il est encore précisé que la tension du rotor est presque le double de celle de l'arrêt, une précaution particulière sera prise pour les isolations des bobinages. Ce système est surtout utilisé pour les moteurs bobinés

### **10.2. Freinage par injection de courant continu**

Ce système est surtout utilisé pour les moteurs à cage. Il s'agit dans ce cas non pas de supprimer le CTS ou de l'inverser, mais tout simplement de le figer. En effet, dans ce cas nous allons créer un frein magnétique. Le CTR va se retrouver en rotation dans un champ fixe qu'il va devoir franchir. On comprend aisément l'effet de freinage que va encaisser ce CTR lui même à présent fonction de la vitesse du rotor. Dans ce cas, le CTR est directement fonction de la rotation du rotor puisque c'est ce dernier qui créé la variation de flux pour les conducteurs. La vitesse du CTR sera donc identique à la vitesse du rotor et diminuera avec celle-ci. Ce système ne sera toutefois plus efficace à faible vitesse puisque le CTR deviendra trop faible.

### **10.3. Freinage par fonctionnement en hypersynchrone**

Dans ce cas de figure, on fait tourner la machine en génératrice à une vitesse un rien supérieure à la vitesse du synchronisme. Dans ce cas, le glissement est négatif et il absorbe de l'énergie mécanique.

### **10.4. Fonctionnement en génératrice asynchrone**

Un moteur asynchrone entraîné à une vitesse supérieure au synchronisme peut débiter de la puissance active sur un réseau, mais continuera toujours à absorber de la puissance réactive car n'oublions pas que la fréquence au rotor est dans ce cas élevée, donc le déphasage du courant rotorique est très élevé ce qui oblige la machine à consommer de la puissance réactive. Cela est du au déphasage du courant rotorique qui influence le déphasage du courant statorique.

## 11. Exercices

- 1) Soit un moteur asynchrone III 220V 50Hz – 6,5A – n=1440 t/min - cos φ=0,84

La résistance mesurée entre deux phases du stator vaut r=2,25 ohms.

Les pertes dans le fer du stator valent : p<sub>fst</sub>=90w

Les pertes mécaniques sont estimées à p<sub>méc</sub>=50w

Calculer : les pertes par effet joule dans le rotor

Les pertes par effet joule dans le stator

le couple utile

le rendement

Solution :

$$p_{jst} = 3 \cdot R_s \cdot I_s^2 = 3 \cdot \left(\frac{R_s}{2}\right) I_s^2 = 3 \cdot \left(\frac{2,25}{2}\right) \cdot 6,5^2 = 142,594w$$

$$p_{jr} = g \cdot P_t$$

$$P_t = P_{ab} - p_{jst} - p_{fst} = 2080,5394 - 142,594 - 0 - 90 = 1847,945w$$

$$P_{ab} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_s \cdot \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 6,5 \cdot 0,84 = 2080,5394w$$

$$g = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1500 - 1440}{1500} = 0,04$$

$$p_{jr} = g \cdot P_t = 0,04 \cdot 1847,945 = 73,9178w$$

$$P_{ut} = P_t - p_{jr} - p_{méc} = 1847,945 - 73,9178 - 50 = 1724w$$

$$C_{ut} = \frac{P_{ut}}{2 \cdot \pi \cdot n_r} = \frac{1724}{2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{1440}{60}\right)} = 11,4328Nm$$

$$\eta = \frac{P_{ut}}{P_{ab}} = \frac{1724}{2080} = 0,8286$$

- 2) Soit un moteur asynchrone triphasé 380V 50Hz absorbe un courant de 15A avec un cosφ=0,86 ; son glissement est de 4%.

Sa vitesse de rotation étant de 1425 t/min.

Nous ne tiendrons compte que des pertes par effet joule dans le stator.

Calculer le nombre de pôles

La puissance absorbée

Le glissement

Les pertes par effet joule dans le rotor

Le rendement

Solution :

$$p = \frac{f}{n_r} = \frac{50}{\frac{1500}{60}} = 2$$

$$P_{ab} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_s \cdot \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 15 \cdot 0,86 = 7898w$$

$$g = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1500 - 1425}{1500} = 0,05$$

$$p_{jr} = g \cdot P_t = g \cdot P_{ab} = 0,05 \cdot 7898 = 394,9w$$

$$\eta = \frac{(1-g) \cdot P_{ut}}{P_{ab}} = \frac{(1-0,05) \cdot 7898}{7898} = 0,95$$

1) Un moteur asynchrone III – 220V – 50 Hz absorbe un courant de 30A avec un  $\cos \varphi = 0,86$  avec un glissement de 4%.

La résistance mesurée entre deux phases du stator est  $r = 0,2$  ohm et les pertes dans le fer au stator valent  $p_{fst} = 300$ w.

Calculer :

- la fréquence de rotation sachant que le stator possède 6 pôles (1000 t/min)
- Les pertes par effet joule dans le rotor (270w)
- Les pertes par effet joule dans le stator 370w)
- Le couple moteur (88,4Nm)
- Le rendement (90,4%)

2) On lit sur la plaque signalétique d'un moteur asynchrone III 380V - 50Hz – I=40A –  $\cos \varphi = 0,86$  –  $n = 725$  t/min.

On sait que la résistance entre phases au stator est de 0,3 ohm et que les pertes fer du stator sont de 600w.

Calculer :

- le nombre de pôles (4)
- Le glissement (0,03)
- La puissance absorbée (22641w)
- Les pertes par effet joule ( $p_{jst} = 720$ w –  $p_{jr} = 710,7$ w)
- Le rendement (0,913)
- Le couple moteur (271,6Nm)

3) Un moteur asynchrone III à cage absorbe, à pleine charge, un courant de 340A et une puissance de 207Kw sous une tension de 380V 50Hz. Le glissement est alors de  $g = 1,2\%$ . Connaissant la résistance entre les phases du stator  $r = 0,018$  ohm ; les pertes constantes de 5200w et  $n_s = 1500$  t/min.

Calculer :

- le facteur de puissance
- La fréquence de rotation
- Pertes joule au rotor
- Pertes joule au stator
- La puissance utile
- Le rendement
- Le couple transmis au rotor ( $C_{transmis}$ )
- Le couple utile

4) Un moteur asynchrone III, 4 pôles, à cage, est alimenté par un réseau triphasé 220V/380V 50Hz.

Le couplage du stator est réalisé de manière telle que chaque enroulement soit soumis à la tension de 380V 50Hz.

Les essais moteurs ont donnés :

Résistance mesurée entre deux phases du stator = 1,5 ohm

Essai à vide sous tension nominale :  $P_v=210\text{w}$  ;  $I_v= 1,5\text{A}$

Essai en charge nominale sous tension de 380V  $I=4,7\text{A}$   $P=2500\text{w}$   $n_r= 1410 \text{ t/min.}$

Calculer :

- la vitesse du synchronisme
- Le couplage du moteur
- Le moteur fonctionnant à vide :
- Le facteur de puissance ( $\cos\varphi$ )
- Les pertes magnétiques au stator
- Les pertes mécaniques
- (nous supposerons ces deux dernières pertes égales)
- le moteur fonctionnant en charge :
- le glissement
- les pertes par effet joule au stator
- les pertes par effet joule au rotor
- la puissance utile
- le couple utile
- le rendement