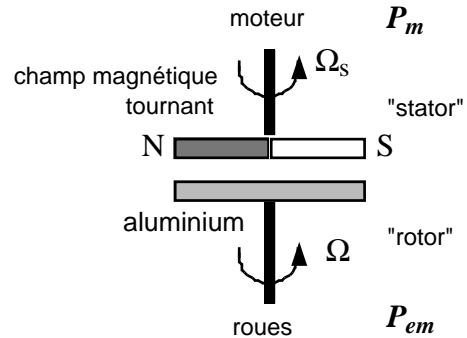
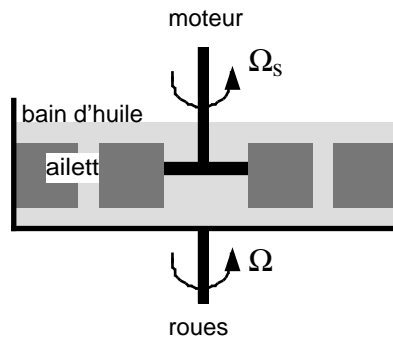
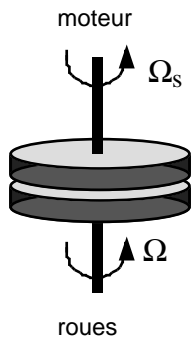


## C34 - Machine Asynchrone (MAS)

### Moteur asynchrone

- **Transmissions mécaniques asynchrones (transmissions de couple) :**



embrayage ou  
transmission hydraulique  
(frottements visqueux)  
ex. : engin de chantier

transmission électromagnétique  
asynchrone à induction  
(courants de Foucault)

- Pour qu'une transmission asynchrone puisse fonctionner, il faut que :
  - .  $\Omega$  (vitesse de rotation)  $<$   $\Omega_s$  (vitesse de synchronisme)
  - . il y ait *nécessairement* des pertes par échauffement (ex. : frottements ou effet Joule)

- *Glissement* : c'est l'erreur relative sur la vitesse, en % : 
$$g = \frac{\Delta\Omega}{\Omega_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} = 1 - \frac{\Omega}{\Omega_s}$$

- *Rendement* : 
$$\eta = \frac{P_m}{P_{em}} = \frac{C_m \Omega}{C_m \Omega_s} = \frac{\Omega}{\Omega_s} = 1 - g$$

*où* : *transmission mécanique asynchrone (embrayage,...)*      *conversion électromécanique asynchrone (MAS,..)*

$C_m$  : couple transmis      couple moteur

$P_{em} = C_m \Omega_s$  : puissance sur l'arbre moteur      puissance électromagnétique

$P_m = C_m \Omega$  : puissance sur l'arbre utilisateur      puissance mécanique au rotor

$P_{JR} = P_{em} - P_m$  : pertes par frottements      pertes Joule Rotor  $\Rightarrow g = 1 - \eta = \frac{P_{JR}}{P_{em}}$

**⚠** Le rendement d'une MAS ainsi calculé est le *rendement théorique* de la machine. Ce rendement de la seule transmission asynchrone ne tient pas compte des autres facteurs de pertes (voir plus bas bilan des puissances).

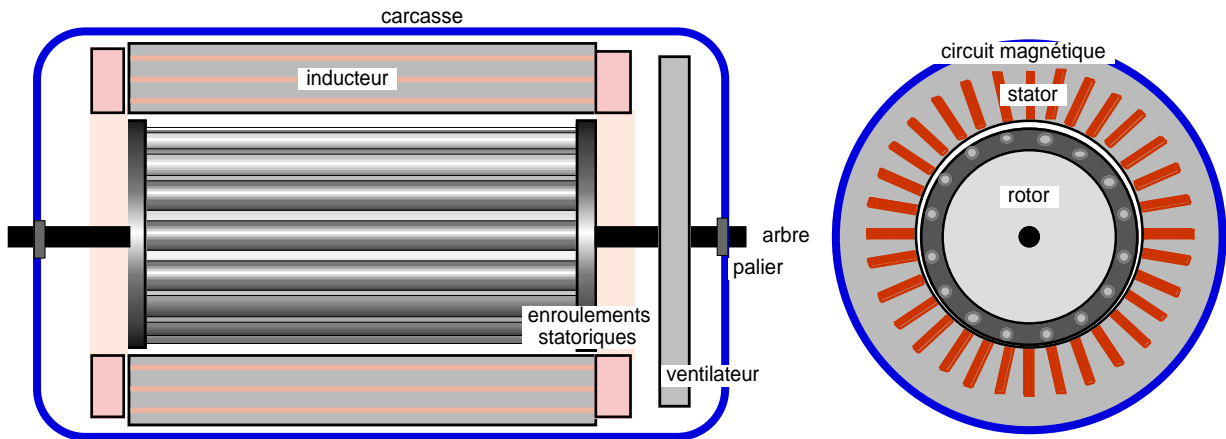
- **Constitution**

Le stator est un bobinage triphasé, qui engendre un champ magnétique tournant.

Pour les petites puissances (usuellement  $<$  10 kW), le rotor est constitué de barres (cuivre ou aluminium) formant un tambour appelé "cage d'écureuil". Le rotor, non connecté, est en court-circuit : ce moteur est pourvu de collecteur et de balais.

Pour des puissances plus importantes, le rotor est bobiné (triphase, Y), relié à l'extérieur via un collecteur simplifié à trois bagues, et court-circuité en fonctionnement normal. Mais on peut aussi modifier les propriétés électromécaniques du moteur en agissant sur le rotor par ces connexions.

Exemple : moteur "à cage d'écureuil" (schéma simplifié) :



• **Caractéristiques (moteurs à cage) :**

- Durée de vie très élevée ; maintenance quasi inexistante (paliers...)
- Faible coût

Mais

- Vitesse de rotation dépendant fortement de la charge appliquée sur l'axe
- Contrôle électronique de vitesse et de couple complexe

• **Modèle électrique d'un MAS idéal :**

Vitesse de synchronisme (vitesse de  $\dot{B}$ ) :  $\Omega_s = \frac{\omega}{p}$  rad / s ou  $n_s = \frac{f}{p}$  trs / s ou  $60 \frac{f}{p}$  trs / mn

Vitesse du rotor :  $\Omega = (1 - g)\Omega_s$  rad / s ou  $n = (1 - g)n_s$  trs / s ou trs / mn

Vitesse de  $\dot{B}$  par rapport au rotor ("vitesse de glissement") :  $\Omega_s - \Omega = g\Omega_s = g \frac{\omega}{p}$

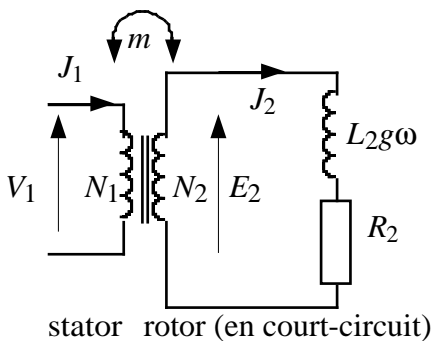
Pulsation des courants rotoriques ( $J_2$ ) :  $\omega' = p(\Omega_s - \Omega) = g\omega$  (même relation que  $\omega = p\Omega_s$ )

Le moteur asynchrone est équivalent à un transformateur dont l'enroulement secondaire (rotor) est en rotation. A l'arrêt, son rapport de transformation vaut :

$$m = \frac{\text{nb spires 1 phase rotor}}{\text{nb spires 1 phase stator}} = \frac{\text{fem rotor à l'arrêt}}{\text{tension alim stator}} \Rightarrow m = \frac{N_2}{N_1} = \frac{E_{20}}{V_1}$$

NB : pour un rotor à cage,  $N_2$  est égal à la moitié du nb de barres.

Le rotor ( $R_2, L_2$ ) est branché en court-circuit. D'où le schéma équivalent au MAS idéal en rotation (MAS idéal : pas de fuites magnétiques, stator sans résistance, etc) :



(1)  $m = \frac{E_{20}}{V_1}$

(2)  $E_{20} = \frac{d\Phi_0}{dt} = \omega\Phi \Rightarrow E_2 = \frac{d\Phi}{dt} = \omega'\Phi = g\omega\Phi = gE_{20} = mgV_1$   
 à l'arrêt ( $g = 1$ )                      en rotation ( $0 < g < 1$ )

$$\Rightarrow J_2 = \frac{E_2}{|Z_2|} = \frac{mgV_1}{\sqrt{R_2^2 + (L_2g\omega)^2}}$$

• **Conversion électromécanique**

- Conversion électromécanique idéale :

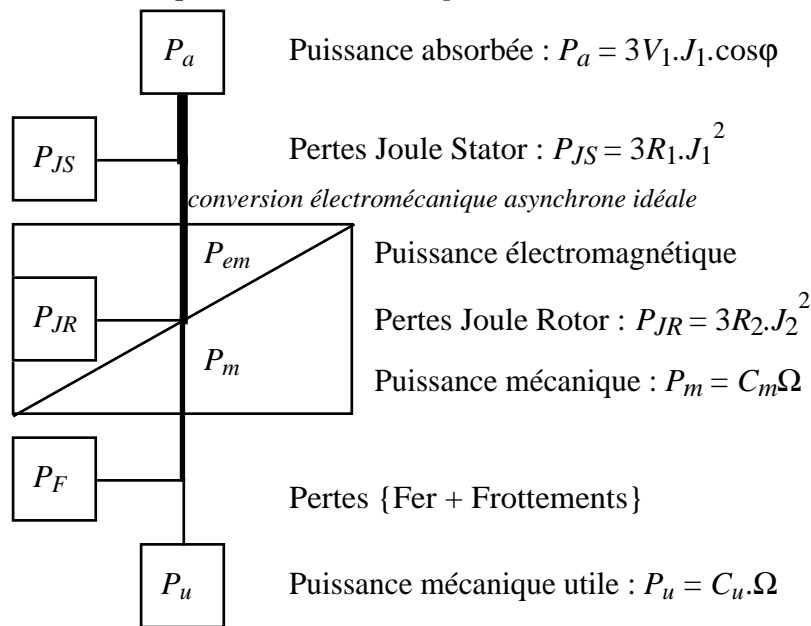
⚠ Cette conversion ne saurait être parfaite, puisqu'il FAUT des pertes Joule au rotor pour que la transmission asynchrone puisse fonctionner. Mais on suppose ici le MAS idéal.

$$(3) \quad g = \frac{P_{JR}}{P_{em}} = \frac{3R_2 J_2^2}{C_m \Omega_s} \Rightarrow C_m = 3 \rho m^2 R_2 \left( \frac{V_1}{\omega} \right)^2 \frac{g \omega}{R_2^2 + (L_2 g \omega)^2}$$

Le couple est maximum quand :  $\frac{dC_m}{dg} = 0 \Leftrightarrow C_{max} = \frac{3 \rho m^2}{2L_2} \left( \frac{V_1}{\omega} \right)^2$  pour  $g = \frac{R_2}{L_2 \omega}$

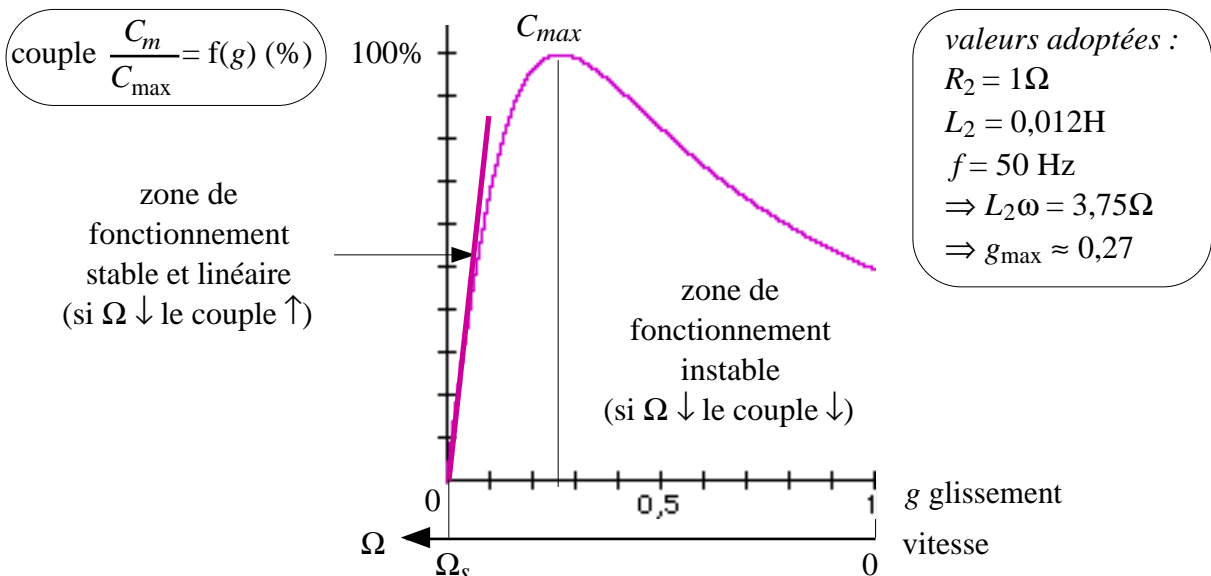
⇒ pour conserver un couple maximal, il faut maintenir le rapport  $\frac{V_1}{\omega}$  constant.

- Conversion électromécanique réelle : bilan des puissances



• **Fonctionnement statique**

La caractéristique statique mécanique d'un MAS se déduit de l'équation du couple  $C_m(g)$  :



• **Fonctionnement dynamique : contrôle de la vitesse**

Le fonctionnement à vitesse variable est régi par les équations (1), (2), (3) et (4)  $C_m = J \frac{d\Omega}{dt} + C_r$

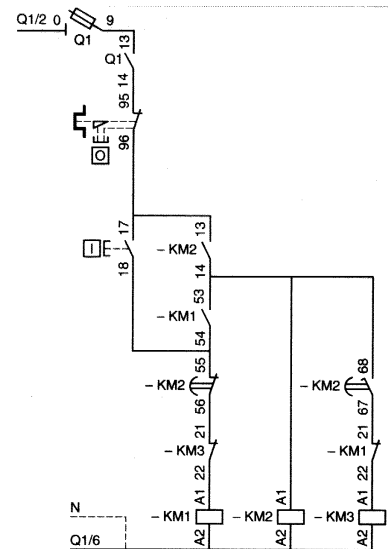
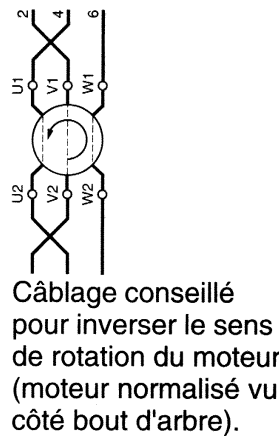
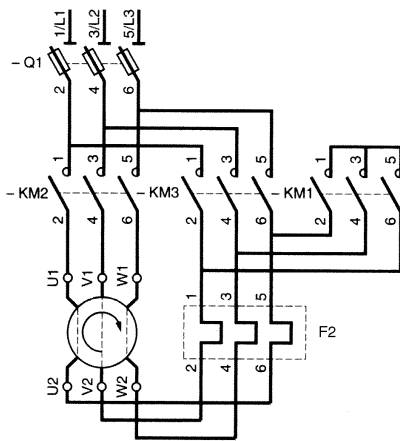
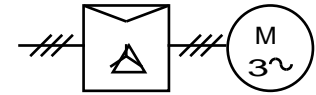
Il existe plusieurs moyens pour contrôler la vitesse d'un MAS, du plus simple au plus complexe :

- **Démarrage étoile / triangle**

Chaque enroulement est d'abord alimentée sous une tension  $V$ , puis sous une tension  $U = \sqrt{3}V$ .

Exemple : démarreur Y-Δ 11kW (d'après doc. Schneider ref LE3-D126E7) :

- Tension entre phases ( $U$ ) : 380 à 440V
- Fusible (à monter sur le sectionneur) : aM 25A
- Tension du circuit de commande : 48V
- Enveloppe : coffret métallique étanche IP559
- Commande par deux boutons : "I" Marche - "O" Arrêt
- Service : 30 démarrages/heure maxi
- Temporisation démarrage : 0 à 30s



L1, L2, L3 : réseau triphasé

Q1 : sectionneur tripolaire porte-fusibles

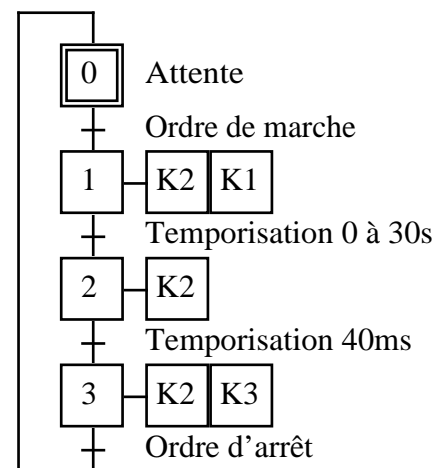
KM1 : contacteur tripolaire "étoile"

KM2 : contacteur tripolaire "ligne"

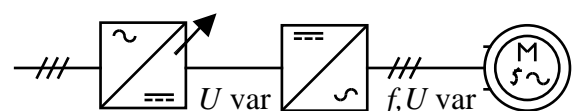
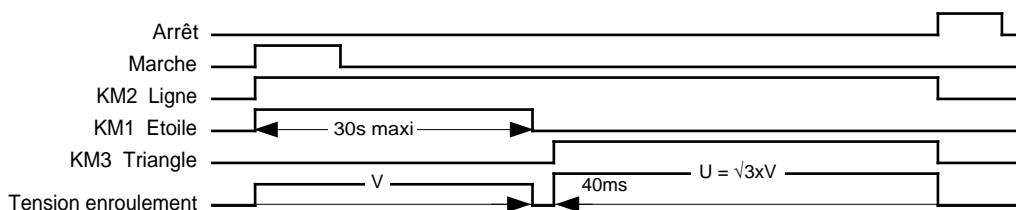
KM3 : contacteur tripolaire "triangle"

F2 : relais thermique de protection 25A (ref Schneider LR2-D1322) à adjoindre au coffret.

Le contact KM2 (67-68) est à fermeture différée, grâce à un temporisateur imposant un retard de 40ms environ à KM3 au moment de la commutation Y → Δ afin d'assurer un temps de coupure suffisant à KM1. Cela évite le risque de court-circuit entre deux fils de phase.

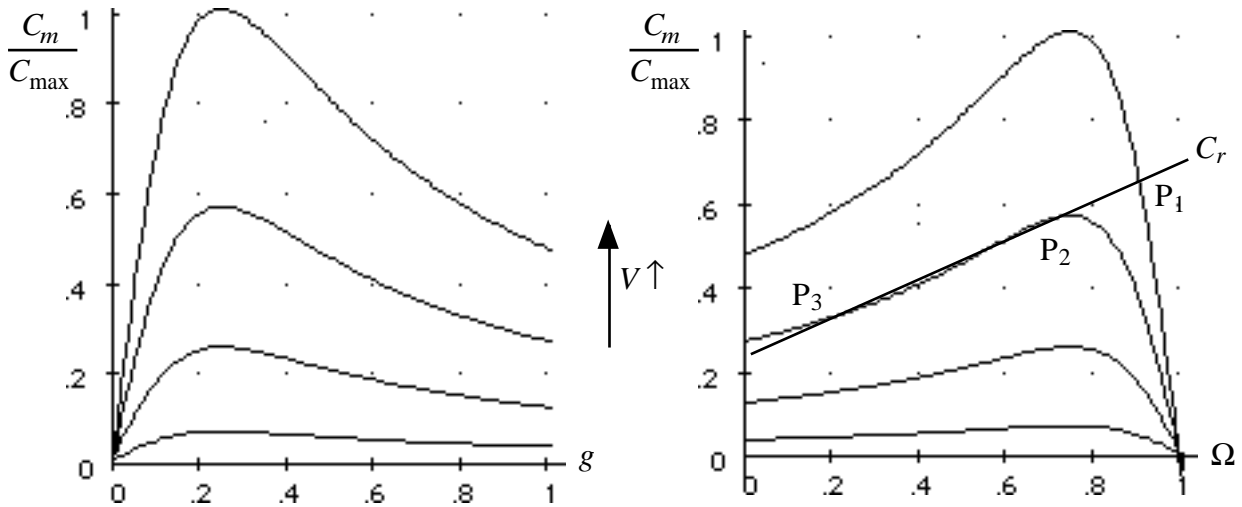
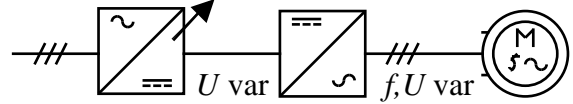


Chronogramme :



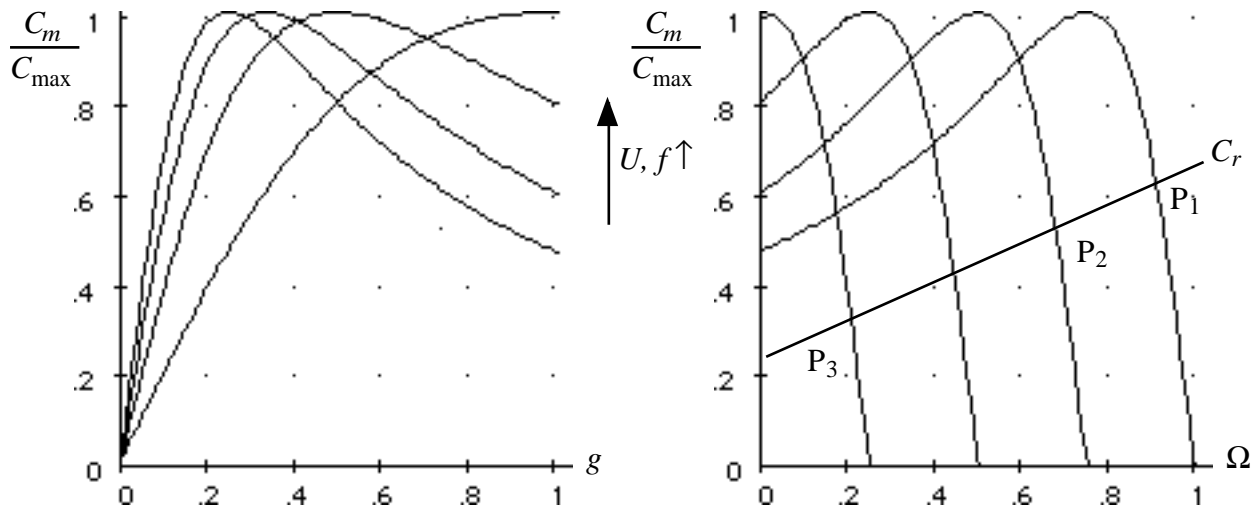
- Contrôle à  $U$  et  $f$  variables, avec  $U/f = c^{te}$ .

⚠ Le contrôle de vitesse d'un MAS à tension  $U$  variable, comme on le fait par exemple sur un MCC, ne convient pas (simulation numérique à l'aide des mêmes données que précédemment) :



Le contrôle est possible entre les points  $P_1$  et  $P_2$ . Mais en dessous de  $P_2$ , si la vitesse diminue, le couple également  $\Rightarrow$  le point de fonctionnement "saute" en  $P_3$ . Ce fonctionnement n'est pas stable.

Le principe réellement utilisé consiste à conserver un rapport  $U/f$  de valeur constante à l'aide d'un onduleur MLI (cf §C25). Non seulement le glissement (donc la vitesse  $\Omega$ ) varie, mais aussi la vitesse de synchronisme  $\Omega_s = 2\pi f / p$ . Les caractéristiques de couple se déplacent en fonction de  $U$  et de  $f$  en restant parallèles entre elles (dans la zone de fonctionnement stable) et conservent au couple maximum une valeur constante. Au total, on obtient un réseau de caractéristiques de couple identique à celui d'un moteur à courant continu :



Ici, le contrôle est possible quel que soit le point de fonctionnement ( $P_1, P_2, P_3$ ).

Malheureusement, il n'a pas été tenu compte dans le calcul du couple effectué plus haut des caractéristiques du MAS réel : impédance du stator, fuites magnétiques, etc. La commande en  $U/f = c^{te}$  ne fonctionne qu'à la condition que ces différents facteurs soient négligeables, ce qui est faux à basse vitesse et en régime transitoire : au démarrage, cette commande n'est utilisable qu'à partir d'un certain seuil. L'ordre de grandeur pratique de la gamme de vitesse est de 1 à 10 (d'après doc. Schneider ALTIVAR 08).

\*\*\*\*\* **COMPLEMENTS** \*\*\*\*\*

- Contrôle vectoriel de flux (suite variation de vitesse des MAS)

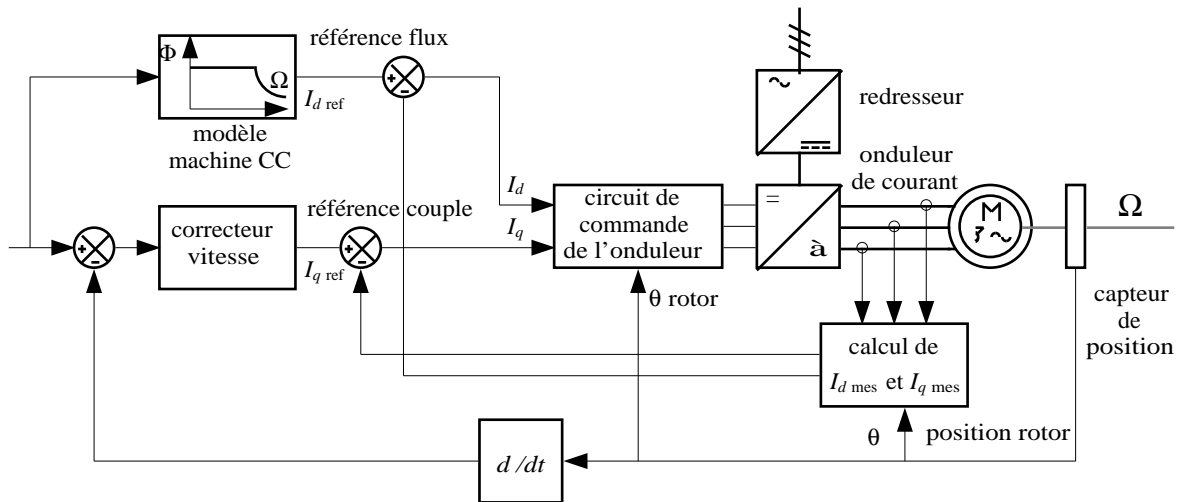
Comme dans un moteur à courant continu, c'est une régulation cascade avec contrôle du courant dans une boucle interne et contrôle de position dans une boucle externe.

Pour la boucle externe, on se donne un modèle de fonctionnement du moteur asynchrone équivalent à un moteur à courant continu au moyen d'une transformation mathématique appelée "transformation de Park". Les paramètres de commande du moteur sont les courants de ligne (générés par un onduleur de courant triphasé). On mesure à tout instant la position du rotor d'où on déduit par dérivation la mesure vitesse.

Alors que dans un moteur asynchrone ordinaire les courants statoriques influent à la fois sur les variables flux et couple, le circuit de commande vectorielle permet de contrôler séparément ces deux variables, exactement comme dans un MCC à excitation séparée (où le courant inducteur commande le flux donc la vitesse et le courant induit commande le couple).

Cela est rendu possible grâce aux propriétés vectorielles des champs tournants : le champ  $\vec{B}$  engendré par les enroulements statoriques alimentés en triphasé peut être vu comme étant engendré par deux enroulements fictifs perpendiculaires alimentés par deux courants  $i_d$  et  $i_q$  en quadrature (c'est d'ailleurs le principe de fonctionnement d'un MAS monophasé utilisé en petite puissance dans les équipements domestiques). En outre, ces deux enroulements fictifs sont calculés dans un repère lié au rotor (d'où la nécessité de connaître sa position  $\theta$ ). Dans ce repère, on montre que le moteur est équivalent à une MCC dont  $i_d$  serait le courant inducteur (commande de flux donc de vitesse) et  $i_q$  le courant induit (comande de couple).

Il existe deux types de contrôle vectoriel de flux : en boucle ouverte, sans capteur de position (gamme de vitesse de 1 à 100, d'après doc. Schneider ALTIVAR 58 ou 66 en version de base), et en boucle fermée, avec capteur de position (gamme de vitesse de 1 à 1000, ALTIVAR 66).



**MAS en fonctionnement réversible - génératrice asynchrone**

La caractéristique statique d'une MAS est réversible. On en déduit que cette machine peut fonctionner en génératrice pour  $g < 0$  ("hypersynchronisme" :  $\Omega > \Omega_s$ ). Le rotor d'une génératrice asynchrone est généralement à cage d'écurieuil (⇒ robustesse et faible coût). Consommant de la puissance réactive, elle doit être couplée au réseau ou à une batterie de condensateurs dans le cas d'une utilisation isolée. Son emploi est réservé aux générateurs de puissance moyenne dont l'arbre d'entraînement tourne à des vitesses fortement variables : mini centrale hydraulique, éolienne, turbine ou moteur à gaz de récupération, certains groupes électrogènes,...

Exemple : moteur de puissance utile de 10 kW

$U = 400V, f = 50 \text{ Hz}, I = 17A, \cos\phi = 0,85$  (donc  $\sin\phi = 0,527$ )

$n = 1475 \text{ tr/min}$  donc  $\Delta n = 1500 - 1475 = 25 \text{ tr/min}$

Les puissances actives et réactives fournies par le réseau sont :

$P = UI \cos\phi = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 17 \cdot 0,85 = 10\,000 \text{ W}$

$Q = UI \sin\phi = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 17 \cdot 0,527 = 6\,200 \text{ VAR}$

Si la machine est utilisée en génératrice elle fournira  $P$  en absorbant  $Q$  sous 400V et 50 Hz en tournant à la vitesse  $n' = n_s + \Delta n$ , soit  $1500 + 25 = 1525 \text{ tr/min}$ .

