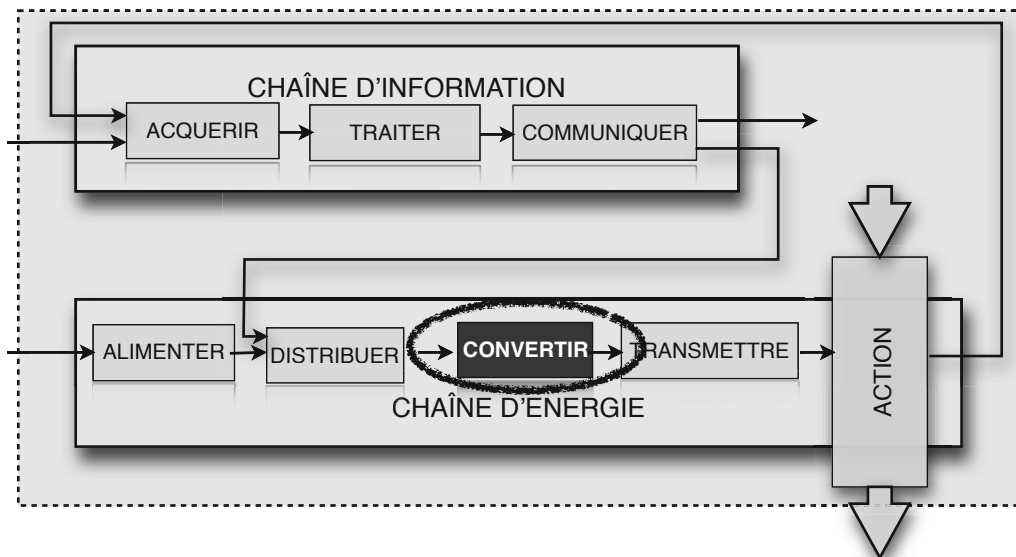

Chapitre 10. Moteurs asynchrones



L'énergie électrique n'est que rarement utilisée comme une fin, elle véhicule une énergie intermédiaire qui sera convertie par exemple en énergie mécanique de rotation.

Lorsque le régime est sinusoïdal, le convertisseur électromécanique est le moteur asynchrone. Les moteurs asynchrones représentent un tiers de la consommation électrique mondiale. Il s'agit de moteurs robustes, éprouvés.

A. Généralités

A.1 Introduction

Le moteur asynchrone est le moteur le plus utilisé dans l'industrie. Il s'agit d'un moteur robuste, éprouvé, fiable, doté d'un bon rendement.

Il nécessite un réseau triphasé pour fonctionner, et il est nécessaire de magnétiser les pôles de son stator, ce qui en fait malheureusement un gros consommateur de puissance réactive.

A.2 Rappels sur le régime triphasé

Une alimentation triphasée est constituée de 3 phases lorsqu'il s'agit d'un réseau tripolaire, ou de 3 phases et 1 neutre lorsqu'il s'agit d'un réseau tétrapolaire.

Les tensions de chacune des phases sont de même amplitude et de même pulsation, mais décalées de $2\pi/3$.

L1		$V_1(t) = V\sqrt{2} \sin(\omega t)$ $V_2(t) = E \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$ $V_3(t) = E \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$
L2	↑ U_{12}	
L3	↑ V_1	
N		

La tension V_1 est appelée tension simple, de valeur efficace V
 La tension $U_{12} = V_1 - V_2$ est appelée tension composée, de valeur efficace U .

Dans un réseau équilibré, ce qui sera toujours le cas au programme de la CPGE ATS, on a $U = \sqrt{3}V$.

Les puissances transitant dans le réseau sont, dans le cas de récepteurs linéaires :

$$\text{Puissance active : } P = 3VI \cos \varphi = \sqrt{3}UI \cos \varphi$$

$$\text{Puissance réactive : } Q = 3VI \sin \varphi = \sqrt{3}UI \sin \varphi$$

$$\text{Puissance apparente : } S = 3VI = \sqrt{3}UI$$

En France, le réseau est caractérisé par une tension simple $V = 230 \text{ V}$ et une tension composée $U = 400 \text{ V}$, à une fréquence $f = 50 \text{ Hz}$.

B. Etude du moteur asynchrone

B.1 Constitution du moteur asynchrone

Un moteur asynchrone est composé de 2 éléments principaux :

- un stator, constitué de bobinages. Ce stator possède p paires de pôles (soit p enroulements par phase) ;
- un rotor, qui est la partie tournante du moteur, qui est soit en cage d'écureuil (barreaux lisses), soit bobiné.

Des phénomènes d'induction, détaillés plus loin, vont se créer au sein du rotor. C'est la raison pour laquelle ces machines sont également appelées machines à induction.

Les courants induit qui circulent dans le rotor ne peuvent exister que si une différence de pulsation existe entre le stator et le rotor, donc entre la fréquence d'excitation du stator et la vitesse du rotor.

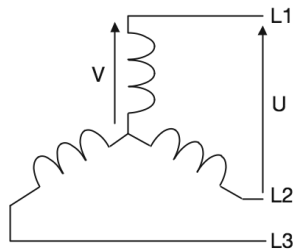
Cette différence de vitesse, qui est à l'origine de la création du couple électromagnétique, est appelée glissement, et est à l'origine du terme «asynchrone» de ce moteur.

B.2 Couplage d'un moteur asynchrone

Les bobinages d'un moteur asynchrone sont conçus pour être alimentés sous une certaine tension. En fonction des caractéristiques du réseau triphasé qui alimente le moteur, il faudra choisir de relier entre deux phases soit un bobinage, soit deux bobinages.

Les standard de tension d'alimentation des bobinages sont 133 V, 230 V et 400 V.

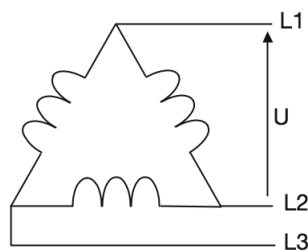
B.2.1 Couplage étoile



Lorsque la tension simple du réseau correspond à la tension d'alimentation des bobinages du stator, il va falloir coupler ces bobinages en «étoile».

Deux bobinages sont alors reliés entre deux phases, et la tension d'alimentation de chaque bobinage est égale à la tension simple du réseau.

B.2.2 Couplage triangle



Lorsque cette fois c'est la tension composée du réseau qui correspond à la tension d'alimentation des bobinages du stator, il va falloir coupler ces bobinages en «triangle».

De cette façon, chacun des bobinages est relié entre deux phases, et ces bobinages sont alimentés à une tension égale à la tension composée du réseau.

B.2.3 Plaque signalétique d'un moteur

La plaque signalétique du moteur indique le type de couplage en fonction de la tension :

Tensions indiquées sur la plaque signalétique du moteur	127V-220V		220V-400V		400V-660V	
Tensions du réseau alimentation	127V	220V	220V	380V	380V	660V
Couplage à effectuer	Δ	Y	Δ	Y	Δ	Y

Les plaques signalétiques des moteurs précisent par ailleurs d'autres informations utiles :

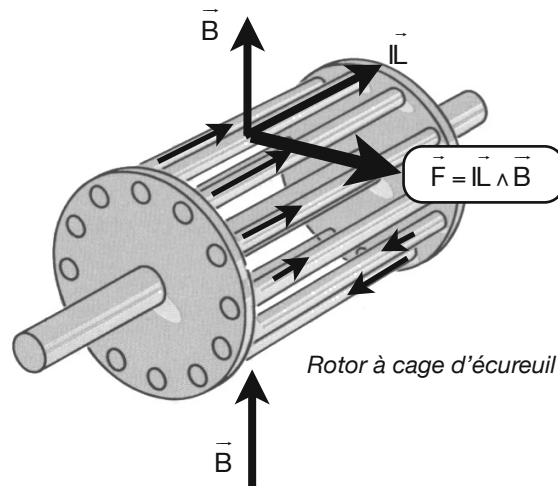
* LEROY SOMER		MOT. 3 ~ LS 80 L T				
N° 734570 BJ 002		kg 9				
IP 55 I cl.F 40°C S1						
V	Hz	min ⁻¹	kW	cos φ	A	
Δ 220	50	2780	0,75	0,86	3,3	
Y 380					1,9	
Δ 230	50	2800	0,75	0,83	3,3	
Y 400					1,9	
Δ 415	50	2825	0,75	0,86	3,3	
	**				1,9	

MOTEURS LEROY-SOMER

Annotations :
 - Couplage à adopter : Δ 230 / Y 400
 - Vitesse nominale : 2800 min⁻¹
 - Facteur de puissance : 0,83
 - Courant inducteur : 3,3 A
 - Puissance nominale : 0,75 kW

B.3 Principe de fonctionnement

L'alimentation des bobinages du stator par un courant sinusoïdal génère un champ magnétique \vec{B} tournant.



Ce champ magnétique tournant crée un flux magnétique $d\Phi = \vec{B} \cdot d\vec{S}$ à travers le rotor en cage d'écurueil de la machine asynchrone.

D'après la loi de Lenz, cette variation de champ magnétique génère une force électromotrice $e = -\frac{d\Phi}{dt}$ entre les barreaux court-circuités du rotor, et un courant induit circule dans ces barreaux.

La circulation de ce courant induit dans le champ magnétique crée alors une force de Laplace $\vec{F} = \vec{I}_L \wedge \vec{B}$ sur les barreaux, qui se traduit finalement par un couple moteur.

Il est important de remarquer que ce couple n'existe que grâce à l'induction, créée à la suite de la différence de fréquence entre le champ magnétique tournant et le rotor. On introduira donc la notion de «glissement» qui traduit cette différence de fréquence.

On appelle **pulsation de synchronisme** la pulsation du champ magnétique dans un stator alimenté à une fréquence f , et disposant de p paires de pôles :

$$\Omega_s = \frac{2\pi f}{p}$$

Pour que les phénomènes inductifs puissent avoir lieu, nous avons vu qu'il est nécessaire qu'il y ait une différence de pulsation entre le rotor et le champ magnétique. C'est le **glissement**, défini par :

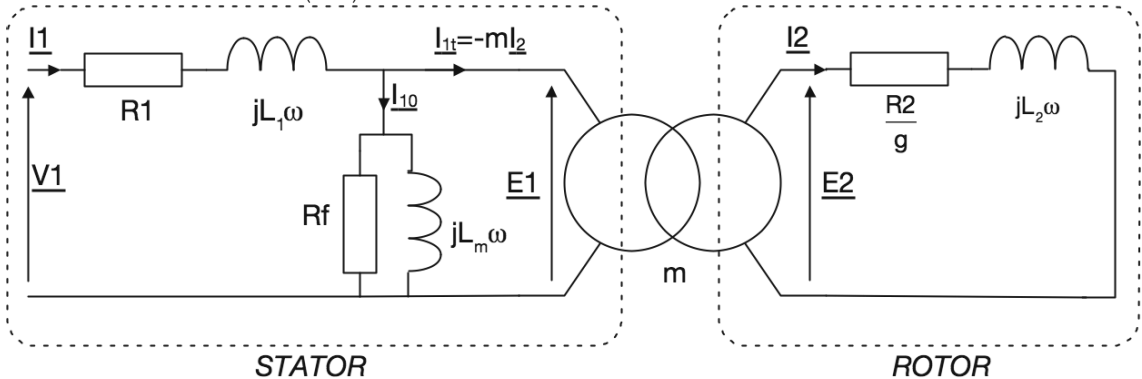
$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$$

En fonctionnement moteur, le glissement est positif (le rotor tourne à une vitesse inférieure à la vitesse de synchronisme), et le fonctionnement est dit «hyposynchrone».

La différence de pulsation fait que, du point de vue du rotor, ce dernier voit un champ magnétique à une fréquence $f_r = gf$.

B.4 Modélisation électrique d'un moteur asynchrone

Une phase d'un moteur asynchrone peut être vue comme un transformateur, dont la pulsation du secondaire serait égale à $g(2\pi f)$, et dont le secondaire serait court-circuité :



Modèle d'une machine asynchrone

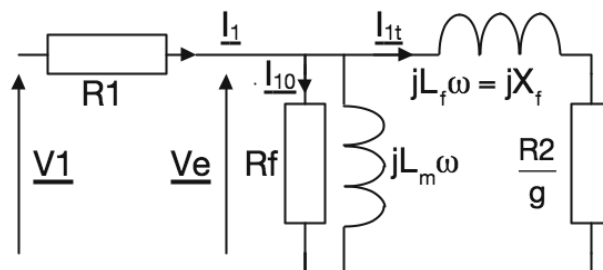
où $Z_1 = R_1 + jL_1\omega$ est l'impédance d'un enroulement du stator (résistance et inductance de fuite)

$Z_2 = \frac{R_2}{g} + jL_2\omega$ est l'impédance d'un enroulement du rotor (résistance et inductance de fuite)

R_f est la résistance traduisant les pertes ferromagnétiques

L_m est l'inductance magnétisante

L'ensemble $\{R_f, L_m\}$ modélise le circuit magnétique.



En ramenant les impédances du secondaire au primaire, on aboutit alors au schéma ci-contre. X_f représente la réactance de fuite de l'induit.

Dans ce modèle, la **puissance dissipée dans la résistance fictive R_2/g correspond à la puissance électrique transmise au rotor (P_{em} : puissance électromagnétique).**

B.5 Couple électromagnétique

D'après le modèle élaboré précédemment, la puissance électromagnétique est donc égale à

$$P_{em} = 3 \frac{R_2}{g} I_{it}^2$$

Le couple électromagnétique a donc pour expression :

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_s}$$

Or, en négligeant la résistance R_1 des enroulements du stator, donc en supposant $\underline{V}_1 = \underline{V}_e$ on peut écrire :

$$\underline{I}_{it} = \frac{\underline{V}_1}{\frac{R_2}{g} + jL_f\omega}, \text{ et donc } I_{it}^2 = \frac{V_1^2}{\left(\frac{R_2}{g}\right)^2 + (L_f\omega)^2}$$

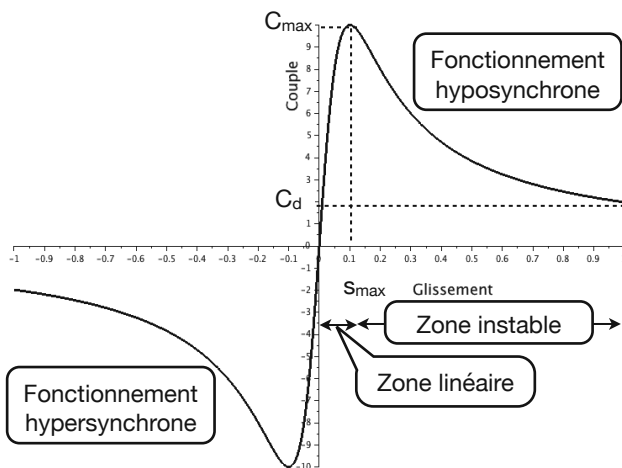
D'où l'expression du couple électromagnétique :

$$C_{em} = 3 \frac{V_1^2}{\Omega_s} \frac{\frac{R_2}{g}}{\left(\frac{R_2}{g}\right)^2 + (L_f\omega)^2} \text{ avec } g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$$

Cette expression peut finalement s'écrire sous la forme :

$$C_{em} = \frac{2C_{max}}{\frac{g}{g_{max}} + \frac{g_{max}}{g}} \text{ avec } \begin{cases} C_{max} = \frac{3V_1^2}{2(L_f\omega)^2 \Omega_s} \\ g_{max} = \frac{R}{L_f\omega} \end{cases}$$

L'allure du couple en fonction du glissement est alors la suivante :



Courbe $C_{em}=f(g)$ d'une machine asynchrone

Cette courbe fait apparaître les deux comportements de la machine asynchrone, linéaire et hyperbolique.

Pour de faibles glissements, la courbe caractéristique est linéaire, et on a :

$$\frac{g}{g_{max}} = \frac{C_{em}}{C_{max}}$$

Au-delà de cette partie linéaire, le comportement peut engendrer une instabilité.

Le fonctionnement hyposynchrone est le fonctionnement normal d'un moteur asynchrone.

Le fonctionnement hypersynchrone correspond au fonctionnement normal d'une génératrice.

C_d représente le couple de démarrage.

Notons qu'il existe toutefois des solutions, intéressantes par exemple dans le cas des éoliennes, qui permettent de faire fonctionner les génératrices en mode hyposynchrone. Il s'agit des machines asynchrones à double alimentation (MADA), mais dont l'étude sort du cadre du programme.

B.6 Pilotage d'un moteur asynchrone



La vitesse d'un moteur dépend donc de la vitesse de synchronisme, qui dépend directement de la fréquence du courant dans le stator.

Faire varier la vitesse d'un moteur asynchrone revient donc à faire varier la fréquence d'excitation du stator. C'est le rôle des variateurs, qui sont des onduleurs.

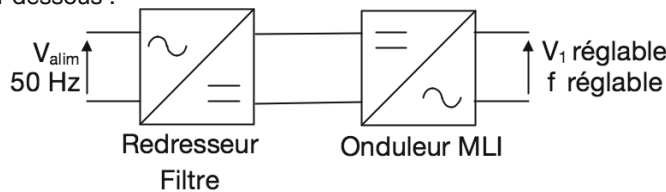
En faisant varier la fréquence de la modulante (dans le cas d'un onduleur MLI), on fait varier la fréquence du courant d'alimentation des bobinages du stator.

$$\text{Rappelons toutefois que } C_{\max} = \frac{3V_1^2}{2(L_f \omega) \Omega_s} = \frac{3pV_1^2}{8\pi^2 L_f} \left(\frac{V_1}{f}\right)^2$$

Comme on cherchera à conserver le couple maximal, la variation de fréquence s'accompagnera d'une variation de tension, telle que le rapport V/f reste constant.

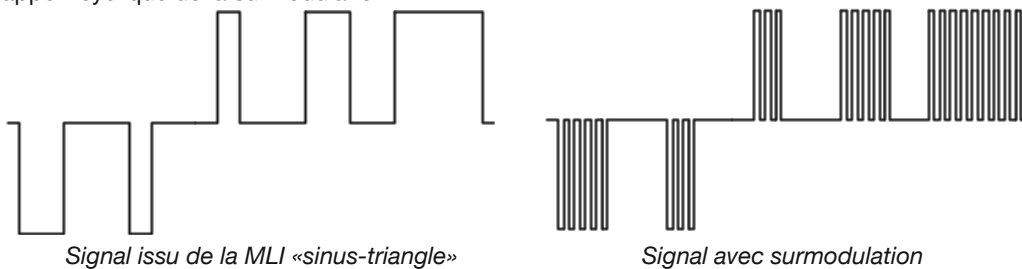
Le pilotage de la machine asynchrone sera dit effectué à U/f constant : on parlera de commande scalaire. Notons qu'il existe également la commande vectorielle, mais dont l'étude sort du cadre du programme.

La structure générale d'un variateur de vitesse pour une commande scalaire d'un moteur asynchrone est représentée ci-dessous :



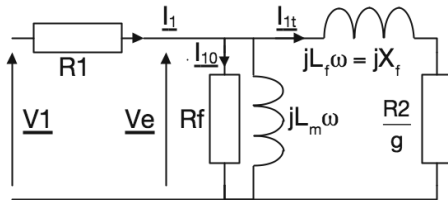
La commande se faisant à U/f constant, il est nécessaire de piloter la tension efficace en sortie d'onduleur. Pour cela, il est possible :

- soit de régler l'amplitude de la modulante (loi MLI de type «sinus-triangle») ;
- soit de procéder à une surmodulation : le signal MLI est lui-même découpé à une fréquence supérieure à la fréquence de la porteuse. Ainsi, la tension moyenne devient réglable en fonction du rapport cyclique de la surmodulation.



La commande scalaire n'est pas adaptée aux très faibles vitesses (inférieures à 10% de la vitesse nominale), car alors la chute de tension aux bornes de la résistance R_1 n'est plus négligeable, et l'approximation $\underline{V}_1 = \underline{V}_e$ (schéma du paragraphe B.4) n'a alors plus de sens.

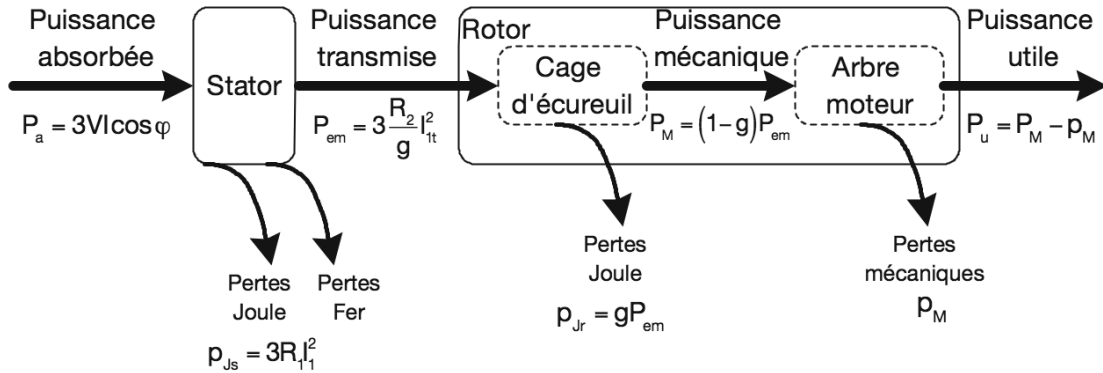
B.7 Bilan des puissances



La puissance électrique alimentant une machine asynchrone est transmise :

- au stator sous forme électrique,
- puis est convertie sous forme électromagnétique,
- puis est transmise au rotor sous forme mécanique,
- puis est enfin délivrée sur l'arbre de sortie.

Chaque transmission fait apparaître des pertes, qui sont représentées ci-dessous :



Bilan des puissances d'une machine asynchrone

Puissances acheminées	Pertes
Puissance électrique absorbée : $P_a = 3VI\cos\varphi = \sqrt{3}UI\cos\varphi$	Pertes joule statoriques : $p_{Js} = 3R_{11}I_1^2$
Puissance électromagnétique transmise à la cage d'écureuil : $P_{em} = 3\frac{R_2}{g}I_{1t}^2$	Pertes fer statoriques : p_{Fs}
Puissance mécanique transmise à l'arbre moteur : $P_M = (1-g)P_{em}$	Pertes joule rotoriques : $p_{Jr} = gP_{em}$
Puissance mécanique disponible en sortie : $P_u = P_M - p_M$	Pertes mécaniques : p_M

Les pertes fer statoriques ne dépendent que de la tension d'alimentation et de la fréquence. Il existe également des pertes fer rotoriques qui sont négligeables.