

Machine asynchrone triphasée à cage

I. Introduction

La machine asynchrone est le type de machine électrique le plus répandu en tant que moteur, jouant un rôle essentiel dans diverses applications industrielles ainsi que dans le secteur du transport ferroviaire. Outre son utilisation en tant que moteur, cette machine joue également un rôle significatif en tant que générateur dans les centrales électriques, notamment dans le domaine des énergies renouvelables.



Les points forts de la machine asynchrone :

- conception simple, robuste, bon marché, entretien facile.
- large gamme de puissances nominales jusqu'à 10 MW.
- fonctionne essentiellement à vitesse constante de zéro à pleine charge.
- vitesse dépend de la fréquence de la source d'alimentation

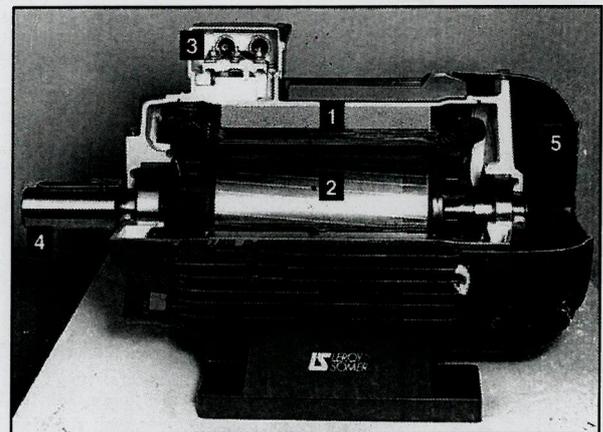


www.automerge.info

II. Constitutions

La machine asynchrone est composée des éléments suivants :

- **Stator** : Il est équipé de trois bobinages (ou enroulements) qui peuvent être couplés en étoile **Y** ou triangle **D** en fonction du système d'alimentation électrique.
- **Rotor** : cylindrique, il porte soit un bobinage (d'ordinaire triphasé comme au stator) accessible par trois bagues et trois balais soit une cage d'écuréuil non accessible, à base de barres conductrices en aluminium

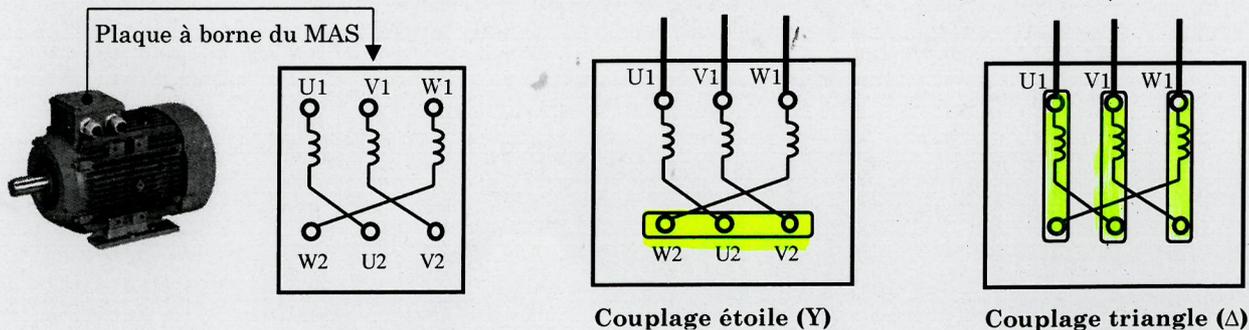


1	Stator	3	Boîte à bornes	5	Ventilateur
2	Rotor à cage d'écuréuil	4	Arbre		

La machine asynchrone à cage est la plus répandue dans le domaine industriel, de par sa grande robustesse mécanique, son faible coût et sa très bonne standardisation.

III. Plaque à borne et choix de couplage

Le stator de la machine asynchrone triphasée est constitué de trois enroulements identiques, qui peuvent être reliés soit en configuration étoile (Y) soit en triangle (Δ). Le choix de la configuration dépend à la fois de la tension du réseau électrique et de la tension maximale supportée par l'enroulement, indiquée sur la plaque signalétique de la machine.



Comment choisir le couplage adéquat pour une MAS ? On distingue :

Réseau : 220/380	Moteur MAS : 220 V / 380 V
<ul style="list-style-type: none"> ○ Tension simple V_r : ... <u>220 V</u> ○ Tension complexe U_r : ... <u>380 V</u> 	<ul style="list-style-type: none"> ○ La tension supportée par un enroulement V_m : ... <u>220 V</u>

Méthode de choix :

- Si la tension d'emploi V_m (supportée) correspond à la tension simple de réseau V_r : **couplage étoile (Y)**
- Si la tension d'emploi V_m (supportée) correspond à la tension complexe de réseau U_r : **couplage triangle (Δ)**

Exemple :

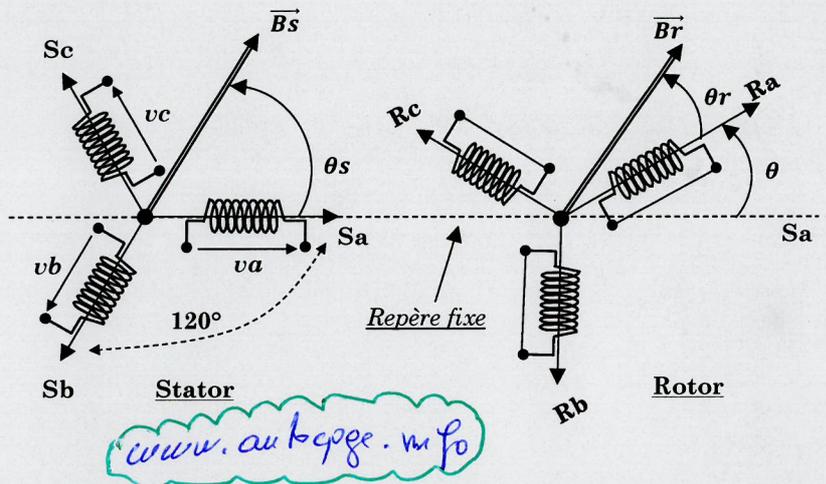
- Exemple 1 : Réseau : 220 V / 380 V || Moteur MAS : 220 V / 380 V : $V_m = V_r \Rightarrow$ **couplage (Y)**
- Exemple 2 : Réseau : 220 V / 380 V || Moteur MAS : 380 V / 658 V : $V_m = U_r \Rightarrow$ **couplage (Δ)**

IV. Principe de fonctionnement

Comment fonctionne la machine asynchrone ?

- **Ferraris :** Les enroulements statoriques sont déplacés géométriquement de 120 degrés et alimentés par des courants triphasés de pulsation ω_s , ce qui crée un champ magnétique tournant (B_s), à la vitesse $\Omega_s = \frac{\omega}{p}$, où p représente le nombre de paires de pôles au stator.

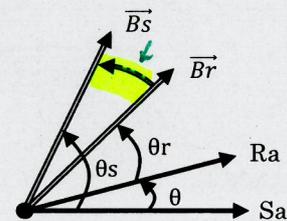
$\omega = 2\pi f$
 ↑
 fréquence de réseau



- Ce champ magnétique tournant balaie les enroulements du rotor et produit une tension induite dans les enroulements du rotor
- En raison du fait que les enroulements du rotor sont court-circuités, des courants rotoriques prennent naissance et génèrent à leur tour un champ magnétique rotorique \vec{B}_r .

Avec :

- $\Omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$: vitesse angulaire (stator / champs statorique B_s).
- $\Omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$: vitesse angulaire (rotor / champs statorique B_r).
- $\Omega = \frac{d\theta}{dt}$: vitesse angulaire (stator / rotor)



- Interaction entre le champ magnétique statorique \vec{B}_s et le champ magnétique rotorique \vec{B}_r crée un couple électromécanique qui entraîne en rotation la partie mobile : $Cem = k \cdot (\vec{B}_s \wedge \vec{B}_r)$

$Cem = k \cdot B_s \cdot B_r \cdot \sin(\theta_s - (\theta + \theta_r)) \rightarrow Cem = k \cdot B_s \cdot B_r \cdot \sin((\Omega_s - (\Omega + \Omega_r))t + Cte)$

Le couple électromagnétique, noté Cem , est sinusoïdal et sa valeur moyenne est nulle ($Cem_{moy} \neq 0$), ce qui signifie qu'il n'y a pas de rotation. Pour qu'un couple apparaisse et qu'il y ait rotation, il est nécessaire que la valeur moyenne du couple électromagnétique soit différente de zéro ($Cem_{moy} \neq 0$). Cela peut être obtenu en respectant la loi d'autopilotage de la machine : $\Omega_s - (\Omega + \Omega_r) = 0$.

On a : $\Omega_s = \Omega + \Omega_r \rightarrow \Omega \neq \Omega_s$: Le nom de la machine asynchrone provient du fait que la vitesse du rotor diffère de celle du champ tournant, créant ainsi un état de désynchronisation entre les deux, d'où le terme "asynchrone".

V. Vitesse et pulsation

1- Vitesse synchronisme

C'est la vitesse de champs tournant Ω_s , elle est donnée par les relations suivantes : $\Omega_s = \frac{\omega}{p}$ en rad/s ou $n_s = \frac{60 \cdot f}{p}$ en tr/min.

pour $f = 50\text{ Hz}$

MAS Bipolaire.	MAS Tétrapolaire	MAS Hexapolaire	MAS Octopolaire
P=1 → 2 pôles	P=2 → 4 pôles	P=3 → 6 pôles	P=4 → 8 pôles
$N_s = 3000$ tr/min	$N_s = 1500$ tr/min	$N_s = 1000$ tr/min	$N_s = 750$ tr/min

- o f, ω : Fréquence et pulsation des courants statoriques.
- o p : Nombre de paires de pôles au stator (et au rotor).
- o Ω_s : Vitesse angulaire du champ statorique ou vitesse de synchronisme.
- o Ω : Vitesse angulaire du rotor.

2- Glissement

Pour la machine asynchrone le rotor glisse par rapport au champ statorique, cette différence de vitesse $\Omega_s - \Omega$ est appelée la vitesse de glissement, tel que : $g = \Omega_s - \Omega$ en absolue et $g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} = \frac{n_s - n}{n_s}$

3- Fréquence f_r des courants rotoriques

La vitesse relative à laquelle le champ tournant balaie les conducteurs du rotor vaut $(\Omega_s - \Omega)$, la pulsation ω_r des courants induits est égale à : $\omega_r = p \cdot (\Omega_s - \Omega) = \omega_s \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$

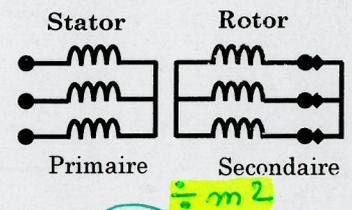
Soit : $\omega_r = g \cdot \omega_s$ ou $f_r = g \cdot f$

- o Au démarrage $\Omega = 0$: $g = 1 \Rightarrow f_r = f$
- o Au régime nominal : $g \rightarrow 0 \Rightarrow f_r \rightarrow 0 \Rightarrow$ très faible.

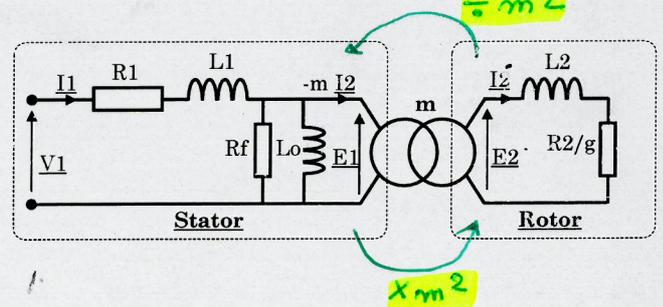
www.autocpage.info

VI. Modèle électrique monophasé de la machine asynchrone

La machine asynchrone est composée de deux ensembles de bobinages (statorique et rotorique) triphasés. Par analogie, on peut alors considérer qu'elle est équivalente, à l'arrêt, à un transformateur triphasé de rapport m , alimenterait une charge $\frac{R_r}{g}$.



- o R_1 : Résistance d'une phase du stator
- o R_2 : Résistance d'une phase du rotor
- o L_1 : Inductance de fuites au stator
- o L_2 : Inductance de fuites au rotor
- o L_0 : Inductance de magnétisation
- o R_f : Résistance modélisant les pertes ferromagnétiques



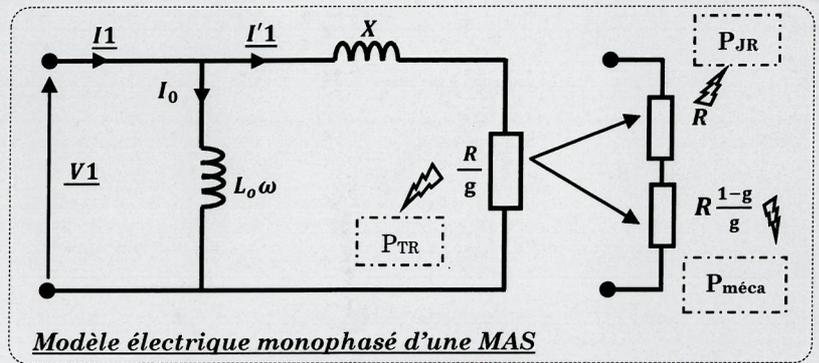
Hypothèse simplificatrices :

- o Dans la pratique, on néglige la chute de tension aux bornes de la résistance R_1 et de l'inductance de fuites L_1 au stator. Ceci n'est pas vrai à des fréquences et des tensions faibles.
- o Les pertes fer sont faibles, donc on néglige la résistance qui modélise les pertes fer R_f .

En posant $R = \frac{R_2}{m^2}$ et $X = \frac{L_2 \omega}{m^2}$ et en ramenant au primaire les éléments du secondaire, on aboutit au schéma équivalent :

On distingue :

- o L_0 : Inductance de magnétisation
- o R : inductance rotorique ramenée au stator
- o X : réactance de fuite rotorique ramenée au stator ;
- o V_1 : Tension efficace aux bornes d'une phase du stator
- o I_1 : Courant efficace dans une phase du stator



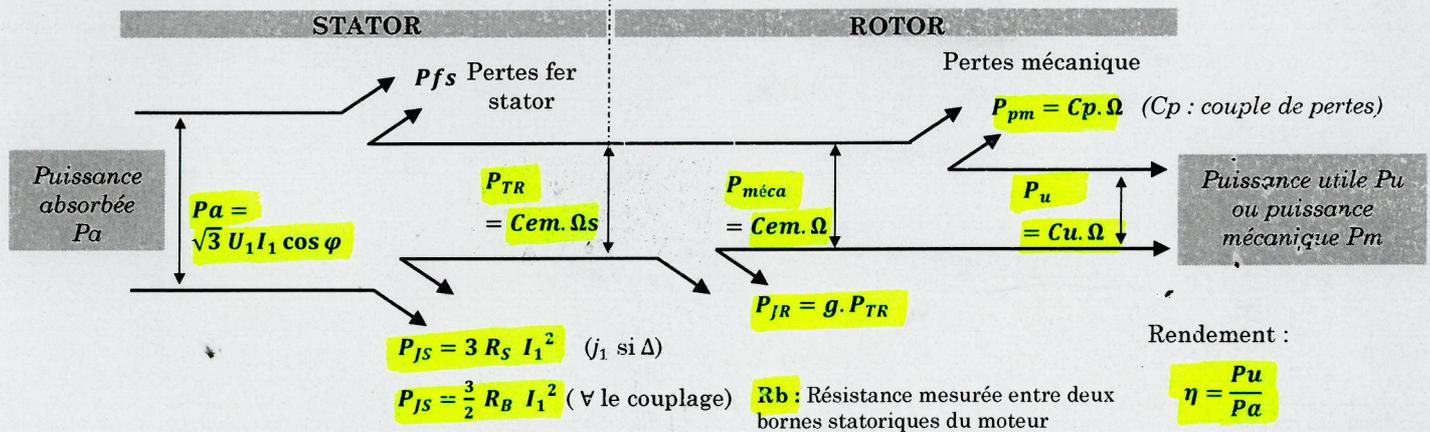
VII. Etude de la machine asynchrone : Moteur triphasé alimenté à tension et fréquence constantes

1- Relation des puissances active d'une MAS

o Puissance active absorbée par le moteur	$P_a = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi)$
o Pertes joules au stator	$P_{\delta s} = 3 \cdot R_s \cdot I_1^2$
o Puissance transmise du stator au rotor	$P_{tr} = 3 \cdot \frac{R}{g} \cdot I_1^2$
o Pertes joules au rotor	$P_{\delta r} = g \cdot P_{tr}$
o Puissance mécanique sur le rotor	$P_{méca} = P_{tr} - P_{\delta r} = (1-g) \cdot P_{tr}$
o Puissance utile :	$P_u = P_{méca} - P_{pm}$

www.autocpge.info

2- Bilan de puissances



3- Le couple mécanique Cm

La figure suivante illustre l'isolation de la partie rotorique du schéma de la machine asynchrone (MAS).

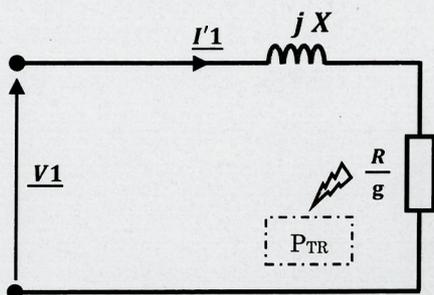


Schéma équivalent du rotor

d'où : $I_1 = \frac{V_1}{[R/g + jX]}$

Hypothèse : les pertes mécaniques sont négliger $\rightarrow Cm = Cem$

o Le couple électromécanique s'exprime

par : $C_m = \frac{P_{tr}}{\Omega_s}$

o D'après le schéma ci-après, la puissance transmise au rotor s'écrit par :

$P_{tr} = 3 \cdot \frac{R}{g} \cdot I_1^2$

o On peut écrire le courant I'1 sous sa forme complexe :

on a : $I_1 = \frac{V_1}{(R/g + jX)}$

$$I_1 = \frac{V_1}{\sqrt{(R/g)^2 + X^2}}$$

o La valeur efficace du courant rotorique I1 :

D'où l'expression final du couple électromagnétique Cem ou couple mécanique Cm:

$$\Rightarrow C_m = \frac{3}{\omega_s} \frac{R}{g} I_1^2$$

$$C_m = \frac{3}{\omega_s} \frac{R}{g} \times \frac{V_1^2}{(R/g)^2 + X^2}$$

$$C_m = \frac{3 V_1^2}{\omega_s} \frac{R/g}{(R/g)^2 + X^2}$$

3.1. le couple maximal

A tension constante, le numérateur est constant. Le couple est maximal pour la valeur g_max de g qui rend minimale la somme R^2/g + X^2g. Par conséquent, cette somme est minimale quand les deux termes sont égaux. Donc :

$$\Rightarrow g_{max} = \frac{R}{X} \quad \text{et on a} \quad \omega_s = \frac{\omega}{p} \quad \omega = 2\pi f$$

$$\text{et que } X = L \omega \quad \text{et } L = \frac{L_2}{m_2}$$

Expression 1 : $C_{m,max} = C_m(g_{max})$

$$C_{m,max} = \frac{3 \cdot P \cdot V_1^2}{2 X \omega}$$

Expression 2 en fonction du rapport V/f

$$C_{m,max} = K \cdot \left(\frac{V}{f}\right)^2 \Rightarrow \text{avec } K = \frac{3 \cdot P}{8 \pi^2 \cdot L}$$

3.2. Le couple de démarrage

Au démarrage, la vitesse de rotation de la machine est nulle n=0, alors le glissement g = 1. Le couple de démarrage s'exprime alors :

$$C_d = C_m(1) = \frac{3 V_1^2}{\omega_s} \frac{R}{R^2 + X^2} \Rightarrow C_d = \frac{3 P \cdot V_1^2}{\omega} \frac{R}{R^2 + X^2}$$

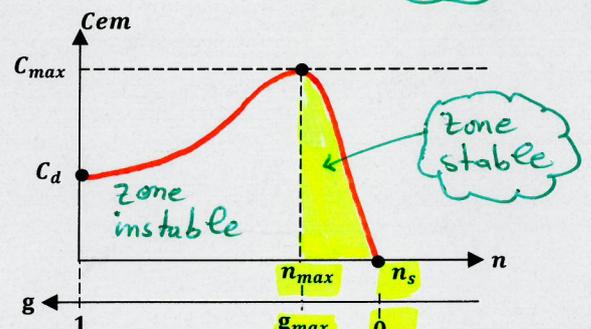
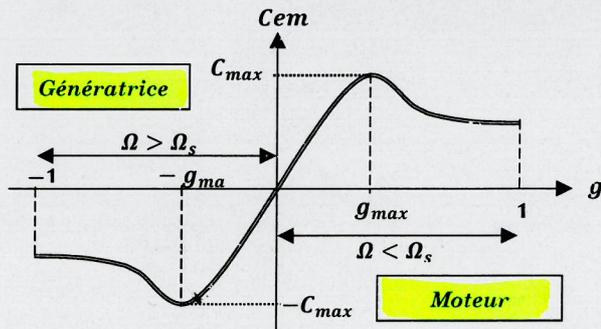
3.3. Les faibles valeurs de glissement g → 0 ⇒ R/g → +∞

d'où : $\frac{R}{g} \gg X$

on néglige X devant $\frac{R}{g} \Rightarrow C = \frac{3 P \cdot V_1^2}{\omega} \frac{1}{R/g} \Rightarrow C = K g$

avec $K = \frac{3 \cdot P \cdot V_1^2}{\omega \cdot R}$

4- Caractéristique mécanique Cm=f(Ω) de la machine asynchrone



VIII. Plaque signalétique

La plaque signalétique d'une machine asynchrone est constituée essentiellement les éléments suivants :

- o Le couplage adopté étoile ou triangle.
- o L'intensité du courant nominal en ligne In (A).
- o Facteur de puissance.
- o Vitesse nominale Nn (tr/min).
- o La puissance utile (kW).

* LEROY SOMER Mot. 3~ PLS 180 M-T						
SOMER N° 734570 GD 002 kg 102						
IP 23 IK08	I cl.F	40°C	S1	%	c/h	
V	Hz	min ⁻¹	kW	cos φ	A	
Δ 230	50	1427	17	0.88	57	
Y 400	50	1427	17	0.88	33	
DE 6212 2RSC3					g	
NDE 6210 2RSC3					h	

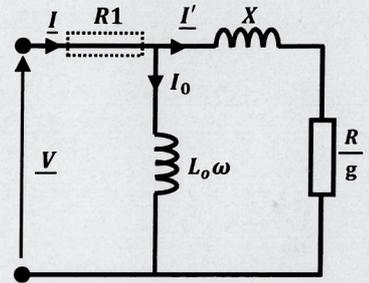
(1)* : si on travaille sur un réseau triphasé 230V entre phases, il faudra coupler le stator en Δ.

- o (1)* : si on travaille sur un réseau triphasé 400V entre phases, il faudra coupler le stator en Y.

IX. Control à vitesse variable : commande scalaire de la MAS

1. Définition

La commande scalaire est une technique de contrôle basée sur la tension qui vise à fournir un **couple maximal sur toute la plage de vitesses**, tout en **réduisant** autant que possible le **courant à vide pour minimiser l'échauffement**. Pour atteindre cet objectif, il est essentiel de maintenir le flux statorique Φ , généré par le courant magnétisant I_0 ($\Phi = Ks \cdot I_0$), à un niveau sensiblement constant, car le couple électromagnétique s'exprime par **$C = K \cdot \Phi \cdot I'$** .



www.autocpage.info

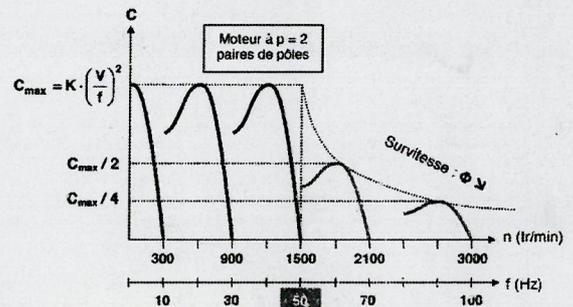
La loi de commande est alors : $I_0 = \frac{V}{L_0 \omega} = Cte \Rightarrow \frac{V}{f} = Cte$

2. Variation de vitesse à fréquence variable

La vitesse d'un moteur dépend de la vitesse de synchronisme Ω_s , qui est directement liée à la fréquence f du courant dans le stator. Les variateurs, tels que les onduleurs, permettent de faire varier la fréquence d'excitation du stator en modulant la fréquence du courant d'alimentation des bobinages : **$N = \frac{fs}{p} (1 - g)$** en tr/s. On rappelle que la relation

suivante donne le couple maximal : **$C_{max} = K \left(\frac{V}{f}\right)^2$** avec $K = \frac{3p}{8\pi^2 L}$

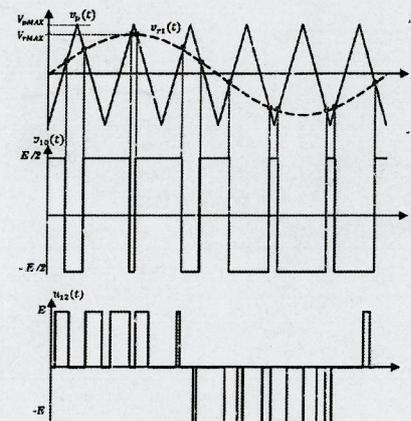
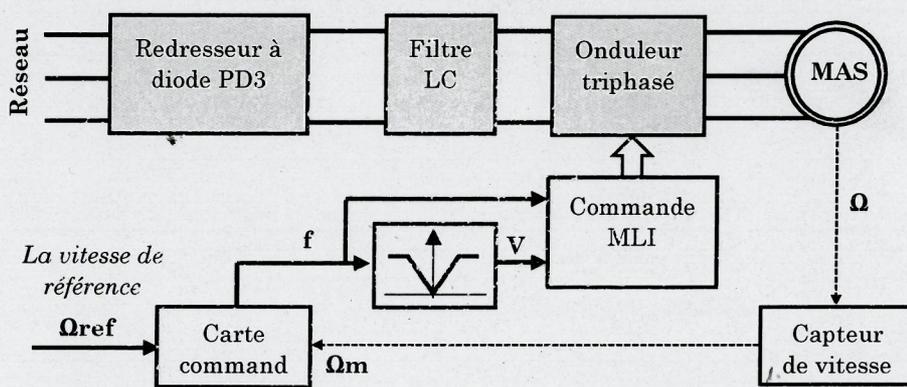
Pour maintenir le couple maximal, la variation de fréquence s'accompagne d'une variation de tension, tout en maintenant le rapport V/f constant. Cela constitue la commande scalaire, où la machine asynchrone est pilotée à V/f constant. Il existe également la commande vectorielle, mais elle dépasse le cadre du programme.



Exemple : MAS 220/380V, 50 Hz \rightarrow le rapport V/f égal : $\frac{V}{f} = \frac{220}{50} \Rightarrow \frac{V}{f} = 4.4 \cdot V/Hz$

3. Structure d'un variateur de vitesse pour une commande scalaire

La configuration du variateur de vitesse pour la commande scalaire d'un moteur asynchrone est illustrée ci-dessous :



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

- o soit de régler l'amplitude de la modulante (loi MLI de type «sinus-triangle») ;
- o soit de procéder à une surmodulation : le signal MLI est lui-même découpé à une fréquence supérieure à la fréquence de la porteuse.

Remarque : La commande scalaire n'est appropriée pour les vitesses très faibles (inférieures à 10% de la vitesse nominale) car à ce niveau, la chute de tension sur la résistance $R1$ devient significative, rendant l'approximation $V1 = V_e$ (schéma du paragraphe VI) non valide.

www.autocpge.info