MACHINE ASYNCHRONE

Le moteur asynchrone est, de beaucoup, le moteur le plus utilisé dans l'ensemble des applications industrielles, du fait de son faible cout, de son faible encombrement, de son bon rendement et de son excellente fiabilité.

Son seul point noir est l'énergie réactive, toujours consommée pour magnétiser l'entrefer. Les machines triphasées, alimentées directement sur le réseau, représentent la grande majorité des applications ; supplantant les machines monophasées aux performances bien moindres et au couple de démarrage nul sans artifice.

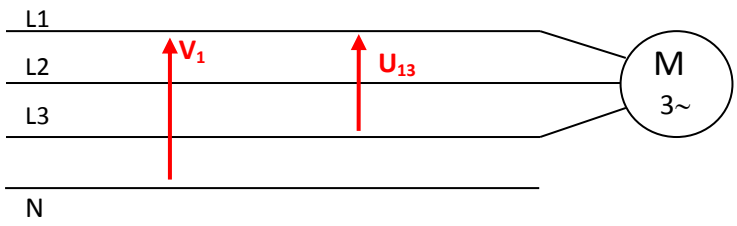
Autrefois, sa mise en œuvre (démarrage et variation de vitesse) se révélait compliqué mais tout cela s'est résolu grâce aux progrès de l'électronique de puissance. La conséquence de ce développement de l'électronique de commande fait que le moteur asynchrone est maintenant utilisé dans des domaines très variés :

- Transport (TGV est , tramways)
- Industrie
- Production d'énergie (éolienne)
- ….

1. RAPPEL DES NOTIONS DE TRIPHASE

Une alimentation triphasée est constituée de 3 tensions identiques décalées d'un angle $\frac{2\pi}{3}$.
$e_1 = E \sin(wt)$, $e_2 = E \sin(wt-2\pi/3)$, $e_3 = E \sin(wt+2\pi/3)$.

Pour délivrer cette énergie, on a besoin de 3 câbles correspondants à chacune des tensions (appelées phases) et éventuellement d'un autre câble (le neutre) permettant le retour du courant lorsque les courants ne sont pas équilibrés. ($i_1+i_2+i_3 \neq 0$)



On peut alors trouver deux types de tension :
- tension simple : tension entre phase et neutre, notée généralement V : ex V_1
- tension composée : tension entre 2 phases, notée U : ex $U_{13}=V_1-V_3$

Dans un réseau équilibré, la relation en valeurs efficaces entre les deux types de tension est : $U=\sqrt{3}.V$
En France, le réseau triphasé distribué par EDF est un réseau 230/400 V.

En régime sinusoïdal équilibré, on peut calculer les puissances électriques par les formules suivantes :

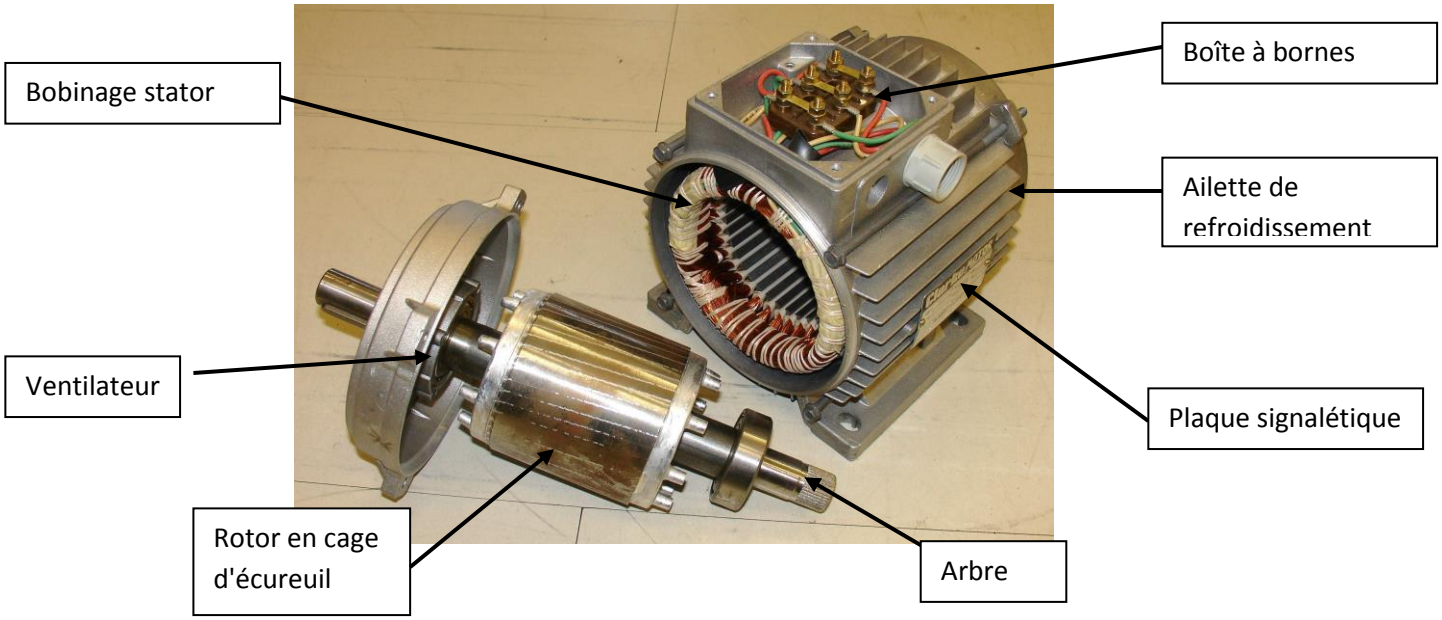
Puissance active en W : $P=3.V.I.\cos\varphi = \sqrt{3}.U.I.\cos\varphi$
Puissance réactive en Var : $Q=3.V.I.\sin\varphi = \sqrt{3}.U.I.\sin\varphi$
Puissance apparente en VA : $S=3.V.I=\sqrt{3}.U.I$

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

2. Constitution

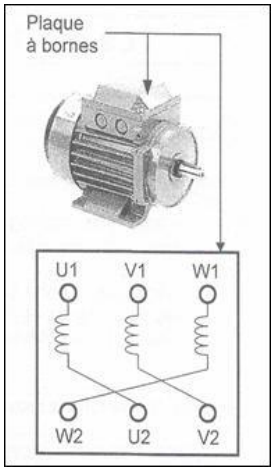
La machine asynchrone est constituée de deux éléments principaux : (cf diaporama)
Le stator : constitué de trois enroulements (bobines) parcourus par des courants alternatifs triphasés et possède p paires de pôles ("nombre de bobinage triphasé au sein dans le stator")

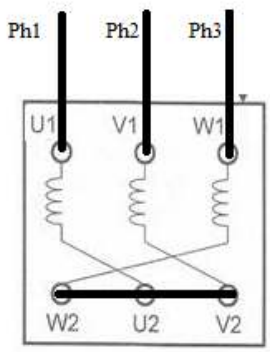
Le rotor : Partie tournante du moteur. Le rotor peut être constitué par un bobinage triphasé, mais, le plus souvent, Il est constitué d'une masse métallique dont de l'aluminium pour l'alléger. On parle alors de rotor à cage d'écureuil.



3. Couplage du stator

Rq : Le stator peut être alimenté selon deux couplages : étoile ou triangle. La tension aux bornes des enroulements (bobinages) ne sera pas la même suivant le couplage.





Couplage étoile : Y

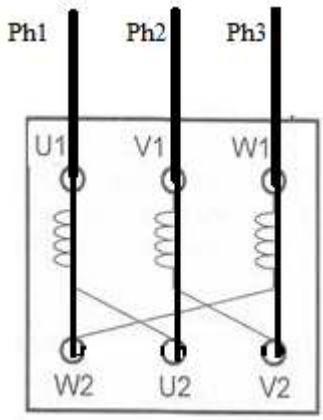
Le schéma de raccordement est donné ci-contre :

Dans ces conditions, l'enroulement voit à ses bornes la tension simple du réseau.

Exemple : sur le réseau EDF classique 230/400, un moteur couplé en étoile aurait une tension sur chaque bobinage du stator de 230V.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

Couplage triangle : △



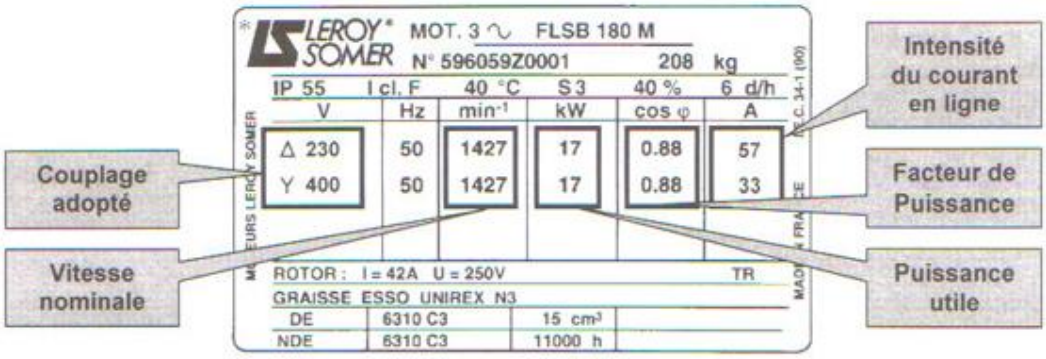
Le schéma de raccordement est donné ci-contre :

Dans ces conditions, l'enroulement voit à ses bornes la tension composée du réseau.

Exemple : sur le réseau EDF classique 230/400, un moteur couplé en étoile aurait une tension sur chaque bobinage du stator de 400V.

Les plaques signalétiques des Moteurs asynchrone indiquent quel couplage réaliser en fonction de la tension composée du réseau, puis les grandeurs nominales du moteur pour le couplage considéré.

On trouve ce type d'indication :



4. Principe (pour les MAS a cage d'ecureuil)

Les courants alternatifs dans les bobinages du stator vont créer dans l'entrefer (espace entre rotor et stator) un champ magnétique tournant à la vitesse :

$$\Omega_s = \frac{w}{p}$$

Ω_S : pulsation de synchronisme du champ tournant en $rad.s^{-1}$.
w : pulsation des courants alternatifs en $rad.s^{-1}$. $\omega = 2.\pi.f$
p : nombre de paires de pôles.

Le champ tournant balaie les bobinages rotoriques et va créer des courants induits dans le rotor en court-circuit (loi de Lenz). Ces courants (de pulsation g.w) vont eux même entrainer un champ magnétique qui va s'opposer aux causes qui lui ont donné naissance. L'interaction de ces deux champs magnétiques va alors créer un couple qui va entrainer le rotor en rotation.

Le rotor tourne à la vitesse *n* plus petite que la vitesse de synchronisme n_s. On dit que le rotor « glisse » par rapport au champ tournant. On introduit alors une variable caractérisant la vitesse de rotation du rotor.

Ce glissement g va dépendre de la charge.

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

N_S : vitesse de rotation de synchronisme du champ tournant $(tr.s^{-1})$.
N : vitesse de rotation du rotor $(tr.s^{-1})$.
$\Omega_S = 2\pi n_S$ $(rad.s^{-1})$ et $\Omega = 2\pi n$ $(rad.s^{-1})$

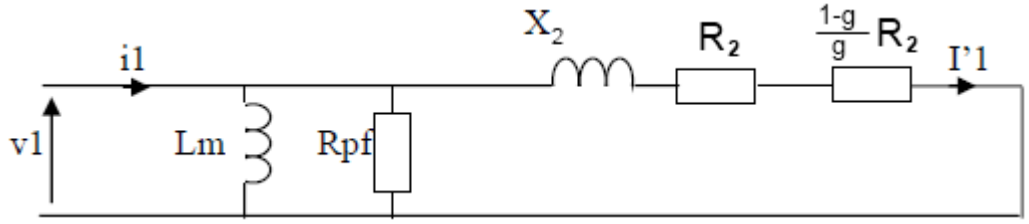
De la relation précédente, on peut aussi tirer l'expression : $\Omega = (1 - g) \times \Omega_S = (1 - g) \times \frac{w}{p}$

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

5. Modelisation

En fonctionnement triphasé équilibré, la machine asynchrone peut être modélisée comme un transformateur triphasé, dont le secondaire aurait une pulsation g.w

Moyennant quelques approximations (en négligeant notamment les pertes joules au stator), on peut donner un modèle monophasé de la machine asynchrone dans lequel tout est ramené au stator.



$I'_1 = m.I_1$ avec m rapport de transformation rotor/stator : $m=V_{20}/V_1$

R_2 représente les pertes joules du rotor ramenées au stator

R_{pf} représente les pertes fers au stator

L_m : inductance magnétisante (magnétisation de la carcasse métallique du moteur et de l'entrefer)

X_2 représente les flux de fuite.

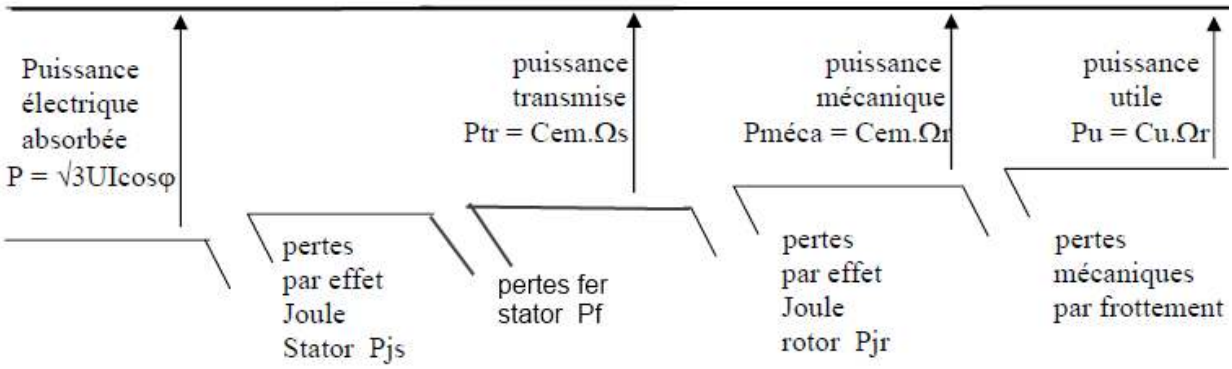
$\frac{1-g}{g}R_2$ est une résistance fictive. La puissance consommée par cette résistance représente la puissance électrique transformée en puissance mécanique.

Ce schéma n'est qu'un modèle. La plupart de ces éléments n'ont pas d'existence physique.

6. Bilan des puissances

Les pertes dans la machine asynchrone sont dues aux :

- pertes joules stator : $P_{JS}=3.R_1.J_1^2$ (voir ce que vaut J en fonction du couplage)
- pertes fer : (hystérésis et courant de Foucault): $Pf \approx 3\frac{V_1^2}{R_{pf}}$
- pertes joules rotor : $P_{JS}=3.R_2.I_2^2$ Rq : on a également la relation $P_{JR}=g.P_{Tr}$ avec P_{Tr} puissance transmise au rotor $P_{Tr} = 3\frac{R_2}{g} \times {I'_1}^2$
- pertes mécaniques Pm



WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

7. COUPLE ELECTROMAGNETIQUE

On peut, à partir du schéma équivalent, calculer l'expression de la puissance mécanique moteur puis en déduire le couple moteur.

P_{tr}= . . . .(×3 : car 3 phases égales dans le moteur) or I_1, = ...

donc : P_{tr}= . . . . . = ...

On en tire : $C_{em} = \frac{3.V^2}{\Omega_S} \times \frac{\frac{R_2}{g}}{(X_2)^2+\left(\frac{R_2}{g}\right)^2} = \frac{3.p.V^2}{w} \times \frac{\frac{R_2}{g}}{(X_2)^2+\left(\frac{R_2}{g}\right)^2}$

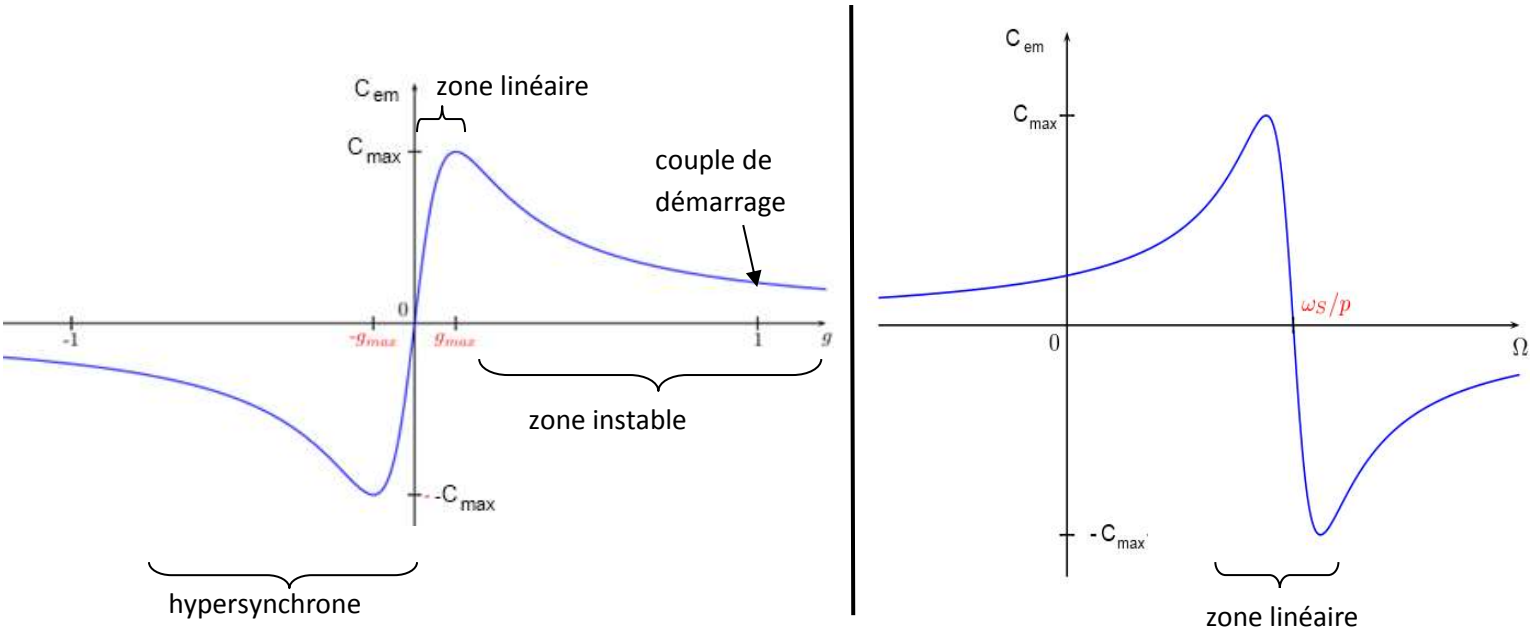
Soit $C_{em} = \frac{3p.V^2}{L_2.w^2} \times \frac{1}{\frac{g.X_2}{R_2}+\frac{R_2}{g.X_2}}$

On peut connaitre le maximum de couple que peut fournir le moteur d'après l'expression de Cm en résolvant l'équation $\frac{d\,C_{em}}{dg} = 0$.

En résolvant l'équation, on trouve que ce maximum de couple est obtenu pour $g_{max}= \frac{R_2}{X_2} \rightarrow C_{max}=\frac{3.V^2}{2.X_2.\Omega_S} = \frac{3.V^2}{2.L_2.w.\Omega_S} = \frac{3p.V^2}{2.L_2.w^2}$

On peut alors écrire le couple sous la forme : $C_{em} = \frac{2C_{max}}{\frac{g}{g_{max}}+\frac{g_{max}}{g}}$

On peut alors tracer l'évolution du couple en fonction du glissement ou de la vitesse rotor :



On constate sur ces courbes qu'il y a une zone (lorsque le glissement est faible, près de la vitesse de synchronisme) où le couple est linéaire par rapport à la vitesse. Cette zone correspond au point de fonctionnement nominal du moteur.

Le couple de démarrage s'obtient en prenant g=1. La zone $g>g_{max}$ est instable, ces points ne sont parcourus qu'en régime transitoire.

Lorsque g<0, le rotor tourne à une vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme. On est alors en fonctionnement hypersynchrone. La machine asynchrone fonctionne en générateur (mode de fonctionnement des éoliennes).

8. Point de fonctionnement du moteur

On va ici étudier comment trouver le point de fonctionnement du moteur (c'est à dire le couple fourni et la vitesse de rotation) lorsque l'on accouple le moteur à une charge mécanique.

Deux méthodes de détermination sont possibles :

a) par le calcul

Le couple de la charge mécanique peut s'exprimer en fonction de la vitesse de rotation.

Ex : Si le moteur est destiné à entrainer un ventilateur, le couple de charge du ventilateur est proportionnel au carré de la vitesse. On a $Cr=k.N^2$

Pour obtenir la vitesse de fonctionnement, il suffit alors d'écrire l'égalité entre le couple fourni par le moteur et le couple de charge, puis on résout l'équation : Cu= Cr , qui devient Cem=Cr si le couple de perte est négligé (pertes mécaniques).

Rq : le couple moteur est souvent exprimé en fonction du glissement, pour pouvoir résoudre l'équation, il faut donc exprimer la vitesse de rotation en fonction de g :

N= . . . . . .

L'égalité en régime permanent du couple moteur et du couple de charge donne la relation :

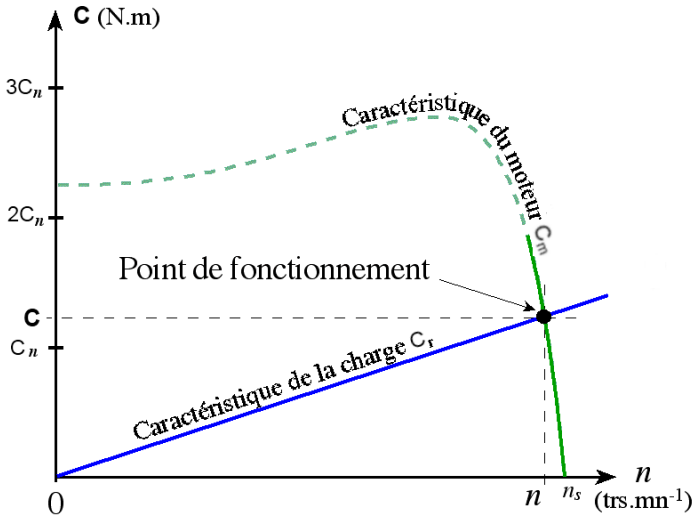
$\frac{3.V^2}{\Omega_S} \times \frac{\frac{R_2}{g}}{(X_2)^2+\left(\frac{R_2}{g}\right)^2} = k.(\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots)^2$ $\rightarrow$ on obtient g, puis on en déduit C et Ω.

b) graphiquement

On obtenir directement C et Ω en traçant sur le même graphe la caractéristique $C_u=f(\Omega)$ et Cr= f(Ω). Souvent, on néglige le couple de perte (pertes mécaniques), on a alors Cu=Cem.

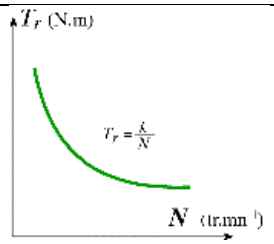
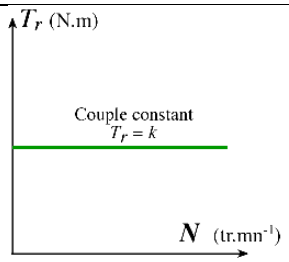
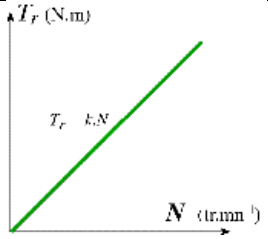
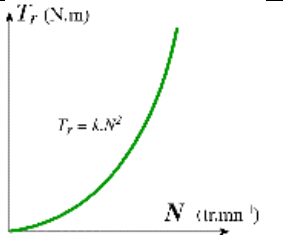
Exemple : Pour une application de pompage le couple est proportionnel à la vitesse Cr=k×N. On obtient alors le tracé suivant :

Le point de fonctionnement est alors obtenu par l'intersection des deux courbes. On lit donc graphiquement la valeur de la vitesse et du couple.



WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

Exemple de charges : sec, visqueux...

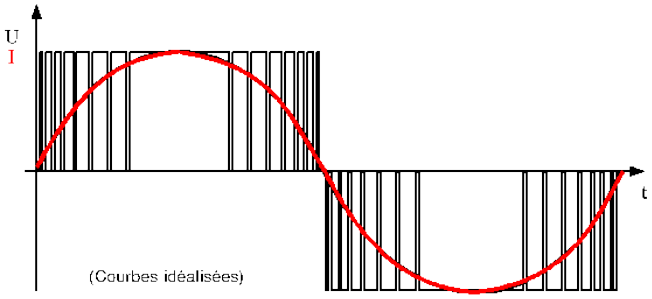
Machine à puissance constante (enrouleuse, compresseur, essoreuse)		Machine à couple constant (levage, pompe)	
Machine à couple proportionnel à la vitesse (pompe volumétrique, mélangeur)		Machine à couple proportionnel au carré de la vitesse (ventilateur)	

9. DEMARRAGE ET VARIATION DE VITESSE

Lors du démarrage d'une machine asynchrone on constate un pic de courant entre 4 et 8 fois le courant nominal. Pour remédier à ce problème, plusieurs méthodes sont employées :

- démarrage étoile-triangle (les bobinages de la machine vont être soumis dans un premier temps à une tension réduite, tension nominale/$\sqrt{3}$, puis la tension nominale)
- ajout d'une résistance au stator
- augmentation progressive de la tension grâce à un auto-transformateur ou un gradateur

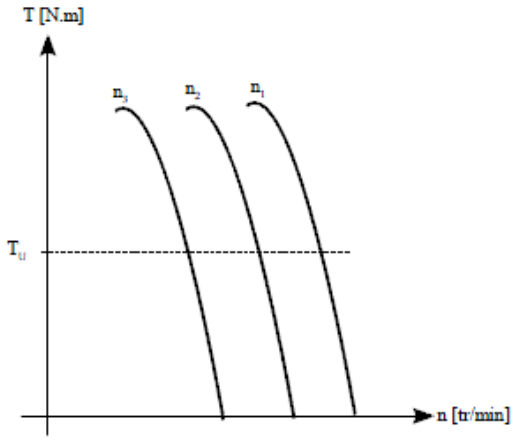
Dans les applications nécessitant une variation de vitesse, on utilise un onduleur (cf cours onduleur). L'onduleur est un montage électronique permettant de créer un système de tensions triphasées dont on peut régler à la fois, la fréquence et l'amplitude.



Les industriels proposent des variateurs intégrant un pont de diode intégrant la génération de tension continue et l'onduleur permettant la création de réseau triphasé variable en amplitude et en fréquence.

Pour que l'on soit dans la plage de fonctionnement nominal du moteur, il faut conserver g≈0. Le seul moyen de faire varier la vitesse est alors de modifier la vitesse de synchronisme

$$\Omega_S = \frac{w}{p} = \frac{2\pi f}{p}$$



Mais pour ne pas modifier la valeur du couple en fonction de la vitesse, on va fonctionner avec un rapport $\frac{U}{f}$ constant.

(Rappel : Cem$= \frac{3p}{L_2} \times \left(\frac{V}{w}\right)^2 \times \frac{1}{\frac{g.X_2}{R_2} + \frac{R_2}{g.X_2}}$, donc si $\frac{V}{w}$ est constant, le couple max ne change pas.)

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر