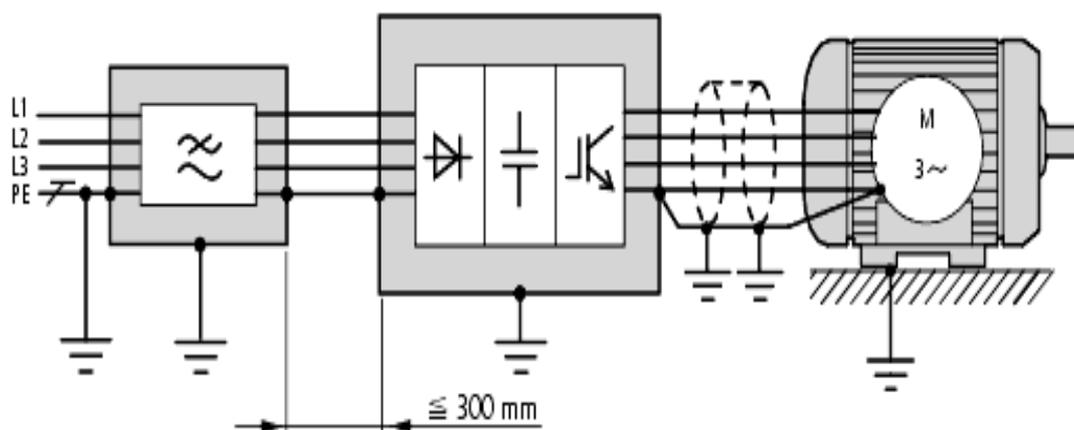


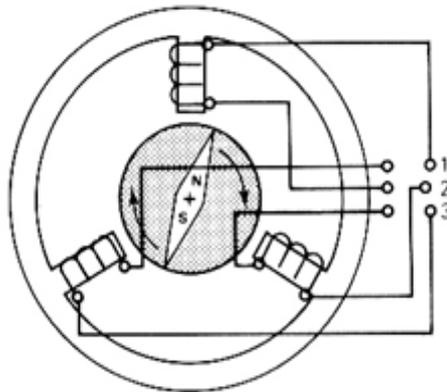
Commande électronique des moteurs à courant alternatif



Sommaire

- **Rappels sur les moteurs asynchrones**
 - ❖ Principe
 - ❖ Modèle équivalent
 - ❖ Bilan de puissances
- **Modes de démarrage des moteurs asynchrones**
 - ❖ Démarrage direct
 - ❖ Démarrage sous tension réduite
 - ❖ Démarrage électronique
 - ❖ Démarrage par variateurs de vitesse
- **Procédés de variation de la vitesse**
 - ❖ Variation par action sur la tension statorique
 - ❖ Variation par contrôle de l'énergie rotorique
 - ❖ Variation par action sur le nombre de pôles
 - ❖ Variation par contrôle de fréquence d'alimentation
- **Variateur industriels pour moteurs asynchrones**
 - ❖ Principales fonctions
 - ❖ Réversibilité de fonctionnement
- **Structure et composants des démarreurs et variateurs électroniques**
 - ❖ Architecture de base
 - ❖ Module de contrôle
 - ❖ Module de puissance
- **Convertisseurs de fréquence pour moteurs asynchrones**
 - ❖ Principe général
 - ❖ Constitution
 - ❖ Variation de vitesse
 - ❖ Variateur à V/f
 - ❖ Variateur à commande vectorielle
 - ❖ Inversion du sens de marche et freinage
 - ❖ Modes de fonctionnement
 - ❖ Application d'un variateur à fréquence variable
 - ❖ Sources de problèmes dans un système de commande électronique de moteurs

1. Rappels sur les moteurs asynchrones :



Le moteur asynchrone, particulièrement recherché par sa robustesse, sa simplicité, son faible coût, a été l'objet de nombreuses études visant à l'entourer d'un équipement destiné à pallier un de ses principaux inconvénients : la variation de la vitesse.

De nos jours, grâce aux progrès de l'électronique, on arrive à rendre les moteurs asynchrones aussi performants que les moteurs à collecteurs. Par ailleurs, si l'on compare les deux types de moteurs asynchrones (à bagues et à cage), il est évident que le moteur à bagues a plus de possibilités, car on peut l'alimenter aussi bien par son stator que par son rotor. Malgré cet avantage indiscutable, c'est le moteur à cage, en raison de sa très grande robustesse, qui est de plus en plus utilisé.

a) Principe :

Les moteurs asynchrone, encore appelés moteurs d'induction, sont constitués principalement des éléments suivants :

Le stator (partie fixe) : on l'appelle également inducteur ou primaire il comporte trois enroulements décalés géométriquement de 120° et alimentés par un signal triphasé ;

Le rotor (partie mobile) : n'est lié électriquement à aucune source d'énergie, ni continue, ni alternative, ce qui simplifie beaucoup sa construction. Le courant, dans ses enroulements, est uniquement induit par le champ tournant statorique, c'est pourquoi, l'enroulement rotorique est encore appelé induit ou secondaire. On distingue deux types de rotors

Rotor à bagues :

C'est un rotor à pôles lisses qui comporte dans ses rainures un enroulement identique à celui du stator. Les trois phases sont branchées en étoile ce qui permet d'insérer un rhéostat dans leur circuit. Ce rhéostat, qui est mis en court-circuit en marche normale, permet d'assurer de meilleures conditions au démarrage.

Rotor à cage :

L'enroulement est remplacé par des barres de cuivre ou d'aluminium, logées dans des encoches et réunies à leurs extrémités par deux couronnes de cuivre ou d'aluminium.

Par comparaison avec les moteurs à bagues, les moteurs à cage ont l'avantage d'être robustes et de coût beaucoup plus faible. Malheureusement, il n'est pas possible de faire varier la résistance de leur rotor, ce qui rend défavorable les conditions de démarrage quand on les alimente à tension et à fréquence constantes.

On remédie à cet inconvénient en utilisant, soit des rotors à double cage, soit des rotors à une seule cage, mais à barres dites en **L** à cause de leur profil, soit des moteurs à encoches très profondes : barres en « lames »

Les courants alternatifs dans le stator créent un champ magnétique tournant à la vitesse

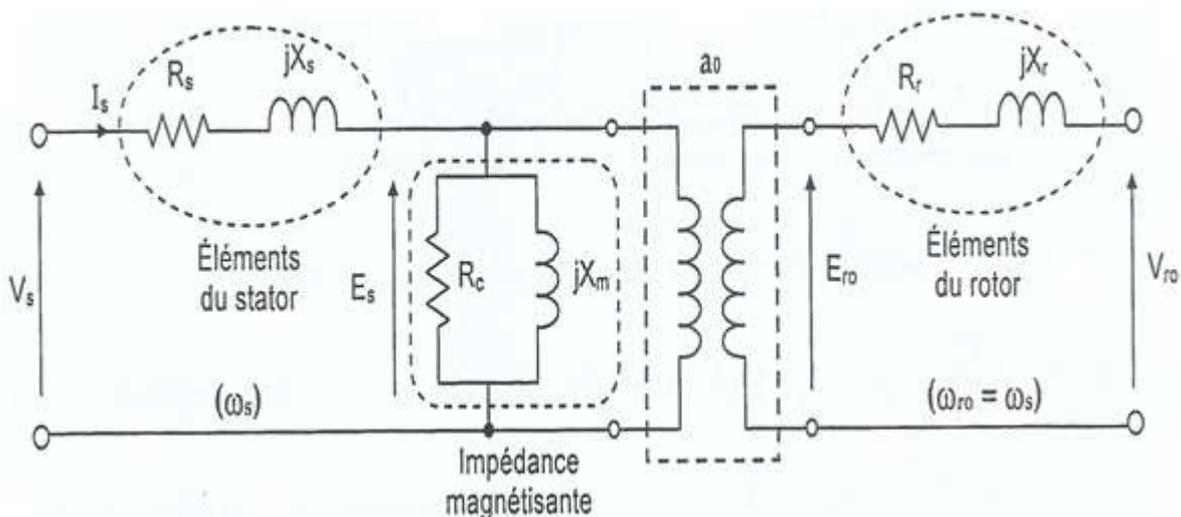
$$\Omega_s \text{ dite de synchronisme : } \Omega_s = 2\pi f / p$$

le rotor en court-circuit tourne à la vitesse angulaire Ω plus petite que la vitesse de synchronisme Ω_s , d'où la notion de glissement $g = (\Omega_s - \Omega) / \Omega_s$

En marche normale, g ne vaut généralement que quelques pour cent. Il faut noter que, dans le fonctionnement à vide où $\Omega = \Omega_s$, le glissement est nul : $g = 0$

b) Modèle équivalent :

La machine asynchrone est équivalente à un transformateur triphasé dont le stator constitue le primaire et le rotor constitue le secondaire



Le rapport de transformation stator-rotor à vide est :

$$a_0 = \frac{N_s}{N_r} = \frac{E_s}{E_{r0}}$$

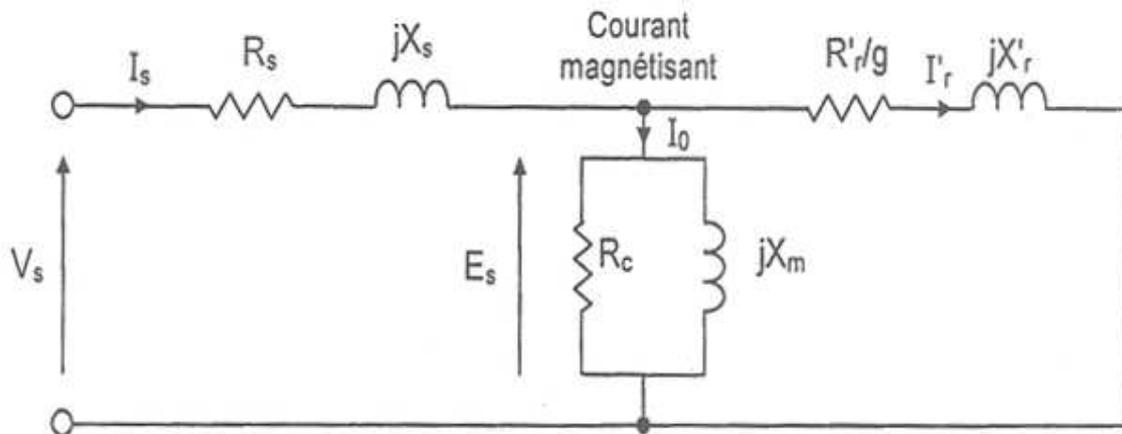
N_s, N_r sont respectivement les nombres de spires statoriques et rotoriques

En charge, le rotor est en court-circuit et la pulsation est : $\omega_r = g \omega_s$

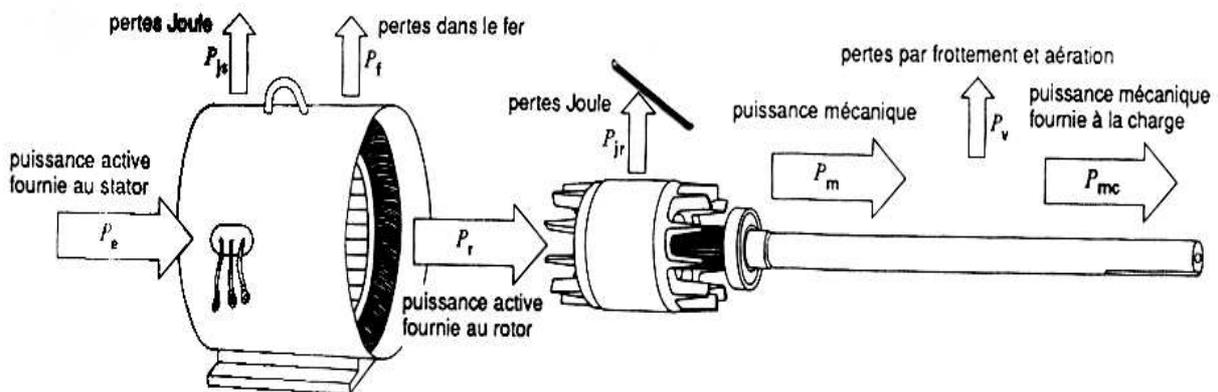
Le rapport de transformation devient : $a = \frac{a_0}{g} = \frac{E_s}{E_r}$

La transformation d'impédance est telle que :

$$X'_r = a^2.X_r \quad ; \quad R'_r = a^2.R_r \quad ; \quad I'_r = I_r / a \quad ; \quad I_s = I_0 + I'_r$$



c) Bilan de puissances :



On y distingue :

- la puissance P_a absorbée par le moteur
- la puissance transmise au rotor, P_{tr} qui est égale à la puissance absorbée diminuée des pertes :
 - par effet Joule, P_{Js} dans les enroulements statoriques :
 - $P_{Js} = 3 RI^2$ pour le couplage étoile

- $P_{JS} = RI^2$ pour le couplage triangle,
- magnétiques, P_{fer} dans le fer

$$P_{tr} = P_a - (P_{JS} + P_{fer}) = 3 \left(\frac{R_r}{g} \right) I_r^2$$

- La puissance électromagnétique, P_e qui prend en compte les pertes Joule P_{JR} dans le rotor :

$$P_e = P_{tr} - P_{JR}$$

A cette puissance correspond le couple électromagnétique C_e

On considère comme négligeables les pertes magnétiques du rotor

$$\text{Ce qui entraîne : } P_e = P_{tr} (1 - g)$$

- Les pertes Joule rotoriques, P_{JR} sont donc dues au glissement, et égales au produit de ce dernier par la puissance transmise P_{tr}

$$P_{JR} = P_{tr} \cdot g$$

- la puissance et le couple utile

$$P_u = P_e - P_{méc}$$

- Rendement : Il est égale au rapport de la puissance absorbée à la puissance utile, soit :

$$P_u = P_a - P_{JS} - P_{fer} - P_{JR} - P_{méc}$$

Le rapport de la puissance électromagnétique à la puissance transmise au rotor est appelé rendement du rotor η_r :

$$\eta_r = 1 - g$$

Couple électromagnétique :

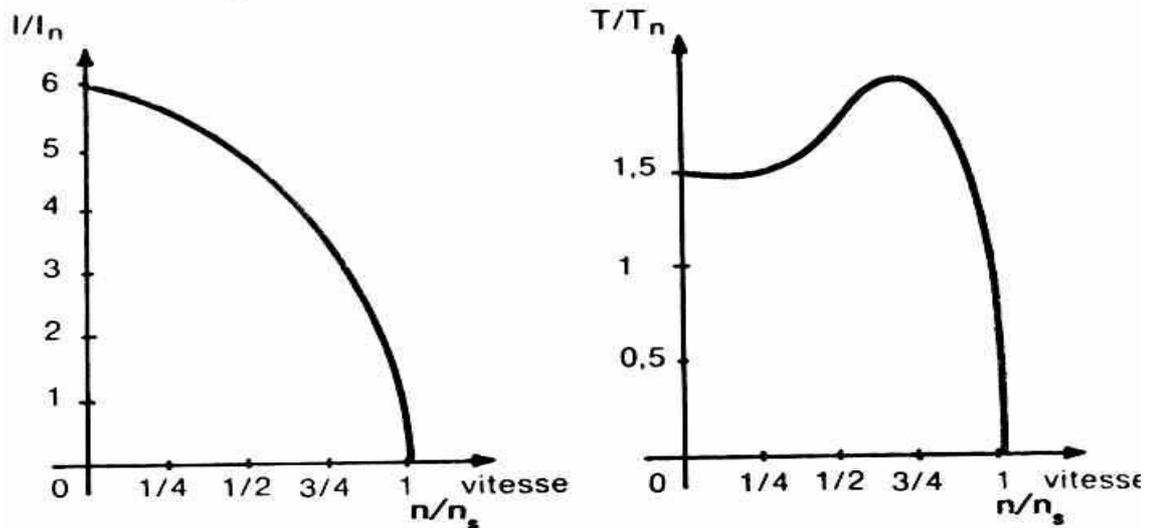
$$P_e = C_e \cdot \Omega$$

$$P_e = P_{tr} (1 - g) = \frac{(1-g)}{g} 3R'_r I_r'^2$$

$$C_e = \frac{P_e}{\Omega} = \frac{3p R'_r}{\omega_s g} I_r'^2$$

$$\text{Soit : } C_e = \frac{P_e}{\Omega} = \frac{3p R'_r}{\omega_s g} \frac{V_s^2}{\left(R_s + \frac{R'_r}{g}\right)^2 + (X_s + X'_r)^2}$$

$$\text{Courant statorique : } I = \frac{V}{\sqrt{\left(R_s + \frac{R'_r}{g}\right)^2 + (X_s + X'_r)^2}}$$



Le couple maximum est indépendant de la résistance rotorique :

$$C_{emax} = \frac{3pV^2}{2\omega_s X}$$

2. Modes de démarrage du moteur asynchrone :

a) Démarrage direct :

Le démarrage direct sur le réseau de distribution est possible à condition d'employer un moteur adéquat pouvant supporter un échauffement correspondant à l'énergie consommée dans l'inertie tournant de l'entraînement au cours du démarrage et de tolérer un appel de courant relativement important. Ce procédé est appliqué aux basses vitesses, ou des moteurs démarrent sans charge.

Si le démarrage direct convient souvent pour une grande variété de machines, il peut s'accompagner parfois de contraintes très gênantes pour bon fonctionnement de la machine :

- Appel de courant au démarrage pouvant perturber la marche d'autres appareils connectés sur le même réseau.
- A-coups mécaniques lors des démarrages, inacceptables pour la machine ou pour le confort et la sécurité des usagers.
- Impossibilité de contrôler l'accélération et la décélération.
- Impossibilité de faire varier la vitesse.

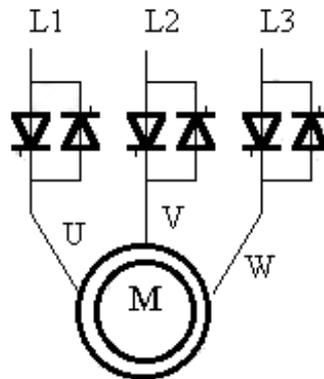
b) Démarrage sous tension réduite :

Plusieurs dispositifs permettent de réduire la tension aux bornes des enroulements du stator pendant la durée de démarrage du moteur ce qui est un moyen de limiter l'intensité du courant de démarrage. L'inconvénient est que le couple moteur est également diminué et que cela augmente la durée avant laquelle la machine atteint le régime permanent.

c) Démarrage électronique :

L'emploi des démarreurs électronique permet de réduire le courant de démarrage et offre une souplesse au démarrage et à l'arrêt du moteur.

Les démarreurs sont constitués d'un gradateur triphasé à angle de phase



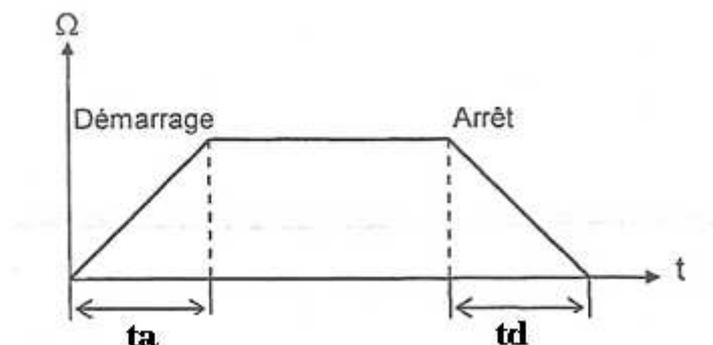
Les démarreurs électroniques présentent des avantages considérables notables :

- Réduire les dommages mécaniques résultants du démarrage direct et prolonger ainsi la durée de vie des équipements.
- Réduire les perturbations dues aux courants de démarrage.
- Atténuer les coups de bélier dans les systèmes de pompage.
- Assurer les fonctions de protection et de diagnostic avancées : surcharge thermique, perte de phase, perte de charge, blocage et contrôle des thyristors.

La tension fournie par un montage gradateur contient des harmoniques de valeurs importantes

d) Démarrage par variateurs de vitesse :

La mise en vitesse du moteur est contrôlée au moyen d'une rampe d'accélération linéaire ou en « S ». Cette rampe est généralement réglable et permet par conséquent de choisir le temps de mise en vitesse t_a approprié à l'application.



Les variateurs de vitesse permettent également de contrôler la décélération au moyen d'une rampe linéaire ou en « S » généralement indépendante de la rampe d'accélération.

Cette rampe peut être réglée de manière à obtenir un temps de passage de la vitesse en régime établi t_d à une vitesse intermédiaire ou nulle.

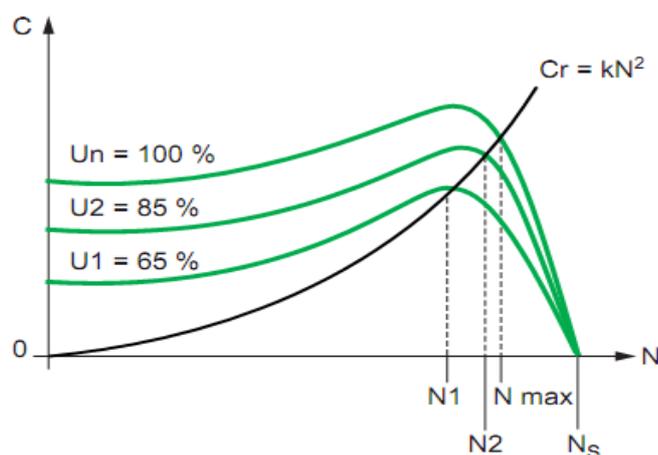
3. Procédés de variation de la vitesse :

Pour une charge mécanique donnée, la variation de vitesse est obtenue en modifiant la caractéristique mécanique $C_{em}(\Omega)$. L'expression du couple électromagnétique C_{em} indique les paramètres qui peuvent être modifiés, à savoir :

- La tension d'alimentation V_s .
- La résistance rotorique R_r et d'une manière générale la puissance consommée au rotor pour une machine à rotor bobiné.
- La fréquence d'alimentation F_s
- Le nombre de paire de pôles : une conception particulière de l'enroulement statorique a permis, Grâce à des connections réalisées de l'extérieur de la machine, de faire varier le nombre de paire de pôles de la machine. en générale on se limite à deux vitesses.

a) Variation par action sur la tension statorique :

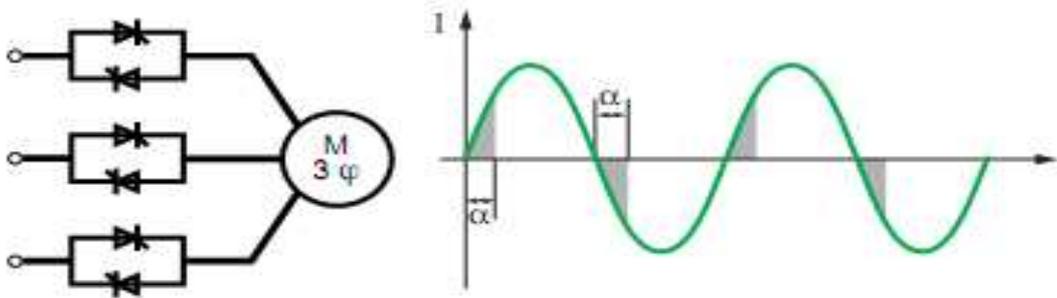
Le couple électromagnétique développé est proportionnel au carré de la tension d'alimentation, la modification de la tension modifie la caractéristique mécanique $C_{em}(\Omega)$ du moteur, le glissement g_{max} se conserve puisqu'il est indépendant de la tension V_s .



Ce procédé modifie le glissement g du moteur et donc altère son rendement : $\eta = (1-g)$

En outre, il existe une limite de stabilité qui correspond à une tension minimale au-dessous de laquelle le moteur "décroche" et s'arrête. Ce procédé se limite aux applications dont le couple résistant C_r diminue rapidement avec la vitesse.

Les dispositifs utilisés sont des gradateurs à triacs ou à thyristors.



A noter que ce procédé permet également un démarrage facile par action sur la tension et n'entraîne pas de surintensité dans le moteur.

Le réglage de la vitesse d'un moteur asynchrone par gradateur possède le grand avantage de la simplicité tant du point de vue du circuit de puissance que la commande électronique.

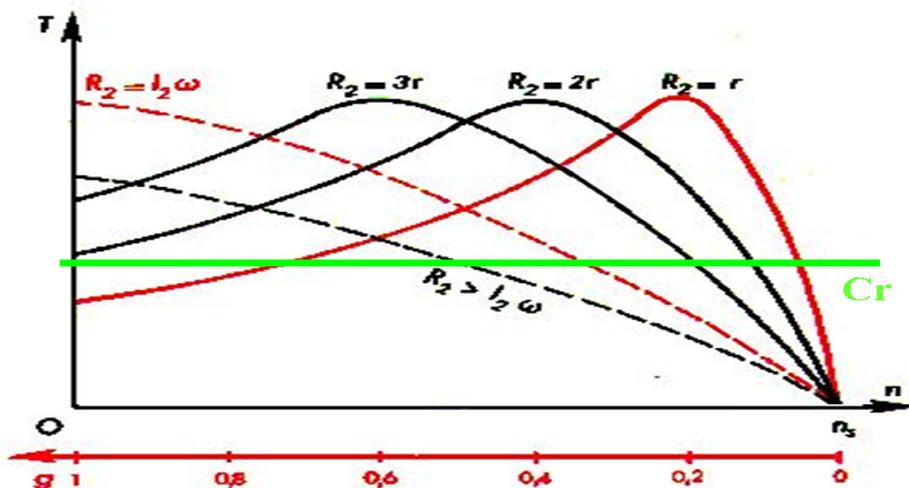
Les performances générales sont assez médiocres, mais ces systèmes sont particulièrement indiqués pour des applications de moteurs de puissance peu élevée et à fonctionnement très court (engins de levage par exemple), ou les préoccupations de rendement sont accessoires.

L'utilisation des gradateurs se rencontre pour la commande des moteurs universels alimentés en courant alternatif. En effet, tous les équipements électroménagers ou de bricolage à vitesse variable utilisent des gradateurs.

b) Variation par contrôle de l'énergie rotorique :

Action sur la résistance rotorique :

En agissant sur la résistance rotorique R_r , le couple maximal $C_{e_{max}}$ n'est pas modifié mais g_{max} augmente avec R_r . pour une charge à couple constant par exemple, on obtient alors diverses vitesses de fonctionnement.



Dans ce mode de variation, le glissement augmente entraînant une diminution du rendement. Néanmoins ce procédé permet d'obtenir de forts couples au démarrage tout en diminuant I_d .

Cascade hyposynchrone :

On prélève de l'énergie au rotor que l'on réinjecte au réseau de distribution. Cela a pour effet d'augmenter le glissement et donc de ralentir la machine, sans dégrader le rendement.

Les 3 enroulements du rotor sont connectés à un redresseur dont le courant de sortie est lissé par une bobine de forte inductance. Ce courant continu alimente un onduleur triphasé qui produit un système de courant alternatif triphasé synchronisé sur la fréquence du réseau.

La sortie de l'onduleur est connectée au réseau de distribution à travers un transformateur triphasé.

En négligeant toutes les pertes du système et les dispersions du moteur, on peut écrire :

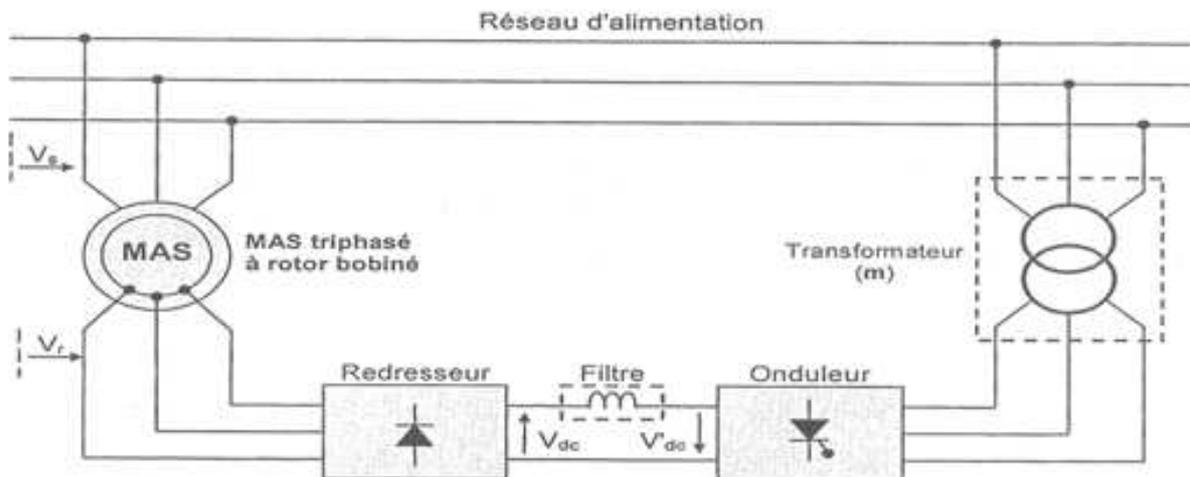


Figure 9-14. Commande par cascade hyposynchrone.

$$V_r = \frac{n_r}{n_s} g V_s = K g V_s$$

Les tensions du circuit intermédiaire à courant continu valent :

$$V_{dc} = \frac{3}{\pi} \sqrt{6} V_r = 2,34 \times K g V_s$$

$$V'_{dc} = \frac{3}{\pi} \sqrt{6} m V_s \cos \alpha = 2,34 \times m V_s \cos \alpha$$

$$V_{dc} = -V'_{dc}$$

$$2,34 K g V_s = -2,34 \times m V_s \cos \alpha$$

Le glissement peut être exprimé par la relation suivante :

$$g = -\frac{m}{K} \cos \alpha$$

Cette relation montre que la vitesse du moteur asynchrone peut être réglée par action sur l'angle de commande de l'onduleur, avec $\alpha > 90^\circ$ par conséquent $g > 1$

La puissance mécanique fournie par l'arbre est : $P_{méc} = C_m \Omega = C_m (1 - g) \frac{\omega_s}{P}$

Supposant que les pertes statoriques sont négligeables :

La puissance statorique vaut : $P_s = P_{éle} = C_m \frac{\omega_s}{P}$

La puissance rotorique vaut : $P_r = g P_s = V_{dc} I_c$

d'où I_{dc} est le courant continu circulant entre les convertisseurs.

On en déduit : $g C_m \frac{\omega_s}{P} = 2.34 k g V_s I_{dc}$

L'expression du couple disponible sur l'arbre de la machine peut s'écrire alors :

$$C_m = \frac{P}{\omega_s} 2.34 k V_s I_{dc}$$

A partir d'un état de fonctionnement donné, si on diminue la valeur de l'angle α de commande du pont onduleur, la tension V'_{dc} diminue provoquant un accroissement du courant I_{dc} et donc du couple, cela entraîne une augmentation de la vitesse (diminution du glissement) jusqu'à une nouvelle situation d'équilibre telle que : $V_{dc} = - V'_{dc}$

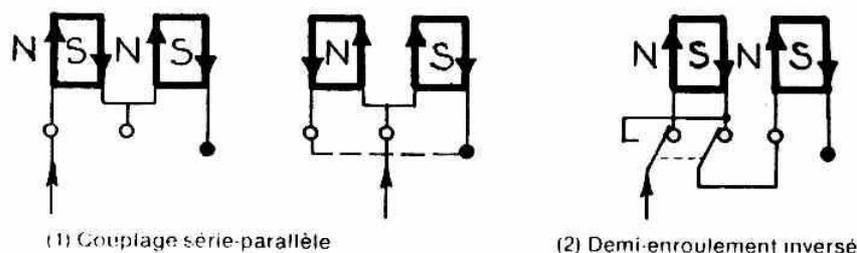
Dans une cascade hyposynchrone, la puissance absorbée au réseau vaut aux pertes :

$$P_s - P_r = P_{méc}$$

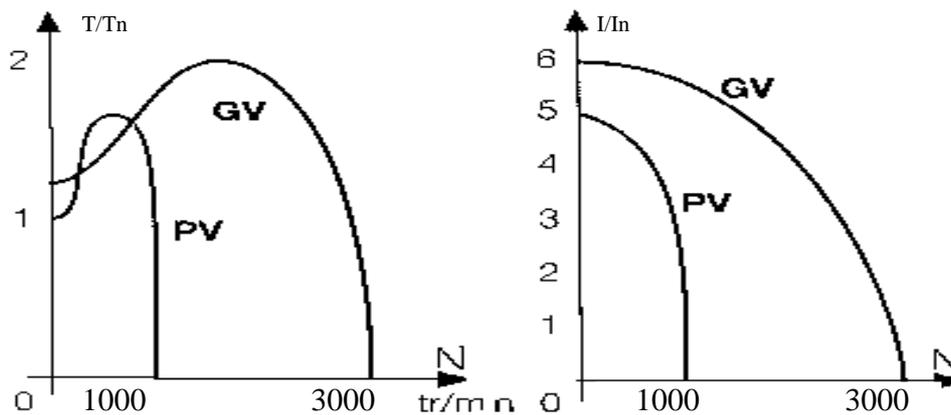
Avec une cascade hyposynchrone, on peut atteindre des meilleurs rendements, ce système est utilisé pour des moteurs puissants.

c) Variation par action sur le nombre de pôles :

Ces moteurs (de 0,3 à plusieurs centaines de kW) n'ont qu'un seul bobinage triphasé qui ne permet qu'un rapport des vitesses de 1 à 2. Ceci est obtenu par mise en parallèle des demi-enroulements de chaque phase (1) ou par inversion du courant dans l'un d'eux (2); le nombre de pôles est alors divisé par deux.



Caractéristiques C (n) en petite vitesse et grande vitesse :



Tensions et couplage	Schéma des connexions internes	Schéma de principe	Branchements plaques à bornes
Dahlander "couple constant" ou "usage courant" 6 bornes couplage Δ intérieur des 6 enroulements		Vitesse inférieure (PV) Triangle série 	
		Vitesse supérieure (GV) Etoile parallèle 	
Ce type de moteur ne permet que des rapports de vitesse de 1 à 2			

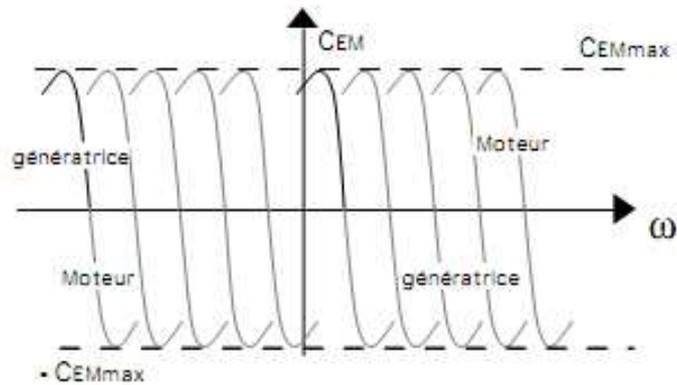
Ces moteurs permettent une variation discontinue et constante, ils sont à usages limités

d) Variation par contrôle de la fréquence d'alimentation :

Ce procédé consiste à faire varier la vitesse en agissant sur la fréquence des courants statoriques, on obtient donc plusieurs courbes mécaniques.

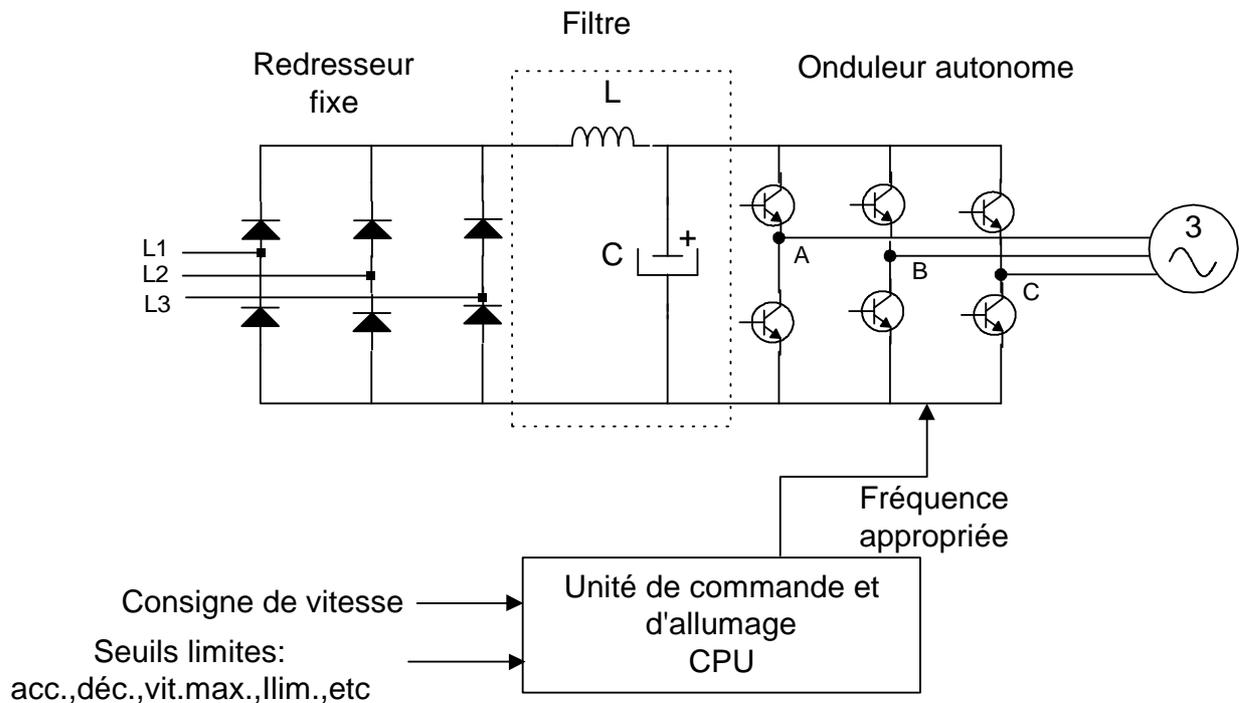
Dans ce type de variateurs, différents montages sont utilisés, et chacun d'eux présente des avantages et des inconvénients selon le domaine d'application. On retrouve :

- l'onduleur autonome à source de tension ;
- l'onduleur à modulation de largeur d'impulsion (MLI)



Le réglage se fait en agissant sur la tension et la fréquence statorique suite à la nature de la charge (courbe mécanique)

Schémas de principe :



4. Variateurs industriels pour moteurs asynchrones :

a) Principales fonctions :

Les variateurs de vitesse industriels sont conçus pour assurer, outre la vitesse, un ensemble de tâches permettant au moteur de fonctionner dans les meilleures conditions :

Démarrage et arrêt : les variateurs de vitesse permettent de contrôler l'accélération et la décélération au moyen d'une rampe linéaire ou en « S ». Le réglage de cette rampe permet de choisir le temps de démarrage et d'arrêt adéquats à l'application envisagée.

Variation et régulation de la vitesse : certains variateurs asservis de vitesse sont munis d'un régulateur de vitesse avec une boucle de retour. la vitesse est pratiquement insensible aux perturbations.

Inversion du sens de rotation : cette fonction est réalisée soit par inversion de la consigne à l'entrée, soit par une information transmise par la connexion réseau.

Freinage : il est réalisé de manière économique en injectant du courant continu dans le moteur avec un fonctionnement réversible de l'étage de puissance.

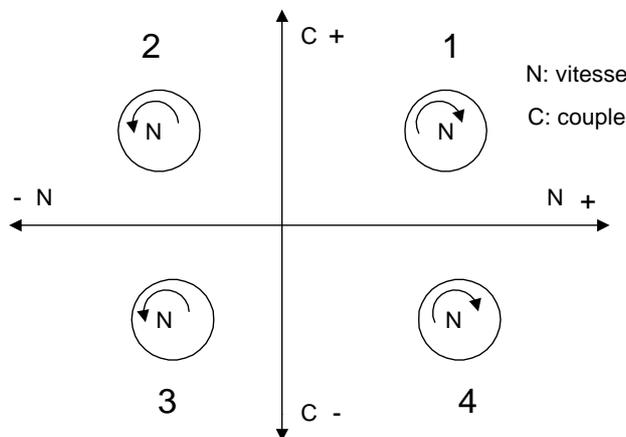
Protections intégrées : les variateurs sont fréquemment équipés de protections contre :

- Les courts-circuits entre phases et entre phase et terre.
- Les surtensions et les chutes de tension.
- Les déséquilibres de phases et la marche en monophasé

b) Réversibilité de fonctionnement :

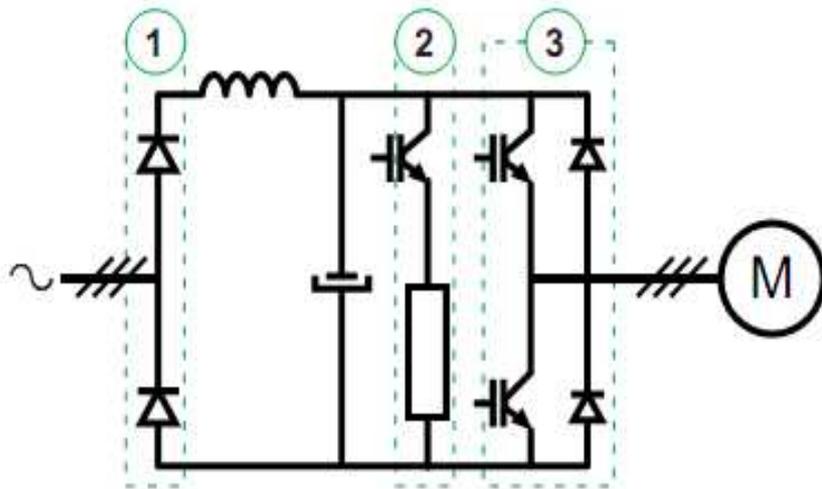
Les variateurs de vitesse peuvent, selon le convertisseur électronique, soit faire fonctionner un moteur dans un seul sens de rotation, ils sont alors dits « unidirectionnels », soit commander les deux sens de rotation, ils sont alors dits « bidirectionnels ».

Les variateurs peuvent être « réversibles » lorsqu'ils peuvent récupérer de l'énergie du moteur fonctionnant en générateur en mode de freinage. La réversibilité est obtenue soit par un renvoi d'énergie sur le réseau (pont d'entrée réversible), soit en dissipant l'énergie récupérée dans une résistance avec un hacheur de freinage.



Variateur unidirectionnel :

Ce type de variateur, le plus souvent non réversible, est réalisé avec un convertisseur indirect (avec étage intermédiaire en CC) comportant en entrée un pont de diode suivi d'un convertisseur de fréquence qui fait fonctionner la machine dans le quadrant 1



En cas de fonctionnement prolongé avec une charge entrainante, un convertisseur réversible est indispensable car la charge est alors négative comme, par exemple, avec un moteur utilisé en frein sur un banc d'essai.

Variateur bidirectionnel :

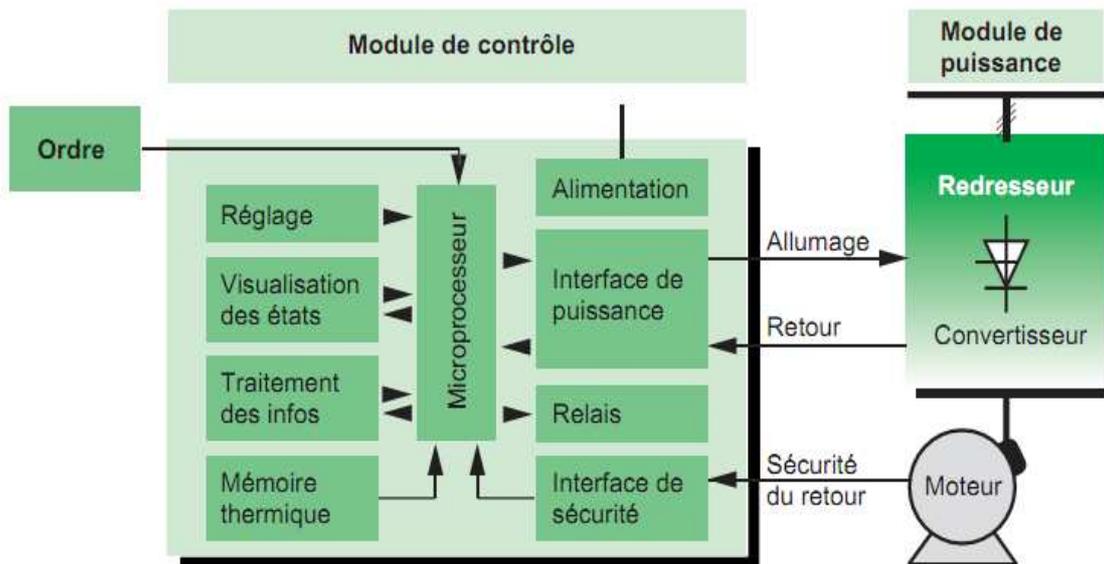
Ce type de variateur peut être un convertisseur réversible ou non réversible .s'il est réversible, la machine fonctionne dans les quatre quadrants et peut permettre un freinage important. S'il est non réversible la machine ne fonctionne que dans les quadrants 1 et 3.

5. Structure et composants des démarreurs et variateurs électroniques :

a) Architecture de base :

Les démarreurs et les variateurs de vitesse électroniques sont composés de deux modules généralement regroupés dans une même enveloppe:

- un module de contrôle qui gère le fonctionnement de l'appareil,
- un module de puissance qui alimente le moteur en énergie électrique.



b) Le module de contrôle :

Sur les démarreurs et les variateurs modernes, toutes les fonctions sont commandées par un microprocesseur qui exploite les réglages, les ordres transmis par un opérateur ou par une unité de traitement, et les résultats de mesures comme la vitesse, le courant, etc.

Les capacités de calcul des microprocesseurs ainsi que des circuits dédiés (ASIC) ont permis de réaliser des algorithmes de commandes extrêmement performants et, en particulier, la reconnaissance des paramètres de la machine entraînée. A partir de ces informations, le microprocesseur gère les rampes d'accélération et de décélération, l'asservissement de vitesse, la limitation de courant, et génère la commande des composants de puissance. Les protections et les sécurités sont traitées par des circuits spécialisés (ASIC) ou intégrés dans les modules de puissance (IPM).

Les réglages (limites de vitesse, rampes, limitation de courant ...) se font soit par claviers intégrés, soit à partir d'automate par des bus de terrain ou de PC pour charger des réglages standard. De même, les différents ordres (marche, arrêt, freinage) peuvent être donnés à partir d'interfaces de dialogue homme /machine, par des automates programmables ou par des PC. Les paramètres de fonctionnement et les informations d'alarme et de défauts peuvent être visualisés par des voyants, des diodes électroluminescentes, des afficheurs à segments ou à cristaux liquides, ou déportés vers des superviseurs par des bus de terrains. Des relais, souvent programmables, donnent des informations de défaut (réseau, thermique, produit, séquence, surcharge...),

Surveillance (seuil de vitesse, pré alarme, fin de démarrage).

Les tensions nécessaires pour l'ensemble des circuits de mesure et de contrôle sont fournies par une alimentation intégrée au variateur et séparée galvaniquement du réseau.

c) Le module de puissance :

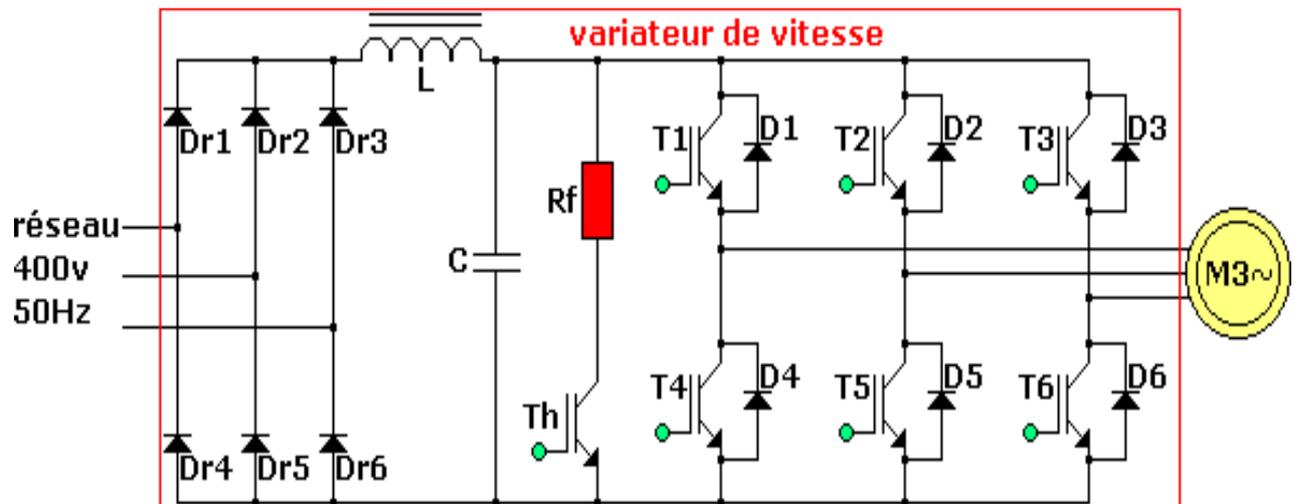
Le module de puissance est principalement constitué de :

Composants de puissance (diodes, thyristors, IGBT) interfaces de mesure des tensions et/ou des courants, fréquemment d'un ensemble de ventilation.

6. Convertisseur de fréquence pour moteur asynchrone :

a) Principe général :

Le convertisseur de fréquence, alimenté à tension et fréquence fixes par le réseau, assure au moteur, en fonction des exigences de vitesse, son alimentation en courant alternatif à tension et fréquence variables. Pour alimenter convenablement un moteur asynchrone à couple constant quelle que soit la vitesse, il est nécessaire de maintenir le flux constant. Ceci nécessite que la tension et la fréquence évoluent simultanément et dans les mêmes proportions.



b) Constitution :

- un redresseur avec condensateurs de filtrage ;
- un onduleur à 6 IGBT et 6 diodes ;
- un hacheur qui est connecté à une résistance de freinage (en général extérieure au produit) les circuits de commande des transistors IGBT ;
- une unité de contrôle organisée autour d'un microprocesseur, lequel assure la commande de l'onduleur ;
- des capteurs internes pour mesurer le courant moteur, la tension continue présente aux bornes des condensateurs et dans certains cas les tensions présentes aux bornes du pont redresseur et du moteur ainsi que toutes les grandeurs nécessaires au contrôle et à la protection de l'ensemble moto-variateur ;

- une alimentation pour les circuits électronique bas niveau. Cette alimentation est réalisée par un circuit à découpage connecté aux bornes des condensateurs de filtrage pour bénéficier de cette réserve d'énergie.

Cette disposition permet à l'Altivar de s'affranchir des fluctuations réseau et des disparitions de tension de courte durée, ce qui lui confère de remarquables performances en présence de réseaux fortement perturbés.

Le circuit de puissance est constitué par un redresseur et un onduleur qui, à partir de la tension redressée, produit une tension d'amplitude et fréquence variables

Pour respecter la directive CE – Communauté Européenne - et les normes associées, un filtre « réseau » est placé en amont du pont redresseur.

Le redresseur est en général équipé d'un pont redresseur à diodes et d'un circuit de filtrage constitué d'un ou plusieurs condensateurs en fonction de la puissance. Un circuit de limitation contrôle l'intensité à la mise sous tension du variateur. Certains convertisseurs utilisent un pont à thyristors pour limiter le courant d'appel de ces condensateurs de filtrage qui sont chargés à une valeur sensiblement égale à la valeur crête de la sinusoïde réseau (environ 560 V en 400 V triphasé). Nota : Malgré la présence de circuits de décharge, ces condensateurs sont susceptibles de conserver une tension dangereuse en l'absence de tension réseau. Une intervention à l'intérieur d'un tel produit ne doit donc être effectuée que par des personnes formées et connaissant bien les précautions indispensables à mettre en place (circuit de décharge additionnel ou connaissance du temps d'attente).

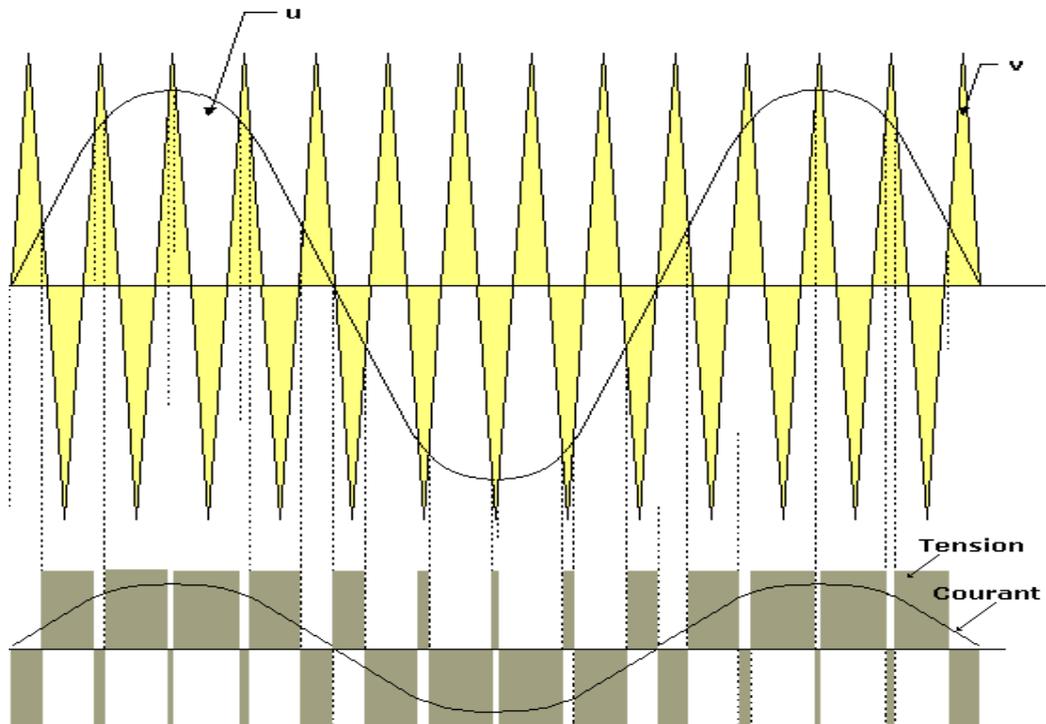
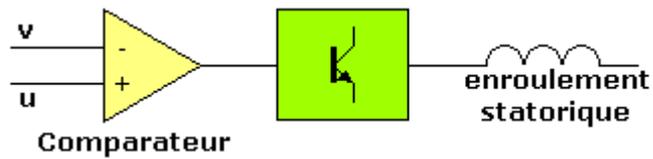
Le pont onduleur, connecté à ces condensateurs, utilise six semi-conducteurs de puissance (en général des IGBT) et des diodes de roue libre associées

Ce type de variateur est destiné à l'alimentation des moteurs asynchrones à cage. Ainsi l'Altivar, de la Marque Télémécanique, permet de créer un mini-réseau électrique à tension et fréquence variables capable d'alimenter un moteur unique ou plusieurs moteurs en parallèle.

c) Variation de vitesse :

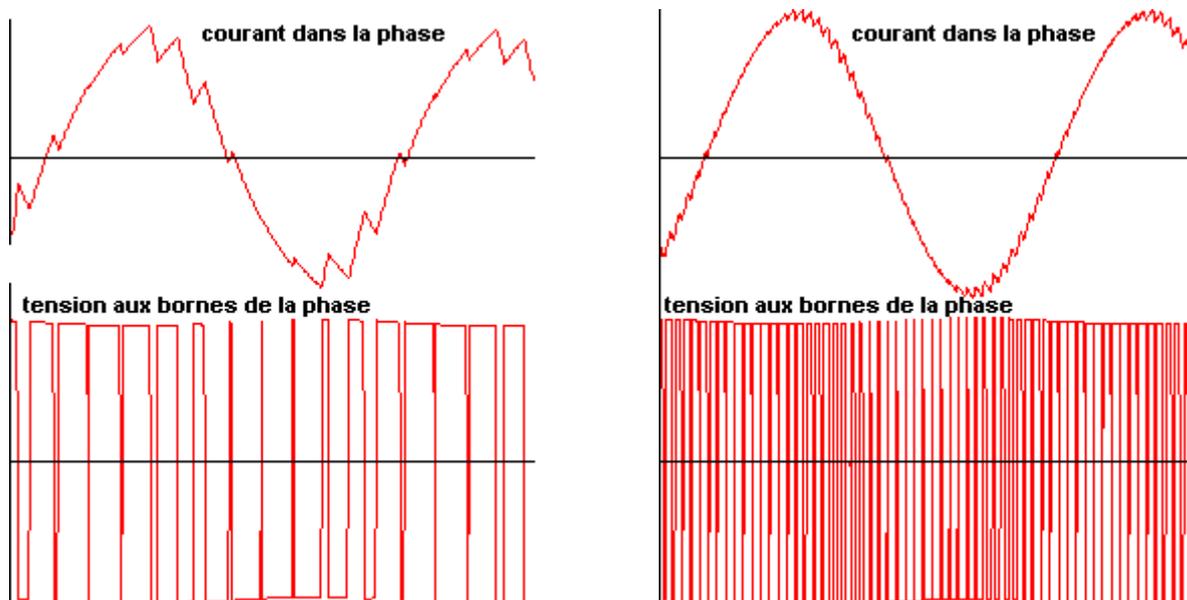
Une onde modulatrice sinusoïdale u , de fréquence f_u est comparée à une onde triangulaire v de fréquence f_v . La sortie du comparateur permet, par l'intermédiaire de transistors de puissance, le pilotage d'une phase de la machine. Les autres phases sont pilotées par des ensembles identiques, déphasés de 120° .

Pour éliminer les harmoniques de rang pair et les harmoniques de rang 3, le rapport de modulation $m = f_v/f_u$ est impair, multiple de 3 et de l'ordre de la centaine (dans l'exemple ci-dessous $m=9$).



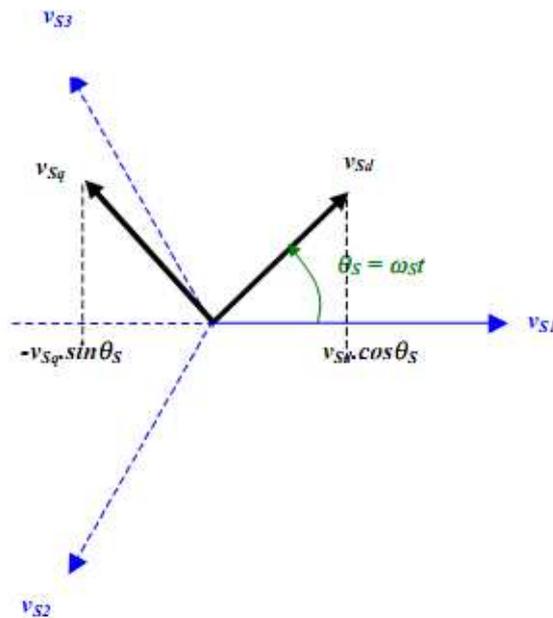
Le courant, filtré par l'inductance de l'enroulement est quasi - sinusoïdal.

Allure des courants et tension (onduleur monophasé) pour des rapports de modulation différents:



Pilotage par contrôle vectoriel de flux :

Sur une machine asynchrone à cage, la complexité de ce type de commande vient du fait qu'on ne dispose que des bornes des enroulements statoriques, pour maîtriser au niveau du rotor, le flux et le courant actif, ces deux grandeurs étant fortement couplées. De plus, il faut retrouver la quadrature entre I et j .



Un développement mathématique complexe montre que les courants statoriques triphasés peuvent se décomposer en un système de courants biphasés I_q et I_d :

- le couple est fonction d'un courant statorique I_q
- le flux est fonction d'un courant statorique I_d (en quadrature avec I_q)

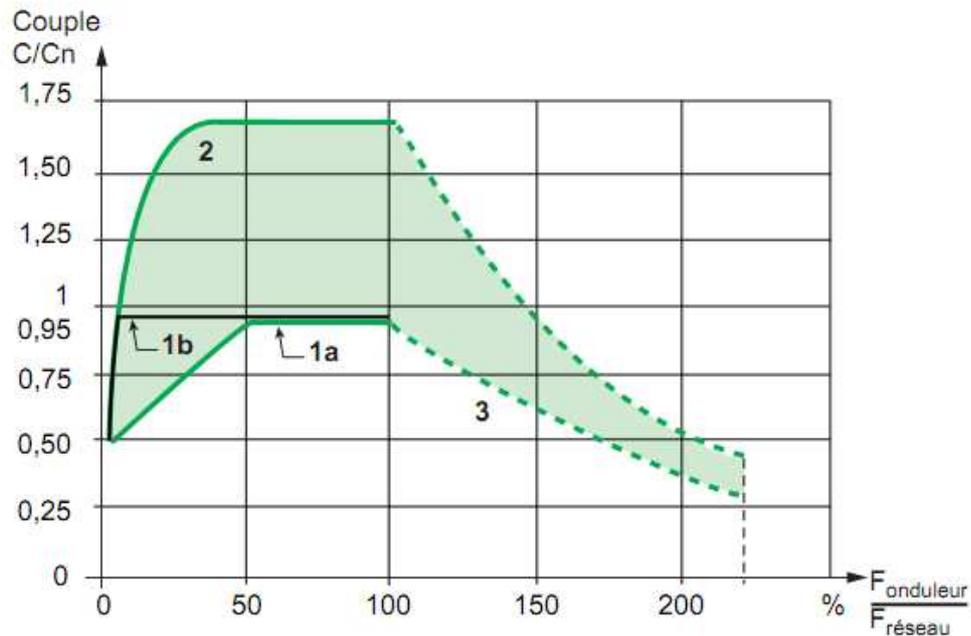
Des signaux M.L.I. générés à partir de calculs très rapides effectués par un microcontrôleur, sont envoyés à des transistors de sortie, à partir des informations de position et de vitesse du rotor, délivrées par un codeur.

Ce type de pilotage permet un excellent contrôle des paramètres couple et vitesse. Le couple est très élevé (supérieur au couple nominal) même à vitesse nulle.

d) Variateur à V/f :

Dans ce type de fonctionnement, la référence vitesse impose une fréquence à l'onduleur et par voie de conséquence au moteur, ce qui détermine la vitesse de rotation. La tension d'alimentation est en relation directe avec la fréquence. Ce fonctionnement est souvent nommé

fonctionnement à U/f constant ou fonctionnement scalaire. Si aucune compensation n'est effectuée, la vitesse réelle varie avec la charge ce qui limite la plage de fonctionnement. Une compensation sommaire peut être utilisée pour tenir compte de l'impédance interne du moteur et limiter la chute de vitesse en charge.



e) Variateur à commande vectorielle :

Les performances sont grandement augmentées par une électronique de commande faisant appel au contrôle vectoriel de flux .

La plupart des variateurs modernes intègrent cette fonction en standard. La connaissance ou l'estimation des paramètres de la machine permet de se passer de capteur de vitesse pour la majorité des applications. Dans ce cas un moteur standard peut être utilisé avec la limitation usuelle de fonctionnement prolongé à basse vitesse.

Le variateur élabore les informations à partir des grandeurs mesurées aux bornes de la machine (tension et courant).

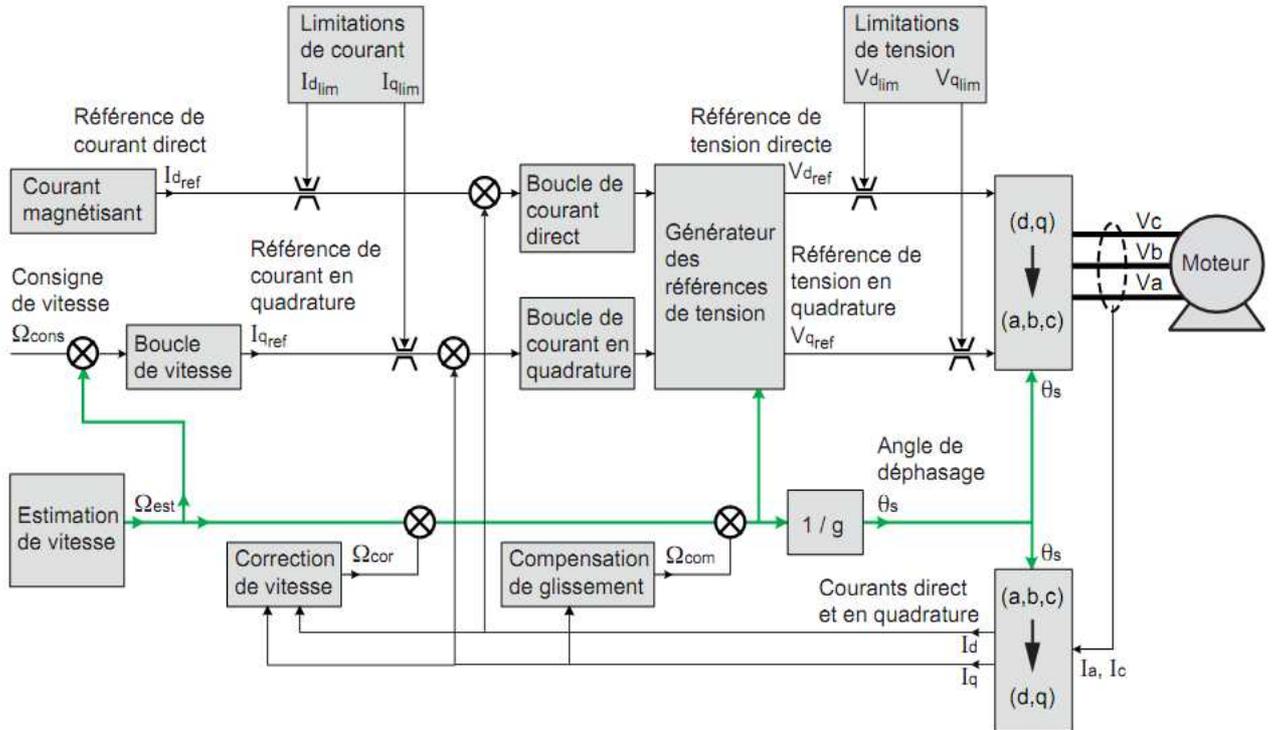
Ce mode de contrôle apporte des performances acceptables sans augmentation de coût.

Pour obtenir ces performances, certains paramètres de la machine doivent être connus.

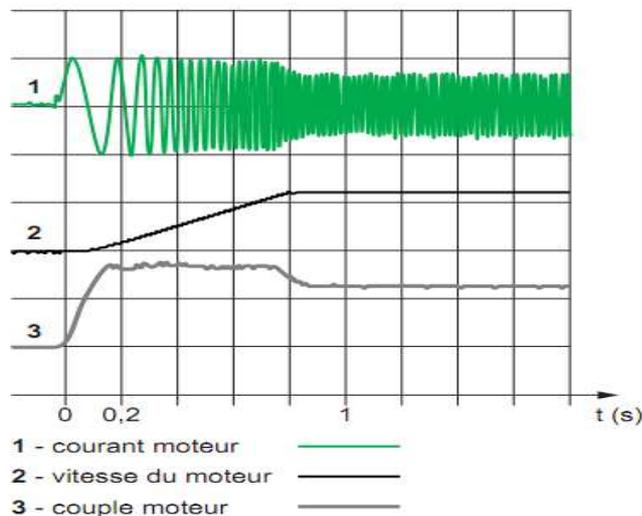
A la mise en service, l'opérateur de la machine doit notamment introduire les caractéristiques plaquées sur le moteur dans les paramètres de réglage du variateur telles que :

- UNS : tension nominale moteur,
- FRS : fréquence nominale stator,
- NCR : courant nominal stator,
- NSP : vitesse nominale,
- COS : cosinus moteur.

Variateur avec contrôle vectoriel de flux sans capteur :



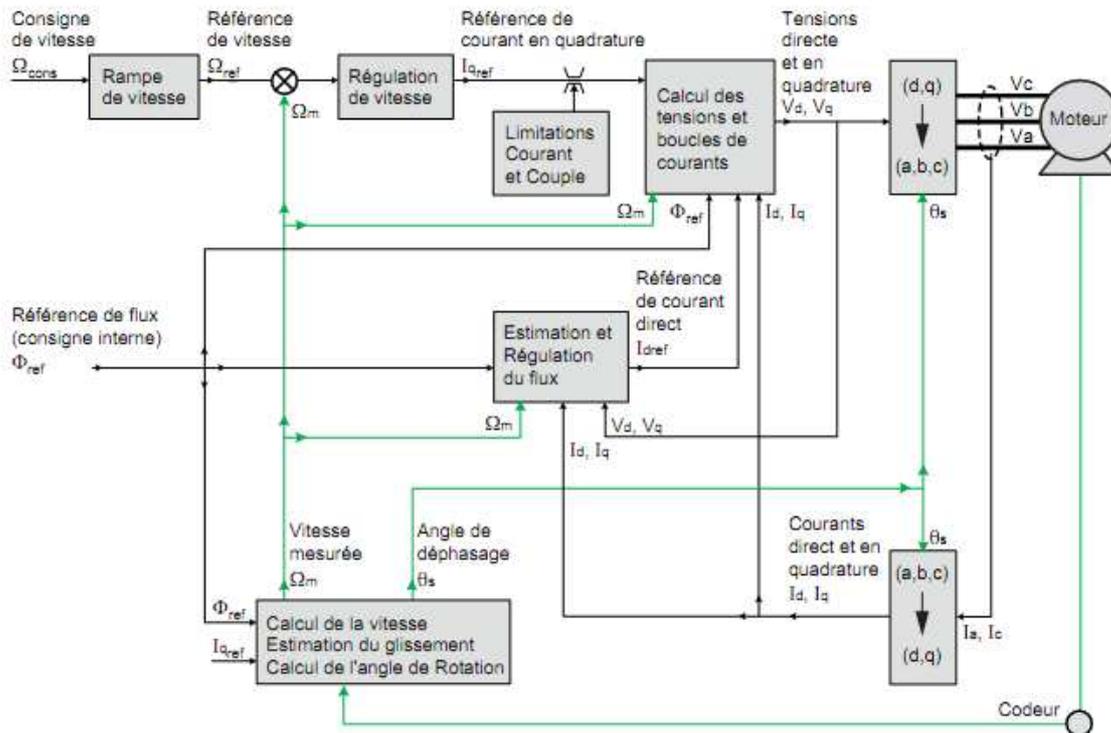
A la mise sous tension, un variateur avec contrôle vectoriel de flux sans capteur (type ATV58F Télémécanique) pratique un autoréglage qui lui permet de déterminer les paramètres statoriques R_s , L_f . Cette mesure peut se faire moteur accouplé à la mécanique. La durée varie en fonction de la puissance du moteur (1 à 10 s). Ces valeurs sont mémorisées et permettent au produit d'élaborer les lois de commande. L'oscillogramme ci-dessous représente la mise en vitesse d'un moteur, chargé à son couple nominal alimenté par un variateur sans capteur. On remarquera que le couple nominal est obtenu rapidement (moins de 0,2 s) et la linéarité de la mise en vitesse. La vitesse nominale est obtenue en 0,8 seconde.



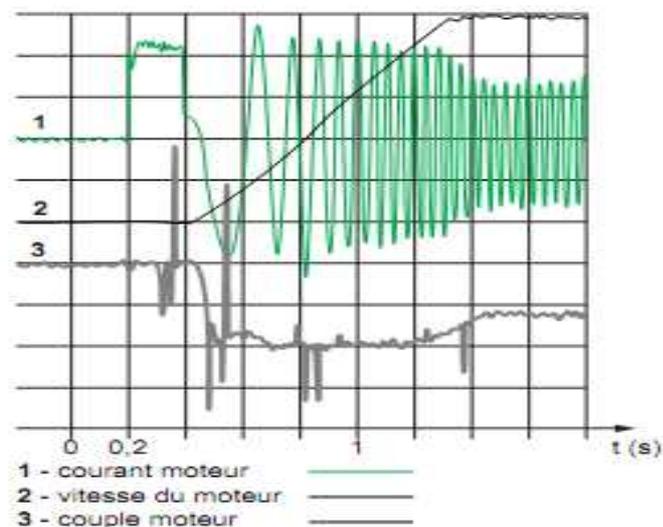
Variateur avec contrôle vectoriel de flux en boucle fermée avec capteur :

Le contrôle vectoriel de flux en boucle fermée avec capteur est une autre possibilité.

Cette solution fait appel à la transformation de Park et permet de contrôler indépendamment le courant (I_d) assurant le flux dans la machine et le courant (I_q) assurant le couple (égal au produit $I_d \cdot I_q$). La commande du moteur est analogue à celle d'un moteur à courant continu.



Ce type de contrôle autorise également des bandes passantes très élevées et des performances comparables et même supérieures aux meilleurs variateurs à courant continu. En contre partie, le moteur utilisé n'est pas de construction standard en raison de la présence d'un capteur et le cas échéant d'une ventilation forcée.



f) Inversion du sens de marche et freinage :

Pour inverser le sens de marche, un ordre externe (soit sur une entrée dédiée à cet effet, soit pour un signal circulant sur un bus de communication) entraîne l'inversion dans l'ordre de fonctionnement des composants de l'onduleur, donc du sens de rotation du moteur. Plusieurs fonctionnements sont possibles.

Inversion immédiate du sens de commande des semi-conducteurs :

Si le moteur est toujours en rotation au moment de l'inversion de sens de marche, cela se traduit par un glissement important et le courant dans le variateur est alors égal au maximum possible (limitation interne). Le couple de freinage est faible en raison du fort glissement et la régulation interne ramène la consigne de vitesse à une faible valeur. Quand le moteur atteint la vitesse nulle, la vitesse s'inverse en suivant la rampe. L'excédent d'énergie non absorbée par le couple résistant et les frottements est dissipé dans le rotor.

Inversion du sens de commande des semi-conducteurs précédée d'une décélération avec ou sans rampe :

Si le couple résistant de la machine est tel que la décélération naturelle est plus rapide que la rampe fixée par le variateur, celui-ci continue à fournir de l'énergie au moteur. La vitesse diminue progressivement et s'inverse.

Par contre, si le couple résistant de la machine est tel que la décélération naturelle est plus faible que la rampe fixée par le variateur, le moteur se comporte comme une génératrice hyper synchrone et restitue de l'énergie au variateur ; mais la présence du pont de diodes interdisant le renvoi de l'énergie vers le réseau, les condensateurs de filtrage se chargent, la tension augmente et le variateur se verrouille. Pour éviter cela, il faut disposer d'une résistance qui est connectée aux bornes des condensateurs par un hacheur de façon à limiter la tension à une valeur convenable. Le couple de freinage n'est plus limité que par les capacités du variateur de vitesse : la vitesse diminue progressivement et s'inverse.

Pour cette utilisation, le fabricant du variateur fournit des résistances de freinage dimensionnées en fonction de la puissance du moteur et des énergies à dissiper. Le hacheur étant dans la majorité des cas inclus d'origine dans le variateur, seule la présence d'une résistance de freinage distingue un variateur capable d'assurer un freinage contrôlé. Ce mode de freinage est donc particulièrement économique. Il va de soi que ce mode de fonctionnement permet de ralentir un moteur jusqu'à l'arrêt sans nécessairement inverser le sens de rotation

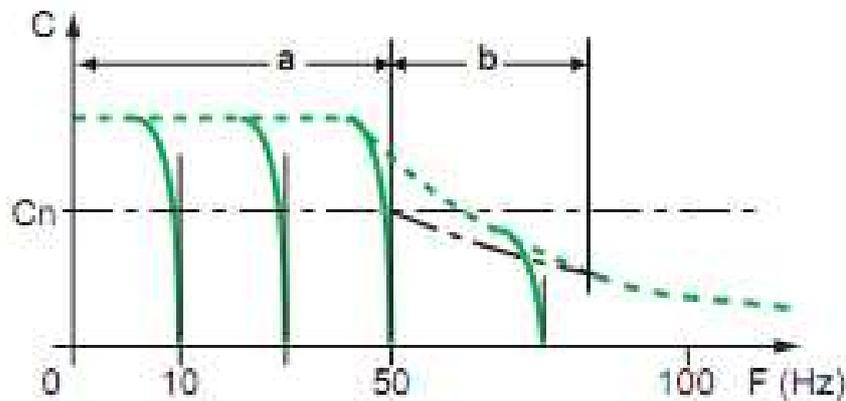
Freinage de ralentissement par injection de courant continu :

Un freinage économique peut être facilement réalisé en faisant fonctionner l'étage de sortie du variateur en hacheur qui injecte ainsi un courant continu dans les enroulements. Le couple de freinage n'est pas contrôlé. Il est assez peu efficace, surtout à grande vitesse, et de ce fait la rampe de décélération n'est pas contrôlée.

Néanmoins c'est une solution pratique pour diminuer le temps d'arrêt naturel de la machine. L'énergie étant dissipée dans le rotor, ce mode de fonctionnement est, par nature, occasionnel

g) Modes de fonctionnement :

Fonctionnement dit à « couple constant »



Tant que la tension délivrée par le variateur peut évoluer et dans la mesure où le flux dans la machine est constant (rapport U/f constant ou mieux encore avec contrôle vectoriel de flux), le couple moteur sera grossièrement proportionnel au courant et le couple nominal de la machine pourra être obtenu sur toute la plage de vitesse. Cependant le fonctionnement prolongé au couple nominal à basse vitesse n'est possible que si une ventilation forcée du moteur est prévue, ce qui nécessite un moteur spécial. Les variateurs modernes disposent de circuits de protection qui établissent une image thermique du moteur en fonction du courant, des cycles de fonctionnement et de la vitesse de rotation : la protection du moteur est donc assurée.

Fonctionnement dit à « puissance constante »

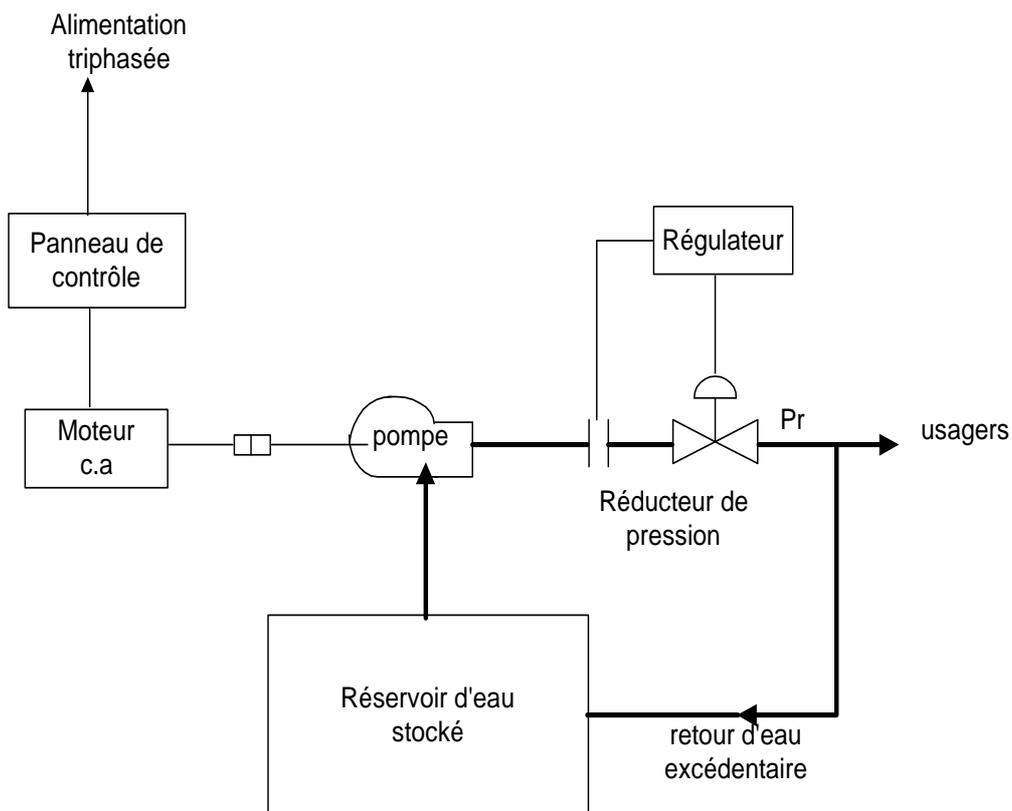
Lorsque la machine est alimentée sous sa tension nominale, il est encore possible d'augmenter sa vitesse en l'alimentant à une fréquence supérieure à celle du réseau de distribution. Toutefois, la tension de sortie du convertisseur ne pouvant pas dépasser celle du réseau, le couple disponible décroît en proportion inverse de l'accroissement de la vitesse. Au-dessus de sa vitesse

h) Application d'un variateur à fréquence variable :

L'application qui suit donne l'avantage d'utiliser un variateur de vitesse dans une station de pompage.

Station de pompage avec réducteur de pression, sans variateur :

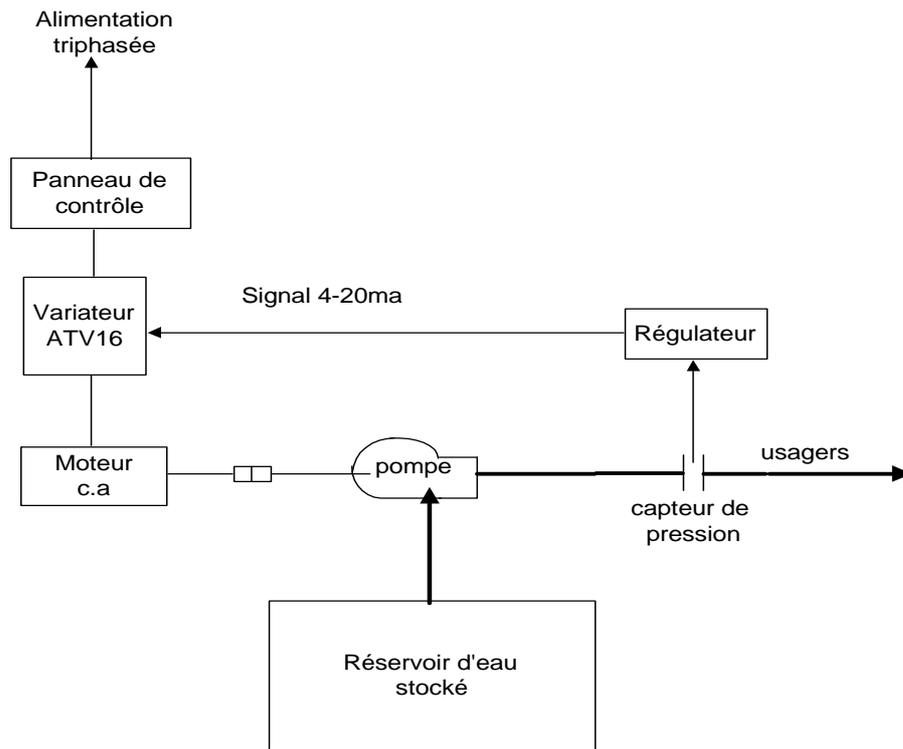
Afin de conserver une pression du réseau (P_r) constante, le réducteur de pression s'ajuste en fonction de la demande des usagers et la pompe fonctionne à plein régime tout le temps. L'excès d'eau est renvoyé au réservoir d'origine, d'où il en résulte une perte d'énergie.



Station de pompage sans variateur

Station de pompage avec variateur :

Dans ce cas, la régulation de la pression du réseau se fait à l'aide du capteur de pression et du variateur de vitesse. Celui-ci délivre au moteur la puissance nécessaire afin de s'ajuster à la demande, d'où il en résulte une économie d'énergie.



Station de pompage avec variateur

i) Sources de problèmes dans un système de commande électronique de moteurs :

Même si l'équipement de commande électronique a été correctement installé et réglé il est toujours possible d'apparaître, durant l'exploitation, des pannes dues aux causes, parfois banales, de type :

- Mauvais contact au niveau des connecteurs, favorisés par les conditions de milieu (humidité, poussière, vibrations, chaleur) ;
- Choc thermique au niveau des dispositifs électroniques de puissance (thyristors, triacs, diodes, IGBT) provoqués par un régime de surcharge temporel du moteur contrôlé, régime qui n'a pas été détecté à cause d'un dysfonctionnement des éléments de surveillance ;
- Déréglage (provoqué par des vibrations ou par des chocs mécaniques) des potentiomètres intervenant dans les références de tension des circuits de protection (dans le cas des circuits de commande analogique);
- Corrosion des pistes du circuit imprimé sous l'influence prolongée des agents atmosphériques nocifs.