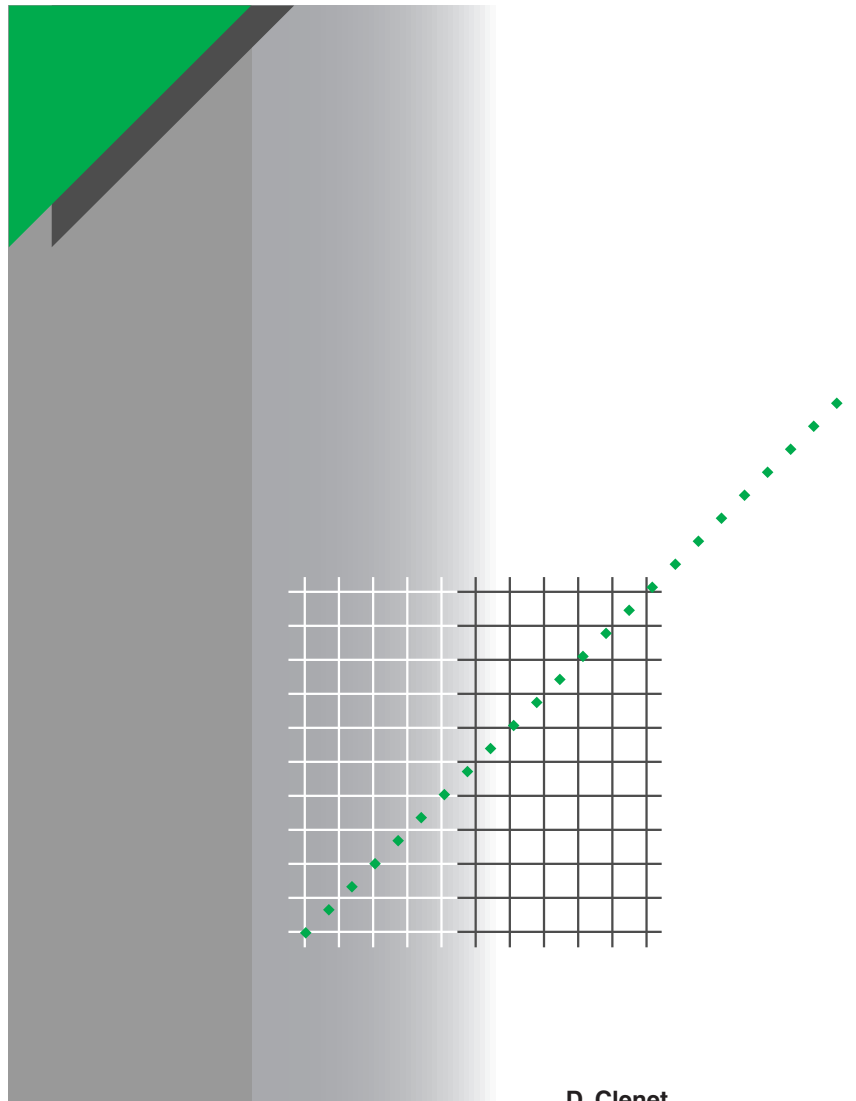


# Cahier technique n° 208

## Démarrateurs et variateurs de vitesse électroniques



D. Clenet

Les Cahiers Techniques constituent une collection d'une centaine de titres édités à l'intention des ingénieurs et techniciens qui recherchent une information plus approfondie, complémentaire à celle des guides, catalogues et notices techniques.

Les Cahiers Techniques apportent des connaissances sur les nouvelles techniques et technologies électrotechniques et électroniques. Ils permettent également de mieux comprendre les phénomènes rencontrés dans les installations, les systèmes et les équipements.

Chaque Cahier Technique traite en profondeur un thème précis dans les domaines des réseaux électriques, protections, contrôle-commande et des automatismes industriels.

Les derniers ouvrages parus peuvent être téléchargés sur Internet à partir du site Schneider Electric.

Code : <http://www.schneider-electric.com>

Rubrique : **Le rendez-vous des experts**

Pour obtenir un Cahier Technique ou la liste des titres disponibles contactez votre agent Schneider Electric.

La collection des Cahiers Techniques s'insère dans la « Collection Technique » de Schneider Electric.

### **Avertissement**

L'auteur dégage toute responsabilité consécutive à l'utilisation incorrecte des informations et schémas reproduits dans le présent ouvrage, et ne saurait être tenu responsable ni d'éventuelles erreurs ou omissions, ni de conséquences liées à la mise en œuvre des informations et schémas contenus dans cet ouvrage.

La reproduction de tout ou partie d'un Cahier Technique est autorisée avec la mention obligatoire :

« Extrait du Cahier Technique Schneider Electric n° (à préciser) ».

# n° 208

## Démarrateurs et variateurs de vitesse électroniques

---

**Daniel CLENET**



Diplômé de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Brest en 1969. Après une première expérience en variation de vitesse dans la société Alstom, il est entré en 1973 chez Telemecanique dans l'activité variateur de vitesse comme ingénieur de développement. Il a développé des variateurs de vitesse pour moteur à courant continu destinés au marché des machines-outils, des variateurs dédiés aux chariots de manutention ainsi qu'une partie des premiers variateurs de vitesse pour moteurs asynchrones.

Son expérience des applications découle des contacts avec les clients utilisateurs et d'une activité de chef de projet dans le Département des Applications Industrielles de Schneider Electric. On lui doit le lancement du variateur Altivar aux USA dans les années 86 à 90.

---



# Démarrateurs et variateurs de vitesse électroniques

Le démarrage en direct sur le réseau de distribution des moteurs asynchrones est la solution la plus répandue et est souvent convenable pour une grande variété de machines. Cependant, elle s'accompagne parfois de contraintes qui peuvent s'avérer gênantes pour certaines applications, voire même incompatible avec le fonctionnement souhaité au niveau de la machine :

- appel de courant au démarrage pouvant perturber la marche d'autres appareils connectés sur le même réseau,
- à-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.

Les démarreurs et les variateurs de vitesse suppriment ces inconvénients. La technologie électronique leur a donné plus de souplesse et a étendu leur champ d'application. Mais encore faut-il bien les choisir. Tout l'objet de ce Cahier Technique est de mieux faire connaître ces dispositifs pour faciliter leur définition en cours de conception d'équipement ou pour améliorer voire remplacer un ensemble moteur-appareillage de commande et de protection.

## Sommaire

<b>1 Historique et rappels</b>	1.1 Historique	<b>p. 4</b>
	1.2 Rappels : les principales fonctions des démarreurs et des variateurs de vitesse électroniques	p. 4
<b>2 Les principaux modes de fonctionnement et principaux types de variateurs électroniques</b>	2.1 Les principaux modes de fonctionnement	<b>p. 6</b>
	2.2 Les principaux types de variateurs	p. 8
<b>3 Structure et composants des démarreurs et variateurs électroniques</b>	3.1 Structure	<b>p. 10</b>
	3.2 Composants	p. 11
<b>4 Variateur-régulateur pour moteur courant continu</b>	4.1 Principe général	<b>p. 14</b>
	4.2 Modes de fonctionnement possibles	p. 15
<b>5 Convertisseur de fréquence pour moteur asynchrone</b>	5.1 Principe général	<b>p. 16</b>
	5.2 Fonctionnement en U/f	p. 17
	5.3 Commande vectorielle	p. 18
	5.4 Gradateur de tension pour moteur asynchrone	p. 21
	5.5 Moto-variateurs synchrones	p. 23
	5.6 Moto-variateurs pas-à-pas	p. 23
<b>6 Les fonctions complémentaires des variateurs de vitesse</b>	6.1 Les possibilités de dialogue	<b>p. 25</b>
	6.2 Les fonctions intégrées	p. 25
	6.3 Les cartes optionnelles	p. 26
<b>7 Conclusion</b>		<b>p. 27</b>

# 1 Historique et rappels

## 1.1 Historique

Pour démarrer les moteurs électriques et contrôler leur vitesse, les démarreurs rhéostatiques, les variateurs mécaniques et les groupes tournants (Ward Leonard en particulier) ont été les premières solutions ; puis les démarreurs et variateurs électroniques se sont imposés dans l'industrie comme la solution moderne, économique, fiable et sans entretien.

Un variateur ou un démarreur électronique est un convertisseur d'énergie dont le rôle consiste à moduler l'énergie électrique fournie au moteur. Les démarreurs électroniques sont exclusivement destinés aux moteurs asynchrones. Ils font partie de la famille des gradateurs de tension. Les variateurs de vitesse assurent une mise en vitesse et une décélération progressives, ils permettent une adaptation précise de la vitesse aux conditions d'exploitation. Les variateurs de vitesse sont du type redresseur contrôlé pour alimenter les moteurs à courant continu, ceux destinés aux moteurs à courant alternatif sont des convertisseurs de fréquence.

Historiquement, le variateur pour moteur à courant continu a été la première solution offerte. Les progrès de l'électronique de puissance et de la microélectronique ont permis la réalisation de convertisseurs de fréquence fiables et économiques. Les convertisseurs de fréquence modernes permettent l'alimentation de moteurs asynchrones standard avec des performances analogues aux meilleurs variateurs de vitesse à courant continu. Certains constructeurs proposent même des moteurs asynchrones avec des variateurs de vitesse électroniques incorporés dans une boîte à bornes adaptée ; cette solution est proposée pour des ensembles de puissance réduite (quelques kW).

En fin de ce Cahier Technique sont évoqués les évolutions récentes des variateurs de vitesse et la tendance qui se dessine chez les constructeurs. Ces évolutions élargissent notablement l'offre et les possibilités des variateurs.

## 1.2 Rappels : les principales fonctions des démarreurs et des variateurs de vitesse électroniques

### Accélération contrôlée

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 approprié à l'application.

### Variation de vitesse

Un variateur de vitesse peut ne pas être en même temps régulateur. Dans ce cas, c'est un système, rudimentaire, qui possède une commande élaborée à partir des grandeurs électriques du moteur avec amplification de puissance, mais sans boucle de retour : il est dit « en boucle ouverte ».

La vitesse du moteur est définie par une grandeur d'entrée (tension ou courant) appelée consigne ou référence. Pour une valeur donnée de la consigne, cette vitesse peut varier en fonction des perturbations (variations de la tension d'alimentation, de la charge, de la température).

La plage de vitesse s'exprime en fonction de la vitesse nominale.

### Régulation de vitesse

Un régulateur de vitesse est un variateur asservi (cf. **fig. 1**). Il possède un système de commande avec amplification de puissance et une boucle de retour : il est dit « en boucle fermée ».

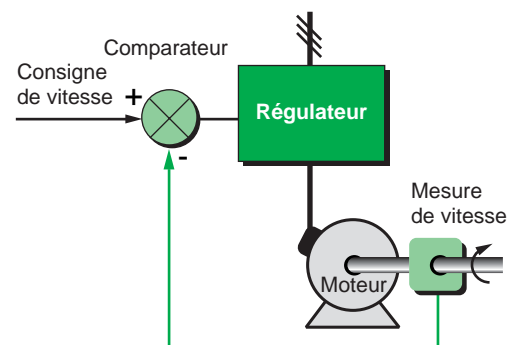


Fig. 1 : principe de la régulation de vitesse.

La vitesse du moteur est définie par une consigne.

La valeur de la consigne est en permanence comparée à un signal de retour, image de la vitesse du moteur. Ce signal est délivré par une génératrice tachymétrique ou un générateur d'impulsions monté en bout d'arbre du moteur.

Si un écart est détecté suite à une variation de la vitesse, les grandeurs appliquées au moteur (tension et / ou fréquence) sont automatiquement corrigées de façon à ramener la vitesse à sa valeur initiale.

Grâce à la régulation, la vitesse est pratiquement insensible aux perturbations.

La précision d'un régulateur est généralement exprimée en % de la valeur nominale de la grandeur à réguler.

### **Décélération contrôlée**

Quand un moteur est mis hors tension, sa décélération est due uniquement au couple résistant de la machine (décélération naturelle). Les démarreurs et variateurs électroniques permettent 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 à une vitesse intermédiaire ou nulle :

- Si la décélération désirée est plus rapide que la décélération naturelle, le moteur doit développer un couple résistant qui vient s'ajouter au couple résistant de la machine, on parle alors de freinage électrique qui peut s'effectuer soit par renvoi d'énergie au réseau d'alimentation, soit par dissipation dans une résistance de freinage.
- Si la décélération désirée est plus lente que la décélération naturelle, le moteur doit développer un couple moteur supérieur au couple résistant de la machine et continuer à entraîner la charge jusqu'à l'arrêt.

### **Inversion du sens de marche**

La majorité des variateurs actuels permettent cette fonction en standard. L'inversion de l'ordre des phases d'alimentation du moteur est réalisée automatiquement soit par inversion de la consigne à l'entrée, soit par un ordre logique sur une borne, soit par une information transmise par une connexion réseau.

### **Freinage d'arrêt**

Ce freinage consiste à arrêter un moteur sans pour autant contrôler la rampe de ralentissement. Pour les démarreurs et variateurs de vitesse pour moteurs asynchrones, ceci est réalisé de manière économique en

injectant du courant continu dans le moteur avec un fonctionnement particulier de l'étage de puissance. Toute l'énergie mécanique est dissipée dans le rotor de la machine et, de ce fait, ce freinage ne peut être qu'intermittent. Sur un variateur pour moteur à courant continu, cette fonction sera assurée en connectant une résistance aux bornes de l'induit.

### **Protections intégrées**

Les variateurs modernes assurent en général la protection thermique des moteurs et leur propre protection. A partir de la mesure du courant et d'une information sur la vitesse (si la ventilation du moteur dépend de sa vitesse de rotation), un microprocesseur calcule l'élévation de température du moteur et fournit un signal d'alarme ou de déclenchement en cas d'échauffement excessif.

Les variateurs, et notamment les convertisseurs de fréquence, sont d'autre part 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,
- la marche en monophasé.

## 2 Les principaux modes de fonctionnement et principaux types de variateurs électroniques

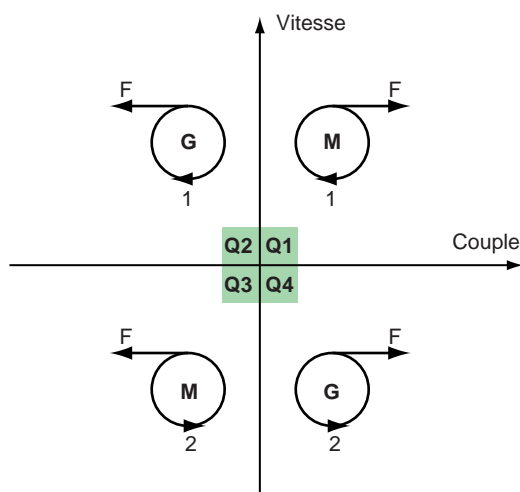
### 2.1 Les principaux modes de fonctionnement

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 l'énergie du moteur fonctionnant en générateur (mode 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.

La **figure 2** illustre les quatre situations possibles dans le diagramme couple-vitesse d'une machine résumées dans le tableau associé.

A noter que lorsque la machine fonctionne en générateur elle doit bénéficier d'une force d'entraînement. Cet état est notamment exploité pour le freinage. L'énergie cinétique alors présente sur l'arbre de la machine est soit transférée au réseau d'alimentation, soit dissipée dans des résistances ou, pour les petites puissances, dans les pertes de la machine.



Sens de rotation	Fonctionnement	Couple -C-	Vitesse -n-	Produit C.n	Quadrant
1 (horaire)	En moteur	oui	oui	oui	1
	En générateur		oui		2
2 (antihoraire)	En moteur			oui	3
	En générateur	oui			4

**Fig. 2** : les quatre situations possibles d'une machine dans son diagramme couple-vitesse.

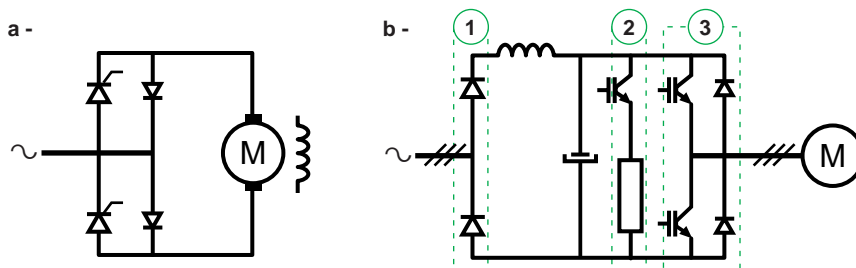
#### Variateur unidirectionnel

Ce type de variateur le plus souvent non réversible est réalisé pour :

- un moteur CC, avec un convertisseur direct (CA => CC) comportant un pont mixte à diodes et thyristors (cf. **fig. 3a** page suivante),

- un moteur AC, avec un convertisseur indirect (avec transformation intermédiaire en CC) comportant en entrée un pont de diodes suivi d'un convertisseur de fréquence qui fait fonctionner la machine dans le quadrant 1 (cf. **fig. 3b** page suivante). Dans certains cas ce montage peut être exploité en bidirectionnel (quadrants 1 et 3).





**Fig. 3** : schémas de principe : [a] convertisseur direct à pont mixte ; [b] convertisseur indirect avec (1) pont de diodes en entrée, (2) dispositif de freinage (résistance et hacheur), (3) convertisseur de fréquence.

Un convertisseur indirect comportant un hacheur de freinage et une résistance correctement dimensionnée convient parfaitement pour un freinage momentané (ralentissement ou sur un engin de levage quand le moteur doit développer un couple de freinage en descente pour retenir la charge).

En cas de fonctionnement prolongé avec une charge entraînante, 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.

#### Fonctionnement à couple constant

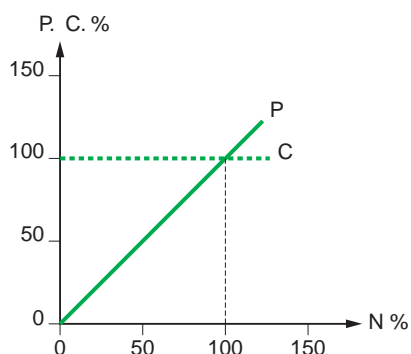
Le fonctionnement est dit à couple constant quand les caractéristiques de la charge sont telles qu'en régime établi, le couple demandé est sensiblement le même quelle que soit la vitesse (cf. fig. 4).

Ce mode de fonctionnement se retrouve sur des machines de type convoyeur ou malaxeur. Pour ce

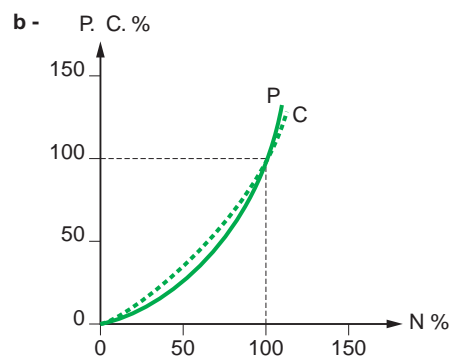
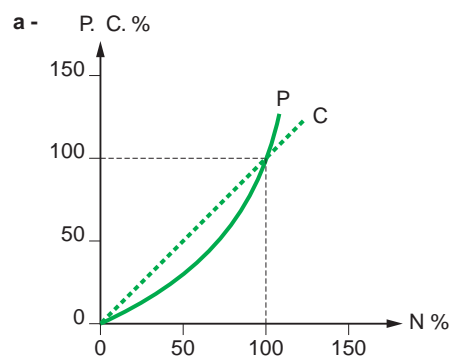
type d'applications le variateur doit avoir la capacité de fournir un couple de démarrage important (1,5 fois ou plus le couple nominal) pour vaincre les frottements statiques et pour accélérer la machine (inertie).

#### Fonctionnement à couple variable

Le fonctionnement est dit à couple variable quand les caractéristiques de la charge sont telles qu'en régime établi, le couple demandé varie avec la vitesse. C'est en particulier le cas des pompes volumétriques à vis d'Archimède dont le couple croît linéairement avec la vitesse (cf. fig. 5a) ou les machines centrifuges (pompes et ventilateurs) dont le couple varie comme le carré de la vitesse (cf. fig. 5b).



**Fig. 4** : courbe de fonctionnement à couple constant.

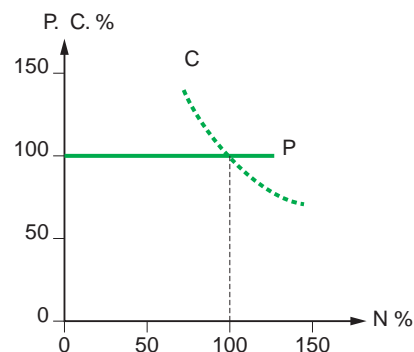


**Fig. 5** : courbes de fonctionnement à couple variable.

Pour un variateur destiné à ce type d'application, un couple de démarrage plus faible (en général 1,2 fois le couple nominal du moteur) est suffisant. Il dispose le plus souvent de fonctions complémentaires comme la possibilité d'occulter des fréquences de résonance correspondant à des vibrations indésirables de la machine. Le fonctionnement au-delà de la fréquence nominale de la machine est impossible en raison de la surcharge qui serait imposée au moteur et au variateur.

#### Fonctionnement à puissance constante

C'est un cas particulier du couple variable. Le fonctionnement est dit à puissance constante quand le moteur fournit un couple inversement proportionnel à la vitesse angulaire (cf. **fig. 6**). C'est le cas, par exemple, pour un enrouleur dont la vitesse angulaire doit diminuer au fur et à mesure que croît le diamètre d'enroulement par accumulation du matériau. C'est également le cas des moteurs de broche des machines outils. La plage de fonctionnement à puissance constante est par nature limitée : en basse



**Fig. 6** : courbe de fonctionnement à puissance constante.

vitesse par le courant fourni par le variateur et en grande vitesse par le couple disponible du moteur. En conséquence, le couple moteur disponible avec les moteurs asynchrones et la capacité de commutation des machines à courant continu doivent être bien vérifiés.

## 2.2 Les principaux types de variateurs

Seuls les variateurs les plus courants et les réalisations technologiques usuelles sont cités dans ce chapitre.

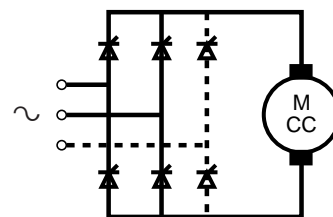
Il existe de nombreux schémas de variateurs de vitesse électronique : cascade hyposynchrone, cycloconvertisseurs, commutateurs de courant, hacheurs... Le lecteur intéressé trouvera une description exhaustive dans les ouvrages « Entraînement électrique à vitesse variable » (auteurs Jean Bonal et Guy Séguier) et « Utilisation industrielle des moteurs à courant alternatif » (auteur Jean Bonal) aux Editions Tec et Doc.

#### Redresseur contrôlé pour moteur à courant continu

Il fournit, à partir d'un réseau alternatif monophasé ou triphasé, un courant continu avec un contrôle de la valeur moyenne de la tension.

Les semi-conducteurs de puissance sont assemblés en pont de Graëtz, monophasé ou triphasé (cf. **fig. 7**). Le pont peut être mixte (diodes / thyristors) ou complet (tout thyristor). Cette dernière solution est la plus fréquente car elle permet un meilleur facteur de forme du courant délivré.

Le moteur à courant continu est le plus souvent à excitation séparée, sauf dans les petites puissances où les moteurs à aimants permanents sont assez fréquents.



**Fig. 7** : schéma d'un redresseur contrôlé pour moteur à courant continu.

L'utilisation de ce type de variateur de vitesse est bien adaptée pour toute application. Les seules limites sont imposées par le moteur à courant continu, en particulier la difficulté d'obtention de vitesses élevées et la nécessité de maintenance (remplacement des balais). Les moteurs à courant continu et leur variateurs associés ont été les premières solutions industrielles. Depuis plus d'une décennie, leur usage est en constante diminution au profit des convertisseurs de fréquence. En effet, le moteur asynchrone est à la fois plus robuste et plus économique qu'un moteur à courant continu. Contrairement aux moteurs à courant continu, standardisés en enveloppe IP55, il est aussi pratiquement insensible à l'environnement (ruissellement, poussières, ambiances dangereuses...).

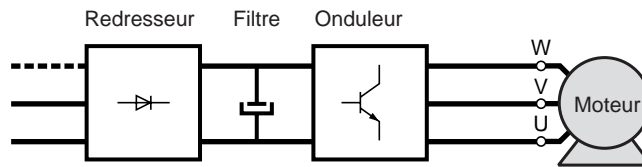
### Convertisseur de fréquence pour moteur asynchrone

Il fournit, à partir d'un réseau alternatif à fréquence fixe, une tension alternative triphasée de valeur efficace et de fréquence variable (cf. **fig. 8**). L'alimentation du variateur pourra être monophasée pour les faibles puissances (ordre de grandeur de quelques kW) et triphasée au-delà. Certains variateurs de petite puissance acceptent indifféremment des tensions d'alimentation mono et triphasées. La tension de sortie du variateur est toujours triphasée. De fait, les moteurs asynchrones monophasés sont mal adaptés à l'alimentation par convertisseur de fréquence. Les convertisseurs de fréquence alimentent des moteurs à cage standard avec tous les avantages liés à ces moteurs : standardisation,

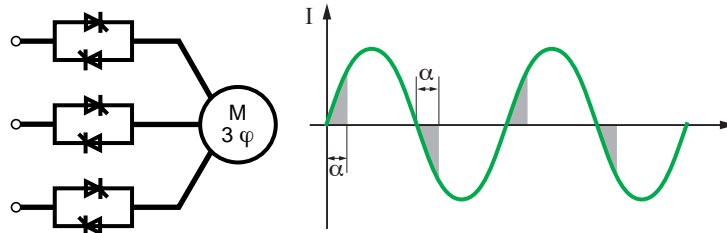
faible coût, robustesse, étanchéité, aucun entretien. Ces moteurs étant auto-ventilés, leur seule limite d'emploi est leur utilisation prolongée à basse vitesse en raison de la réduction de cette ventilation. Si un tel fonctionnement est souhaité, il faut prévoir un moteur spécial équipé d'une ventilation forcée indépendante.

### Gradateur de tension pour le démarrage des moteurs asynchrones

Il fournit, à partir d'un réseau alternatif, un courant alternatif de fréquence fixe égale à celle du réseau avec un contrôle de la valeur efficace de la tension par modification de l'angle de retard  $\alpha$  à l'amorçage des semi-conducteurs de puissance, deux thyristors montés tête-bêche dans chaque phase du moteur (cf. **fig. 9**).



**Fig. 8** : schéma de principe d'un convertisseur de fréquence.



**Fig. 9** : démarreur de moteurs asynchrones et forme du courant d'alimentation.

# 3 Structure et composants des démarreurs et variateurs électroniques

## 3.1 Structure

Les démarreurs et les variateurs de vitesse électroniques sont composés de deux modules généralement regroupés dans une même enveloppe (cf. **fig. 10**) :

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

### 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'automates 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 :

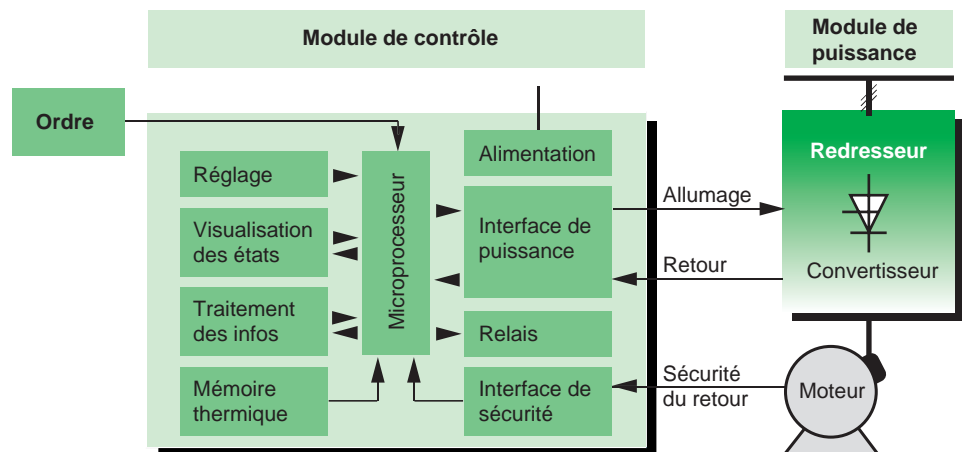
- défaut (réseau, thermique, produit, séquence, surcharge...),
- surveillance (seuil de vitesse, pré alarme, fin de démarrage).

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.

### 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.



**Fig. 10** : structure générale d'un variateur de vitesse électronique.

## 3.2 Composants

Les composants de puissance (cf. **fig. 11**) sont des semi-conducteurs fonctionnant en tout ou rien, donc comparables à des interrupteurs statiques pouvant prendre les deux états : passant ou bloqué.

Ces composants, associés dans un module de puissance, constituent un convertisseur qui alimente, à partir du réseau à tension et fréquence fixes, un moteur électrique sous une tension et / ou une fréquence variable.

Les composants de puissance sont la clef de voûte de la variation de vitesse et les progrès réalisés ces dernières années ont permis la réalisation de variateurs de vitesse économiques.

### Rappel

Les matériaux semi-conducteurs, tels que le silicium, ont une résistivité qui se situe entre celle des conducteurs et celle des isolants. Leurs atomes possèdent 4 électrons périphériques. Chaque atome s'associe avec 4 atomes voisins pour former une structure stable à 8 électrons.

Un semi-conducteur de type P s'obtient en incorporant au silicium pur une faible proportion d'un corps dont les atomes possèdent 3 électrons périphériques. Il manque donc un électron pour former une structure à 8 électrons, ce qui se traduit par un excédent de charges positives.

Un semi-conducteur de type N s'obtient en incorporant un corps dont les atomes ont 5 électrons périphériques. Il y a donc un excédent d'électrons, c'est-à-dire un excédent de charges négatives.

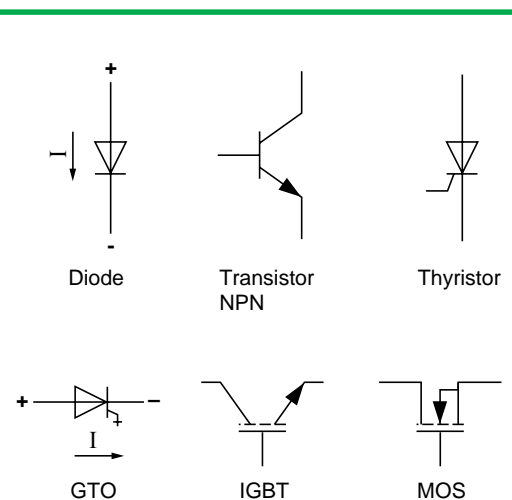
### La diode

La diode est un semi-conducteur non contrôlé comportant deux régions P (anode) et N (cathode) et qui ne laisse passer le courant que dans un seul sens, de l'anode vers la cathode.

Elle conduit quand l'anode est à une tension plus positive que celle de la cathode : elle se comporte alors comme un interrupteur fermé. Elle bloque le courant et se comporte comme un interrupteur ouvert si la tension d'anode devient moins positive que celle de la cathode.

La diode possède les caractéristiques principales suivantes :

- à l'état passant
  - une chute de tension composée d'une tension de seuil et d'une résistance interne,
  - un courant maximum permanent admissible (ordre de grandeur, jusqu'à 5 000 A RMS pour les composants les plus puissants) ;
- à l'état bloqué une tension maximale admissible qui peut dépasser 5 000 V crête.



**Fig. 11** : les composants de puissance.

### Le thyristor

C'est un semi-conducteur contrôlé constitué de quatre couches alternées : P-N-P-N.

Il se comporte comme une diode par l'envoi d'une impulsion électrique sur une électrode de commande appelée gâchette ou « gate ». Cette fermeture (ou allumage) n'est possible que si l'anode est à une tension plus positive que la cathode.

Le thyristor se bloque quand le courant qui le traverse s'annule.

L'énergie d'allumage à fournir sur la « gate » n'est pas liée au courant à commuter. Et il n'est pas nécessaire de maintenir un courant dans la gâchette pendant la conduction du thyristor.

Le thyristor possède les caractéristiques principales suivantes :

- à l'état passant
  - une chute de tension composée d'une tension de seuil et d'une résistance interne,
  - un courant maximum permanent admissible (ordre de grandeur, jusqu'à 5 000 A RMS pour les composants les plus puissants).
- à l'état bloqué
  - une tension inverse et directe maximale admissible, (pouvant dépasser 5 000 V crête). En général les tensions directes et inverses sont identiques.
  - un temps de recouvrement qui est le temps minimal pendant lequel une tension anode cathode positive ne peut être appliquée au composant sous peine de le voir se réamorcer spontanément.
  - un courant de gâchette permettant l'allumage du composant.

Il existe des thyristors destinés à fonctionner à la fréquence du réseau, d'autres dits « rapides » pouvant fonctionner à quelques kilohertz, en disposant d'un circuit d'extinction.

Les thyristors rapides ont parfois des tensions de blocage directe et inverse dissymétriques. En effet dans les schémas usuels, ils sont souvent associés à une diode connectée en antiparallèle et les fabricants de semi-conducteurs utilisent cette particularité pour augmenter la tension directe que le composant peut supporter à l'état bloqué. Ces composants sont maintenant complètement supplantés par le GTO, les transistors de puissance et surtout les IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor).

### **Le thyristor GTO (Gate Turn Off thyristor)**

C'est une variante du thyristor rapide qui présente la particularité de pouvoir être bloqué par sa gâchette. Un courant positif envoyé dans la gâchette ou « gate » entraîne la mise en conduction du semi-conducteur à condition que l'anode soit à une tension plus positive que la cathode. Pour maintenir le GTO conducteur et limiter la chute de tension, le courant de gâchette doit être maintenu. Le blocage s'effectue en inversant la polarité du courant de gâchette. Le GTO est utilisé sur les convertisseurs de très forte puissance, car il est capable de maîtriser les fortes tensions et intensités (jusqu'à 5 000 V et 5 000 A). Cependant, en raison des progrès des IGBT, leur part de marché tend à s'amenuiser.

Le thyristor GTO possède les caractéristiques principales suivantes :

- à l'état passant
- une chute de tension composée d'une tension de seuil et d'une résistance interne,
- un courant de maintien destiné à réduire la chute de tension directe,
- un courant maximum permanent admissible,
- un courant de blocage pour provoquer l'interruption du courant ;
- à l'état bloqué
- des tensions inverse et directe maximales admissibles, souvent dissymétriques comme avec les thyristors rapides et pour les mêmes raisons,
- un temps de recouvrement qui est le temps minimal pendant lequel le courant d'extinction doit être maintenu sous peine de le voir se réamorcer spontanément,
- un courant de gâchette permettant l'allumage du composant.

Les GTO peuvent fonctionner à des fréquences de quelques kilohertz.

### **Le transistor**

C'est un semi-conducteur bipolaire contrôlé constitué de trois régions alternées P-N-P ou N-P-N. Il ne laisse passer le courant que dans un seul sens : de l'émetteur vers le collecteur en technologie P-N-P, du collecteur vers l'émetteur en technologie N-P-N.

Les transistors de puissance capable de fonctionner sous des tensions industrielles sont du type N-P-N, souvent montés en « Darlington ».

Le transistor peut fonctionner en amplificateur. La valeur du courant qui le traverse est alors fonction du courant de commande circulant dans sa base. Mais il peut également fonctionner en tout ou rien comme interrupteur statique : ouvert en l'absence de courant de base, fermé en saturation. C'est ce deuxième mode de fonctionnement qui est utilisé dans les circuits de puissance des variateurs.

Les transistors bipolaires couvrent des tensions jusqu'à 1 200 V et acceptent des courants pouvant atteindre 800 A.

Ce composant est aujourd'hui remplacé dans les convertisseurs par l'IGBT.

Dans le fonctionnement qui nous intéresse le transistor bipolaire possède les caractéristiques principales suivantes :

- à l'état passant
- une chute de tension composée d'une tension de seuil et d'une résistance interne,
- un courant maximum permanent admissible,
- un gain en courant (pour maintenir le transistor saturé, le courant injecté dans la base doit être supérieur au courant qui circule dans le composant, divisé par le gain),
- à l'état bloqué, une tension directe maximale admissible.

Les transistors de puissance utilisés en variation de vitesse peuvent fonctionner à des fréquences de quelques kilohertz.

### **L'IGBT**

C'est un transistor de puissance commandé par une tension appliquée à une électrode appelée grille ou « gate » isolée du circuit de puissance, d'où son nom « Insulated Gate Bipolar Transistor ». Ce composant nécessite des énergies infimes pour faire circuler des courants importants.

C'est aujourd'hui le composant utilisé en interrupteur tout ou rien dans la majorité des convertisseurs de fréquence jusqu'à des puissances élevées (de l'ordre du MW). Ses caractéristiques tension courant sont similaires à celles des transistors bipolaires, mais ses performances en énergie de commande et fréquence de découpage sont très nettement supérieures à tous les autres semi-conducteurs. Les caractéristiques des IGBT progressent très rapidement et des composants haute tension (> 3 kV) et forts courants (plusieurs centaines d'ampères) sont actuellement disponibles.

Le transistor IGBT possède les caractéristiques principales suivantes :

- une tension de commande permettant la mise en conduction et le blocage du composant ;
- à l'état passant
- une chute de tension composée d'une tension de seuil et d'une résistance interne,
- un courant maximum permanent admissible ;
- à l'état bloqué, une tension directe maximale admissible ;



- Les transistors IGBT utilisés en variation de vitesse peuvent fonctionner à des fréquences de quelques dizaines de kilohertz.

### Le transistor MOS

Ce composant fonctionne de manière toute différente des précédents, par modification du champ électrique dans un semi-conducteur obtenue en polarisant une grille isolée, d'où l'appellation : « Métal Oxyde Semi-conducteur ». Son usage en variation de vitesse est limité aux utilisations en basse tension (variateurs de vitesse alimentés par batterie) ou de faible puissance car la surface de silicium nécessaire à l'obtention d'une tension de blocage élevée avec une faible chute de tension à l'état passant est économiquement irréalisable.

Le transistor MOS possède les caractéristiques principales suivantes :

- une tension de commande permettant la mise en conduction et le blocage du composant ;
- à l'état passant
  - une résistance interne,
  - un courant maximum permanent admissible ;
- à l'état bloqué, une tension directe maximale admissible (pouvant dépasser 1000 V).

Les transistors MOS utilisés en variation de vitesse peuvent fonctionner à des fréquences de quelques centaines de kilohertz. On les trouve de manière quasi universelle dans les étages d'alimentation à découpage sous la forme de composants discrets ou d'un circuit intégré comportant la puissance (MOS), les circuits de commande et régulation.

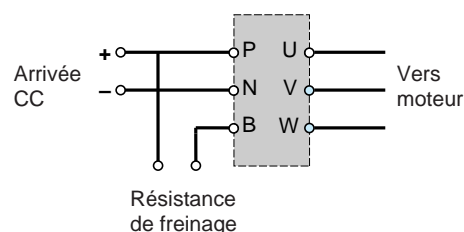
### L'IPM (Intelligent Power Module)

Ce n'est pas à proprement parler un semi-conducteur mais un assemblage de transistors IGBT. Ce module (cf. **fig. 12**) regroupe un pont onduleur à transistors de puissance IGBT et l'électronique bas niveau pour la commande des semi-conducteurs, soit dans un même boîtier compact :

- 7 composants IGBT, dont six pour le pont onduleur et un pour le freinage,
- les circuits de commande des IGBT,
- 7 diodes de puissance de roue libre associées aux IGBT pour permettre la circulation du courant,
- des protections contre les courts-circuits, les surintensités et les dépassements de température,
- l'isolation galvanique de ce module.

Le pont redresseur à diodes est le plus souvent intégré à ce même module.

Cet assemblage permet de maîtriser au mieux les contraintes de câblage et de commande des IGBT.



**Fig. 12 :** module IPM (Intelligent Power Module).

## 4 Variateur-régulateur pour moteur courant continu

### 4.1 Principe général

L'ancêtre des variateurs de vitesse pour moteur à courant continu est le groupe Ward Leonard.

Ce groupe, constitué d'un moteur d'entraînement, généralement asynchrone, et d'une génératrice à courant continu à excitation variable, alimente un ou des moteurs à courant continu. L'excitation est réglée par un dispositif électromécanique (Amplidyne, Rototrol, Regulex), ou par un système statique (amplificateur magnétique ou régulateur électronique). Ce dispositif est aujourd'hui totalement abandonné au profit des variateurs de vitesse à semi-conducteurs qui réalisent de manière statique les mêmes opérations avec des performances supérieures.

Les variateurs de vitesse électronique sont alimentés sous une tension fixe à partir du réseau alternatif et fournissent au moteur une tension continue variable. Un pont de diodes ou un pont à thyristors, en général monophasé, permet l'alimentation du circuit d'excitation.

Le circuit de puissance est un redresseur. La tension à délivrer devant être variable, ce redresseur doit être du type contrôlé, c'est-à-dire comporter des composants de puissance dont la conduction peut être commandée (thyristors). La variation de la tension de sortie est obtenue en limitant plus ou moins le temps de conduction pendant chaque demi-période. Plus l'amorçage du thyristor est retardé par rapport au zéro de la demi-période, plus la valeur moyenne de la tension est réduite et, de ce fait, la vitesse du moteur plus faible (rappelons que l'extinction d'un thyristor intervient automatiquement quand le courant passe par zéro).

Pour des variateurs de faible puissance, ou des variateurs alimentés par une batterie d'accumulateurs, le circuit de puissance, parfois constitué de transistors de puissance (hacheur), fait varier la tension continue de sortie en ajustant le temps de conduction. Ce mode de fonctionnement est dénommé MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion).

#### Régulation

La régulation consiste à maintenir avec précision la vitesse à la valeur imposée en dépit des perturbations (variation du couple résistant, de la tension d'alimentation, de la température).

Toutefois, lors des accélérations ou en cas de surcharge, l'intensité du courant ne doit pas atteindre une valeur dangereuse pour le moteur ou le dispositif d'alimentation. Une boucle de régulation interne au variateur maintient le courant à une valeur acceptable. Cette limite est accessible pour permettre l'ajustement en fonction des caractéristiques du moteur.

La vitesse de consigne est fixée par un signal, analogique ou numérique transmis par l'intermédiaire d'un bus de terrain ou par tout autre dispositif qui délivre une tension image de cette vitesse désirée. La référence peut être fixe ou varier au cours du cycle.

Des rampes d'accélération et de décélération réglables appliquent de façon progressive la tension de référence correspondant à la vitesse désirée, l'évolution de cette rampe peut suivre toutes les formes désirées. Le réglage des rampes définit la durée de l'accélération et du ralentissement.

En boucle fermée, la vitesse réelle est mesurée en permanence par une dynamo tachymétrique ou un générateur d'impulsions et comparée à la référence. Si un écart est constaté, l'électronique de contrôle réalise une correction de la vitesse. La gamme de vitesse s'étend de quelques tours par minute jusqu'à la vitesse maximale. Dans cette plage de variation, on obtient aisément des précisions meilleures que 1 % en régulation analogique et mieux que 1 / 1000 en régulation numérique, en cumulant toutes les variations possibles (vide / charge, variation de tension, de température etc.)

Cette régulation peut également être effectuée à partir de la mesure de la tension du moteur en tenant compte du courant qui le traverse. Les performances sont dans ce cas sensiblement inférieures, à la fois en gamme de vitesse et en précision (quelques % entre marche à vide et marche en charge)

#### Inversion du sens de marche et freinage par récupération

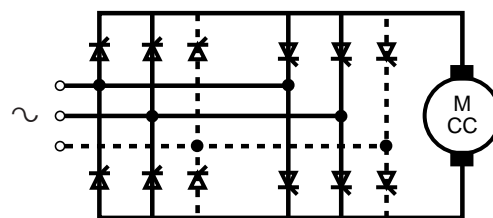
Pour inverser le sens de marche, il faut inverser la tension d'induit. Ce peut être réalisé à l'aide de contacteurs (cette solution est maintenant obsolète) ou en statique par inversion de la polarité de sortie du variateur de vitesse ou de la polarité du courant d'excitation.



Cette dernière solution est peu usitée en raison de la constante de temps de l'inducteur.

Lorsqu'un freinage contrôlé est désiré ou que la nature de la charge l'impose (couple entraînant), il faut renvoyer l'énergie au réseau. Pendant le freinage, le variateur fonctionne en onduleur, en d'autres termes la puissance qui transite est négative.

Les variateurs capables d'effectuer ces deux fonctionnements (inversion et freinage par récupération d'énergie) sont dotés de deux ponts connectés en antiparallèle (cf. **fig. 13**). Chacun de ces ponts permet d'inverser la tension et le courant ainsi que le signe de l'énergie qui circule entre le réseau et la charge.



**Fig. 13** : schéma d'un variateur avec inversion de marche et freinage par récupération d'énergie pour un moteur à courant continu.

## 4.2 Modes de fonctionnement possibles

### Fonctionnement dit à « couple constant »

À excitation constante, la vitesse du moteur est fonction de la tension appliquée à l'induit du moteur. La variation de vitesse est possible depuis l'arrêt jusqu'à la tension nominale du moteur qui est choisie en fonction de la tension alternative d'alimentation.

Le couple moteur est proportionnel au courant d'induit et le couple nominal de la machine peut être obtenu de manière continue à toutes les vitesses.

### Fonctionnement dit à « puissance constante »

Lorsque la machine est alimentée sous sa tension nominale, il est encore possible d'augmenter sa vitesse en réduisant le courant d'excitation. Le variateur de vitesse doit dans ce cas comporter un pont redresseur contrôlé alimentant le circuit d'excitation. La tension d'induit reste alors fixe et égale à la tension nominale et le courant d'excitation est ajusté pour obtenir la vitesse souhaitée.

La puissance a pour expression

$$P = E \cdot I$$

avec

E sa tension d'alimentation,

I le courant d'induit.

La puissance, pour un courant d'induit donné, est donc constante sur toute la gamme de vitesse, mais la vitesse maximale est limitée par deux paramètres :

- la limite mécanique liée à l'induit et en particulier la force centrifuge maximale pouvant être supportée par le collecteur,
- les possibilités de commutation de la machine, en général plus restrictives.

Le fabricant du moteur doit donc être sollicité pour bien choisir un moteur, en particulier en fonction de la gamme de vitesse à puissance constante.

## 5 Convertisseur de fréquence pour moteur asynchrone

### 5.1 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.

#### Constitution

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 (cf. fig. 8).

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 Telemecanique, permet de créer un mini-réseau électrique à tension et fréquence variables capable d'alimenter un moteur unique ou plusieurs moteurs en parallèle. Il comporte :

- 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.

#### La variation de vitesse

La génération de la tension de sortie est obtenue par découpage de la tension redressée au moyen d'impulsions dont la durée, donc la largeur, est modulée de telle manière que le courant alternatif résultant soit aussi sinusoïdal que possible (cf. fig. 14).

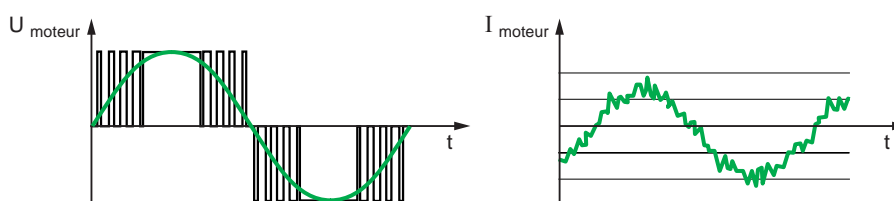


Fig. 14 : la modulation de largeur d'impulsions.

Cette technique connue sous le nom de MLI (Modulation de Largeur d'Impulsions ou PWM en anglais) conditionne la rotation régulière à basse vitesse et limite les échauffements. La fréquence de modulation retenue est un compromis : elle doit être suffisamment élevée pour réduire l'ondulation de courant et le bruit acoustique dans le moteur sans augmenter notablement les pertes dans le pont onduleur et dans les semi-conducteurs. Deux rampes règlent l'accélération et le ralentissement.

### Les protections intégrées

Le variateur s'auto-protège et protège le moteur contre les échauffements excessifs, en se verrouillant jusqu'au retour à une température acceptable.

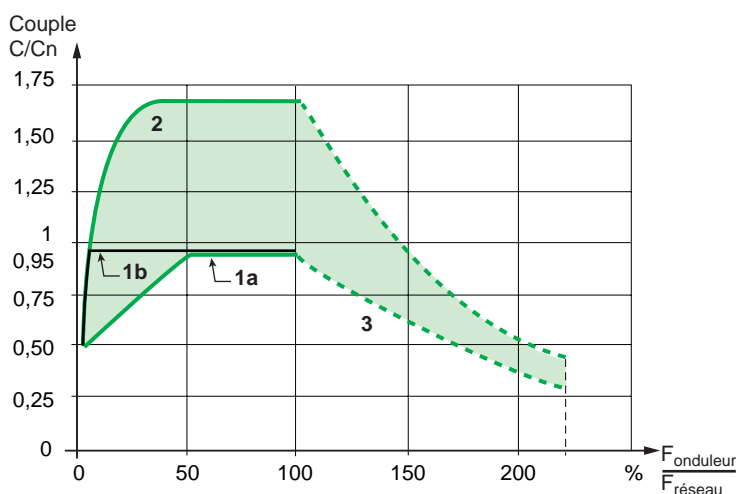
Il en est de même pour toute perturbation ou anomalie pouvant altérer le fonctionnement de l'ensemble, comme les surtensions ou sous tension, la disparition d'une phase d'entrée ou de sortie.

Dans certains calibres le redresseur, l'onduleur, le hacheur, la commande et les protections contre les courts-circuits sont intégrés dans un unique module IPM - Intelligent Power Module -.

## 5.2 Fonctionnement en U/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 (cf. [fig. 15](#)). 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.



**Fig. 15** : caractéristiques de couple d'un variateur (Altivar 66 – Telemecanique).  
 1 – couple utile permanent moteur auto-ventilé (a) et moteur moto-ventilé (b),  
 2 – surcouple transitoire (< 1,7 Cn pendant 60 s),  
 3 – couple en survitesse à puissance constante.

### 5.3 Commande vectorielle

Les performances sont grandement augmentées par une électronique de commande faisant appel au contrôle vectoriel de flux - CVF - (cf. **fig. 16**). 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, le metteur au point 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.

A partir de ces valeurs, le variateur calcule les caractéristiques du rotor :  $L_m$ ,  $T_r$ . ( $L_m$  : inductance magnétisante,  $T_r$  : moment du couple).

#### Variateur avec contrôle vectoriel de flux sans capteur

A la mise sous tension, un variateur avec contrôle vectoriel de flux sans capteur (type ATV58F – Telemecanique) 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 moteur (1 à 10 s). Ces valeurs sont mémorisées et permettent au produit d'élaborer les lois de commande.

L'oscillogramme de la **figure 17** page suivante 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.

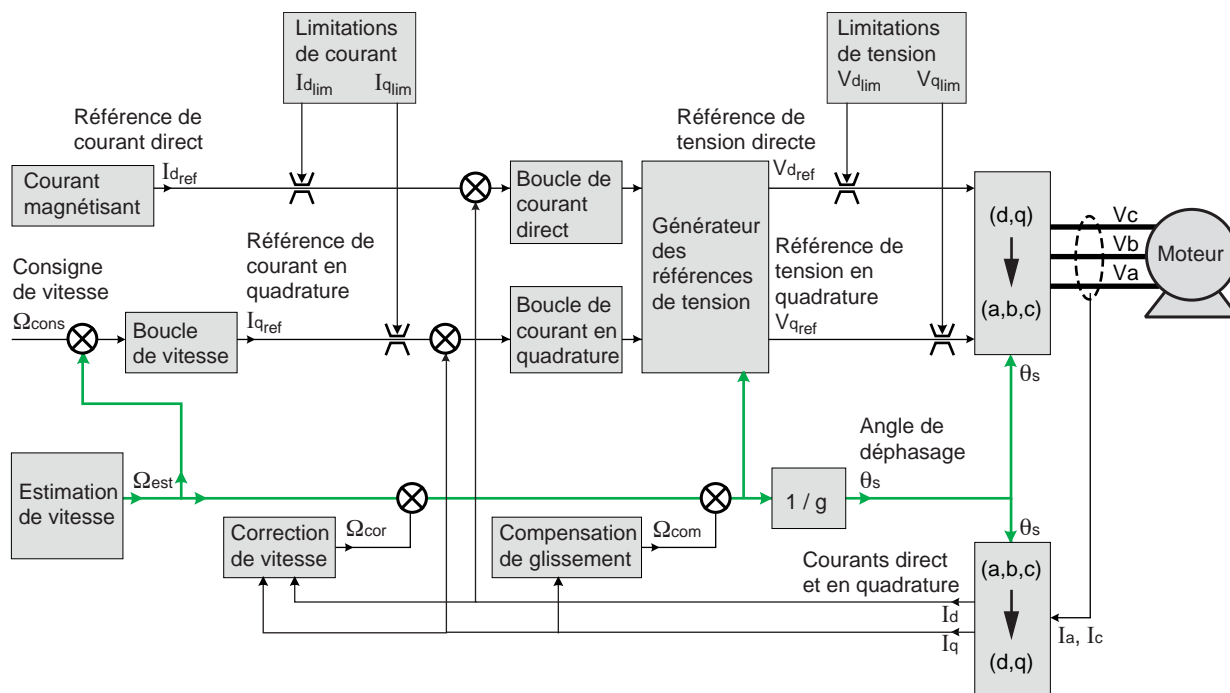
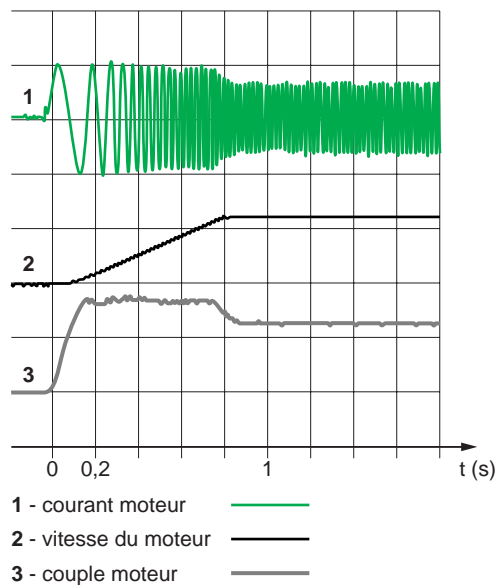


Fig. 16 : schéma de principe d'un variateur à contrôle vectoriel de flux.



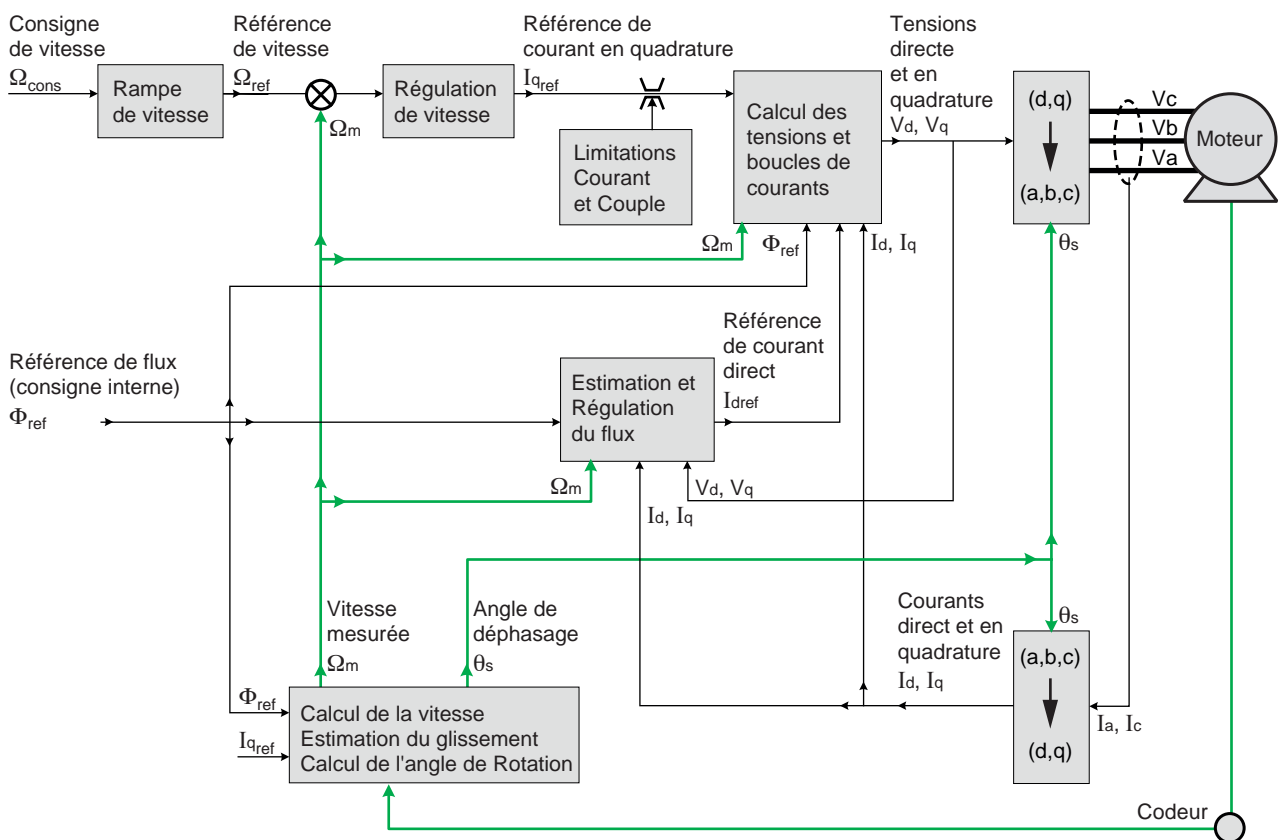
**Fig. 17 :** caractéristiques d'un moteur à sa mise sous tension par un variateur avec contrôle vectoriel de flux sans capteur (type ATV58F - Telemecanique).

Cette solution (cf. **fig. 18**) apporte la réponse aux applications exigeantes : forte dynamique lors des transitoires, précision de vitesse, couple nominal à l'arrêt.

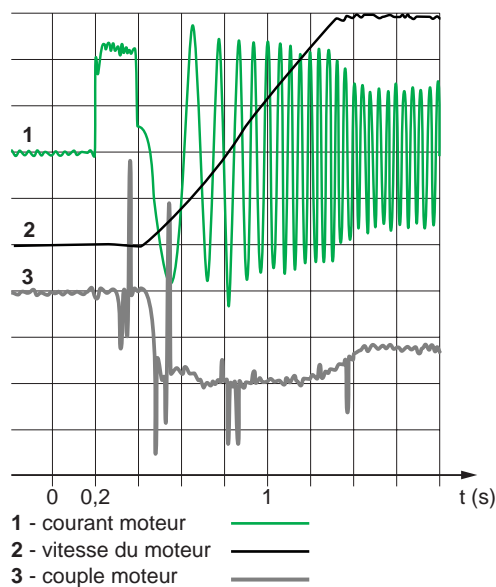
Le couple maximal transitoire est égal à 2 ou 3 fois le couple nominal suivant le type de moteur. De plus, la vitesse maximale atteint souvent le double de la vitesse nominale, ou davantage si le moteur le permet mécaniquement.

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 contrepartie, 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.

L'oscillogramme représenté dans la **figure 19** page suivante représente la mise en vitesse d'un moteur, chargé à son couple nominal alimenté par un variateur avec contrôle vectoriel de flux avec capteur. L'échelle des temps est de 0,1 s par division. Par rapport au même produit sans capteur l'augmentation des performances est sensible. Le couple nominal s'établit en 80 ms et le temps de montée en vitesse, dans les mêmes conditions de charge est de 0,5 seconde.



**Fig. 18 :** schéma de principe d'un variateur avec contrôle vectoriel de flux avec capteur.



**Fig. 19** : oscillogramme de la mise en vitesse d'un moteur, chargé à son couple nominal alimenté par un variateur avec contrôle vectoriel de flux (type ATV58F - Telemecanique).

En conclusion, le tableau de la **figure 20** compare les performances respectives d'un variateur dans les trois configurations possibles.

### 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.

■ 1<sup>er</sup> cas : 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.

■ 2<sup>e</sup> cas : 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.

	Contrôle scalaire	Avec contrôle vectoriel de flux	
		sans capteur	avec capteur
Gamme de vitesse	1 à 10	1 à 100	1 à 1000
Bande passante	5 à 10 Hz	10 à 15 Hz	30 à 50 Hz
Précision de vitesse	± 1 %	± 1 %	± 0,01 %

**Fig. 20** : performances respectives d'un variateur dans les trois configurations possibles (type ATV58F - Telemecanique).



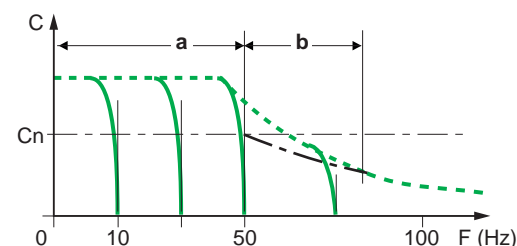
## Les modes de fonctionnement possibles

### ■ 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 (cf. **fig. 21**). 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 (cf. **fig. 21**). Au-dessus de sa vitesse



**Fig. 21** : couple d'un moteur asynchrone à charge constante alimenté par un convertisseur de fréquence [a] – zone de fonctionnement à couple constant, [b] – zone de fonctionnement à puissance constante.

nominale, le moteur fonctionne non plus à couple constant mais à puissance constante ( $P = Cw$ ), tant que la caractéristique naturelle du moteur l'autorise.

La vitesse maximale est limitée par deux paramètres :

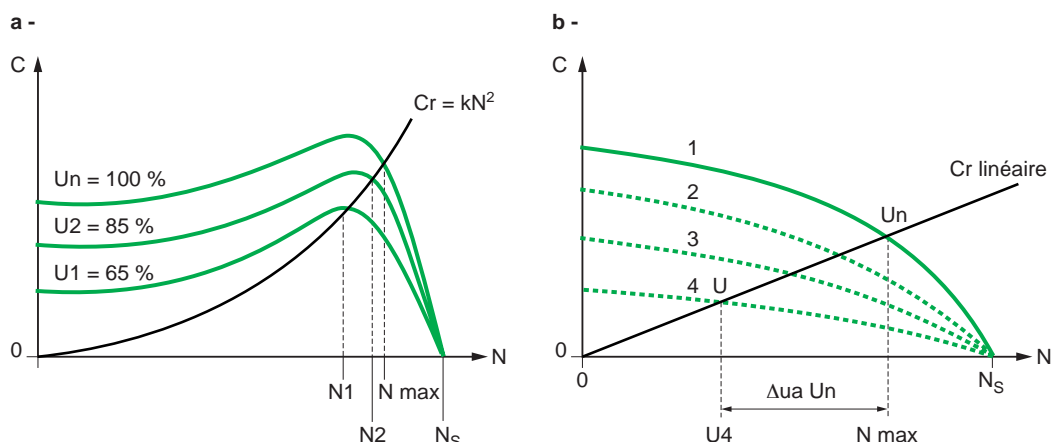
- la limite mécanique liée au rotor,
- la réserve de couple disponible.

Pour une machine asynchrone alimentée à tension constante, le couple maximum variant comme le carré de la vitesse, le fonctionnement à « puissance constante » n'est possible que dans une plage limitée de vitesse déterminée par la caractéristique de couple propre à la machine.

## 5.4 Gradateur de tension pour moteur asynchrone

Ce dispositif de variation de tension, exploitable pour l'éclairage et le chauffage, n'est utilisable qu'avec des moteurs asynchrones à cage résistante ou à bagues (cf. **fig. 22**). Ces moteurs asynchrones sont dans la majorité des cas triphasés, occasionnellement monophasés pour les petites puissances (jusqu'à 3 kW environ).

Souvent utilisé comme démarreur ralentisseur progressif, dans la mesure où un couple de démarrage élevé n'est pas nécessaire, un gradateur permet de limiter l'appel de courant, la chute de tension qui en découle et les chocs mécaniques dus à l'apparition brutale du couple.



**Fig. 22** : couple disponible d'un moteur asynchrone alimenté à tension variable et dont le récepteur présente un couple résistant parabolique (ventilateur) [a] - moteur à cage d'écurieuil, [b] - moteur à cage résistante.

Parmi les applications les plus courantes citons le démarrage des pompes centrifuges et des ventilateurs, des convoyeurs à bande, des escaliers roulants, des portiques de lavage d'automobiles, des machines équipées de courroies... et en variation de vitesse sur les moteurs de très faible puissance ou sur les moteurs universels, comme dans l'outillage électroportatif. Mais pour certaines applications, telle la variation de vitesse des petits ventilateurs, les gradateurs ont quasiment disparu au profit des convertisseurs de fréquence plus économiques en phase d'exploitation.

Dans le cas des pompes, la fonction ralentisseur permet également d'éliminer les coups de bélier.

Mais le choix de ce dispositif de variation de vitesse nécessite quelques précautions. En effet quand un moteur glisse, ses pertes sont proportionnelles au couple résistant et inversement proportionnelles à la vitesse ; or le principe de fonctionnement d'un gradateur consiste à réduire le couple moteur en réduisant la tension afin d'équilibrer le couple résistant à la vitesse désirée. Le moteur à cage résistante (cf. fig. 22b) doit donc être capable, à petite vitesse, de dissiper ses pertes (les petits moteurs jusqu'à 3 kW répondent généralement à ces conditions). Au-delà, il faut en général utiliser un moteur moto-ventilé. Pour les moteurs à bague les résistances associées doivent être dimensionnées conformément aux cycles de fonctionnement. La décision est du ressort du spécialiste qui sélectionnera le moteur en fonction des cycles de fonctionnement.

Trois types de démarreurs se trouvent sur le marché : soit à une phase contrôlée dans les petites puissances, soit à deux phases contrôlées (la troisième étant une connexion directe), soit avec toutes les phases contrôlées. Les deux premiers systèmes ne sont à utiliser que pour des cycles de fonctionnement peu sévères en raison du taux d'harmoniques supérieur.

### Principe général

Le circuit de puissance comporte, par phase, 2 thyristors montés tête-bêche (cf. fig. 9). La variation de tension est obtenue en faisant varier le temps de conduction de ces thyristors au cours de chaque demi-période. Plus l'instant de l'amorçage est retardé, plus la valeur de la tension résultante est faible.

L'amorçage des thyristors est géré par un microprocesseur qui assure également les fonctions suivantes :

- contrôle des rampes de montée en tension et de diminution de tension réglables ; la rampe de décélération ne pourra être suivie que si le temps de décélération naturel du système entraîné est plus long ;
- limitation de courant réglable ;
- sur couple au démarrage ;

- commande de freinage par injection de courant continu ;
- protection du variateur contre les surcharges ;
- protection du moteur contre les échauffements dus aux surcharges ou aux démarrages trop fréquents ;
- détection de déséquilibre ou d'absence de phases, de défauts thyristors.

Un tableau de bord qui affiche différents paramètres de fonctionnement apporte une aide à la mise en service, à l'exploitation et à la maintenance.

Certains gradateurs, tels l'Altistart (Telemecanique) peuvent commander le démarrage et le ralentissement :

- d'un seul moteur,
- de plusieurs moteurs simultanément, dans la limite de son calibre,
- de plusieurs moteurs successivement par commutation. En régime établi, chaque moteur est alimenté directement par le réseau à travers un contacteur.

Seul l'Altistart dispose d'un dispositif breveté permettant une estimation du couple moteur ce qui permet d'effectuer des accélérations et décélérations linéaires et, si nécessaire, de limiter le couple moteur.

### Inversion du sens de marche et freinage

L'inversion du sens de marche s'effectue par inversion des phases d'entrée du démarreur. Le freinage se fait alors à contre courant et toute l'énergie est dissipée dans le rotor de la machine. Le fonctionnement est donc par nature intermittent.

### Freinage de ralentissement par injection de courant continu

Un freinage économique peut être facilement réalisé en faisant fonctionner l'étage de sortie du démarreur en redresseur qui injecte ainsi un courant continu dans les enroulements. Le couple de freinage n'est pas contrôlé et le freinage est assez peu efficace, surtout à grande vitesse. 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 également occasionnel.



## 5.5 Moto-variateurs synchrones

### Principe général

Les moto-variateurs synchrones (cf. **fig. 23**) sont une association d'un convertisseur de fréquence et d'un moteur synchrone à aimants permanents équipé d'un capteur.

Ces moto-variateurs sont destinés à des marchés spécifiques, comme les robots ou les machines-outils, pour lesquels sont exigés un faible volume des moteurs, des accélérations rapides et une bande passante étendue.

### Le moteur

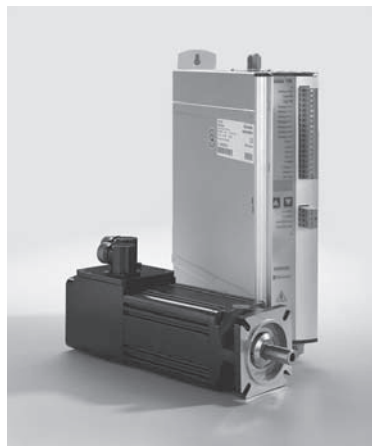
Le rotor du moteur est équipé d'aimants permanents en terre rare pour obtenir un champ élevé dans un volume réduit. Le stator comporte les enroulements triphasés. Ces moteurs peuvent accepter des courants de surcharge importants pour réaliser des accélérations très rapides. Un capteur équipe ces moteurs pour indiquer au variateur la position angulaire des pôles du moteur afin d'assurer la commutation des enroulements.

### Le variateur

Dans sa constitution, le variateur est similaire à un convertisseur de fréquence : il fonctionne de façon analogue.

Il est aussi constitué d'un redresseur et d'un onduleur à transistors à modulation de largeur d'impulsions (MLI) qui restitue un courant de sortie de forme sinusoïdale.

Il est fréquent de trouver plusieurs variateurs de ce type alimentés par une même source de courant continu. Ainsi, sur une machine-outil, chaque variateur commande un des moteurs



**Fig. 23** : photographie d'un moto-variateur synchrone (Variateur Lexium + moteur, Schneider Electric).

associés aux axes de la machine. Une source commune à courant continu alimente en parallèle cet ensemble de variateurs.

Ce type d'installation permet de mettre à disposition de l'ensemble, l'énergie qui proviendrait du freinage de l'un des axes.

Comme dans les convertisseurs de fréquence, une résistance de freinage associée à un hacheur permet d'évacuer l'énergie de freinage en excès.

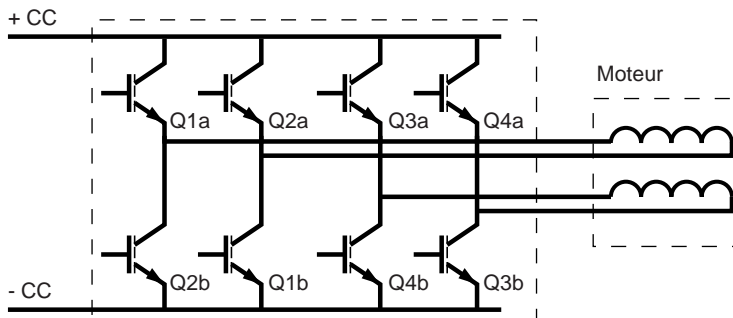
Les fonctions d'asservissement de l'électronique, les faibles constantes de temps mécaniques et électriques, autorisent des accélérations et plus généralement des bandes passantes très élevées, avec en même temps une très grande dynamique de vitesse.

## 5.6 Moto-variateurs pas-à-pas

### Principe général

Les moto-variateurs pas-à-pas sont des associations d'une électronique de puissance, similaire dans sa conception à celle d'un

convertisseur de fréquence, et d'un moteur pas à pas (cf. **fig. 24**). Ils fonctionnent en boucle ouverte (sans capteur) et sont destinés à des applications de positionnement.



**Fig. 24** : schéma de principe d'un variateur pour moteur bipolaire pas à pas.

### Le moteur

Le moteur peut être à réluctance variable, à aimants permanents ou présenter une combinaison des deux (Voir Cahier Technique n° 207 « Introduction aux moteurs électriques »).

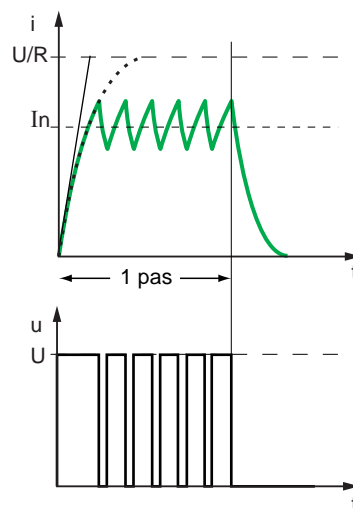
### Le variateur

Dans sa constitution, le variateur est analogue à un convertisseur de fréquence (redresseur, filtrage et pont constitué de semi-conducteurs de puissance).

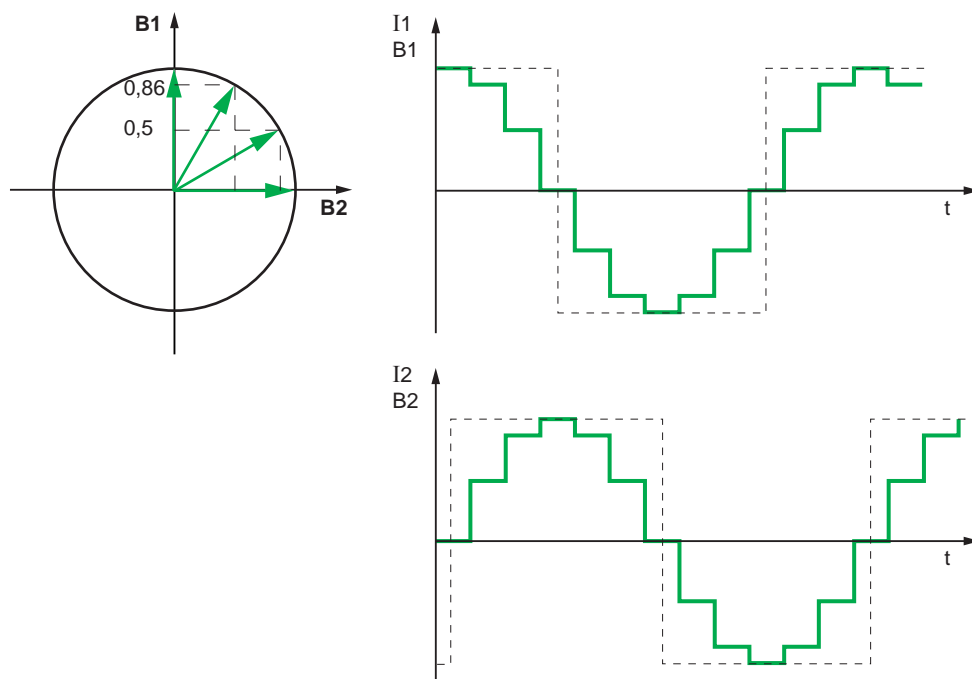
Cependant son fonctionnement est fondamentalement différent dans la mesure où il a pour objectif d'injecter un courant constant dans les enroulements. Parfois il fait appel à la modulation de largeur d'impulsions (MLI) pour obtenir de meilleures performances, en particulier le temps de montée du courant (cf. **fig. 25**), ce qui permet d'étendre la plage de fonctionnement.

Le fonctionnement (cf. **fig. 26**) en micropas permet de multiplier artificiellement le nombre de positions possibles du rotor en générant des échelons successifs dans les bobines durant chaque séquence. Les courants dans les deux bobines ressemblent alors à deux courants alternatifs décalés de  $90^\circ$ . Le champ résultant est la composition vectorielle des champs créés

par les 2 bobines. Le rotor prend ainsi toutes les positions intermédiaires possibles. Le schéma représente les courants d'alimentation des bobines B1 et B2 ; les positions du rotor sont représentées par le vecteur.



**Fig. 25** : allure du courant résultant d'une commande à MLI.



**Fig. 26** : diagramme, courbes d'intensité et principe d'échelons pour une commande en micropas d'un moto-variateur pas-à-pas.

## 6 Les fonctions complémentaires des variateurs de vitesse

### 6.1 Les possibilités de dialogue

Pour pouvoir assurer un fonctionnement correct du moteur, les variateurs intègrent un certain nombre de capteurs pour surveiller la tension, les courants « moteur » et son état thermique. Ces informations, indispensables pour le variateur, peuvent être utiles pour l'exploitation.

Les variateurs et démarreurs récents intègrent des fonctions de dialogue en tirant profit des bus de terrain. Il est ainsi possible de générer des informations qui sont utilisées par un automate et un superviseur pour la conduite de la machine. De la même façon les informations de contrôle proviennent de l'automate par le même canal.

Parmi les informations qui transitent citons :

- les consignes de vitesse,
- les ordres de marche ou d'arrêt,
- les réglages initiaux du variateur ou les modifications de ces réglages en opération,
- l'état du variateur (marche, arrêt, surcharge, défaut),
- les alarmes,
- l'état du moteur (vitesse, couple, courant, température).

Ces possibilités de dialogue sont également utilisées en liaison avec un PC pour pouvoir simplifier les réglages à la mise en route (téléchargement) ou archiver les réglages initiaux.

### 6.2 Les fonctions intégrées

Pour couvrir efficacement bon nombre d'applications, les variateurs disposent d'un nombre important d'ajustages et de réglages comme :

- les temps des rampes d'accélération et décélération,
- la forme des rampes (linéaires, en S ou en U),
- les commutations de rampes permettant d'obtenir deux rampes d'accélération ou de décélération pour permettre par exemple un accostage en douceur,
- la réduction du couple maximum commandée par une entrée logique ou par une consigne,
- la marche pas à pas,
- la gestion de la commande d'un frein pour les applications de levage,
- le choix de vitesses présélectionnées,
- la présence d'entrées sommatriques permettant d'ajouter des consignes de vitesse,
- la commutation des références présentes à l'entrée du variateur,
- la présence d'un régulateur PI pour les asservissements simples (vitesse ou débit par exemple),
- l'arrêt automatique suite à une coupure réseau permettant le freinage du moteur,
- le rattrapage automatique avec recherche de la vitesse du moteur pour une reprise à la volée,
- la protection thermique du moteur à partir d'une image générée dans le variateur,

- la possibilité de connexion de sondes PTC intégrées au moteur,
- l'occultation de fréquence de résonance de la machine (la vitesse critique est occultée de sorte que le fonctionnement à cette fréquence est rendu impossible),
- le verrouillage temporisé à basse vitesse dans les applications de pompage où le fluide participe à la lubrification de la pompe et évite le grippage.

Ces fonctions, sur les variateurs sophistiqués, se trouvent le plus souvent en standard (cf. **fig. 27**).



**Fig. 27** : photographie d'un variateur comportant de nombreuses fonctions intégrées (ATV58H - Telemecanique).

## 6.3 Les cartes optionnelles

Pour des applications plus complexes, les fabricants proposent des cartes optionnelles qui permettent soit des fonctions particulières, par exemple le contrôle vectoriel de flux avec capteur, soit des cartes dédiées à un métier particulier. On trouve par exemple :

- des cartes « commutation de pompes » pour réaliser économiquement une station de pompage comportant un seul variateur alimentant successivement plusieurs moteurs,
- des cartes « multi-moteurs »,
- des cartes « multi-paramètres » permettant de commuter automatiquement des paramètres prédéfinis dans le variateur,
- des cartes spécifiques développées à la demande d'un utilisateur particulier.

Certains fabricants proposent également des cartes automates intégrées dans le variateur permettant des applications simples. L'opérateur dispose alors d'instructions de programmation et d'entrées et sorties pour la réalisation de petits automatismes, là où la présence d'un automate ne se justifie pas.

## 7 Conclusion

---

Le choix d'un variateur de vitesse étant intimement lié à la nature de la charge entraînée et aux performances visées, toute définition et recherche d'un variateur de vitesse doivent passer par une analyse des exigences fonctionnelles de l'équipement puis des performances requises pour le moteur lui-même.

La documentation des fournisseurs de variateurs de vitesse fait également abondamment mention de couple constant, couple variable, puissance constante, contrôle vectoriel de flux, variateur réversible... Ces désignations caractérisent toutes les données nécessaires pour retenir le type de variateur le plus adapté.

Un choix incorrect de variateur peut conduire à un fonctionnement décevant. De même, il faut tenir compte de la gamme de vitesse souhaitée pour choisir convenablement l'association moteur / variateur.

Toutes les informations réunies dans ce Cahier Technique doivent permettre d'aboutir à un bon choix en consultant la documentation des constructeurs ou, ce qui est encore plus sûr, en s'adressant, avec toutes les précisions nécessaires, à des spécialistes pour sélectionner le variateur apportant le meilleur rapport prix / performances.

**Schneider Electric**

Direction Scientifique et Technique,  
Service Communication Technique  
F-38050 Grenoble cedex 9  
Télécopie : 33 (0)4 76 57 98 60  
E-mail : fr-tech-com@mail.schneider.fr

Réalisation : AXESS - Valence (26).  
Edition : Schneider Electric  
- 20 € -