

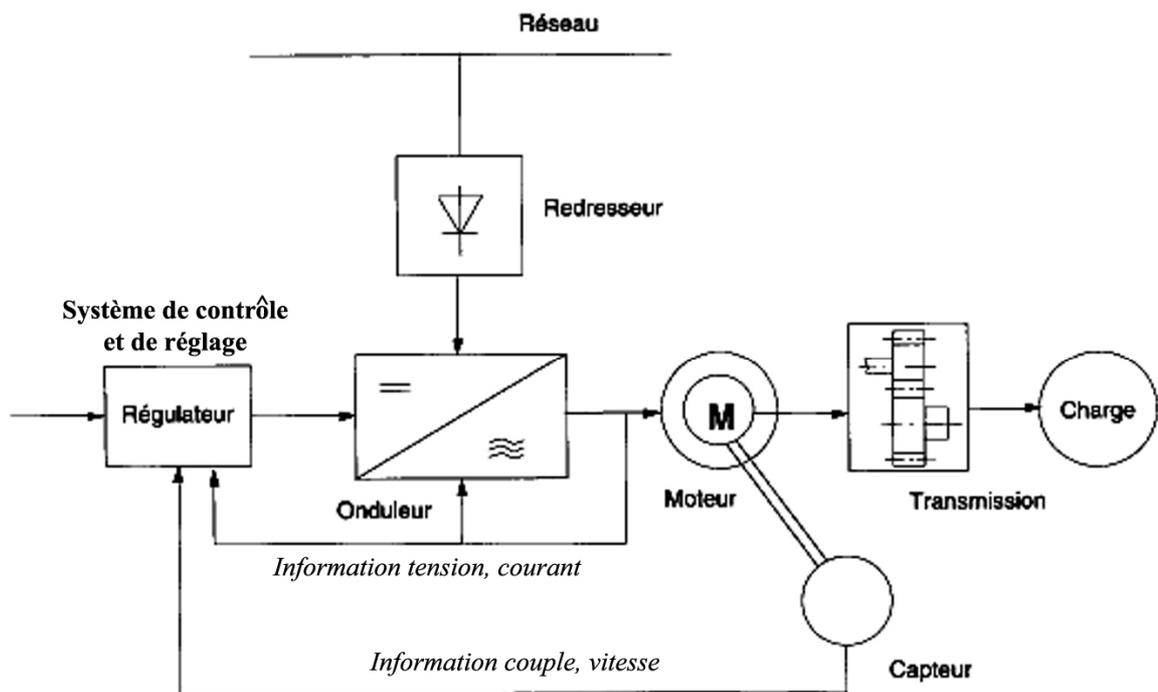
# M1 Electrotechnique Industrielle

## Cours Entraînements Electriques

### 1. Généralités sur les entraînements électriques

#### 1.1. Définition et structure des entraînements électriques

Les entraînements électriques sont utilisés dans l'industrie des machines. Les principaux domaines d'application sont les machines outils, la robotique, les machines de conditionnement (impression, découpage, emballage, etc.), les machines de production de tout type (papier, aliments, chimie, etc.). L'entraînement est décomposé en ses principaux sous ensembles: actionneur (moteur), transmission, alimentation, contrôle et capteurs, charge, éléments de sécurité et de protection.



#### 1.2. Méthodologie d'étude d'un entraînement électrique

L'étude d'un entraînement électrique est principalement conditionnée par ses contraintes et ses avantages:

- une grande souplesse d'exploitation, impliquant une dynamique plus élevée et un contrôle dans un large domaine de vitesse

- des exigences croissantes en matière de positionnement
- une meilleure intégration de l'entraînement à l'organe entraîné
- une plus grande fiabilité, impliquant un accroissement de la durée de vie des moteurs
- un meilleur choix du dispositif d'alimentation permettant de réduire les pertes au démarrage et au freinage pour les entraînements à fonctionnement intermittent
- des coûts réduits d'exploitation et d'investissement

### 1.3. Caractéristiques des charges

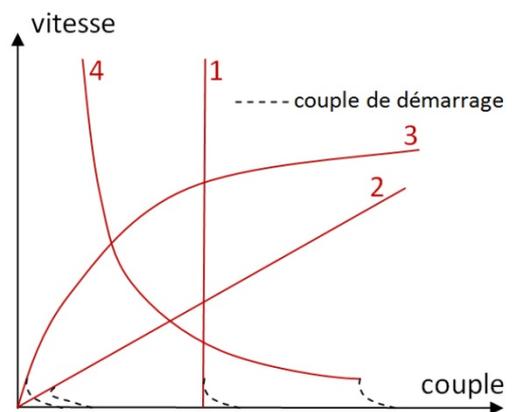
Pour permettre un choix correct de l'entraînement électrique, il est très important de connaître les caractéristiques du couple résistant ou entraînant des machines utilisées.

1- Couple résistant constant  $C_r = C_{te}$  comme les dispositifs de levage, les convoyeurs, les bandes transporteuses etc.

2- Couple résistant proportionnel à la vitesse  $C_r = K\omega$  comme le principe de la vis d'Archimède

3- Couple résistant  $C_r = K\omega^2$  comme les ventilateurs et les pompes centrifuges

4-  $C_r = K/\omega$  comme les enrouleurs, les broches de machines outils



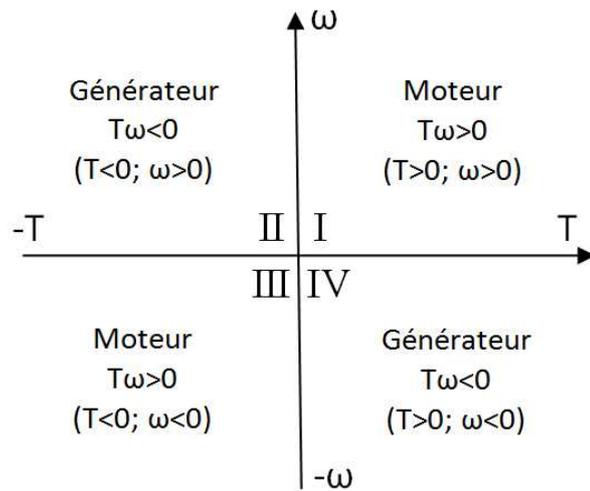
Toutes ces machines, quelque soit leur couple résistant, peuvent opposer au démarrage un couple de décollage plus ou moins important. Mal qualifié lors de l'étude du mouvement, il peut, s'il est important, empêcher le démarrage ou rendre la mise en vitesse très longue. Le couple de démarrage peut atteindre plusieurs fois le couple à la vitesse nominale.

**Exemple:** Machines avec roulements à billes ou à rouleaux  $C_d = 110$  à  $125\%C_n$ , machines à palier lisse  $130$  à  $150\%$ , convoyeurs (frottements importants)  $160$  à  $250\%$ , machines dont le cycle de fonctionnement présentent des à-coups (presse, machines comportant des cames ou systèmes bielle-manivelle)  $250$  à  $600\%$ .

### 1.4. Caractéristiques des moteurs

#### 1.4.1. Notion des quatre quadrants

Les quadrants I et III possèdent une puissance positive, ceci correspond à un fonctionnement moteur. L'énergie est fournie par le réseau. La mécanique est entraînée. Les quadrants II et IV possèdent une puissance négative, ceci correspond à un fonctionnement générateur. L'énergie est fournie par la mécanique, la mécanique entraîne.



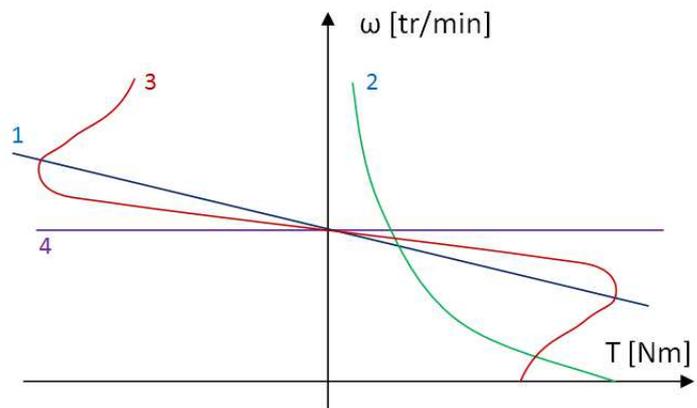
### 1.4.2. Caractéristiques mécaniques de machines électriques

1- Caractéristique du moteur à courant continu à excitation indépendante

2- Caractéristique du moteur à courant continu à excitation série

3- Caractéristique de la machine asynchrone

4- Caractéristique de la machine synchrone



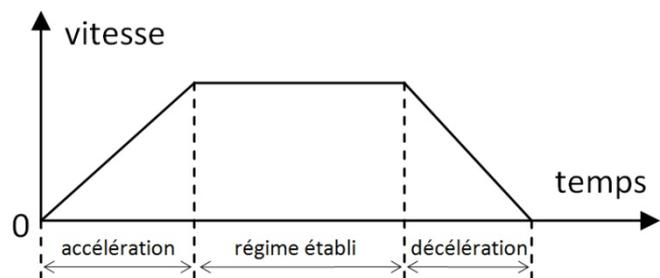
### 1.5. Couples fournis par le moteur et les différentes phase d'un mouvement

**Régime établi:** le couple fourni par le moteur ( $C_m$ ) est égal au couple résistant ( $C_r$ ).

**Accélération:**  $C_m = C_r + C_a$

$C_a$ : Couple accélérateur

Le couple accélérateur est lié à l'accélération désirée de la mécanique  $d\omega/dt$  et à l'inertie  $J$  de la mécanique  $C_a = J d\omega/dt$ .

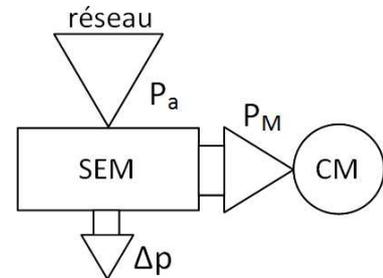


**Décélération:** Dans ce cas, le couple accélérateur est négatif, il est appelé couple de ralentissement ( $C_{ra}$ ). Si la machine est laissée à elle-même lors de la coupure de la tension d'alimentation, le couple de ralentissement  $C_{ra} = C_r = J d\omega/dt$ ; l'arrêt se produira au bout d'un temps  $t$

lié au moment d'inertie. Si ce temps est inacceptable, il faut ajouter au couple de ralentissement un couple de freinage ( $C_f$ )  $C_{ra}=C_r+ C_f = J \, d\omega/dt$ .

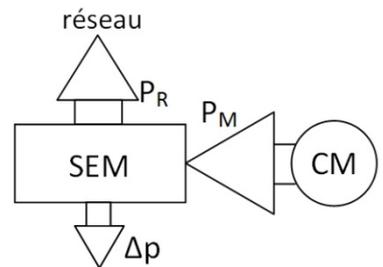
## 1.6. Régimes de freinage des machines

Toutes les machines électriques, convertisseurs d'énergie peuvent fonctionner en 2 régimes: moteur ou en régime frein (générateur). En régime moteur, la puissance électrique absorbée  $P_a$  du réseau; est convertie en puissance mécanique  $P_M$  et en pertes  $\Delta p$ .  $P_M$  est transmise à la charge mécanique (CM). SEM: Système électromécanique.



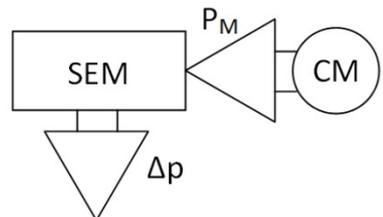
### 1.6.1. Freinage par récupération d'énergie

Dans ce régime, l'énergie cinétique et potentiel de la charge mécanique est transmise à l'arbre de la machine qui la transforme en énergie électrique et en perte. l'énergie électrique est transmise au réseau électrique. Ce régime de freinage est le plus rentable vu que l'énergie de freinage est utilisée.

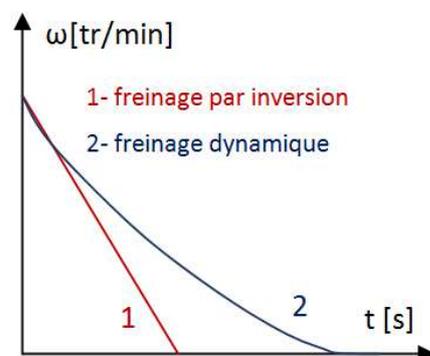
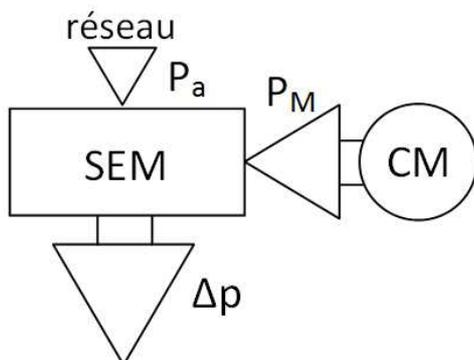


### 1.6.2. Freinage dynamique

Dans ce régime, le moteur est coupé de l'alimentation et fonctionne comme un générateur autonome dont la charge est une résistance. Le couple de freinage est d'autant plus grand que le courant fourni à la résistance.



### 1.6.3. Freinage par inversion



Dans ce régime, le sens de rotation du moteur est inversé. Le moteur consomme donc l'énergie électrique du réseau ainsi que l'énergie mécanique de la charge. La somme des 2 énergies est consommée par la suite en pertes du moteur et par la résistance supplémentaire.

## ***1.7. Principales fonctions d'une commande de puissance électronique***

### ***1.7.1. Démarrage***

C'est la mise en vitesse d'une machine depuis l'arrêt jusqu'à la vitesse établie. La mise sous tension directe d'un moteur peut engendrer des problèmes électriques et mécaniques (pointes de courant; chute de tension; à-coups mécaniques; patinage; usure; etc.) L'utilisation d'un démarreur peut résoudre ces types de problème.

### ***1.7.2. Variation de vitesse***

La variation de vitesse est la possibilité d'acquisition de plusieurs niveaux de vitesse d'un système mécanique selon la volonté de l'opérateur. La plage de variation de vitesse autorisée par un moteur est appelée gamme de vitesse  $G=V_{\max}/V_{\min}$ . La variation de vitesse avec régulation est un système de variation de vitesse complété d'une fonction asservissement qui se caractérise par la notion de précision du système qui peut être garantie dans la gamme de vitesse.

### ***1.7.3. Freinage***

C'est la décélération de la vitesse établie jusqu'à une vitesse intermédiaire par application d'un couple de freinage contrôlé.

### ***1.7.4. Inversion du sens du mouvement***

C'est la possibilité d'ordonner l'autre sens de marche du mouvement. L'inversion se fait à vitesse nulle, après décélération avec ou sans freinage électrique. La décélération puis l'accélération peuvent être contrôlées.

## ***2. Entraînements électriques des moteurs asynchrones***

### ***2.1. Démarrage des moteurs asynchrones***

Au démarrage, le moment du couple moteur est dans les conditions habituelles d'utilisation, très supérieur au moment du couple résistants. L'accélération est donc brutale et le courant appelé est susceptible d'être très important. Ce phénomène, sans inconvénient pour les petits moteurs, est

inacceptable dès que la puissance atteint quelques dizaines de kilowatts. Il est alors nécessaire de mettre en œuvre des procédés particuliers de démarrage.

## ***2.1.1. Démarrages conventionnels***

### ***2.1.1.1. Démarrage direct***

Le démarrage direct est le plus simple des démarrages à mettre en œuvre des moteurs asynchrones. Il se réalise en charge, à tension nominale mais à condition que  $T_d < T_r$  ( $T_d$  - couple de démarrage,  $T_r$  - couple résistant). La différence entre les deux couples donne l'accélération et le rotor se met à tourner. La vitesse du rotor devient constante une fois que le couple moteur  $T_M = T_r$ . Ce type de démarrage est utilisé pour des moteurs petite et moyenne puissance. Ses inconvénients sont les appels de courant de démarrage très importants ( $I_d = 4$  à  $8$  fois  $I_n$ ) engendrant d'importantes chutes de tension.

### ***2.1.1.2. Démarrage étoile triangle***

On couple en étoile lors du démarrage un moteur destiné à travailler en triangle (tension composée du réseau). Un moteur destiné à un tel démarrage doit avoir les 6 bornes statoriques sorties. Généralement ce démarrage est opéré par des contacteurs et se fait à vide ou avec un faible couple résistant. L'avantage de ce démarrage est de diminuer de trois fois l'appel du courant par rapport au démarrage direct. Les inconvénients sont:

- pointes de courant et de couple élevées au passage étoile triangle
- appareillage avec maintenance
- pas de réglage des paramètres de démarrage

### ***2.1.1.3. Démarrage statorique à résistances***

Pour des moteurs de quelques kW, la tension est diminuée par l'insertion d'un rhéostat triphasé en série avec les enroulements du stator. Pour une diminution de la tension de 50%, l'appel du courant lors du démarrage est de moitié de celui d'un démarrage direct et le couple de démarrage est de 4 fois moins. Ce type de démarrage est utilisé pour des charges à couple résistant croissant.

### ***2.1.1.4. Démarrage par autotransformateur***

La tension d'alimentation est diminuée par un autotransformateur (2 ou 3 rapports de transformations sont ordinairement utilisés) avant d'être couplée directement au réseau. Il a pour avantages la possibilité de choisir le couple de démarrage et le passage des divers temps de

démarrage qui se fait sans coupure de courant (absence de surtensions). Ce mode de démarrage est surtout utilisé pour les fortes puissances (>100kW) et conduit à un coût de l'installation relativement élevé.  $I_d=1,7$  à  $4I_n$ ;  $C_d=0,5$  à  $0,85C_n$ .

### 2.1.1.5. Démarrage à résistances rotoriques

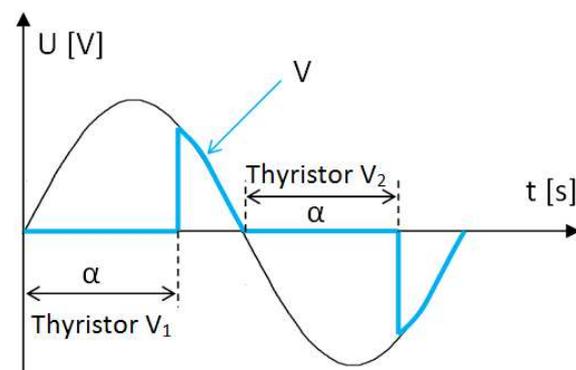
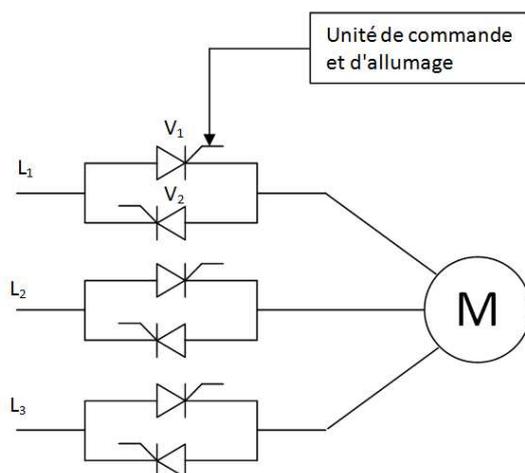
Pour ce type de démarrage, nous avons besoin d'avoir accès aux conducteurs rotoriques . Le fait de rajouter des résistances au rotor (Machines Asynchrones à rotor bobiné) provoque une limitation des pointes de courant au démarrage. En plus, il a l'avantage, si les résistances sont bien choisies, de démarrer avec le couple maximal du moteur. En général, ce type de procédé est réservé pour les démarrages difficiles, lorsqu'un couple de démarrage élevé est exigé (broyeurs, malaxeurs ...) pour des machines qui ont un grand moment d'inertie (grosses pompes ) ou lorsqu'un démarrage progressif est nécessaire (ascenseur...).

### 2.1.2. Démarrage par gradateur de tension

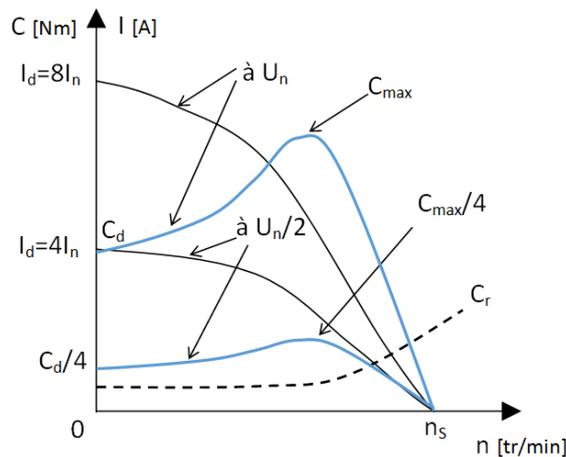
Les objectifs du démarreur sont:

- amener le moteur à son régime nominal le plus progressivement possible
- limiter les pointes de courant d'appel
- limiter les à-coups de couple

Les gradateurs de tension délivrent une tension variable à fréquence constante. Le couple obtenu est égal à  $C=K.U$  ( $f=Cte$ ). Les gradateurs de tension utilisés avec des moteurs à cage d'écureuil (1kW–2MW) servent uniquement de démarreur. Les gradateurs de tension utilisés avec des moteurs à cage résistante ou à bagues de faible et moyenne puissance, autorise une variation, voire une régulation. Deux thyristors montés tête-bêche permettent le passage de deux alternances d'une phase.



La variation de la tension aux bornes du récepteur est obtenue par la variation de l'angle de retard  $\alpha$  à l'amorçage. Il peut varier de 0 à 180° par rapport au début de la sinusoïde. Le moteur peut recevoir une tension variable de 0 à la tension du réseau en modulant l'instant d'allumage des thyristors. La variation de tension s'effectue sur les 3 phases avec le même angle  $\alpha$  mais déphasé de  $2\pi/3$ .



La limitation du courant de démarrage à une valeur prédéterminée provoque une réduction du couple de démarrage pratiquement égale au rapport du carré des courants.

**Exemple:** Sur un moteur dont les caractéristiques sont  $C_d = 2C_n$  pour  $I_d = 6I_n$ ; la limitation du courant à  $I_{d1} = 3I_n$ ; soit  $0,5I_d$  donne un couple de démarrage  $C_{d1} = C_d \times (0,5)^2 = 2C_n \times 0,25 = 0,5C_n$ .

## 2.2. Variation de vitesse des moteurs asynchrones

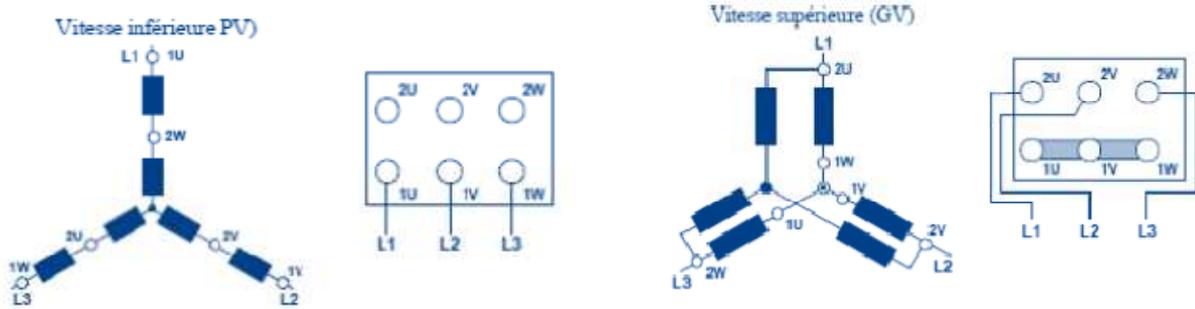
Alimenté par des tensions de fréquence  $f$ , le moteur triphasé ayant  $2p$  pôles tourne normalement à la vitesse  $N' = f(1-g)/p$  peu inférieur à la vitesse de synchronisme  $f/p$ . Pour changer la vitesse, à  $f$  donné, il faut changer le nombre de pôles. Pour obtenir une variation continue de  $N'$ , il faut faire varier sans discontinuité le glissement ou ce qui est préférable, la fréquence d'alimentation.

### 2.2.1. Variation de vitesse en changeant le nombre de pôles

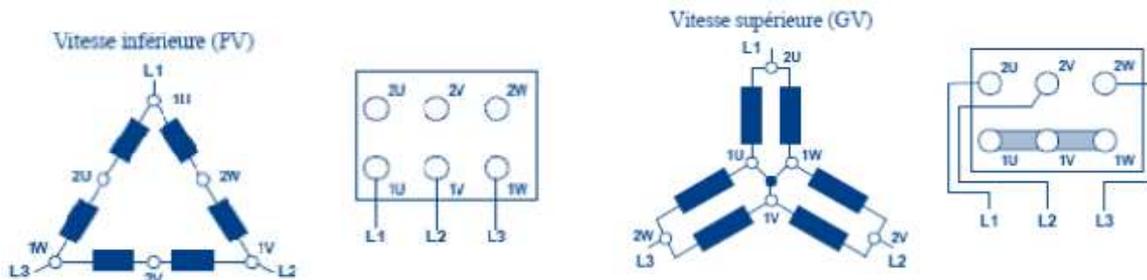
Il est possible d'obtenir un nombre discret de vitesses en utilisant deux enroulements statoriques ou en modifiant le nombre de pôles du stator.

- Double enroulements statoriques séparés:** Lorsque l'on souhaite obtenir 2 vitesses qui ne sont pas dans un rapport de 2 à 1, on munit le stator de 2 enroulements ( toujours montés en étoile pour éviter les courants induits) que l'on alimente séparément.
- Couplage de pôles système Dahlander:** Il est possible d'obtenir des moteurs à 2 vitesses dans un rapport 1/2 avec un enroulement statorique constitué de  $3 \times 2$  demi-enroulements qui par couplage feront apparaître un nombre de paires de pôles simples ou doubles.

-Montage à couple quadratique: Lorsque le couple résistant varie en fonction du carré de la vitesse, les enroulements connectés en étoiles



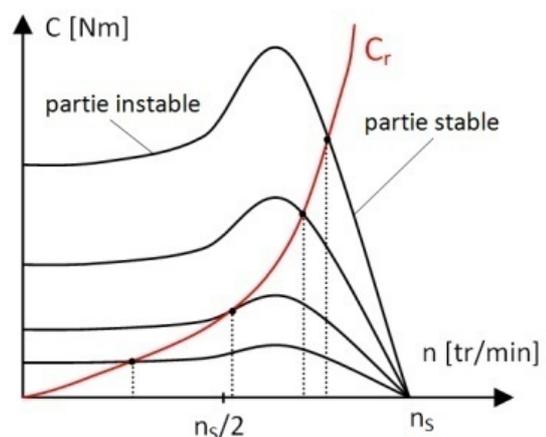
- Montage à couple constant: Lorsque le couple résistant est à peu près le même au 2 vitesses, les enroulements sont connectés en étoile parallèle pour la grande vitesse YY et en triangle série pour la petite vitesse Δ. Dans les catalogues le symbole est YY/Δ.



- c) Couplage de pôle système PAM(Pole-Amplitude-Modulation): Avec ce système, il est possible d'obtenir des moteurs à 2 vitesses qui ne sont pas nécessairement dans un rapport 1/2. Les couplages externes sont les même pour le système Dahlander.
- d) Mixage des techniques: En plaçant dans un stator deux enroulements à changement de pôles, on peut avoir jusqu'à 4 vitesses pour un même moteur. C'est le maximum réalisable pratiquement.

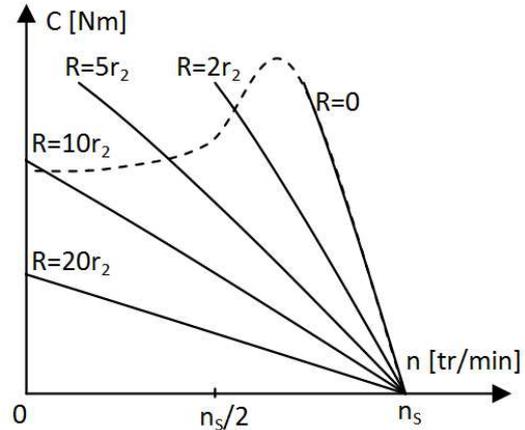
### 2.2.2. Variation de vitesse en actionnant le glissement

a) Réduction de la valeur des tensions d'alimentation: Pour augmenter le glissement d'un moteur asynchrone à cage alimenté par des tensions de fréquence constante, il faut diminuer la valeur de ces tensions. La mise en œuvre de ce procédé est d'interposé un gradateur triphasé entre le réseau et les bornes du moteur. Le fait qu'à glissement



donné le couple du moteur asynchrone est proportionnel au carré de la tension d'alimentation, a un domaine d'emploi limité et conduit à des performances médiocres. Ce procédé n'est utilisable que pour l'entraînement de charges dont le couple croît très vite avec la vitesse (pompes, ventilateurs).

b) *Variation de la résistance secondaire:* La façon la plus simple de faire varier la vitesse en charge du moteur à rotor bobiné est d'utiliser un rhéostat secondaire. Au fur et à mesure que la résistance par phase secondaire augmente, le glissement à couple résistant donné croît.



Avantages:

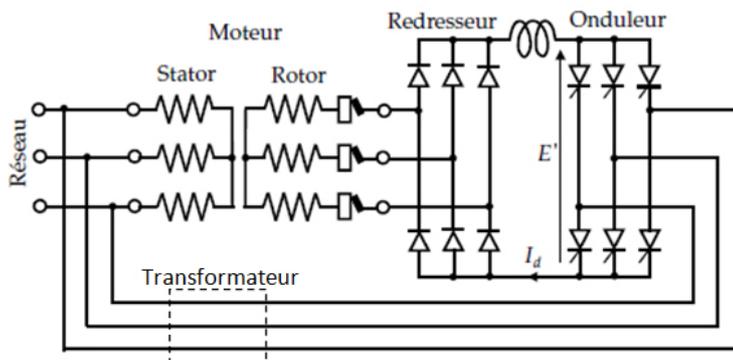
1. On peut régler la vitesse d'une charge quelconque car la partie utilisée de la caractéristique mécanique est toujours stable
2. Les pertes dues à l'accroissement du glissement sont dissipées hors du moteur dans la résistance additionnelle. On peut sans surintensité développer le couple nominal à toute vitesses.

Inconvénients:

1. Ce n'est pas un vrai réglage de vitesse, la vitesse à vide est toujours très voisine de la vitesse synchrone. On accroît la chute de vitesse en charge.
2. L'augmentation du glissement se fait au détriment du rendement, trop de pertes Joule au secondaire.

Applications: Ce procédé est très utilisé en levage, est assuré par des contacteurs qui permettent d'enlever les diverses proportions de la résistance additionnelle ou de les introduire suivant qu'on veut augmenter ou diminuer la vitesse.

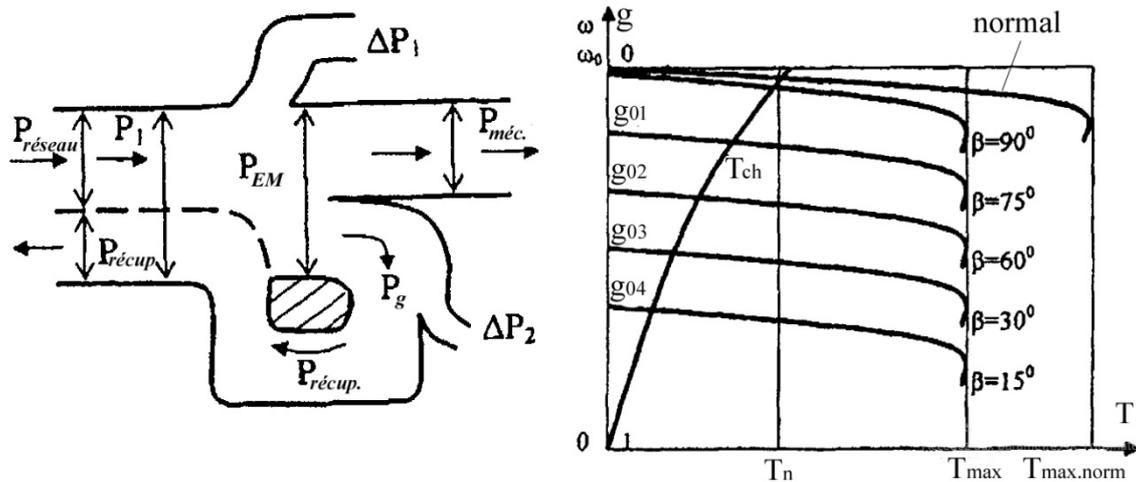
c) *Récupération de la puissance de glissement:* Au lieu de dépenser en pertes Joule la puissance



prélevée entre les bagues d'un moteur **asynchrone à rotor bobiné** qu'on veut faire glisser; on peut récupérer cette puissance égale aux pertes Joule dans le rotor.

Dans le passé, grâce à des groupements de machines, on ramenait la puissance de glissement à la fréquence du réseau afin

de la réinjecter dans celui-ci. On a ensuite redressé les tensions rotoriques pour alimenter un moteur à courant continu qui ajoutait son couple à celui du moteur asynchrone. Actuellement, on effectue la récupération de manière entièrement statique, grâce au montage appelé cascade hyposynchrone. Selon le diagramme énergétique de ce montage, le moteur absorbe la puissance  $P_1$  du réseau électrique qui sera transformée en pertes statoriques  $\Delta P_1$  et en puissance électromagnétique  $P_{EM}$ . Cette dernière donnera la puissance mécanique  $P_{méc}$  et la puissance de glissement  $P_g$ . La puissance de glissement se compose en puissance de récupération  $P_{récup}$  et en perte rotoriques, du redresseur, de l'onduleur et du transformateur  $\Delta P_2$ . La puissance réelle absorbée du réseau est donc  $P_{réseau}=P_1-P_{récup}$



En faisant varier l'angle de retard à l'amorçage de l'onduleur, on peut donc faire varier la vitesse du moteur. Ce procédé qui permet une vraie variation de vitesse présente 2 avantages:

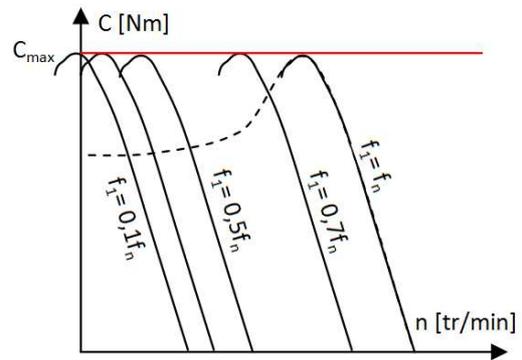
- les fonctions de l'électronique de puissance sont faciles à réaliser. En particulier, l'onduleur est non autonome, la fréquence et la forme d'onde de ses tensions de sortie étant imposés par le réseau; à part les dispositifs de commande des gâchettes et les protections usuelles, il ne nécessite pas d'auxiliaire.
- la partie électronique de puissance n'a à être dimensionnée que pour la portion de la puissance qu'elle redresse puis ondule. Elle est d'autant plus réduite que le glissement maximum nécessaire est plus limité.

Application: Ce montage est très intéressant pour les équipements ne nécessitant qu'une gamme de vitesse limitée. Pour ne pas augmenter son dimensionnement on démarre avec des résistances rotoriques pour amener le moteur jusqu'à la zone de réglage.

### 2.2.3. Variation de la fréquence d'alimentation

Pour obtenir un vrai réglage de la vitesse du moteur à cage, il faut faire varier la fréquence des tensions d'alimentation. Il faut prendre en considération qu'en changeant la fréquence le flux change aussi  $\Phi_1 = \frac{E_1}{kf_1} \approx \frac{U_1}{kf_1}$ . Donc pour garder la valeur du flux constante, il faut en même temps changer la valeur de l'amplitude de la tension tel que

$\frac{U_1}{f_1} = \text{Cte}$ . La régulation de la tension est indispensable car en diminuant la fréquence au dessous de la fréquence nominale, cela fait diminuer les réactances des enroulements du moteur qui feront augmenter le courant d'aimantation. Cela saturera le paquet de fer et donc le surchauffera.



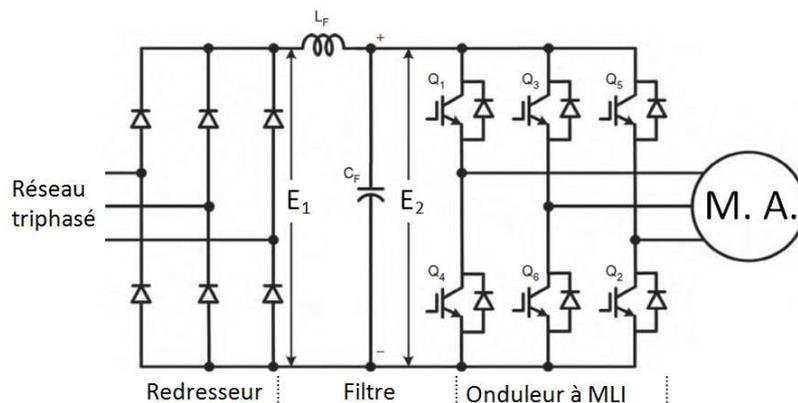
Deux types de procédés sont utilisables pour obtenir à partir du réseau à tension et fréquence constantes, les tensions de valeur et de fréquence variables:

- passage par l'intermédiaire du continu et l'emploi d'un onduleur autonome
- conversion directe à partir du réseau (technique de cycloconvertisseur)

#### 2.2.3.1. Convertisseur de fréquence avec onduleur autonome

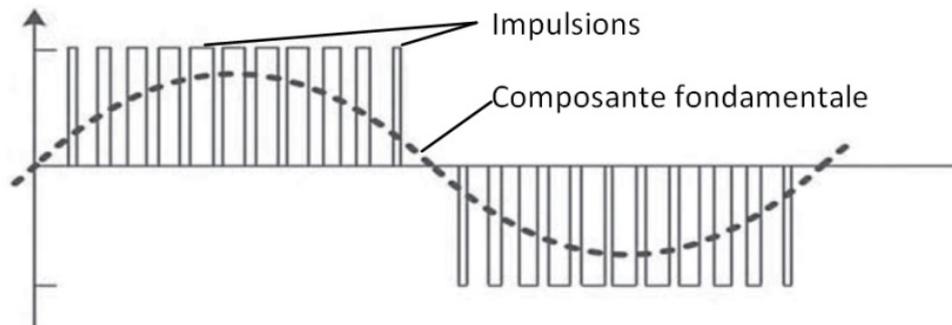
##### MLI (modulation de largeur d'impulsions)

Ce système à commutation forcée utilise la MLI. L'onduleur génère une tension sinusoïdale ou de toute forme désirée. Le système est surtout utilisé pour la variation de vitesse des moteurs asynchrones devant fonctionner sur la large gamme de vitesses ou dont le couple et la vitesse doivent changer très rapidement. Il est constitué de transistors IGBT, MOSFET et parfois de GTO.



Un redresseur en pont produit une tension constante  $E_1$  à partir du réseau triphasé dont la valeur sera filtrée  $E_2$  à l'entrée de l'onduleur. Grâce aux signaux émis par l'unité de commande et d'allumage, l'onduleur génère une série d'impulsions de tensions positives d'amplitude constante,

suivies par une série d'impulsion semblables mais de signe contraire. La largeur de ces impulsions et les intervalles qui les séparent sont ajustés de sorte que la composante fondamentale se rapproche de la sinusoïde. En changeant le nombre d'impulsions par alternance, on peut produire des fréquences différentes. Cependant, pour maintenir un flux constant dans le moteur, il faut en même temps changer la largeur des impulsions.



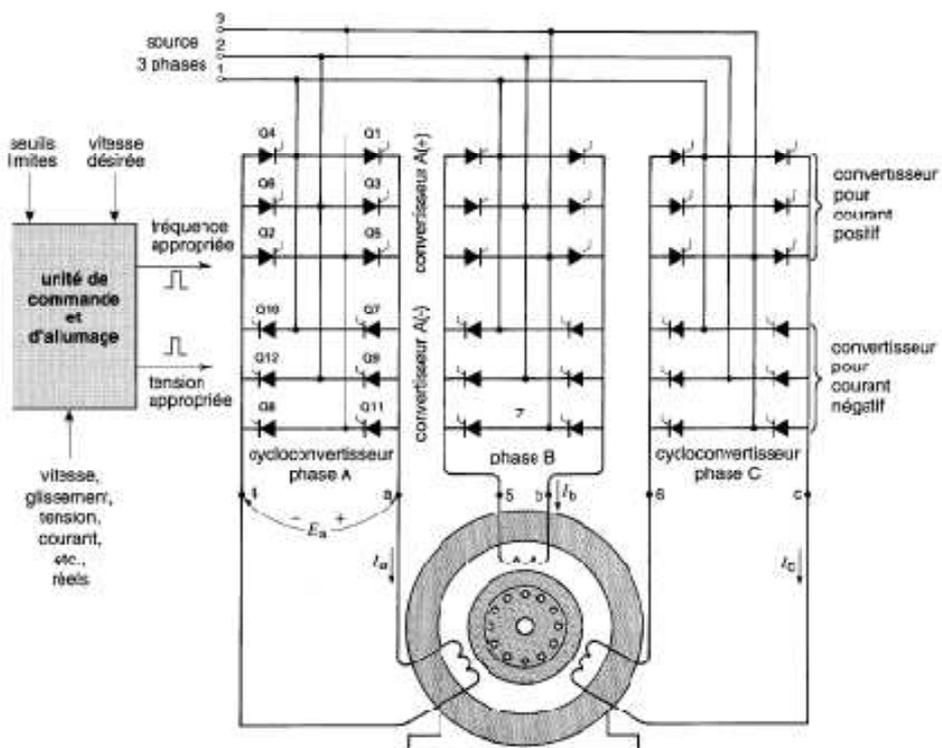
Avantages:

- Fonctionnement sans à-coups, même à basse vitesse
- module de freinage possible
- moteur silencieux

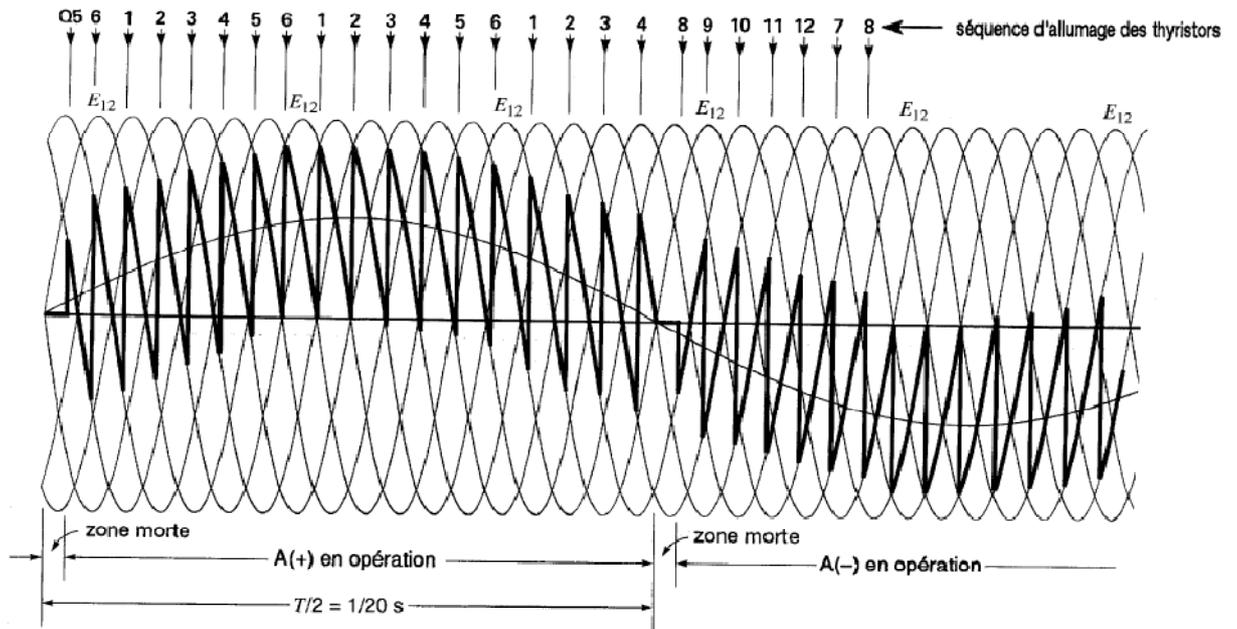
inconvénient:

- limitation de puissance

*2.2.3.2. Les cycloconvertisseurs*

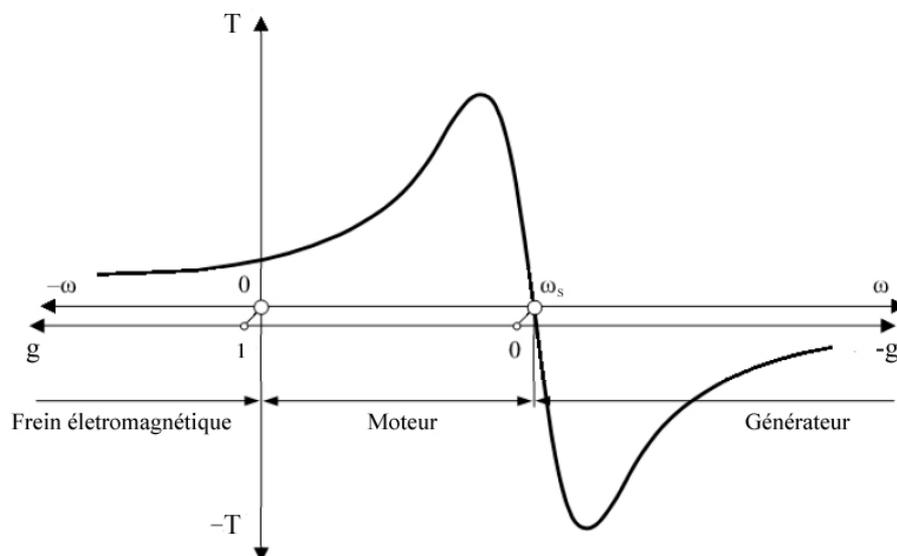


On forme la tension appliquée à chaque phase du moteur à l'aide de portions des tensions sinusoïdales du réseau. chaque phase est reliée à celui-ci par deux ponts à 6 thyristors. On applique les impulsions appropriées aux gâchettes des thyristors, afin de faire varier simultanément la fréquence et la tension pour maintenir un flux constant dans le moteur. Ce système donne de bonnes caractéristiques couple vitesse dans les 4 quadrants. Le moteur peut accélérer, arrêter, changer le sens de rotation et freiner avec la récupération d'énergie sans que l'on soit obligé de changer de connexions.



Son utilisation pour alimenter le moteur asynchrone ou synchrone est limitée aux entraînements de forte puissance à basse vitesse.

### 2.3. Freinages des moteurs asynchrones

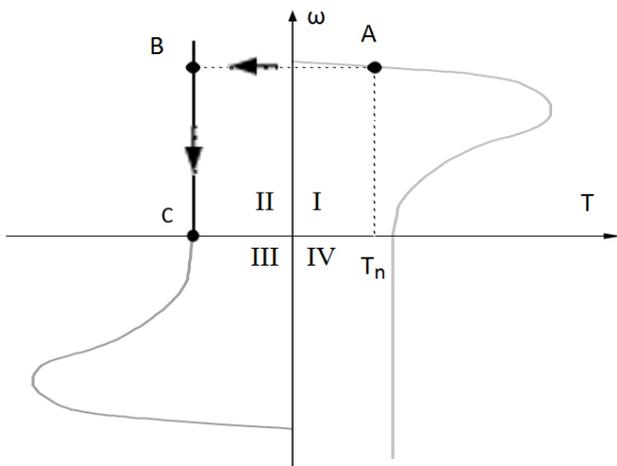


De la caractéristique mécanique d'une machine asynchrone, on déduit trois régimes:

régime générateur  $-\infty < g < 0$ ; régime moteur  $0 < g < 1$  et régime frein  $1 < g < +\infty$

### 2.3.1. Freinage par inversion $1 < g < +\infty$

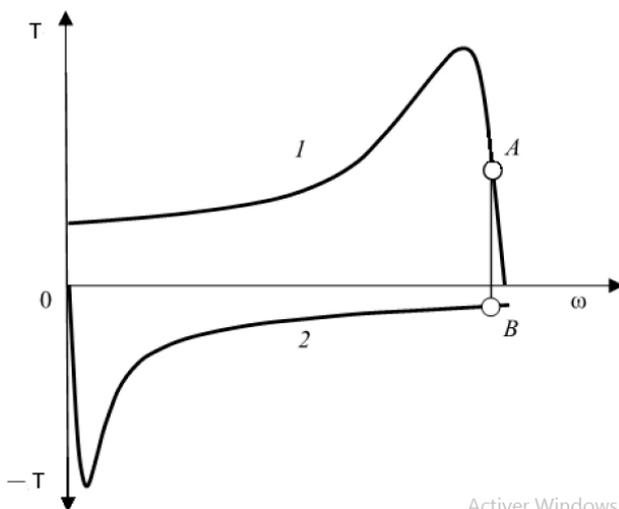
Il suffit d'inverser 2 phases de l'alimentation pour changer le sens de rotation du champ tournant statorique pour freiner par exemple une charge à forte inertie. Une fois arrêtée, il faut couper l'alimentation sinon le moteur se mettra à tourner dans l'autre sens.



Lors du freinage, il n'y a pas de récupération d'énergie. L'énergie est dissipée dans le rotor ou dans les résistances sous forme de chaleur. Suivant les résistances insérées au rotor, dans le cas d'un moteur à bagues, le couple de freinage sera plus ou moins important. Ce type de freinage produit donc des pertes importantes supérieures même à celles au rotor bloqué de la machine.

Ce type de freinage ne peut se faire de manière prolongée au risque de détériorer l'isolation des conducteurs rotoriques ou même jusqu'à faire fondre les barres d'un rotor à cage. Il a l'avantage de garder presque constant le couple de freinage. En pratique ce freinage ne va pas au-delà d'un glissement dépassant  $g=2$ .

### 2.3.2. Freinage par injection de courant continu (dynamique)



On peut freiner un moteur et sa charge en branchant une source à courant continu à 2 bornes du stator. Le bobinage statorique générera alors un champ stationnaire qui induira une tension alternative dans les barres ou les conducteurs rotoriques en mouvement de la machine. Il en résulte des courants alternatifs et des pertes Joule dans le rotor qui freinent les parties tournantes.

Ce type de freinage dissipe dans le rotor 3 fois moins d'énergie que celui du freinage par inversion. Vu que le couple de freinage augmente avec le carré du courant continu

circulant dans le stator, on peut donc faire circuler un courant de 2 à 6 fois le courant alternatif nominal, puisque le temps de freinage est d'autant plus court que ce courant est grand. On peut facilement utiliser ce freinage en alimentant directement la machine en courant continu par un onduleur autonome juste en arrêtant la commutation des thyristors de l'onduleur.

L'inconvénient de ce freinage est d'avoir de grands courants pour relativement de petit couples dans les zones à glissement élevé.

Son principal avantage, est de ne pas avoir besoin de couper l'alimentation juste à l'arrêt comme pour le freinage à inversion.

### **2.3.3. *freinage par récupération $g < 0$***

Ce freinage est possible si la machine est entraînée au dessus de sa vitesse de synchronisme. La machine fonctionne alors en régime générateur et fournit de la puissance active à partir de ses bornes statoriques, quoi qu'elle continue à consommer du réseau de la puissance réactive (excitation). A ce moment, un couple de freinage apparait à son arbre. Ce régime de freinage peut être réalisé par exemple:

- en diminuant le nombre de paire de pôles de la machine en cours de fonctionnement
- dans la décélération des entraînements sous l'action des forces de traction des charges comme les ascenseurs, les montes charges etc.
- Dans le cas de la diminution de la tension d'alimentation des dispositifs de commande

#### **Références:**

- [1] Segulier G.; Notelet F. Electrotechnique industrielle. Technique et documentation Lavoisier 1987.
- [2] El-Shakawi M. A. Fundamentals of electric drives. Brooks/cole publishing company 2000.
- [3] Onichenko G.B. Entraînements électriques. Academia 2006.
- [4] Bimal K. Bose. Power Electronics and Motor Drives. Academic Press is an imprint of Elsevier 2006.
- [5] Séguier G.; Labrique F.; Delarue P. Electronique de puissance. Dunod 2015.
- [6] Wildi T. Electrotechnique. De Boek université 2000.
- [7] Novikov G.V. Commande par la fréquence des moteurs asynchrones. Baumann Press. Moscou 2016.