Cours
Capteurs et Actionneurs
Master SIS.1

Michel Bensoam

21 janvier 2005

Génie Electrique

Table des matières

1 Introduction Générale **4**

2 Présentation des machines **6**
2.1 Généralités 6
2.1.1 Constitution 6
2.1.2 Point de fonctionnement 6
2.1.3 Les quatre quadrants 6
2.2 La machine à courant continu 7
2.2.1 Construction 7
2.2.2 Principales relations 8
2.2.3 Le moteur à excitation indépendante 9
2.2.4 Le moteur à excitation série 10
2.3 Commande du moteur à courant continu 11
2.3.1 Régulation de vitesse sous flux constant 11
2.3.2 Régulation de vitesse avec action sur le flux 12
2.4 La machine synchrone 12
2.4.1 Le champ tournant 13
2.4.2 Construction 13
2.5 Commande du moteur synchrone 13
2.5.1 Machine synchrone en régime établi 13
2.5.2 Machine synchrone autopilotée 14
2.5.3 Machine synchrone alimentée en courant ou tension 14
2.6 La machine asynchrone 15
2.6.1 Construction 15
2.6.2 Principales relations 15
2.6.3 Alimentation à fréquence et tension constante 15
2.7 Commande du moteur asynchrone 16
2.7.1 Cascade hyposynchrone 16
2.7.2 Commande scalaire 16
2.7.3 Commande vectorielle 17
2.7.4 Commande directe du couple 18

3 Les charges **19**
3.1 Mouvement de translation et de rotation 19
3.1.1 Moment d'inertie et réducteurs 19
3.1.2 Caractérisation expérimentale 20
3.2 Les charges industrielles 21
3.2.1 Démarrage freinage 21

4 Fonction de conversion de puissance **23**
4.1 Redresseurs . . . 23
4.1.1 Redresseurs commandés . . . 23
4.1.2 Groupements et variantes . . . 24
4.2 Gradateurs . . . 27
4.3 Hacheurs . . . 29
4.3.1 Hacheurs non réversibles . . . 29
4.3.2 Hacheurs réversibles . . . 30
4.3.3 Groupements de hacheurs . . . 30
4.4 Onduleurs . . . 31
4.4.1 Onduleur de tension à un créneau par alternance . . . 31
4.4.2 Onduleur MLI . . . 32
4.4.3 Onduleur multi-niveaux . . . 33

5 Les capteurs **34**
5.1 Généralités . . . 34
5.2 Capteurs de température . . . 34
5.2.1 Mesure par thermocouple . . . 34
5.2.2 Thermométrie par diodes et transistors . . . 34
5.3 Capteurs de position . . . 35
5.3.1 Capteurs potentiométriques . . . 35
5.3.2 Resolver . . . 36
5.3.3 Capteur digitaux . . . 36
5.4 Capteurs de vitesse . . . 36
5.4.1 Codeurs incrémentaux . . . 36
5.4.2 Tachymètres . . . 37
5.5 Capteurs de proximité . . . 37
5.5.1 Capteurs inductifs . . . 37
5.5.2 Capteurs à effet Hall . . . 37
5.6 . . . 38
5.7 Capteurs de couple . . . 39
5.7.1 Couplemètre par jauges de contraintes. . . . 39
5.7.2 Mesure d'angle de torsion . . . 39
5.8 Capteurs de débits et de niveaux . . . 40

6 Conclusions **40**

7 Bibliographie **41**

1 Introduction Générale

Ce cours a pour vocation de faire un état des lieux des systèmes électrotechniques dans leur environnement industriel. Nous allons donc essayer d'analyser les interactions entre les différentes parties d'un système industriel et donner par là-même les contraintes qui s'y appliquent. Le principal objet de ce cours concerne la conversion électromécanique ou force motrice mais nous allons étudier aussi des conversions de l'énergie électrique différentes. Dans tous les cas, c'est l'utilisation finale (la charge), qui sera notre point de départ. D'une manière générale, un processus industriel peut se définir de la façon suivante. Il est constitué de :

- un convertisseur électronique de puissance,
- un actionneur électrique,
- une charge,
- un équipement de commande.

Il est bon de considérer les actionneurs dans leur environnement. Le tableau suivant nous donne une organisation possible d'un processus industriel :

Actionneur	**Commande**	**Convertisseur**
Nature de la charge	Nature du processus	Nature de l'alimentation
Electro-mécanique	Communication	Source d'alimentation
Couple	Capteurs	Tension, Fréquence
Vitesse	Produit fabriqué	Réseau
Inertie	Critères d'optimisation	Qualité
Vibrations	Qualité	Perturbations
Limites	Nature du process	Imunité
Environ. Physique	**Environ. Economique**	**Environ. Electromagnétique**

TAB. 1 – L'actionneur dans son environnement : exemple de conversion électromécanique

Pour définir une fonction de conversion électro-physique de puissance, nous devons tenir compte :

- de l'application industrielle,
- de l'environnement dans lequel elle va fonctionner,
- de l'impact qu'elle va avoir sur cet environnement.

Coté utilisation : ce sont les caractéristiques physiques (par exemple régime permanent ou dynamique, inertie, jeu, raideurs pour un moteurs) qui vont définir la puissance de dimensionnement de l'actionneur et ses caractéristiques.

Coté environnement : on est amené à s'intéresser :

- aux aspects physiques (altitude, température, humidité, poussières, emplacement),
- aux aspects électriques (nature et caractéristique de la source d'alimentation, sensibilité aux perturbations électromagnétiques, niveau des perturbations au point de branchement),
- aux aspects communications (relation avec le réseau d'automatisme de l'entreprise),
- aux aspects qualité :
  - maintenance,
  - facilité d'exploitation,
  - performances économiques.

2 Présentation des machines

2.1 Généralités

2.1.1 Constitution

Les machines électriques sont constituées d'un stator et d'un rotor en matériaux ferromagnétiques. Entre ces deux parties se trouve l'entrefer qui est maintenu par des paliers ou roulements (figure 1)

Remarque : Les parties du moteur qui sont soumises à des champs variables

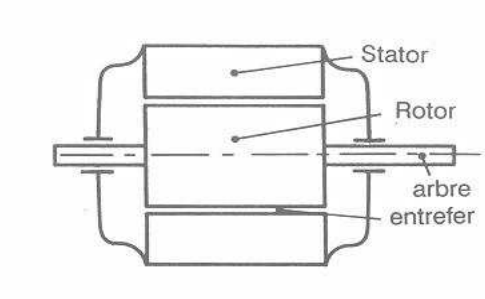

FIG. 1 – constitution d'une machine électrique

doivent être feuilletées pour diminuer les pertes par courant de Foucault.

2.1.2 Point de fonctionnement

La caractéristique mécanique (couple moteur en fonction de la vitesse C_m = f(N)) est donnée pour une machine en fonction de la tension et de la fréquence. En général, on a la courbe qui correspond à la tension et la fréquence nominales. La charge a elle aussi une caractéristique mécanique (C_r = f(N))

- La vitesse et le couple de la machine associée à sa charge sont donnés par le point d'intersection entre ces deux caractéristiques.
- A vitesse nulle, le couple moteur doit être supérieur au couple résistant pour que le moteur démarre.
- Le point de fonctionnement peut être stable ou instable.

2.1.3 Les quatre quadrants

Pour caractériser un entrainement, on utilise la notion de quadrants qui sont délimités par les axes de la courbe C = f(N).

- quadrant 1 : la machine fonctionne en moteur (C>0) un seul sens (N>0).
- quadrant 2 : la machine fonctionne en générateur (C<0) dans un seul sens (N>0).

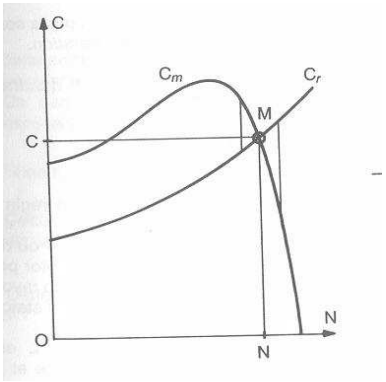

FIG. 2 – caractéristiques d'une machine asynchrone et sa charge

- quadrant 3 : la machine fonctionne en générateur (C<0) dans l'autre sens (N<0).
- quadrant 4 : la machine fonctionne en moteur (C>0) dans l'autre sens (N<0).

Remarque : On peut définir les quadrants de fonctionnement pour la machine seule ou pour la machine et son convertisseur.

2.2 La machine à courant continu

2.2.1 Construction

La figure 3 représente la coupe d'une machine à courant continu 4 pôles.

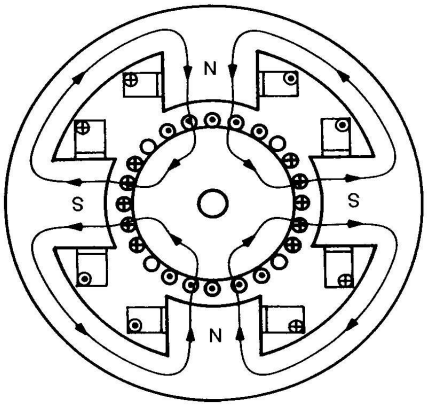

FIG. 3 – coupe d'une machine à courant continu

Inducteur et circuit magnétique L'inducteur se trouve sur le stator de la machine. Ici, nous avons 4 pièces polaires autour desquelles sont enroulés les inducteurs. Ces pôles sont reliés entre eux par la carcasse de la machine qui sert aussi à refermer le circuit magnétique. Le flux créé par les inducteurs circule donc dans les pôles, dans l'entrefer, dans le rotor ou induit et se referme par la carcasse de la machine.

Induit et collecteur Le bobinage de l'induit est formé de bobines d'un ou plusieurs tours dont les conducteurs sont parallèles à l'axe. Chaque enroulement a le même nombre de brins qui passent sous un pôle nord et un pôle sud. Le collecteur est formé de lames de cuivre isolées entre elles et reliées aux enroulements. Les balais en graphite frottent sur le collecteur et assurent le passage du courant dans l'induit et l'inversion du courant dans les brins.

2.2.2 Principales relations

Les principales relations qui nous intéressent pour ensuite commander le moteur et le piloter sont :

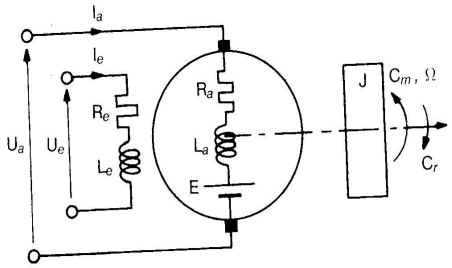

FIG. 4 – modèle électrique et mécanique

force électromotrice

$$E = \frac{p}{a} n N \phi \tag{1}$$

tensions vitesse

$$U_a = E + R_a I_a + L_a . \frac{dI_a}{dt} \tag{2}$$

$$N = \frac{U_a - R_a I_a}{\left(\frac{p}{a} n \phi\right)} \tag{3}$$

couple

$$C = \frac{EI}{2\pi N} = \frac{1}{2\pi}\frac{p}{a} nI\phi = C_r + J\frac{d\Omega}{dt} \tag{4}$$

rendement

$$\eta = \frac{U_a I_a - R_a I_a^2 - Pm - Pf}{U_a I_a + Pexc} \tag{5}$$

2.2.3 Le moteur à excitation indépendante

A partir de l'équation (2) des tensions, nous pouvons passer directement à la caractéristique du couple en fonction de la vitesse. En effet, le flux étant constant, le terme $\frac{p}{a} n\phi$ est constant donc N est proportionnel à E et C est proportionnel à I. Nous obtenons un réseau de droites parallèles qui correspondent à différentes valeurs de U.

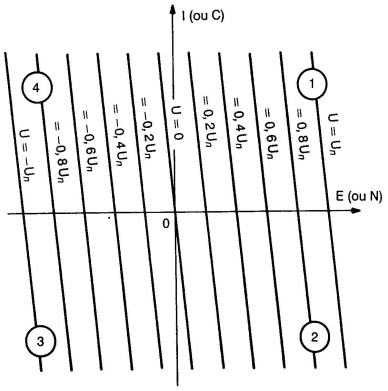

FIG. 5 – caractéristiques à flux constant d'une machine à courant continu

Fonctionnement dans le quadrant 1 Le démarrage doit se faire sous tension réduite car la machine est limitée par un courant maxi. Une fois que la machine a démarré, nous pouvons augmenter progressivement la tension jusqu'au point de fonctionnement nominal. Il n'y a pas de possibilités de freinage. L'arrêt se fera en roue libre.

Fonctionnement dans le quadrant 1 et 2 Le freinage est possible en se plaçant sur une caractéristique qui présente un couple négatif pour une vitesse donnée. Ainsi, la machine va être freinée.

Fonctionnement dans le quadrant 1 et 4 Dans des applications de levage où le couple de charge est constant, les quadrants 1 et 4 suffisent.

Fonctionnement dans le quadrant 1 à 4 Tous les quadrants sont accessibles. Le moteur et son éventuel convertisseur devront être complétement réversibles.

Fonctionnement à puissance constante Un fois la vitesse nominale atteinte, il y a la possibilité de diminuer le flux pour augmenter la vitesse. Ceci ne peut se faire qu'avec une diminution du couple. La vitesse ne doit pas dépasser une vitesse maxi liée à la construction de la machine. Les applications où ces survitesses sont possibles sont du type :

- Avance rapide de machine outils
- Bobineuse
- Laminoir

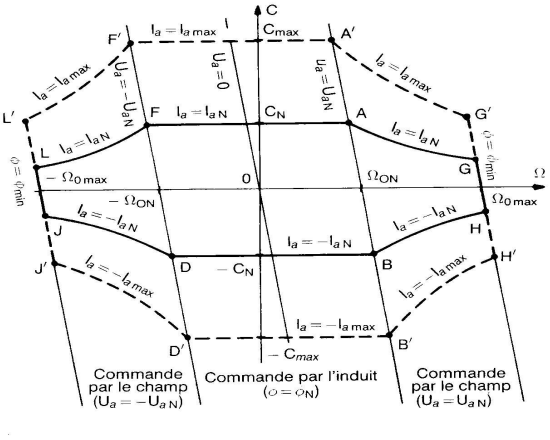

FIG. 6 – modes de fonctionnement possibles

2.2.4 Le moteur à excitation série

Dans un moteur à excitation série, l'inducteur est parcouru par le même courant que l'induit.

Passage dans les autres quadrants

Moteur série alimenté en alternatif

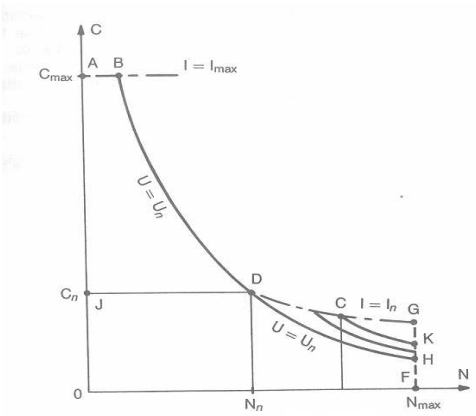

FIG. 7 – caractéristiques d'une machine à courant continu à excitation série

2.3 Commande du moteur à courant continu

2.3.1 Régulation de vitesse sous flux constant

Le schéma suivant figure (8) montre comment on réalise la régulation de vitesse d'une machine à courant continu. Il y a deux boucles imbriquées de vitesse et de courant. Comme les constantes de temps électrique et mécanique sont très différentes, la boucle interne de courant réagit plus vite que celle de vitesse. On voit qu'il faut un capteur de courant et un de vitesse dans ce type de régulation. L'étude détaillée de ces asservissements ne fait pas l'objet de ce cours.

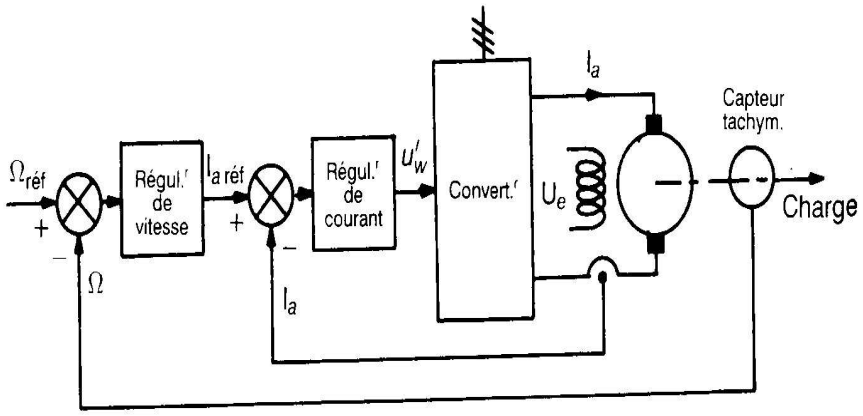

FIG. 8 – schéma de principe de la régulation de vitesse

2.3.2 Régulation de vitesse avec action sur le flux

Pour augmenter la plage de variation de vitesse, on peut être amené à agir sur le courant inducteur. Pour ce faire, on rajoute une boucle de courant sur l'inducteur qui est pilotée par une consigne de fem maximum.

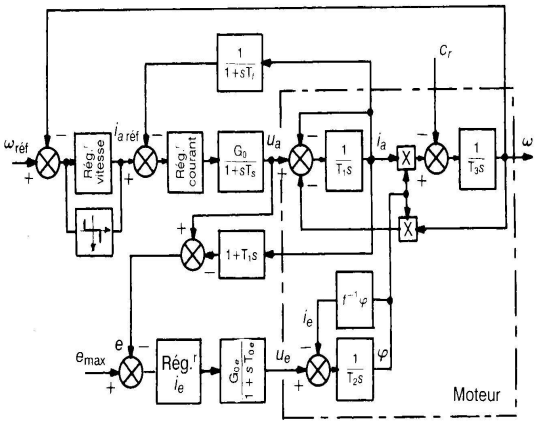

FIG. 9 – exemple de schéma de régulation avec action sur le flux

2.4 La machine synchrone

La figure (10) représente la coupe du stator d'une machine synchrone à deux paires de pôles

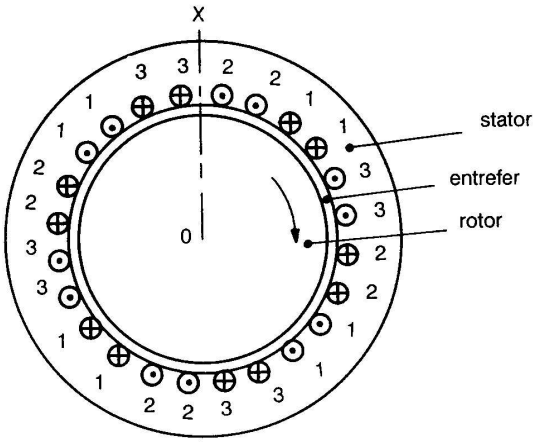

FIG. 10 – coupe du stator d'une machine synchrone

2.4.1 Le champ tournant

Les enroulements statoriques répartis géométriquement comme sur la figure (10) et parcourus par un système de courant triphasé créent un champ tournant à une vitesse angulaire qui dépend de la fréquence et du nombre de paires de pôles de la machine (ici 1500 tr/min). Ce champ tournant va entraîner le rotor à la vitessse de synchronisme. Le rotor doit donc créer un champ fixe par rapport à lui même qui va tourner à sa vitesse de rotation.

2.4.2 Construction

Il existe deux types principaux de rotors pour les machines synchrones.

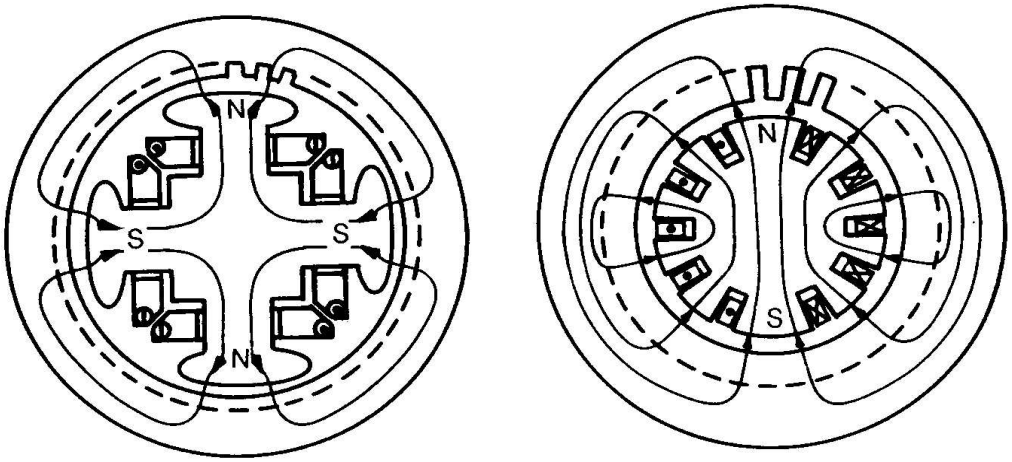

FIG. 11 – rotors d'une machine synchrone (a) pôle saillant (b) pôle lisse

2.5 Commande du moteur synchrone

2.5.1 Machine synchrone en régime établi

Le moteur synchrone alimenté par le réseau électrique a une vitesse qui dépend de la fréquence et du nombre de paire de pôles de la machine. Par exemple, une machine 4 pôles alimentée par le réseau 50 Hz va tourner à 1500tr/min. Pour faire varier sa vitesse, il va donc falloir faire varier la fréquence de l'alimentation statorique par un dispositif électronique de puissance. C'est ce que l'on appelle l'autopilotage.

2.5.2 Machine synchrone autopilotée

Le principe de l'autopilotage est d'asservir la vitesse du champ statorique à celle du rotor en maintenant un angle constant entre les deux. Cet angle s'appelle angle d'autopilotage (souvent noté δ).

2.5.3 Machine synchrone alimentée en courant ou tension

Pour réaliser l'autopilotage, on peut utiliser deux types de commandes :
- la commande par commutateur de courant,
- la commande par onduleur de tension.

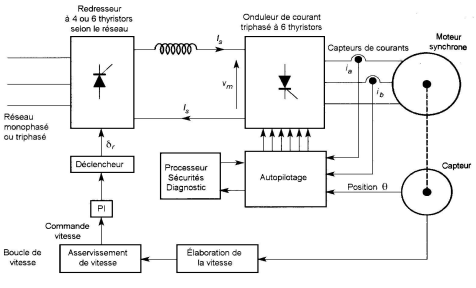

FIG. 12 – machine synchrone alimentée par un commutateur de courant

Cette forme d'alimentation (fig.12) est la plus courante pour les machines synchrones car il est possible de l'alimenter avec un commutateur de courant dont les composants ont une commutation commandée et l'autre naturelle. Il s'agit de thyristors qui présentent l'avantage de pouvoir transiter des puissances importantes à un faible coût. De plus, le montage complet redresseur-onduleur-machine est réversible et permet de récuperer l'énergie au freinage. On retrouve ce type de montage dans les applications de traction électrique.

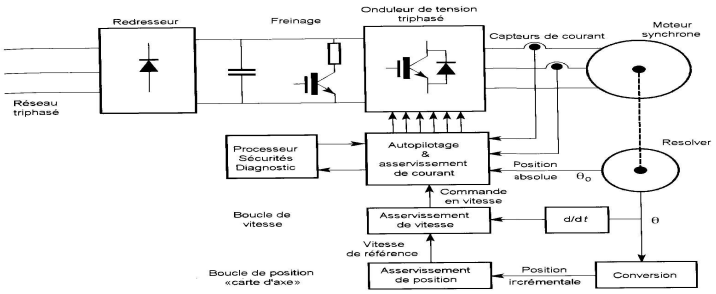

FIG. 13 – machine synchrone alimentée par un onduleur de tension

Ce type de commande est employé dans les applications de plus faibles puissances

où les interrupteurs de l'onduleur sont commandés à l'ouverture et la fermeture. Les applications principales sont les machines outils qui demandent une précision en vitesse et position et une grande souplesse de commande que permet ce type d'onduleur commandé en MLI (voir plus loin).

2.6 La machine asynchrone

2.6.1 Construction

Le moteur asynchrone est constitué d'un stator et d'un rotor séparés par un entrefer.

- le stator est analogue à celui des machines synchrones. Il porte un bobinage triphasé relié à la source d'alimentation.
- le rotor est cylindrique. Il est formé par un empillage de disques de tôles encochées sur leur périphérie. Dans les encoches, on place un bobinge polyphasé en court circuit.
- l'entrefer est plus étroit que dans les autres machines car il n'y a pas d'inducteur. La création du flux dans l'entrefer nécessite la consommation de puissance réactive prise à la source alimentant le stator.

2.6.2 Principales relations

Le rotor de la machine tourne à une vitesse différente de celle du champ statorique, d'où le nom de la machine. La différence de vitesse s'appelle le glissement et a pour expression :

$$g = \frac{\left(N - N'\right)}{N} = \frac{\left(\Omega - \Omega'\right)}{\Omega} \tag{6}$$

la fréquence des courants rotoriques a donc pour expression :

$$\omega_R = \omega.\frac{\left(\Omega - \Omega'\right)}{\Omega} = g.\omega \tag{7}$$

2.6.3 Alimentation à fréquence et tension constante

Le moteur asynchrone alimenté par le réseau électrique a une vitesse qui dépend de la fréquence et du nombre de paires de pôles de la machine ainsi que du couple opposé par sa charge. Par exemple une machine 4 pôles alimentées par le réseau 50 Hz va tourner à environ 1450tr/min, les 50 tr/min étant dûs au glissement. Pour faire varier sa vitesse, il va donc falloir faire varier la fréquence de l'alimentation statorique par un dispositif électronique de puissance. Comme le moteur asynchrone consomme obligatoirement de la puissnce réactive, son courant sera en retard sur la tension et l'utilisation de thyristors dans l'onduleur n'est pas possible comme avec la machine synchrone. Il y a donc obligation d'utiliser un onduleur de tension.

2.7 Commande du moteur asynchrone

2.7.1 Cascade hyposynchrone

Une des premières applications industrielles pour faire varier la vitesse de la machine asynchrone a été la cascade hyposynchrone. Ce principe nécessite un moteur à rotor bobiné. On modifie la caractéristique de la machine en agissant sur les courants rotoriques et on fait ainsi varier la vitesse. Ce montage est encore

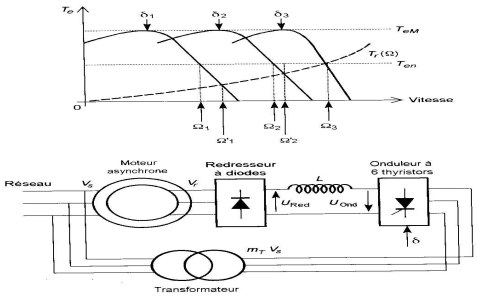

FIG. 14 – cascade hyposynchrone

utilisé industriellement mais a été avantageusement remplacé par des variateurs de vitesse.

2.7.2 Commande scalaire

La commande scalaire consiste à imposer la vitesse du champ statorique par un convertisseur de puissance. Le rotor va essayer de suivre cette consigne et sa vitesse dépendra du couple opposé par la charge. Il n'y a pas de capteurs de vitesse dans ce principe. Ce type de commande convient pour les applications où la précision sur la vitesse n'est pas importante et où le couple aux faibles vitesses est faible. On peut améliorer ce système en lui adjoignant un capteur de vitesse

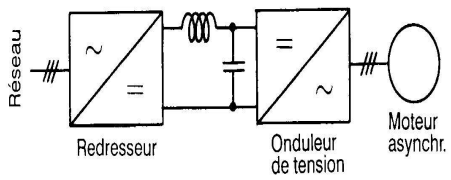

FIG. 15 – commande scalaire de la machine asynchrone

et donc un retour.

2.7.3 Commande vectorielle

La commande vectorielle consiste à se ramener à un système de vecteur tournant qui dissocie la création du flux et le couple. On essaye de se ramener à un modèle de machine à courant continu. Le schéma suivant montre que par des transformations mathématiques, on peut obtenir deux vecteurs I_{sx} etI_{sy} qui sont l'image d'un courant créant le flux et l'autre le couple. Le schéma de principe

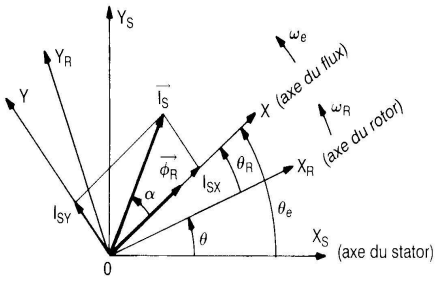

FIG. 16 – diagramme de la machine asynchrone

d'une telle commande est le suivant : La boucle de vitesse fournit une consigne de couple à la régulation de courant. Cette consigne représente l'amplitude du courant. La phase est donnée par la comparaison entre la position du flux statorique et la référence du flux rotor. Ensuite ces grandeurs deviennent les paramètres de la transformée de Park inverse pour élaborer les consignes de courants triphasés. Ces courants sont ensuite générés par l'onduleur.

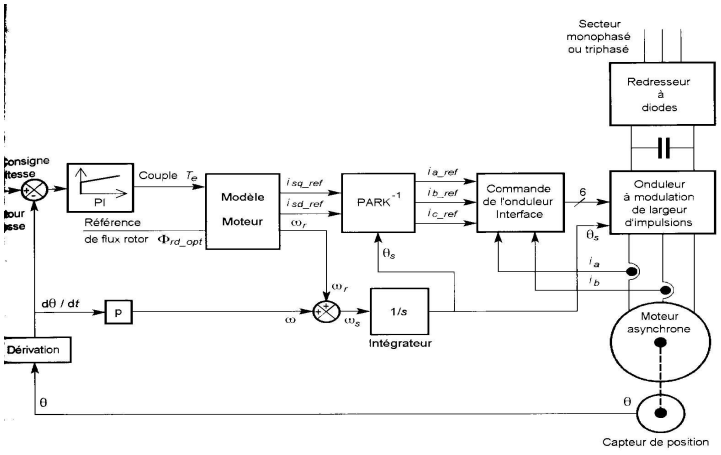

FIG. 17 – commande vectorielle

2.7.4 Commande directe du couple

A partir de modèles plus élaborés de la machine, les industriels ont développé une commande directe du couple qui se fait sans capteur de vitesse mais uniquement avec des informations sur les courants et les tensions de la machine. Ces informations sont comparées avec le modèle identifié de la machine pour élaborer les commandes du moteur.

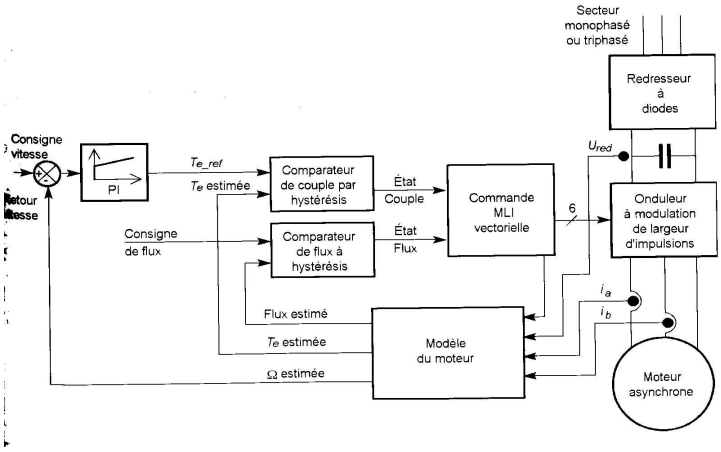

FIG. 18 – commande directe du couple

3 Les charges

3.1 Mouvement de translation et de rotation

Un solide de masse M qui se déplace en translation qui est soumis à une force F et à une force résistante F_r et se déplaçant à la vitesse v est régi par la loi :

$$F - F_r = M\frac{d^2v}{dt^2} \tag{8}$$

Pour un mouvement de rotation, cette équation devient :

$$C - C_r = J\frac{d^2\Omega}{dt^2} \tag{9}$$

où C est le couple moteur, C_r le couple résistant et J le moment d'inertie du solide.
Nous voyons, avec ces relations, que l'inertie d'un système doit être prise en compte dans les phases transitoires (démarrage et freinage).

3.1.1 Moment d'inertie et réducteurs

Les machines électriques entraînent leurs charge en rotation. Il est donc nécessaire de connaître le moment d'inertie ramené sur l'arbre du moteur pour pouvoir déterminer ses temps de démarrage et d'arrêt. Par exemple sur la figure 19 nous avons un entraînement avec sortie multiple. J_1, J_2, J_3 sont les moments d'inertie des trois lignes d'arbre qui tournent aux vitesses angulaires $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$. Sur la troisième ligne d'arbre, un câble soulevant une masse M_3 s'enroule sur un tambour de diamètre D_3.
La masse soulevée développe un couple résistant $M_3.g.\frac{D_3}{2}$.
Son moment d'inertie ramené sur l'arbre 3 est $M_3.g.\left(\frac{D_3}{2}\right)^2$. Nous en déduisons le moment d'inertie total ramené sur l'arbre du moteur.

$$J = J_1 + J_2.\left(\frac{\Omega_2}{\Omega_1}\right)^2 + \left[J_3 + M_3.\left(\frac{D_3}{2}\right)^2\right].\left(\frac{\Omega_3}{\Omega_1}\right)^2 \tag{10}$$

et le couple électromagnétique C du moteur

$$C = J.\frac{d\Omega_1}{dt} + M.\frac{D_3}{2}.g.\frac{\Omega_3}{\Omega_1} \tag{11}$$

Le moteur doit donc fournir un couple pour soulever la charge et pour vaincre l'inertie lors des phases transitoires.

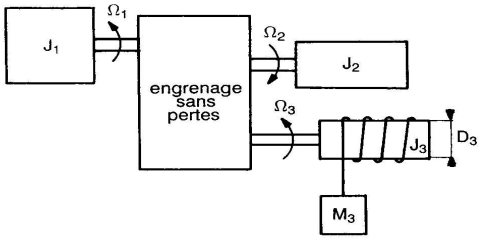

FIG. 19 – moteur avec réducteur et inertie

3.1.2 Caractérisation expérimentale

Pour déterminer l'inertie d'un système, nous proposons une méthode expérimentale qui peut s'appliquer dans de nombreux cas industriel. Tout d'abord, on mesure la puissance P consommée par le moteur entraînant la charge à diverses valeurs stabilisées de la vitesse Ω. On soustrait ensuite, les pertes présentes uniquement quand le moteur est alimenté (les pertes Joules dans le moteur par exemple). La puissance P_r, ainsi corrigée correspond au couple résistant total de l'ensemble moteur non alimenté.
On peut ainsi tracer la courbe $C_r\,(\Omega)$ représentée sur la partie gauche de la courbe de la figure 20. l'entraînement est alors conduit à une vitesse stabilisée Ω_0 puis

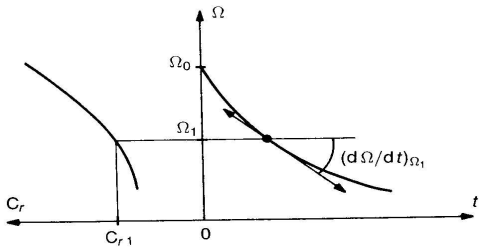

FIG. 20 – détermination expérimentale de l'inertie

on sépare le moteur de son alimentation. A partir de cet instant, on enregistre la variation de la vitesse en fonction du temps. pendant le ralentissement, dans l'équation (9) le couple C est nul, donc on en déduit J par la relation :

$$J = -\frac{C_{r1}}{(d\Omega/dt)_{\Omega_1}} \tag{12}$$

Pour plus de précision, on peut calculer J pour plusieurs points de la courbe et faire la moyenne.

3.2 Les charges industrielles

Les charges industrielles opposent des couples que l'on peut classer suivant plusieurs catégories.

- **Un couple résistant proportionnel au carré de la vitesse**
  - les pompes centrifuges
  - les compresseurs centrifuges
  - les ventilateurs
  - les pompes à vis
  - les centrifugeuses
- **Un couple résistant proportionnel à la vitesse**
  - les presses
  - les calandres
  - les freins à courant de Foucault
  - les machines outils
- **Un couple résistant constant**
  - les compresseurs et les pompes à pistons
  - les engins de levage et manutention
  - les bandes transporteuses
  - les broyeurs et concasseurs
- **Un couple résistant inversement proportionnel à la vitesse**
  - les bobineuses
  - les tours
  - les dérouleuses à bois

Dans la réalité, ces caractéristiques diffèrent dans les basses vitesses essentiellement à cause des couples de frottement ou couple de décollage. Les caractéristiques réelles demandent une étude mécanique approfondie qui sort du cadre de ce cours.

3.2.1 Démarrage freinage

Les constructeurs définissent trois grandeurs :

- la constante d'inertie définie par le rapport $H = \frac{1}{2}.J.\frac{\Omega_n^2}{S_n}$ qui ne prend en compte que les caractéristiques du moteur.
- la constante de temps d'accélération $T_a = \frac{2.H}{\eta_n cos\varphi_n}$
- le facteur d'inertie $FI = \frac{J_1+J_2'}{J_1}$ où J_1 est l'inertie du rotor et J_2' l'inertie de la charge ramenée sur l'arbre.

D'après l'équation (9) le temps de démarrage peut se caculer par l'équation :

$$t_d = J.\int_0^{\Omega_n} \frac{d\Omega}{dt} \tag{13}$$

Pour simplifier, on peut calculer un couple d'accélération $C_a = C - C_r$ et sa valeur moyenne pendant la phase d'accélération.

$$C_{a_{moy}} = \frac{1}{\Omega_n}\left[\int_0^{\Omega_n} C.d\Omega - \int_0^{\Omega_n} C_r.d\Omega\right] \tag{14}$$

ainsi que le temps de démarrage

$$t_d = \frac{J.\Omega_n}{C_{a_{moy}}} \tag{15}$$

A partir des grandeurs définies plus haut, on obtient une formule empirique simple qui permet d'estimer le temps de démarrage :

$$t_d = H.FI.\frac{C_{moy}}{C_{moy} - C_{r_{moy}}} \tag{16}$$

Remarque : Pour le freinage, les équations sont les mêmes mais le couple électromagnétique doit être négatif pour freiner la charge.

4 Fonction de conversion de puissance

4.1 Redresseurs

Les convertisseurs alternatif-continu sont appelés redresseurs.

4.1.1 Redresseurs commandés

Les redresseurs utilisés pour la variation d'énergie (vitesse ou autre) sont obligatoirement commandés. Le réseau triphasé est en général la source pour des convertisseurs de forte puissance. Nous avons ici, figure 21, les formes d'ondes pour un redresseur triphasé où tous les interrupteurs sont commandés. La valeur

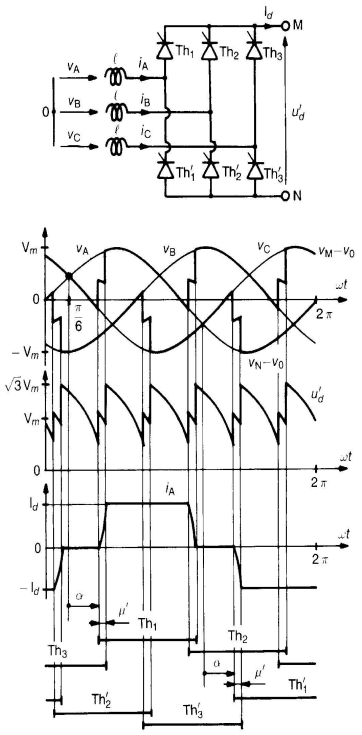

FIG. 21 – redresseur triphasé et courbes pour un pont complet

moyenne de la tension redressée est de :

$$U_{d0} = \frac{6}{\pi} V_m sin\left(\frac{\pi}{3}\right) cos\left(\psi\right) = 1,654.V_m.cos\left(\psi\right) \tag{17}$$

Cette valeur est théorique et on doit tenir compte des chutes de tension suivantes :

- empiètement,
- semi-conducteurs
- enroulements du transformateur

4.1.2 Groupements et variantes

Pour des raisons économiques, on utilise parfois des ponts mixtes figure 22, (la moitié des interrupteurs sont des thyristors et l'autre des diodes). Ces ponts

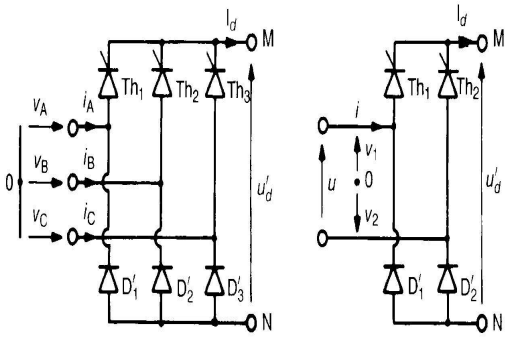

FIG. 22 – ponts mixtes triphasé et monophasé

peuvent être mono ou triphasés. Pour le pont triphasé, la tension moyenne redressée est de :

$$U'_{d0} = \frac{6}{\pi} V_m sin\left(\frac{\pi}{3}\right)\left[\frac{1+cos\,(\psi)}{2}\right] = 1,654.V_m.\left[\frac{1+cos\,(\psi)}{2}\right] \qquad (18)$$

Le pont mixte introduit des harmoniques supplémentaires par rapport au pont

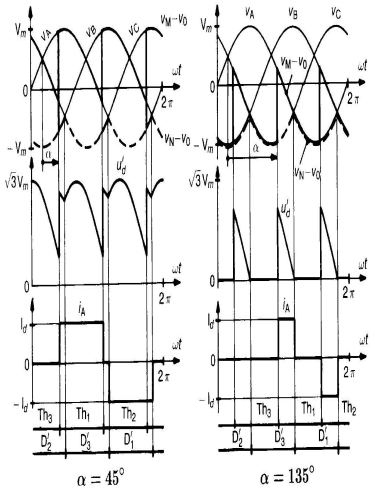

FIG. 23 – courbes pour un pont mixte triphasé

complet et on évitera de l'utiliser quand cela pose un problème sur le réseau.

groupement en anti-parallèle Dans certaines applications, on utilise des groupements de redresseurs soit pour obtenir la réversibilité de la machine (figure 24), soit pour diminuer les harmoniques prélevées sur le réseau (figure 26).

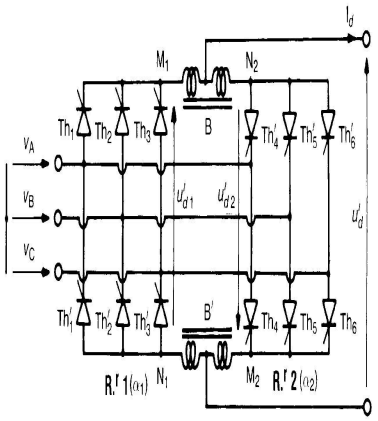

FIG. 24 – groupement en anti-parallèle

Le groupement en anti-parallèle permet au courant continu de circuler dans les deux sens. Comme le convertisseur est réversible en tension, nous avons ici un fonctionnement possible dans les quatre quadrants.

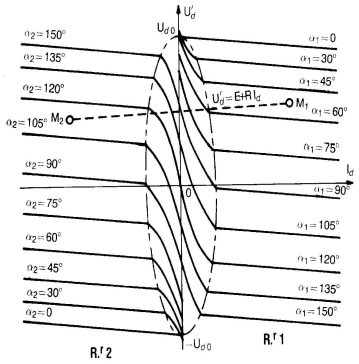

FIG. 25 – courbes pour un groupement en anti-parallèle

groupement en série Le fait d'associer plusieurs redresseurs en série permet de diminuer les contraintes en tension sur les semi-conducteurs mais aussi de réduire les harmoniques en couplant les sorties du transformateur de différentes façons. Un des enroulements est couplé en étoile et l'autre en triangle. Ceci donne des systèmes triphasés décalés et donc des instants de commutation séparés entre

les deux ponts. La forme du courant prélevé au réseau est plus proche d'une sinusoïde.

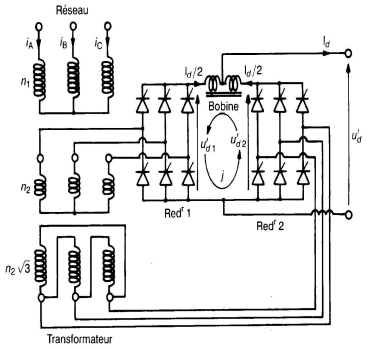

FIG. 26 – groupement en série

4.2 Gradateurs

Le gradateur est un convertisseur alternatif-alternatif qui donne en sortie une tension alternative :

- de même fréquence que la tension d'entrée,
- dont on peut réduire la valeur efficace de façon continue.

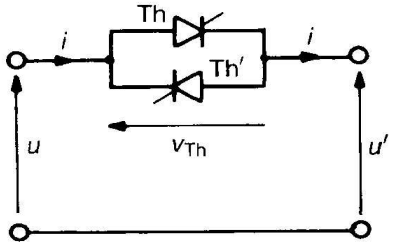

FIG. 27 – gradateur monophasé

Il existe deux façons classiques de commander un gradateur :

- commande par angle de phase,
- commande par train d'onde. La figure 28 nous donne les chronogrammes pour la commande par phase sur une charge R,L.

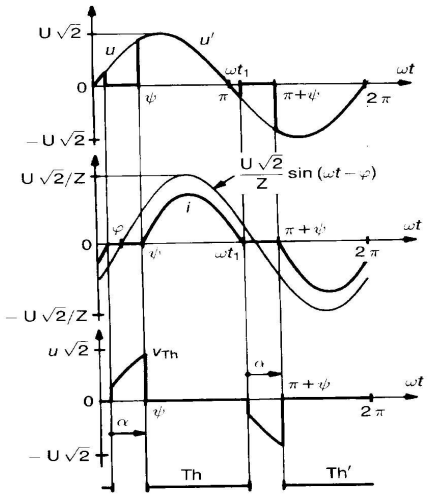

FIG. 28 – courbes du gradateur monophasé

En triphasé, on peut utiliser les gradateurs pour démarrer progressivement une machine asynchrone. Le couplage étoile est le plus utilisé à cause des moindres

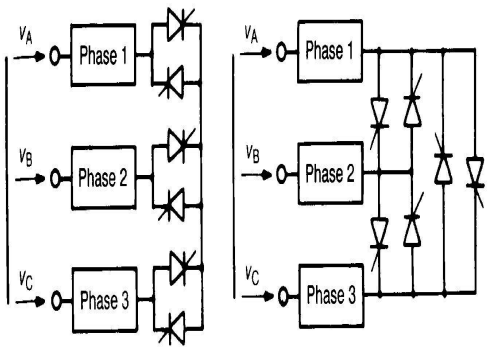

FIG. 29 – gradateur triphasé

harmoniques qu'il engendre. La figure 30 nous donne les chronogrammes pour la commande en triphasé du gradateur.

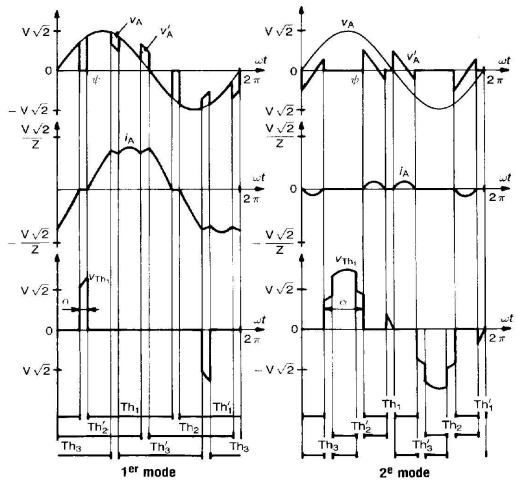

FIG. 30 – courbes du gradateur triphasé

4.3 Hacheurs

Les hacheurs font partie de la famille des convertisseurs continu-continu.

4.3.1 Hacheurs non réversibles

Les hacheurs non réversibles ont deux interrupteurs. Un des interrupteurs est commandé à l'amorçage et au blocage et l'autre est à commutation naturelle. La figure 31 nous montre les deux principaux hacheurs utilisés, à savoir, le hacheur série et le hacheur parallèle. le hacheur série est abaisseur, c'est à dire que sa

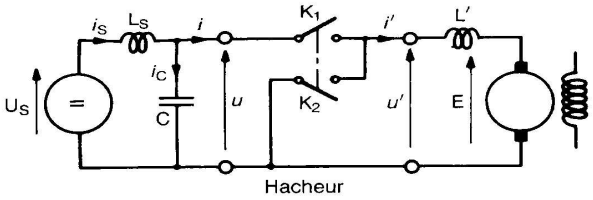

Figure 5.1

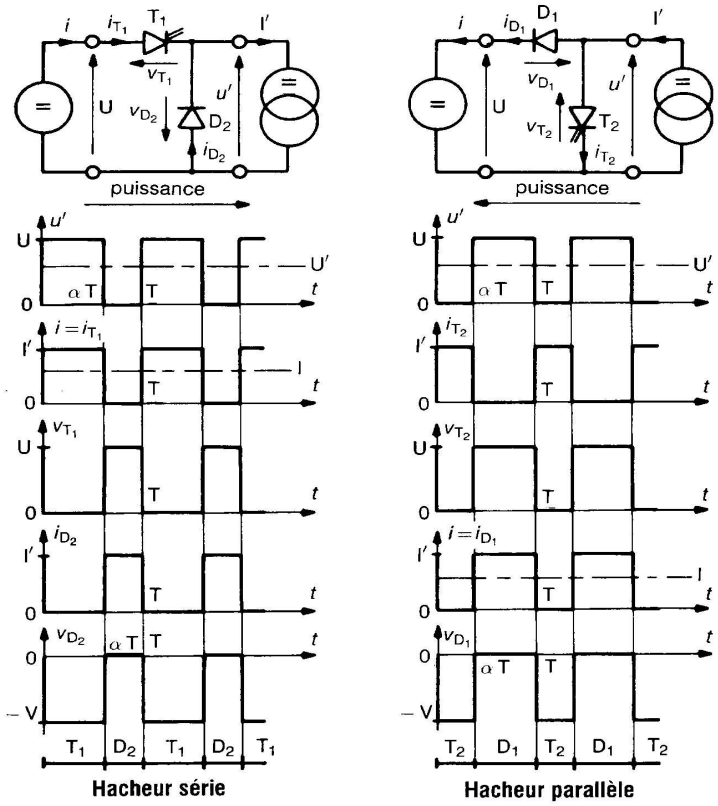

FIG. 31 – hacheurs série et parallèle

tension de sortie est infèrieure à celle d'entrée, alors que le hacheur parallèle est élévateur.

4.3.2 Hacheurs réversibles

On entend par hacheur réversible, les hacheurs qui offrent la possibilité d'inverser le sens de la tension, du courant ou des deux. Dans ce cas, le transfert d'énergie peut se faire dans les deux sens, à savoir, de la source vers la charge ou l'inverse. Le hacheur de la figure (32)est reversible à la fois en tension et en courant. On l'appelle hacheur quatre quadrants.

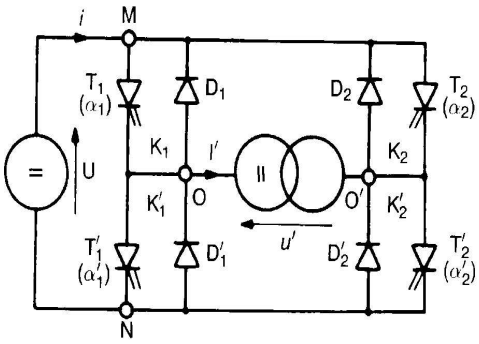

FIG. 32 – hacheurs réversibles

4.3.3 Groupements de hacheurs

Pour diminuer le taux d'ondulation des courants de sortie, on utilise des montages hacheurs entrelacés. Ce sont deux hacheurs, ou plus, qui fonctionnent de manière synchrone mais décalée pour partager les puissances mises en jeu.

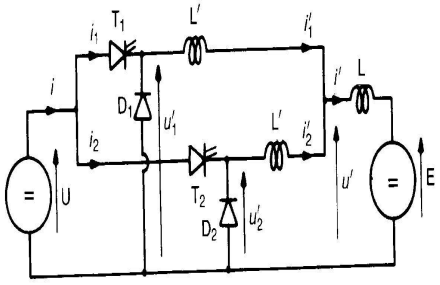

FIG. 33 – hacheurs séries entrelacés

4.4 Onduleurs

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion de l'énergie de forme continue à la forme alternative. On distingue deux type d'onduleurs :

- **Les onduleurs de tension** qui partent d'une source de tension continue et impose à la charge une tension alternative (en général en créneaux)
- **les commutateurs de courant** qui partent d'une source de courant continue et impose à la charge un courant alternatif (en général en créneaux)

Ces onduleurs, peuvent fonctionner à la fréquence imposée à la charge, on parle alors d'un créneau par alternance ou à une fréquence supérieure et on parle alors de MLI (Modulation de largeur d'impulsions).

4.4.1 Onduleur de tension à un créneau par alternance

Ces onduleurs sont utilisés pour des applications de forte puissance. Le fait de ne commuter qu'une fois par alternance limite les pertes dans les composants actifs. Lors du fonctionnement en pleine onde, on ferme chaque interrupteur pendant la moitié de la période T des tensions alternatives de sortie. Pour que ces tensions forment un système de tensions triphasées équilibrées, on décalent les commandes des phases successives de un tiers de période ou à l'échelle de la pulsation ω, des fondamentaux de ces tensions de $\frac{2\pi}{3}$.

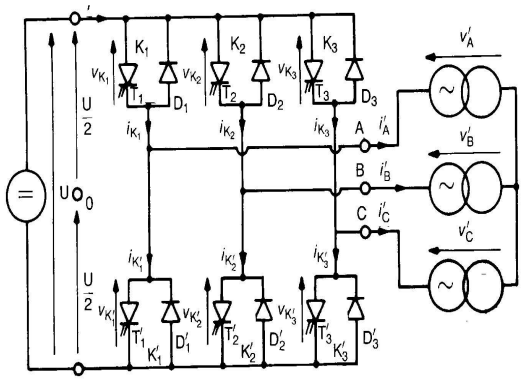

FIG. 34 – onduleur un créneau par alternance

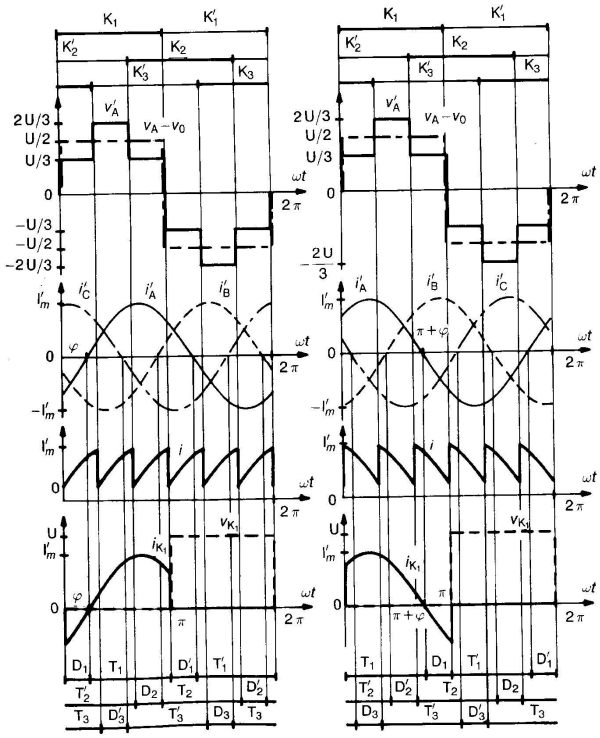

FIG. 35 – onduleur un créneau par alternance

4.4.2 Onduleur MLI

La modulation de largeur d'impulsion (MLI) permet de contrôler plus efficacement une charge avec un convertisseur statique. Le principe est de suivre une consigne (par exemple une sinusoïde) en la comparant avec un signal triangulaire pour générer les instants de commutation des interrupteurs (fig(36). Lorsque la consigne est au-dessus du triangle, c'est l'interrupteur du haut qui est commandé et lorsque la consigne est au-dessous du triangle, c'est l'interrupteur du bas qui est commandé.

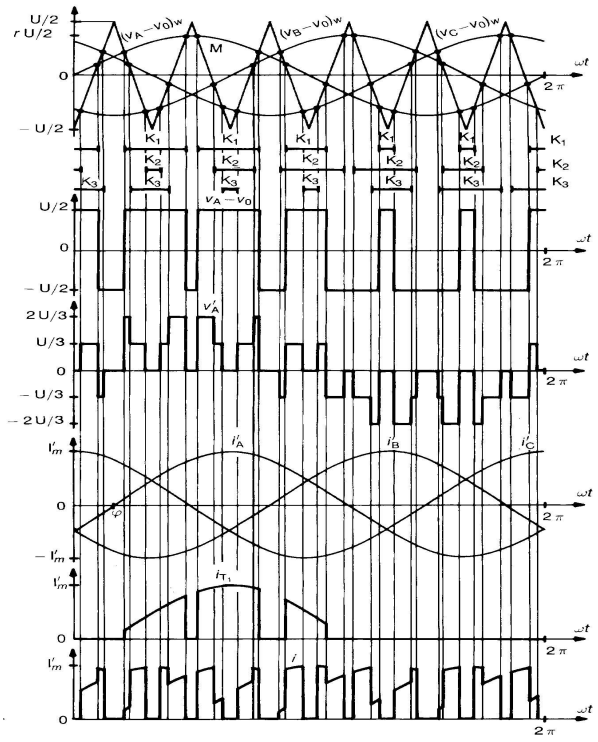

FIG. 36 – Modulation de largeurs d'impulsions

4.4.3 Onduleur multi-niveaux

Les onduleurs multi-niveaux ont été mis au point pour avoir des formes d'ondes de sortie plus proches des formes souhaitées que les créneaux et pour pouvoir augmenter la tension de sortie en associant plusieurs transistors en série.

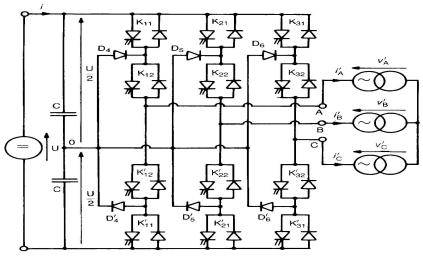

FIG. 37 – Onduleur multi-niveaux

5 Les capteurs

5.1 Généralités

Un capteur est un système qui permet d'obtenir une image sous forme en général électrique, d'une grandeur physique. On appelle :

- m le mesurande c'est à dire la grandeur physique à mesurer.
- s la grandeur de sortie du capteur.

La chaine de mesure du capteur nous donne une fonction entre ces deux grandeurs qui est caractérisée par les notions suivantes :

- linéarité
- bande passante, temps de réponse
- vieillissement
- sensibilité
- sensibilité aux perturbations
- étalonnage

Ces capteurs fonctionnent sous différents principes physiques et sont, soit actif soit passifs. Dans le cas des capteurs passifs, on utilise souvent un conditionnement qui permet d'améliorer toutes les caractéristiques ci-dessus.

5.2 Capteurs de température

Un grand nombre de lois physiques sont sensibles à la température. C'est pourquoi il existe une grande diversité de types de capteurs de température.

5.2.1 Mesure par thermocouple

Un thermocouple est constitué de deux conducteurs A et B formant entre eux deux jonctions aux températures T_1 et T_2. La première température est connue et sert de référence et l'autre est placée dans le milieu étudié et représente la température inconnue. Il apparaît une différence de potentiel entre les deux électrodes qui est fonction de la différence de température et du couple de métaux utilisé.

5.2.2 Thermométrie par diodes et transistors

Une jonction silicium diode ou transistor alimenté par un courant constant donne une tension proportionnelle à la température. On utilise cette propriété pour fabriquer des capteurs. En général, on ajoute un circuit intégré pour conditionner le capteur. Il existe aussi des circuits intégrés permettant d'enregistrer la température sur une période longue. Cela est utilisé dans les systèmes de contôle de la chaîne du froid en introduisant le capteur dans le produit au début de la chaîne (abattoir) et en lisant les données à la fin (magasin).
Il existe auusi des mesures de température basées sur la mesure du bruit de fond qui représente l'agitation thermique des électrons dans un matériau. On peut

FIG. 38 – exemple de thermocouples industriels

aussi citer les mesures par quartz dont la fréquence de résonnance dépend de la température.

5.3 Capteurs de position

En génie électrique, on utilise les capteurs de position pour obtenir une position absolue, que ce soit en linéaire ou en angle. Les capteurs de positions relatives seront traités comme capteurs de vitesse.

5.3.1 Capteurs potentiométriques

Un potetiomètre linéaire ou rotatif permet si il est alimenté de déterminer la position. En rotation, ce principe peut être utilisé si le système tourne lentement car le frottement du capteur impose une usure. Nous avons ici plusieurs capteurs

FIG. 39 – exemple de potentiomètre rotatifs

de position angulaire. Ce sont des potentiomètres qui n'ont pas de butée de fin de course.

5.3.2 Resolver

Le resolver est un capteur de position angulaire sans contact. Il est utilisé dans les applications d'autopilotage des machines synchrones. Le principe est d'avoir deux enroulements statoriques à angle droit et deux rotoriques également à angle droit. En alimentant un des enroulements rotoriques en alternatif et en court-circuitant l'autre, les enroulements statoriques sont le siège de fem modulée par des fonctions de $sin(\theta)$ et $cos(\theta)$. On récupère ces informations pour élaborer la position du rotor.

5.3.3 Capteur digitaux

Le principe est de coder la position sur un certain nombre de bits (fig40) pour obtenir un nombre fini de position. En augmentant le nombre de bits, on augmente la précision du capteur. Les capteurs classiques sont codés sur 10 bits (1024 positions) et les plus sophistiqués sur 12 bits (4096 positions). Au delà, la précision des secteurs devient difficile à lire même pour un capteur optique par diode et phototransistor.

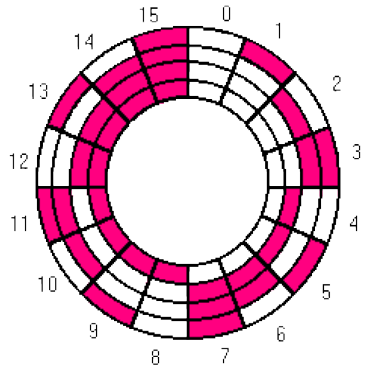

FIG. 40 – exemple de codage sur 4 bits

5.4 Capteurs de vitesse

Les capteurs de vitesse permettent de mesurer une vitesse ou une position relative entre deux points.

5.4.1 Codeurs incrémentaux

Les codeurs incrémentaux sont utilisés dans les applications de commande des machines asynchrones. Trois sorties sont utilisées (A,B,Top0). Les voies A et B sont une succession de 0 et 1. Le codage se fait en comptant les impulsions.

Un décalage entre les deux voies permet de connaître le sens de rotation de la machine. Le Top0 recale à chaque tour la position initiale en cas de raté pendant un tour. Les codeurs classiques sont codés sur 10 bits (1024 positions) et les plus sophistiqués sur 12 bits (4096 positions). Selon le même principe du comptage, on utilise des capteurs de proximité avec des roues crantées. Ce système ne permet pas de connaître le sens de rotation mais est utilisé dans les systèmes ABS.

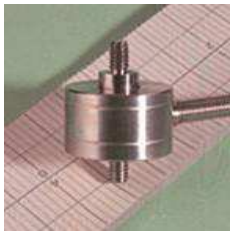

FIG. 41 – codeur incrémental 1024 points

5.4.2 Tachymètres

Un machine à courant continu à excitation par aimant délivre à vide une fem proportionnelle à la vitesse. On l'appelle Dynamo tachymétrique. Son principal inconvénient, comme toutes les machines à courant continu, est le frottement des balais sur les collecteurs qui provoque une usure importante.
Une variante est l'alternateur tachymétrique qui délivre trois tensions sinusoïdales décalées de $\frac{2.\pi}{3}$ et dont la tension est proportionnelle à la vitesse. La précision de ce type de capteur est moins grande que celle de la dynamo tachymétrique.

5.5 Capteurs de proximité

5.5.1 Capteurs inductifs

Pour repérer des pièces sur un système en mouvement, on utilise des capteurs de proximité à réluctance variable. La présence d'une pièce métallique modifie la réluctance du circuit magnétique du capteur et donc sa réponse à une fréquence d'entrée.

5.5.2 Capteurs à effet Hall

Dans ce cas, il s'agit de mesurer un champ magnétique qui est crée par un aimant (pièce à repérer) ou un inducteur (fonctionnement d'une machine électrique ou d'un transformateur). La plaque en semi-conducteur à effet Hall (fig42) placé dans un champ magnétique B voit apparaître à ses bornes une tension proportionnelle au champ. Ces dispositifs sont trés utilisés en Electrotechnique en particulier dans les capteurs de courant (voir 5.6)

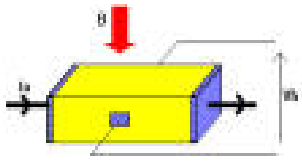

FIG. 42 – capteur à effet Hall

5.6 Capteurs de courant

Pour des faibles puissances mises en jeu (inférieures à 100W et tension inférieure à 50V), on utilise un shunt qui est une résistance calibrée de faible valeur. Au-delà on utilise soit un transformateur de courant pour la composante alternative soit l'effet hall pour la composante continue soit les deux pour des signaux quelconques.
La figure 43 nous donne le principe d'un tel capteur.
Le flux magnétique créé par le circuit primaire (gros fils) est compensé à l'aide

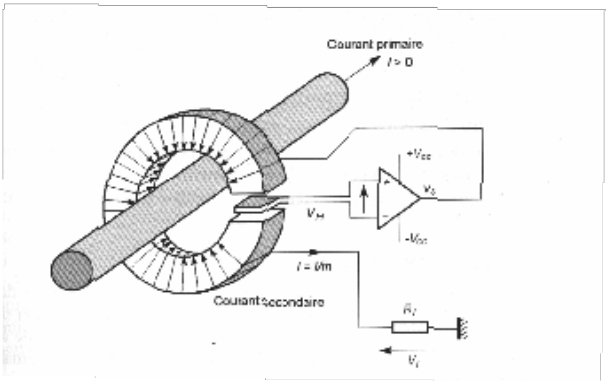

FIG. 43 – capteur à effet Hall

d'une bobine secondaire grâce à une cellule à effet Hall associée à un circuit électronique. Le circuit magnétique (tore ferrite) permet de canaliser le flux créé dans la bobine secondaire et de mesurer la composante alternative. Le courant secondaire est fourni par l'amplificateur opérationnel (lui même alimenté par deux sources de courant continu) qui assure un fonctionnement du tore à flux nul (pas de saturation). Ce montage est communément appelé "pince ampèremétrique". Le rapport du nombre de spires primaires et secondaires donne l'amplification de ce capteur.

5.7 Capteurs de couple

Pour mesurer le couple entre une machine électrique et sa charge, on utilise un capteur de couple monté sur l'arbre de transmission. Cela implique qu'une partie du capteur soit en rotation pour la mesure et l'autre fixe pour le traitement. Les couplemètres sont donc des éléments mécaniques relativement onéreux.

5.7.1 Couplemètre par jauges de contraintes.

Sur l'accouplement entre la machine et la charge, il y a en générale une partie élastique pour assurer la transmission des efforts sana accoup. On place alors entre ces deux parties des jauges de contraintes pour mesurer la force exercée. Cela est ensuite transmis à la partie fixe et traduit en signal image du couple.

FIG. 44 – capteur de couple

La figure 44 nous donne un exemple d'un tel capteur.

5.7.2 Mesure d'angle de torsion

Pour mesurer le couple, on utilise la déformation d'un axe en torsion entre ses deux extrémités.

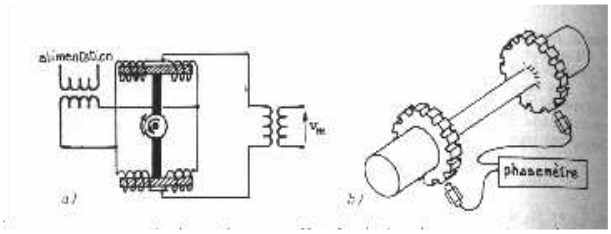

FIG. 45 – capteur de couple par mesure d'angle

L'avantage de ce type de couplemètre est qu'il n'y a pas de contact entre les parties fixes et tournantes. La précision dépend de la qualité de la réalisation mécanique et donc du prix.

5.8 Capteurs de débits et de niveaux

Il est souvent utile de mesurer des débits de fluide. Pour l'air ou les gaz on utilise en général des anémomètres (figure 46). Cette mesure peut fortement être perturbée par les turbulences autour de l'endroit de la mesure.

FIG. 46 – anémomètre

Pour mesurer les débits de fluide, le principe est le même mais le capteur occupe toute la canalisation et la mesure est plus précise.
Pour mesurer les niveaux, on utilise plusieurs techniques :

- mesure de la position d'un flotteur (1 ou 2 sondes conductrices)
- mesure de la force exercée par le flotteur (capteur de contrainte)
- mesure de la différence entre deux pressions (enceinte fermée)

6 Conclusions

Ce cours a permis de donner un aperçu de toute la chaîne partant de l'exploitation de l'énergie électrique vers son utilisation contrôlée. L'ingénieur aura donc une image globale de tous ces éléments et de l'interaction entre eux. Pour plus de détail, il faudra se reporter à la littérature plus complète et trouver en fonction de son application, les meilleurs compromis de choix. Tous ce qui est décrit dans ce cours fait appel à des notions de physique dans un plan très large et nous ne montreons que la partie utilisation technologique de ces concepts. Des exemples concrets de dimensionnement de matériel vont venir étayer ce cours sous forme de TD ainsi qu'une série de Travaux Pratiques pour mettre en oeuvre et illustrer ces techniques.

7 Bibliographie

Références

[1] Georges ASCH & Collaborateurs, *Les capteurs en instrumentation industrielle*, Dunod 5^{me} édition 1999 ISBN 2 10 004758 2.

[2] Michel PINARD , *Commande des moteurs électriques*, Dunod collection l'usine nouvelle 2004 ISBN 2 10 005326 4.

[3] Jean Bonal & Guy SEGUIER, *Entrainements électriques à vitesse variable* Tome 1, collection Schneider 1997 ISBN 2 7430-0138-0.

[4] Jean Bonal & Guy SEGUIER, *Entrainements électriques à vitesse variable* Tome 2, collection Schneider 1998 ISBN 2 7430-0185-2.

[5] Jean Bonal & Guy SEGUIER, *Entrainements électriques à vitesse variable* Tome 3, collection Schneider 1998 ISBN 2 7430-0186-0.

[6] Jean-Paul FERRIEUX & François FOREST, *Alimentations à découpages : principe et fonctionnement*, Dunod 3^{me} édition 2000 ISBN 2 10 004

[7] Pierre MAYE, *Moteurs électriques pour la robotique*Tome 3, collection DUNOD ISBN 2 10 005960 2.