

LA VARIATION DE VITESSE DES MOTEURS A COURANTS ALTERNATIFS

L'essentiel du marché actuel de la variation de vitesse des machines utilise des moteurs à courant continu (MCC) qui sont, par nature, des machines à vitesse variable.

Cependant, les moteurs à courants alternatifs (MCA) sont de plus en plus utilisés à vitesse variable car ils permettent de dépasser les limites des MCC.

Cette évolution se poursuit grâce aux développements de l'électronique de puissance.

L'utilisation des moteurs alternatifs pour régler la vitesse s'impose :

- dans les applications nécessitant des performances allant au-delà des limites imposées par l'existence du collecteur des MCC :
 - Atmosphères poussiéreuses, explosives ou corrosives,
 - Difficultés d'accès du moteur pour son entretien,
 - Cas des grands couples : le MCC est limité en courant, donc en couple, qui peut transiter par son collecteur,
 - Cas des grandes vitesses (à grande puissance) : la vitesse périphérique du collecteur est limitée.

- dans le cadre des recommandations d'économie d'énergie.

Quand l'énergie était bon marché, un MCA à vitesse fixe était un moindre investissement. On pouvait obtenir des paliers de vitesse, et même une certaine plage à vitesse variable, en dissipant de l'énergie (résistances électriques, freins à courants de Foucault, coupleurs à glissement, ...).

Le coût actuel de l'énergie tend à revaloriser la variation de vitesse des MCA par suite des économies d'énergie qu'elle peut entraîner.

En effet, dans de nombreux organes centrifuges (pompes, ventilateurs, compresseurs ...), le débit doit être réglé.

- *si l'organe est entraîné à vitesse constante : ce réglage se fait en créant dans le circuit une perte de charge variable à l'aide d'une vanne, par exemple, mais le rendement est mauvais.*
- *si l'organe est entraîné à vitesse variable : le rendement est toujours optimal.*

Le calcul économique montre que le surinvestissement lié au dispositif de variation de vitesse s'amortit en trois ans environ.

Dès lors que le MCA, synchrone ou asynchrone, est installé et qu'on désire régler et contrôler sa vitesse pour consommer moins d'énergie, on peut intercaler, entre le réseau et le moteur existant, un équipement électronique de réglage de vitesse.

- dans le cas de marche en synchronisme de plusieurs moteurs en parallèle.

C'est le cas avec un réseau à fréquence variable alimentant des moteurs synchrones tournant rigoureusement en synchronisme, ou asynchrones en fonctionnement "pseudo-synchrone".

Avec des MCC, à partir d'une même tension d'induit, on n'a pas nécessairement la même vitesse sur les machines si le couple est différent sur ces machines.

En fait, les deux solutions, MCC et MCA, sont plus complémentaires que concurrentes. Le choix dépend, avant tout, des caractéristiques recherchées, des performances demandées et des conditions d'emploi.

Après le rappel de quelques notions fondamentales, nous examinerons l'influence des divers paramètres de la variation de vitesse des MCA (tension statorique, courant rotorique, fréquence d'alimentation), et étudierons les solutions électroniques de ces divers procédés.

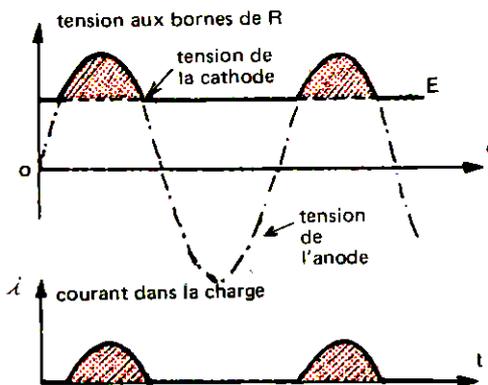
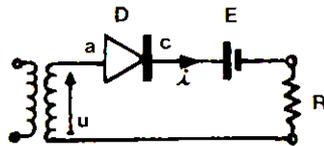
Chaque solution présente des performances, des avantages, des inconvénients. Leur étude permet de guider l'utilisateur dans le meilleur choix de la solution recherchée.

SOMMAIRE

| | Pages |
|---|----------|
| • On commencera par le rappel de quelques notions fondamentales | 3 à 14 |
| • On étudiera respectivement : | |
| A ● Les équipements, pour MCA, à fréquence fixe au stator et dont on fait varier la vitesse : | |
| A.1 - par variation de la tension statorique : le GRADATHYR | 15 à 19 |
| A.2 - par variation du courant rotorique sans récupérer l'énergie rotorique de glissement : le ROTOMAT | 20 à 22 |
| A.3 - par variation du courant rotorique en récupérant l'énergie rotorique de glissement : le VAROTOR | 23 à 27 |
| B ● Les équipements, pour MCA, dont on fait varier la vitesse par la variation de la fréquence au stator de la machine : | |
| B.1 - par conversion directe de la fréquence : le CYCLOCONVERTISSEUR | 29 à 37 |
| B.2 - par conversion indirecte de la fréquence (boucle intermédiaire à courant continu) : ONDULEUR AUTOSYNCHRONE autopiloté par le moteur synchrone | 38 à 49 |
| B.3 - par conversion indirecte de la fréquence (boucle intermédiaire à courant continu) : ONDULEUR AUTONOME à commutations forcées | 51 à 70 |
| C ● Tableaux de synthèse rappelant : | |
| • les possibilités actuelles des convertisseurs et des MCA | 71 et 72 |
| • les principes généraux des équipements à vitesse variable des MCA | 73 |
| • leurs caractéristiques générales | 74 |
| • leurs critères et domaines d'application, les références CGEE ALSTHOM DEI | 75 |
| D ● Annexe : les représentations commerciales de CGEE ALSTHOM, Division des Ensembles Industriels DEI, en France et dans le monde | 77 à 79 |

RAPPEL DE QUELQUES NOTIONS FONDAMENTALES

1 • CONDITIONS DE CONDUCTION D'UN SEMI-CONDUCTEUR



La diode conduit quand $u > E$
Le secteur fournit alors de l'énergie à la charge.

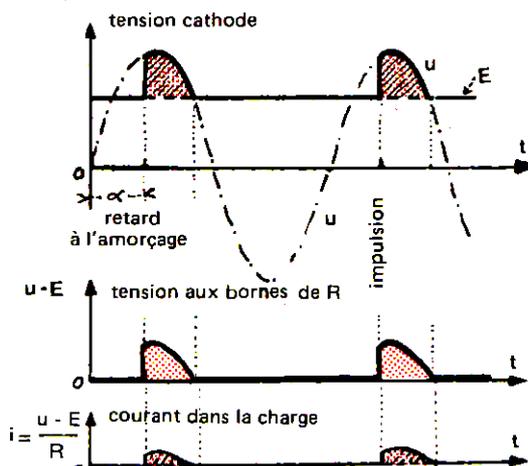
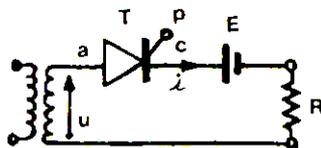
Dans un semi-conducteur (diode ou thyristor), le courant ne peut circuler que dans un seul sens, de l'anode à la cathode.

- Une **DIODE** conduit, quand son anode est plus positive que sa cathode. Elle se comporte alors comme un interrupteur fermé. Dans l'autre cas, elle est bloquée et se comporte comme un interrupteur ouvert.

Soit un circuit comprenant une tension alternative u , une batterie d'accumulateurs de f.c.e.m. E et une résistance R .

La diode D conduit quand u , tension de l'anode, est supérieur à E . Alors un courant i charge la batterie :

$$i = \frac{u - E}{R}$$



Le thyristor peut être enclenché quand $u > E$
Le secteur fournit alors de l'énergie à la charge

- Un **THYRISTOR** s'amorce quand son anode est plus positive que sa cathode ET qu'il reçoit une impulsion de commande sur sa porte.

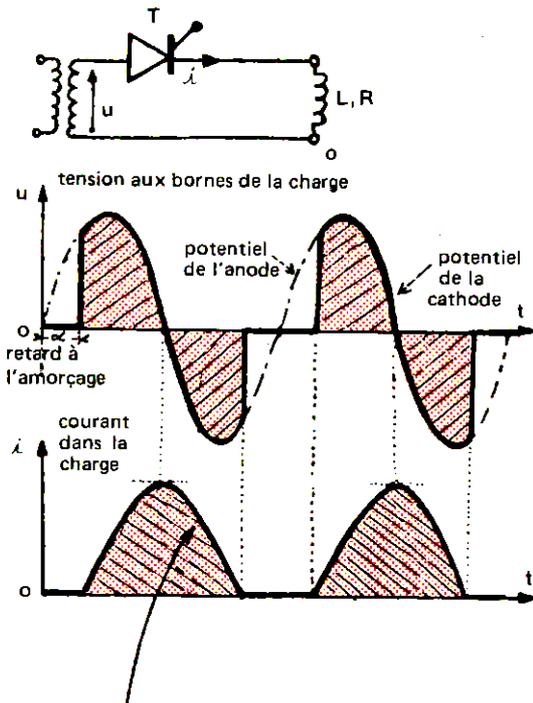
Dans le même circuit, où la diode D est remplacée par un thyristor T , en retardant l'instant d'allumage du thyristor, on peut donc **REGLER** la valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge R , donc la valeur moyenne du courant i dans la charge.

Le thyristor ne peut pas couper le courant. Il se bloque quand le circuit, extérieur à lui, est tel que par sa configuration (résistances, self-inductances, capacités) et les tensions en jeu (alimentation, forces contre-électromotrices ...), le courant qui le traverse s'annule.

Tant que le thyristor conduit, il se comporte comme un interrupteur fermé et le potentiel de cathode suit le potentiel d'anode.

Quand le courant qui le traverse s'est annulé, le thyristor se bloque. Il se comporte comme un interrupteur ouvert et les deux potentiels (anode et cathode) évoluent séparément.

2 • DEBIT SUR UN CIRCUIT INDUCTIF



Le maintien, par la self, du courant dans le circuit, prolonge la conduction de T.

Soit un circuit comprenant une tension alternative u et une self-inductance L .

L'inductance L , qu'elle soit une self ou une inductance de fuite des jeux de barres, d'un transformateur ..., stocke de l'énergie.

Elle tend :

- à retarder l'établissement du courant,
- à retarder son *annulation*.

L'inductance développe une f.c.e.m. ($-L \frac{di}{dt}$) qui tend à s'opposer à la cause qui lui a donné naissance.

Si on considère la résistance R de l'inductance comme négligeable,

$$u = L \frac{di}{dt} + Ri$$

Quand $u > 0$, $\frac{di}{dt} > 0$: le courant croît.

Quand $u < 0$, $\frac{di}{dt} < 0$: le courant décroît.

On ne peut amorcer T que quand $u > 0$.

Pendant la conduction, la cathode de T suit le potentiel de son anode.

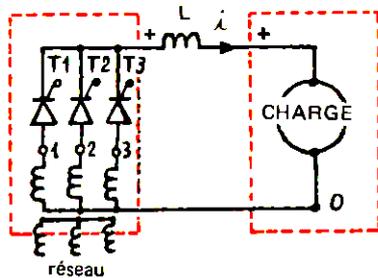
Quand il n'y a plus de courant dans la charge le thyristor se bloque (il peut être considéré comme un interrupteur ouvert), la cathode se retrouve au potentiel 0. L'anode suit toujours le potentiel du secteur.

On ne peut donc plus amorcer T dans ces conditions, et jusqu'à la prochaine alternance positive du secteur.

L'énergie reçue du secteur et absorbée par l'inductance (u positif, i positif) est égale à l'énergie fournie par l'inductance (u négatif, i positif) et renvoyée au secteur.

Les chutes ohmiques (Ri) étant supposées nulles, il y a transfert d'énergie du secteur à la charge et de la charge au secteur, sans consommation d'énergie.

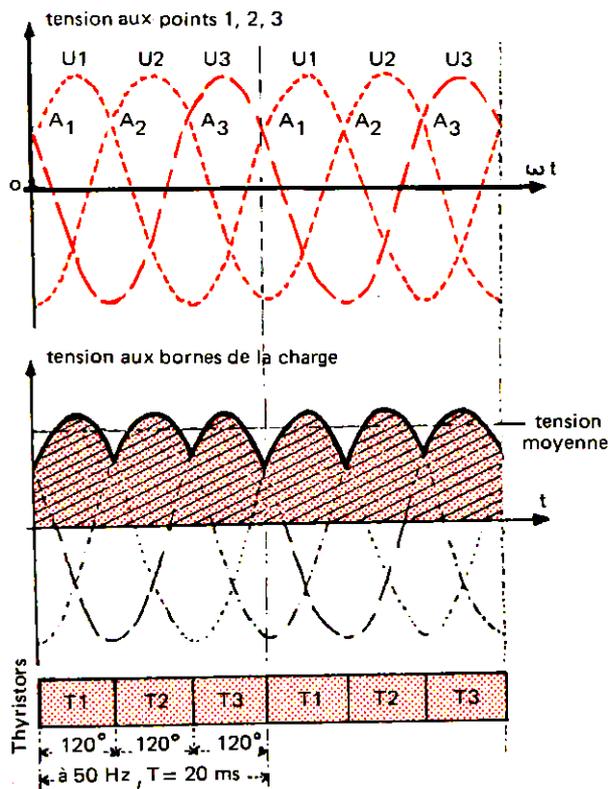
3 ● PRINCIPE FONDAMENTAL DU PONT A THYRISTORS



- Fonctionnement en redresseur
- Fonctionnement en onduleur

A titre d'exemple théorique, soit un pont triphasé simple à thyristors (demi-pont de Graëtz à montage étoile).

Le circuit se compose d'une self L et d'une charge dont on ne préjuge rien.



- Si, à l'instant où la sinusoïde U_1 devient la plus positive, on allume T_1 (point A_1), T_1 conduit, porte les 3 cathodes communes au même potentiel le plus positif, bloquant ainsi T_2 et T_3 . Cette tension est appliquée à la charge.
- Si, à l'instant où la sinusoïde U_2 devient la plus positive, on allume T_2 (point A_2), T_2 conduit. La cathode de T_2 portée à ce potentiel positif, bloque T_1 qui conduisait.
- Si, en A_3 , on allume T_3 , la conduction de T_3 bloque T_2 qui conduisait, etc ...

Les amorçages des thyristors sont tels que l'évolution des tensions simples du réseau permet l'allumage d'un nouveau thyristor et éteint le thyristor qui conduisait précédemment.

On applique donc à l'ensemble self et charge la tension délimitée par les sommets positifs des sinusoïdes.

Ce fonctionnement est celui de la commutation naturelle qui aurait été celle de 3 diodes : D_1, D_2, D_3 , à la place des 3 thyristors : T_1, T_2, T_3 .

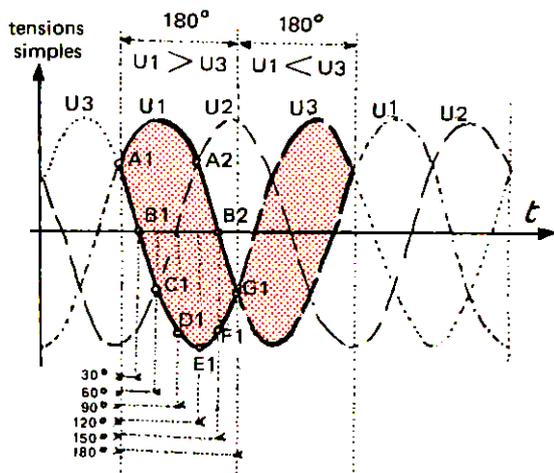
La tension à la sortie du pont est périodique et sa valeur moyenne est la plus positive réalisable. Il n'y a pas de retard à l'amorçage des thyristors.

Le sens du courant étant imposé par les semi-conducteurs, le courant sort du générateur par un pôle +. Il entre dans la charge, qui est réceptrice, par un pôle +. L'énergie va du réseau à la charge.

Les thyristors sont allumés dans l'ordre des phases du secteur : 1, 2, 3, 1 ...

| | | | | | |
|------------|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------|
| | Allumer T1 | Allumer T2 qui éteint T1 | Allumer T3 qui éteint T2 | Allumer T1 qui éteint T3 | etc ... |
| Thyristors | T1 | T2 | T3 | T1 | |

Pour faire varier la valeur moyenne à la sortie du pont, on fait varier l'angle de retard α à l'allumage des thyristors.



Supposons que T3 conduise dans la zone où U_3 est supérieur à U_1 . A partir du point A1 (point de commutation naturelle), la phase 1 devient plus positive que la phase 3. C'est une condition nécessaire pour allumer T1.

Si on ne le fait pas, c'est-à-dire si on introduit un retard à l'amorçage du thyristor suivant, l'inductance L *maintient le courant* par T3. T1 non allumé reste bloqué et la charge suit le potentiel de la phase 3 jusqu'à la décharge complète de l'énergie emmagasinée dans L.

Lorsqu'on allume T1 à un instant entre A1 et G1, le potentiel de sa cathode est porté au potentiel positif de son anode.

Comme les trois cathodes sont communes, ce potentiel positif bloque T3. Le courant est transféré à T1.

Cette tension est appliquée à la charge.

| T1 enclenché au point | A1 | B1 | C1 | D1 | E1 | F1 | G1 |
|-----------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Retard α | 0° | 30° | 60° | 90° | 120° | 150° | 180° |

Quel peut être l'angle de retard α maximum ?

T3 débitant, pour allumer T1, il faut :

- avoir $U_1 > U_3$: tension anode > tension cathode,
- et donner une impulsion de commande sur la porte de T1.

En considérant les sinusoides U_3 et U_1 , par raison de symétrie :

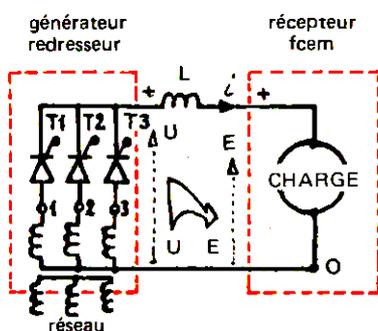
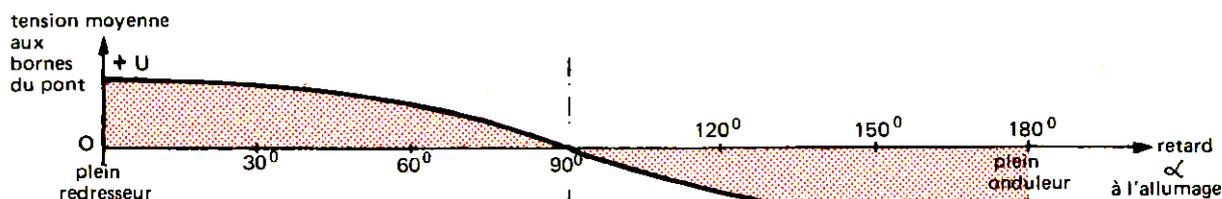
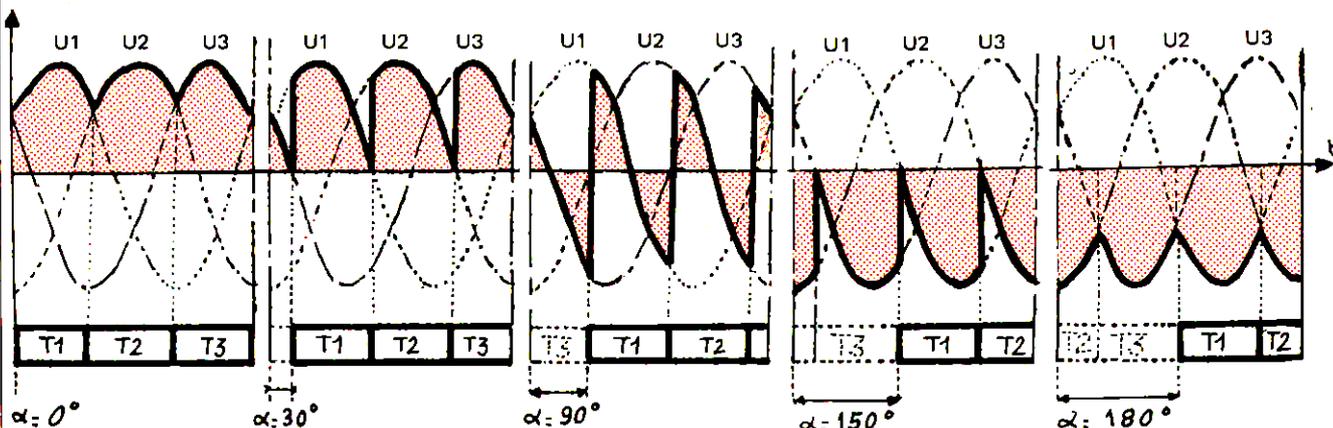
- pendant 180° : $U_1 > U_3$ et on peut enclencher T1, c'est la zone en trait épais. La conduction de T1 éteindra T3.
- pendant 180° : $U_1 < U_3$ et on ne peut pas enclencher T1.

La plage de retard est donc d'une demi-période soit : $360^\circ/2 = 180^\circ$

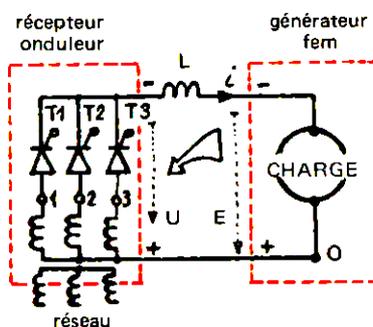
Dans un réseau triphasé, par raison de symétrie, si les angles de retard sont également distribués, chaque thyristor peut conduire pendant un temps égal, soit le tiers de la période, c'est-à-dire : $360^\circ/3 = 120^\circ$.

D'où la forme possible, dans quelques cas de retard α ($\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 30^\circ$, $\alpha = 90^\circ$, $\alpha = 150^\circ$ et $\alpha = 180^\circ$), des tensions appliquées à la charge et de la mention du thyristor qui conduit.

Dans les schémas en page suivante, l'inductance L est supposée importante et le débit du courant est supposé non discontinu.



$$U - E = Z \cdot i$$



$$E - U = Z \cdot i$$

TENSION MOYENNE DU PONT POSITIVE

Le réseau par le pont est un générateur dont le courant sort du pôle +, et la charge est un récepteur qui reçoit le courant par son pôle +.

La tension alternative du secteur est REDRESSEE, transformée en CONTINU (périodique) et l'énergie envoyée dans la charge. Il y a transfert d'énergie du réseau à la charge. La charge est une machine tournante travaillant en moteur qui absorbe de l'énergie du réseau. C'est le fonctionnement du pont en REDRESSEUR.

Le pont travaille en REDRESSEUR quand son courant et la tension moyenne U à ses bornes sont de même sens.

On dit que le courant et la tension sont de même sens lorsque le courant SORT du pont par le pôle +.

TENSION MOYENNE DU PONT NEGATIVE

La charge est un générateur courant continu dont le courant sort du pôle + et le pont est un récepteur qui reçoit le courant par son pôle +.

La tension continue aux bornes de la génératrice est ONDULEE, transformée en ALTERNATIF et l'énergie est renvoyée au secteur; elle est donc récupérée. Il y a transfert d'énergie de la charge c.c. au réseau. La charge est une machine tournante travaillant en génératrice qui fournit de l'énergie au réseau. C'est le fonctionnement du pont en ONDULEUR.

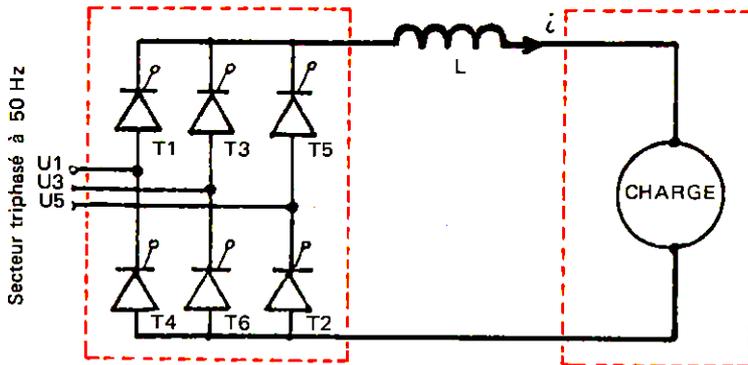
Le pont travaille en ONDULEUR quand son courant et la tension moyenne U à ses bornes sont de sens opposés.

On dit que le courant et la tension sont de sens opposé lorsque le courant ENTRE dans le pont par le pôle +.

Le sens du courant n'a pas varié. Dans nos conventions de signe, il est ici toujours positif. Il est toujours imposé par le sens des thyristors.

4 • REALISATION INDUSTRIELLE DU PONT A THYRISTORS

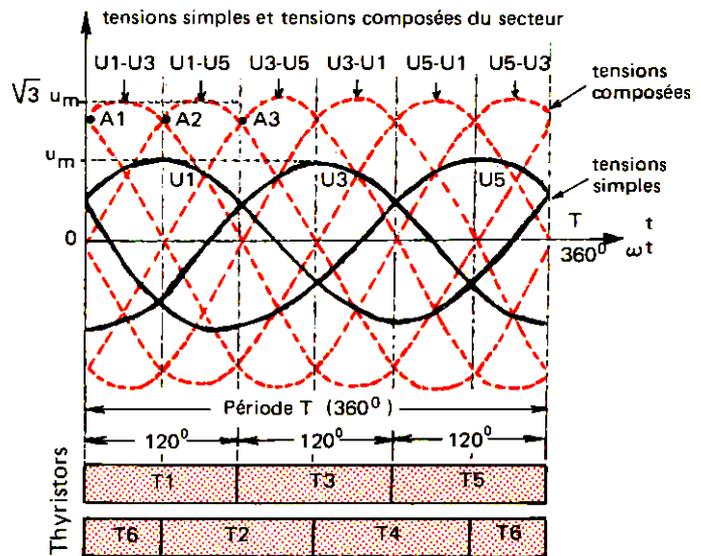
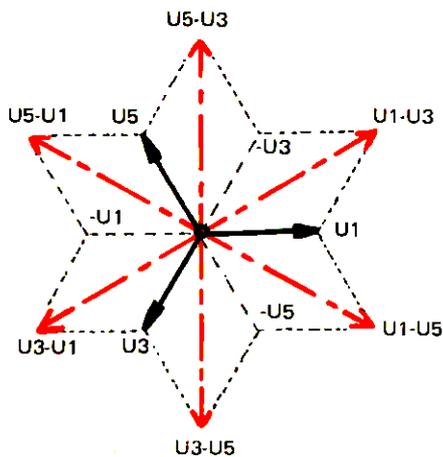
- Utilisation des tensions composées (entre phases) du secteur



Dans les montages industriels, on utilise le pont de GRAETZ complet à 6 thyristors. Au lieu d'appliquer à la charge, comme dans le montage théorique précédent, les tensions simples (que nous appellerons U1, U3, U5), on lui applique les tensions composées entre phases :

$$U1-U3, U1-U5, U3-U5, \\ U3-U1, U5-U1, U5-U3,$$

dont l'amplitude est $\sqrt{3}$ fois plus importante que celles des tensions simples.



A partir des sinusoïdes U1, U3, U5, les sinusoïdes U1-U3, U1-U5 ... etc s'en déduisent par différence à chaque instant.

Les raisonnements sont les mêmes que précédemment.

L'évolution des tensions composées permet l'allumage d'un nouveau thyristor et l'extinction naturelle de celui qui conduisait précédemment.

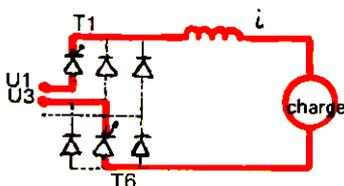
Le cycle de fonctionnement des thyristors se fait dans l'ordre :

$$T6^*T1, T1^*T2, T2^*T3, T3^*T4, T4^*T5, T5^*T6, T6^*T1 \dots \text{etc.}$$

- 41 • $\alpha = 0^\circ$ A l'instant où la sinusoïde U1-U3 devient la plus positive (U1 très positif, U3 très négatif), on allume le couple de thyristors T6*T1 (point A1).

La cathode de T1, portée au potentiel de U1 (le plus positif à cet instant) bloque en inverse les cathodes de T3 et T5.

L'anode de T6, portée au potentiel de U3 (le plus négatif à cet instant) bloque en inverse les anodes de T2 et T4.



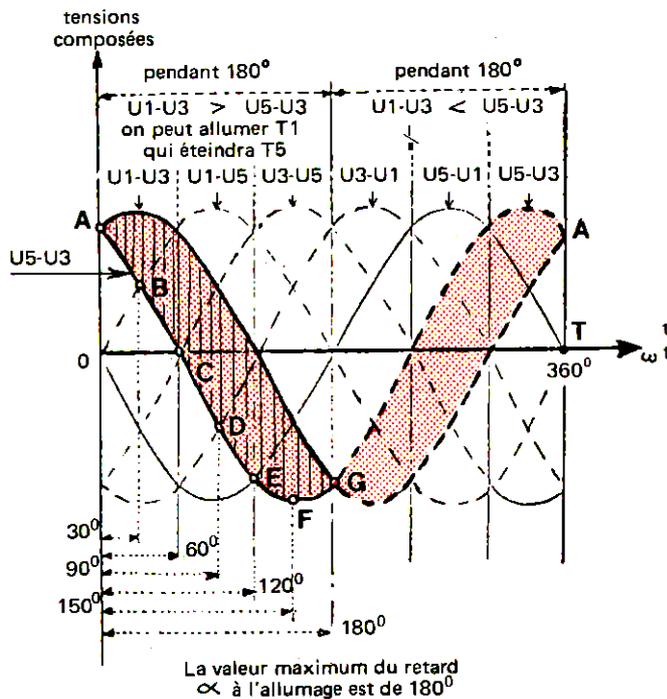
La charge reçoit la tension U1-U3.

En A2, elle recevra U1-U5 (couple T1*T2)

En A3, elle recevra U3-U5 (couple T2*T3) ... etc

$\alpha = 0^\circ$ correspond à la plus grande tension positive reçue par la charge.

42 ● RETARD A L'ALLUMAGE DES THYRISTORS



Supposons que T5-T6 conduisent, c'est-à-dire que la charge reçoive la tension U5-U3.

Dans l'opération suivante, on veut allumer T1 et éteindre T5, c'est-à-dire faire travailler le couple de thyristors T6-T1.

A partir du point A, la tension U1-U3 est plus positive que la tension U5-U3 : c'est une condition nécessaire pour allumer T1 qui éteindra T5.

Si on ne le fait pas, c'est-à-dire si on n'envoie pas une impulsion sur la gâchette de T1, T1 reste bloqué, l'inductance maintient le courant, et la charge continue de recevoir la tension U5-U3.

Après le retard α , l'allumage de T1 porte sa cathode à U1.

La cathode de T5 qui conduisait, était au potentiel U5. $U1 > U5$, à cet instant, bloque T5 en inverse. La charge reçoit la tension U1-U3.

U1-U3 étant, pendant 180°, supérieur à U5-U3, le retard maximum de α peut être de 180°.

| Allumage de T1 au point | A | B | C | D | E | F | G |
|-------------------------|----|-----|-----|-----|------|------|------|
| Retard α | 0° | 30° | 60° | 90° | 120° | 150° | 180° |

La séquence après T6-T1 est T1-T2, c'est-à-dire selon le même processus, après le retard α , allumage de T2 et extinction de T6 (T1 reste conducteur). La séquence après T1-T2 est T2-T3 ... etc.

D'où la forme possible, dans certains cas de retard α , des tensions appliquées à la charge et des thyristors qui conduisent.

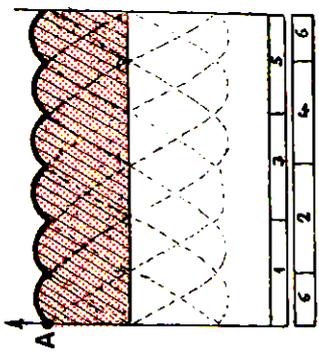
L'inductance L est supposée importante, et le débit du courant est supposé non discontinu.

Dans un réseau triphasé, si les angles de retard sont également distribués, chaque thyristor conduit pendant un temps égal au tiers de la période, soit $360^\circ/3 = 120^\circ$.

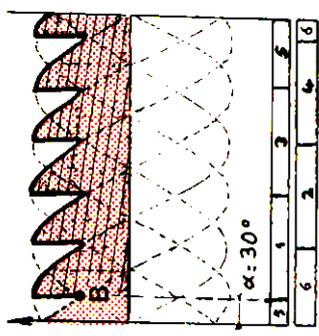
Remarque : ANGLE DE GARDE EN ONDULEUR

Pour bien s'assurer de l'instant où la tension U1-U3 est plus positive que la tension U5-U3, c'est-à-dire que le thyristor T1 pourra s'allumer et le thyristor T5 bien s'éteindre et avoir le temps de se désioniser, on n'utilise pas $\alpha = 180^\circ$ (car alors $U1-U3 = U5-U3$) mais $\alpha \neq 150^\circ$.

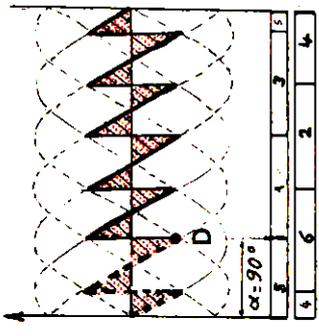
$180^\circ - 150^\circ = 30^\circ$ est l'angle de garde en ONDULEUR.



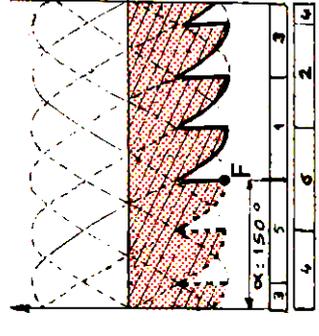
Conduction des thyristors $\alpha = 0^\circ$
tension moyenne la plus positive
PLEIN REDRESSEUR



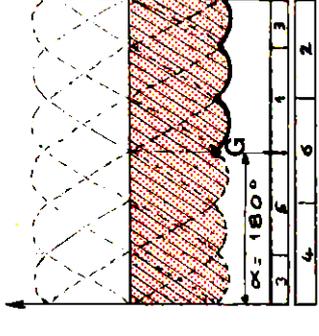
Conduction des thyristors $\alpha = 30^\circ$



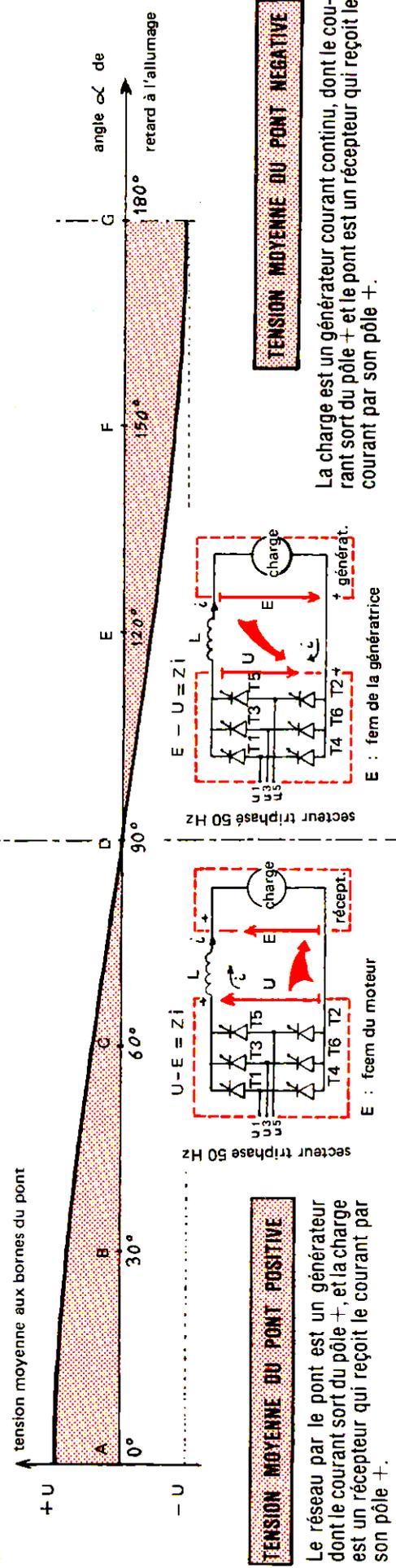
Conduction des thyristors $\alpha = 90^\circ$
tension moyenne nulle



Conduction des thyristors $\alpha = 150^\circ$



Conduction des thyristors $\alpha = 180^\circ$
tension moyenne la plus négative
PLEIN ONDULEUR



TENSION MOYENNE DU PONT POSITIVE
Le réseau par le pont est un générateur dont le courant sort du pôle +, et la charge est un récepteur qui reçoit le courant par son pôle +.

TENSION MOYENNE DU PONT NEGATIVE
La charge est un générateur courant continu, dont le courant sort du pôle + et le pont est un récepteur qui reçoit le courant par son pôle +.

La tension alternative du secteur est REDRESSEE, transformée en CONTINU (périodique), et l'énergie transférée du réseau dans la charge.

La charge est une machine tournante travaillant en moteur qui absorbe de l'énergie au réseau. C'est le fonctionnement du pont en REDRESSEUR.

Le pont travaille en REDRESSEUR quand son courant et la tension moyenne U à ses bornes sont de même sens. On dit que le courant et la tension sont de même sens lorsque le courant SORT du pont par le pôle +.

La tension continue aux bornes de la génératrice est ONDULEE, transformée en ALTERNATIF, et l'énergie transférée de la charge au réseau est donc récupérée.

La charge est une machine tournante, travaillant en génératrice qui fournit de l'énergie au réseau. C'est le fonctionnement du pont en ONDULEUR.

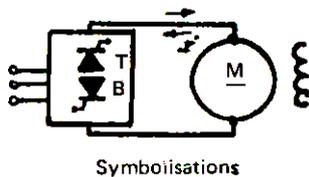
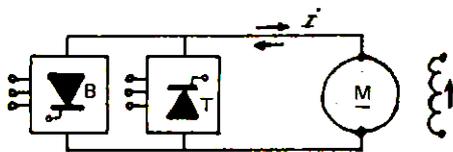
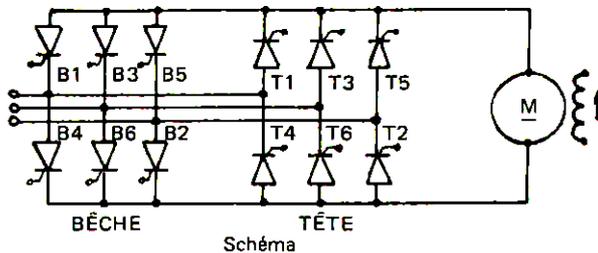
Le pont travaille en ONDULEUR quand son courant et la tension moyenne U à ses bornes sont de sens opposés. On dit que le courant et la tension sont de sens opposés lorsque le courant ENTRE dans le pont par le pôle +.

Le sens du courant n'a pas varié. Dans nos conventions de signe, il est toujours imposé par le sens des thyristors.

5 ● LE MONTAGE TÊTE-BÊCHE DES PONTS A THYRISTORS

Le pont de Graëtz ne peut fournir ou recevoir du courant que dans un seul sens. Il est unidirectionnel.

Pour pouvoir faire transiter le courant dans les deux sens, un deuxième pont de Graëtz est monté en antiparallèle sur le premier.



Nous référant à un MCC bien connu, ce montage autorise le fonctionnement du MCC dans les deux sens de marche. Il permet surtout, lors d'un freinage, c'est-à-dire d'une décélération, de transformer l'énergie vive de la machine (qui passe d'un fonctionnement en moteur à un fonctionnement en génératrice), en énergie électrique renvoyée au réseau, et donc RECUPEREE. Le freinage peut être contrôlé, c'est-à-dire obtenu avec le maximum de couple de freinage (à flux supposé constant, par exemple, avec le maximum de courant I).

Outre, que l'énergie de freinage est récupérée, le temps de freinage peut être réduit puisqu'on peut freiner au courant maximal, donc au couple maximal. Ce système d'inversion statique est très rapide (10 ms).

Le pont tête-bêche améliore les performances du système.

ANGLES DE GARDE

L'un des ponts étant en position ONDULEUR pendant que l'autre est en position REDRESSEUR (seul l'un des deux porte le courant), comme les f.e.m. moyennes des deux ponts doivent toujours être égales, et qu'il y a un angle limite de garde en onduleur, de $180^\circ - 150^\circ = 30^\circ$, il faut par mesure de symétrie, introduire un angle de garde de 30° en redresseur.

6 ● FACTEUR DE PUISSANCE (COS φ) D'UNE CHARGE A COURANTS ALTERNATIFS

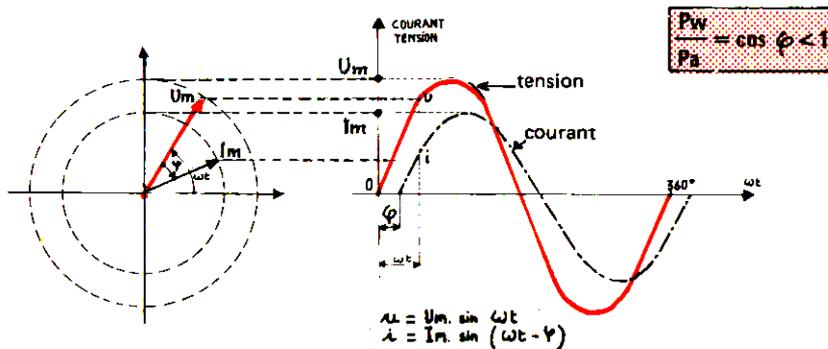
Une installation industrielle est généralement alimentée par un réseau électrique Haute Tension, et comprend :

- un poste de transformation,
- des récepteurs du type "résistant" tels que : étuves, radiateurs, lampes à filament, etc.,
- des récepteurs du type "inductif" tels que : transformateurs, moteurs, etc.
- des récepteurs du type "capacitif" tels que : lignes, condensateurs, compensateurs synchrones, etc ...

Supposons toujours, pour simplifier l'exposé, que le réseau soit monophasé.

Soit U la basse tension, en volts, au secondaire du transformateur d'alimentation que nous supposerons à pleine charge, et I l'intensité du courant total absorbé, en ampères.

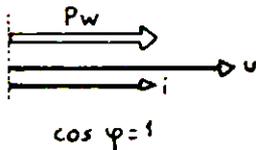
La puissance réelle ou active consommée P_w , exprimée en watts, est inférieure au produit (volts x ampères) représentant la puissance apparente de l'installation P_a , dans un rapport égal au facteur de puissance :



Le facteur de puissance est représenté graphiquement par le cosinus de l'angle φ représentant le déphasage entre le courant et la tension.

Le $\cos \varphi$ dépend uniquement des caractéristiques des récepteurs et de leur régime en fonctionnement (type de moteur, vitesse, charge). Il est indépendant du rendement propre de ces récepteurs.

61 ● LES RECEPTEURS DU TYPE RESISTANT : n'absorbent qu'une puissance active.



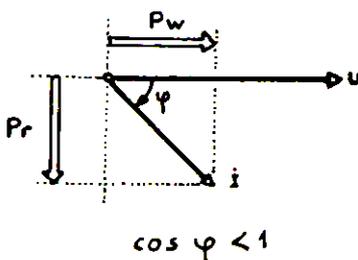
Le facteur de puissance est égal à l'unité. On a $P_w = P_a$.

Il n'y a pas de décalage du courant I par rapport à la tension U . Quand la tension passe par 0, le courant s'annule.

62 ● LES RECEPTEURS DU TYPE INDUCTIF : absorbent :

- une puissance active $P_w = U \cdot I \cdot \cos \varphi$ (Watts)
- une puissance réactive $P_r = U \cdot I \cdot \sin \varphi$ (VA réactifs).

La puissance apparente P_a , égale au produit $U \times I$, représente la somme géométrique des puissances active et réactive.



La puissance active P_w se transforme intégralement en travail et en chaleur (pertes).

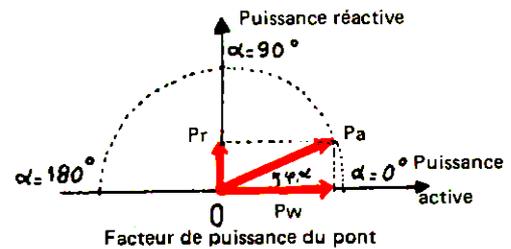
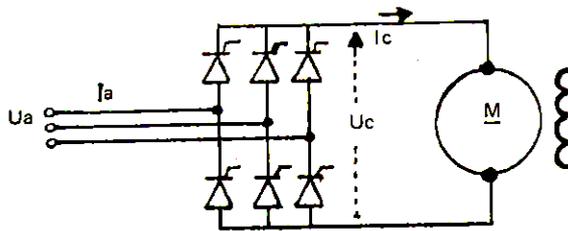
La puissance réactive P_r est celle nécessaire à l'excitation magnétique des récepteurs (magnétisation des noyaux des transformateurs, ...).

Avec une alimentation de la charge par un pont à thyristors, la notion de débit sur un circuit inductif est fondamentale. La présence de selfs permet l'existence d'une tension négative sur la charge, bien que le courant ne puisse jamais s'inverser.

Le courant est décalé en arrière par rapport à la tension. Le $\cos \varphi$ est inférieur à 1.

Dans tous les cas, quand le courant s'annule, il entraîne le blocage du thyristor (page 4) du pont d'alimentation de la charge.

7 ● FACTEUR DE PUISSANCE ($\cos \varphi$) DU PONT, COTE RESEAU



Soit un réseau alternatif (tension U_a , courant I_a) alimentant, par un pont de Graëtz, un MCC par une tension continue U_c et un courant continu I_c . On suppose que le moteur est alimenté à courant et excitation constants, donc à couple C constant. On suppose, en outre, qu'il n'y a pas de pertes.

71 ● A L'ARRÊT

Le moteur donne son couple nominal C mais, étant arrêté, ne fournit pas de puissance. La puissance côté continu est nulle.

$$P_c = U_c \times I_c = 0, \text{ d'où } U_c = 0$$

La puissance mécanique P_m , égale à la puissance électrique, est nulle à l'arrêt car $P_m = C \times N$, avec $N = 0$. Cette puissance est égale à la puissance côté alternatif P_a :

$$P_a = U_a \times I_a \times \cos \varphi \text{ avec : } \begin{array}{l} U_a \neq 0 \text{ (secteur présent)} \\ I_a \neq 0 \text{ (car } I_a = k \cdot I_c) \end{array}$$

$$P_a = P_c = 0. \text{ On ne peut avoir } P_a = 0 \text{ que si } \cos \varphi = 0.$$

On peut aussi noter qu'à l'arrêt d'un moteur chargé ($U_c = 0$), le retard α à l'allumage des thyristors est 90° et $\cos \alpha$ est aussi égal à 0 (page 10).

72 ● EN VITESSE

$$\text{Lorsque le moteur tourne : } P_m = C \times N = P_c = P_a \quad P_c = U_c \times I_c \quad P_a = U_a \times I_a \times \cos \varphi$$

Comme $P_c = P_a$, il en résulte que $\cos \varphi \neq 0$

A la vitesse nominale, donc à la puissance nominale, $\cos \varphi = 1$.

On peut aussi noter qu'à la pleine vitesse du moteur ($U_c = U$ nominal), le retard α à l'allumage des thyristors est 0° et $\cos \alpha$ est aussi égal à 1 (page 10).

73 ● FACTEUR DE PUISSANCE COTE RESEAU

On voit donc que $\cos \varphi$ et $\cos \alpha$ suivent la même loi. L'angle de déphasage φ est pratiquement égal à l'angle de retard α . Ils sont égaux en supposant aucune perte ni aucun courant magnétisant. Dans la réalité, sans être égaux, ils se suivent de très près.

En première approximation, on peut dire que $\cos \alpha = \cos \varphi$ côté réseau

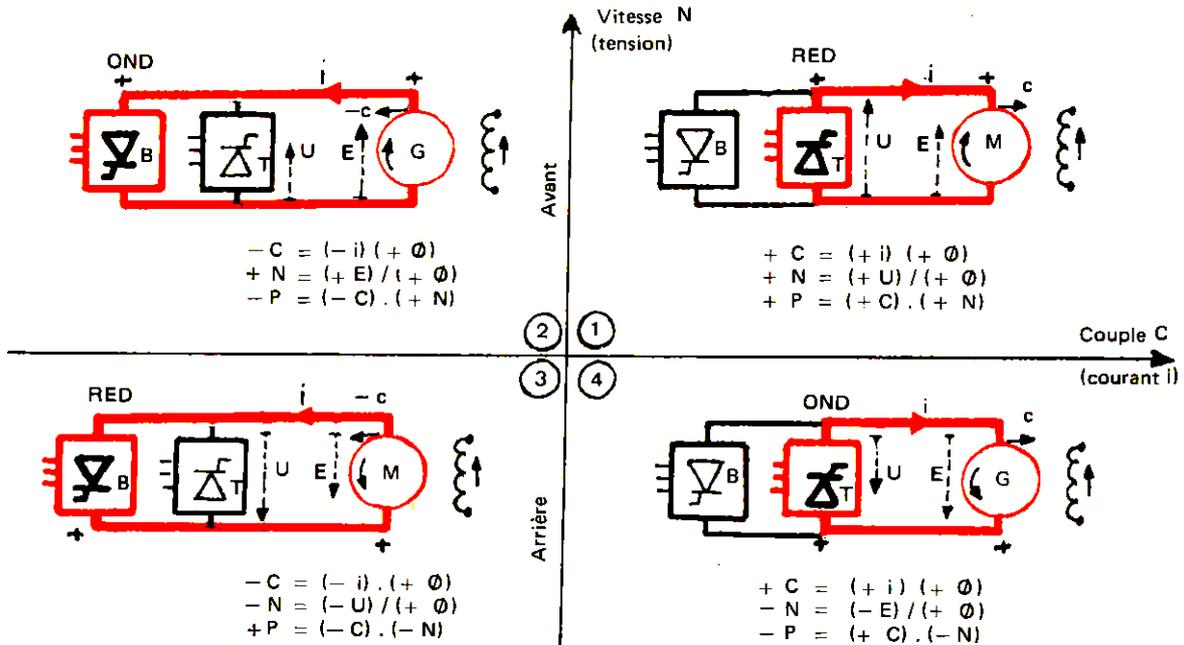
Remarques : Il importe de ne pas confondre le facteur de puissance ($\cos \varphi$) côté réseau dû au réglage du pont à thyristors, avec le facteur de puissance (même désignation $\cos \varphi$) d'une charge à courants alternatifs dû à la nature de la charge (résistive, inductive, ...).

Dans le cas du croquis, le pont alimente un moteur à courant continu, il n'y a pas de facteur de puissance d'une charge continue.

Conclusion :

Un pont de Graëtz a un facteur de puissance voisin de 0, pour une tension continue moyenne nulle, et un facteur de puissance voisin de 1 pour la pleine tension continue moyenne (plein redresseur ou plein onduleur).

8 • FONCTIONNEMENT DANS LES 4 QUADRANTS DU PLAN COUPLE-VITESSE - REVERSIBILITE



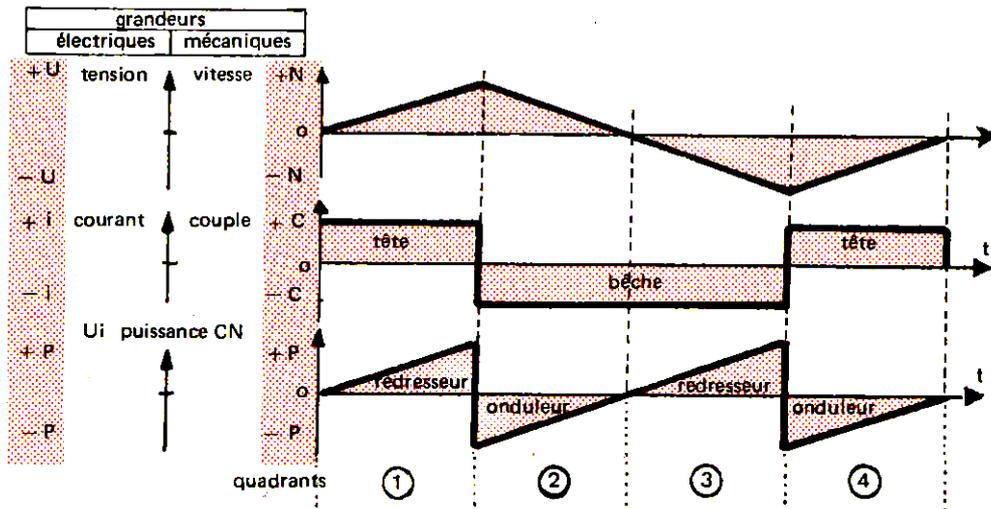
FLUX CONSTANT - INVERSION DE TENSION D'INDUIT PAR PONTS TETE-BECHE D'INDUIT

En fonctionnement AVANT :

- Quadrant 1 : Marche normale : Couple et vitesse de même sens
Tête redresseur, Bêche bloqué, la machine travaille en moteur.
L'énergie transite du réseau au moteur.
- Quadrant 2 : Freinage en récupération
Bêche onduleur, Tête bloqué, la machine tournant toujours en avant, fonctionne en génératrice.
L'énergie transite de la génératrice au réseau.

En fonctionnement ARRIERE :

- Quadrant 3 : Marche normale : Couple et vitesse de même sens
Bêche redresseur, Tête bloqué, la machine travaille en moteur.
L'énergie transite du réseau au moteur.
- Quadrant 4 : Freinage en récupération
Tête onduleur, Bêche bloqué, la machine tournant toujours en arrière, fonctionne en génératrice.
L'énergie transite de la génératrice au réseau.



On sait, en effet (page 10), qu'un pont de GRAETZ fonctionne :

- en redresseur (quadrants 1 et 3) quand son courant et sa tension sont de même sens,
- en onduleur (quadrants 2 et 4) quand son courant et sa tension sont de sens opposés.

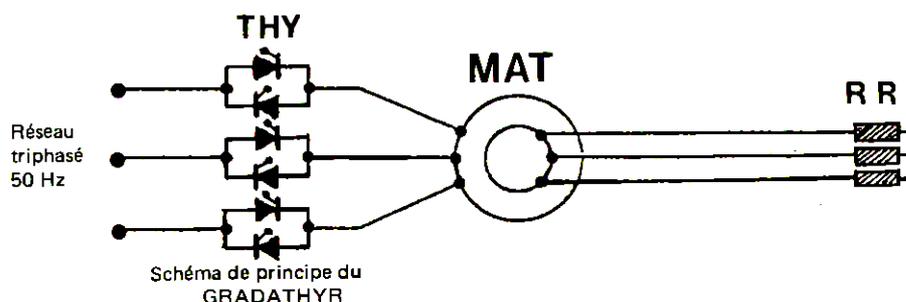
A

VARIATION DE VITESSE A FREQUENCE FIXE AU STATOR

A.1

VARIATION DE LA TENSION STATORIQUE : LE GRADATHYR

La variation de vitesse du moteur asynchrone, à cage ou à bagues, peut être obtenue par la variation de sa tension statorique.

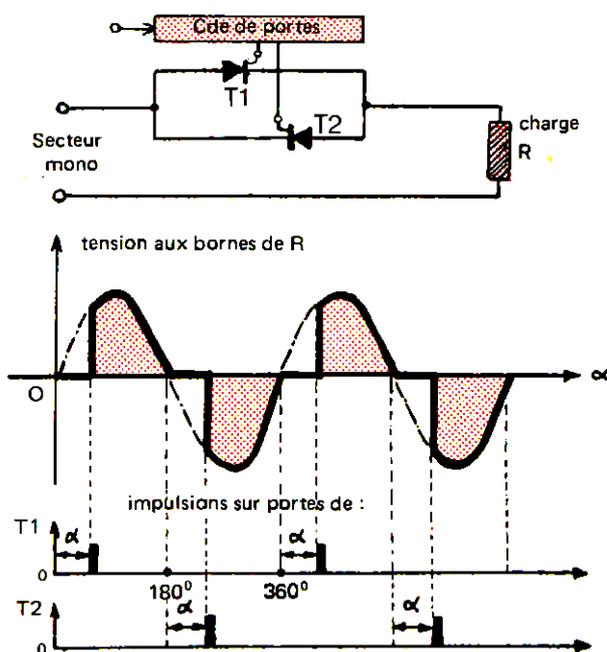


On interpose entre le réseau 50 Hz et le moteur asynchrone triphasé, un réducteur de tension constitué, par phase d'alimentation, d'un couple de thyristors montés en tête-bêche et pouvant conduire :

- l'un, pendant les alternances positives du secteur,
- l'autre, pendant les alternances négatives du secteur.

En réglant l'angle de retard α à l'amorçage des thyristors, une tension efficace variable est appliquée au moteur.

Le GRADATHYR est un moyen simple, robuste et souple, d'obtenir une tension alternative réglable.



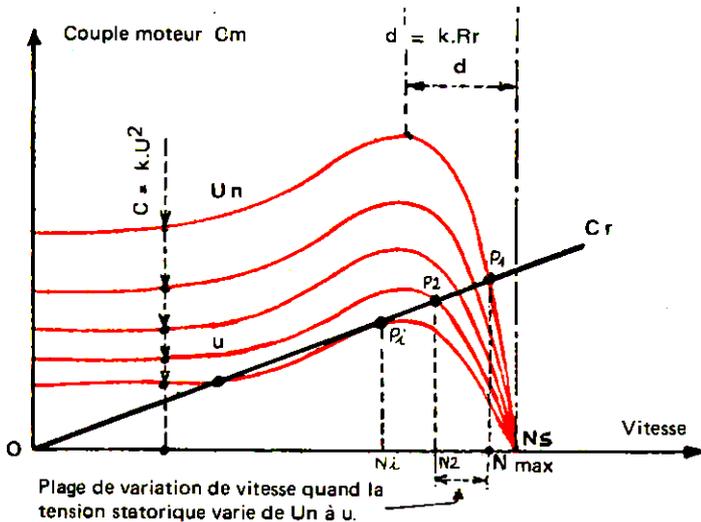
1 ● PRINCIPE DU GRADATEUR MONOPHASE

Soit un réseau alternatif monophasé alimentant une charge R par 2 thyristors montés en tête-bêche (T1 et T2).

Ces deux thyristors ont une commande de porte qui génère des impulsions sur chaque alternance positive des tensions anode-cathode de T1 et T2.

En fonction du retard α à l'amorçage, la tension alternative appliquée à la charge R peut varier de la pleine tension secteur ($\alpha = 0^\circ$) à 0 ($\alpha = 180^\circ$).

Le même montage gradateur peut être utilisé en triphasé pour faire varier la tension statorique du moteur asynchrone.



Rappel : On sait que dans un moteur asynchrone, en fonction de la vitesse :

- le couple croît, passe à un maximum et s'annule à la vitesse de synchronisme N_s .
- Le couple varie comme le carré de la tension : $C = k.U^2$, donc la courbe du couple est d'autant plus faible que la tension statorique est faible.
- La distance "d" du sommet de la courbe à la vitesse de synchronisme est proportionnelle à la valeur de la résistance rotorique R_r .

2 • STABILITE DU REGIME ETABLI :

Rappelons la relation fondamentale de la dynamique

$$C_m - C_r = J \frac{dN}{dt}$$

$J =$ Moment d'inertie du moteur et de la charge entraînée

Le point de fonctionnement ($N = \text{constant}$, $dN/dt = 0$) est à l'intersection des caractéristiques mécaniques :

- du moteur : Couple moteur C_m en fonction de la vitesse,
- et de l'utilisation : Couple résistant C_r en fonction de la vitesse.

Alors $C_m = C_r$ pour une vitesse de régime N .

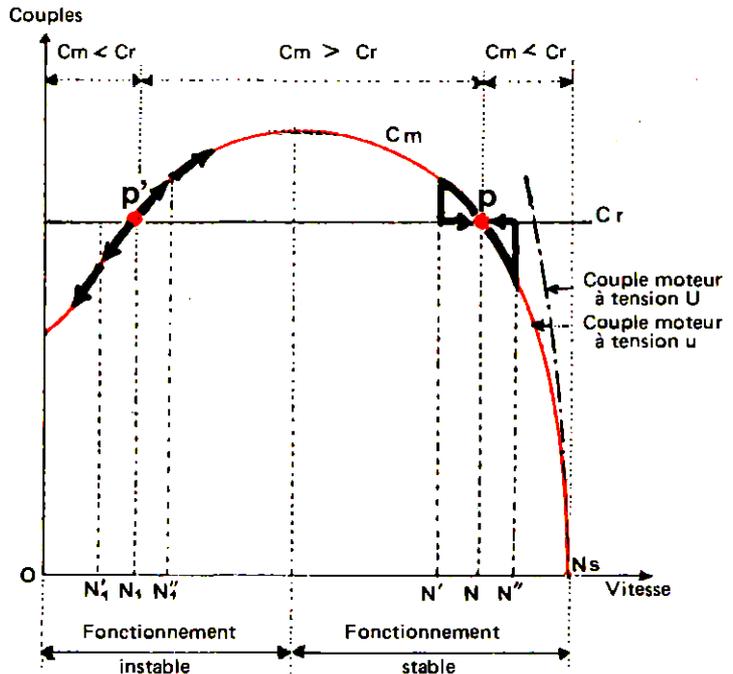
Un régime est stable, donc utilisable, lorsqu'après une perturbation temporaire, il se rétablit de lui-même.

21 • LE REGIME EST STABLE quand :

- la vitesse baissant, passant de N (vitesse de régime) à N' , $C_m > C_r$ produit une accélération ($dN/dt > 0$) ramenant N' à la vitesse de régime N .
- la vitesse croissant accidentellement, de N à N'' , $C_r > C_m$, produit une décélération ($dN/dt < 0$) ramenant N'' à la vitesse de régime N .
- Le régime est stable quand la pente de C_m est inférieure à celle de C_r .

22 • LE REGIME EST INSTABLE dans le contraire.

- Un ralentissement de N_1 à N'_1 entraîne $C_m < C_r$, ce qui aggrave le ralentissement jusqu'au calage du moteur,
- Une accélération accidentelle de N_1 à N'_1 entraîne $C_m > C_r$, ce qui aggrave l'accélération jusqu'à l'emballement.
- Le régime est instable quand la pente de C_m est supérieure à la pente de C_r .



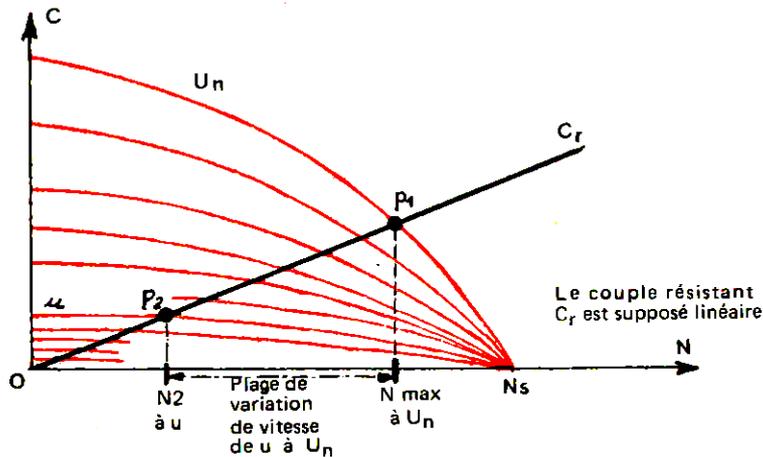
Le couple résistant C_r est supposé constant

3 ● VARIATION DE LA VITESSE

A la tension nominale U_n (angle de retard α nul), l'équilibre entre C_m et C_r est obtenu au point P_1 (vitesse N_{max} , couple C_1 : $C_{m1} = C_{r1}$).

Pour diminuer la vitesse du MAT, l'augmentation du retard α à l'allumage des thyristors diminue la tension efficace statorique, appliquée au MAT. D'où un nouveau point de fonctionnement P_2 (vitesse N_2 , couple C_2 : $C_{m2} = C_{r2}$).

Avec un moteur à cage, normal, une plus grande diminution de vitesse, par une tension statorique plus faible, ferait passer le point de fonctionnement P_i dans une zone instable (page 16).



La plage de variation de vitesse serait donc limitée de N_i à N_{max} sans marge de sécurité dans la zone de N_i .

Pour augmenter cette plage, on augmente l'étendue de la zone à fonctionnement stable en déplaçant les sommets des courbes $C = f(N)$ vers la gauche, par une augmentation de la résistance au rotor :

31 ● SOIT EN UTILISANT DES MOTEURS A CAGE TRES RESISTIVE, mais :

- l'énergie de glissement est dissipée dans le moteur qui doit être prévu pour cette dissipation, même à basse vitesse,
- la plage de variation de vitesse reste limitée,

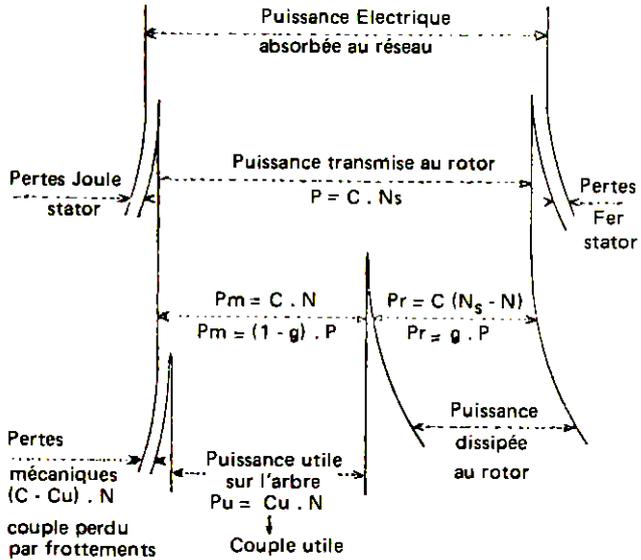
32 ● SOIT EN DISSIPANT L'ENERGIE DE GLISSEMENT A L'EXTERIEUR DU MOTEUR, en utilisant des moteurs à bagues (avec résistances rotoriques à l'extérieur), et convenablement ventilés. Avec suffisamment de résistances, et sur des caractéristiques $C_r = f(N)$ convenables, toutes les courbes $C = f(N)$ peuvent être stables, et la variation de vitesse, totale : de 0 à N_{max} .

N_{max} diminue avec l'augmentation de résistance du circuit rotorique.

4 • PUISSANCE DISSIPÉE AU ROTOR

Dans un moteur asynchrone à cage ou à bagues, la puissance (P) transmise au rotor (qui est, aux pertes joules stator et aux pertes fer stator près, la puissance absorbée au réseau), est égale à la puissance mécanique (Pm) sur l'arbre du moteur + la puissance (Pr) dissipée au rotor.

$$P = P_m + P_r$$



• Puissance absorbée P

L'enroulement statorique produit un champ tournant à la vitesse de synchronisme

$$N_s = \frac{f}{p} = \frac{\text{fréquence du réseau}}{\text{paire de pôles}}$$

Pour une charge donnée, donc un couple C donné, la puissance absorbée est $P = C.N_s$.

• Puissance mécanique Pm

C'est le produit du couple électromagnétique par la vitesse N du rotor $P_m = C.N$

• Puissance rotorique de glissement Pr Par différence, $P_r = C(N_s - N)$. Par définition du glissement : $N_s - N = g.N_s$,

$$P_r = g.C.N_s$$

$$P_r = g.P$$

ce qui entraîne

$$P_m = (1-g).P$$

La puissance Pr dissipée au rotor est donc proportionnelle au glissement g et au couple C.

| | |
|--|---|
| <p>41 • Cas d'un couple résistant C constant (Levage, Direction, Translation)</p> | <p>42 • Cas d'un couple résistant C proportionnel au carré de la vitesse C = k * N² (pompes, ventilateurs)</p> |
| Puissance absorbée $P = C . N_s$ | |
| P constant | P proportionnel au carré de la vitesse N |
| Puissance rotorique dissipée $P_r = g . P$ | |
| <p>$P_r = P$ (max. de P_r) $P_r = 2/3.P$ $P_r = P/2$ $P_r = 1/3.P$ $P_r = 0$</p> | <p>• à l'arrêt $N = 0$ • à $N = 1/3.N_s$ • à $N = N_s/2$ • à $N = 2/3.N_s$ • au synchronisme $N = N_s$</p> |
| <p>$g = 1$ $g = 2/3$ $g = 1/2$ $g = 1/3$ $g = 0$</p> | <p>$P_r = 2 P_m$ $P_r = P_m$ $P_r = 1/2 P_m$</p> |
| <p>$P_r = 0$ $P_r = 2/3.P$ $P_r = P/2$ $P_r = 1/3.P$ (max. de P_r) $P_r = 0$</p> | |
| Fonctionnement intéressant | |
| Si marches intermittentes | Car pertes raisonnables aux forts glissements |

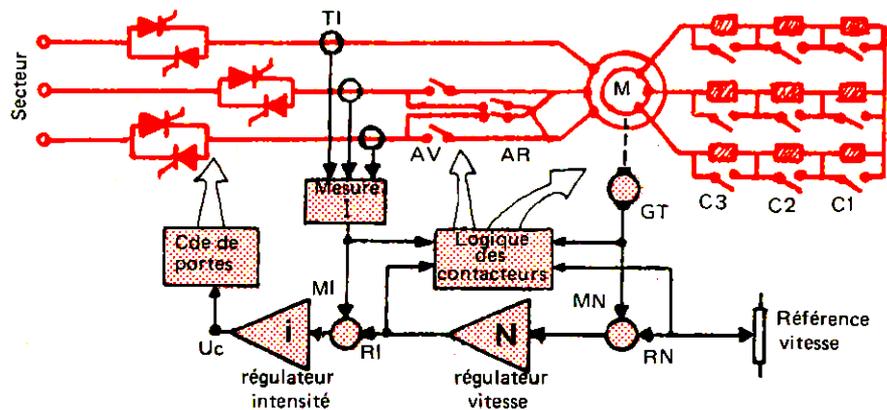
5 ● REALISATION INDUSTRIELLE

La régulation est à deux chaînes en cascade.

Une référence de vitesse (RN) qui, dans le cas le plus simple, peut être un potentiomètre d'affichage, est comparée à la mesure de la vitesse (MN), fournie par une génératrice tachymétrique (GT). L'écart de vitesse est amplifié par l'amplificateur de vitesse (N).

Sa sortie utilisée comme référence de courant moteur (RI) est comparée à la mesure du courant moteur (MI) obtenue par redressement au secondaire des transformateurs d'intensité (TI) montés sur les 3 phases du pont à 6 thyristors. L'écart d'intensité est amplifié par l'amplificateur de courant (I).

Sa sortie est utilisée comme tension de commande (Uc) de la "commande de portes" des 6 thyristors.



Le moteur, sans inverser son sens de rotation, peut être freiné en contre-courant, par inversion de ses polarités grâce aux contacteurs AV et AR, commandés par la "logique des contacteurs".

Une grande plage de vitesse est obtenue par une résistance rotorique élevée (contacteurs C1, C2, C3, également commandés par la "logique des contacteurs").

La variation de vitesse du moteur asynchrone combine donc :

- les commutations de crans de résistance (par C1, C2, C3), comme dans un démarrage rotorique normal.
- les commutations de phases (par AV-AR) : comme dans un freinage à contre courant,
- la variation de la tension statorique par le pont à 6 thyristors.

6 ● DOMAINES D'APPLICATIONS DU GRADATHYR

L'inconvénient du GRADATHYR réside surtout dans les pertes à dissiper aux forts glissements, c'est-à-dire aux faibles vitesses. La diminution de vitesse s'accompagne d'une augmentation des pertes.

Le GRADATHYR peut être utilisé lorsque ces pertes sont relativement faibles :

- aux faibles puissances de moteur,
- quand le couple résistant diminue fortement avec la vitesse (Cas du pompage et de la ventilation, où $C = k.N^2$ ou $C = k.N^3$).
- dans les services intermittents :
 - Vitesse d'approche du levage
 - Mouvements horizontaux de ponts ou portiques où un seul GRADATHYR peut commander plusieurs moteurs.

A.2 VARIATION DE VITESSE PAR VARIATION DU COURANT ROTORIQUE : le R O T O M A T

I ● PRINCIPE

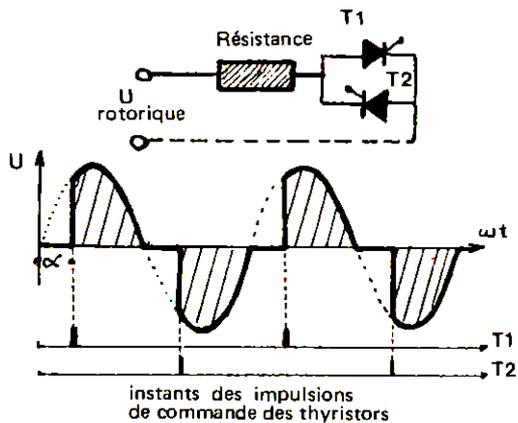
Chaque phase du circuit rotorique du moteur à bagues se termine par deux thyristors montés en tête-bêche, l'un pour les alternances positives, l'autre pour les alternances négatives de la tension rotorique.

On règle le courant rotorique en le faisant circuler plus ou moins longtemps, selon le retard à l'allumage des thyristors.

Rappel : On sait qu'un moteur asynchrone est constitué :

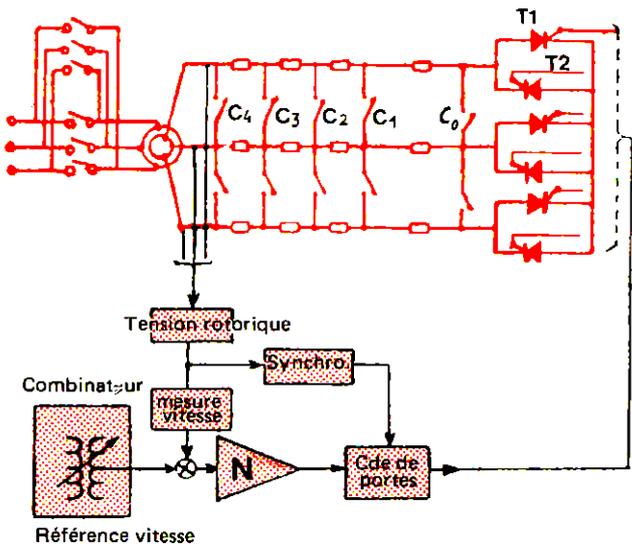
- d'un enroulement statorique triphasé qui produit un champ tournant, dépendant de la fréquence f du secteur et du nombre p de paires de pôles, à la vitesse de synchronisme N_s .

$$N_s = f/p$$



| Machine à courants alternatifs | f | p | N _s | |
|--------------------------------|---------|---|----------------|------------|
| | | | tr/s | tr/mn |
| Machine bipolaire | 50 Hz | 1 | 50 tr/s | 3000 tr/mn |
| | 150 Hz | 1 | 150 tr/s | 9000 tr/mn |
| Machine tétrapolaire | 50 Hz | 2 | 25 tr/s | 1500 tr/mn |
| | 12,5 Hz | 2 | 6,25 tr/s | 375 tr/mn |

PRINCIPE DE LA VARIATION DU COURANT ROTORIQUE (sur une phase)



- d'un enroulement rotorique triphasé, fermé sur une résistance extérieure à l'aide des bagues et balais.

Le champ statorique balaie les enroulements du rotor qui tourne à une vitesse N inférieure à N_s et y développe une f.e.m. (dépendant du glissement g), qui crée le courant rotorique (dépendant de la résistance rotorique) qui, dans le champ génère le couple.

- Le couple moteur G_m est proportionnel au carré du courant rotorique I .
- D'après la relation générale de la dynamique :

$$J \frac{dN}{dt} = C_m - C_r$$

où J est le moment d'inertie des masses en mouvement (moteur et charge entraînée), la variation de vitesse dN/dt est obtenue par variation du couple C_m , c'est-à-dire du courant rotorique I .

- Accélérer : c'est augmenter C_m .
- Décélérer : c'est diminuer C_m .

Quand la vitesse augmente, le rotor tourne avec le champ statorique :

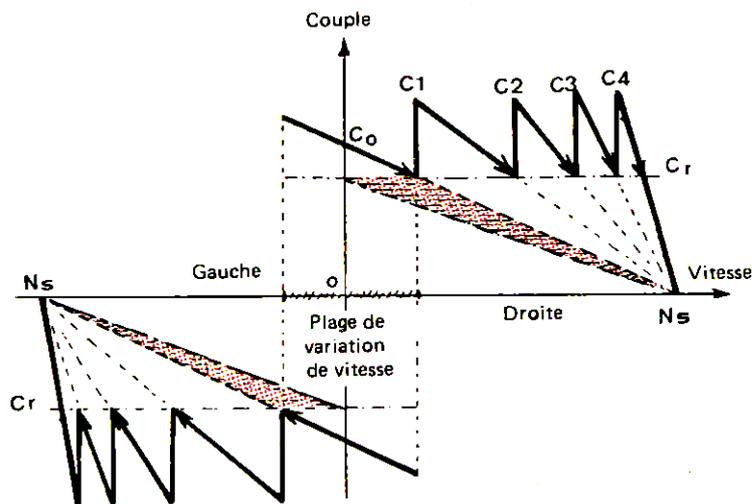
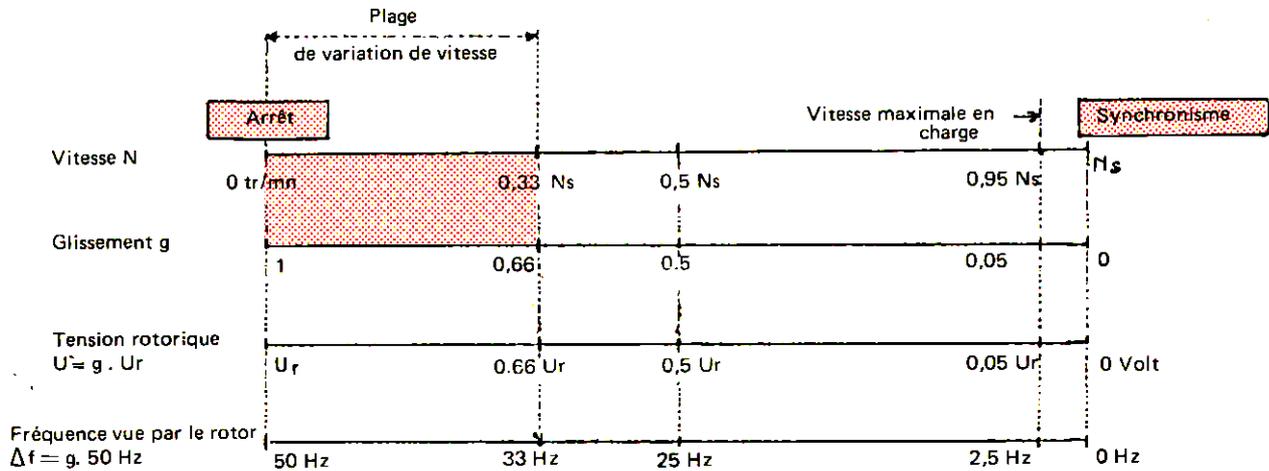
- le glissement $g = (N_s - N)/N_s$ diminue. N : vitesse de rotation du moteur $N = N_s (1 - g)$
- la tension rotorique $U = g \cdot U_r$ (U_r = tension rotorique à l'arrêt) diminue
- la fréquence de rotation, $f_r = g \cdot 50$ Hz diminue.
- La fréquence vue par le rotor, c'est-à-dire la fréquence des courants rotoriques $\Delta f = g \cdot 50$ Hz, diminue. Δf est la différence entre la fréquence d'alimentation du stator et la fréquence de rotation du rotor.

2 • VARIATION DE VITESSE

• A l'arrêt : $N = 0$, $g = 100 \%$, $U = U_r$, $f_r = 50 \text{ Hz}$
 Le moteur se comporte comme un transformateur.

• Au synchronisme (cas d'un couple résistant nul) :

$N = N_s$, $g = 0$, $U = 0 \text{ Volt}$, $f_r = 0 \text{ Hz}$



Les parties hachurées correspondent à la plage de variation de vitesse. On a supposé le couple résistant C_r constant.

Diminuer le courant rotorique, en ne laissant passer qu'une partie du temps (grâce aux thyristors), a le même effet qu'augmenter la résistance rotorique, c'est-à-dire travailler sur une courbe plus plate de couple en fonction de la vitesse.

La régulation de vitesse est obtenue sans dynamo tachymétrique par la mesure de la fréquence rotorique (page 20).

Pour rester économiques, les commandes de portes des thyristors sont utilisées à des fréquences comprises entre 50 et 33 Hz, c'est-à-dire que la régulation de vitesse se fait entre l'arrêt et le tiers de la vitesse de synchronisme.

Au-delà de ces vitesses, les thyristors sont court-circuités par contacteurs, et le démarrage rotorique normal, court-circuitant les résistances porte le moteur à des paliers de vitesse et jusqu'à sa vitesse nominale de l'ordre de 0,95 Ns. Des contacteurs d'inversion statorique permettent la marche dans les deux sens D et G (page 20).

Remarque :

Pour une variation de vitesse au voisinage de 0 ($g \neq 1$), la puissance perdue dissipée au rotor $P_r = g \cdot P$ peut donc atteindre la pleine puissance P du moteur, dans le cas d'un couple constant (page 18).

Le rendement d'un ROTOMAT ne pouvant donc pas être important, cette solution ne peut être convenable que pour des moteurs de faibles puissances ($P < 100$ kW).

3 • DOMAINES D'APPLICATIONS

Comme la puissance de glissement ($P_r = g \cdot P$), dissipée dans les résistances, peut être importante et même atteindre la pleine puissance du moteur (pour $g = 1$), le système ROTOMAT n'est utilisé que pour les faibles puissances, en service intermittent.

Les domaines d'application sont surtout ceux du levage à service intermittent, où :

- . les grandes distances sont parcourues à grande vitesse ($g \neq 0$: réglage gros par contacteurs),*
- . à l'abordage, le réglage fin est obtenu par le ROTOMAT à thyristors, toutes résistances rotoriques insérées ($g \neq 1$).*

A.3 EQUIPEMENT A RECUPERATION DE L'ENERGIE ROTORIQUE DE GLISSEMENT : LE VAROTOR

1 • PRINCIPE

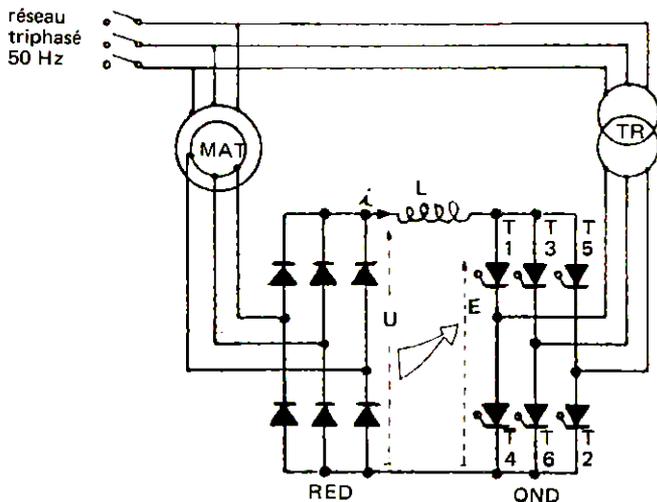
La machine entraînée est un moteur asynchrone bobiné, à bagues.

Au lieu de régler le courant rotorique en dissipant l'énergie de glissement ($P_r = g \cdot P$) dans des résistances, cette énergie est renvoyée au réseau et donc récupérée.

La tension alternative rotorique est d'abord redressée puis ondulée.

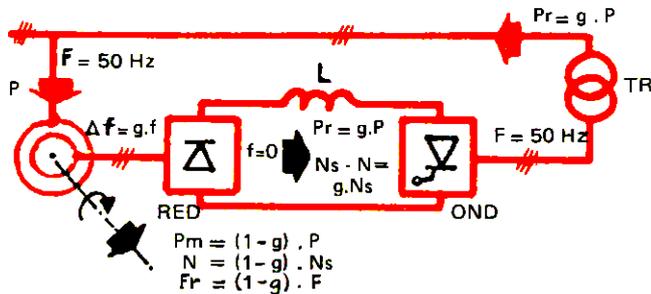
La tension rotorique, alternative triphasée, d'amplitude et de fréquence proportionnelle au glissement $g = \frac{N_s - N}{N_s}$

est redressée par un pont de Graëtz à diodes (RED) qui fournit une force électromotrice U.



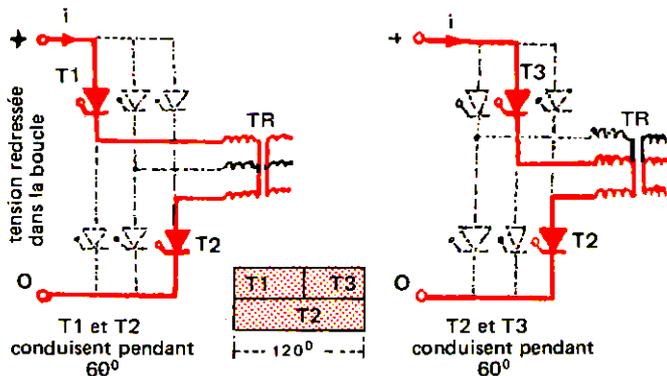
Le réglage du courant rotorique s'obtient en opposant à U une f.c.e.m. E générée par un pont de Graëtz composé des 6 thyristors T1 à T6 fonctionnant en onduleur : Tension E négative à ses bornes, ajustable par le réglage du retard α (entre 90° et 180°) à l'amorçage des thyristors (page 10).

Entre les ponts RED et OND, une inductance de lissage, L, absorbe à chaque instant l'écart de tension entre RED et OND, découple les deux ponts, lisse le courant rotorique redressé, et permet le fonctionnement du pont OND en onduleur.



Il y a transfert d'énergie du rotor, via OND, vers le réseau par l'intermédiaire d'un transformateur TR d'adaptation des tensions du rotor et du réseau.

Piloté par les phases du secteur 50 Hz, le courant rotorique est normalement commuté par les couples de thyristors T1*T2, T2*T3, T3*T4 ... et renvoyé au réseau par TR. Cette commutation est indépendante de la fréquence rotorique qui varie avec la vitesse du MAT. Elle est synchronisée par le réseau 50 Hz.



Le courant rotorique redressé I, qui ne peut circuler que dans un seul sens, de U vers E, est :

$$I = \frac{U - E}{Z}$$

Z est l'impédance du circuit rotorique comprenant l'inductance L.

2 ● REGLAGE DE LA VITESSE DU MAT

- Pour accélérer : Il faut augmenter le couple, donc augmenter le courant rotorique I , donc obtenir une f.c.e.m. E moins négative, en diminuant le retard (α vers 90°).

L'augmentation de couple fait atteindre la nouvelle vitesse désirée.

- Pour décélérer : Il faut diminuer le couple, donc I . Le courant peut même s'annuler si $U < E$, et le moteur ralentit par le couple résistant jusqu'à atteindre la nouvelle vitesse désirée. La diminution de I est obtenue par une f.c.e.m. E plus négative, en augmentant le retard (α vers 180°).

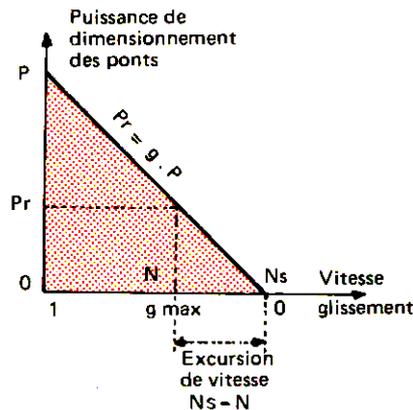
3 ● VARIATION TOTALE ET VARIATION PARTIELLE DE VITESSE. DIMENSIONNEMENT DES PONTS

Comme il a été montré en page 18, la puissance P absorbée par le moteur se répartit en puissance mécanique $P_m = (1 - g) \cdot P$, utile sur l'arbre du moteur, et en puissance rotorique de glissement $P_r = g \cdot P = g \cdot C \cdot N_s$ proportionnelle au glissement et au couple.

Les ponts du VAROTOR doivent tenir :

- le courant I_r pour obtenir le couple, et
- la tension rotorique maximale ($U = g_{\max} \cdot U_r$) proportionnelle à l'excursion de glissement de 0 à g_{\max} , donc à l'excursion de vitesse $N_s - N$.

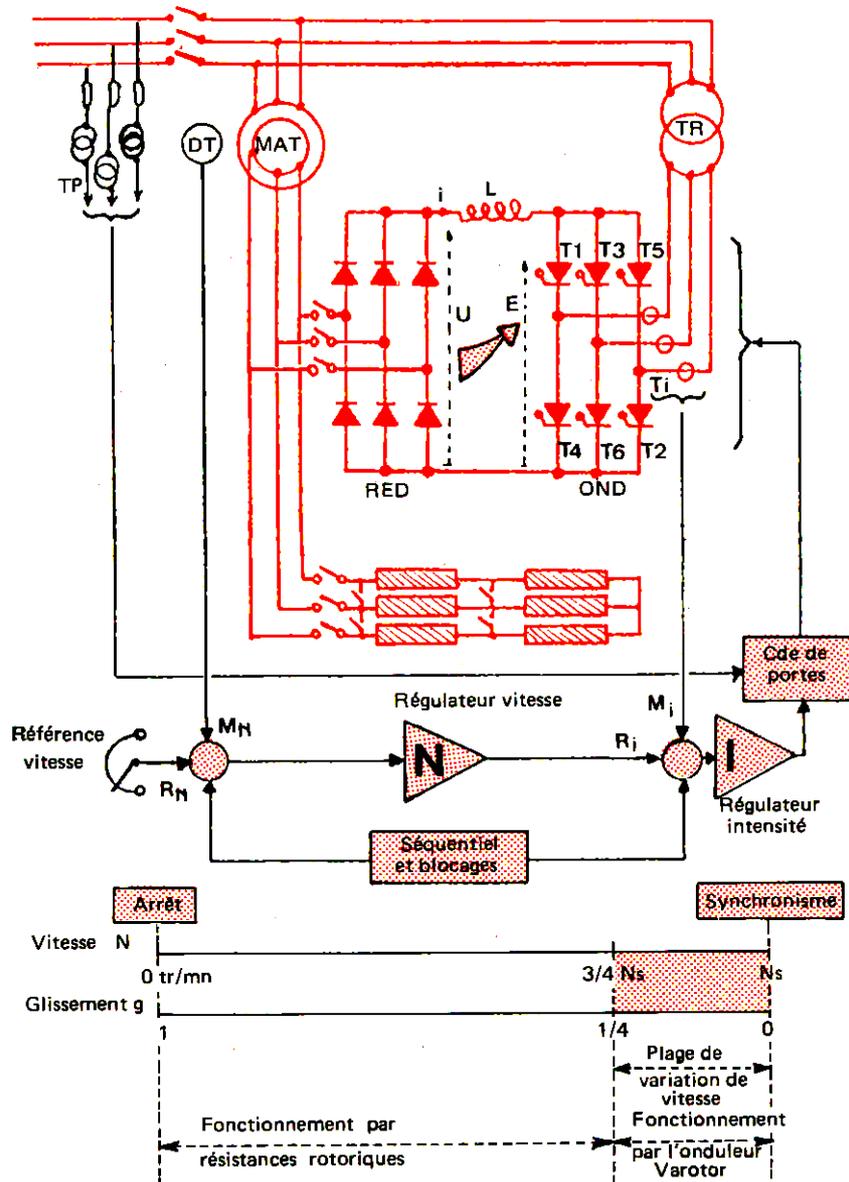
Ils doivent donc être dimensionnés pour : $g_{\max} \cdot U_r \cdot I_r = g_{\max} \cdot U \cdot I = g_{\max} \cdot P$, c'est-à-dire la puissance rotorique $P_r = g \cdot P = g \cdot C \cdot N_s$



- 31 ● DANS LE CAS D'UN VAROTOR A VARIATION TOTALE DE VITESSE**, de l'arrêt (calage 0 tr/mn, glissement 1) à la vitesse de synchronisme N_s , glissement 0), la puissance rotorique à commuter varie de $P_r = 1 \cdot P$ à $P_r = 0$

Les ponts RED et OND sont dimensionnés pour la totalité de la puissance P du MAT, et le schéma est celui décrit précédemment. Ils sont déterminés pour la vitesse la plus faible. Ici, ils assurent le démarrage du moteur.

32 ● DANS LE CAS D'UN VAROTOR A VARIATION PARTIELLE DE VITESSE : par exemple de $3/4.N_s$ ($g = 1/4$) à N_s ($g = 0$), la puissance rotorique à commuter varie de $P_r = P/4$ à 0.



Les ponts pourraient être avantageusement réduits pour transiter $g.P$, ici $P/4$: le quart de la puissance du MAT.

La montée en vitesse se fait alors par résistances et contacteurs rotoriques de $N = 0$ à $N = 3/4.N_s$, vitesse basse de la plage de variation choisie, à partir de laquelle les résistances de démarrage sont éliminées et l'équipement VAROTOR redresseur-onduleur rejoint sa vitesse de consigne et prend le MAT en charge.

Mais la diminution de prix des ponts est contrebalancée par le coût du démarreur rotorique, un volume et un poids plus importants.

4 ● PUISSANCE REACTIVE ABSORBÉE

On a vu (page 13) que le pont de GRAETZ a un facteur de puissance :

$\cos \varphi = 1$ pour une tension continue maximale, plein redresseur ou plein onduleur,

$\cos \varphi = 0$ pour une tension continue moyenne nulle.

- Ainsi, avec un MCC, le facteur de puissance du pont est :

$\cos \varphi = 1$: à pleine vitesse du moteur

$\cos \varphi = 0$: à vitesse nulle du moteur.

- Avec un VAROTOR connecté à un MCA, c'est l'inverse.

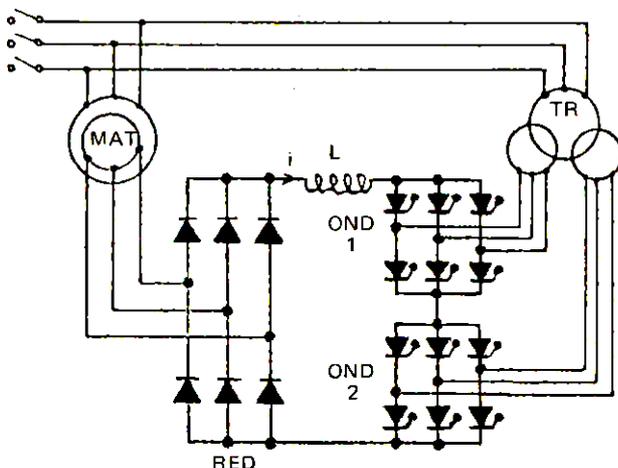
- A l'arrêt : Plein glissement, pleine tension rotorique : $\cos \varphi$ de l'onduleur : voisin de 1

- A pleine vitesse : Glissement faible, tension rotorique voisine de 0 : $\cos \varphi$ de l'onduleur : voisin de 0

Pour une plage de variation de vitesse proche de la pleine vitesse, par exemple

de $3/4 N_s$ ($g = 1/4$) à N_s ($g = 0$), le $\cos \varphi$ est mauvais, c'est-à-dire que beaucoup d'énergie réactive est consommée.

Pour limiter la consommation d'énergie réactive, surtout dans le cas de grandes puissances de moteurs, on a intérêt économique à remplacer l'onduleur unique par deux onduleurs de tension moitié, montés en série et reliés chacun à l'un des deux secondaires du transformateur.



Au voisinage du synchronisme, la tension redressée U est très faible. La tension aux bornes des onduleurs E doit être aussi faible. U est égal à E , à ZI près.

Un onduleur unique aurait à travailler pour $E \neq 0$ à $\alpha = 90^\circ$ c'est-à-dire à $\cos \varphi \neq 0$, c'est-à-dire dans les plus mauvaises conditions de facteur de puissance du pont onduleur.

Avec deux onduleurs en série, l'inconvénient disparaît.

Pour obtenir une tension voisine de 0 :

- OND1 : travaille plein redresseur ($\alpha = 0^\circ$), donc $+ E/2$ à ses bornes et $\cos \varphi = 1$,
- OND2 : travaille plein onduleur ($\alpha \neq 180^\circ$), donc $- E/2$ à ses bornes et $\cos \varphi = 1$.

Il n'y a plus de consommation de réactif.

Cependant, ce dispositif à double onduleur est peu utilisé pour de petites machines car la puissance réactive consommée reste faible.

Remarques : Dans le cas de l'excursion totale de vitesse, à partir de l'arrêt (pleine tension rotorique) jusqu'à N_{max} , le dispositif à double onduleur :

- présente un intérêt économique, quand la tension rotorique est élevée : (cas général des grosses puissances), puisque les ponts OND1 et OND2 sont de tension moitié,
- ne présente pas d'intérêt quand la tension rotorique faible (ex. 300 V, cas des petites puissances de moteurs) est acceptable par tous les semi-conducteurs industriels.

5 ● PERFORMANCES DU VAROTOR

Le VAROTOR est une CASCADE HYPOSYNCHRONE : il ne peut pas fonctionner en moteur au-delà de la vitesse de synchronisme.

Dans le VAROTOR, le pont redresseur à diodes ne permet qu'un simple redressement du courant fourni par le rotor, et non pas un contrôle du courant qu'il faudrait fournir au rotor pour freiner en récupération.

51 ● LA CASCADE HYPOSYNCHRONE VAROTOR POSSEDE PLUSIEURS AVANTAGES :

- une plage de variation de vitesse continue et étendue,
- de nombreuses possibilités de régulation automatique,
- un bon rendement (de l'ordre de 95 %), meilleur qu'avec un MCC alimenté par convertisseur statique.
- l'investissement peut, dans une certaine mesure, être réduit en cas d'une plage partielle de variation de vitesse (par exemple, de 0,5 Ns à Ns).

52 ● MAIS LA CASCADE HYPOSYNCHRONE A UN CERTAIN NOMBRE DE CONTRAINTES :

- La présence de bagues rotoriques et de balais du moteur asynchrone à bagues est inévitable. Ces contraintes restent tout de même moins graves que celles relatives au collecteur d'une machine à courant continu,
- La vitesse maximale ne peut pas dépasser 3 000 tr/mn avec une machine bipolaire, alimentée par le réseau 50 Hz.
- Le système peut décrocher, en cas de microcoupures du secteur. En effet, dans le pont ONDULEUR, ($I = \frac{U - E}{Z}$), si le réseau disparaît, la f.c.e.m. E disparaît, et le courant peut croître d'une façon dangereuse. Il faut se prémunir par un certain nombre de sécurités, contre ce risque de "décrochage" du pont ONDULEUR.
- En cas de variation partielle de vitesse, l'équipement auxiliaire de démarrage (résistances, contacteurs ...), entraîne des contraintes de poids, d'encombrement, de prix ...

6 ● DOMAINES D'APPLICATIONS

Tous domaines d'entraînement à vitesse variable, et jusqu'à plusieurs mégawatts de puissance :

- à 1 sens de marche, ou
- à 2 sens de marche, en inversant l'alimentation statorique, par contacteurs.

Exemples : Soufflantes, pompes, compresseurs, ventilateurs, broyeurs, calandres, étireuses, malaxeurs, transporteurs.

B**VARIATION DE VITESSE PAR FREQUENCE VARIABLE
AU STATOR**

Lorsqu'il est nécessaire de faire fonctionner des moteurs alternatifs à des vitesses variables, en particulier lorsqu'il est nécessaire de les démarrer en charge et de les amener ensuite à des vitesses voulues, la meilleure solution technique consiste à alimenter leur stator à fréquence variable.

La conversion de la fréquence fixe du réseau en une fréquence variable d'alimentation du stator du moteur à courants alternatifs peut être :

- directe : c'est le cas des cycloconvertisseurs
- indirecte : par l'intermédiaire d'une boucle à courant continu, c'est le cas des onduleurs.

B.1**LE CYCLOCONVERTISSEUR**

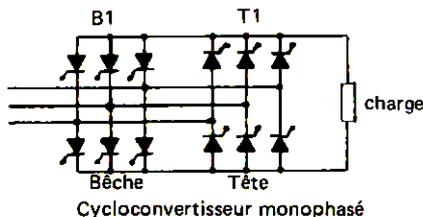
Lorsque la fréquence maximale d'alimentation reste nettement inférieure à la fréquence du réseau électrique dont on dispose, il est intéressant de constituer l'alimentation à fréquence variable par des convertisseurs statiques à thyristors.

Le groupement des convertisseurs statiques, qui constituent un ensemble susceptible de convertir la fréquence et la tension du réseau sans passer par une boucle intermédiaire à courant continu, porte le nom de **CYCLOCONVERTISSEUR**.

LE CYCLOCONVERTISSEUR MONOPHASE

Un convertisseur délivre du courant dans une seule direction.

Pour obtenir un cycloconvertisseur capable de fournir une succession de courants, positifs et négatifs, il est donc nécessaire d'alimenter la charge par 2 convertisseurs montés en tête-bêche.



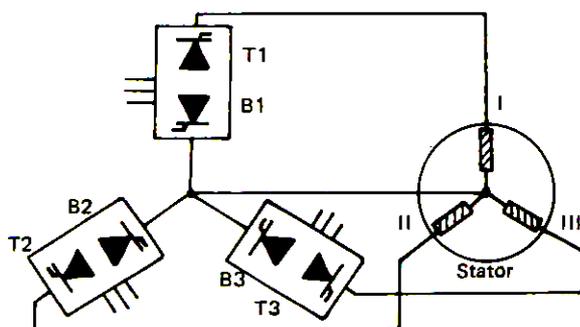
Les ponts tête-bêche T1 et B1 qui alimentent la charge monophasée ressemblent à une alimentation continue réversible.

Le pont en fonctionnement détermine le sens du courant.

La loi de commande du retard α à l'amorçage des thyristors détermine le sens et l'amplitude de la tension de sortie.

LE CYCLOCONVERTISSEUR TRIPHASE

Il se compose de 3 cycloconvertisseurs monophasés



*cycloconvertisseur et moteur
sont tous deux couplés en étoile*

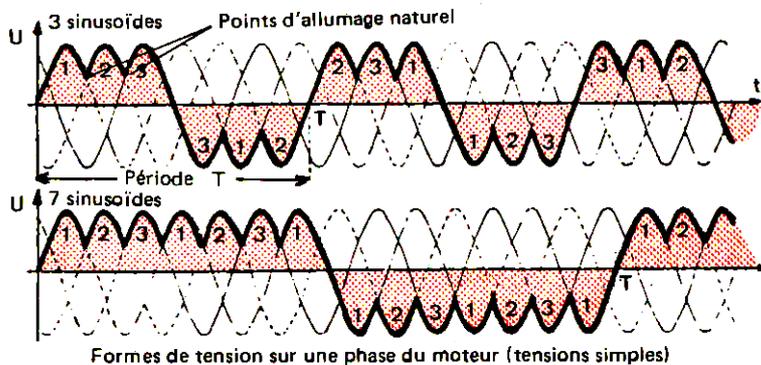
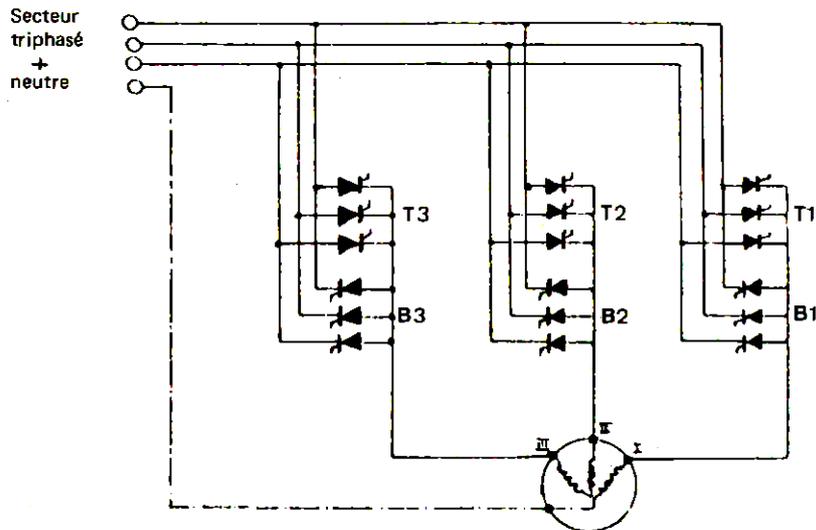
Chacune des phases du moteur, synchrone ou asynchrone, à alimenter, est raccordée au réseau électrique au travers de deux ponts de Graëtz montés en groupe tête-bêche.

Les trois groupes tête-bêche, constituant l'alimentation des trois phases du moteur, sont connectés en étoile, comme le sont d'ailleurs les enroulements des trois phases du moteur.

Le point commun des groupes tête-bêches est relié au point commun de l'étoile du moteur et l'extrémité libre de chaque groupe tête-bêche est relié à l'extrémité libre d'une des phases du moteur (I, II et III).

1 ● CYCLOCONVERTISSEUR A ONDES PLEINES

11 ● CYCLOCONVERTISSEUR A DEMI-PONTS DE GRAETZ



Utilisation des tensions simples du secteur (triphase simple alternance).

Considérons par phase un pont triphasé simple, c'est-à-dire un demi-pont de Graëtz. On utilise donc les tensions simples phase-neutre, (sinusoïdes 1, 2, 3 du secteur) et non les tensions composées entre phases.

- Sur la phase I du moteur, on applique :

- les 3 sommets positifs des sinusoïdes 1, 2, 3 du réseau : fonctionnement redresseur du pont tête T1 en commutations naturelles (retard $\alpha = 0$),
- puis les 3 sommets négatifs des sinusoïdes 3, 1, 2, du réseau : fonctionnement redresseur du pont bêche B1 en commutations naturelles, après passage de T1 en onduleur,
- de nouveau, les trois sommets positifs, etc ...

On a donc appliqué à la phase I du moteur une tension alternative de fréquence plus faible que celle du réseau, et d'autant plus faible que le nombre de sommets de sinusoïdes est plus élevé.

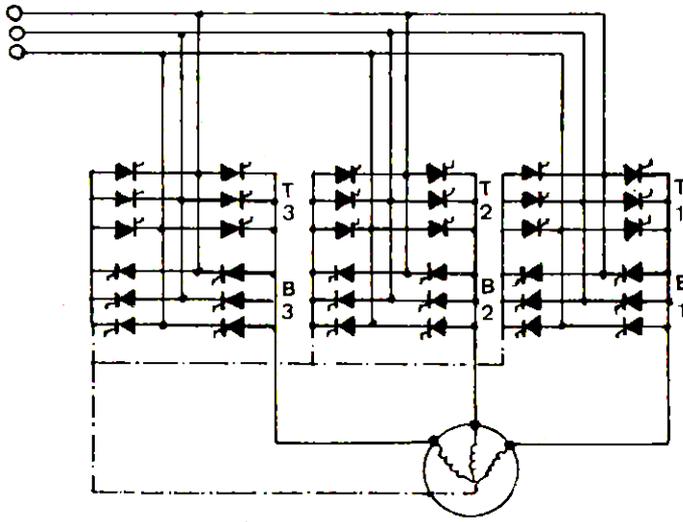
- Sur la phase II du moteur, les mêmes tensions seraient appliquées, par T2 et B2, décalées d'1/3 de période.
- Sur la phase III du moteur, les mêmes tensions seraient appliquées, par T3 et B3, décalées de 2/3 de période.

On a ainsi réalisé, en principe, un système triphasé dont la fréquence est variable avec le nombre de sommets de sinusoïdes.

12 • CYCLOCONVERTISSEUR A PONTS DE GRAETZ COMPLETS

Utilisation des tensions composées (entre phases) du secteur (triphase double alternance : hexaphasé).

Chaque phase du moteur est reliée par ponts de Graëtz tête-bêche au secteur. Le pont de Graëtz utilise les tensions entre phases du secteur, et chaque période comprend 6 sommets de sinusoides alors que le demi-pont de Graëtz utilise les tensions simples phase-neutre, et chaque période comprend 3 sommets de sinusoides.



Cycloconvertisseur industriel à 3 ponts de Graëtz tête-bêche

Avec ponts de Graëtz :

- 1 sommet de sinusoides correspond à 50 Hz. Période $T = 1 \text{ sec}/50 = 20 \text{ ms}$ $t = 20 \text{ ms}/6$. On a 3 t par demi-sinusoides.

- n sommets de sinusoides, c'est-à-dire $(n + 2) t$ par demi-sinusoides, correspondent à une fréquence

$$f = 50 \text{ Hz} \cdot \frac{3}{n+2}, \text{ c'est-à-dire une période}$$

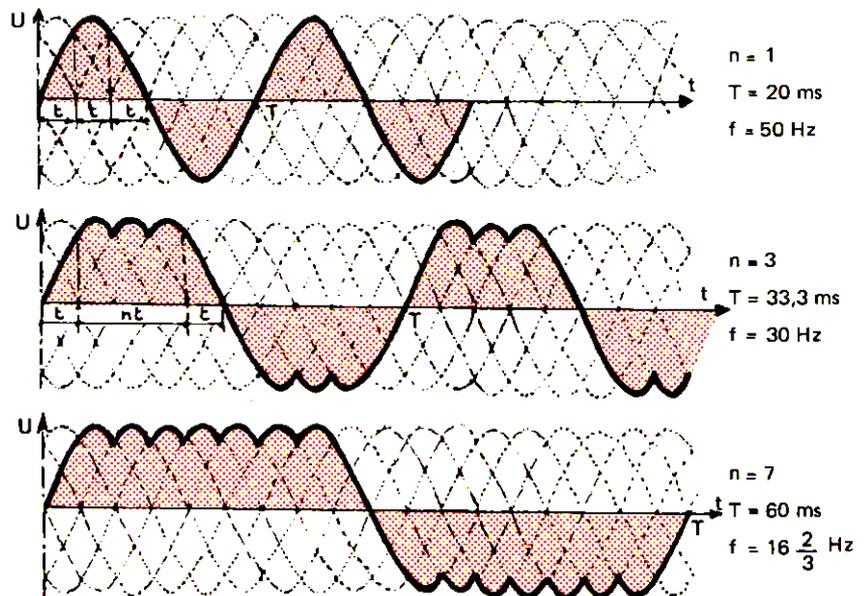
$$T = \frac{n+2}{150} \text{ secondes. } f = \frac{150}{n+2}$$

donc pour :

| | | |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|
| $n = 2$ sommets | $f = 37,5 \text{ Hz}$ | $T = 26,6 \text{ ms}$ |
| $n = 3$ sommets | $f = 30 \text{ Hz}$ | $T = 33,3 \text{ ms}$ |
| $n = 7$ sommets | $f = 16,6 \text{ Hz}$ | $T = 60 \text{ ms}$ |

- A grande fréquence, c'est-à-dire avec un petit nombre de sommets de sinusoides, le passage de 2 à 3 sommets fait chuter brutalement la fréquence de 37,5 à 30 Hz, ce qui entraînerait le décrochage du moteur.

- A basse fréquence, c'est-à-dire avec un grand nombre de sommets de sinusoides, le passage, par exemple, de 70 à 71 sommets, ne modifierait pratiquement pas la fréquence qui passerait de 2,08 à 2,05 Hz.

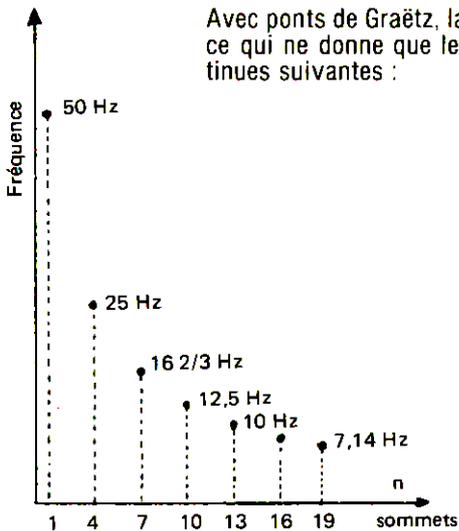


Formes de tension sur une phase du moteur (tensions composées)

13 • INCONVENIENTS

Les inconvénients d'un cycloconvertisseur à ondes pleines sont nombreux.

- La variation de fréquence est discontinue, la plus petite variation correspond à un sommet de sinusoides.
- on ne peut pas utiliser n'importe quel nombre de sommets de sinusoides. On ne peut retenir que les nombres de sommets tels que la période engendrée soit découparable en trois tranches égales pour obtenir un système triphasé où les trois phases soient décalées d' $1/3$ de période.



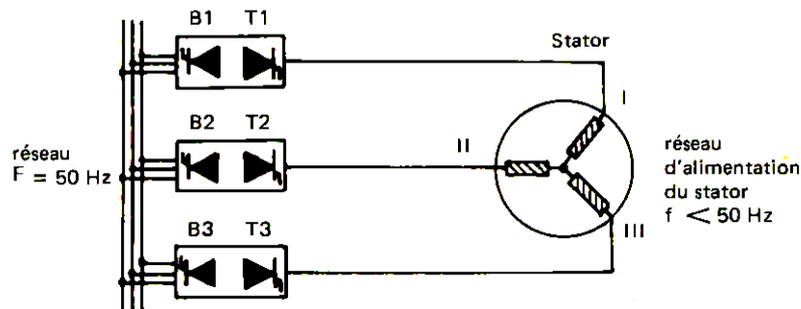
| n | Période T | Fréquence 1/T |
|----|-----------|---------------|
| 1 | 20 ms | 50 Hz |
| 4 | 40 ms | 25 Hz |
| 7 | 60 ms | 16 2/3 Hz |
| 10 | 80 ms | 12,5 Hz |
| ↓ | ↓ | ↓ |
| 19 | 140 ms | 7,14 Hz |

Un cycloconvertisseur à ondes pleines ne peut pas régler l'amplitude de tension. Or, aux chutes ohmiques près, la tension à appliquer à la machine est proportionnelle à la vitesse. Comme on veut généralement faire travailler la machine à flux constant, c'est-à-dire à U/f constant, il faut pouvoir ajuster la tension U à appliquer à la machine, à sa fréquence f d'alimentation, c'est-à-dire à sa vitesse.

Ce type de CYCLOCONVERTISSEUR ne trouve son application que si l'on dispose d'un générateur tel qu'un DIESEL entraînant un alternateur, où on puisse régler l'amplitude de la tension.

2 ● CYCLOCONVERTISSEUR A REGLAGE DE PHASES

Le schéma de puissance est le même que précédemment, le système est toujours branché sur le réseau 50 Hz sans boucle intermédiaire à courant continu.



21 ● PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

211 ● FONCTIONNEMENT D'UNE PHASE DU MOTEUR

- a) Dans une première approche de l'analyse, supposons que le facteur de puissance ($\cos \varphi$) de la charge connectée au cycloconvertisseur soit égal à 1, ce qui signifie que tension et courant sont en phase et proportionnels. Supposons que cette charge soit la phase I du moteur.

On peut par la pensée, remplacer l'enroulement de phase du moteur par l'induit d'un moteur à courant continu.

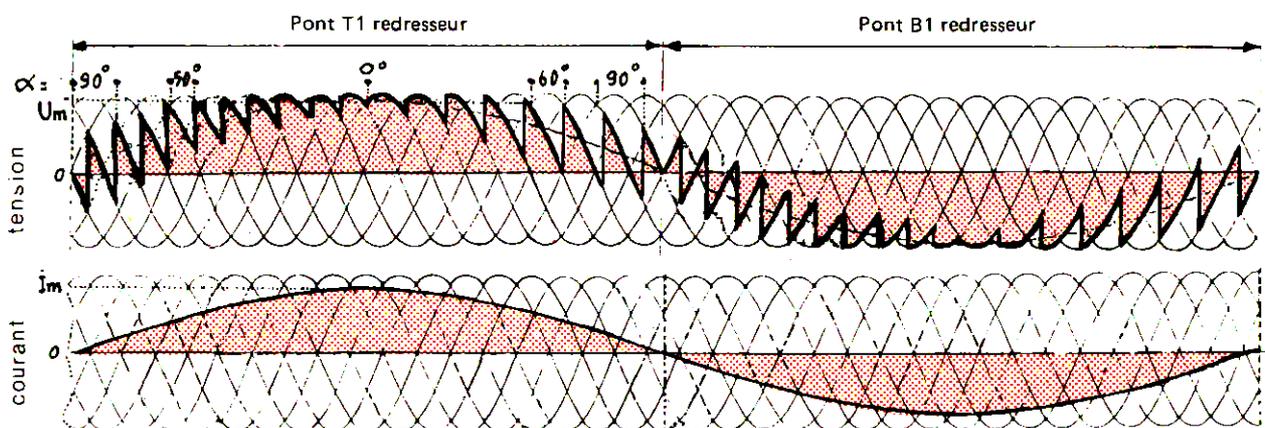
- Si l'on veut fournir du courant dans un sens donné au moteur, on agira sur les portes des thyristors du pont qui a le même sens de conduction que le sens du courant que l'on veut faire circuler. Supposons pont tête. Le pont bêche B1 est bloqué (suppression de ses impulsions d'amorçage de portes).

Supposons que l'on applique au pont tête T1 des impulsions d'amorçage avec un angle de retard α tel que la tension moyenne soit voisine de zéro ($\alpha \neq 90^\circ$). Puis que l'on diminue l'angle de retard α de manière à faire croître lentement et d'une façon sinusoïdale la tension redressée jusqu'à une certaine valeur maximale V_m ($\alpha \neq 0$). Qu'ensuite, on agisse à nouveau sur l'angle de retard α de manière à amener lentement la tension redressée de la valeur maximale à zéro ($\alpha \neq 90^\circ$).

Comme par hypothèse, $\cos \varphi = 1$ pour la charge, si on suppose de plus, provisoirement, qu'elle ne comporte pas de f.e.m., on aura fait circuler dans la charge un courant proportionnel à la tension, c'est-à-dire qui, partant de zéro, sera passé par un maximum I_m , puis sera revenu à zéro. Sous l'effet de la demi sinusoïde de courant reçue par le moteur, ce dernier se met à tourner.

- Supposons qu'à l'annulation du courant, après la demi-sinusoïde considérée, l'excitation du moteur ait changé de sens. Si on veut qu'il continue à tourner dans le même sens que précédemment, il faut changer le sens des caractéristiques d'alimentation d'induit, c'est-à-dire le sens du courant et la polarité de la tension. Il suffira de rendre conducteur le pont bêche B1 de la phase I et de bloquer le pont tête T1.

En s'imposant une loi de variation convenable de l'angle de retard α en fonction du temps pour le pont bêche B1, on peut appliquer à la charge une tension redressée qui varie suivant une demi-sinusoïde, et sera de polarité opposée à la précédente. Il circulera un courant ayant la forme d'une demi-sinusoïde, de sens opposé au cas précédent.



Tension et courant sont supposés en phase

- On peut continuer ainsi, amorçant alternativement le pont tête, puis le pont bêche, imaginer que l'on alimente l'induit du moteur à courant continu par un courant alternatif à très basse fréquence (1 période = quelques secondes, par exemple), et si l'excitation du moteur à courant continu est inversée à chaque passage à zéro du courant d'induit, le moteur à courant continu tournera toujours dans le même sens en fournissant toujours un couple de même sens.

En fait, une telle alimentation de moteur à courant continu ne se rencontre pas dans la pratique. Nous l'avons seulement pris en considération parce que les alimentations d'induits de moteurs à courant continu sont bien connues et qu'il est aisé, à partir de là de donner le principe du fonctionnement d'une phase de cycloconvertisseur. Mais les images s'ajustent bien car dans une phase de moteur alternatif, la tension et le courant changent de sens chaque fois qu'un pôle inducteur passe sous un pôle induit.

On peut dire que si on amorce alternativement le pont tête, puis le pont bêche, avec une loi d'amorçage telle que les tensions redressées respectives aient l'allure d'une demi-sinusoïde (dont on néglige les ondulations à fréquence multiple de celle du réseau), on alimente la phase considérée du moteur par un courant alternatif sinusoïdal.

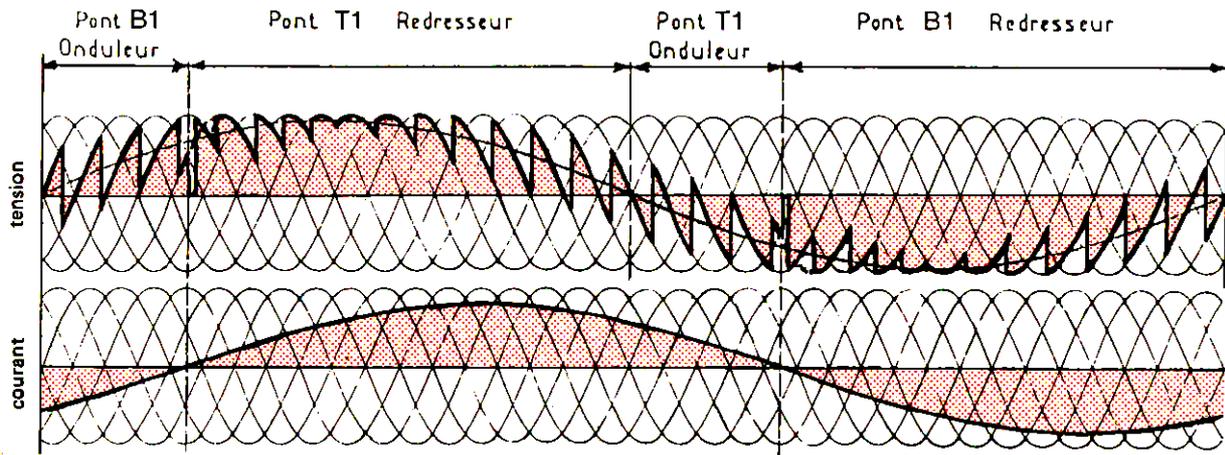
- b) Considérons maintenant une charge inductive. C'est le cas d'un moteur asynchrone où le courant est décalé en arrière par rapport à la tension.

La figure suivante représente l'évolution dans le temps de la tension et du courant débité par les ponts T1*B1 d'alimentation de la phase I du moteur à une fréquence de 8 Hz environ, pour le fondamental de la tension et le fondamental du courant.

Un détecteur de sens du courant en sortie définit le pont qui doit conduire.

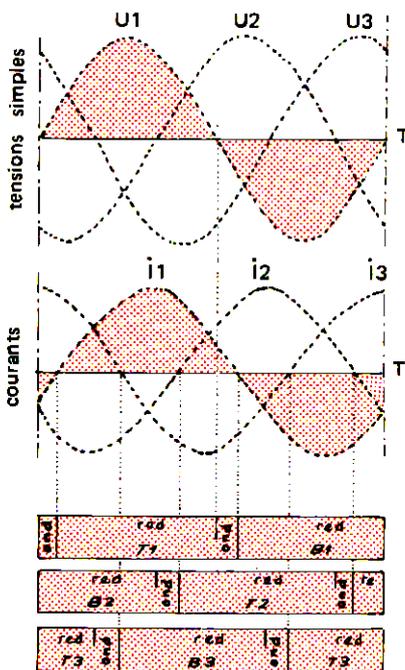
Chaque pont travaille (page 10) :

- en redresseur : quand son courant et sa tension moyenne sont de même sens,
- en onduleur : quand son courant et sa tension moyenne sont de sens opposés.



Dans cet exemple,
la période est de $6 \times 20 \text{ ms} = 120 \text{ ms}$
la fréquence est donc de $50 \text{ Hz} / 6 = 8 \frac{1}{3} \text{ Hz}$

212 • FONCTIONNEMENT DES 3 PHASES DU MOTEUR EN TRIPHASE



Chacune des phases du moteur peut être alimentée, par le groupe tête-bêche correspondant, par un courant alternatif si les organes qui élaborent les impulsions d'amorçage des 3 groupes tête-bêche suivent à tout instant la même loi :

- les 3 tensions appliquées aux phases du moteur sont les mêmes,
- et avec un décalage dans le temps, d'un tiers de la période de la fréquence sortante,

On a bien ainsi un système triphasé.

Dans la pratique c'est ainsi que l'on opère. Le dispositif de commande du cycloconvertisseur est unique et commun aux trois groupes tête-bêche, et délivre à chacun d'eux des impulsions d'amorçage convenablement distribuées dans le temps, de manière que les tensions fournies par les trois groupes tête-bêche forment à tout instant un système triphasé, de fréquence et d'amplitude convenables.

213 • REGLAGE DES AMPLITUDES

Pour établir des courants sinusoïdaux dans les phases du moteur, il faut qu'à tout instant, pour chaque phase, la tension moyenne fournie par le pont correspondant soit supérieure à la f.e.m. du moteur, d'une quantité convenable pour faire circuler le courant souhaité.

Comme la f.e.m. du moteur est proportionnelle à sa vitesse, la tension fournie par le cycloconvertisseur doit être réglée en amplitude en fonction de la vitesse du moteur et du courant à établir. L'amplitude de la tension fournie à une phase du moteur dépend de la valeur maximale U_m à laquelle on laisse s'établir la tension du pont qui est en débit.

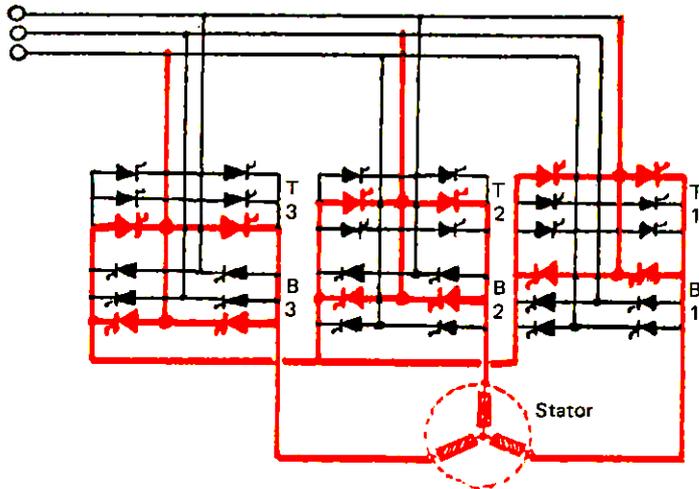
Dans la courbe tension de la page 33, l'amplitude de la tension moyenne est maximum. Pour cette tension maximum U_m , le thyristor correspondant est en amorçage naturel. L'angle de retard α est alors nul. Pendant l'intervalle de conduction correspondant, la tension redressée est bien la plus élevée possible.

Au contraire, l'amplitude de la tension moyenne est réduite si le thyristor conduisant pour le maximum de cette tension n'est allumé qu'après un certain retard (par exemple $\alpha = 15^\circ$).

22 • LIMITE DE FREQUENCE

On peut, sur le plan purement technique, fournir en sortie d'un cycloconvertisseur des tensions de n'importe quelle fréquence comprise entre zéro et la fréquence du réseau d'alimentation. (La fréquence 0 Hz signifie que le cycloconvertisseur est capable de délivrer une tension continue : son schéma est celui d'un redresseur en pont). Mais sur le plan économique il en est tout autrement.

Jusqu'à une fréquence égale au 1/3 de la fréquence du réseau, tous les thyristors de l'équipement travaillent de la même façon : mêmes courants pendant les mêmes temps avec les mêmes cycles de répétition.



Quand la machine est alimentée en 50 Hz, 12 thyristors seulement, sur les 36 thyristors, travaillent. Ils sont équivalents à un seul pont tête-bêche.

Au fur et à mesure que la fréquence de sortie dépasse le 1/3 de la fréquence du réseau, certaines branches des ponts ne conduisent plus, sont bloquées avant d'avoir pu conduire.

Il existe, par exemple, des fréquences de sortie où la même branche de pont ne conduit jamais, et où les deux autres branches de pont conduisent seules cycliquement. On peut même dire à la limite que si, dans chaque pont, la même branche conduisait toujours cycliquement, une demi-alternance du réseau, le moteur serait alimenté à la fréquence du réseau (par exemple 50 Hz), et la totalité de la puissance de la machine transiterait par ce seul bras.

Du fait de tels cycles de répétition, les thyristors qui débitent plus souvent que d'autres, sont plus chargés en courant ; ils voient des valeurs moyennes et efficaces plus élevées. Ils doivent être surdimensionnés. Comme on ne sait pas à l'avance quelles seront les branches de pont qui travailleront cycliquement plus souvent, il faut surdimensionner tous les thyristors.

Cette considération économique fixe la limite de fréquence supérieure qu'un cycloconvertisseur peut fournir et qui se situe environ au tiers de la fréquence du réseau. Jusqu'à cette fréquence de sortie, tous les thyristors sont chargés semblablement. La puissance des ponts n'est alors déterminée que par la puissance de la machine.

Au-delà du tiers de la fréquence du réseau, certains thyristors sont cycliquement plus chargés et, comme selon les régimes cela peut être n'importe lesquels, tous doivent être surdimensionnés. Ce surdimensionnement peut s'approcher du rapport 3 si l'on veut aller jusqu'à la fréquence du réseau.

Remarque : en traction, si l'alternateur accouplé au moteur thermique délivre une tension réglable (par son excitation) à 150 Hz, la fréquence maximum de sortie du cycloconvertisseur est de 50 Hz.

23 ● PUISSANCE REACTIVE CONSOMMEE : FACTEUR DE PUISSANCE DU CYCLOCONVERTISSEUR

Nous entendons par là, le facteur de puissance vu sur le réseau triphasé d'alimentation du cycloconvertisseur, et non pas le facteur de puissance de la charge connectée au cycloconvertisseur.

Considérons une phase du moteur alimentée par une tension sinusoïdale d'amplitude maximale (courbe tension de la page 33). L'angle d'amorçage α varie sans cesse.

Le retard à l'amorçage, voisin de 90° pour les passages par 0 de la tension redressée, est nul pour les sommets de la sinusoïde moyenne de tension redressée. On sait que le facteur de puissance au primaire d'un pont (transformateur ou réseau) est égal au cosinus de l'angle α de retard d'amorçage (page 13) :

$$\cos \alpha = \cos \varphi \text{ du pont côté réseau}$$

On aura donc, tout au long de la sinusoïde moyenne de tension redressée, un facteur de puissance partant de 0 pour aller à 1, et décroître à 0. Mais le réseau ne voit pas toutes ces fluctuations du facteur de puissance d'une phase car il alimente les trois tête-bêches correspondant aux trois phases du moteur, et les tensions fournies par les 3 tête-bêches constituent 3 sinusoïdes décalées d'un tiers de période de la fréquence de sortie.

Le réseau ne verra jamais un facteur de puissance nul puisque lorsqu'une des sinusoïdes de sortie passera par 0 (facteur de puissance nul sur le pont correspondant), les autres sinusoïdes seront près de leur maximum (facteur de puissance élevé sur les ponts correspondants).

- Pour une tension moyenne d'amplitude maximale, le facteur de puissance vu par le réseau, fluctue autour d'une valeur moyenne de l'ordre de 0,7.
- Par contre, lorsque le moteur est alimenté à une tension réduite, on ne trouve plus à aucun moment de thyristor en allumage naturel, et tout au long de la sinusoïde moyenne de tension redressée, le facteur de puissance varie de 0 à une valeur qui reste toujours inférieure à 1. Dans ce cas, le facteur de puissance sur le réseau est plus faible que dans le cas précédent. Sa valeur dépend de l'amplitude de la sinusoïde moyenne de tension redressée.

24 ● FREINAGE DYNAMIQUE A RECUPERATION D'ENERGIE

Grâce à la présence de ponts tête-bêche dans chaque phase du moteur, il est possible de transiter l'énergie, aussi bien du réseau électrique vers le moteur que du moteur vers le réseau.

Le moteur fonctionne alors en alternateur et le réseau en récepteur. Le freinage dynamique consiste, le moteur étant en marche, à afficher une vitesse nulle. Le moteur fonctionnera en générateur transformant l'énergie vive en énergie électrique, laquelle sera transitée par le cycloconvertisseur au réseau électrique, avec l'intensité maximale autorisée par la limitation. On a ainsi l'arrêt le plus rapide possible puisqu'il est effectué avec le couple résistant maximum possible.

25 ● APPLICATIONS

Le rendement des cycloconvertisseurs est excellent, de l'ordre de 97 % sans tenir compte du rendement des transformateurs d'alimentation, s'il y en a.

Comme les thyristors ont des commandes de portes en 50 Hz, la puissance est pratiquement illimitée, par exemple jusqu'à 30 MW, directement sur un réseau triphasé Moyenne tension (20 kV).

Les applications concernent essentiellement l'entraînement :

- **de moteurs lents de grande puissance (ex : fours annulaires à ciment), qui permettent de développer de forts couples à basse fréquence.**
Les machines sont alors attaquées directement, sans réducteur intermédiaire (augmentation de rendement et diminution du coût global). La construction des machines synchrones peut être annulaire, autour du four à ciment.
- **d'un ensemble de moteurs lents (ex : rouleaux de tables de laminoirs) :**
 - **à vitesse égale (moteurs synchrones)**
 - **à vitesse voisine (moteurs asynchrones).**

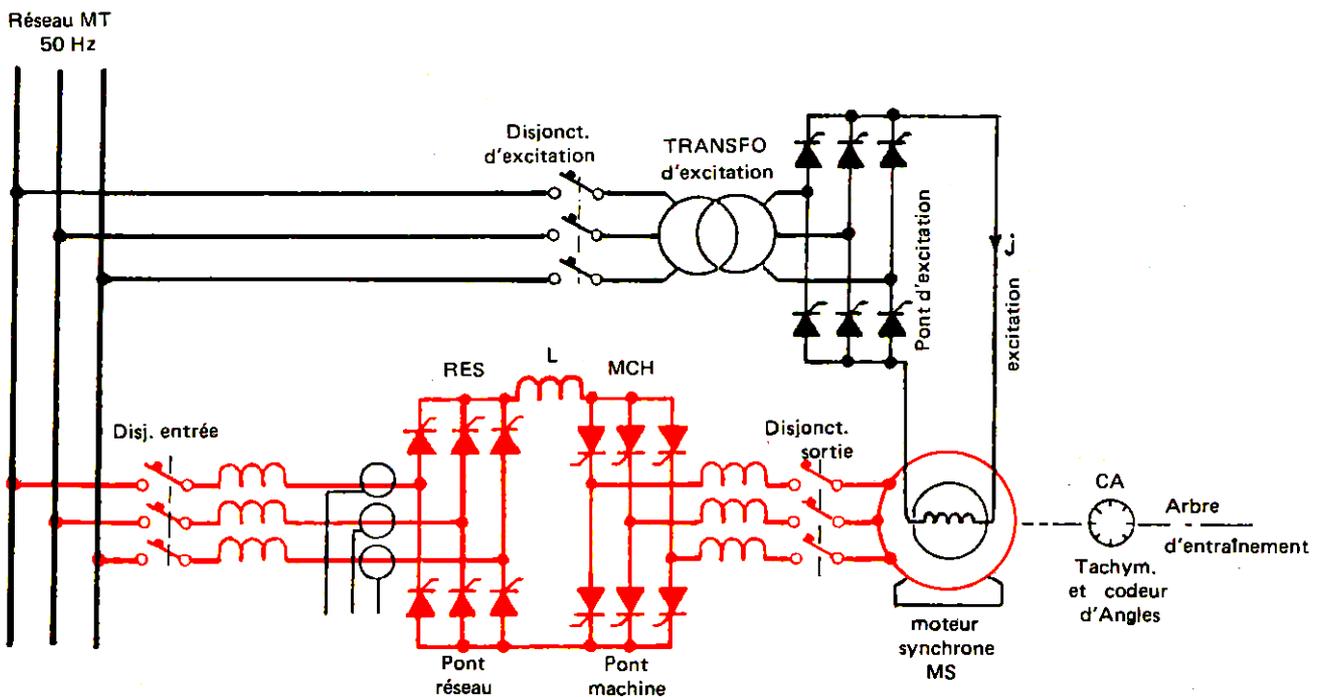
B.2 L'ONDULEUR AUTOSYNCHRONNE

L'onduleur autosynchrone, à commutation naturelle par la machine alimente une machine synchrone à fréquence variable donc à vitesse variable.

- **Le stator de la machine :** induit à enroulements triphasés, est alimenté par un système redresseur-onduleur comprenant :
 - un convertisseur côté réseau, RES, recevant l'énergie sous forme de courants alternatifs du réseau, et la fournissant sous forme de courant continu à la boucle intermédiaire,
 - un convertisseur côté machine, MCH, recevant l'énergie sous forme de courant continu de la boucle intermédiaire, et la fournissant sous forme de courants alternatifs polyphasés, de fréquence variable, à la machine synchrone, MS,
 - une boucle reliant les deux convertisseurs et comprenant l'inductance de lissage, L,
 - un dispositif codeur d'angles, CA, monté sur l'arbre de la machine et susceptible de donner à tout instant la position angulaire du rotor.

Par simplification de vocabulaire, ce système redresseur-onduleur est appelé ONDULEUR AUTOSYNCHRONNE.

- **Le rotor de la machine :** inducteur à courant continu, est excité par un pont d'excitation réglable.



ONDULEUR AUTOSYNCHRONNE PILOTANT UNE MACHINE SYNCHRONNE

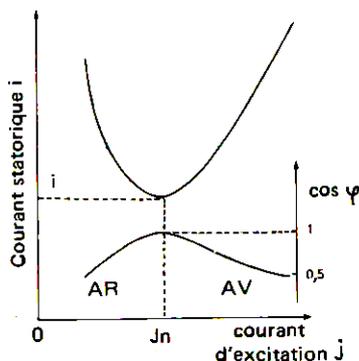
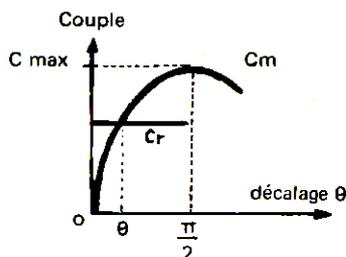
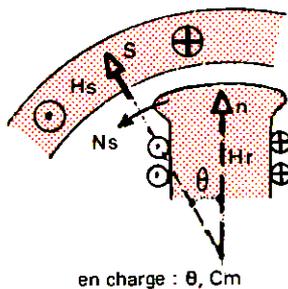
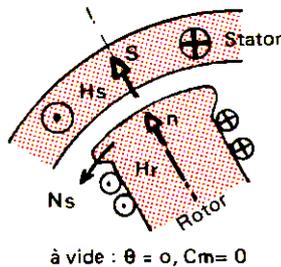
1 ● PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

11 ● RAPPEL SUR LE MOTEUR SYNCHRONE ALIMENTÉ PAR LE SECTEUR 50 Hz

111 ● CARACTERISTIQUES GÉNÉRALES

La machine synchrone est caractérisée par l'absence de glissement.

Dans une machine synchrone alimentée directement par le secteur, en courants triphasés sinusoïdaux :



- le Stator, identique à celui d'un moteur asynchrone triphasé, porte 3 enroulements triphasés (induit), alimentés par le réseau 50 Hz. Le champ induit tourne de façon uniforme en fonction de la fréquence fixe du réseau. Son alimentation fournit la puissance à l'arbre moteur.
- le Rotor porte un enroulement parcouru par du courant continu (inducteur), de même nombre de pôles que l'enroulement induit. Le champ inducteur fournit l'excitation. Son pôle nord n tend à se mettre sous le pôle Sud S du champ induit, et à tourner avec lui. Le rotor tourne donc aussi, d'une façon uniforme à la vitesse de synchronisme N_s .
- à vide : Couple résistant nul ($C_r = 0$) :
L'axe des bobines du rotor coïncide avec l'axe des pôles statoriques du champ induit tournant. Il n'y a pas de couple électromagnétique $C_m = 0$
- en charge (C_r existant) : Le champ inducteur au rotor H_r est décalé du champ induit au stator H_s , d'un angle θ fonction du couple, et constant pour un couple donné.

Le pôle nord n du champ inducteur suit le pôle Sud S du champ induit avec un retard θ constant. Le rotor tourne toujours à la vitesse de synchronisme N_s et un couple C_m fonction du décalage θ prend naissance.

112 ● COUPLE MOTEUR

Le couple moteur C_m s'adapte automatiquement à la charge.

A la limite, quand $\theta = \pi/2$, le couple moteur est maximum. Mais si θ tend encore à augmenter, le moteur "décroche" et s'arrête en provoquant des surintensités dangereuses.

113 ● FACTEUR DE PUISSANCE DU MOTEUR SYNCHRONE

Il dépend du courant d'excitation J .

Pour $J = J_n$, $\cos \varphi = 1$ et le courant statorique I est minimum,

Pour $J < J_n$, $\cos \varphi < 1$ en arrière. Le courant statorique est déphasé en arrière par rapport à la tension statorique U .

Pour $J > J_n$, $\cos \varphi < 1$ en avant. I est déphasé en avant par rapport à U .

114 ● DEMARRAGE DU MOTEUR SYNCHRONE

a) Pour démarrer un moteur synchrone alimenté par le secteur 50 Hz :

- un moteur de lancement est nécessaire pour entraîner l'inducteur dans le sens du champ tournant statorique à une vitesse voisine de celui-ci, et permettre l'accrochage des champs.
- le démarrage peut se faire en asynchrone, si le rotor est muni de cage d'écureuil, et sans excitation. Quand le moteur tourne près du synchronisme, l'excitation est enclenchée et le champ rotorique s'accroche au champ statorique.

b) Le 3ème procédé de démarrage et de réglage de vitesse consiste à alimenter le stator à fréquence variable de 0 à f_{max} . L'onduleur autosynchrone réalise cette fonction.

12 • MOTEUR SYNCHROME ALIMENTE A FREQUENCE VARIABLE

Avec un onduleur autosynchrone, on fait varier la vitesse d'un moteur synchrone en alimentant son stator, non plus à la fréquence fixe du réseau, mais à une fréquence variable.

Le couple maximum est proportionnel à l'excitation et au flux :

$$\phi = \frac{U}{f} = \frac{\text{tension d'alimentation du stator}}{\text{fréquence d'alimentation du stator}}$$

A excitation constante, pour travailler au couple maximum, quelle que soit la vitesse, U/f doit être maintenu constant : la tension d'alimentation U du stator doit varier parallèlement à sa fréquence f d'alimentation.

Cette fréquence d'alimentation du stator dépend de la fréquence de commutation des thyristors du pont machine, MCH. On montre que le champ statorique ne tourne plus d'une façon uniforme mais par bonds.

Supposons une machine synchrone bipolaire dont le bobinage statorique est composé de 3 enroulements : U, V, W, en étoile (On ne représentera qu'une spire par enroulement).

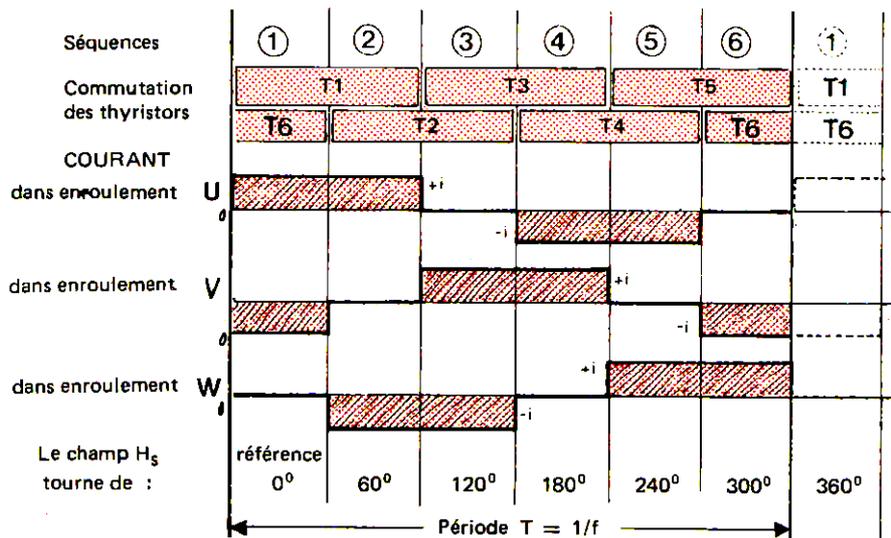
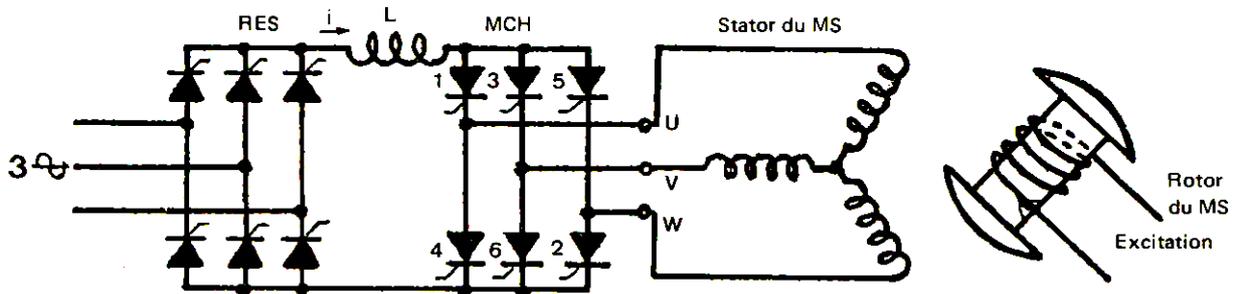
Prenons, comme référence arbitraire du champ H_s, celui créé en allumant les thyristors 6 et 1.

Les diagrammes suivants, montrent les allumages successifs des thyristors du pont MCH pour faire tourner le champ induit au stator H_s.

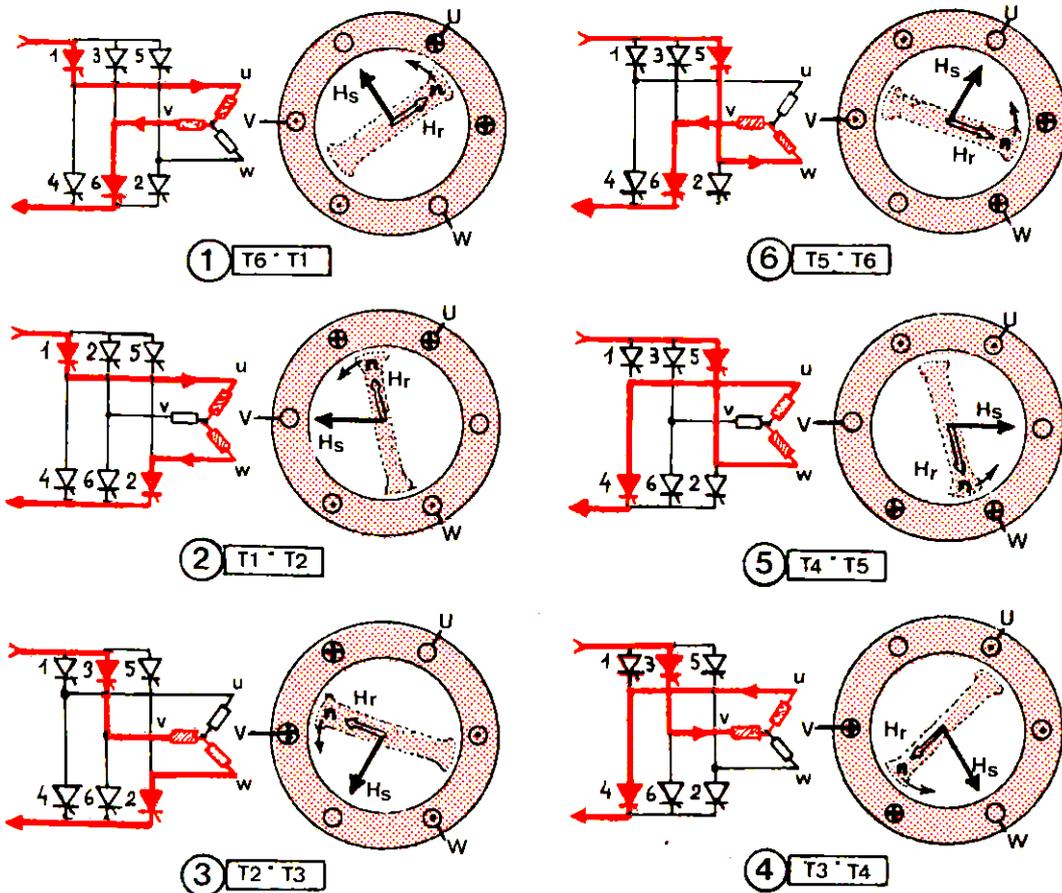
L'ordre de commutation des thyristors est : T6*T1, T1*T2, T2*T3, T3*T4, T4*T5, T5*T6, T6*T1 ... etc., et le courant de la boucle intermédiaire parcourt les enroulements de la machine de la façon suivante :

| Dans l'enroulement | le courant entre (+) quand | le courant sort (-) quand | Thyristors | | | | | |
|--------------------|----------------------------|---------------------------|------------|----|----|----|----|----|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| U | T1 conduit | T4 conduit | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| V | T3 conduit | T6 conduit | +i | +i | 0 | -i | -i | 0 |
| W | T5 conduit | T2 conduit | -i | 0 | +i | +i | 0 | -i |
| | | | 0 | -i | -i | 0 | +i | +i |

L'instant de commutation des thyristors dépend de la position du rotor, donnée par le codeur (c.e position angulaire du rotor).



A partir de la boucle à courant continu, le pont MCH alimente le stator de la machine synchrone, en courants triphasés alternatifs, en forme de créneaux. Il prend donc le courant continu et le commute périodiquement d'une phase à l'autre du moteur. C'est un COMMUTATEUR STATIQUE DE COURANT.

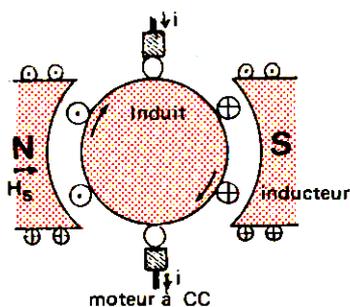


Le champ H_S progresse par bonds de 60° . Le pôle nord du rotor tend à se placer sous le pôle Sud du stator et le rotor suit la rotation du champ tournant H_S .

L'onduleur MCH étant ici un pont de Graëtz triphasé, il y a donc 6 commutations par période. Chaque bond de 60° de H_S , change l'angle θ entre les deux champs, H_S et H_r (champ rotorique inducteur).

L'angle θ est l'image du couple. Comme l'angle θ évolue, le couple présente une légère ondulation par rapport au couple moyen.

13 • SIMILITUDES ENTRE LE MOTEUR A COURANT CONTINU ET LE MOTEUR SYNCHRONE



131 • La machine synchrone, pilotée par codeur d'angles, travaille selon le même principe qu'un moteur à courant continu (MCC) alimenté par l'induit.

Dans un MCC, la commutation de courant se fait par le passage des lames du collecteur du rotor devant les balais.

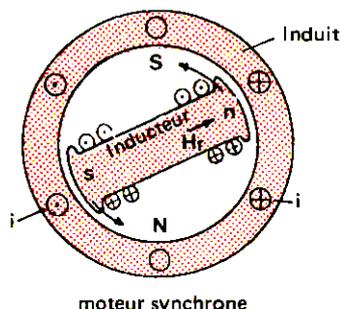
Dans une machine synchrone, commandée par onduleur auto-synchrone, la commutation du courant se fait par les thyristors commandés par le codeur de position angulaire du rotor : disque à encoches, solidaire du rotor devant le capteur de position fixe au stator.

Cette solution écarte tout risque de décrochage.

Tout ralentissement, lent ou brusque, de la machine, conduit automatiquement à une diminution de la fréquence des courants I d'alimentation puisque les commutations sont cadencées par la rotation de la machine elle-même.

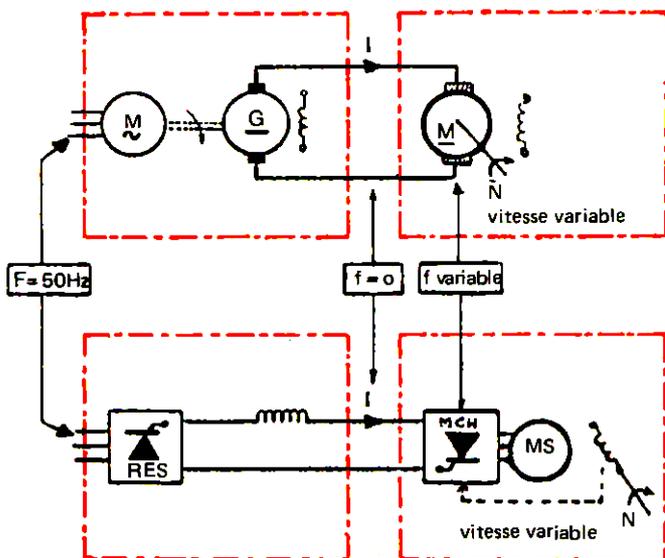
La fréquence d'alimentation de la machine synchrone reste donc toujours parfaitement synchrone de la vitesse.

Le pont MCH est un COMMUTATEUR STATIQUE DE COURANT. S'il se compose d'un pont de Graëtz classique, il se comporte comme un collecteur à six lames par pas polaire (faible indice de pulsation : 6).



132 • On peut faire un parallèle entre les variations de vitesse des MCC et des moteurs synchrones.

- le plus ancien : le groupe WARD LEONARD : Moteur à vitesse fixe, accouplé à une génératrice à CC qui alimente un MCC à vitesse variable.
- le plus récent : le moteur synchrone autopiloté par onduleur autosynchrone : redresseur à fréquence fixe, onduleur et moteur synchrone à fréquence variable.



Il y a dans les deux cas, double conversion de fréquence :

- le passage de la fréquence fixe du réseau ($F = 50 \text{ Hz}$), à la fréquence nulle (courant continu : $f = 0$).
- le passage de la fréquence nulle à la fréquence variable, proportionnelle à la fréquence de rotation du moteur qui utilise :
 - un MCC et son collecteur mécanique,
 - un moteur synchrone et son collecteur électronique, qui est l'onduleur autosynchrone.

Le commutateur mécanique (collecteur) du MCC réalise :

- la commutation des courants d'induit, par le passage successif des lames sous les balais,
- la synchronisation de ces commutations par la rotation du collecteur avec l'arbre.

Le commutateur électronique (onduleur autosynchrone) du moteur synchrone réalise les mêmes fonctions :

- la commutation des courants par allumage et extinction successifs des thyristors,
- la synchronisation de ces commutations par la boucle de pilotage, à partir du capteur de position angulaire du rotor (CA), qui constitue en fait un arbre électrique.

Avec le moteur synchrone, toutes les limitations dues au collecteur mécanique du MCC sont dépassées : environnement, entretien, puissances, vitesses ... (pages 1 et 72).

2 ● FONCTIONNEMENT DE L'ONDULEUR AUTOSYNCHRONE

Deux phases sont à distinguer :

- celle du démarrage et des faibles vitesses, où la f.e.m. de MS est insuffisante (ex $< 8\%$ de sa valeur nominale à 50 Hz), pour assurer la commutation naturelle du pont MCH : c'est le mode cadencé.
- celle correspondant à une f.e.m. de MS au-delà de 8% de la vitesse maximale. Le pont MCH fonctionne à commutations naturelles par la machine : c'est le mode synchrone. Si le moteur synchrone est à $\cos \phi$ avant, le courant s'annule naturellement dans le thyristor.

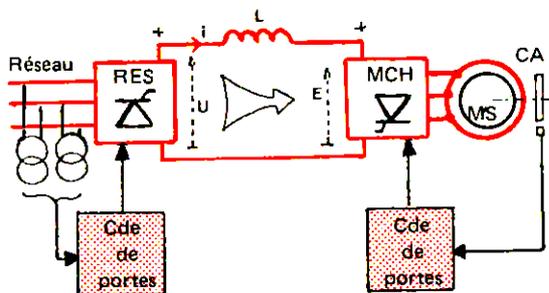
Ces phases sont décrites dans l'ordre inverse où elles ont lieu :

21 ● MODE SYNCHRONE - Fonctionnement en onduleur autosynchrone

- Le pont RES travaille en redresseur et fournit du courant continu à la boucle. Le couple d'accélération dépend de l'excitation et de ce courant échangé que reçoit MCH : commutateur statique de ce courant.

La commande de portes de RES, pilotée par le réseau 50 Hz, est identique à celle utilisée pour la commande des MCC.

- Supposons que la machine MS tourne à une vitesse suffisante.



Fonctionnement de la machine synchrone en moteur

Le pont MCH se comporte, en ce qui concerne les commutations de ses thyristors, comme s'il était raccordé au secteur. Ce sont bien des machines synchrones qui alimentent le secteur. L'énergie nécessaire à ses commutations est fournie par la f.e.m. de la machine synchrone dès lors qu'elle est suffisante, c'est-à-dire que la vitesse a dépassé quelques Hertz, pour permettre l'allumage séquentiel des thyristors de MCH, quand leur tension d'anode est supérieure à la tension de cathode et permet l'extinction du thyristor qui conduisait.

L'amorçage d'un thyristor entraîne l'extinction du précédent qui conduisait.

La machine MS reçoit l'énergie prélevée du réseau, redressée par RES, convertie en continu, ondulée par MCH, et elle fonctionne en moteur.

Le fonctionnement du pont machine MCH, commandé par l'évolution des tensions aux bornes de la machine synchrone, est général et non lié à la fréquence de la machine. MS et MCH sont intimement liés.

Les commutations du pont MCH en onduleur étant pilotées à partir de la vitesse de rotation, restent donc synchrones des tensions aux bornes de la machine, et le fonctionnement est assuré quelle que soit la fréquence. Le moteur synchrone est AUTO-PILOTÉ.

Le décrochage de MS est impossible. Toute diminution de la vitesse de MS conduit à une diminution de la fréquence des courants d'alimentation, parfaitement synchrone de la vitesse. D'où le nom d'ONDULEUR AUTOSYNCHRONE.

Pour accélérer le moteur synchrone, il faut lui donner un couple moteur C_m plus important, donc un courant I plus important. Par apport d'énergie, la machine accélère. La nouvelle évolution des tensions, aux bornes de la machine, pilote de façon synchrone l'allumage des thyristors du pont MCH en onduleur. Le codeur d'angles CA renseigne sur la position de la roue polaire et sur la vitesse, et donne les impulsions de commande de portes des thyristors du pont MCH.

Pour éviter une surintensité inacceptable, $I = (U - E) / Z$, le pont réseau RES doit donc fournir une tension U bien ajustée à la force électromotrice E de MS, laquelle est proportionnelle à sa vitesse.

Le flux de la machine est :

$$\phi = \frac{U}{f} = \frac{\text{tension d'alimentation du stator}}{\text{fréquence d'alimentation du stator}}$$

Comme la machine travaille généralement à flux constant, la tension de boucle U doit donc également varier proportionnellement à la fréquence f . Le pont RES travaillant en redresseur, assure cette variation par le réglage du retard ($0 < \alpha < 90^\circ$) à l'allumage de ses thyristors pilotés par le réseau 50 Hz (page 10).

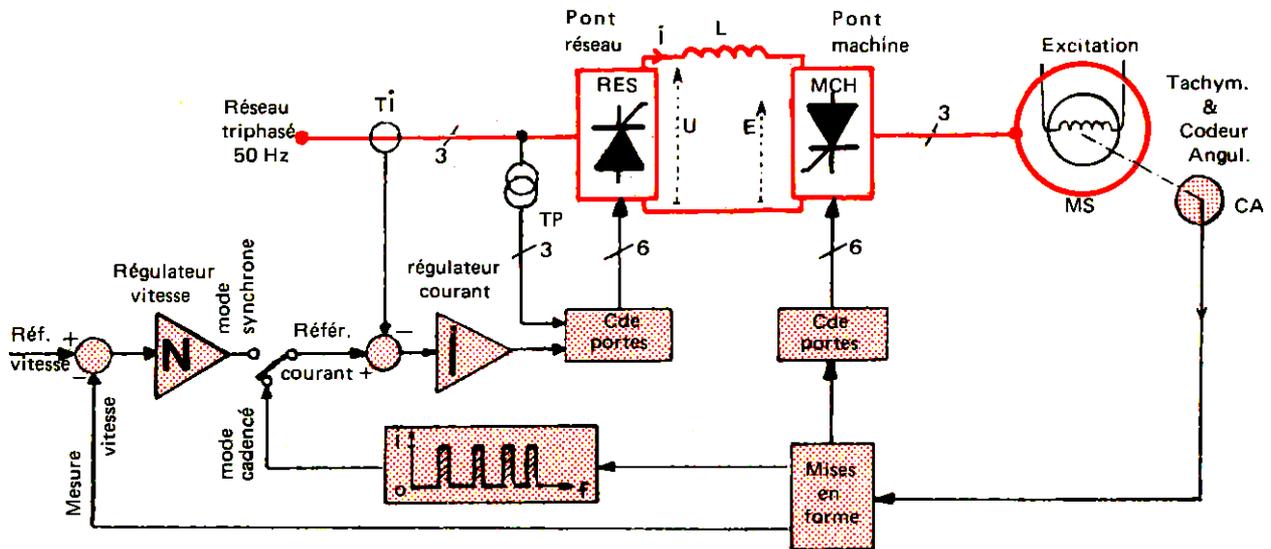


Schéma de principe de régulation
d'un Onduleur autosynchrone et machine synchrone avec codeur d'angles

La régulation est du type cascade : Le régulateur de vitesse fournit la référence au régulateur pilotant la commande de portes du pont RES. Le codeur CA de la position angulaire du rotor pilote la commande de portes du pont MCH.

22 • MODE CADENCE - Démarrage et basses vitesses

À l'arrêt, et à faible vitesse, la machine MS est incapable de fournir les tensions nécessaires à la commutation du courant. La commutation naturelle n'est possible que si la f.e.m. machine dépasse un seuil minimal. Les thyristors de MCH sont alors commutés grâce à un artifice.

La machine, à l'arrêt, est dans une position quelconque, et la position angulaire du flux inducteur du rotor est connue et imposée.

Le codeur angulaire, qui donne la position de l'axe polaire par rapport aux bobines du stator, définit les thyristors de MCH à allumer, pour créer le champ statorique qui fera tourner le rotor dans le sens désiré.

Lorsque le moteur aura tourné d'un certain angle, d'autres polarités devront être établies (c'est-à-dire qu'il faudra éteindre les thyristors qui conduisaient, et allumer les nouveaux thyristors convenables) pour que le champ H_s progresse et que le rotor suive.

Or, l'extinction ne peut pas se faire naturellement, car la machine n'a pas encore de f.e.m. suffisante pour assurer la commutation. Cette extinction est provoquée en annulant le courant I dans la boucle par action sur le pont RES. Après blocage des thyristors, et allumage des suivants, le courant I est rétabli.

Le codeur d'angles continue de définir les nouvelles commutations de thyristors jusqu'à ce que la machine ait une f.e.m. suffisante pour assurer les commutations et permettre le fonctionnement en onduleur autosynchrone. A ce seuil de f.e.m., donc de vitesse, le passage en mode synchrone se fera automatiquement.

Le codeur d'angles régit le fonctionnement cadencé :

- Il détermine les instants auxquels il faut annuler I pendant quelques millisecondes, en donnant au régulateur d'intensité une référence $I = 0$. Le pont RES diminue la tension U pour annuler le courant.

Quand le courant est annulé, les thyristors de MCH qui étaient conducteurs se bloquent.

- Il détermine les nouveaux thyristors de MCH qui doivent être mis en conduction pour aiguiller le courant vers la phase suivante du moteur. Exemple : T1*T2 puis T2*T3, puis T3*T4, ... etc, soit 6 impulsions de commande par période, pour un pont de Graëtz.

Le régulateur d'intensité, recevant une référence I (plein courant), le pont RES fonctionne alors en redresseur. L'amplitude du courant I dépend de la tension fournie par le pont réseau RES, et définit l'amplitude du couple moteur à fournir à la machine, pour un flux d'excitation donné : $C = I \cdot \Phi$

Ce fonctionnement suit la fréquence de la machine. Quand la machine accélère, ces commutations se font plus vite, d'une façon synchrone.

23 • PASSAGE DU MODE CADENCE AU MODE SYNCHRONE

Le mode cadencé dure de l'arrêt jusqu'à quelques hertz.

Les allumages à établir dans le pont MCH sont les mêmes dans les deux modes. Les angles d'allumage des thyristors de MCH sont inchangés.

- Dans le mode cadencé, on ne peut établir ces conductions que par la connaissance de la position angulaire de la machine et de son diagramme interne. La commutation est artificielle puisqu'il faut éteindre les thyristors par annulation du courant débité par la boucle intermédiaire.
- Dans le mode synchrone, il n'est plus nécessaire d'annuler le courant débité par la boucle, c'est la f.e.m. de la machine qui assure la commutation naturelle. Mais les instants angulaires de conduction à établir dans le pont MCH sont les mêmes, et ils sont lus sur le codeur angulaire (corrigés par le diagramme interne de la machine).

Lorsque la machine a une f.e.m. suffisante pour assurer la commutation, telle que le mode synchrone puisse intervenir, une logique statique réalise le passage de la commutation artificielle à la commutation naturelle, ce qui est symbolisé dans le schéma de principe de régulation (page 44) par l'inverseur "mode cadencé-mode synchrone".

Alors que dans le mode cadencé, la référence de courant (cycles de références nulles suivies de références "plein courant") provient des informations du codeur d'angles, dans le mode synchrone, cette référence I provient normalement de la sortie du régulateur de vitesse.

Le capteur de position angulaire détermine, non seulement la position du rotor mais, utilisé aussi en tachymétrie, il permet de contrôler couple et vitesse.

3 ● SYSTEME SANS CODEUR ANGULAIRE

Le système peut fonctionner plus économiquement sans codeur angulaire. La commande du pont MCH est effectuée à partir des tensions de la machine :

- en mode synchrone, des transformateurs de potentiel, TP2, aux bornes de la machine indiquent les tensions qui pilotent le pont machine MCH en onduleur.
- en mode cadencé, ces TP2 ne servent pas. Un générateur de tension $U = f(t)$ fournit au démarrage une basse tension qui croît ensuite linéairement. Cette tension est convertie en fréquence f , par un convertisseur Tension/Fréquence qui fournit, en sortie, des créneaux dont la fréquence est proportionnelle à la tension à l'entrée.

On a ainsi un signal de fréquence qui évolue dans le même temps, de la même manière que le faisait le générateur de tension : palier au démarrage, puis rampe de croissance en fonction du temps.

Ce signal "fréquence" pilote le démarrage :

- en provoquant les allumages successifs et dans le bon ordre du pont MCH,
- en appliquant, avec annulation aux bons moments, la référence courant au régulateur de courant du pont RES.

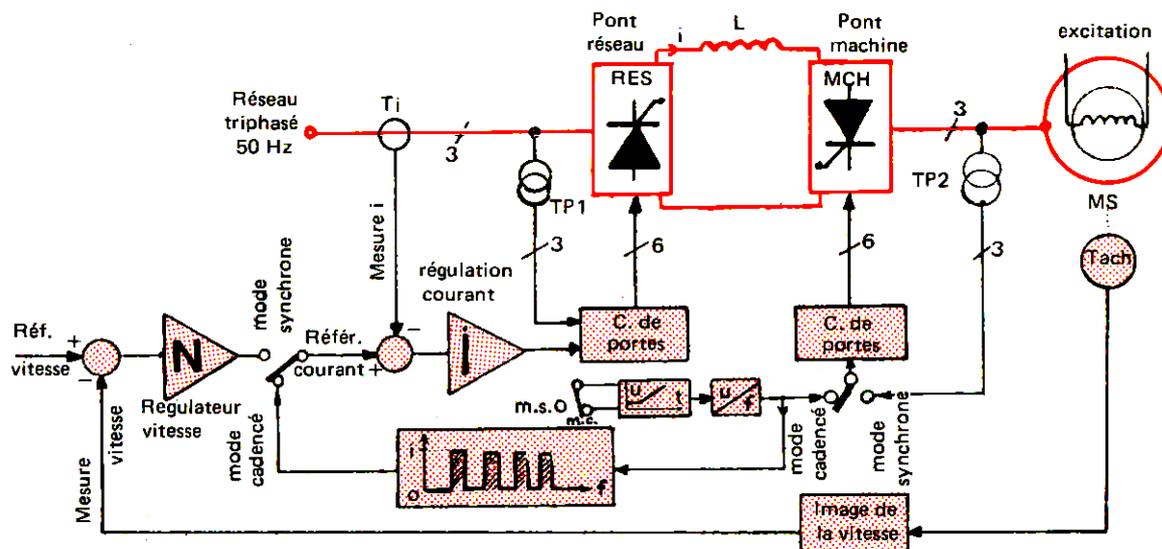


Schéma de principe de régulation d'un Onduleur autosynchrone et machine synchrone **sans** codeur d'angles

Ainsi, par exemple :

- Un couple de thyristors de MCH (ex. T1 et T2) est allumé.
 - On impose I_n à la référence courant et on crée le champ tournant au stator.
 - Après que le rotor ait tourné de 60° , on annule le courant pour éteindre les thyristors, en branchant le pont réseau RES en onduleur pour vider la boucle de son énergie.
- Et on repart pour un cycle : Allumage de T2 et T3, établissement de I_n ...

L'inconvénient est qu'au départ, le rotor peut venir en arrière, chercher le champ et repartir en avant, avec lui. En effet, on ne connaît pas, au démarrage, la position du champ inducteur du rotor d'où l'inconvénient possible d'une oscillation.

Si le démarrage n'est qu'une phase transitoire sans précision, cette oscillation n'est pas gênante. Il n'en est pas de même dans les applications de levage ou de traction.

- Dès que la f.e.m. de la machine est suffisante pour assurer la commutation du courant I de travail (5 à 10% de la tension nominale), le passage au mode synchrone s'établit comme dans le système précédent avec codeur angulaire.

Le schéma symbolise également par un inverseur les liaisons réalisées lors du passage du mode cadencé au mode synchrone.

4 ● REVERSIBILITE

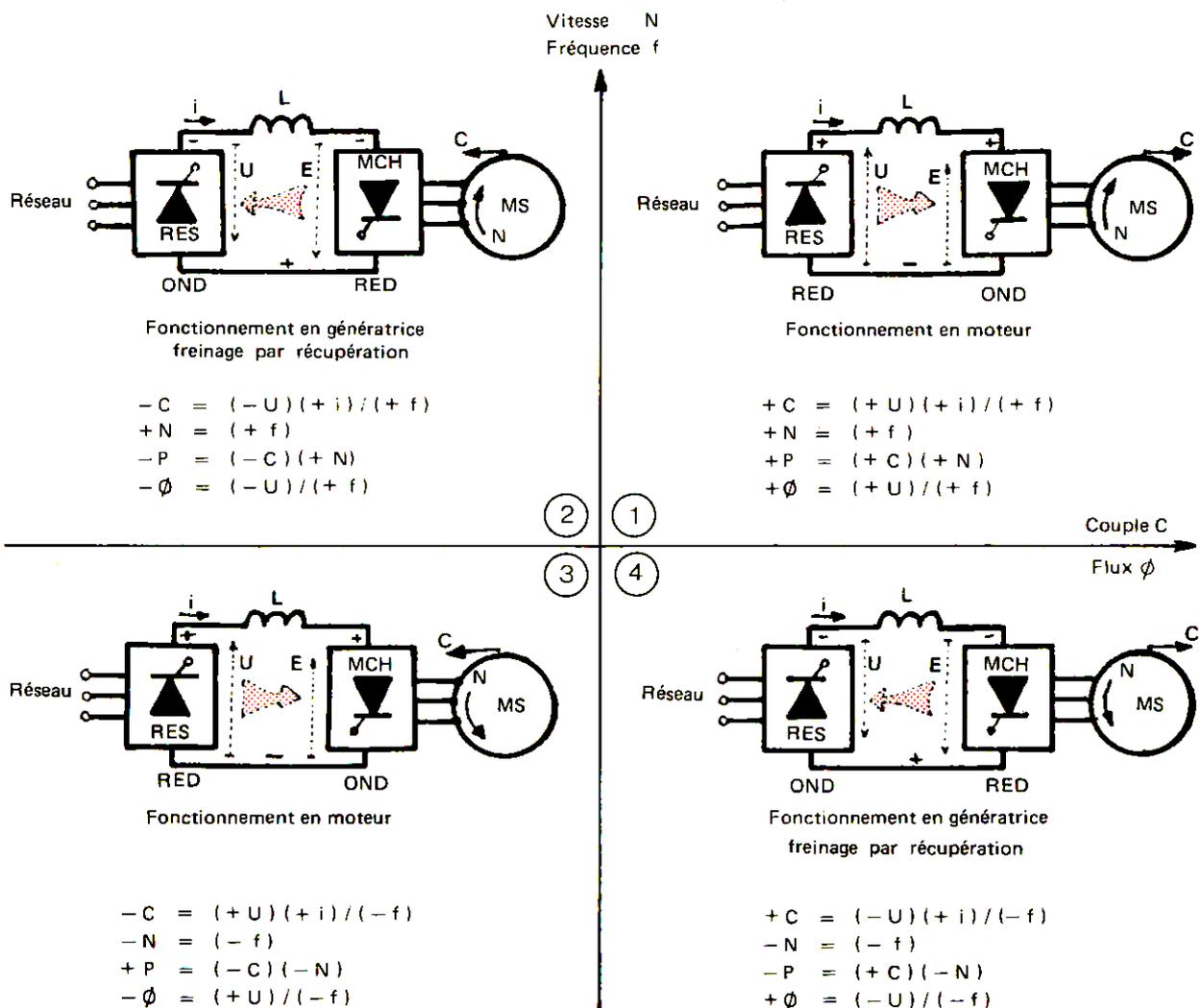
En conservant le sens du courant dans la boucle intermédiaire à courant continu, mais en inversant les polarités de tensions, dans le quadrant 2 (par rapport au quadrant 1) et dans le quadrant 4 (par rapport au quadrant 3) :

- le pont MCH fonctionne en redresseur piloté par la fréquence variable de la machine, recevant l'énergie sous forme de courants alternatifs de la machine synchrone et l'envoyant sous forme de courant continu dans la boucle intermédiaire.
- le pont RES fonctionne comme dans le cas du MCC, en onduleur, piloté par le réseau 50 Hz, recevant l'énergie sous forme de courant continu de la boucle intermédiaire et l'envoyant sous forme de courants alternatifs, triphasés, dans le réseau électrique.

Le système est donc parfaitement symétrique, et la machine synchrone peut fonctionner aussi bien en moteur qu'en génératrice à fréquence variable, c'est-à-dire à vitesse variable.

L'inversion du couple par rapport à la vitesse, c'est-à-dire le freinage, se fait en récupération, en renvoyant l'énergie de la machine sur le réseau.

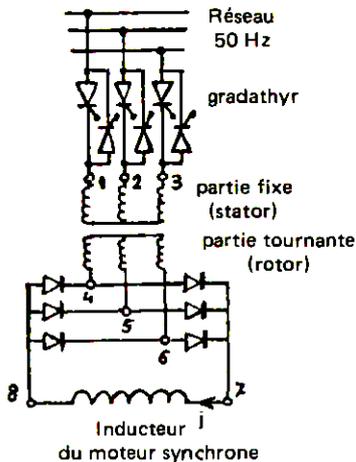
La marche dans les 4 quadrants de Couple = f (Vitesse) est illustrée ci-dessous :



L'inversion du sens de marche est obtenue en inversant, au niveau de l'électronique de contrôle, la succession des allumages des thyristors de MCH. Le champ tournera en sens inverse. On peut donc fournir un couple et une vitesse dans les deux sens, sans adjonction d'éléments de puissance.

Avec une machine à courant continu, il aurait fallu des ponts tête-bêche d'induit pour obtenir des performances équivalentes.

5 ● EXCITATION DU MOTEUR

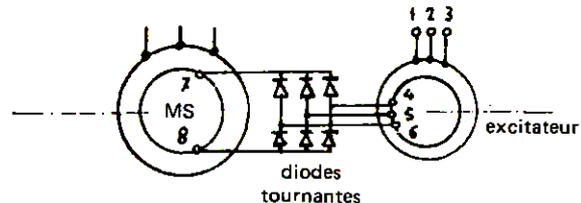


S'il n'y a pas d'exigences particulières dues à l'environnement, on peut utiliser une excitation par bagues et balais, comme indiqué dans les schémas précédents.

Au contraire, si la vitesse de rotation ou l'exploitation l'exigent, on utilise une excitation par redresseurs tournants, supprimant ainsi tous contacts glissants.

Afin de pouvoir exciter la machine même à l'arrêt, le courant d'excitation J est transmis par un exciteur tournant dont le réglage s'effectue par un GRADATHYR au stator de l'excitateur.

Excitation tournante de la machine synchrone par exciteur à champ tournant



6 ● IRREGULARITE CYCLIQUE DU COUPLE

Dans un moteur synchrone alimenté par onduleur autosynchrone, c'est-à-dire par courants polyphasés en forme de créneaux, le champ induit statorique ne progresse pas de façon uniforme (comme dans le cas d'alimentation directe du stator par le réseau, en courants sinusoïdaux), mais par bonds.

En supposant que le rotor tourne de façon quasi uniforme, chaque progression du champ induit H_S change l'angle θ entre lui et le champ inducteur H_r qui est continu, et par conséquent le couple, qui ondule ($\pm 7\%$) par rapport à sa valeur moyenne.

Aux très basses vitesses, tant que la machine synchrone n'a pas encore une force électromotrice suffisante pour assurer l'extinction des thyristors du convertisseur MCH, on a vu que cette extinction est obtenue par annulation ou pendant quelques millisecondes du courant dans la boucle à courant continu. Cette annulation conduit à une annulation du couple pendant ce temps.

Pour remédier aux irrégularités du couple, le pont de Graëtz triphasé peut être remplacé par un système à plus de 6 séquences ou par plusieurs systèmes à 6 séquences décalés les uns par rapport aux autres.

7 ● DOMAINES D'APPLICATIONS

71 ● POSSIBILITES DES ONDULEURS AUTOSYNCHRONES ALIMENTANT DES MACHINES SYNCHRONES :

- Suppression du collecteur, qui peut être complétée par la suppression des bagues et balais (excitateur tournant, page 48)
- Grandes puissances : plus de 20 MW
- Grandes vitesses : de 3000 tr/mn pour machines de 40 MW, à 9000 tr/mn pour machines de 2,5 MW, avec réglage de 0 à la vitesse nominale.
- Couple réglable de 0 à C_n et au surcouple sur toute la plage de vitesse. Contrôle du couple d'accélération sans surintensité au réseau
- Excellent rendement : (0,95).

72 ● DOMAINES D'APPLICATIONS

- *Economie d'énergie en réglant la vitesse (au lieu d'étrangler le fluide), et rendement élevé : cas des compresseurs, pompes, ventilateurs ... etc.*
- *Démarrage de plusieurs alternateurs successivement, alimentés en moteurs synchrones jusqu'à leur vitesse de synchronisme où ils sont couplés au réseau,*
- *Cas où le collecteur d'un MCC est indésirable : propulsion de gros navires, broyeurs à ciment, gros convoyeurs, soufflantes de hauts fourneaux ... etc.*

Grâce à la technologie "Moyenne tension" des convertisseurs, à montage série-parallèle des thyristors par bras de pont, les gros équipements peuvent être alimentés directement en moyenne tension (5 à 20 kV), par le réseau, sans la perte de rendement due au transformateur.

B.3 L'ONDULEUR AUTONOME A COMMUTATIONS FORCÉES

C'est un convertisseur statique de fréquence à commutations forcées et à boucle intermédiaire à courant continu, capable d'alimenter à fréquence variable, donc à vitesse variable, un moteur alternatif.

Il comprend essentiellement :

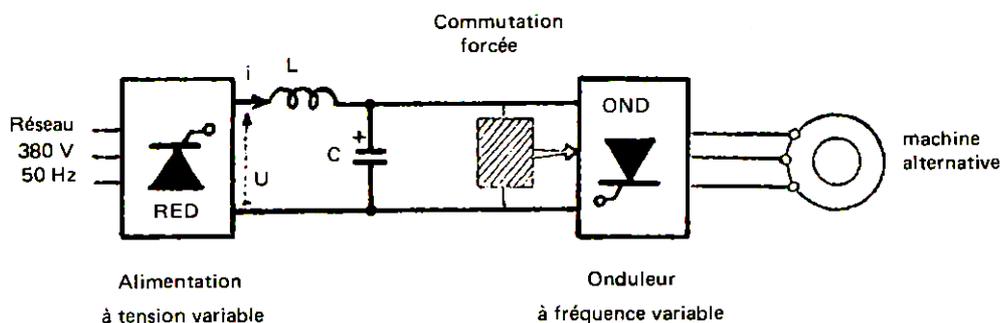
- un pont de Graëtz d'alimentation RED redresseur, capable de fournir une tension continue U réglable.
- une cellule de filtrage, placée dans la boucle à courant continu, et composée d'une inductance L et d'une capacité C ,
- un pont de Graëtz OND onduleur à fréquence variable, relié au stator de la machine à courants alternatifs.
- un dispositif d'extinction des thyristors du pont OND, à commutations forcées.

Ce convertisseur est dit **ONDULEUR AUTONOME** car il peut fonctionner sur une charge ne possédant pas de force électromotrice alternative (charge passive) : c'est le cas d'un moteur asynchrone incapable de fournir à un pont onduleur les tensions nécessaires à sa commutation.

De ce fait, l'onduleur est nécessairement du type à commutations forcées.

Le dispositif d'extinction des thyristors de l'onduleur assure les commutations. Pour cette raison, l'onduleur autonome est également appelé **ONDULEUR AUTOCOMMUTÉ**.

Si un tel système onduleur alimente le stator (bipolaire) d'un moteur asynchrone (à 50 Hz, $N_s = 3000$ tr/mn) à une fréquence variant de 0 à 150 Hz, la vitesse de synchronisme du moteur varie de 0 à 9000 tr/mn.



1 ● RAPPEL DE QUELQUES NOTIONS DE BASE

11 ● RAPPEL SUR LE MOTEUR ASYNCHRONE

Le moteur asynchrone est une machine simple et robuste, alimentée par une seule source.

- **Son stator,** inducteur fixe à enroulements triphasés, crée un champ tournant à la vitesse de synchronisme N_s .

$$N_s = \frac{f}{p} = \frac{\text{fréquence d'alimentation du stator}}{\text{paires de pôles de la machine}}$$

- **Son rotor,** induit mobile de même nombre de pôles que le stator, peut être soit à cage en court-circuit, soit bobiné, relié à trois bagues et fermé par des résistances extérieures.

La source fournit la puissance magnétisante nécessaire à l'établissement du flux dans la machine, et la puissance mécanique c'est-à-dire le couple et la vitesse.

En effet, le champ tournant au stator balaie les conducteurs du rotor, induit dans le circuit du rotor des f.e.m. qui produisent des courants. Ces courants, placés dans le champ tournant, génèrent un couple qui fait tourner le rotor.

Le rotor tourne à une vitesse N inférieure à la vitesse N_s du champ tournant. Il est **ASYNCHRONE** par rapport au champ. Le déplacement relatif du champ N_s par rapport au rotor, c'est-à-dire le glissement $g = (N_s - N)/N_s$ crée des courants induits dans le rotor, donc le couple C .

Principe de la variation de vitesse

La vitesse de synchronisme, N_s , étant proportionnelle à la fréquence f du réseau d'alimentation, on peut donc régler la vitesse du moteur en réglant sa fréquence.

Cependant, pour ne pas saturer la machine, il faut maintenir le flux en dessous de sa valeur de saturation.

Détermination du flux

L'égalité des puissances (aux pertes près) :

- électrique reçue $U I$
- mécanique fournie $C N$: avec C proportionnel à $I \phi$ et N proportionnel à f , donne :

$$U I = k_1 I \phi f \quad \text{donc} \quad \phi = k U / f$$

Le flux est donc proportionnel au rapport :

$$\frac{U}{f} = \frac{\text{tension d'alimentation du stator}}{\text{fréquence d'alimentation du stator}}$$

La source à courant continu alimentant l'onduleur à fréquence variable doit donc être réglable pour permettre l'ajustage du flux de la machine asynchrone à toute fréquence, et depuis le démarrage.

Le couple est proportionnel au flux et au courant statorique :

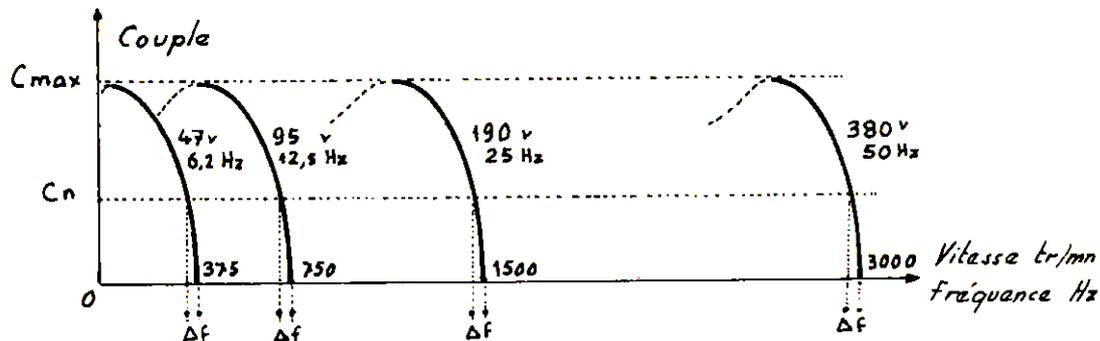
$$C = K (U/f) I$$

Une valeur de U/f trop faible entraîne une diminution du couple pouvant aller jusqu'au décrochage du moteur.

Une valeur de U/f trop élevée entraîne un dépassement du flux optimum du moteur, et risque la saturation et des intensités trop fortes.

12 • FONCTIONNEMENT A COUPLE CONSTANT

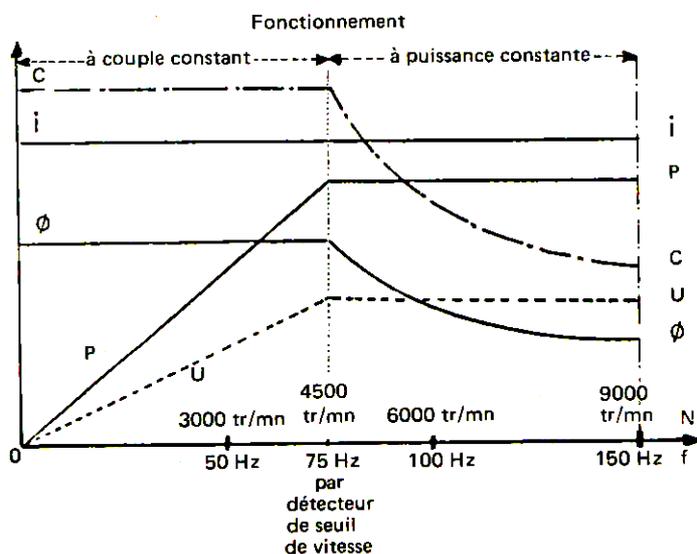
A flux constant, c'est-à-dire en faisant varier la tension d'alimentation U proportionnellement à la fréquence d'alimentation f, la relation "Couple-vitesse" du moteur asynchrone se translate avec la fréquence.



Avec une machine bipolaire, par exemple, on obtiendra ce réseau de courbes pour :

| Tension d'alimentation | Fréquence statorique d'alimentation | Vitesse de synchronisme |
|------------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| 23,7 V | 3,12 Hz | 187 tr/mn |
| 47,5 V | 6,25 Hz | 375 tr/mn |
| 95 V | 12,5 Hz | 750 tr/mn |
| 190 V | 25 Hz | 1500 tr/mn |
| 380 V | 50 Hz | 3000 tr/mn |
| 570 V | 75 Hz | 4500 tr/mn |

Il est possible de fonctionner à couple constant (par exemple, le couple nominal), à toutes les vitesses, y compris le démarrage. Ce qui revient à dire qu'on travaille alors à une fréquence vue par le rotor (fréquence statorique moins fréquence de rotation de la machine) Δf constante.



$P = U \cdot i = C \cdot N$

$C = i \cdot \phi$

$\phi = U / f$

13 • FONCTIONNEMENT A PUISSANCE CONSTANTE

Au-delà d'une certaine fréquence (donc d'une certaine vitesse détectée par une simple dynamo tachymétrique), la machine peut travailler en défluxé, c'est-à-dire à puissance constante.

- U : tension d'alimentation du stator
- i : courant d'alimentation du stator
- ϕ : flux de la machine
- C : couple moteur
- N : vitesse de rotation de la machine
- P : puissance de la machine

2 ● ALIMENTATION A FREQUENCE f VARIABLE

Avec un moteur asynchrone, il n'existe pas de réseau pour faire commuter les thyristors du pont onduleur OND. C'est l'onduleur qui crée un réseau alternatif capable d'alimenter des charges passives.

Pour expliquer le principe de l'onduleur autonome à fréquence variable, nous rappelons quelques notions concernant la transformation de tension continue en tensions alternatives, sur une charge passive. Cette transformation est réalisée à fréquence variable.

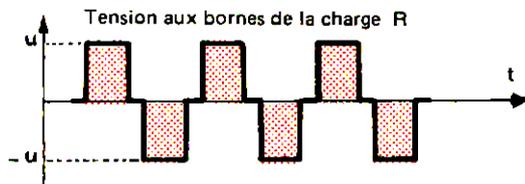
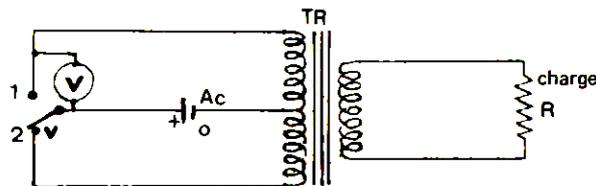
21 ● MONTAGES MONOPHASES

211 ● Principe élémentaire

Soit un circuit composé d'un accumulateur Ac , d'un transformateur à point milieu du primaire sorti, et d'un vibreur constitué d'un relais V à contact inverseur. Le secondaire du transformateur alimente une charge passive R .

Quand la bobine V est alimentée, elle attire la lame et ferme le contact 1. On recueille sur la charge R , au secondaire du transformateur, un créneau de tension positive U .

Le contact 1 a également court-circuité la bobine V .



Quand la bobine V est court-circuitée, la lame repart en arrière et ferme le contact 2.

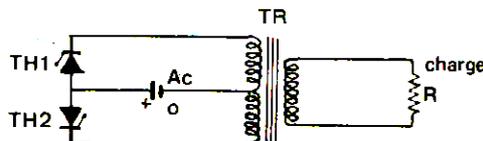
On recueille sur la charge R un créneau de tension $-U$.

V de nouveau alimenté, attire sa lame, etc ...

On recueille ainsi au secondaire du TR une succession de créneaux positifs et négatifs de tension, séparés d'un temps mort, quand le contact V se trouve entre les deux positions 1 et 2.

- En remplaçant, dans le même circuit, le vibreur par deux thyristors, $TH1$ et $TH2$, qui sont des interrupteurs statiques qu'on fait conduire alternativement, la tension recueillie au secondaire de TR serait la même, c'est-à-dire alternative.

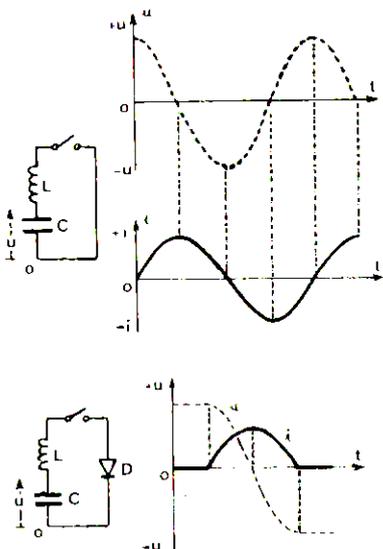
On a transformé du Continu en Alternatif non sinusoïdal bien sûr.



Mais comme le circuit à charge passive R ne comporte pas de f.e.m. alternative capable d'éteindre naturellement le courant dans le thyristor allumé, le problème consiste à pouvoir éteindre le thyristor allumé, avant d'autoriser la conduction de l'autre thyristor.

On réalise cette extinction au moyen d'un circuit auxiliaire d'extinction forcée par contre courant sur chaque thyristor. Ce circuit est un circuit oscillant.

212 • Principe du circuit oscillant

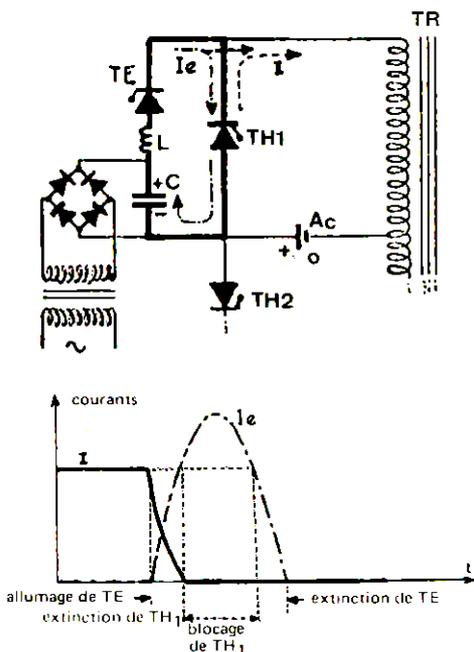


Soit un circuit comportant une self L , une capacité C , un interrupteur. La capacité est supposée chargée positivement ($u = +U$).
 A la fermeture de l'interrupteur :

- le courant i s'établit et croît sinusoidalement. Le condensateur se décharge : u diminue.
- quand $u = 0$, le courant est maximum. Toute l'énergie contenue initialement dans C est transférée dans la self L .
- puis i décroît, L agissant comme générateur, restitue l'énergie à C , qu'il charge en polarité inverse.
- quand $i = 0$, $u = -U$... etc, indéfiniment si le circuit n'est pas amorti par sa résistance. Tension et courant sont sinusoidaux et décalés de 90° . Ils dépendent du dimensionnement de L et C .

Si le circuit comprend une diode D , le courant ne peut pas s'inverser. Après une demi-sinusoïde, quand le courant s'annule, C se retrouve chargé en polarité inverse.

213 • Principe de l'extinction



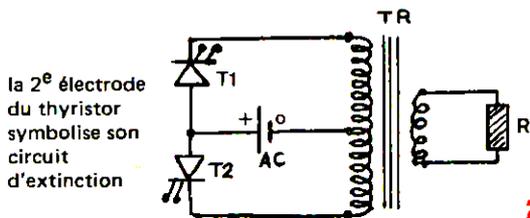
Si on remplace l'interrupteur par un thyristor d'extinction TE :

- Allumage de $TH1$: par sa porte, son anode est positive par rapport à la cathode. Etablissement du courant principal I supposé constant.
- Extinction de $TH1$: par l'allumage du thyristor d'extinction TE .

Le circuit oscillant, LC , est dimensionné pour que l'amplitude du courant I_e soit supérieure à celle du courant I à éteindre, et que la durée d'une demi-sinusoïde de I_e soit supérieure au temps qu'il faut à $TH1$ pour s'éteindre, se désioniser, se bloquer.

Lorsque I s'est annulé, I_e se ferme au travers du transformateur. Après la demi-sinusoïde, I_e ne pouvant s'inverser reste nul et TE s'éteint et se bloque.

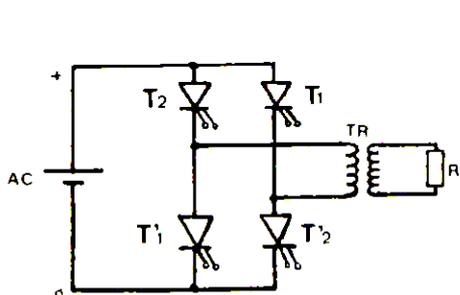
- on peut alors allumer $TH2$ puis l'éteindre par un circuit oscillant similaire
- puis allumer $TH1$, l'éteindre ... etc. TE qui véhicule le courant I_e pendant un temps très bref, est de faible calibre par rapport à $TH1$.



la 2^e électrode du thyristor symbolise son circuit d'extinction

Par la suite, pour alléger l'écriture des schémas, tout le circuit d'extinction est symbolisé par une 2^e porte (d'extinction) sur le thyristor. La 1^{ère} porte est la porte normale d'allumage du thyristor.

214 • Montage monophasé (double alternance)



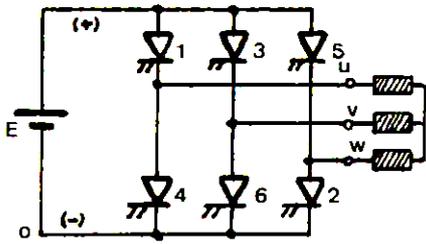
Pour utiliser un transformateur sans point milieu du primaire sorti, le circuit est constitué d'un pont monophasé à 4 thyristors, tel que :

- Quand $T1$ et $T1'$ conduisent : un créneau de tension positive est recueilli en R .
- Quand $T2$ et $T2'$ conduisent : un créneau de tension négative est recueilli en R .

Les extinctions se font selon le même principe que précédemment, par circuits LC , symbolisés par la 2^eme gâchette des thyristors. La fréquence obtenue en R est celle à laquelle on commande les fonctionnements successifs des thyristors.

22 • MONTAGE TRIPHASE - DEBIT SUR RESISTANCES COUPLEES EN ETOILE

221 • Principe



Le pont de Graëtz permet d'alimenter, à fréquence variable, une charge triphasée par des tensions triphasées en créneaux à partir d'une source continue (batterie d'accumulateurs ou secteur redressé par un pont de Graëtz à diodes).

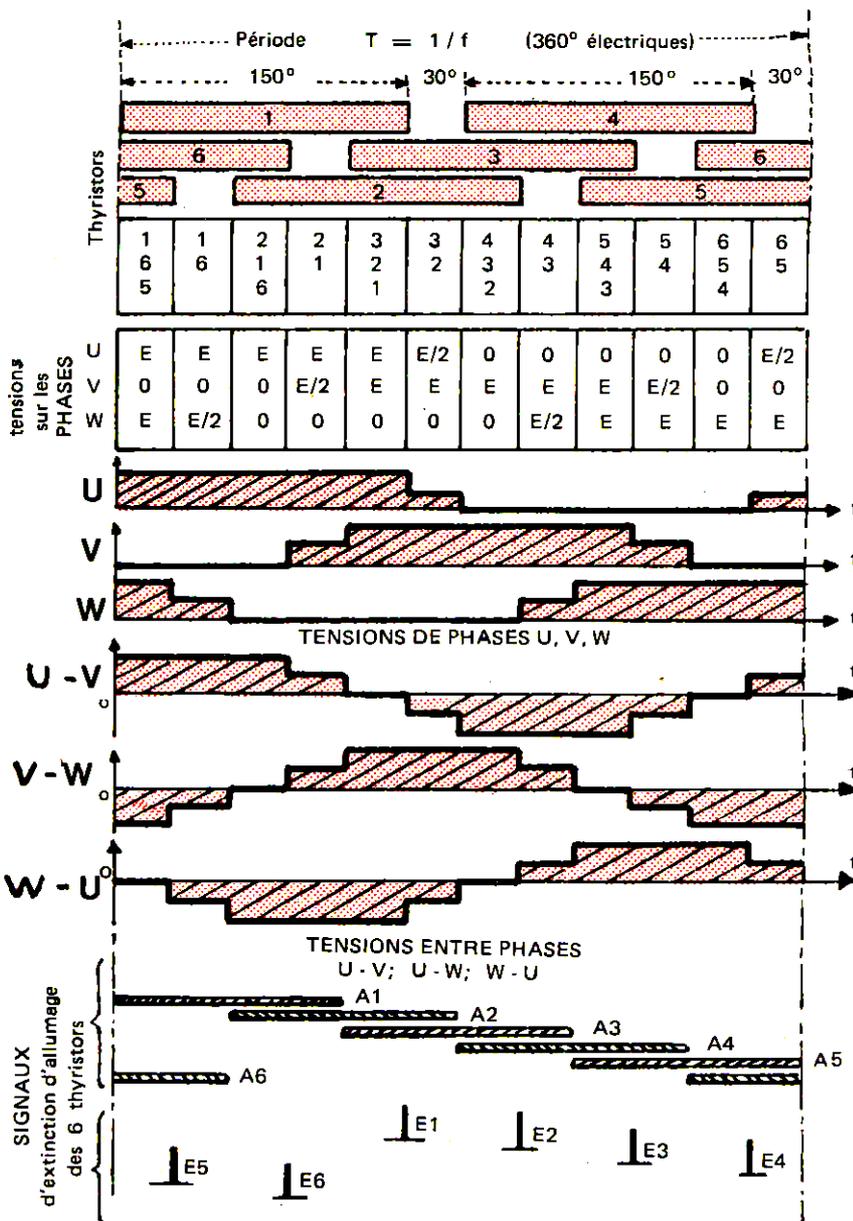
La charge est constituée par trois résistances identiques, couplées en étoile.

La séquence d'amorçages des thyristors d'un onduleur à fréquence variable est telle que les trois tensions de sortie (U, V, W.) soient décalées d'1/3 de période (120°), afin de constituer un système triphasé.

L'onduleur opère en COMMUTATEUR DE TENSION.

Pour créer ces tensions triphasées, il faut que les ordres d'amorçages des thyristors :

- 1, puis 2, puis 3, ... puis 6, puis 1 ... etc. soient décalées de $360^\circ/6 = 60^\circ$,
- d'un même bras (1 et 4, 3 et 6, 5 et 2), soient décalés de 180° .



La durée du débit des thyristors n'étant pas imposée, on choisit 150° (et non 180°) pour :

- dissocier allumage et extinction des six thyristors du pont,
- éliminer les risques de court-circuit sur la source à courant continu, en ménageant un temps mort de 30° entre les débits des thyristors d'un même bras.

D'où les 12 séquences de fonctionnement des thyristors :

- 5.6.1, 6.1, 6.1.2, 1.2
- 1.2.3, 2.3, 2.3.4, 3.4
- 3.4.5, 4.5, 4.5.6, 5.6
- 5.6.1 ... etc.

La fréquence d'alimentation de la charge est réglée par la fréquence des commutations des thyristors du pont.

222 • Détermination des tensions alternatives aux bornes de la charge

Prenons comme origine (arbitraire) des tensions (potentiel 0), la borne (-) de la source à courant continu E

- Quand 3 thyristors conduisent (ex. 5^*6^*1 , 6^*1^*2 , 1^*2^*3 ...): Ils fixent le potentiel (0 ou E) des trois phases (U, V ou W) qu'ils alimentent.
- Quand 2 thyristors conduisent (ex. 6^*1 , 1^*2 , 2^*3 ...): Ils fixent le potentiel (0 ou E) des deux phases qu'ils alimentent. La 3ème phase n'est reliée qu'au neutre de la charge. Les deux autres résistances de charge réalisent un diviseur par 2 de la tension E. La 3ème phase est donc portée au potentiel E/2.

Ces considérations définissent les allures des tensions de phases U, V, W, et, par différence, des tensions entre phases, U-V, V-W et W-U.

Ces tensions constituent bien un système triphasé en créneaux, tel qu'il y a suppression des harmoniques pairs et des harmoniques 3 et multiples de 3.

223 • Commande de l'onduleur

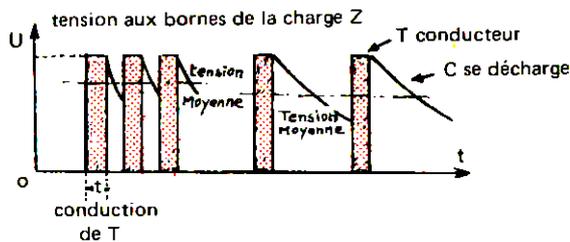
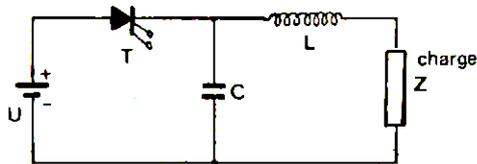
L'électronique de commande est sous la dépendance d'une horloge pilotant un compteur à 12 positions qui délivre 12 signaux par période :

- 6 pour l'allumage (A) des thyristors : impulsions larges (120° électriques) car si la charge est inductive, on ne connaît pas avec précision la loi d'établissement du courant. Ces signaux d'allumage sont repérés, A1, A2 ... A6.
- 6 pour leur extinction (E) : impulsions brèves. Ces signaux d'extinction sont repérés E1, E2 ... E6.

3 ● ALIMENTATION A TENSION U VARIABLE

Pour ajuster le flux de la machine, la tension U doit varier (proportionnellement à la fréquence).

- 31 ● Si on dispose d'une source continue, (ou pour les petits équipements), on utilise un HÂCHEUR dont le principe est de pouvoir être conducteur pendant de courts instants à une fréquence réglable.



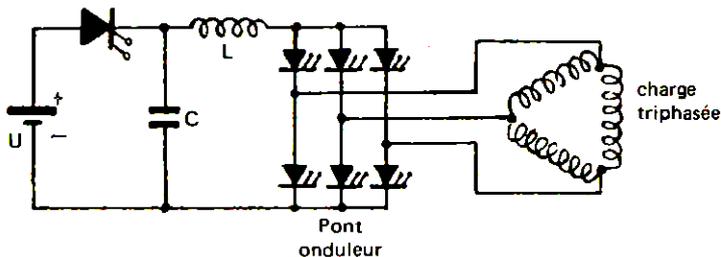
- Soit un circuit comprenant une source continue U qui, au travers d'un thyristor T , qui est un interrupteur statique, charge une capacité C qui alimente une charge Z .

Aux limites :

- Si T est toujours conducteur (il a été allumé et n'a pas été éteint) : C est chargé à la pleine tension U et la charge reçoit cette tension U .
- Si T n'est jamais conducteur, C étant déchargé, la charge Z reçoit une tension nulle.

Entre ces deux limites, plus la fréquence à laquelle on allume et éteint T est grande, plus la capacité C est souvent chargée et plus la charge reçoit une tension moyenne importante.

La source U est donc connectée plus ou moins souvent à un filtre inductance L -capacité C qui emmagasine l'énergie pour la restituer à la charge. La tension aux bornes de la charge est donc réglable selon la fréquence des commutations du thyristor T .

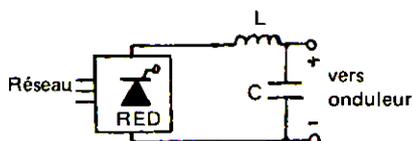


- Si un tel hâcheur alimente, par un onduleur à thyristors (qu'on peut allumer et éteindre), une charge triphasée :

- la tension d'alimentation de l'onduleur est réglée par le hâcheur au travers du LC,
- la fréquence d'alimentation de la charge est réglée par les commutations du pont onduleur.

- 32 ● Si on ne dispose pas d'une source continue, mais d'un réseau alternatif (ou pour les gros équipements), on utilise un pont de Graëtz connecté au réseau, fonctionnant en redresseur et dont on règle la tension par le réglage des retards α à l'allumage des thyristors :

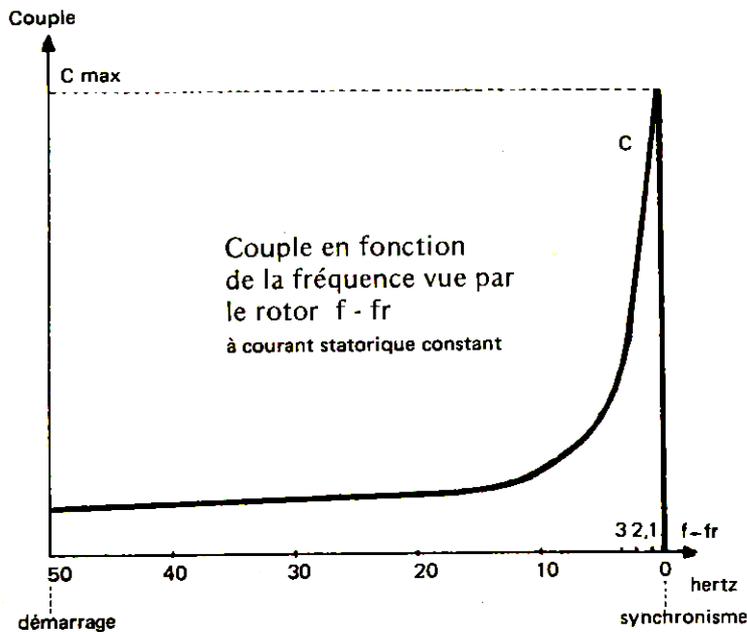
($\alpha = 0^\circ$: tension moyenne maximale
 $\alpha = 90^\circ$: tension moyenne nulle).



Si le réseau alternatif est à 50 Hz, cette tension continue réglable ondule à 300 Hz (page 10). Il est nécessaire de la filtrer à l'entrée de l'onduleur, par un circuit LC, pour disposer d'une tension aussi continue que possible, et ne pas introduire d'harmoniques supplémentaires dans la tension de la machine alimentée.

4 ● FONCTIONNEMENT D'ENSEMBLE

Le fonctionnement de la machine asynchrone peut être décrit à l'aide des quatre paramètres :



- Tension d'alimentation du stator U
- Courant statorique I
- Fréquence d'alimentation du stator f
- Fréquence vue par le rotor, c'est-à-dire écart de fréquence $\Delta f = f - f_r$ entre la fréquence d'alimentation du stator f et la fréquence de rotation du rotor f_r .

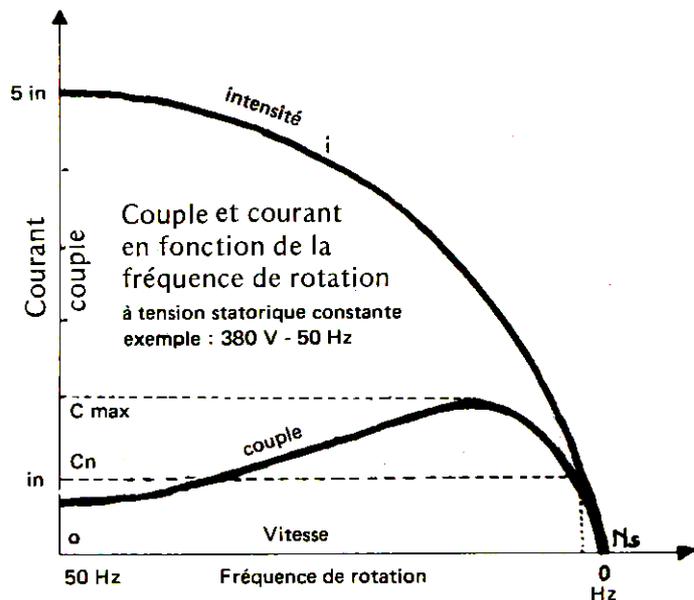
Cet écart de fréquence correspond au glissement.

La courbe ci-contre, à courant statorique constant, du couple en fonction de Δf , indique le couple maximum pour une certaine valeur de Δf .

Rappel :

Pour une tension statorique constante (exemple : le secteur 380 V, 50 Hz), rappelons les courbes bien connues du couple et du courant en fonction de la vitesse, pour le démarrage direct d'une machine asynchrone.

- Couple bas : $0,6 C_n$ par exemple au démarrage
- Surintensité considérable : $6 I_n$ et plus au démarrage.
- Au décollage (machine à l'arrêt, $N = 0$, $f_r = 0$) : $\Delta f = f - f_r = 50$ Hz.



Avec un onduleur autonome, tous ces inconvénients disparaissent. On peut démarrer, et fonctionner à toutes les vitesses intermédiaires, avec le couple maximum, sans surintensité.

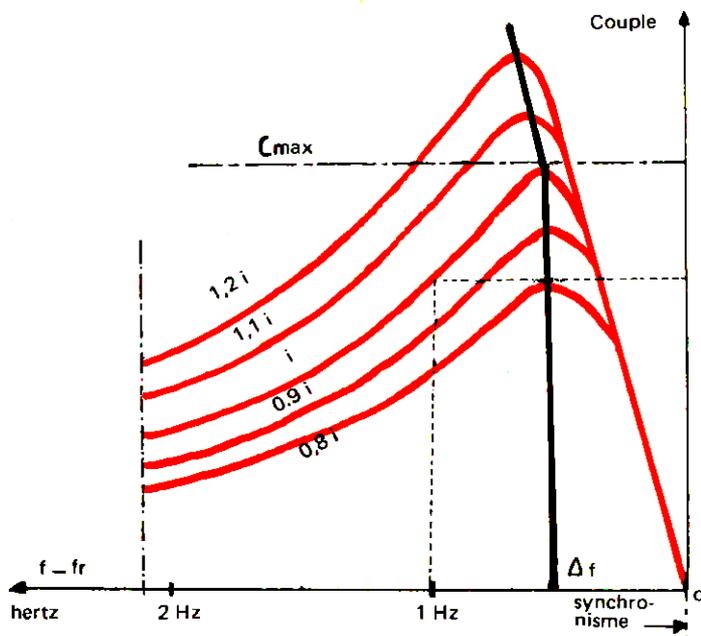
Le moteur asynchrone peut être piloté à fréquence variable par un onduleur autonome, selon deux procédés :

- **Pilotage par le courant** : en contrôlant la fréquence vue par le rotor, (Δf) qu'on maintient constante tant que la machine n'est pas saturée.
- **Pilotage par la tension** : en contrôlant le flux qu'on maintient constant, c'est-à-dire en maintenant tension et fréquence dans un rapport constant.

Nous allons étudier successivement les deux modes de pilotages en détaillant plus spécialement le pilotage par la tension dont les réalisations industrielles sont plus fréquentes.

41 • PILOTAGE DE L'ONDULEUR PAR LE COURANT STATOR

Pour un courant statorique constant, la courbe du couple en fonction de la fréquence ($f - f_r$) vue par le rotor présente un maximum C_{max} pour une certaine valeur de $\Delta f = f - f_r$.



Cet écart de fréquence est donc plus important à étudier que la fréquence f d'alimentation du stator.

Fonctionner, pour chaque vitesse du moteur, à Δf optimum, c'est fonctionner, pour chaque vitesse du moteur (y compris le démarrage) au couple maximum.

Tant que la machine n'est pas saturée, le Δf correspondant à C_{max} est indépendant de i . Lorsque la machine est saturée, le Δf correspondant à C_{max} est fonction de i .

Utilisons en abscisse une échelle dilatée de la fréquence vue par le rotor ($f - f_r$), pour les basses fréquences (de 0 à 2 Hz par exemple).

Avec un onduleur autonome alimentant une machine asynchrone, on peut obtenir au démarrage le couple maximum sans surintensité.

Pour obtenir la fréquence f d'alimentation de l'onduleur, on mesure la fréquence f_r du rotor par un capteur (numérique) accouplé à l'arbre.

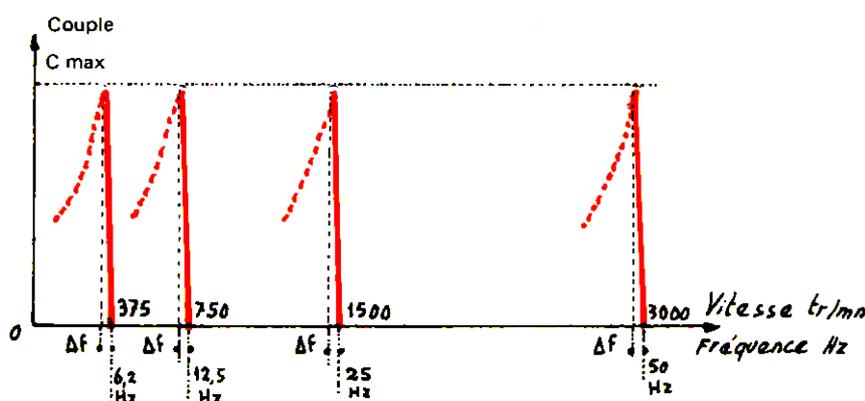
On y ajoute le terme Δf optimum.

$$f = \Delta f + f_r$$

Pour un i donné et à titre d'exemple :

- le couple est maximum pour $\Delta f = 0,7$ Hz
- le couple chute de 30 % pour $\Delta f = 1$ Hz

Le capteur numérique doit donc être de grande précision car Δf est une faible fraction de la fréquence f_r de rotation.



Δf pour C_{max} est maintenu constant

Il nécessite une régulation de vitesse ($J \cdot dN/dt = C_m - C_r$), car en cas de délestage de charge ($C_r \searrow$), si on impose le courant (C_m), on risque l'emballage ($\frac{dN}{dt} \nearrow$).

Ce type ne convient qu'à l'entraînement de machine unique.

Lorsqu'en freinage, la machine fonctionne en génératrice asynchrone, le sens du courant boucle ne s'inverse pas. Par contre, la tension boucle s'inverse. De ce point de vue, ce type est proche de l'entraînement d'une machine synchrone alimentée par onduleur autosynchrone.

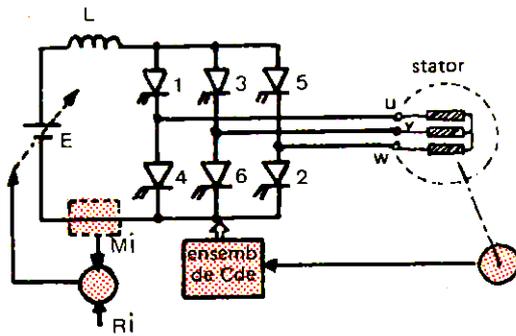
La chaîne de régulation devant être très précise est numérique.

La courbe "Couple/vitesse" se translate avec la fréquence f d'alimentation du stator.

L'onduleur dont on règle le courant dans la boucle, est un COMMUTATEUR DE COURANT.

Associé à un dispositif de pilotage en fréquence, par calcul de la fréquence f , il permet l'optimisation du variateur de vitesse.

411 • Principe de l'alimentation en courant

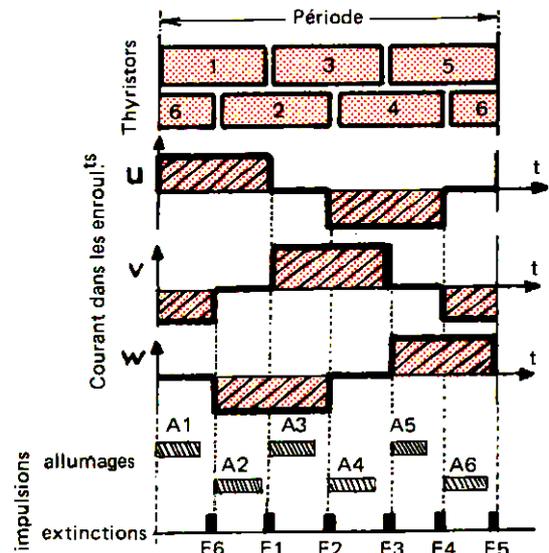


L'alimentation en courant est réalisée à partir d'une source de tension variable fournissant un courant continu filtré par une inductance de lissage dans une boucle intermédiaire.

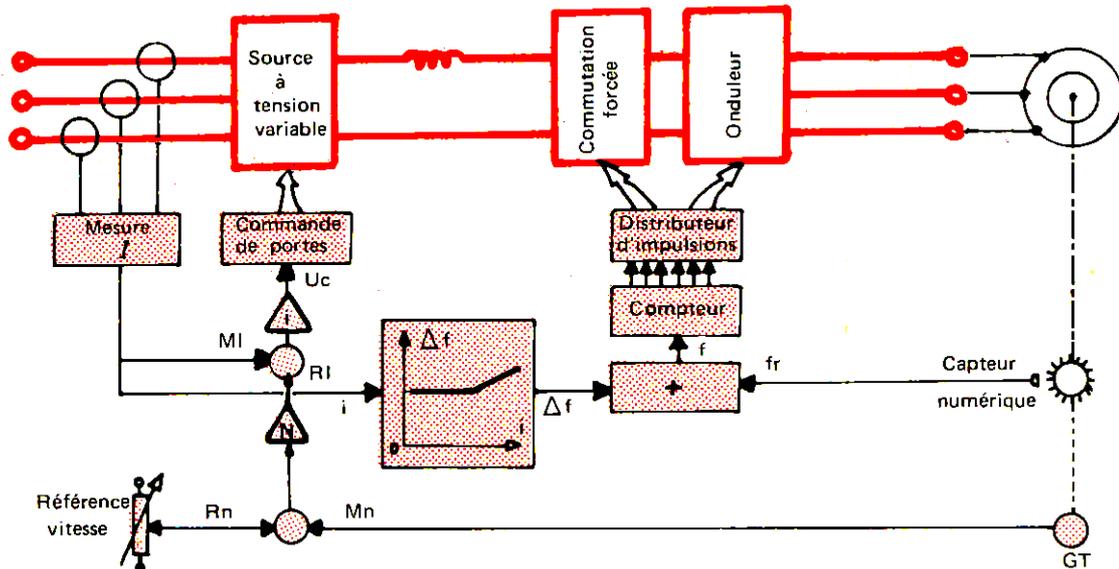
Ce courant continu est commuté dans les enroulements de la machine par un onduleur fonctionnant en COMMUTATEUR DE COURANT.

Le fonctionnement est le même que celui décrit en page 40. Le courant alternatif de la machine a la forme d'une succession de créneaux positifs et négatifs.

Avec une machine asynchrone, la commutation naturelle n'étant pas possible, seule une commutation forcée des thyristors de l'onduleur est possible.



412 • Schéma de commande de l'onduleur autonome, piloté par le courant



Les éléments de l'onduleur piloté en courant, comprennent notamment :

- un capteur de vitesse numérique,
- un générateur de la valeur Δf , constant d'abord, puis corrigé par le courant I à partir de la saturation de la machine,
- un sommateur de fréquences $f = \Delta f + f_r$

a) On affiche la vitesse

L'écart de vitesse amplifié sert de référence de courant. Un amplificateur de courant, après comparaison avec la mesure du courant, règle le courant par l'intermédiaire de la commande de portes du pont d'entrée constituant la source à tension variable.

b) La fréquence f de l'onduleur est imposée par le sommateur qui ajoute le terme Δf à la fréquence f_r de rotation. La sortie du sommateur, qui donne une fréquence égale à 6 fois celle de l'onduleur, commande un compteur à 6 positions qui, par un distributeur, fournit les impulsions d'extinctions au dispositif de commutation forcée et d'allumages au pont onduleur.

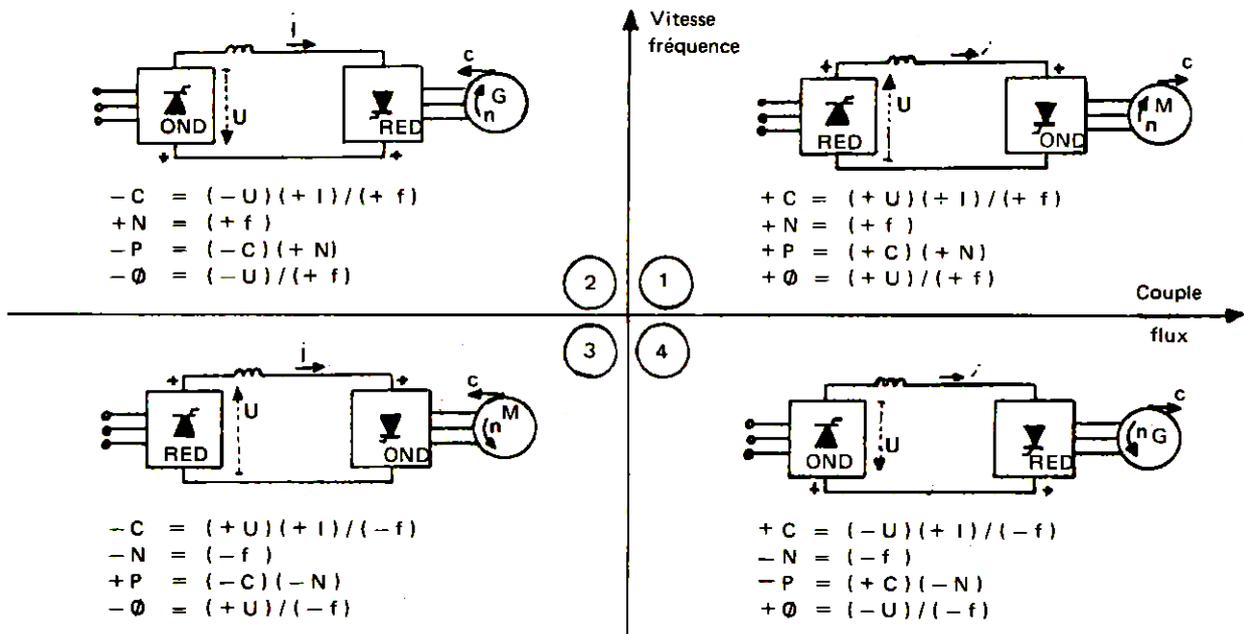
413 • Réversibilité

Le sens du courant boucle ne s'inverse pas, mais la tension boucle U s'inverse lorsque la machine fonctionne en génératrice asynchrone.

Il n'y a donc pas besoin (c'est également le cas de l'entraînement d'une machine synchrone alimentée par onduleur autosynchrone), d'un deuxième pont bêche d'entrée pour récupérer l'énergie de freinage.

En freinage, le pont d'entrée, fonctionnant en onduleur, renvoie au réseau l'énergie récupérée.

L'inversion du sens de rotation est obtenue en inversant, au niveau de l'électronique de contrôle, la succession des allumages et extinctions du pont machine (inversion de f).



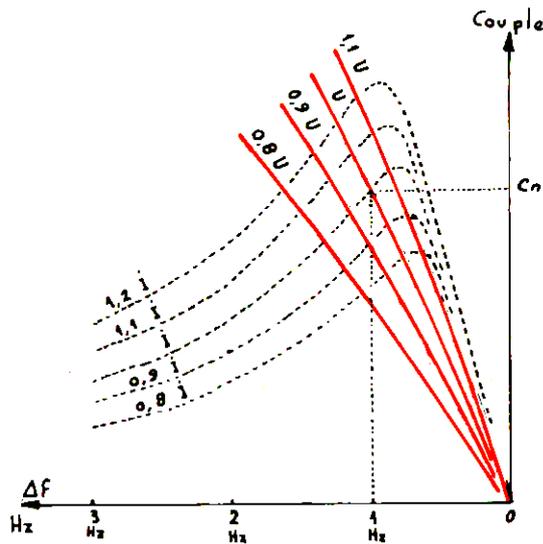
42 • Pilotage de l'onduleur par la tension stator

Le principe consiste à fonctionner à flux constant pour obtenir, comme il a été décrit page 53, une translation de la courbe "Couple-Vitesse" dès lors que tension et flux varient parallèlement.

Dans la machine prise en exemple, le couple nominal est obtenu pour une fréquence vue par le rotor $\Delta f = f - f_r \neq 1$ Hz et le flux constant.

Au démarrage, $f_r = 0$: pour obtenir le couple nominal sans surintensité, on doit alimenter la machine à la tension réduite u telle que le flux soit constant :

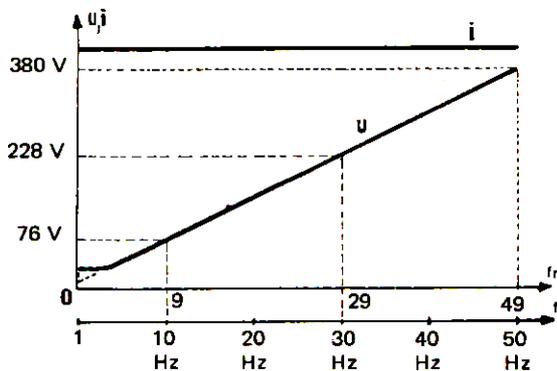
$$\phi = \frac{380 \text{ V}}{50 \text{ Hz}} = \frac{u}{f} = \frac{u}{\Delta f + f_r} = \frac{u}{1 \text{ Hz} + 0}, \text{ c'est-à-dire à : } \begin{cases} u = 7,6 \text{ V.} \\ f = 1 \text{ Hz} \end{cases}$$



Le point de fonctionnement est maintenu à l'intersection de la droite C_n et de la courbe du couple à tension nominale U , à flux constant

Au fur et à mesure de la montée en vitesse de la machine, on augmente parallèlement la tension stator U et la fréquence f de l'onduleur.

| U Volts | f Hz | f_r Hz | $f - f_r$ Hz |
|------------|---------|-------------|-----------------|
| 7,6 | 1 | 0 | 1 |
| 76 | 10 | 9 | 1 |
| 228 | 30 | 29 | 1 |
| 380 | 50 | 49 | 1 |



On maintient le rapport U/f constant, c'est-à-dire le flux constant sauf aux basses valeurs de U , où il faut majorer U des chutes ohmiques.

Les onduleurs dont on règle la tension de boucle U en fonction de la fréquence, s'appellent : ONDULEURS A COMMUTATION DE TENSION.

Le réglage de cette tension détermine la fréquence f d'alimentation de l'onduleur, donc la vitesse du rotor de la machine.

L'onduleur à commutation de tension, associé à un dispositif de pilotage en fréquence, maintenant U/f constant, permet de réaliser des entraînements simples à vitesse variable. Il ne nécessite pas de capteur sur l'arbre de la machine.

On obtient une régulation de vitesse à $f - f_r$ près, par régulation de la tension stator.

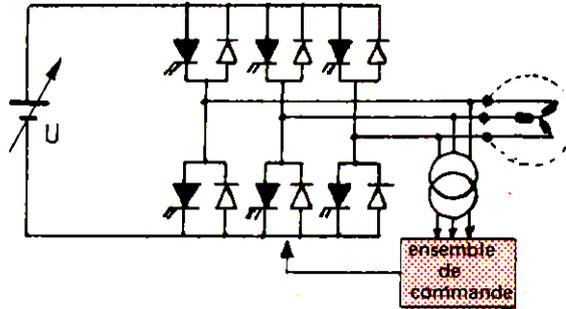
Cet onduleur permet de créer un réseau à fréquence variable f capable d'alimenter des machines en parallèle.

Par adjonction d'une dynamo tachymétrique, il est possible de réaliser un asservissement rigoureux de vitesse.

421 • Principe de l'alimentation en tension

En débit (théorique) sur résistances, il a été vu, page 56, que l'onduleur impose à la charge des tensions alternatives triphasées, à partir de la source de tension continue.

En débit sur le stator d'une machine asynchrone, donc sur une charge passive et inductive, la commutation des thyristors doit également être forcée. Le courant est déphasé en arrière par rapport à la tension. Il doit donc continuer à circuler lorsque la tension est déjà nulle, c'est-à-dire après l'extinction des thyristors. Son passage est alors réalisé par des diodes montées en anti-parallèle sur les thyristors.

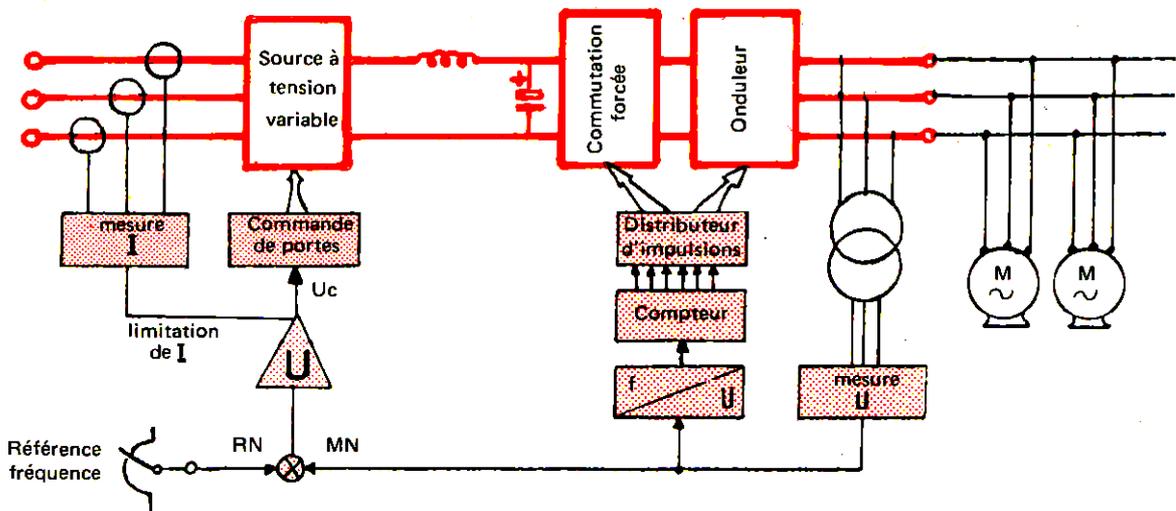


422 • Schéma de commande de l'onduleur autonome, piloté par la tension

L'électronique de commande est simple :

- On affiche la fréquence. La fréquence est proportionnelle à la tension. On se sert de cet affichage pour régler la tension, au travers d'un amplificateur dont la sortie U_c attaque la commande de portes du pont redresseur d'entrée constituant la source à tension variable.
- La tension de la boucle U étant établie, on en déduit, par le convertisseur "Tension/Fréquence" linéaire, la fréquence de l'onduleur.

La sortie du convertisseur U/f , qui donne une fréquence égale à 12 fois celle de l'onduleur, commande un compteur à 12 positions qui, par un distributeur, fournit les impulsions d'extinctions au dispositif de commutation forcée et d'allumages au pont onduleur.



423 • Réversibilité

Les diodes de retour permettent de redresser les courants débités par la machine en génératrice asynchrone. L'énergie de freinage est récupérée par adjonction d'un pont bêche d'entrée pont B, fonctionnant alors en onduleur (quadrants 2 et 4).

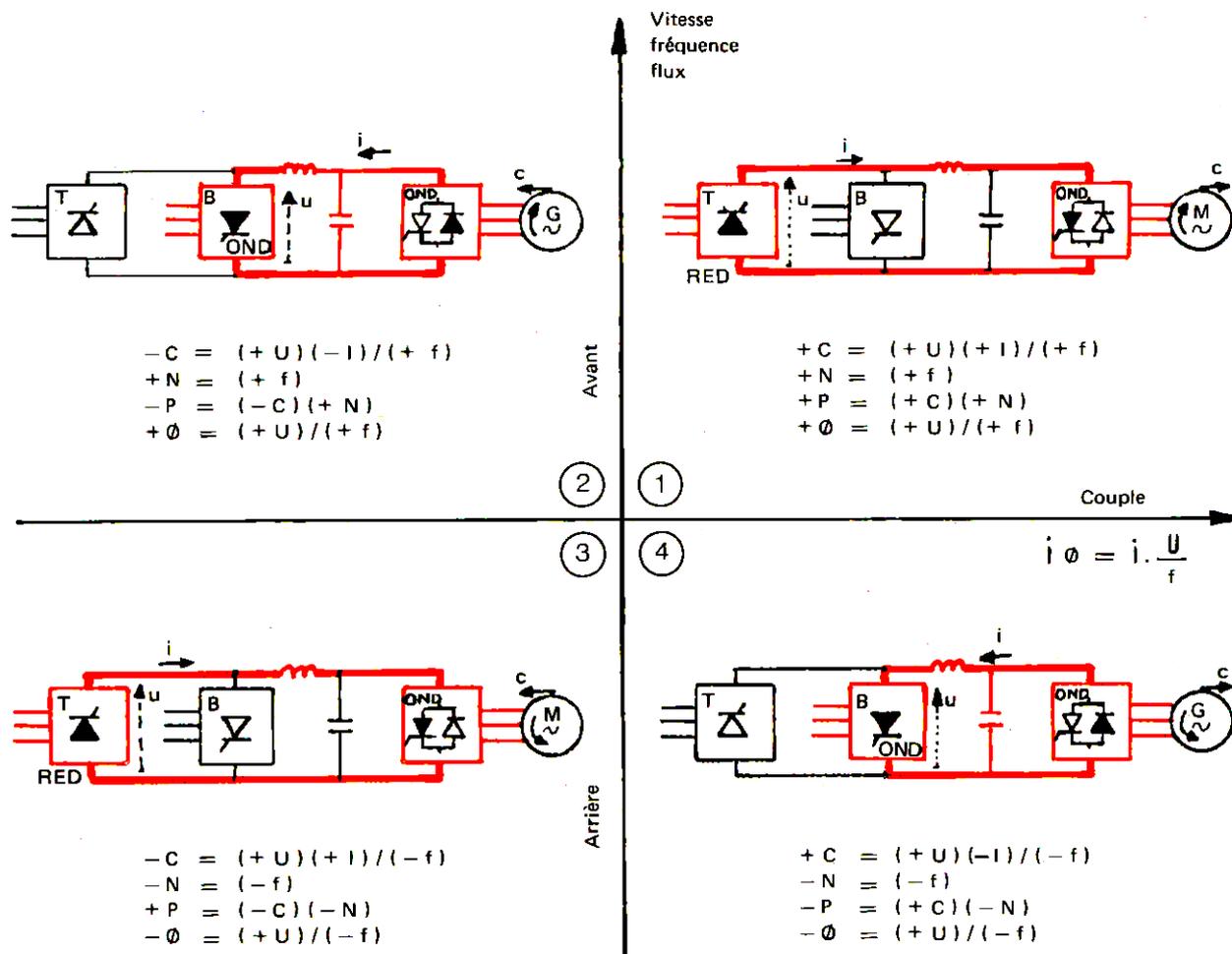
Remarque :

Le freinage peut également être obtenu par dissipation de l'énergie de freinage dans une résistance triphasée branchée par un contacteur, aux bornes du moteur, au moment du freinage.

L'inversion du sens de marche est obtenue, au niveau de l'électronique de commande, en inversant l'ordre de commutation des thyristors du pont machine OND.

Donc, sans adjonction du pont bêche B d'entrée, le système peut fonctionner dans les deux directions (Avant et Arrière : quadrants 1 et 3), mais sans possibilité de récupérer l'énergie de freinage.

Du quadrant 1 au quadrant 2, ainsi que du quadrant 3 au quadrant 4, la machine opère en génératrice asynchrone et l'énergie de freinage est récupérée au travers du pont B. Le courant est alors inversé.



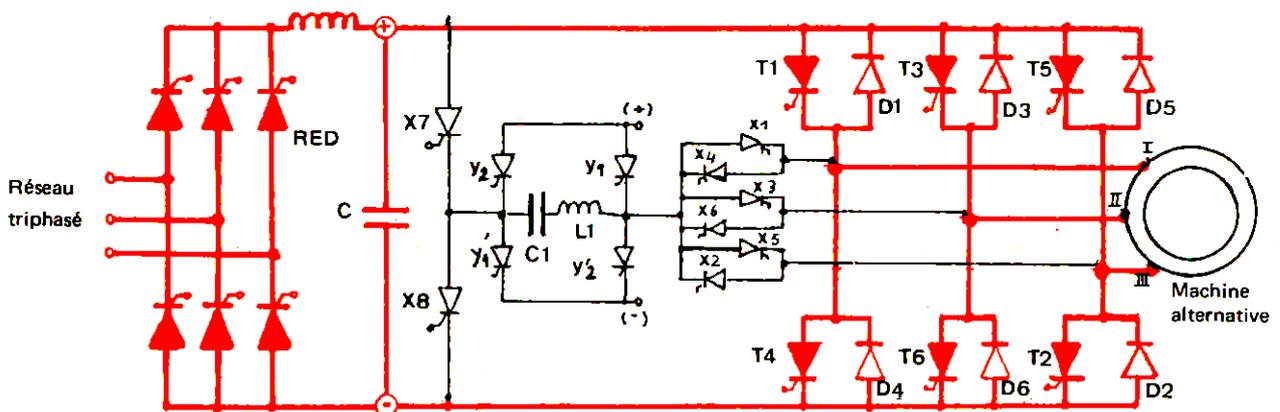
5 ● REALISATION INDUSTRIELLE DE L'ONDULEUR AUTONOME A COMMUTATION DE TENSION

- 51 ● **LA SOURCE ALIMENTANT L'ONDULEUR EST REGLABLE** : par un pont de Graëtz RED à 6 thyristors, piloté par une commande de portes classique.

Sa tension de sortie ondulant à 300 Hz est filtrée par un circuit LC qui découple l'onduleur du réseau.

On peut donc ainsi régler la tension appliquée au moteur asynchrone. Quand la vitesse du moteur diminue, la tension doit diminuer.

52 ● L'ONDULEUR A FREQUENCE VARIABLE, A COMMUTATIONS FORCEES



Cet onduleur est essentiellement constitué par un pont de Graëtz à six thyristors, T1 à T6, munis chacun d'une diode, D1 à D6, branchée en antiparallèle.

On associe à cet ensemble thyristors-diodes, un dispositif à commutation forcée, unique, capable d'assurer l'extinction des thyristors de l'onduleur. En effet, ceux-ci sont parcourus par le courant provenant de la boucle continue intermédiaire, et il est impossible de les éteindre de façon naturelle par passage à zéro du courant, car la machine asynchrone ne développe aucune force électromotrice à ses bornes.

L'extinction du courant dans les thyristors de l'onduleur est assurée par l'intermédiaire d'un circuit oscillant L1C1. L'énergie emmagasinée dans un condensateur C1 est associée à un aiguillage (formé de 8 thyristors X1 à X8) qui oriente son courant de décharge vers le thyristor qui est à éteindre dans l'onduleur.

X1 à X6 sont montés deux à deux tête-bêche. Chaque tête-bêche a un point commun relié au circuit oscillant et l'autre extrémité reliée à une phase du moteur.

X1 pour éteindre T1 et X4 pour éteindre T4 sont reliés à la phase I
 X3 pour éteindre T3 et X6 pour éteindre T6 sont reliés à la phase II
 X5 pour éteindre T5 et X2 pour éteindre T2 sont reliés à la phase III

Le circuit parcouru par le courant de décharge du condensateur se referme par l'un ou l'autre des deux thyristors X7 ou X8 :

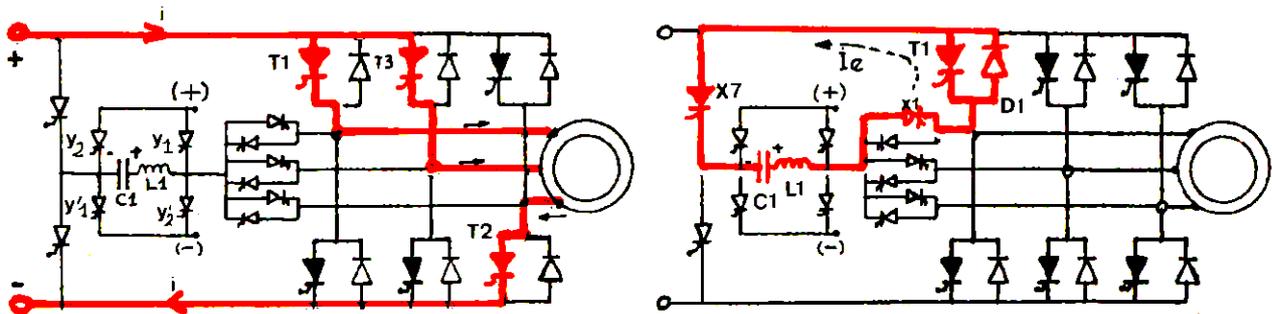
- X7 avec X1, X3 ou X5 pour éteindre les thyristors impairs,
- X8 avec X4, X6 ou X2 pour éteindre les thyristors pairs.

Pour compenser l'amortissement du circuit oscillant, dû aux pertes ohmiques, C 1 fonctionne sous une tension constante grâce à une source auxiliaire (+) (-) extérieure qui fournit les pertes du circuit oscillant :

- les thyristors auxiliaires Y1 et Y'1 pour le complément de charge dans un sens,
- les thyristors auxiliaires Y2 et Y'2 pour le complément de charge dans l'autre sens.

Cette source auxiliaire constante (+) (-) est indépendante de la tension d'alimentation U essentiellement variable puisque devant évoluer avec la fréquence d'alimentation du moteur.

521 • Mécanisme de l'extinction forcée d'un thyristor



Comme il a été montré en page 56, les séquences de commutation des thyristors de l'onduleur travaillant en commutateur de tension sont au nombre de 12 :

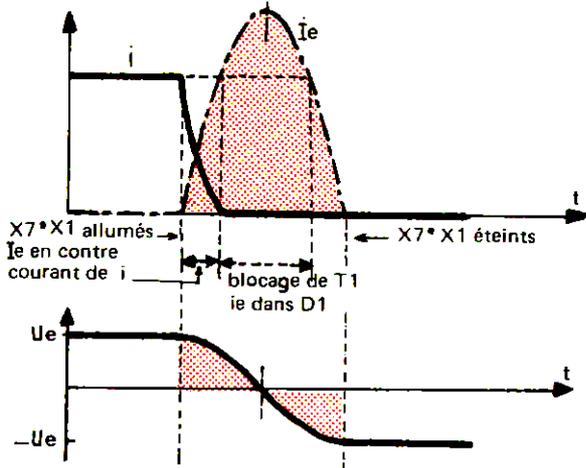
5.6.1, 6.1, 6.1.2, 1.2, 1.2.3, 2.3,
 2.3.4, 3.4, 3.4.5, 4.5, 4.5.6, 5.6, 5.6.1 ... etc

Supposons que T1, T2 et T3 conduisent et transigent un courant I dans le stator du moteur. Pour la séquence suivante, on veut éteindre T1 pour atteindre la séquence T2²T3.

Annulation du courant dans T1 : le circuit oscillant L1C1 est tel que la capacité est chargée $\frac{1}{2} U_e$ positivement (Ue).

L'allumage simultané de X7 et X1 (leur anode est positive par rapport à leur cathode), fait circuler un courant d'extinction I_e sinusoïdal, qui s'oppose à I et d'amplitude supérieure à I, mais pendant un bref instant, de l'ordre de 0,1 ms. En effet, si on néglige les chutes de tension dans les thyristors et les diodes, le circuit oscillant L1C1 fonctionne en court-circuit. I_e et U_e sont sinusoïdaux et décalés de 90°.

Polarisation en inverse de T1 : I_e s'oppose à I et l'annule.



Quand I s'est annulé, T1 ne conduit plus.

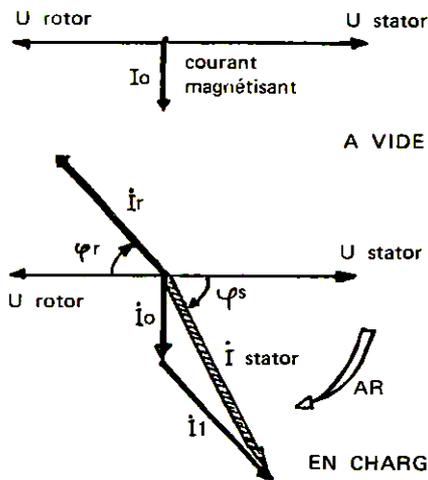
I_e se referme au travers de la diode D1. Le thyristor T1 polarisé en inverse par la chute de tension dans D1, se bloque (le courant ne peut pas s'inverser dans T1).

Après une demi-sinusoïde, $I_e = 0$ et la tension aux bornes de C1 s'est inversée et est devenue maximale $\pm \frac{1}{C1} (-U_e)$.

Le circuit oscillant est alors prêt à assurer une nouvelle extinction, celle de T2.

522 • Courant magnétisant du moteur asynchrone

Tout moteur asynchrone, comme tout organe dans lequel un flux est établi, est le siège de courant magnétisant I_0 déphasé par rapport à la tension d'alimentation U stator.



• **A VIDE** : Ce courant magnétisant I_0 est le seul courant au stator.

Il n'y a pas de courant rotorique, le couple moteur est nul.

• **EN CHARGE** : Un courant rotorique I_r existe, donc un courant statorique de charge I_1 .

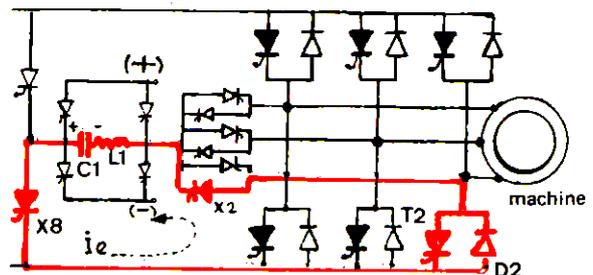
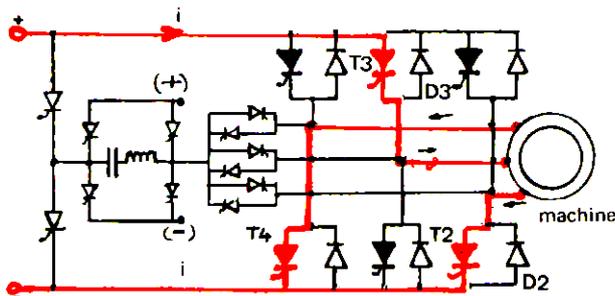
$$I_1 = k \cdot I_r$$

$$I_{\text{stator}} = I_0 + I_1$$

Le courant statorique est nécessairement déphasé en arrière, par rapport à la tension statorique, puisque I_0 est déphasé de 90° en arrière.

Dans le pilotage de l'onduleur en tension, quand la tension d'alimentation U stator est nulle, le courant I stator, étant déphasé en arrière, ne l'est pas et il doit se refermer dans les diodes.

523 • Dans la séquence suivante, du pont onduleur, T2, T3 et T4 conduisent. On veut ensuite éteindre T2 pour atteindre la séquence T3*T4.



C1 est maintenant chargée $\pm \frac{1}{C1}$. On annule le courant I dans T2, par allumage de X8 et X2. Le courant d'extinction I_e bloque T2 ... etc

524 • Rôle des diodes

Le rôle des diodes de retour est triple :

- Blocage des thyristors par leur polarisation en inverse,
- Chemin offert au courant pendant l'extinction des thyristors
- Redressement des courants débités par la machine asynchrone fonctionnant en génératrice : les diodes autorisent le fonctionnement en récupération, l'énergie de freinage de la machine étant renvoyée au réseau par adjonction d'un pont bêche d'entrée fonctionnant en onduleur. La réversibilité de l'onduleur autonome piloté en tension a été étudiée page 65.

525 • Circuit d'extinction

Le circuit d'extinction L1C1 est unique pour les 6 thyristors T1 à T6. Il fonctionne donc à une fréquence six fois plus élevée que celle vue par le moteur car il y a six extinctions par période onduleur

On n'utilise donc qu'une seule capacité C1, et qu'une seule inductance L1, qui sont volumineuses et chères.

Par contre, le circuit d'aiguillage de l'extinction est composé des 8 thyristors X1 à X8 qui, véhiculant l'important courant d'extinction, mais pendant des temps très courts, sont petits par rapport aux thyristors de puissance T1 à T6.

La source auxiliaire d'alimentation de C1 à tension constante ne représente que 1 % de la puissance nominale de l'onduleur fonctionnant à 50 Hz. La puissance de cette source est proportionnelle à la fréquence de l'onduleur.

526 • NOTA :

- A cause du problème de l'extinction, il n'est pas utilisé de pont onduleur avec montage série-parallèle de thyristors par bras. L'onduleur peut atteindre des puissances de l'ordre de 500 kW, qui est également la limite des moteurs industriels courants, et des fréquences de l'ordre de 150 Hz.
- L'onduleur autonome peut alimenter non seulement des moteurs asynchrones mais également des moteurs synchrones, selon le même principe de création d'un champ tournant statorique à vitesse variable. Il est nécessaire, dans ce dernier cas, d'ajouter une inductance par phase entre le moteur et l'onduleur pour tenir la différence entre la tension sinusoïdale de la machine synchrone et la tension en créneaux de l'onduleur. De plus, cet onduleur n'acceptant pas de charge à $\cos \varphi$ avant, il faut régler l'excitation du moteur synchrone pour qu'il fonctionne à $\cos \varphi$ arrière (page 39).

6 ● DOMAINES D'APPLICATIONS

Ce variateur simple permet une régulation de vitesse et accepte les à-coups de charge de 100 %.

L'électronique de commande est simple, composée d'un petit nombre de cartes : sa maintenance est donc facile.

Un tel variateur peut être directement raccordé dans une installation, entre le réseau et la machine. Il n'est pas nécessaire de connaître précisément les caractéristiques du moteur pour réaliser l'onduleur.

Le rendement global est bon : de 80 % à 20 Hz à 91 % à 50 Hz pour un équipement de puissance voisine de 100 kW. Le rendement global est tributaire du rendement du moteur, variable avec sa puissance.

61 ● GAMMES D'ONDULEURS AUTONOMES

Des gammes homogènes d'onduleurs autonomes existent à CGEE ALSTHOM Division des Ensembles Industriels, DEI :

- | | |
|----------------|---|
| • 30 à 75 kW | jusqu'à 150 Hz |
| • 100 à 150 kW | jusqu'à 150 Hz |
| • 200 à 400 kW | jusqu'à 50 ou 100 Hz selon la puissance |

62 ● DOMAINES D'APPLICATIONS

Les domaines d'application sont extrêmement variés

- *Avec moteurs asynchrones : pompes, ventilateurs, tréfileuses, soufflantes, compresseurs, mélangeurs, bancs d'essais, auxiliaires de métallurgie, meules à grandes vitesses, machines-outils*
- *Avec moteurs synchrones : industries du verre, du textile artificiel, rouleaux de laminoirs ...*

D'une façon générale, ce variateur peut répondre à toutes les applications, jusqu'à 500 kW, dans les créneaux suivants :

- *Alimentation de plusieurs moteurs (asynchrones ou synchrones) en parallèle, devant être synchronisés en vitesse,*
- *Emploi de moteurs alternatifs antidéflagrants, de série (chimie, pétrochimie),*
- *Présence d'un collecteur exclue (causes mécaniques ou d'environnement),*
- *Moteurs à grande vitesse : possibilité d'utiliser des moteurs bipolaires au-delà de 3000 tr/mn,*
- *Installation existante d'un moteur alternatif à vitesse fixe qu'on désire compléter par un variateur de vitesse.*

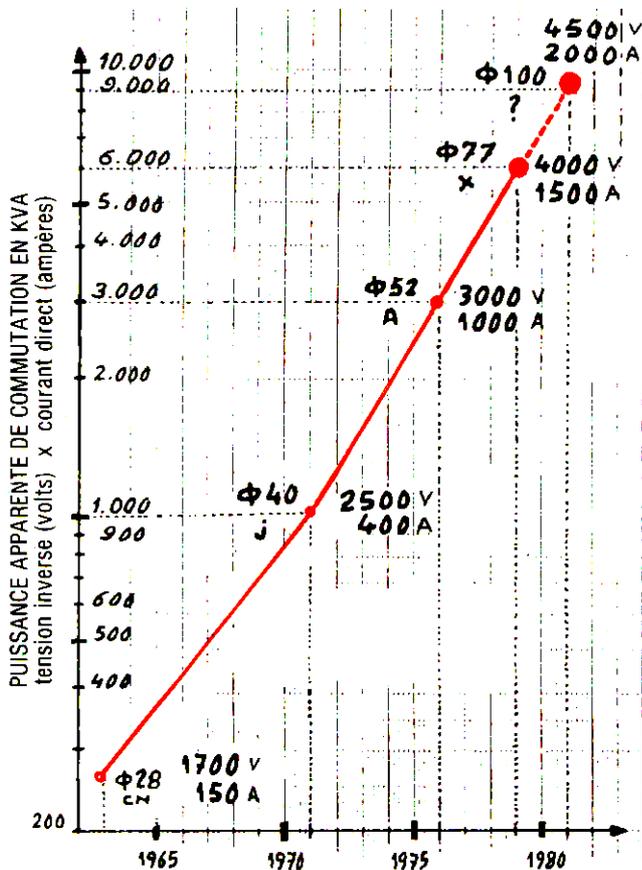
POSSIBILITES ACTUELLES DES CONVERTISSEURS A THYRISTORS ET DES MACHINES A COURANTS ALTERNATIFS A VITESSE VARIABLE

1 ● POSSIBILITES ACTUELLES DES CONVERTISSEURS A THYRISTORS

Leurs performances actuelles résultent tant de l'amélioration constante des semi-conducteurs de puissance que de l'expérience acquise dans la commande des moteurs à courant continu (basse tension et fort courant), et dans la conversion associée au transport à courant continu (haute tension : 100 kV).

La puissance apparente de dimensionnement des thyristors (courant direct moyen multiplié par tension inverse), a été multipliée par 23 en 16 ans (de 260 kVA à 6000 kVA de 1963 à 1979), grâce :

- à l'amélioration du refroidissement : par air, par huile, par eau,
- et au calibre des jonctions : le diamètre des pastilles de silicium atteint déjà 77 mm, et atteindra 100 mm d'ici quelques années.



Evolution de la puissance apparente de dimensionnement des thyristors et du diamètre des jonctions

Le tableau suivant, des thyristors construits par la CGEE ALSTHOM Division des Ensembles Industriels (DEI) illustre particulièrement bien l'évolution figurée par la courbe en ordonnées logarithmiques.

| Année | Diamètre de la jonction en mm | Type du thyristor | Puissance apparente dimensionn ¹ | | |
|-------|-------------------------------|-------------------|---|------------------------|-------------------------|
| | | | Tension inverse VOLTS | Courant direct AMPERES | Puissance apparente kVA |
| 1963 | 28 | CN | 1700 | 150 | 260 |
| 1966 | 33 | H | 1800 | 400 | 720 |
| 1971 | 40 | j | 2500 | 400 | 1000 |
| 1976 | 52 | A | 3000 | 1000 | 3000 |
| 1979 | 77 | X | 4000 | 1500 | 6000 |

Les semi-conducteurs actuels ont un niveau de fiabilité particulièrement élevé et un niveau de puissance dépassant largement les besoins industriels actuels.

La technologie MOYENNE TENSION utilise des éléments modulaires pour bras de pont de Graëtz avec, par exemple, 12 thyristors en série et 4 thyristors en parallèle (environ 8500 V et 660 A), soit 48 thyristors par module.

La seule limitation provient des possibilités actuelles des machines à courants alternatifs

2 ● POSSIBILITES ACTUELLES DES MACHINES A COURANTS ALTERNATIFS

21 ● LIMITES DU MOTEUR A COURANT CONTINU

On a vu que le collecteur d'une machine à courant continu est limité par la nature du contact glissant (balais, lames du collecteur), assurant la commutation des courants de l'induit.

Ces limitations sont dues :

- à l'environnement : ambiance corrosive, air sec, ambiance explosive (étincelle aux balais),
- aux frais d'entretien du collecteur : remplacement des balais, nettoyage des poussières de charbon, rectification du collecteur,
- aux performances maximales "Puissance multipliée par vitesse".

Cette limitation est sensiblement l'hyperbole $PN = 2000 \text{ MW} \times \text{tr/mn}$, avec

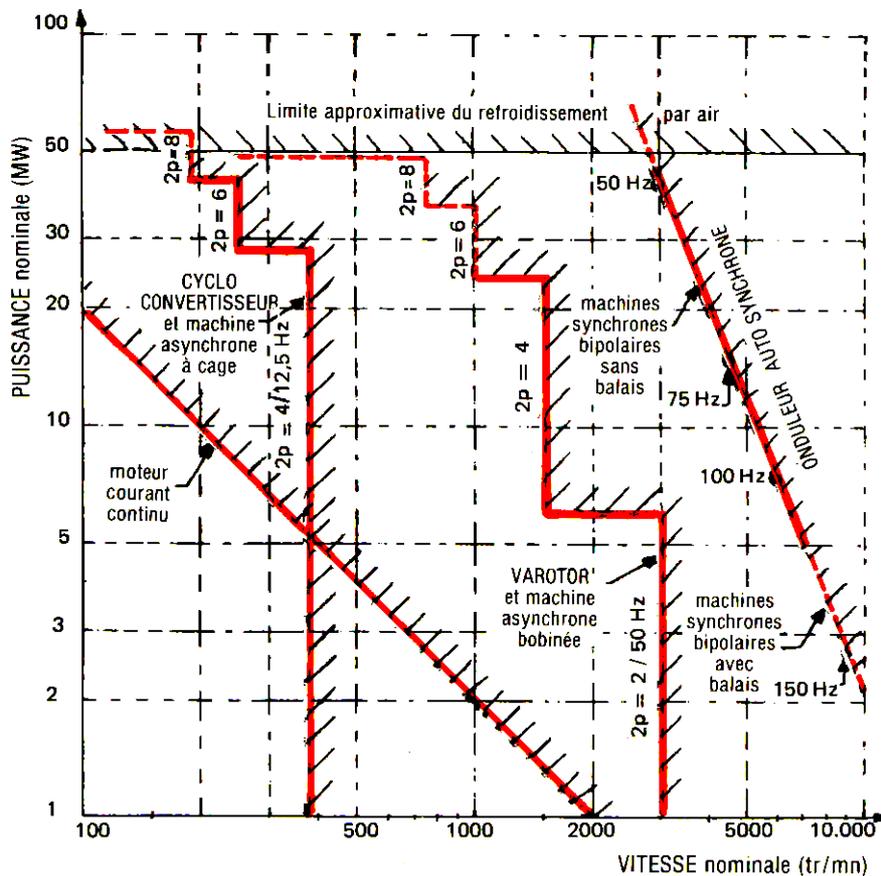
aux limites (1 MW à 2000 tr/mn

(20 MW à 100 tr/mn (cas extrême des très gros laminoirs à moteurs à courant continu)

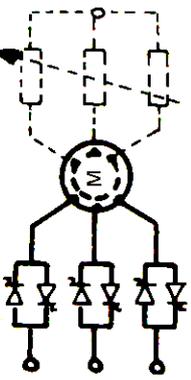
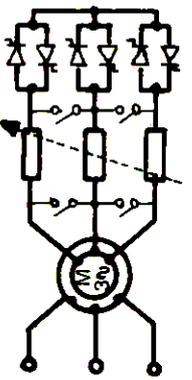
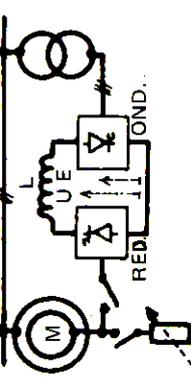
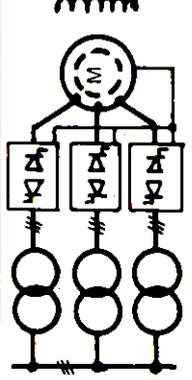
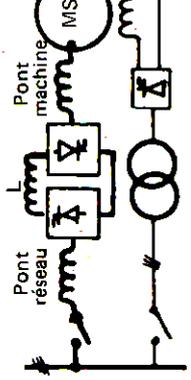
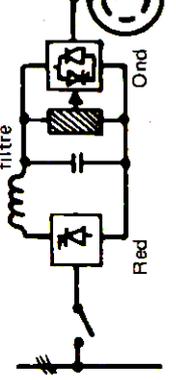
22 ● POSSIBILITES OFFERTES PAR LES EQUIPEMENTS A FREQUENCE VARIABLE ET LES MOTEURS A COURANTS ALTERNATIFS

- Le **VAROTOR** (cascade hyposynchrone) peut monter à :
 - 6 MW à 3000 tr/mn en machine bipolaire $2p = 2$
 - 25 MW à 1500 tr/mn en machine tétrapolaire $2p = 4$
 et à une puissance supérieure en machines à 6 ou 8 pôles.
- Le **CYCLOCONVERTISSEUR** peut monter environ à :
 - 27 MW à 375 tr/mn en machine à cage à 4 pôles en 12,5 Hz,
 - 40 MW à 250 tr/mn en machine à cage à 6 pôles en 12,5 Hz,
 et à une puissance supérieure en machine à cage à 8 pôles.
- L' **ONDULEUR AUTOSYNCHRONE** peut monter, avec machine synchrone bipolaire
 - avec balais, à : 2,5 MW à 9000 tr/mn (150 Hz)
 - sans balais, à : 7,5 MW à 6000 tr/mn (100 Hz) - 15 MW à 4500 tr/mn (75 Hz) - 40 MW à 3000 tr/mn (50 Hz).
- L' **ONDULEUR AUTONOME** peut, avec machines bipolaires (3000 tr/mn à 50 Hz), atteindre 9000 tr/mn à 150 Hz et jusqu'à des puissances de 500 kW.

Le tableau, en coordonnées logarithmiques, illustre ces quelques chiffres.

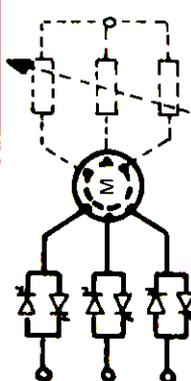
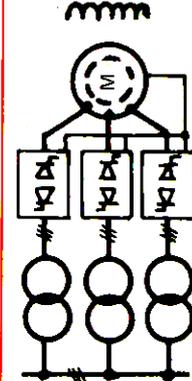
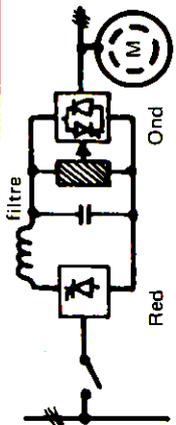
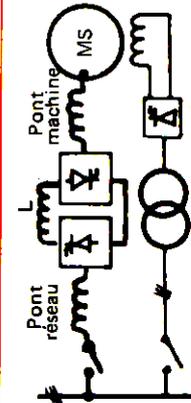


PRINCIPES GENERAUX DE FONCTIONNEMENT DES EQUIPEMENTS

| <p>VARIATION DE VITESSE DES MOTEURS A COURANTS ALTERNATIFS</p> | <p>SCHEMA DE PUISSANCE DE PRINCIPE</p> | |
|--|---|---|
| <p>GRADATHYR Variation de la tension statorique</p> |  | <p>Chaque phase d'alimentation comporte un tête bêche à thyristors. Selon le retard apporté à leur allumage, on règle la tension appliquée à la machine, et partant, le couple. Le réglage peut se faire sur une gamme d'autant plus profonde que le rotor est résistant. Ceci, joint au fait que cette méthode augmente le glissement, donc les pertes, conduit parfois à mettre des résistances rotoriques extérieures à la machine, pour que la dissipation se fasse en dehors de la machine.</p> |
| <p>ROTOMAT Variation du courant rotorique</p> |  | <p>Le circuit de chaque phase du rotor se termine par un tête bêche. Selon le retard apporté à l'allumage du thyristor, on permet au courant rotorique de circuler plus ou moins longtemps, donc d'avoir une valeur moyenne plus ou moins élevée. Le couple varie en conséquence, et avec lui la vitesse. Des contacteurs permettent de brancher plus ou moins des résistances selon les paliers désirés, ou même de marcher en secours sans les systèmes de réglages à thyristors, alors court circuités par contacteurs rotoriques. La mesure de vitesse étant obtenue à partir de la tension rotorique, il n'est plus besoin, comme dans le GRADATHYR, de dynamo tachymétrique. Le courant en ligne est moins chargé en harmoniques.</p> |
| <p>VAROTOR Cascade hyposynchrone Récupération de l'énergie rotorique de glissement</p> |  | <p>Un pont à diodes redresse les courants rotoriques pour en faire du courant continu. Ce courant continu alimente un onduleur raccordé au réseau. L'onduleur renvoie dans le réseau le courant continu de la boucle, c'est à dire finalement les courants rotoriques. Selon le réglage du retard à l'allumage des thyristors de l'onduleur, ce dernier oppose une force contre électromotrice plus ou moins grande à celle du rotor (via la boucle à courant continu). Cela règle la valeur du courant rotorique donc du couple, et partant la vitesse.</p> $i = \frac{U - E}{Z}$ <p>U : fem du pont redresseur E : fem du pont onduleur Z : impédance des circuits rotoriques</p> |
| <p>CYCLO CONVERTISSEUR Conversion directe de Fréquence</p> |  | <p>Dans chacune des phases d'alimentation du moteur il y a 2 ponts tête bêche, dans le genre de ceux des Variathyr. Mais au lieu de marcher en régime stabilisé, on module le retard à l'allumage de façon que la tension de sortie varie à basse fréquence (0 à 16 Hz). Les variations de tension appliquées aux 3 phases sont décalées de 120° de l'une à l'autre. A un instant donné, il y a un tête bêche red. le 2e est onduleur, le troisième pouvant être en redresseur ou en onduleur selon l'instant considéré (la somme des courants des 3 phases est toujours nulle). Ce qui entre par une phase sort par les deux autres, ou ce qui entre par 2 phases sort par une, selon l'instant considéré.</p> |
| <p>ONDULEUR AUTO SYNCHRONE Conversion indirecte de Fréquence par générateur courant continu</p> |  | <p>Un pont redresseur à thyristors redresse les courants alternatifs du réseau et en fait du courant continu. Ce courant continu est ondulé par un 2e pont à thyristors (pont machine) à la fréquence de rotation de la machine synchrone. Les commutations du pont machine se font, comme sur un réseau, grâce à la f.e.m. de la machine synchrone. Cela est vrai sauf à l'arrêt ou aux très basses vitesses où la f.e.m. de la machine est inexistante ou trop faible. Pour les très basses fréquences, la commutation du pont machine se fait par annulation du courant continu dans la boucle, par action sur le pont d'entrée (pont réseau). Le réglage de couple se fait par réglage du courant du moteur, obtenu en réglant la tension appliquée au moteur. C'est à dire finalement, en réglant la tension de la boucle intermédiaire à courant continu par action sur le pont d'entrée (qui est connecté au réseau)</p> |
| <p>ONDULEUR AUTONOME Commuation forcée</p> |  | <p>Un pont redresseur à thyristors redresse les courants alternatifs du réseau et en fait du courant continu. Ce courant continu est ondulé par un deuxième pont à thyristors à la fréquence de rotation de la machine asynchrone. Mais comme cette dernière ne fournit pas de force contre électromotrice, elle ne peut assurer la commutation des thyristors du pont onduleur ; on adjoint au pont onduleur, un système de commutations forcées comprenant un condensateur, une inductance, des thyristors d'aiguillage et une source auxiliaire à courant continu. Le réglage du couple se fait par réglage du courant du moteur, obtenu en réglant la tension de la boucle intermédiaire à courant continu par action sur le pont d'entrée qui est connecté au réseau.</p> |

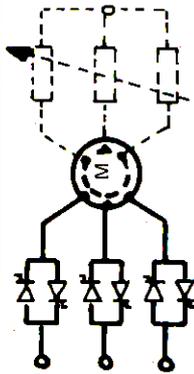
Fréquence fixe

Fréquence variable

| VARIATION DE VITESSE DES MOTEURS A COURANTS ALTERNATIFS | SCHEMA DE PUISSANCE DE PRINCIPE | | Pour Moteur alternatif | | Puissance | | | Fréquence alimentant le moteur | | | Récupé- ration sur Freinage | | 2 sens marche | | Cd = Cn sans surin- tensité | | Plage variation de vitesse | | Rendement | | cos φ | | REMARQUES | | | | | | | |
|---|--|--------------------------|------------------------------|-----------------|-----------------|--------------------|-----------------------|--------------------------------------|-------------------|--------|-----------------------------------|----------------|---------------------|----------------|-----------------------------------|----------------|-------------------------------|----------------|-----------|------|-------|------|-----------|------|------|------|------|------|---|--|
| | Asyn. à cage | Asyn. à bagues | Synchrone | Pertes 50 kW | Moyen 300 kW | Grandes 1000 kW | Très grandes 10 MW | Fixe 50/60 Hz | Variable 20 Hz | 200 Hz | Sans Adonc- | Avec Adonc- | Sans Adonc- | Avec Adonc- | Sans Adonc- | Avec Adonc- | 0 à ± 100 % | 0 à ± 100 % | 0,85 | 0,95 | 0,80 | 0,70 | 0,95 | 0,85 | 0,95 | 0,70 | 0,80 | 0,95 | | |
| GRADATHYR Variation de la tension statorique |  | | • | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | |
| | ROTOMAT Variation du courant rotorique | | • | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | |
| | VAROTOR Cascade hyposynchrone Récupération de l'énergie rotorique de glissement | | • | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | |
| CYCLO CONVERTISSEUR |  | | • | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | |
| | ONDULEUR AUTO SYNCHRONE | | • | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | |
| Fréquence variable | Conversion indirecte de Fréquence par générateur courant continu | | • | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | |
| | Conversion directe de Fréquence | | • | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | |
| ONDULEUR AUTONOME à commuta- tions forcées | | Commutation forcée | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Conversion indirecte de Fréquence par générateur courant continu | | Commutation naturelle | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
|  | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
|  | | Ond | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Fréquence fixe | | Pont réseau | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Pont maching | | MS | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Pont réseau | | MS | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | • | | |
| Ond | | Red | | • | | | • | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

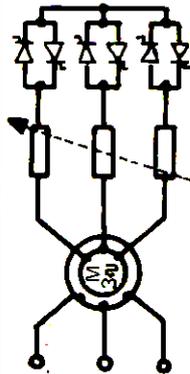
GRADATHYR

Variation de la tension statorique



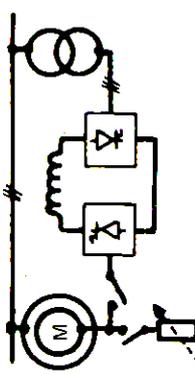
ROTOMAT

Variation du courant rotorique



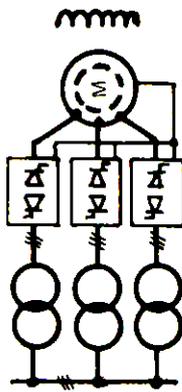
VAROTOR

Cascade hyposynchrone Récupération de l'énergie rotorique de glissement



CYCLO CONVERTISSEUR

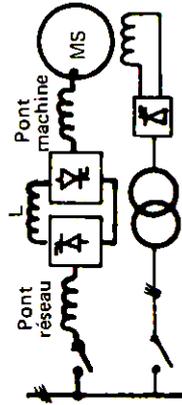
Conversion directe de Fréquence



ONDULEUR AUTO SYNCHRONES

Auto-Plôté

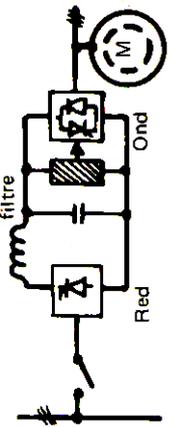
Commutation naturelle



ONDULEUR AUTONOME

à commutations forcées

Commutation forcée



- Mot. Asynch. à cage résistive : Faible plage de variation vitesse : mot. en C : $k \cdot N^2$, $C = k \cdot N^3$
- POMPES, VENTILATEURS de faible puissance
- Mot. Asynch. à Bagues : moyenne puissance 200 kW
- Service Intermittent : Lavage, MANTUTENTION
- Auxiliaires de BORD (cabestan, propulseur d'étrave)
- Chauffage : le gradathyr commande des résistances (et non plus un moteur)

- Service intermittent en lavage manutention :
- GRUES : de ports, de bord
- TREUILS : de Travaux publics
- PONTS : d'aciéries, de centrale, de montage de grosses pièces.

- Faible plage de variation de vitesse : POMPES, VENTILATEURS, SOUFFLANTES, COMPRESSEURS (moteurs en C : kN^2 , C : $k \cdot N^3$)

- Grandes Puissances : POMPES EXTRUDEUSES

- Grandes Puissances, Faible Vitesse : ($f \ll 16$ Hz) BROYEURS, FOURS A CIMENT
- Commande multi-moteurs : Trains de rouleaux de laminoirs

- Démarrages doux, Réglage fin, Synchronisme : INDUSTRIES de TRANSFORMATION
- PROPULSION de NAVIRES
- Grandes Vitesses : CENTRIFUGEUSES (6000 t/m)
- Grandes Puissances : TURBO COMPRESSEURS
- VENTILATEURS, Pompes Circulation (nucléaire)
- Démarrage - Couplage de Moteurs Synchrones : Pompes, Turbines à gaz, grosses soufflantes - Centrales hydrauliques à pompage

- Avec moteurs Synchrones :
 - VERRE (étenderie, float-glass)
 - TEXTILES ARTIFICIELS
 - POMPES, VENTILATEURS, SOUFFLANTES, COMPRESSEURS
 - Avec moteurs asynchrones :
 - POMPES, VENTILATEURS, SOUFFLANTES, COMPRESSEURS
 - MELANGEURS, BANCS D'ESSAIS, AUXILIAIRES de METALLURGIE, MACHINES-OUTILS

- P.A. Marseille : translation portiques : 8 x 13 kW : 104 kW par palée
- P.A. Le Havre : translation portiques : 4 x 35 kW : 140 kW par palée
- Usinor Marduyck : translation ponts roulants : 47 kW
- NEYRPIC : Propulseur d'étraves : 132 kW
- St. GOBAIN INDUSTRIES (Division Verre Textile) : par DSU
- Chambéry : tiroirs de commande à 127 paliers pour 65 bobinoirs.

- COCKERILL à Chertal (Belgique) :
 - Equipement de direction de pont roulant 30 kW
 - (variation de vitesse de 0 à 30% de la vitesse nominale)

- CEA/EDF, Centrale de Phénix à Marcoule :
 - 6 Eq. pompes à sodium : 770 à 1220 kW
- CIMENTS FRANCAIS : Transporteur : 75 kW
- CELLULOSE DU PIN : Ventilateur de chaudière : 660 kW
- GDF : 3 pompes à méthane : 1330 kW
- HBL : 2 ventilateurs de chaudière : 1650 kW
- C.A.T. CARRIER : Compresseur frigorifique : 2600 kW
- INGERSOLL-RAND : 22 pompes : 1150 kW

- CENTRE D'ETUDES NUCLEAIRES de SACLAY : alimentation du Synchrotron Saturne : 24 MW
- AGUIEIRA (Portugal) : Centrale pompage : 3 moteurs synchrones de 100 MVA, 12 kv, Onduleur : 8,5 MW / 11,5 MVA
- CELLULOSE de STRASBOURG : 2 ventilateurs tirage de chaudière 1100 kW

- CELA Marcoule : prototype industriel
- CELLULOSE de STRASBOURG : 2 filtres de lavage
- LITWIN pour CDF chimie/copenor Dunkerque :
 - 2 granuleurs polyéthylène
 - 2 mélangeurs
- TREFILUNION : 1 machine à tréfiler
- EDF St Denis : 1 banc d'essais
- PAPETERIES DE CONDAT : vis de déstockage
- SOLVAY à Tavaux : pompe

Fréquence fixe

Fréquence variable

Conversion indirecte de Fréquence

Conversion directe de Fréquence

