

OFPPT

ROYAUME DU MAROC

مكتب التكوين المهني وإنعاش الشغل

Office de la Formation Professionnelle et de la Promotion du Travail

DIRECTION RECHERCHE ET INGENIERIE DE FORMATION

**RESUME THEORIQUE
&
GUIDE DE TRAVAUX PRATIQUES**

MODULE N°17 **INSTALLATION ET REPARATION D'UN
SYSTEME DE COMMANDE
ELECTRONIQUE DE
MOTEURS**

SECTEUR : GENIE ELECTRIQUE

SPECIALITE : MMOAMP

NIVEAU : T.S.

Document élaboré par :

Nom et prénom	EFP	DR
PANTAZICA LUCRETIA	CDC	

SOMMAIRE

	Page
Présentation du module	7
Première partie - Résumé de théorie	7
I. Systèmes de commande électronique des moteurs	8
I.1. Principe de base des variateurs de vitesse	10
I.2. Le redresseur	11
I.3. Le circuit intermédiaire	13
I.4. L'onduleur	15
I.5. Le circuit de commande	18
I.6. L'optimisation automatique de l'énergie	20
II. Commande de vitesse pour moteur à courant continu	21
II.1 Rappel sur les moteurs à CC	21
II.2 Convertisseurs utilisés	25
II.3 Principes des asservissements électroniques	29
II.5 Variateur de vitesse RECTIVAR 4	33
III. Commande de vitesse pour moteur à courant alternatif	41
III.1 Principe de fonctionnement des machines à courant alternatif	41
III.2 Variateurs pour les moteurs synchrones	42
A.1 Principe généraux de réglage	44
A.2 Machine synchrone alimenté par un commutateur de courant	44
A.3 Variateurs à onduleurs de tension fonctionnant en MLI	54
A.4 Variateurs à cycloconvertisseur	59
A.5 Conclusions	60
III.3 Variateurs pour les moteurs asynchrones	61
B.1 Rappel sur le moteur asynchrone triphasé	61
B.2 Machine asynchrone – onduleur MLI	63
Contrôle des tensions statoriques	
B.3 Machine asynchrone – onduleur MLI	67
Contrôle des courants statoriques	
B.4 Association machine asynchrone – commutateur de courant	70
III.4 Variateur de vitesse « ALTIVAR »	74
III.5 Application d'un variateur de fréquence variable	76
IV. Protection des variateurs de vitesse des moteurs électriques	78
V. Instruction de sécurité et d'emploi relatives aux variateurs de vitesses	80

VI. L'installation d'un système de commande électronique de moteurs	82
VI.1 Les plans et les devis	82
VI.2 Normes en vigueur	82
VI.3 Méthodes d'installation	85
VI.4 Mesures de sécurité lors de l'installation	85
VI.5 Installer les câbles et les canalisations	85
VII. Analyse de l'état réel d'un équipement	87
VIII. Réparation d'un équipement électronique	88
VIII.1 Règles de sécurités relatives à la réparation des systèmes industriels	88
VIII.2 Techniques de dépannage	89
VIII.3 Sélectionner les composants de remplacement	90
VIII.4 La procédure de remplacement des composants défectueux	90
VIII.5 L'importance de la qualité dans l'exécution des travaux	91
VIII.6 Consigner les interventions	91
IX. Ajuster et calibrer un système de commande électronique de moteurs	96
IX.1 Règles de sécurité	96
IX.2 Mesurages	96
IX.3 Procédure de calibrage	97
IX.4 Vérifier le fonctionnement des dispositifs de sécurité	97
IX.5 Vérifier le fonctionnement de l'équipement	98
Deuxième partie - Guide de travaux pratiques	100
TP.1	101
TP.2	109
TP.3	119
TP.4	126
TP.5	130
TP.6	136
	140
Troisième partie - Evaluation de fin de module	141
Bibliographie	143
Annexe 1 : Evaluation de fin de module – solutions	144

MODULE : 17

**INSTALLATION, REPARATION D'UN SYSTEME DE
COMMANDE ELECTRONIQUE DE MOTEURS**

Durée : 60 H

56 % : théorique

38 % : pratique

6 % : évaluation

OBJECTIF OPERATIONNEL

COMPORTEMENT ATTENDU

Pour démontrer sa compétence le stagiaire doit
*installer et réparer un système de commande électronique de
moteurs selon les conditions, les critères et les précisions qui
suivent.*

CONDITIONS D'EVALUATION

- A partir :
 - de directives ;
 - du schéma du système de commande électronique ;
 - d'une panne provoquée.
- A l'aide :
 - des manuels techniques ;
 - des outils et des instruments ;
 - d'un système de commande électronique de moteurs ;

CRITERES GENERAUX DE PERFORMANCE

- Respect des règles de santé et de sécurité au travail.
- Respect des normes en vigueur.
- Utilisation appropriée des outils et des instruments.
- Qualité des travaux.

OBJECTIF OPERATIONNEL

PRECISIONS SUR LE COMPORTEMENT ATTENDU

A. Reconnaître les modes de pilotages de la vitesse d'un moteur à cc.

B. Utiliser les schémas synoptiques

C. Etablir les conditions de fonctionnement

D. Reconnaître les modes de pilotages de la vitesse en fréquence et en tension d'un moteur à ca.

CRITERES PARTICULIERS DE PERFORMANCE

- Explication correcte de la variation de vitesse par la tension d'induit.
- Explication correcte de la variation de vitesse par le flux d'induction.
- Utilisation appropriée des variateurs à hacheurs.
- Utilisation appropriée du variateur de vitesse RECTIVAR.
- Identification juste d'un asservissement électronique.
- Identification juste d'une boucle de vitesse.
- Identification juste d'une boucle de courant.
- Explication adéquate du fonctionnement du schéma fonctionnel.
- Rendre opérationnel l'affichage.
- Introduction correcte des paramètres.
- Modification juste des paramètres.
- Rendre opérationnel la protection des variateurs de vitesse.
- Description juste des principes généraux de variation de la vitesse d'un moteur synchrone et d'un moteur asynchrone.
- Explication adéquate du principe de fonctionnement d'une machine synchrone alimenté par un commutateur de courant.
- Explication adéquate du principe de fonctionnement d'une machine synchrone alimenté par un onduleur de tension MLI.
- Application juste du contrôle des tensions statoriques pour un ensemble machine asynchrone – onduleur MLI.
- Application juste du contrôle des

	courants statoriques pour un ensemble machine asynchrone – onduleur MLI. - Description juste du principe de fonctionnement de l'ensemble machine asynchrone – commutateur de courants. - Rendre opérationnel le variateur de vitesse ALTIVAR
E. Installer un système de commande électronique de moteurs	- Identification exacte des symboles - Utilisation efficace ses informations pertinentes dans les manuels techniques. - Installation correcte d'un système de commande électronique de moteurs - Ajustage et calibrage correct d'un système de commande électronique de moteurs
F. Réaliser la maintenance.	- Réalisation correcte d'un raccordement. - Analyse juste de l'état réel d'un équipement de commande électronique de moteurs. - Choix adéquat des opérations de maintenance de l'installation. - Application correcte des toutes les précautions de sécurité selon normes internationales. - Utilisation correcte des informations pertinentes sur la maintenance.
G. Vérifier le fonctionnement d'un système de commande électronique de moteurs.	- Identification juste des étapes de vérification. - Mesures correctes des paramètres spécifiques des variateurs. - Interprétation juste des valeurs de différents paramètres du variateur.
H. Poser le diagnostic et réparer les pannes	- Rendre utile tous les informations pertinentes sur les possibles pannes qui peuvent intervenir dans les manuels techniques. - Choix adéquat des étapes des vérifications. - Identification précise des étapes de montage et démontage de l'installation.

I. Ranger et nettoyer.

J. Consigner les interventions

- Choix adéquate des composants du remplacement.
- Rangement approprié et propreté des lieux.
- Pertinence des informations présentées.

Présentation du module

L'objectif de ce module est de faire acquérir les connaissances liées aux types de commande électronique de moteurs, au diagnostic de fonctionnement ainsi qu'au remplacement de composants défectueux. Il vise donc à rendre les stagiaires aptes à installer et à réparer les systèmes de commande électronique de moteurs.

Le résumé de théorie contient, dans les premiers chapitres (I à III), la présentation des variateurs de vitesse pour les moteurs à courant continu et moteurs à courant alternatif les plus utilisés, accompagnée des schémas pratiques et de l'analyse de fonctionnement. Les quatre chapitres suivants présentent la protection des variateurs, les instructions de sécurité et d'emploi des commandes électroniques de moteurs, l'installation d'un système de commande de moteurs et l'analyse de l'état réel d'un équipement de commande électronique. Les chapitres VIII et IX ont comme sujet « Réparation d'un équipement électronique » et « Ajuster et calibrer un système de commande électronique de moteurs ».

La deuxième partie, « Guide de travaux pratiques », présente les travaux pratiques qui visent les redresseurs avec des diodes ou des thyristors, les onduleurs et les gradateurs et comme équipements industriels les variateurs de vitesse ALTIVAR 16 et RECTIVAR 4.

La troisième partie offre un exemple pour « Evaluation de fin de module » épreuves théorique et pratique et les solutions afférents.

Module 17

INSTALLATION ET REPARATION D'UN SYSTEME DE COMMANDE ELECTRONIQUE DE MOTEURS

RESUME THEORIQUE

Chapitre I

SYSTÈMES DE COMMANDE ÉLECTRONIQUES DE
MOTEURS

I.1 Commande électronique de vitesse des moteurs électriques

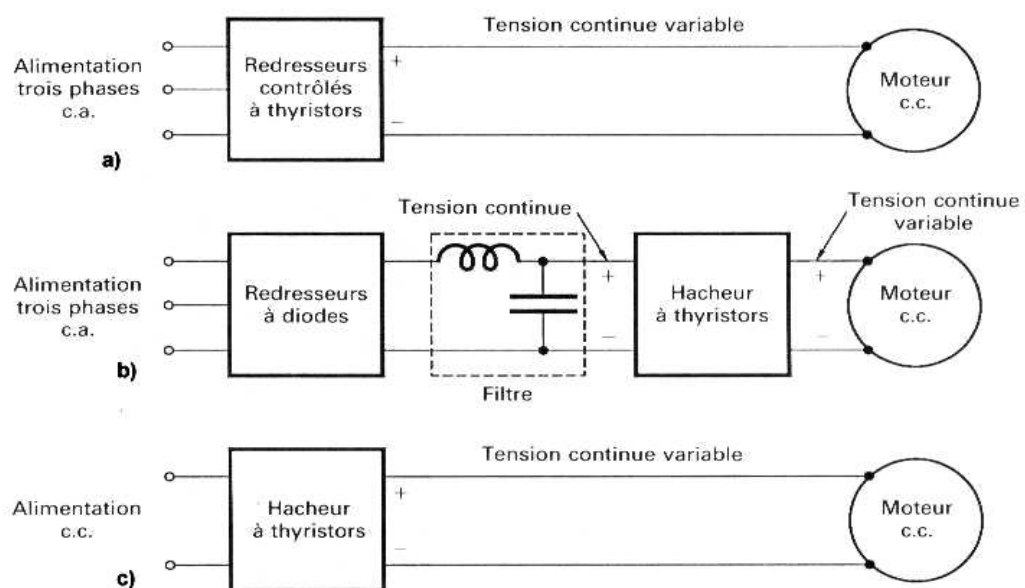
La commande de vitesse des moteurs électrique constitue l'application la plus importante de l'électronique de puissance. Les installations industrielles automatisées utilisent de plus en plus des variateurs électronique de vitesse à thyristors soit pour obtenir **la vitesse d'entraînement optimale** de machine pour chaque étape d'un procédé industriel, soit pour **asservir la vitesse** d'un ou plusieurs moteurs entraînant des équipements électromécaniques. Dans le cas des entraînements contrôlés à vitesse variable, on utilise principalement les moteurs à courant continu (série et à excitation séparée) et les moteurs à courants alternatifs (synchrone et asynchrone).

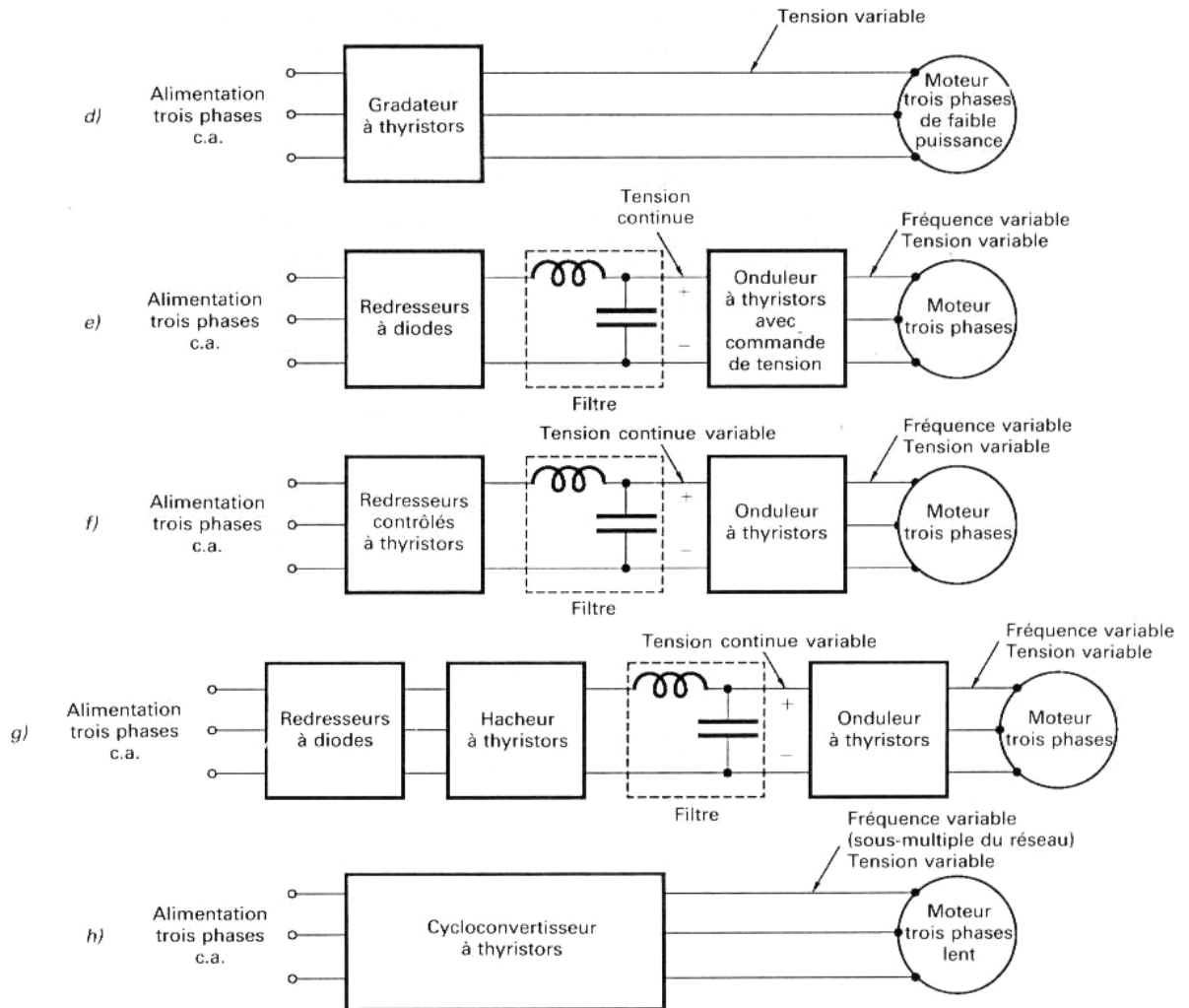
Les moteurs à courant continu sont alimentés :

- à partir d'un réseau alternatif (monophasé ou triphasé) par l'intermédiaire de redresseurs contrôlés à thyristors ou des redresseurs à diodes suivis des hacheurs à thyristors.
- à partir d'un réseau continu ou d'une batterie d'accumulateurs par l'intermédiaire de hacheurs à thyristors.

Depuis les années 70, on emploie de plus en plus des moteurs à courant alternatif (synchrone et asynchrone) associés à des variateurs de vitesse. Ces moteurs sont plus robuste que les moteurs à courant continu ayant des performances similaires et leur coût est aussi moins élevé.

Les moteurs à courant alternatif sont alimentés par des tensions et des fréquences réglables à l'aide des gradateurs à thyristors, d'onduleurs autonomes, des dispositifs comprenant un redresseur et un hacheur suivi d'un onduleur.





Commande électronique de vitesse des moteurs électrique par :
a) redresseurs contrôlés; b) hacheur; c) hacheur; d) gradateur; e) onduleur avec commande de tension; f) onduleur; g) hacheur et onduleur; h) cycloconvertisseur

I.2 Variateurs de vitesse – considérations générales

Un **variateur de vitesse** est un équipement électrotechnique alimentant un moteur électrique de façon à pouvoir faire varier sa vitesse de manière continue de l'arrêt jusqu'à sa vitesse nominale. La vitesse peut être proportionnelle à une valeur analogique fournie par un potentiomètre, ou par une commande externe : un signal de commande analogique ou numérique, issu d'une unité de contrôle.

Différents couples résistants

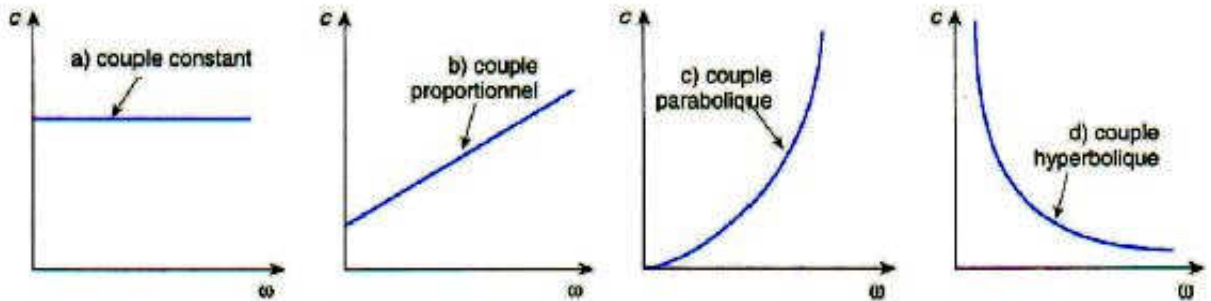
Le couple résistant d'une machine entraînée par un moteur électrique peut s'apparenter à l'un des cas suivants :

a) Couple constant - La puissance demandée est directement proportionnelle à la vitesse. C'est le cas des machines-outils.

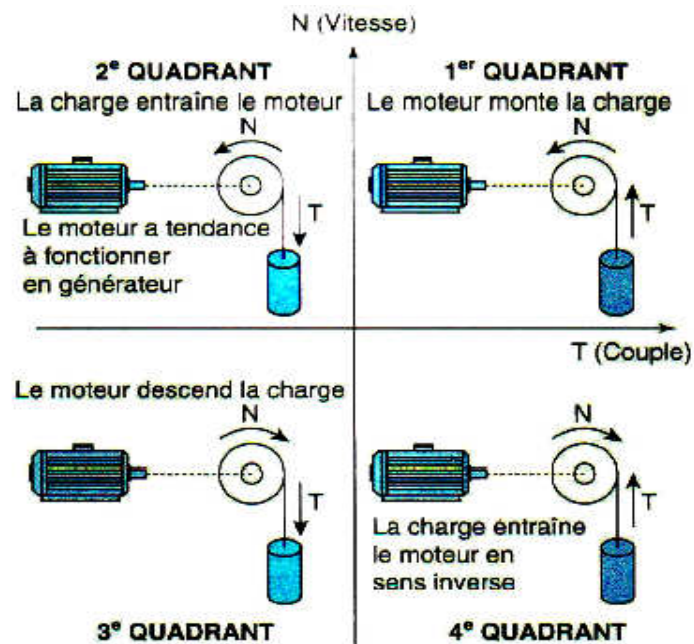
b) Couple proportionnel à la vitesse - La puissance demandée est proportionnelle au carré de la vitesse. C'est le cas des machines à grande vitesse de fonctionnement.

c) Couple parabolique - La puissance est proportionnelle au cube de la vitesse. C'est le cas des ventilateurs et des pompes centrifuges.

d) Couple hyperbolique - La puissance demandée par le récepteur est constante. C'est le cas des machines à enrouler, ou à dérouler, et des machines de bobinages.



Marche en quatre quadrants - Selon que le moteur doit fonctionner dans les deux sens de marche, avec une charge entraînante (couple moteur et couple résistant dans le même sens), ou avec une charge résistante, on définit quatre quadrants de fonctionnement.

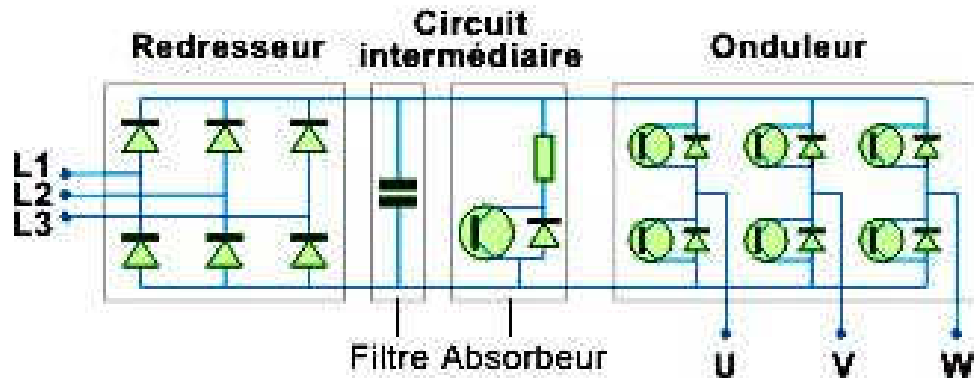


Principe de base des variateurs de vitesse

Depuis la venue de la technologie des semi-conducteurs, la variation de vitesse électronique des moteurs électriques a pris le dessus sur les anciens systèmes.

Cette technologie, devenue fiable, part toujours du même principe : à partir d'une source, le variateur de vitesse va recréer en sortie :

- Une tension triphasée variable en fréquence et en amplitude pour les moteurs à courant alternatif.
- Une tension continue variable en amplitude pour les moteurs à courant continu.



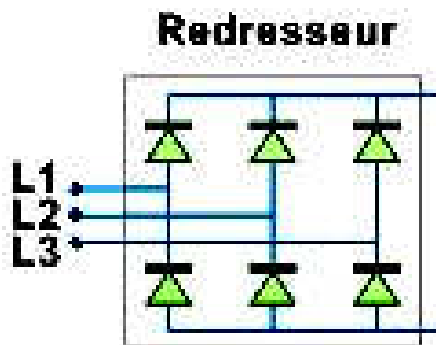
Le variateur de vitesse est composé essentiellement :

- d'un redresseur qui, connecté à une alimentation triphasée (le réseau), génère une tension continue à ondulation résiduelle (le signal n'est pas parfaitement continu). Le redresseur peut être de type commandé ou pas,
- d'un circuit intermédiaire agissant principalement sur le "lissage" de la tension de sortie du redresseur (améliore la composante continue). Le circuit intermédiaire peut aussi servir de dissipateur d'énergie lorsque le moteur devient générateur,
- d'un onduleur qui engendre le signal de puissance à tension et/ou fréquence variables,
- d'une électronique de commande pilotant (transmission et réception des signaux) le redresseur, le circuit intermédiaire et l'onduleur.

Le variateur de vitesse est principalement caractérisé selon la séquence de commutation qui commande la tension d'alimentation du moteur. On a :

- les variateurs à source de courant (CSI),
- les variateurs à modulation d'impulsions en amplitude (PAM),
- les variateurs à modulation de largeur d'impulsion (PWM/VVC).

a) Le redresseur

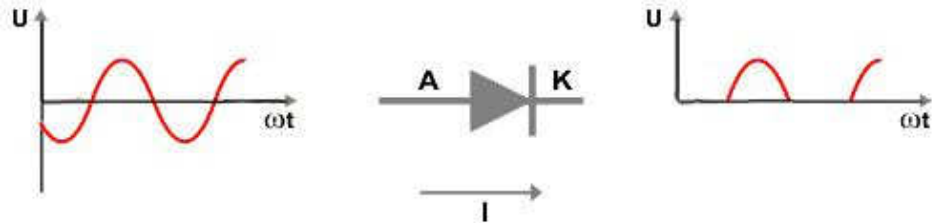


La fonction du redresseur au sein du variateur de vitesse est de transformer la tension triphasée alternative en tension continue monophasée. Cette opération se réalise par l'utilisation :

- soit d'un pont de diodes, le redresseur est "non-commandé",
- soit d'un pont de thyristors, alors le redresseur est commandé.

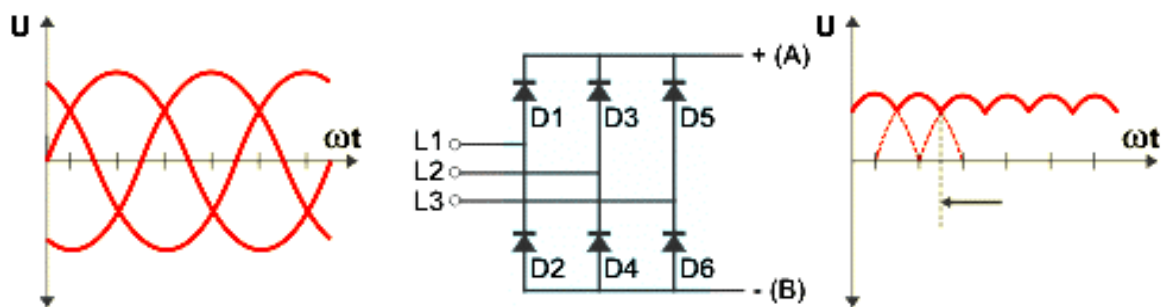
Le redresseur non commandé

Comme le montre la figure ci-dessous, des deux alternances d'une tension monophasée alternative (positive et négative), seule l'alternance positive passe à travers la diode entre les électrodes couramment appelées "anode" et "cathode"; on dit que la diode est "passante".



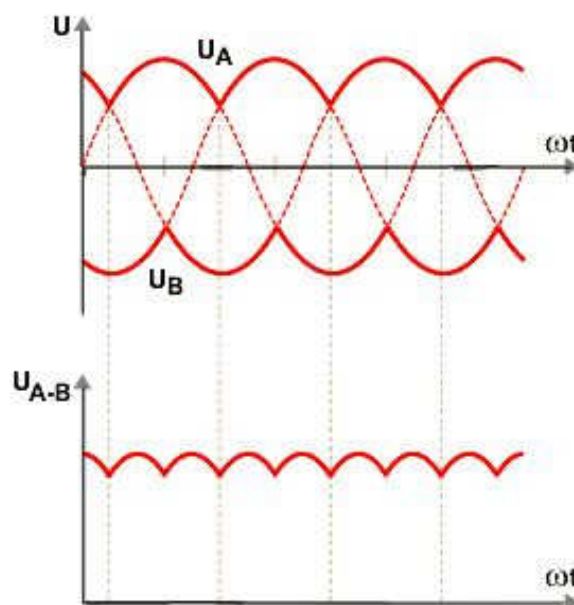
Fonctionnement de la diode.

Pour obtenir une tension continue à la sortie du redresseur, il est nécessaire de trouver un système qui permette d'exploiter les deux alternances; c'est le pont de diodes. Dans un redresseur triphasé non-commandé, le pont de diodes permet, comme le montre la figure ci-dessus, de générer une tension continue en redressant l'alternance négative de chaque une des trois tensions composées. On voit que la tension de sortie n'est pas tout à fait continue et comporte une ondulation résiduelle.



Redresseurs non-commandés.

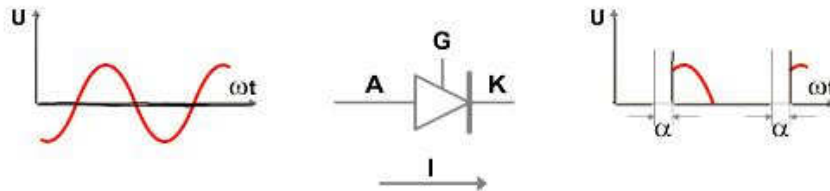
La tension à ondulation résiduelle sortant du redresseur a une valeur moyenne de l'ordre de 1,35 fois la tension du réseau.



Tension à ondulation résiduelle.

Le redresseur commandé

Dans le redressement commandé d'une tension alternative, la diode est remplacée par le thyristor qui possède la particularité de pouvoir contrôler le moment où il deviendra "passant" dans l'alternance positive. C'est la troisième électrode, appelée "gâchette", qui, lorsqu'elle est alimentée sur commande par la régulation du redresseur, devient conductrice. Tout comme la diode, le thyristor est "bloquant" durant l'alternance "négative".

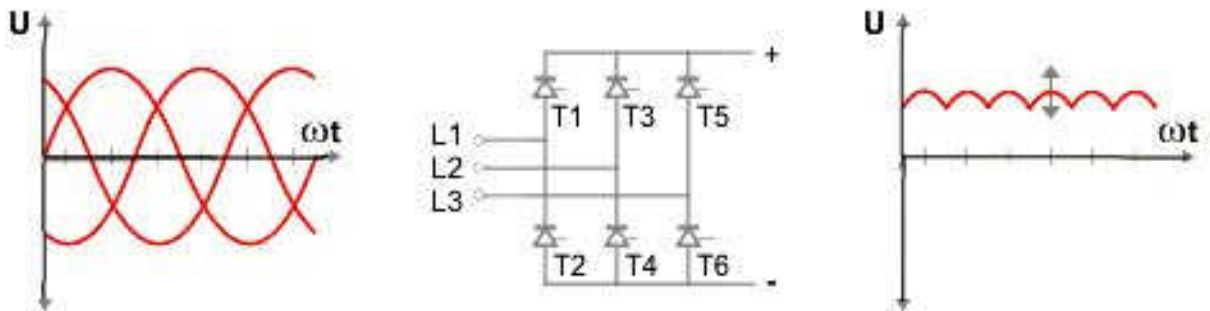


Fonctionnement du thyristor.

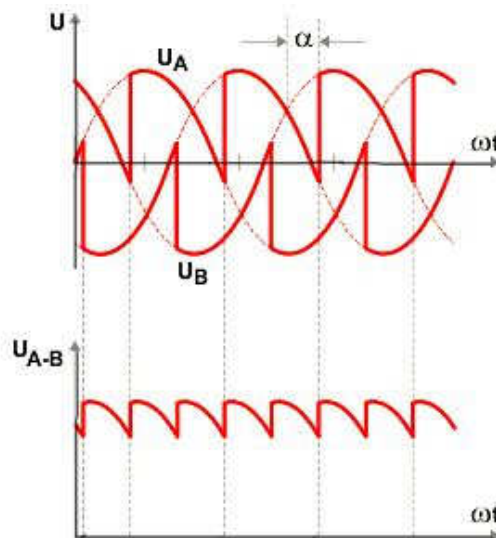
On voit tout de suite l'intérêt du thyristor par rapport à la diode : on peut faire varier la valeur de la tension moyenne de sortie en contrôlant le moment où l'impulsion sera donnée sur la gâchette pour rendre le thyristor "passant".

Dans un redresseur triphasé commandé, le pont de thyristors permet, comme le montre la figure ci-dessus :

- De générer une tension continue en redressant l'alternance négative de chaque une des trois tensions composées. On voit que la tension de sortie n'est pas tout à fait continue et comporte une ondulation résiduelle.
- De faire varier le niveau de tension moyenne à la sortie du redresseur.

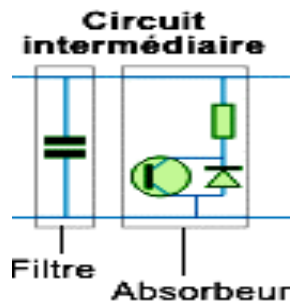


Redresseurs commandés.



Tension de sortie du redresseur.

1.3 Le circuit intermédiaire



Ce circuit joue plusieurs rôles suivant les options prises sur le type de variateur dont principalement le lissage en courant ou en tension du signal de sortie du redresseur et le contrôle du niveau de tension ou de courant d'attaque de l'onduleur. Il peut aussi servir à :

- découpler le redresseur de l'onduleur,
- réduire les harmoniques,
- stocker l'énergie due aux pointes intermittentes de charge.

On différencie le circuit intermédiaire à :

- À courant continu variable lorsque le redresseur est commandé (variation de la tension de sortie du redresseur).
- À tension continue variable ou constante lorsque le redresseur est respectivement commandé ou pas.
- À tension variable lorsque le redresseur est non-commandé.

Le circuit intermédiaire à courant continu variable

Ce type de circuit intermédiaire caractérise les variateurs à source de courant. Il est composé d'une bobine (ou self) de lissage "passe bas" (filtration des basses fréquences) permettant de réduire l'ondulation résiduelle. En d'autres termes la bobine transforme la tension de sortie du redresseur à ondulation résiduelle en un courant continu.

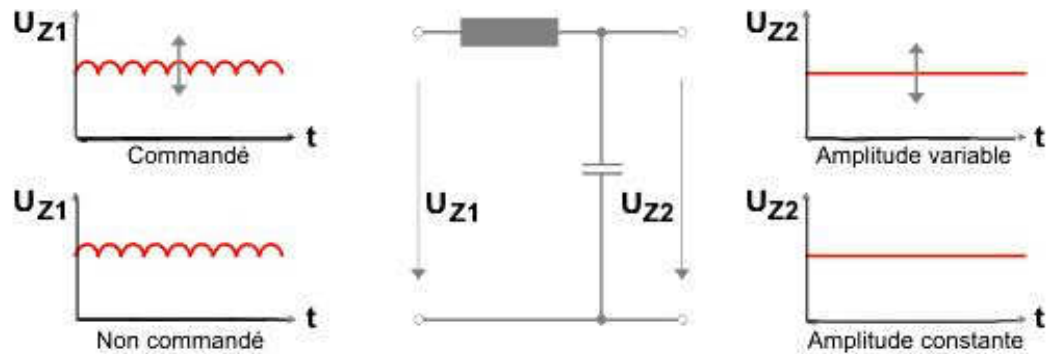


Circuit intermédiaire à courant continu variable.

Le circuit intermédiaire à tension continue constante ou variable

Ce type de circuit intermédiaire caractérise les variateurs à source de tension. Il est composé d'une bobine (ou self) de lissage "passe bas" (filtration des basses fréquences) et d'un condensateur "passe haut" (filtration des hautes fréquences) permettant de réduire l'ondulation résiduelle. Pour un redresseur commandé, le circuit intermédiaire transforme la tension de sortie à ondulation résiduelle du redresseur en tension continue d'amplitude variable.

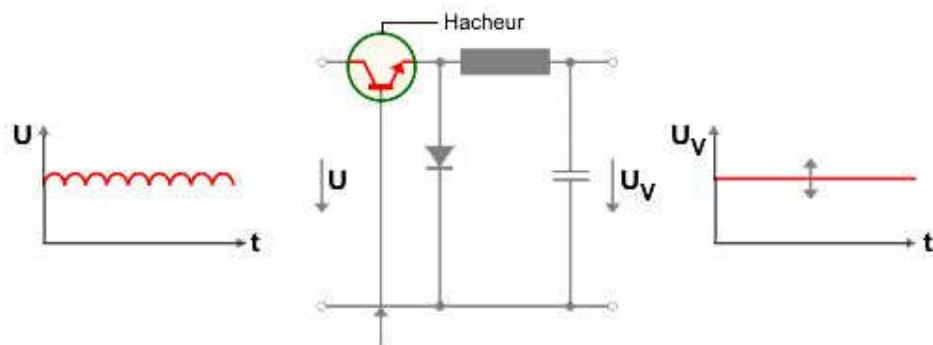
Pour un redresseur non-commandé, la tension à l'entrée de l'onduleur est une tension continue dont l'amplitude est constante.



Circuit intermédiaire à tension continue constante ou variable.

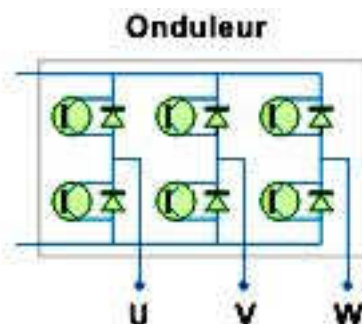
Le circuit intermédiaire à tension variable

A l'entrée du filtre est ajouté un hacheur composé d'un transistor et d'une diode "roue libre". Dans ce cas, le circuit intermédiaire transforme la tension continue de sortie du redresseur à ondulation résiduelle en une tension carrée lissée par le filtre. Il en résulte la création d'une tension variable suivant que le pilote du hacheur rende le transistor "passant" ou pas.



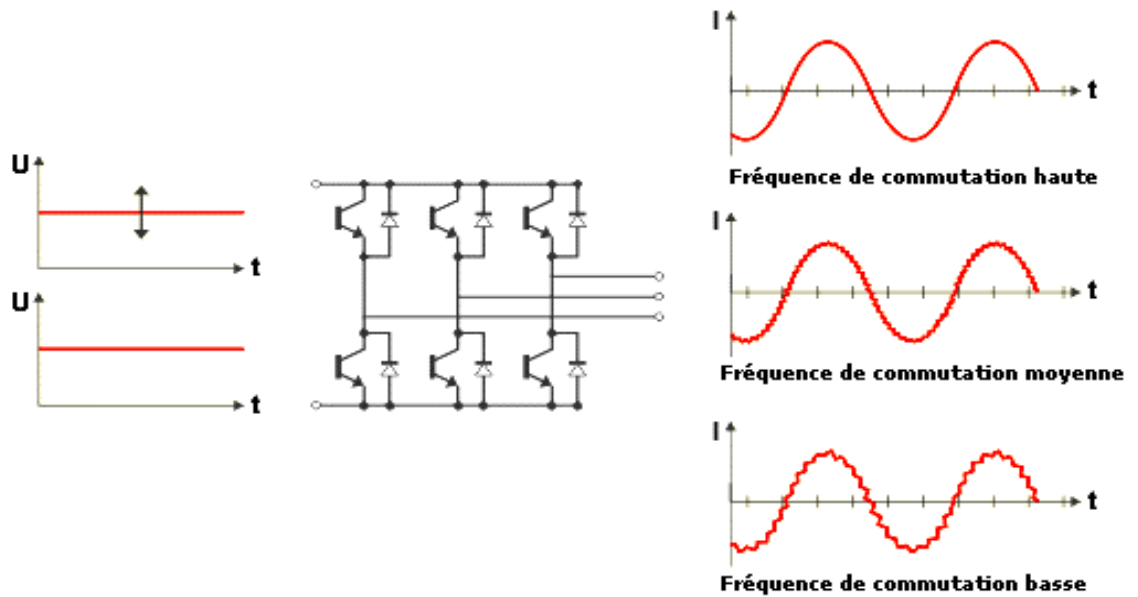
Circuit intermédiaire à tension variable.

I.4 L'onduleur



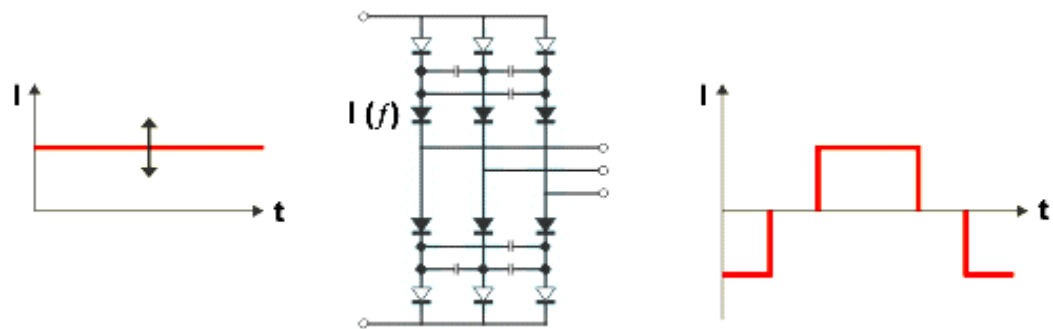
L'onduleur constitue la dernière partie du variateur de vitesse dans le circuit puissance. Alimenté à partir du circuit intermédiaire par :

- une tension continue variable ou constante,



Onduleur pour tension intermédiaire variable ou continue.

- un courant continu variable,



Onduleur pour courant intermédiaire continu variable.

L'onduleur fournit au moteur une grandeur variable en tension ou en fréquence ou les deux en même temps suivant le cas. En effet, une alimentation de l'onduleur :

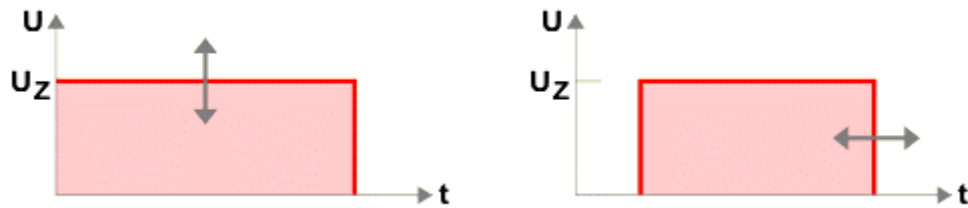
- En tension ou en courant continu variable, lui permet de réguler la vitesse du moteur en fréquence.
- En tension continue constante, lui impose de réguler la vitesse du moteur en tension et en fréquence.

Bien que les fonctionnements des onduleurs soient différents, la technologie reste plus ou moins identique. Pour une raison de souplesse de commande en fréquence, les onduleurs sont maintenant équipés de transistors haute fréquence plutôt que de thyristors. Ce type de transistor de puissance peut être allumé et éteint très rapidement et, par conséquent, couvrir une large plage de fréquence (entre 300 Hz et 20 kHz).

Modes de fonctionnement de l'onduleur

On distingue plusieurs modes de fonctionnement des onduleurs en fonction principalement du signal de sortie du circuit intermédiaire :

- le fonctionnement en modulation d'impulsion en amplitude (*PAM : Pulse Amplitude Modulation*),
- le fonctionnement en modulation de largeur d'impulsion (*PWM : Pulse Width Modulation*).



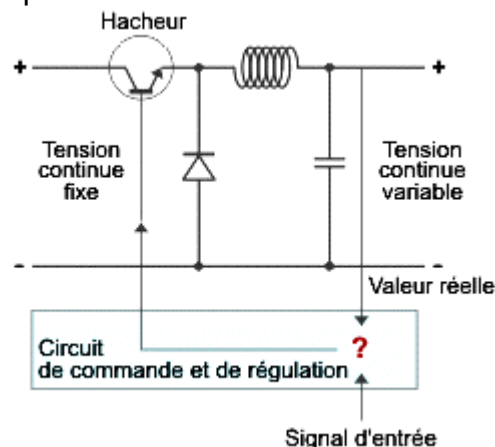
Mode de modulation en amplitude ou en largeur d'impulsion.

Modulation d'impulsion en amplitude

Ce type de modulation est utilisé lorsque le variateur de vitesse est à tension intermédiaire variable.

Comme on l'a vu dans le circuit intermédiaire :

- Pour les variateurs avec redresseurs non-commandés, un hacheur est nécessaire pour générer une tension variable au niveau de l'onduleur.
- Pour les variateurs avec redresseurs commandés, la variation de l'amplitude de la tension est générée par le redresseur lui-même.



Circuit intermédiaire à tension variable par le hacheur.

Quel que soit le système, l'onduleur reçoit à son entrée une tension continue variable en amplitude. Dans ce cas, l'onduleur, lui, ne fait varier que la fréquence d'allumage et d'extinction des thyristor ou des transistors en fonction du niveau de la tension d'entrée pour recréer une tension sinusoïdale (dans le cas d'un moteur à courant alternatif).

Modulation de largeur d'impulsion (PWM)

Ce type de modulation est souvent utilisé pour générer une tension triphasée à fréquence et tension variables.

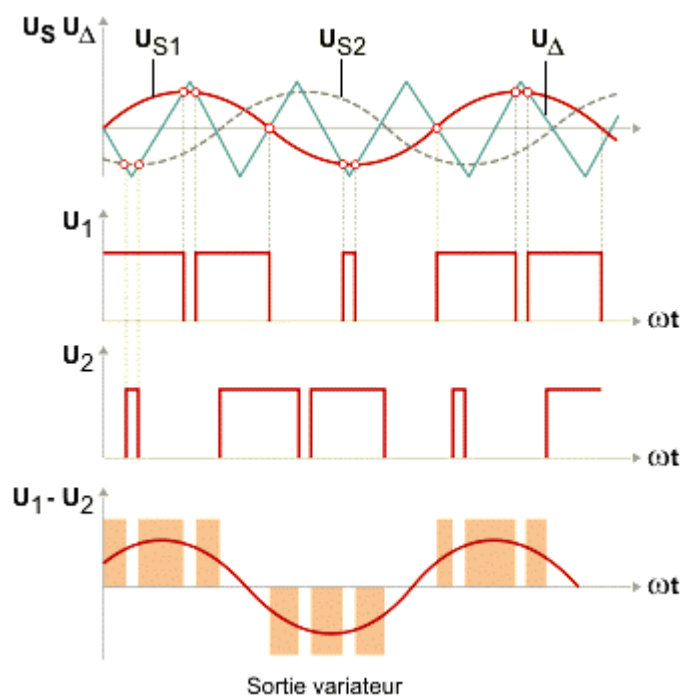
Il existe 3 manières de gérer la commutation des thyristors ou des transistors de puissance :

- PWM à commande par sinusoïde,
- PWM synchrone pour limiter les harmoniques,

- PWM asynchrone pour améliorer la réaction du moteur à toute modification rapide de la commande du variateur de fréquence.

Dans un souci de clarté, seule la PWM à *commande par sinusoïde* est expliquée ci-dessous :

Le principe de commande de l'onduleur réside dans l'utilisation d'un comparateur de tensions. Ce comparateur superpose à trois tensions sinusoïdales de référence une tension de forme triangulaire. La fréquence des trois sinusoïdes de référence correspondent à celle des tensions souhaitées à la sortie de l'onduleur. Les intersections entre les sinusoïdes et l'onde triangulaire détermine l'allumage ou l'extinction des thyristors (ou des transistors de puissance) selon le cas. Il en résulte un temps d'impulsion "passante" ou "non-passante" variable reconstituant un courant sinusoïdal en sortie du variateur de vitesse.



Principe PWM à commande par sinusoïde.

Attention, dans ce type de commande, il faudra être attentif à la génération d'harmoniques responsables de perturbation du réseau amont. Dans ce cas, une commande PWM synchrone limite la création d'harmoniques.

I.5 Le circuit de commande

Le circuit de commande ne fait pas partie du circuit puissance du variateur de vitesse. Ce circuit doit garantir quatre fonctions essentielles :

- 1) La commande des semi-conducteurs du variateur de vitesse.
- 2) L'échange d'informations de commande, de régulation et d'analyse avec les périphériques.
- 3) Le contrôle des défauts (interprétation et affichage).
- 4) La protection du variateur de vitesse et du moteur.

La venue des microprocesseurs et microcontrôleurs a permis d'accroître la vitesse d'exécution des informations de commande et de régulation du circuit de commande vis à vis des autres circuits (circuit intermédiaire, onduleur, ...).

Le circuit de commande est donc en mesure de déterminer le schéma optimum d'impulsions des semi-conducteurs pour chaque état de fonctionnement du moteur par rapport à la charge, au réseau, aux consignes de commande, ...

La régulation de vitesse de moteurs triphasés à courant alternatif évolue selon deux principes de commandes différents :

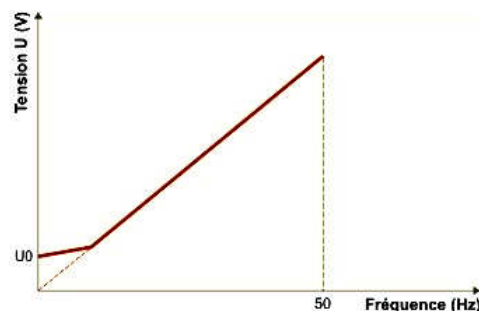
- la commande U/f (Scalaire),
- la commande vectorielle de flux (*VVC : Voltage Vector Control*).

Ces principes déterminent la manière de programmation des algorithmes de commande et de régulation des variateurs de vitesses. Les deux méthodes présentent des avantages en fonction des exigences spécifiques des performances (couple, vitesse, ...) et de la précision de l'entraînement.

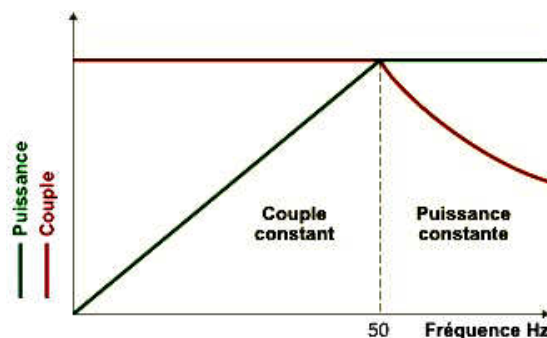
La commande U/f (scalaire)

La commande U/f se base sur la mesure de grandeurs scalaires (valeurs d'amplitude en tension et en fréquence). C'est le système de commande de base des variateurs de fréquence standard.

Afin de garder un flux constant dans le moteur et donc aussi une variation de vitesse à couple constant la tension et la fréquence varient proportionnellement jusqu'à la fréquence nominale du moteur (50 Hz). Lorsque la tension nominale est atteinte, la tension ne sachant plus augmenter, il est toujours possible d'augmenter la fréquence; dans ce cas la variation se fait à puissance constante, le couple diminue avec la vitesse. Ce mode de fonctionnement est intéressant pour des charges à couple constant tels que les ascenseurs. En effet, le couple moteur "colle" mieux au profil du couple résistant; ce qui signifie que les consommations qui en découlent sont moindres.

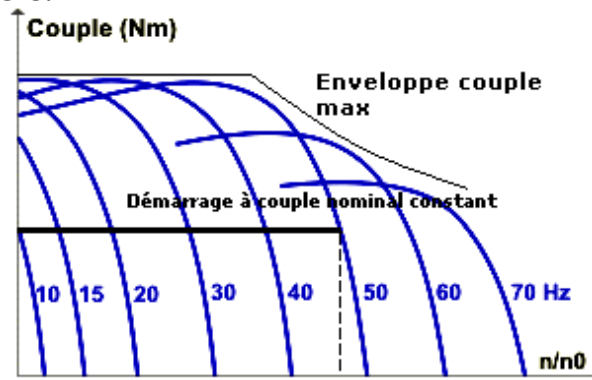


Fonctionnement U/f constant.



Fonctionnement à couple constant sous une fréquence de 50 Hz.

La figure ci-dessous montre les profils des courbes du couple en fonction de la vitesse pour différents rapports U/f :



Fonctionnement à couple constant.

La commande U/f a les avantages :

- facilité d'adaptation du variateur de vitesse au moteur.
- supporte aisément les variations de charge dans toute la plage de vitesses.
- le couple moteur reste plus ou moins constant en fonction de la vitesse.

et les inconvénients :

- plage de régulation de la vitesse limitée à 1/20.
- à faible vitesse, pas de compensation par rapport au glissement et à la gestion de la charge.

La commande vectorielle de tension (ou de flux)

Pour ce type de commande, il est nécessaire de fournir des indications précises sur les paramètres du moteur (encodage de la plaque signalétique).

La **commande vectorielle en tension** (VVC : *Voltage Vector Control*) agit selon le principe de calcul de la magnétisation optimale du moteur à différentes charges à l'aide de paramètres de compensation permettant de contrôler le glissement et la charge du moteur.

Comme son nom l'indique, la commande vectorielle en tension travaille avec les vecteurs de tension à vide et de compensation par rapport à la variation de la charge. La *commande vectorielle à champ orienté* travaille avec les valeurs des courants actifs, de magnétisation (flux) et du couple. Par un modèle mathématique approprié, il est possible de déterminer le couple nécessaire au moteur en fonction des vecteurs du flux statorique et du courant rotorique et ce afin d'optimiser et réguler le champ magnétique et la vitesse du moteur en fonction de la charge.

La commande vectorielle de flux a les avantages :

- bonne réaction aux variations de charge.
- régulation précise de la vitesse.
- couple intégral à vitesse nulle.
- performance semblable aux entraînements à courant continu.
- réaction rapide aux variations de vitesse et large plage de vitesses (1/100).
- meilleure réaction dynamique aux variations de sens de rotation.
- une seule stratégie de commande pour toute la plage de vitesse est nécessaire.

et inconvénients :

- nécessite de connaître les caractéristiques précises du moteur.

I.6 L'optimisation automatique de l'énergie

Dans des applications des économies d'énergie peuvent être réalisées en réduisant la force du champ magnétique et par conséquent les pertes dans le moteur. En effet, en général, pour des installations classiques, les moteurs sont surmagnétisés par rapport au couple à fournir.

Dans beaucoup d'applications, on pourra fixer le rapport U/f afin d'optimiser les consommations énergétiques. Un compromis sera trouvé entre l'économie d'énergie et les besoins réels du moteur en couple minimal pour un rotor bloqué (ou couple de décrochage).

Chapitre II

Commande de vitesse pour moteur à courant continu

On dit que le moteur industriel par excellence est le moteur asynchrone car, pour une puissance donnée, il est toujours le moins cher, est généralement d'une mise en œuvre simple, à partir du réseau triphasé.

Pourtant, pour l'industriel, le moteur à courant continu reste intéressant dès que la source d'énergie prévue est une batterie d'accumulateurs ou, bien entendu, un réseau continu. En effet, avec ce moteur, le réglage de la vitesse est facile.

On rencontre la machine à courant continu dans les chariots automatiques de transport et dans la plus part des véhicules de traction. Ils agissent alors de contrôler un mouvement, alors que le support du moteur est lui-même en mouvement. **S'il y a asservissement du moteur du chariot, il est généralement en vitesse.**

Un autre cas est le robot. Le support est fixe, mais les moteurs sont placés à chaque articulation, pour contrôler les mouvements des bras manipulateurs. **S'il y a asservissement du moteur du robot, il est généralement en position.**

Les choix du moteur, du convertisseur de puissance qui sert à sa commande, et de l'alimentation continue sont en définitive imposés par le type de charge mécanique prévue, compte tenu du réducteur de vitesse.

Dans ce chapitre on présente une démarche et de détermination d'une installation la plus générale possible utilisant un moteur à courant continu. Par la suite on se limite à l'étude pratique du variateur RECTIVAR.

En définitive, une fois la question posée de la charge mécanique et la nature de la tension d'alimentation étant fixée, il s'agit de choisir :

- le type du moteur utilisé : à flux constant (aimant permanent ou inducteur), à excitation série,....
- le convertisseur de puissance : hacheur ou redresseur à thyristors ;
- la commande : analogique ou numérique (microcontrôleur) ;
- la boucle de commande : en boucle ouverte ou fermée ;
- la nature de la protection du moteur : sans capteur (seulement par fusible et/ou disjoncteur) ou avec capteur(s).

II.1 Rappel sur le moteur à courant continu

Dans un moteur à courant continu :

- le stator porte un système d'excitation, enroulement inducteur ou aimants permanents, qui crée le flux Φ .
- le rotor porte un enroulement, l'induit, qui est alimenté par un système collecteur-balais. L'induit auquel on applique la tension U_d absorbe un courant I_d . Il transforme, aux pertes près, la puissance $U_d I_d$ ainsi reçue en puissance mécanique développant un couple électromagnétique C sous une vitesse angulaire Ω .

a) Expression de la vitesse et du couple

- La rotation de l'induit dans le flux inducteur y génère une f.e.m. E

$$E = k\Phi\Omega$$

k étant un coefficient qui dépend des caractéristiques de construction de la machine. La tension f.e.m. est liée à la tension U_d et au courant I_d par :

$$U_d = R \cdot I_d + e_B + L \frac{dI_d}{dt} + E = R \cdot I_d + e_B + L \frac{dI_d}{dt} + k\Phi\Omega$$

en désignant par R et L la résistance et l'inductance propre de l'induit, par e_B la chute de tension aux contacts balais-collecteur.

En régime permanent, I_d est constant, d'où l'expression de la vitesse N en tours par seconde :

$$N = \frac{\Omega}{2\pi} = \frac{U_d - (R \cdot I_d + e_B)}{2\pi k\Phi}$$

On voit que, sauf aux très basses vitesses, la chute de tension $R I_d + e_B$ ne peut être négligée devant U_d , la vitesse est sensiblement proportionnelle à la tension d'alimentation et inversement proportionnelle au flux.

Pour inverser le sens de rotation, il faut inverser soit U_d , soit Φ .

➤ Le couple électromagnétique C est le quotient de la puissance transformée $E \cdot I_d$ par la vitesse angulaire de rotation : $C = E \cdot I_d / \Omega$
Le couple, donné par $C = k \cdot \Phi \cdot I_d$ est donc proportionnel au flux inducteur Φ et au courant I_d absorbé par l'induit.

Pour inverser le couple, il faut inverser le flux Φ ou la courant I_d .

➤ Si la machine au lieu de fournir de la puissance mécanique en reçoit, elle peut fonctionner en génératrice transformant la puissance reçue en puissance «électrique envoyée à la source de tension U_d . Cela suppose que cette source soit elle aussi réversible.

Ce fonctionnement permet le freinage électrique de la machine par récupération ; le couple électromagnétique est alors un couple de freinage ; dans l'expression de la vitesse, la chute ohmique $R \cdot I_d + e_B$ ajoute à U_d pour donner la f.e.m. E .

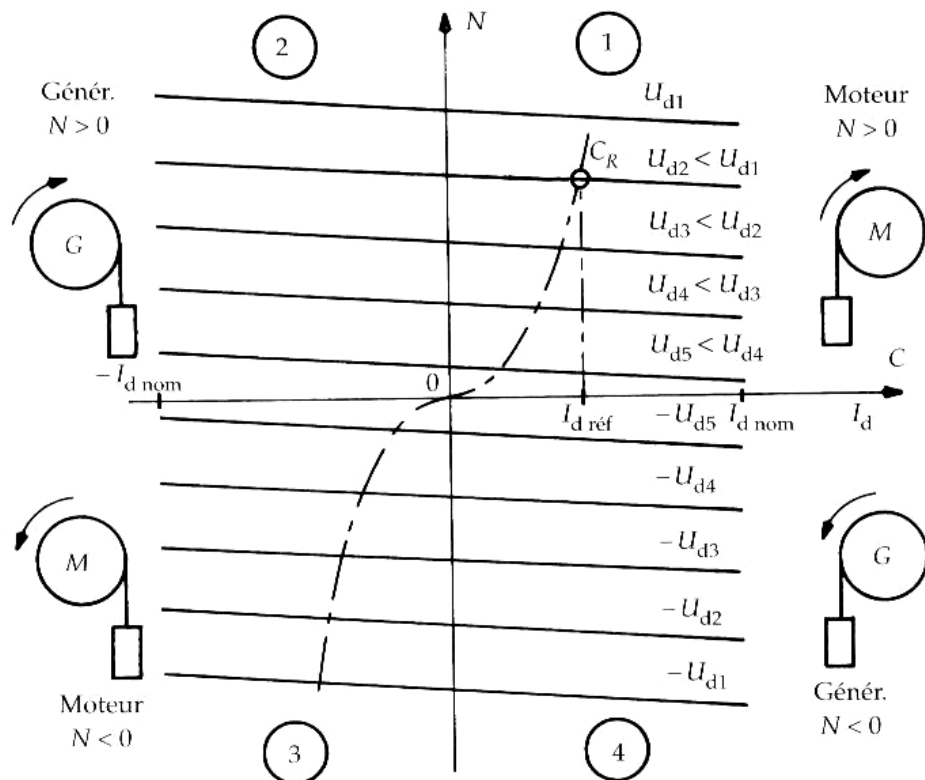
b) Modes de fonctionnement

➤ Les relations $C = k \cdot \Phi \cdot I_d$ et $N \approx U_d / 2\pi k\Phi$ montrent que pour faire varier la vitesse on a intérêt à agir sur la tension U_d en maintenant le flux Φ constant, de manière à obtenir une relation linéaire entre le courant d'induit I_d et le couple électromagnétique C . Ce fonctionnement à Φ constant est dit « à couple constant » car, quelle que soit la vitesse, le moteur peut développer son couple nominal C_{nom} sans dépasser la valeur nominale du courant d'induit $I_{d\,nom}$.

Une fois atteinte la valeur maximale de la tension U_d que peut donner la source alimentant l'induit, on peut, de moins, avec les machines excitées par un enroulement inducteur, augmenter la vitesse en diminuant le flux. On travaille alors dans la zone dite « à puissance constante », car la puissance que le moteur peut développer à courant I_d donné est, aux pertes près, égale à $U_{d\,max} \cdot I_d$ donc constante. Ce fonctionnement, ou le couple, que le moteur peut développer à I_d donné décroît avec la vitesse, ne se rencontre en pratique que de manière exceptionnelle, sauf en traction électrique.

➤ Sur la figure suivante on a tracé en traits pleins les courbes donnant la vitesse N en fonction du courant I_d (ou de couple C) pour diverses valeurs de U_d lors du fonctionnement à flux constant.

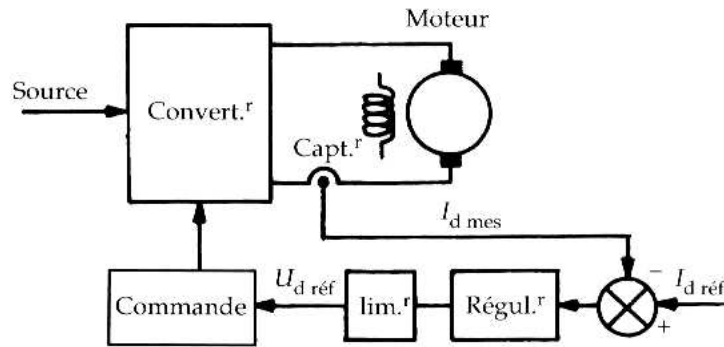
- Si le convertisseur qui fournit la tension U_d à l'induit n'est réversible ni en tension, ni en courant, seul le premier quadrant du plan C - N est accessible : la machine ne peut marcher qu'en moteur et dans un seul sens de rotation.
- Si le convertisseur est non-réversible en tension mais réversible en courant, la machine peut fonctionner en moteur ou en génératrice et donc assurer le freinage par récupération, dans un sens de rotation (quadrants 1 et 2).
- Si le convertisseur est réversible en tension mais pas en courant, la machine peut fonctionner en moteur dans un sens de rotation, en génératrice en sens inverse (quadrants 1 et 4).
- Si le convertisseur est réversible en tension et en courant, la machine peut fonctionner en moteur et en génératrice dans les deux sens de rotation.



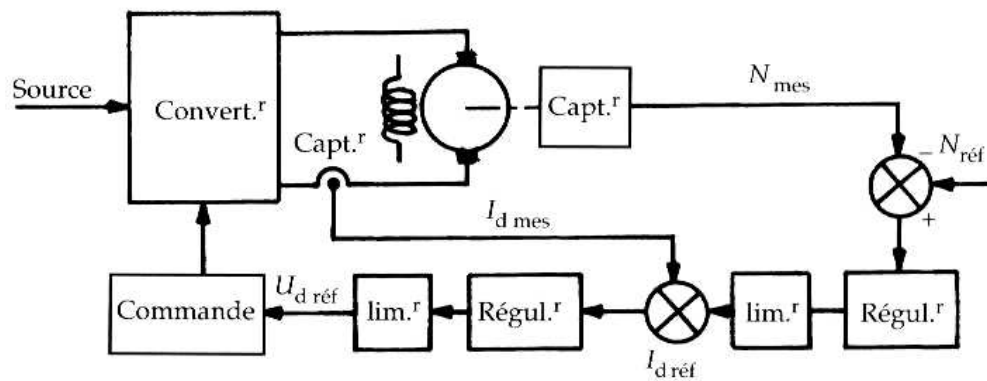
c) Réglage du point de fonctionnement

Le fonctionnement en régime établi correspond au point d'intersection de la caractéristique $N(C)$ du moteur avec celle $N(C_R)$ donnant le couple résistant C_R de la charge entraînée (tracé en traits mixtes sur la figure ci-dessus).

➤ Le caractère quasi- horizontal des courbes $N(I_d)$ à U_d constant fait qu'une faible variation de la tension U_d à N constant entraîne une variation importante du courant I_d . Pour éviter que I_d ne risque de prendre une valeur excessive, on fait généralement dépendre la valeur de U_d d'une boucle de régulation qui asservit le courant I_d dans l'induit à une valeur de référence $I_{d\text{ réf}}$. (voir figure suivante). Avec cette boucle de régulation la caractéristique $N(C)$ et $N(I_d)$ du moteur devient une verticale (en traits interrompus sur la figure ci-dessus). En faisant varier $I_{d\text{ réf}}$, on peut déplacer le point de fonctionnement du moteur.



➤ Pour faire varier la vitesse, on fait généralement dépendre $I_{d \text{ réf.}}$ d'une boucle de régulation de vitesse qui asservit la vitesse du moteur à la valeur de référence souhaitée (voir la figure ci-dessous), ce qui nécessite la présence d'un capteur de vitesse.



Les limites placées à la sortie des régulateurs servent l'un à maintenir $I_{d \text{ réf.}}$ entre deux valeurs $+ I_{d \text{ max.}}$ et $- I_{d \text{ max.}}$ l'autre à maintenir $U_{d \text{ réf.}}$ entre les deux valeurs maximum et minimum de la tension qui peut fournir le convertisseur.

II.2 Convertisseurs utilisés

a) Variateurs de vitesse à redresseurs

Dans pratiquement toutes les applications industrielles, la source d'énergie électrique utilisée est le réseau alternatif de distribution. Pour obtenir la tension continue variable appliquée à l'induit du moteur, le plus simple est d'utiliser un redresseur.

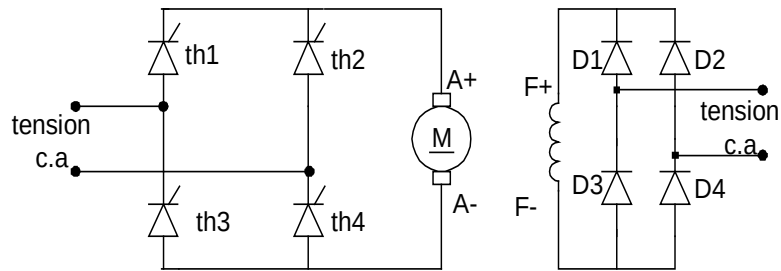
Ils sont monophasés ou triphasés.

➤ Emploi d'un redresseur seul

Si la machine n'a à être alimentée que pour un fonctionnement dans le quadrant 1, on peut employer un redresseur en pont mixte.

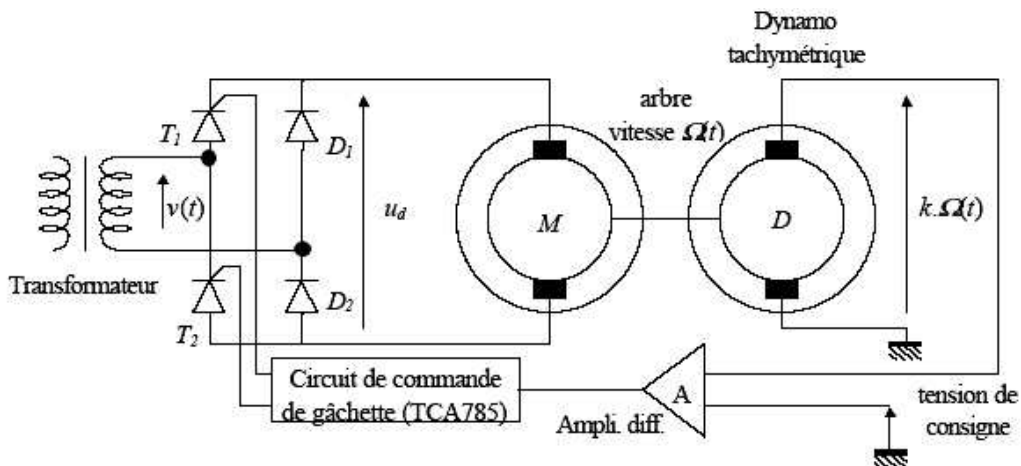
C'est ce qu'on fait d'ordinaire en monophasé.

Les ponts monophasés sont utilisés dans les variateurs de faible puissance (jusqu'à 10 kW environ). Ils comprennent soit un pont complet de quatre thyristors (figure suivante) ou un pont mixte à deux thyristors et deux diodes.

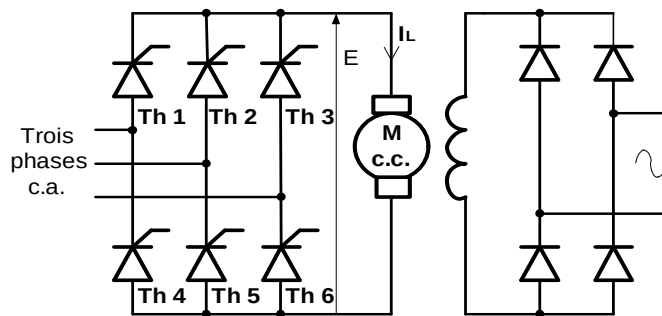


Variateur de vitesse à thyristors unidirectionnel monophasé pour moteur CC

Exemple de régulation en vitesse d'un moteur à courant continu



Les ponts triphasés sont employés pour les puissances supérieures à 10 kW. On peut choisir un pont complet à six thyristors (figure suivante) ou mixte à trois thyristors et trois diodes. En triphasé, les performances du pont mixte sont si mauvaises qu'on utilise le plus souvent le pont tous thyristors alors même qu'on n'a pas besoin de sa réversibilité.

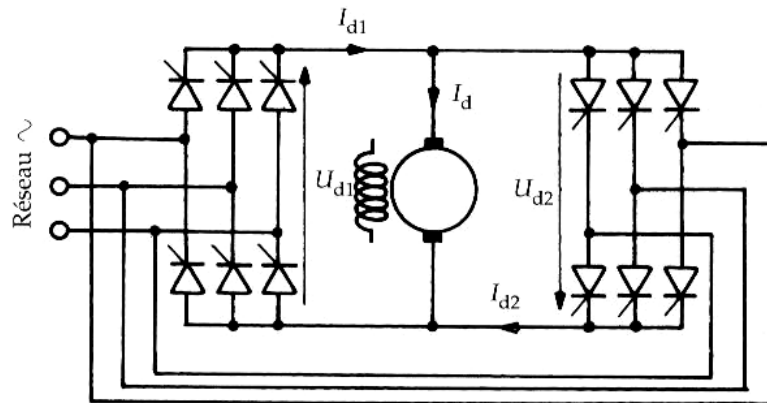


Variateur de vitesse à thyristors unidirectionnel triphasé pour moteur CC.

➤ Montage réversible « tête-bêche »

Si la machine doit pouvoir tourner dans les deux sens de rotation avec des passages rapides d'un sens à l'autre, il faut lors d'inversion de sens de rotation effectuer un freinage électrique par renvoi de l'énergie au réseau (passage du quadrant 1 au quadrant 2 ou du quadrant 3 au quadrant 4). Comme un redresseur tout thyristors n'est réversible qu'en tension, pour obtenir la réversibilité en courant nécessaire, la solution la plus efficace est de monter aux bornes de l'induit deux redresseurs tout thyristors

montés en « tête-bêche » (voir la figure suivante) : l'un fournit au moteur le courant I_d positif l'autre le courant I_d négatif.

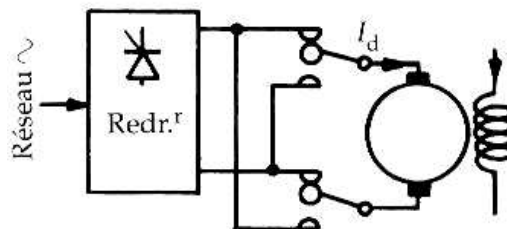


Pour éviter de créer des courts-circuits entre les phases du réseau la solution habituelle consiste à ne faire pas travailler qu'un pont à la fois en n'envoyant des impulsions des gâchettes qu'aux thyristors du pont pouvant fournir le courant I_d de polarité souhaitée.

Pour inverser le sens du courant dans le moteur, on doit d'abord amener le courant I_d à zéro ce qui entraîne le blocage du pont qui était en service. On supprime alors les signaux de gâchette sur les thyristors de ce pont. Ce n'est qu'en suite qu'on débloque l'autre pont. Il en résulte un temps mort durant lequel I_d est nul qui ne dépasse pas quelques millisecondes.

➤ Inversion du courant d'induit

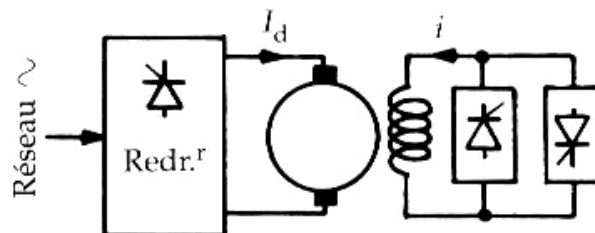
Lorsque les inversions du sens de rotation sont peu fréquentes, on peut n'utiliser qu'un seul redresseur et, à l'aide d'un contacteur bipolaire, inverser ses connexions avec l'induit du moteur après annulation du courant (figure suivante).



Cela permet au redresseur de jouer tantôt le rôle du pont « tête », tantôt celui du pont « bêche ». Ce procédé entraîne une augmentation sensible du temps mort nécessaire à l'inversion du couple.

➤ Inversion du courant inducteur

On peut également obtenir un fonctionnement dans les quatre quadrants du plan couple-vitesse avec un seul redresseur en inversant le flux Φ après annulation du courant I_d dans l'induit (voir la figure suivante).



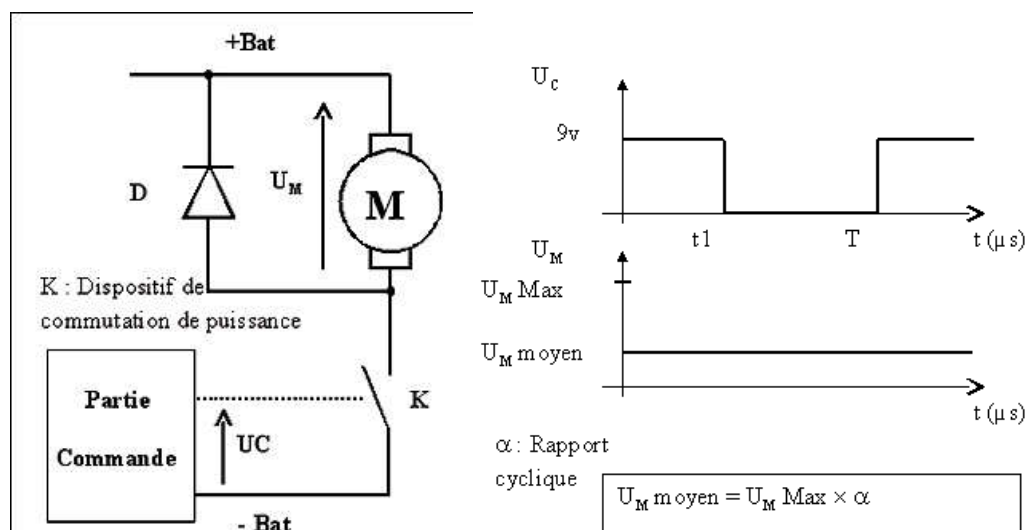
L'inversion du courant d'excitation est d'ordinaire obtenue par deux petits redresseurs montés tête-bêche et alimentant l'enroulement inducteur dans un sens ou dans l'autre. Cette solution simple et économique n'est utilisable que lorsqu'on accepte un temps mort d'inversion du couple assez élevé (0,5 seconde à quelques secondes) car, à cause de la constante de temps de l'inducteur, l'inversion de i ne peut pas être très rapide.

b) Variateurs à hacheurs

Pour obtenir la tension continue variable appliquée à l'induit U_d on utilise un hacheur lorsque l'équipement est alimenté en courant continu, batterie d'accumulateurs ou caténaire à courant continu en traction électrique.

Le hacheur ou convertisseur continu - continu est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs commandés et qui permet de modifier la valeur de la tension d'une source de tension continue avec un rendement élevé. Le découpage se fait à une fréquence très élevée ce qui a pour conséquence de créer une tension moyenne. C'est l'analogie, pour les sources de tensions continues, du transformateur utilisé en régime alternatif.

Si la tension délivrée en sortie est inférieure à la tension appliquée en entrée, le hacheur est dit **dévolteur**. Dans le cas contraire, il est dit **survolteur**. Il existe des hacheurs capables de travailler des deux manières (Boost-Buck).



On emploie :

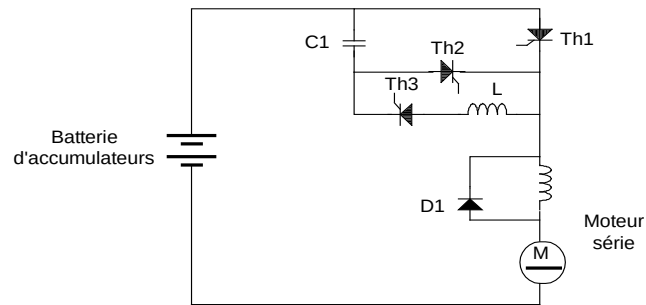
- le hacheur série lorsque le moteur ne doit travailler que dans le quadrant 1.
- la hacheur à deux interrupteurs réversibles en courant quand il doit travailler dans les quadrants 1 et 2.
- le hacheur en pont réversible en courant et en tension du côté continu pour le fonctionnement dans les quatre quadrants.

La marche dans les quadrants 2 et 3 nécessite que la source alimentant le hacheur soit réversible en courant.

On sait que, grâce à une commande adaptée, le passage d'un quadrant à un autre ne pose aucun problème.

A noter que dans certain cas on utilise aussi un hacheur dans des équipements alimentés en alternatif : on trouve alors en cascade un redresseur, un filtre, le hacheur. C'est une particulière la solution adoptée pour les entraînements des petite puissance avec des groupes moteur-charge de très faible inertie quand on a besoin de performances dynamiques importantes : avec un redresseur à thyristors en pont classique, on ne peut intervenir par la commande que six fois par période du réseau : avec un hacheur on peut intervenir à chaque période du hachage.

Les variateurs de vitesse avec hacheurs sont particulièrement utilisés pour équiper les moteurs de traction alimentés soit à partir d'une ligne en courant continu (train électrique) ou à partir d'une batterie d'accumulateurs (véhicule électrique). Le hacheur est utilisé uniquement avec le moteur série (voir la figure suivante), tandis que les variateurs à thyristors sont utilisés avec les moteurs « shunt » ou à aimant permanent.



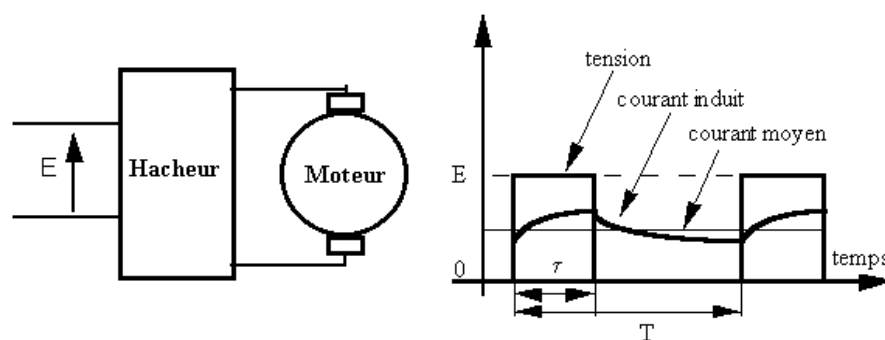
Circuit d'un hacheur de courant

Commande moteur par hacheur à IGBT

Un moteur à courant continu peut être piloté de deux façons :

- 1) Réglage du couple moteur $C_m = K I_{moy} \Phi$, par réglage du courant moyen dans l'induit.
- 2) Réglage de la vitesse de rotation par la tension moyenne appliquée à l'induit.

Dans les deux cas, cela conduit à une commande permettant de hacher la tension appliquée à l'induit avec un rapport cyclique contrôlable par l'utilisateur (PWM).



Remarque : Pour une machine à excitation séparée, on peut aussi agir sur le courant d'inducteur pour régler la vitesse.

Le synoptique d'un montage complet est donné ci après :

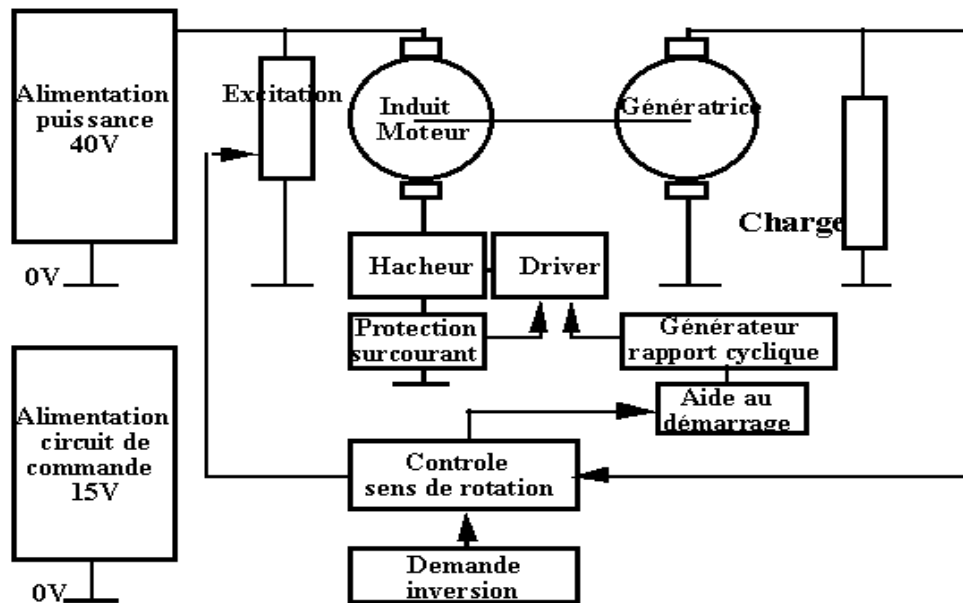
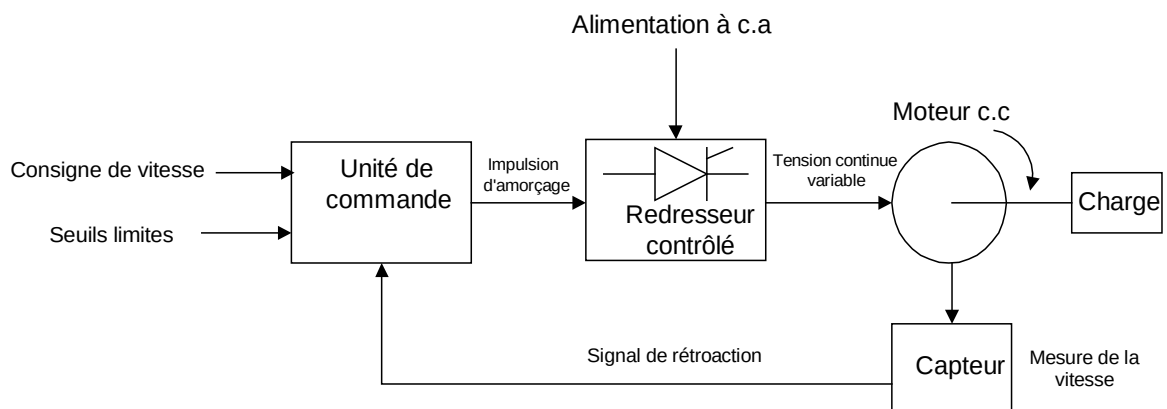


Figure 2

L'alimentation 40V alimente simultanément l'excitation et l'induit du moteur. Celui-ci est couplé à une charge constituée de la même machine montée en génératrice et d'une résistance. Aux bornes de celle-ci, l'information vitesse de rotation est disponible (mais il ne s'agit pas d'un capteur "vrai" de vitesse).

II.3 Principes des asservissements électroniques

Les variateurs de vitesse permettent non seulement de contrôler la vitesse et d'inverser le sens de rotation, mais aussi d'asservir la vitesse, soit en la maintenant égale à une valeur déterminée, quel que soit le couple résistant exercé sur l'arbre. Le schéma synoptique de la figure suivante présente les principaux éléments d'un variateur de vitesse pour un moteur courant continu à excitation séparée.



Le système comprend :

- un module de commande qui est constitué d'un régulateur de vitesse, un circuit d'amorçage à thyristors et des circuits pouvant régler la vitesse de rotation, l'accélération, la décélération, le courant d'induit maximum et le couple maximum. Tous ces réglages peuvent se faire à l'aide de potentiomètres s'il s'agit de carte analogique ou d'un microprocesseur dans le cas de variateur numérique.

- un capteur de vitesse transmettant un signal proportionnel à la vitesse du moteur. Ce capteur est soit une génératrice tachymétrique qui est entraînée par le moteur ou un disque codé, utilisé pour le comptage associé à un convertisseur fréquence-tension.
- un module de commande qui ajuste l'angle d'amorçage des thyristors en fonction de la vitesse du moteur.

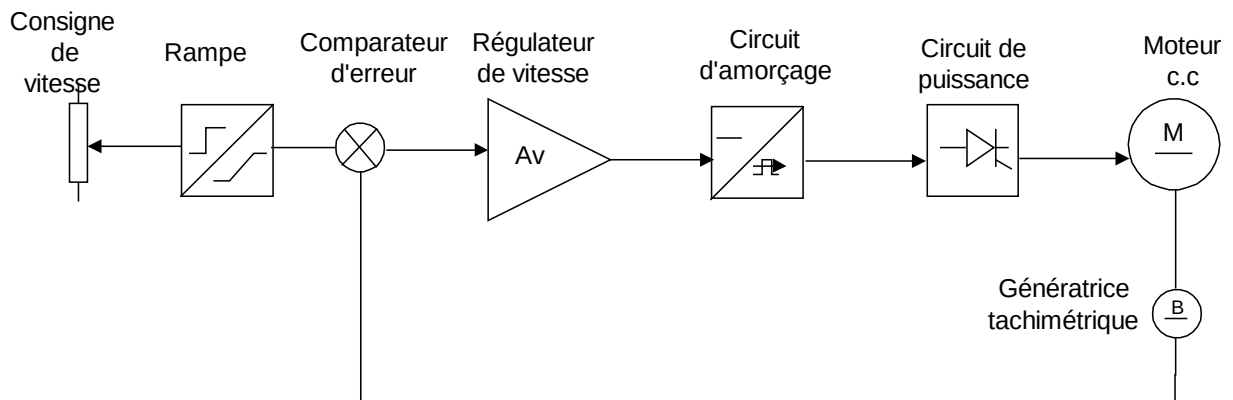
On retrouve deux méthodes permettant la régulation de vitesse d'un moteur à courant continu, soit :

- par génératrice tachymétrique ;
- par tension d'induit ou f.c.é.m.

a) Régulation par génératrice tachymétrique

Celle-ci, placée en bout d'arbre du moteur, fournit une tension proportionnelle à la vitesse de rotation. Le régulateur agit pour que cette tension (la vitesse de rotation) soit égale à la tension de consigne. Cette méthode permet d'avoir une très grande précision, de 0,1% pour une variation de charge importante.

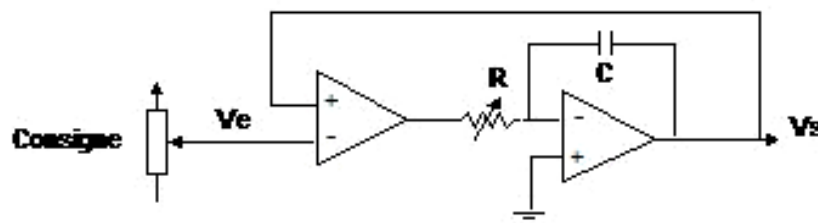
La figure ci-dessous montre les différents éléments d'une boucle de régulation utilisant une génératrice tachymétrique.

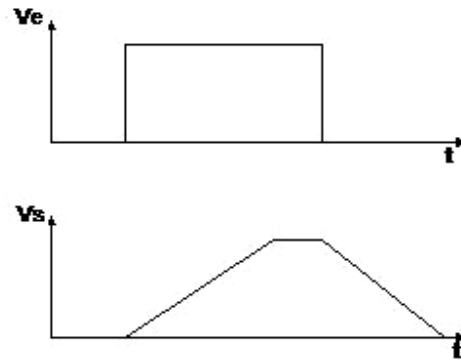


Assevissement de vitesse d'un moteur à c.c.

• La rampe (voir la figure ci-dessous)

Cette fonction transforme un échelon de tension d'entrée en une tension de sortie variable linéaire. Elle se compose d'une façon générale d'un intégrateur rebouclé sur un comparateur qui permet de maintenir constante la tension de sortie lorsque celle-ci a rattrapé le niveau de la tension d'entrée. Cette fonction permet de rendre plus progressifs les démarrages ou les arrêts.

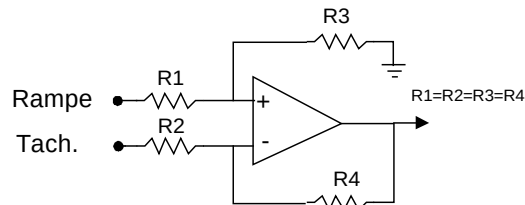




Circuit de la rampe d'accélération

- **Le comparateur** (voir la figure suivante)

C'est un amplificateur de différence qui compare la consigne à la tension provenant de la génératrice tachymétrique. Cette différence donne l'erreur entre ces deux valeurs au régulateur.

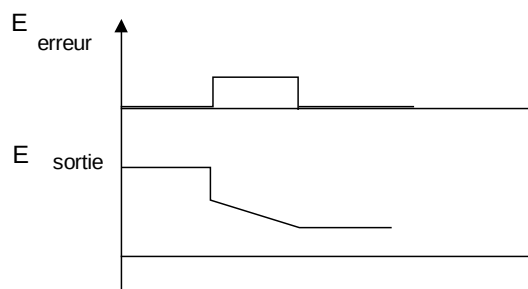
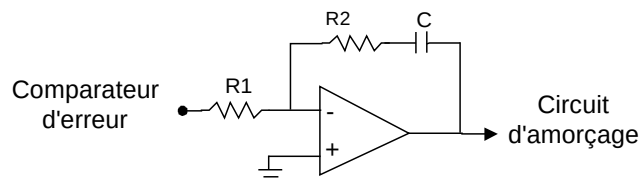


Comparateur d'erreur

- **Le régulateur** (figure ci-dessous)

Le régulateur est de type proportionnel, intégral (PI). La partie proportionnelle permet une correction rapide de l'erreur, tandis que la partie intégrale corrige tant qu'il y a une erreur.

Cette correction agit sur le circuit d'amorçage.

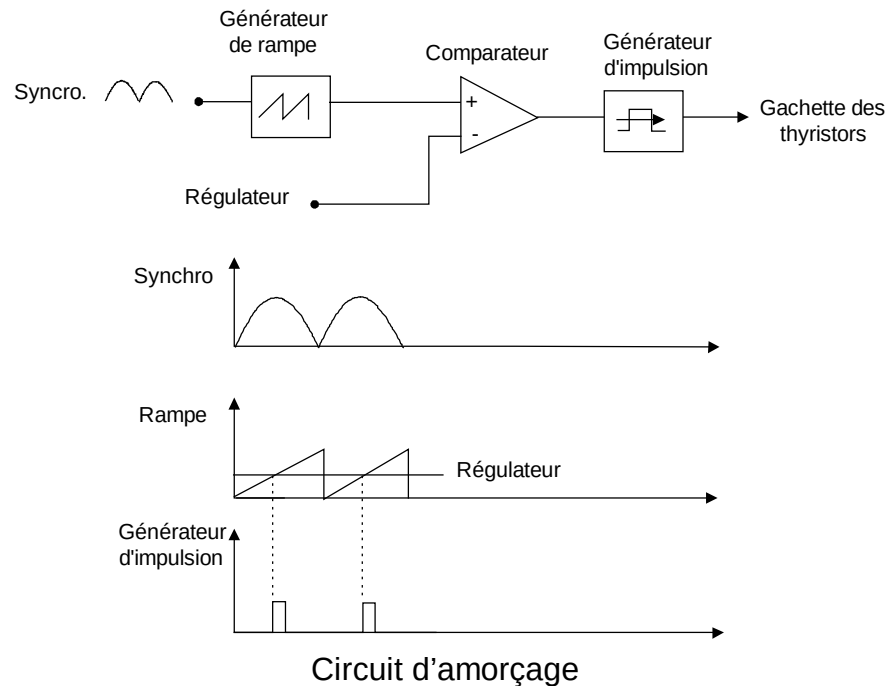


Régulateur PI

- **Circuit d'amorçage** (voir la figure suivante)

C'est un circuit qui permet d'amorcer à un moment bien précis le ou les thyristors qui alimentent le moteur.

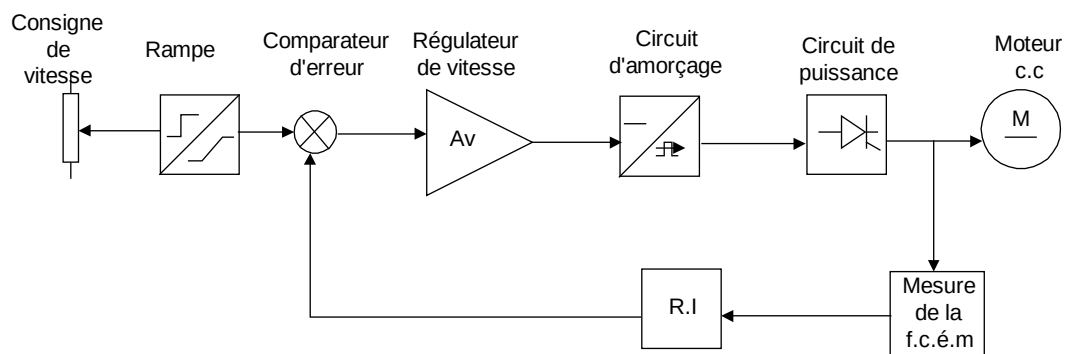
Ce circuit génère une rampe qui est synchronisée sur le secteur, celle-ci est comparée à la tension provenant du régulateur. La sortie du comparateur permet à un générateur d'impulsions de commander les thyristors avec un angle pouvant varier entre 0° et 180° . L'isolation entre le circuit d'amorçage et les thyristors se fait par transformateur d'impulsion.



b) Régulation par tension d'armature

Avec cette méthode, la variation de vitesse est mesurée par la tension d'induit du moteur (f.c.e.m.) (voir figure suivante). Un circuit de compensation (R.I) est nécessaire à cause de la résistance interne du moteur. La précision obtenue pour la vitesse est de 1 à 2% ; la précision devient mauvaise pour les faibles vitesses.

La mesure est prise à partir d'un réseau résistif ou d'une carte électronique d'isolation.



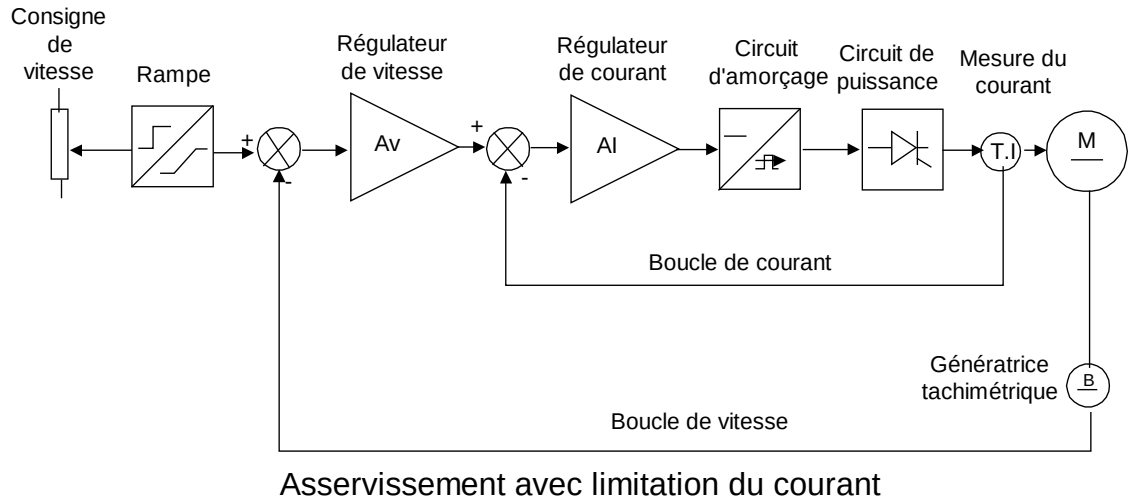
Régulation par force contre-électromotrice

- **Limitation de courant** (Figure ci-dessous)

Pour protéger le moteur contre les surcharges, un dispositif de commande maintient le courant d'induit en dessous d'une valeur limite. Lorsque la valeur limite est atteinte, les impulsions de gachette sont retardées, entraînant une baisse de tension de sortie du pont redresseur. Cette valeur limite de courant est déterminée en fonction du couple maximal souhaité et de l'intensité maximale autorisée dans le moteur.

Les principales méthodes de mesure de courant sont :

- les transformateurs de courant alternatif ;
- les capteurs à effet Hall ;
- les résistances en série avec l'armature du moteur. Ces dernières sont peu employées, car elles empêchent l'isolation galvanique entre le circuit de commande et celui de puissance.



II. 4 Variateur de vitesse Rectivar 4

II.4.1 Discussion

Les variateurs de vitesse RTV-44 (Figure 4-1) de Télémécanique sont destinés à la régulation de vitesse des moteurs à courant continu à excitation séparée ou à aimants permanents, à partir d'un réseau alternatif monophasé. La commande peut être réalisée à partir d'une carte analogique ou d'un microprocesseur. Ces variateurs sont réversibles, double pont et fonctionnent dans les 4 quadrants du plan couple/vitesse. Ces variateurs peuvent contrôler des moteurs ayant une capacité comprise entre 0,65KW et 1770 KW.

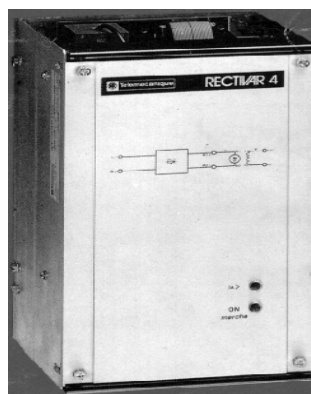


FIGURE 4-1 RECTIVAR 4

II.4.2 Schéma fonctionnel

La Figure 4-2 nous met en relief le schéma fonctionnel du variateur RECTIVAR 4

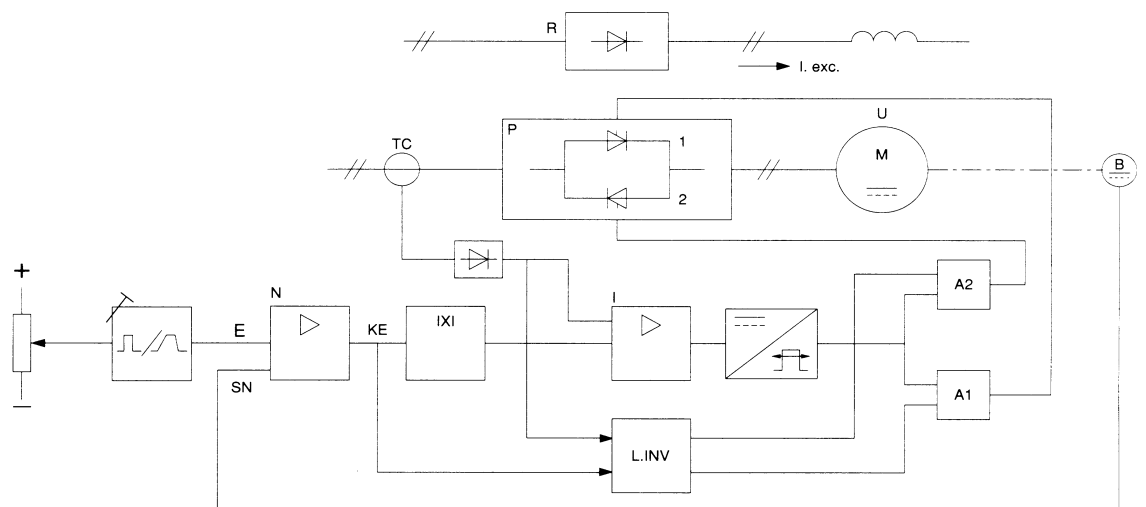


FIGURE 4-2 SCHÉMA FONCTIONNEL

Alimentation monophasée		Courant côté continu		Moteur Puissance maximale moteur (1) $\eta = 0,85$ limitation (2) classique à rabatement				Tension d'induit recommandée	Excitation Tension redressement double simple alter-nance alter-nance			RECTIVAR (1)	
Tension	Courant ligne	Maximal permanent	Pointe	Cd/Cn = 1,2 In A	P kW	Id/In = 1,5 Pn (4) kW	Pc (3) kW		Courant	Référence	Masse		
U eff. V	I eff. A	Im A	Ip A					UA V	V	V	I ex. A		kg
220V 50/60 Hz	8	6	9	5	0,6	0,5	1,15	150	190	100	2	RTV-44U60M	3,600
	16	12	18	10	1,25	1	2,3	150	190	100	2	RTV-44D12Q	3,600
	32	24	36	20	2,55	2	4,6	150	190	100	2	RTV-44D24Q	6,000
	58	44	66	36	4,6	3,7	8,4	150	190	100	2	RTV-44D44Q	6,000
240V 50/60 Hz	8	6	9	5	0,65	0,55	1,2	160	205	110	2	RTV-44U60M	3,600
	16	12	18	10	1,35	1,1	2,45	160	205	110	2	RTV-44D12Q	3,600
	32	24	36	20	2,7	2,2	4,9	160	205	110	2	RTV-44D24Q	6,000
	58	44	66	36	4,9	4	9	160	205	110	2	RTV-44D44Q	3,600
380V 50/60 Hz	16	12	18	10	2,2	1,8	4	260	330	170	2	RTV-44D12Q	3,600
	32	24	36	20	4,4	3,5	8	260	330	170	2	RTV-44D24Q	6,000
	58	44	66	36	8	6,4	14,6	260	330	170	2	RTV-44D44Q	6,000
415V 50/60 Hz	16	12	18	10	2,4	1,9	4,3	280	360	185	2	RTV-44D12Q	3,600
	32	24	36	20	4,8	3,8	8,6	280	360	185	2	RTV-44D24Q	6,000
	58	44	66	36	8,6	6,9	15,7	280	360	185	2	RTV-44D44Q	6,000

II.4.4 Raccordement

OFPPT/DRIF

changement de la consigne de vitesse par un potentiomètre. La lecture de vitesse du moteur est prise à l'aide d'une dynamo-tachimétrique.

Schéma développé
conseillé

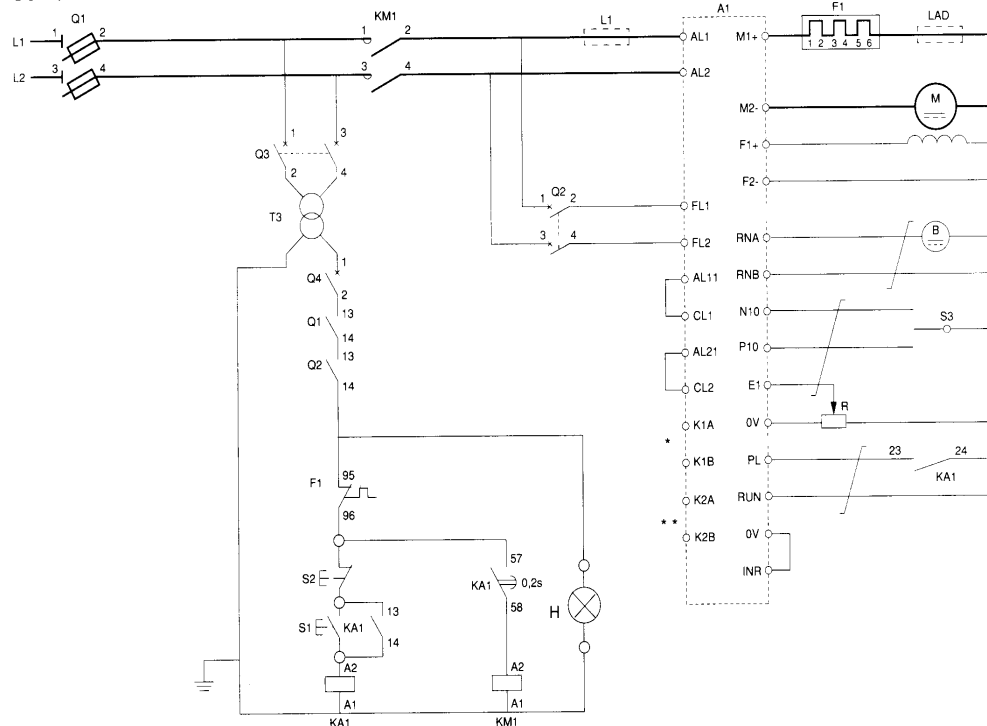


FIGURE 4-4 CIRCUIT DE RACCORDEMENT

II.5.5 Carte de contrôle

La Figure 4-5 montre le schéma de la carte de contrôle du variateur. On retrouve sur cette carte :

- les cavaliers qui servent à configurer le variateur ;
- les potentiomètres de réglage ;
- les indicateurs d'états ;
- un relais de validation et un relais affectable.

Elle regroupe les fonctions suivantes :

- une régulation de vitesse à action proportionnelle et intégrale ;
- une régulation de courant ;
- une logique d'inversion ;
- une limitation de courant ;
- n circuit d'allumeur à trains d'impulsions ;
- une rampe avec temps d'accélération et de décélération réglables séparément.

Carte contrôle
(commune à tous les
variateurs)

Carte encliquetable

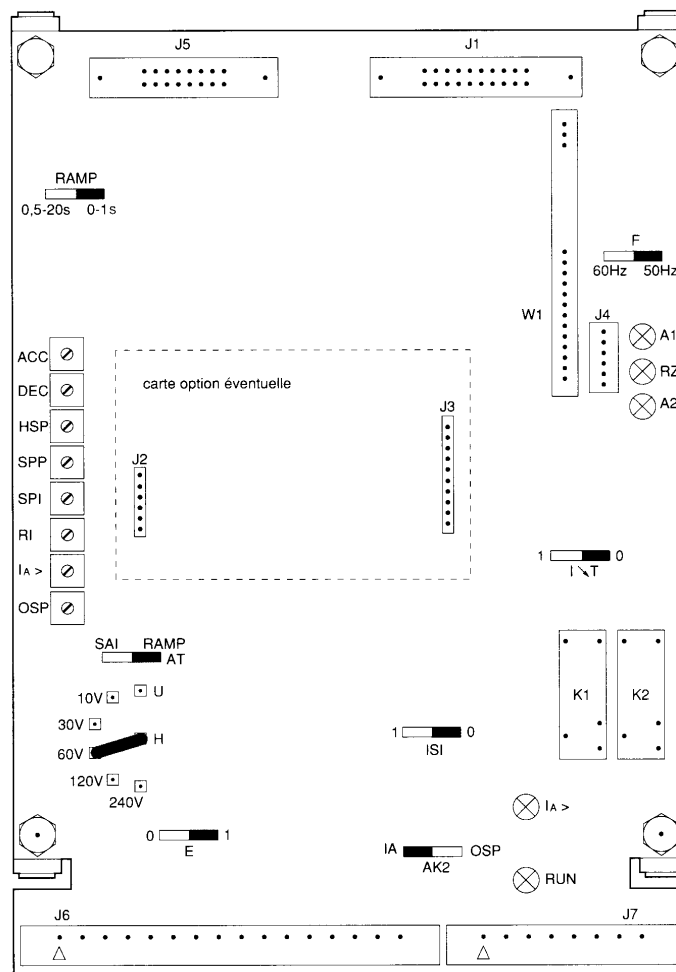


FIGURE 4-5 CARTE DE CONTRÔLE

II.4. 6 Choix d'un variateur pour un convoyeur transportant des agrégats

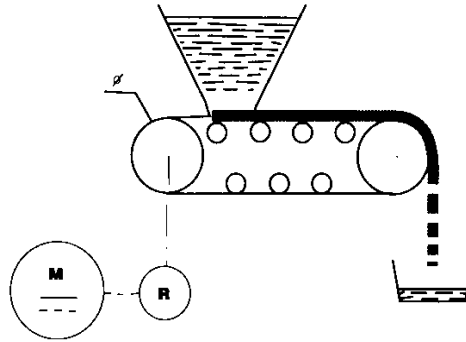


FIGURE 4-6 CONVOYEUR À AGRÉGATS

Caractéristiques :

- débit maximal du tapis, $Q = 50t/h$;
- charge au mètre linéaire, $ml = 120Kg/m$;
- diamètre des tambours, $d = 0,4 m$;
- couple résistant en charge $Cr = 590 Nm$;
- réseau monophasé de 220v, 50Hz.

Solution :

- Vitesse du tapis :

$$V = \frac{Q}{ml} = \frac{50 \times 10^3 kg / h}{120 kg / m} = 416 m / h = 0,116 m / s$$

- Vitesse de rotation des tambours

$$w = \frac{V}{r} = \frac{0,116 m / s}{0,2 m} = 0,580 rad / s$$

$$N = \frac{w \times 60}{2\pi} = \frac{0,580 \times 60}{6,28} = 5,54 tr / min$$

- Puissance utile du tapis :

$$P_1 = C \times W = 590 \times 0,58 = 342 W$$

- Calcul du réducteur

Si l'on choisit un moteur qui tourne à 1000 tr/min, le rapport de réduction est égal à :

$$R = \frac{N_{MOT}}{N_{TAMBOUR}} = \frac{1000}{5,54} = 180$$

- Puissance utile au variateur si le rendement du moteur est de 0,91

$$P_2 = \frac{P_1}{n} = \frac{342}{0,91} = 376 W$$

Le choix se porte sur un Rectivar RTV-04V60M.

II.4.7 Schéma synoptique

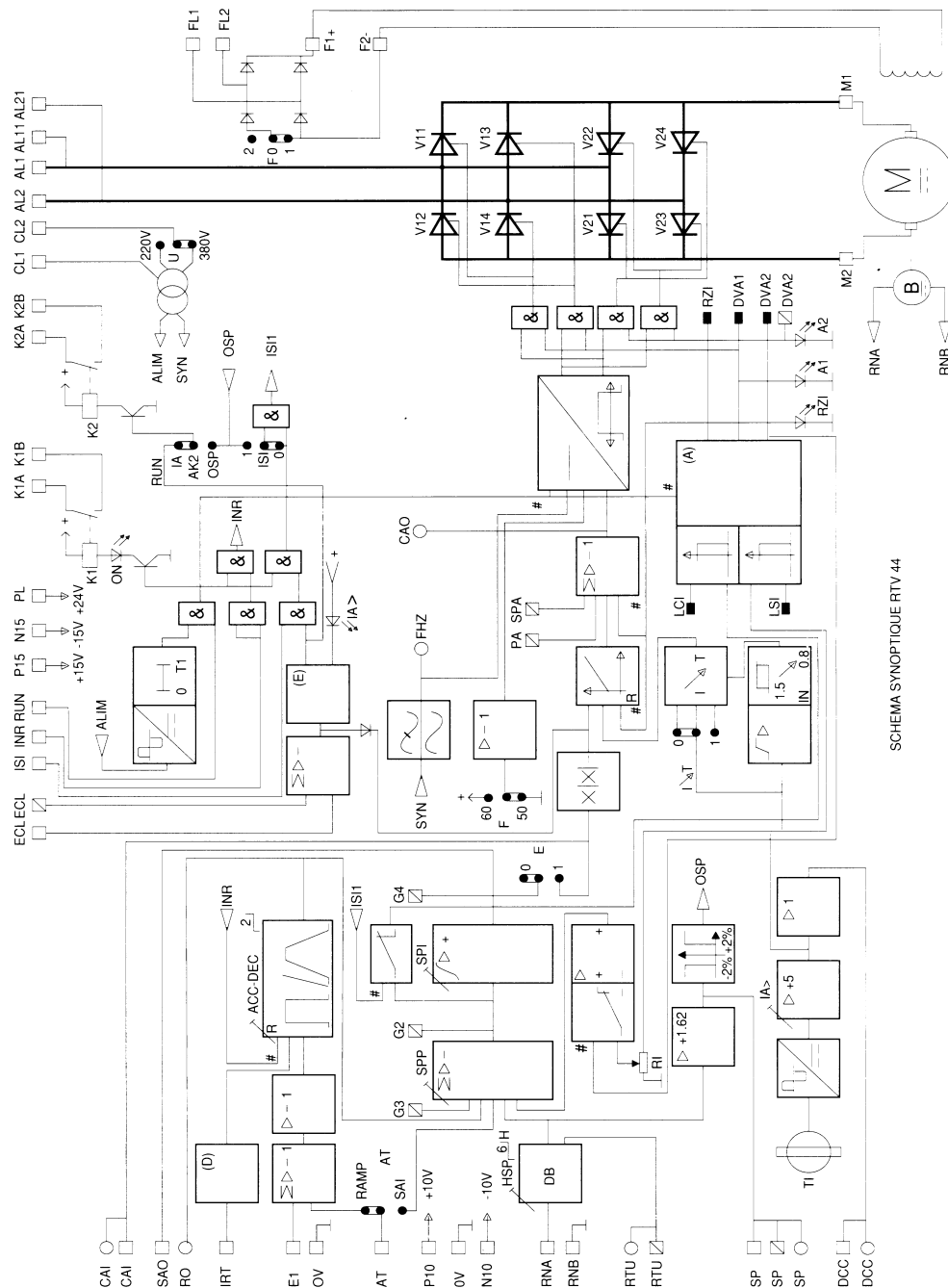


FIGURE 4-7 SCHÉMA SYNOPTIQUE

II.4.8 MAINTENANCE DU VARIATEUR RECTIVAR 4

Il est important de procéder à une installation minutieuse si l'on veut éviter un défaut de fonctionnement. Un mauvais contact, une connexion défectueuse peuvent créer le défaut de fonctionnement. Il est important de suivre la procédure d'installation qui est

indiquée dans le manuel de service du manufacturier. Les pannes qu'on peut retrouver sont :

- Le moteur ne tourne pas ;
- mauvaise régulation : la vitesse chute en fonction de la charge ;
- instabilité du moteur ;
- le réglage de la vitesse est impossible ;
- les fusibles fondent.

Pour le dépannage, il est recommandé de se munir d'un appareil de mesure ou de contrôle soit :

- un ampèremètre ou une pince ampèremétrique ;
- un voltmètre ou un multimètre ;
- un ohmmètre ou une sonnette ;
- un oscilloscope.

Le tableau 2-3 nous donne les différentes pannes et les vérifications à faire sur la carte de contrôle, la carte de puissance et sur le moteur pour un branchement avec dynamo-tachimétrique ou par tension d'armature.

TABLEAU 4-1 PROCÉDURE DE DÉPANNAGE

Défauts	Vérifier sur le variateur		Vérifier le retour de vitesse avec		Vérifier sur le moteur
	carte de contrôle	carte de puissance	D.T d'armature	tension	
le moteur ne tourne pas	• le réglage de la limitation la • la liaison 0V-RUN et 0V-INR ; • la référence 0-10V aux bornes 0V et E1	• la tension réseau ; • les fusibles.	-	-	• la tension d'excitation F1+ et F2- ; • usure des balais ; • que le moteur n'est pas calé ;
Le moteur tourne par à coups	Le réglage des gains SPP et SPI	le pont de puissance	-	la compensation de chute RI.	les balais du moteur
Le moteur s'emballe	-	• la position du cavalier F ; • le pont de puissance	• La position du cavalier H ; • le retour DT aux bornes RNA et RNB	• la position du cavalier H en HO-HU ; • le retour de tension	la tension d'excitation.
Instabilité	• Le réglage des gains SPP et SPI ; • la position du cavalier H.	-	L'accouplement DT - moteur	la compensation de chute RI.	
Mauvaise régulation		-	-	la compensation de chute RI.	la valeur de tension nominale d'induit
Le réglage de la vitesse est impossible	La consigne 0-10V aux bornes 0V et E1	le pont de puissance	-	-	-
Fusion des fusibles		• les raccordements (court-circuit ou défaut de masse) ; • le pont de puissance.	-	-	les raccordements (court-circuit ou défaut de masse)

Vérification du pont de puissance

Placez le variateur hors tension, déconnectez AL1, AL2, M1, M2 et vérifiez la continuité du pont en tenant compte que 2 cas peuvent se présenter :

- 1- Thyristor ouvert ; vérifier chaque thyristor .
- 2- Thyristor en court-circuit ; le montage étant à ponts anti-parallèles, il ne sera possible de déterminer s'il s'agit du pont A ou du pont B qu'après le démontage de l'un d'eux.

En cas de défaut, débrancher les cathodes des composants et :

- sonnez le câblage puissance ;
- sonnez chaque composant (voir Figure 0-8) ;
- remplacez le ou les composants défectueux.

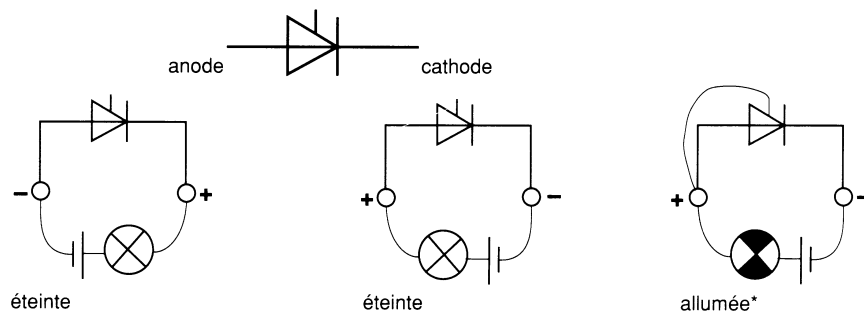


FIGURE 0-8 CIRCUIT DE TEST

La vérification peut se faire avec un ohmmètre ou une lampe et une batterie. La lampe s'allume lorsque la gachette et l'anode sont connectées, et reste allumée lorsque l'on débranche la gachette.

Vérification du circuit d'excitation

Le circuit d'excitation est situé sur la carte de puissance. Enlevez la carte de contrôle et déconnectez F1 et F2. Vérifiez à l'ohmmètre les 4 diodes du pont. Remplacez la carte puissance concernée en cas de défaut.

Chapitre III

Commande de vitesse pour moteur à courant alternatif

Les progrès récemment réalisés dans les domaines de l'Electronique de Puissance et de la Commande Numérique ont permis depuis peu l'essor des variateurs de vitesse pour les machines à courant alternatif. Aujourd'hui les machines à courant alternatif peuvent remplacer les machines à courant continu dans la plupart des entraînements à vitesse variable.

Dans de nombreux secteurs industriels, il faut donc s'attendre à la disparition progressive des entraînements utilisant la machine à courant continu.

III.1 Principe de fonctionnement des machines à courant alternatif.

Dans les machines électriques à pôles lisses, le couple électromagnétique est dû à l'interaction de deux champs magnétiques. Dans le cas des machines à courant alternatif de type synchrone et asynchrone, il s'agit de l'interaction de deux champs tournants, le champ tournant créé par le(s) courant(s) qui circule(nt) dans l(es) enroulement(s) du rotor et le champ tournant produit par les courants sinusoïdaux qui parcourent les enroulements du stator. La figure 1 précise les positions des vecteurs H_s et H_r représentant respectivement les champs tournants statorique et rotorique.

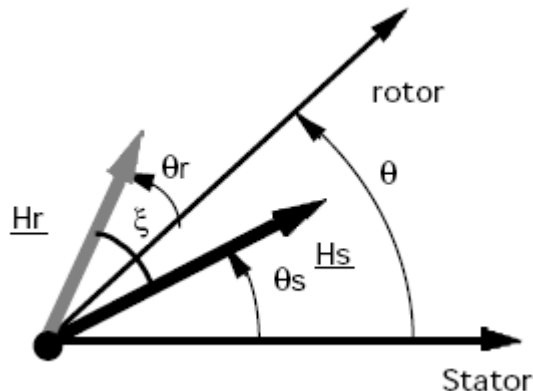


Figure 1

La position du rotor par rapport au stator est repérée par l'angle q tel que :

$$\theta = \Omega t + \alpha$$

Le champ tournant statorique se déplace par rapport au stator et sa position est repérée par l'angle θ_s :

$$\theta_s = \Omega_s t + \beta$$

En notation complexe, dans le repère lié au stator, le champ produit par les enroulements du stator peut s'exprimer par :

$$\theta_r = \Omega_r t + \gamma$$

En notation complexe, dans le repère lié au rotor, le champ produit par les enroulements du rotor peut s'exprimer par :

$$\underline{H_r} = H_r e^{j\theta_r}$$

Le couple électromagnétique fourni par la machine s'exprime par un produit vectoriel :

$$C_{EM} = k (\vec{H}_s \Delta \vec{H}_r)$$

Ainsi :

$$C_{EM} = k H_s H_r \sin (\vec{H}_s, \vec{H}_r)$$

Soit :

$$C_{EM} = k H_s H_r \sin (\theta + \theta_r - \theta_s)$$

En remplaçant θ , θ_r et θ_s par leurs expressions :

$$C_{EM} = k H_s H_r \sin [(\Omega + \Omega_r - \Omega_s)t + \gamma - \beta + \alpha]$$

La valeur moyenne du couple électromagnétique est non nulle si :

$$\Omega + \Omega_r = \Omega_s$$

Cette relation permet de mettre en évidence le principe de fonctionnement des deux principales machines à courant alternatif :

- Dans le cas de la machine synchrone, le champ rotorique est produit par un enroulement alimenté en courant continu ou par un aimant permanent, la pulsation Ω_r est donc nulle. Le rotor tourne à la même vitesse que le champ statorique.
- Dans le cas de la machine asynchrone, le rotor tourne à une vitesse différente de celle du champ statorique. Les courants rotoriques sont alternatifs et Ω_r représente la vitesse angulaire de glissement : $\Omega_r = g \Omega_s$ (g : glissement).

Tout ceci peut être résumé dans le tableau ci-dessous :

<u>Machine synchrone :</u>	<u>Machine asynchrone :</u>
$\Omega_r = 0 \rightarrow \Omega = \Omega_s$ (10 a)	$\Omega + \Omega_r = \Omega_s$ (10 b)

Pour contrôler parfaitement le couple électromagnétique de ces machines, il faut donc assurer en permanence l'égalité :

$$\Omega + \Omega_r = \Omega_s$$

sur les pulsations et maîtriser l'angle ξ entre les vecteurs H_s et H_r ($\xi = \gamma - \beta + \alpha$).

Ainsi :

$$C_{EM} = k H_s H_r \sin \xi$$

III.2 : Variateurs pour les moteurs synchrones

Dans un moteur synchrone triphasé :

- **Le stator** port un enroulement triphasé à $2p$ pôles. Les bobinages des trois phases, repérés par les indices A, B et C sont identiques mais décalés deux à deux de $2\pi/3p$. Les trois phases sont d'ordinaire connectées en étoile avec neutre isolé. Le stator constitue l'induit, c'est-à-dire l'enroulement ou le flux créer par l'inducteur génère les forces électromotrices.
- **Le rotor** constitue l'inducteur. Grâce à un enroulement alimenté en courant continu ou à des aimants permanents, il crée $2p$ pôles successivement Nord et Sud.

Lorsque la machine fonctionne en moteur, la source qui alimente l'induit fournit l'énergie électrique qui est transformée en énergie mécanique. Lorsqu'elle fonctionne en génératrice, la machine renvoie vers la source l'énergie électrique produite à partir de l'énergie mécanique prise à la charge qu'elle freine.

Expression du couple : $C = \frac{2}{3} p \Phi_m I'_m \cos \Psi$ donc à amplitudes des courants et des flux données, le couple est proportionnel à $\cos \Psi$; il est maximum pour Ψ nul. Si Ψ est compris entre $\pi/2$ et $3\pi/2$, C est négatif, c'est la marche en génératrice.

Les équations des tensions statoriques peuvent se mettre sous forme vectorielle :

$$\overline{V'} = R \overline{I'} + jL\omega \overline{I'} + \overline{E'}$$

Le nom de machine synchrone vient du fait qu'en régime permanent vitesse angulaire de rotation Ω et la pulsation ω des grandeurs électrique statoriques sont rigoureusement proportionnelles.

Réglage du point de fonctionnement

➤ Lorsque qu'on alimente la machine synchrone par le réseau, celui impose la fréquence des tensions et courants statoriques et donc la vitesse de rotation de la machine. La puissance active fournie par le réseau (ou renvoyée à celui-ci) est imposée par la puissance que le système mécanique accouplé au rotor absorbe (ou fournit). On règle la puissance réactive échangée avec le réseau en agissant sur le courant d'excitation.

➤ Lorsqu'elle est utilisée dans un variateur de vitesse, la machine synchrone est alimentée par un convertisseur électronique de puissance. On utilise celui-ci pour asservir l'évolution temporelle des courants statoriques à la position du rotor de manière à ce que cette évolution permette d'obtenir un couple constant ou s'en rapprochant le plus possible. D'autre part, on règle l'amplitude des courants en fonction de couple souhaité.

On arrive ainsi au schéma de régulation de la figure 2 qui permet d'obtenir des performances dynamiques.

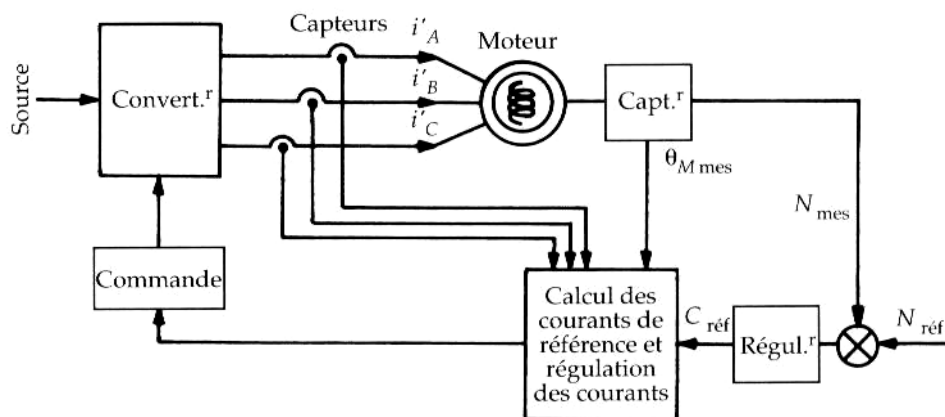


Figure 2

Différentes solutions permettent la réalisation d'un tel schéma ; elles diffèrent les unes par les autres par :

- Le type de convertisseur utilisé qui dépend surtout de la puissance de la machine ;
- La loi de calcul des courants de références en fonction du couple souhaité et de la position du rotor ;
- La manière dont la régulation des courants est assurée.

A.1 : Principe généraux de réglage.

Pour assurer un fonctionnement à vitesse variable de la machine synchrone, il est nécessaire d'alimenter la machine à fréquence variable. Pour éviter le "décrochage" de la machine, il faut à tout instant que la pulsation des grandeurs statoriques ω_s soit telle que $\omega_s = p \Omega$ (p représente le nombre de paires de pôles de la machine et Ω la vitesse angulaire de rotation du rotor).

L'alimentation à fréquence variable de la machine synchrone (Fig. 3) se fait à l'aide d'un convertisseur statique généralement continu-alternatif. La source d'entrée peut être du type source de courant ou du type source de tension. En sortie du convertisseur, on contrôle l'amplitude des tensions statoriques ou l'amplitude des courants statoriques et la fréquence f_s est proportionnelle à la vitesse de rotation de la machine. D C

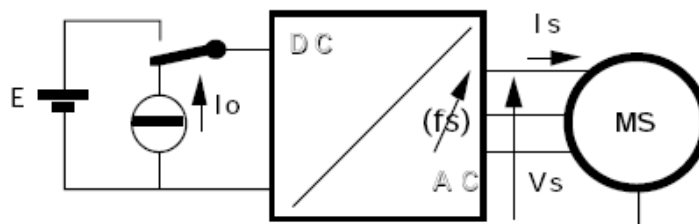


Figure 3

A.2 : Machine synchrone alimentée par un commutateur de courant.

La machine synchrone est donc alimentée par un pont de Graetz triphasé à thyristor conformément à la figure 4.

La source côté continu est de type source de courant et les thyristors commutent le courant entre les différentes phases de la machine et remplissent ainsi le rôle de collecteur "électronique".

Lorsque la machine fonctionne en moteur, le pont à thyristors fonctionne en onduleur non autonome. Les tensions statoriques de la machine permettent, sous certaines conditions, la commutation naturelle des thyristors.

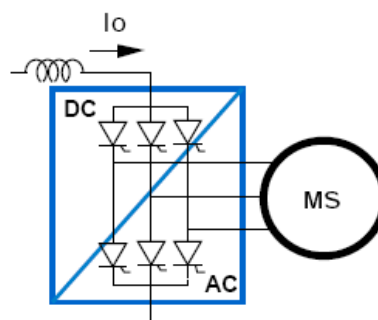


Figure 4

Afin de voir quelles sont ici les conditions de fonctionnement en commutation naturelle des thyristors, il faut faire un bref rappel sur le pont de Graetz à thyristors.

A.2.1 : Le redresseur triphasé à thyristors.

Lorsqu'on étudie le fonctionnement d'un redresseur à thyristors, le réseau de tensions alternatives est généralement considéré en convention **générateur** et la charge inductive côté continu est considérée en convention **récepteur**.

L'allure du courant dans la phase 1 est rappelée à la figure 5. Le réseau d'alimentation est supposé parfait (impédance interne nulle), la charge côté continu fortement inductive est assimilée à une source de courant.

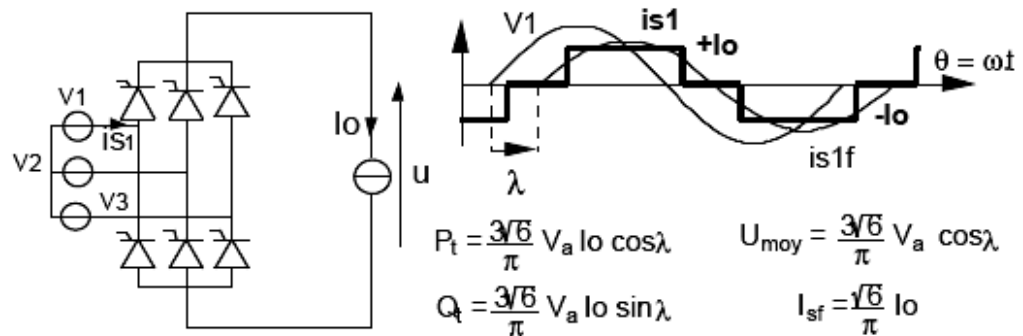


Figure 5

Les interrupteurs utilisés sont des thyristors, ils ont une caractéristique statique à trois segments (réversibles en tension et unidirectionnels en courant), l'amorçage est commandé et le blocage spontané.

De ce fait, les courants absorbés par le convertisseur sont en retard sur les tensions simples correspondantes. La commande à l'amorçage des interrupteurs signifie donc que le convertisseur consomme de la puissance réactive vis à vis du réseau de tensions alternatives. Sur la figure 5, les puissances active et réactive sont respectivement notées P_t et Q_t , la valeur efficace du fondamental des courants de lignes est notée I_{sf} (grandeur à prendre en compte pour construire le diagramme de Fresnel) et la valeur moyenne de la tension redressée est notée U_{moy} . L'angle de retard à l'amorçage des thyristors est noté λ .

La figure 6 représente l'évolution des puissances active et réactive absorbées par le pont à thyristors en fonction de la valeur de l'angle de retard à l'amorçage des thyristors. Le point de fonctionnement se situe sur un demi-cercle et le convertisseur à thyristors absorbe toujours de la puissance réactive quel que soit le signe de la puissance active. Pour un angle de retard à l'amorçage supérieur à 90° , la puissance active change de signe ; on parle alors de fonctionnement en onduleur puisque c'est le convertisseur qui fournit de la puissance active au réseau.

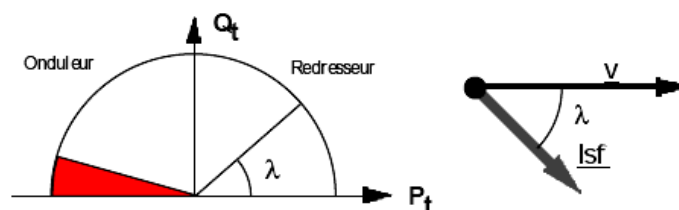


Figure 6

Pour assurer la commutation naturelle des thyristors à l'aide des tensions du réseau, il faut théoriquement que λ reste compris entre 0° et 180° . Pratiquement la plage de variation de λ est limitée à cause du temps minimal d'application de tension inverse des thyristors noté t_q ($\lambda < \pi - \omega t_q$). Avec des thyristors classiques (application secteur), la valeur maximale de l'angle λ est limitée à 150° ($\omega t_q \gg \pi/6$).

Pour l'étude de l'association machine synchrone - redresseur à thyristors, les conventions électriques sont généralement changées.

Le côté continu est considéré en convention générateur et le côté alternatif est considéré en convention récepteur. Ainsi, lorsque la machine synchrone fonctionne en moteur la puissance active est de signe positif. Dans ce cas là, le pont de Graëtz fonctionne en onduleur non autonome (c'est les tensions statoriques qui assurent les commutations spontanées des interrupteurs). Afin de ne pas dérouter le lecteur par ces changements de convention, nous allons donc reprendre l'étude du pont de Graëtz triphasé.

La figure 7 illustre le fonctionnement du pont de Graëtz à thyristors avec les nouvelles conventions. Côté réseau alternatif le courant change de signe. Ainsi, l'angle de retard à l'amorçage des thyristors n'est plus égal au déphasage tension-courant noté ϕ . Côté continu, la polarité de la tension est inversée : la tension moyenne U_{moy} est positive lorsque le pont à thyristor fonctionne en onduleur.

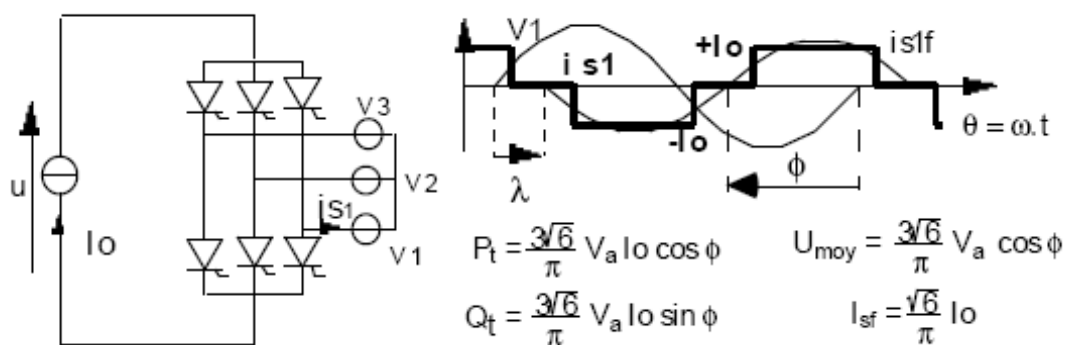


Figure 7

Les angles λ et Φ sont complémentaires : $\Phi = \lambda - \pi$. L'angle Φ est négatif et les courants de lignes sont en avance sur les tensions simples correspondantes (i_{s1} est en avance sur v_1). Comme l'angle de retard à l'amorçage des thyristors varie entre 0 et 150° , l'angle Φ est donc compris entre -180° et -30° (Fig. 8).

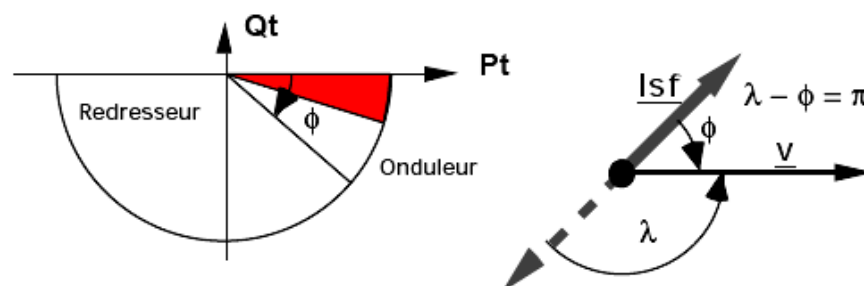


Figure 8

La puissance réactive Q_t est alors négative, ce qui signifie bien que le pont à thyristor absorbe de la puissance réactive sur le réseau. Lorsque l'angle Φ évolue entre $-\pi/6$ et

- $\pi/2$, le pont à thyristor fonctionne en onduleur et le réseau absorbe de la puissance active ($P_t > 0$). Lorsque l'angle Φ évolue entre $-\pi/2$ et $-\pi$, le pont à thyristor fonctionne en redresseur et le réseau fournit de la puissance active ($P_t < 0$).

A.2.2 Alimentation de la machine synchrone par un pont triphasé à thyristors.

Le pont de Graëtz à thyristors permet de commuter les courants dans les phases de la machine synchrone à conditions toutefois que ces courants soient toujours en avance sur les tensions statoriques correspondantes (commutation naturelle des thyristors $\rightarrow$ la machine synchrone fournit de la puissance réactive au pont à thyristors).

Le dispositif d'autopilotage, que on va décrire plus loin, doit assurer en permanence cette condition.

Les commutations des courants dans les phases de la machine synchrone s'effectuent conformément à la figure 9. Chaque thyristor conduit pendant un tiers de période (120°) et l'enchaînement des séquences tient compte de la position du rotor pour éviter le "décrochage" de la machine.

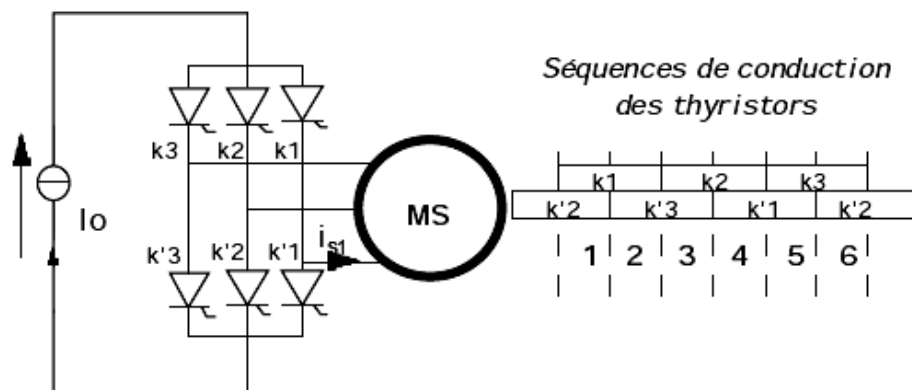


Figure 9

A chaque séquence de conduction, le champ statorique a une direction fixe et seul le champ rotorique se déplace à la vitesse du rotor.

Sur la Figure 10, nous avons représenté, dans le cas d'une machine bipolaire ($p = 1$), les positions des vecteurs H_s et H_r pour deux séquences de fonctionnement :

- séquence 1 : $i_{s1} = + I_o$; $i_{s2} = - I_o$; $i_{s3} = 0$.
- séquence 2 : $i_{s1} = + I_o$; $i_{s2} = 0$; $i_{s3} = - I_o$.

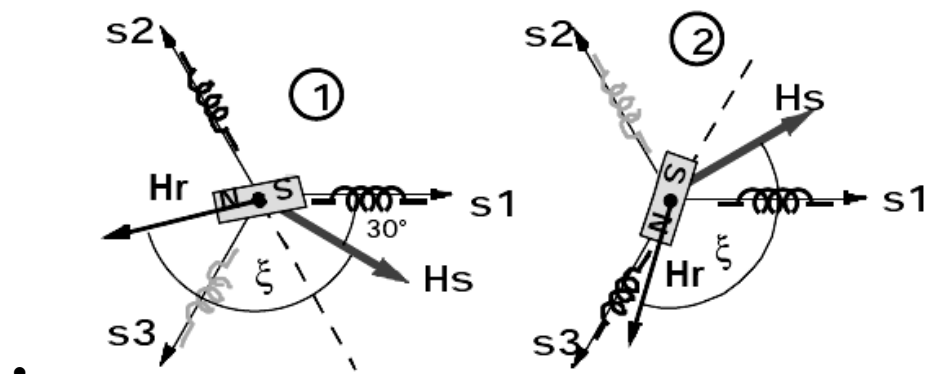


Figure 10

Le couple électromagnétique s'exprime par la relation : $C_{EM} = k \cdot H_s \cdot H_r \sin \zeta$ et comme l'angle ζ évolue entre deux commutations à cause du déplacement du rotor, il y a donc une ondulation importante du couple électromagnétique (Fig. 11). Ceci peut être un inconvénient majeur dans certaines applications où la charge entraînée présente une faible inertie.

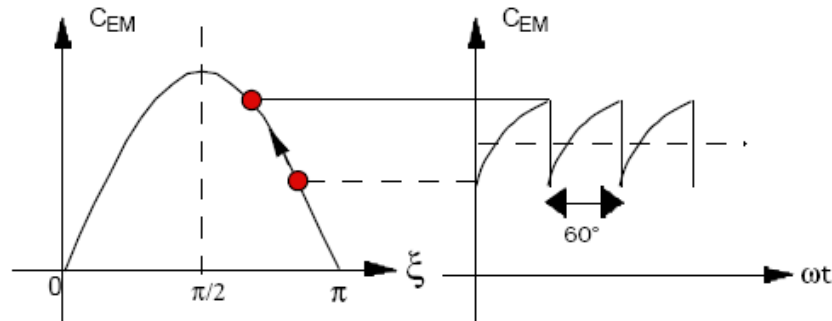


Figure 11

Pour maintenir toujours l'angle ζ dans la même plage de variation et obtenir ainsi un couple à valeur moyenne non nulle, il faut que le passage d'une séquence à une autre s'effectue en fonction du déplacement du rotor. Ainsi, pour passer de la séquence 1 à la séquence 2, il faut attendre que le rotor ait tourné de 60° (machine bipolaire) pour amorcer le thyristor $k'3$ et commuter ainsi le courant I_o de la phase 2 vers la phase 3. C'est le principe de l'autopilotage de la machine.

A.2.3 : Autopilotage de la commande des thyristors.

Lorsqu'on connecte un pont à thyristors sur un réseau, les ordres d'amorçage des thyristors sont générés à partir des tensions de ce réseau. Dans le cas où l'on utilise un pont à thyristors pour alimenter une machine synchrone, c'est le déplacement du rotor qui va permettre de générer les commandes des thyristors. Le capteur de position du rotor peut être très rudimentaire puisqu'il faut générer $6.p$ ordres d'amorçage lorsque le rotor effectue un tour complet. La figure 12 illustre le principe de fonctionnement du capteur dans le cas d'une machine bipolaire ($p = 1$).

Le capteur de position est constitué d'un disque solidaire du rotor et d'un dispositif opto-électronique lié au stator. Le dispositif opto-électronique comprend six ensembles diodes électroluminescentes - photo-transistors disposés conformément à la figure 12. Lorsque qu'une diode éclaire un photo-transistor, le thyristor correspondant est amorcé. Le disque lié au rotor possède une encoche de 120° afin de générer les ordres de commande des thyristors au fur et à mesure du déplacement du rotor.

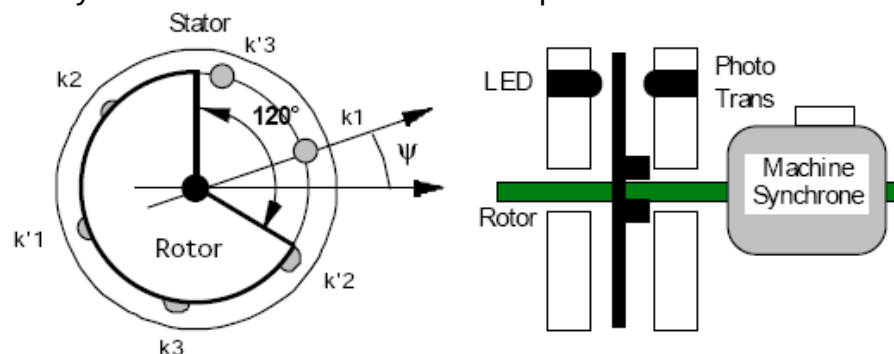


Figure 12

Le dispositif opto-électronique lié au stator peut être décalé de façon à déphaser les ordres de commandes des thyristors par rapport à la position de la roue polaire ce qui permet de contrôler le déphasage ψ entre courant et FEM sur chaque phase. Dans les montages industriels, l'angle ψ est contrôlé grâce à une commande électronique qui déphase les signaux générés par le capteur de position.

Pour assurer le fonctionnement en commutation naturelle du pont à thyristors, il faut imposer un angle ψ suffisant pour que les courants par phase soient en avance sur les tensions statoriques correspondantes. Le diagramme de Fresnel de la figure 13 illustre le fonctionnement de l'ensemble convertisseur-machine. Les courants statoriques ne sont pas sinusoïdaux et I_{sf} représente donc leur composante fondamentale (Fig. 7).

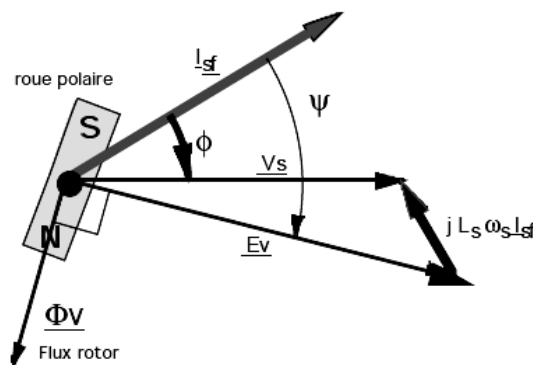


Figure 13

Sur ce diagramme, nous voyons bien qu'il faut régler l'angle ψ de sorte que I_{sf} reste en avance sur la tension statorique V_s . Au paragraphe A-2-1 on a vu que dans un pont de Graëtz connecté sur un réseau (ex : 380 V - 50 Hz), la commande des thyristors est synchronisée par rapport aux tensions entre phases et impose le déphasage tension-courant sur chaque phase ($\Phi = \lambda - \pi$).

Dans le cas de la machine synchrone autopilotée, la commande des thyristors est élaborée en fonction de la position de la roue polaire et l'angle ψ représentant le déphasage tension-courant au stator n'est plus directement contrôlé.

En effet, la figure 13 montre qu'avec un angle ψ constant, l'angle Φ diminue lorsque l'amplitude de I_{sf} augmente. Si l'angle Φ devient supérieur à $-\omega_s t_q$ (cf A-2-1), la commutation naturelle des thyristors n'est plus possible et les courants dans les phases (et donc le couple électromagnétique) de la machine ne sont plus contrôlés. Avec des thyristors pour application secteur ($f = 50$ Hz) il faut que $\Phi \leq -30^\circ$.

A.2.4 : Stratégie de contrôle du couple électromagnétique.

Au paragraphe A-1, nous avons vu que le couple électromagnétique s'exprime par la relation : $C_{EM} = 3 p \Phi_v I_s \cos \psi$ et qu'il fallait donc imposer l'amplitude du courant I_s et contrôler l'angle ψ . Dans le cas de l'alimentation de la machine synchrone par un pont de Graëtz à thyristors, l'amplitude du fondamental des courants statoriques, notée I_{sf} , dépend du courant continu I_o (cf A-2-1) et le couple électromagnétique s'exprime alors par :

$$C_{EM} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} p \Phi_v I_o \cos \psi$$

Pour assurer la commutation naturelle des thyristors, il faut que l'angle ψ soit réglé de façon à ce que le courant I_{sf} soit toujours en avance sur la tension V_s . Il est donc impossible de fonctionner avec $\psi = 0$ ($\cos \psi = 1$) et il faut ainsi déclasser la machine qui ne peut plus fournir son couple nominal.

En pratique, il est possible d'asservir le réglage de l'angle ψ en fonction du courant absorbé par la machine de sorte que Φ garde sa valeur minimale.

Si les thyristors sont considérés comme des interrupteurs parfaits ($t_q = 0$), le déphasage ψ entre I_{sf} et V_s peut être nul et nous pouvons alors raisonner sur le diagramme de Fresnel de la figure 14.

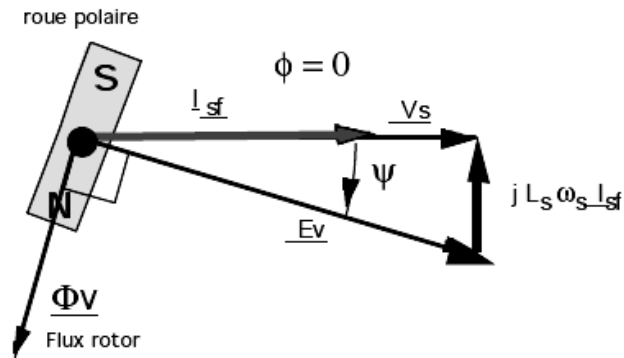


Figure 14

Ainsi, nous avons :

$$L_s \omega_s I_{sf} = E_v \sin \psi$$

L'angle ψ doit être réglé de telle sorte que :

$$\sin \psi = \frac{L_s I_{sf}}{\Phi_v}$$

Le couple électromagnétique s'exprime alors par :

$$C_{EM} = 3 p \Phi_v I_{sf} \sqrt{1 - \left(\frac{L_s I_{sf}}{\Phi_v} \right)^2}$$

La figure 15 illustre l'évolution du couple électromagnétique en fonction du courant I_{sf} pour différents cas.

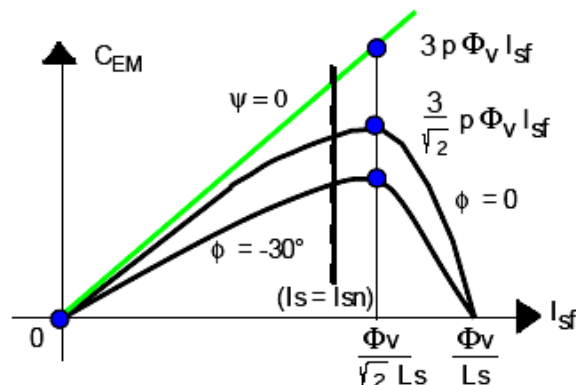


Figure 15

Lorsque $\psi = 0$, le couple électromagnétique est proportionnel à l'amplitude du courant I_{sf} ($C_{EM} = 3 p \Phi_v I_{sf}$). Lorsque le déphasage Φ est nul, le couple électromagnétique passe par un maximum pour une valeur de $I_{sf} = \Phi_v / \sqrt{2} L_s$.

Cette valeur est généralement supérieure au courant nominal de la machine. En pratique, il est nécessaire de maintenir l'angle α à -30° à cause du t_q des thyristors ce qui entraîne une diminution supplémentaire du couple électromagnétique par rapport au fonctionnement à $\Phi = 0$.

A.2.5 : Réalisation de l'ensemble convertisseur-machine.

La figure 16 représente le convertisseur complet permettant l'alimentation à fréquence variable d'une machine synchrone à partir d'un réseau alternatif qui peut être monophasé ou triphasé.

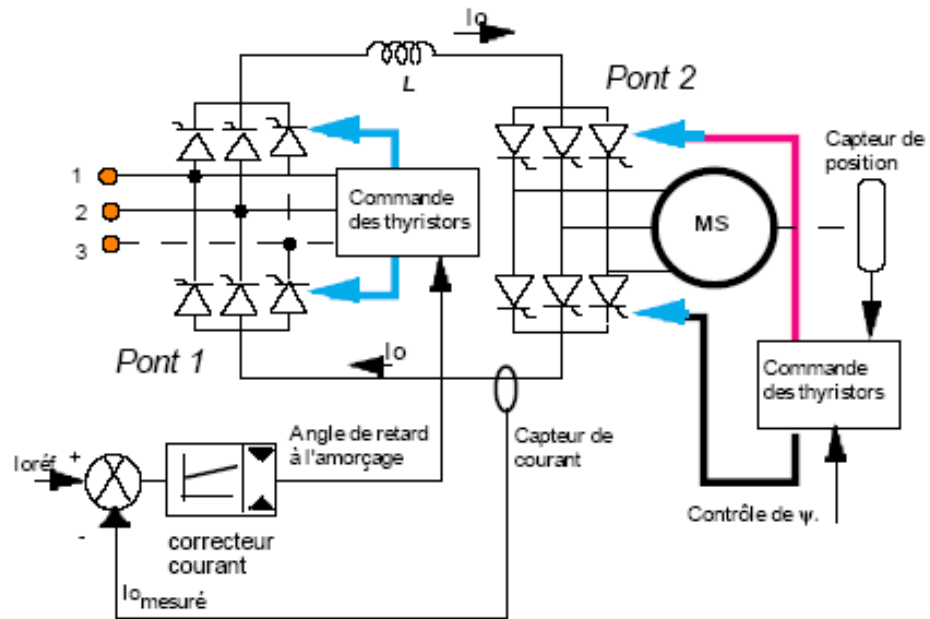


Figure 16

Jusqu'à présent, on a considéré que l'ensemble machine synchrone - pont à thyristors était alimenté par une source de courant continu I_o dont l'amplitude doit être variable afin de contrôler le couple électromagnétique.

Pour réaliser la source de courant, on utilise généralement un pont de Graetz à thyristors (pont n°1) connecté au réseau alternatif et associé à une bobine de lissage du courant. La commande des thyristors, synchronisée sur le réseau alternatif, est asservie de façon à ce que le courant en sortie du pont suive la valeur de consigne $I_{oréf}$. Comme nous l'avons vu précédemment, la commande du pont n°2 est élaborée en fonction de la position du rotor de la machine synchrone. Le dispositif de la figure 16 permet donc de contrôler le couple électromagnétique de la machine synchrone à l'aide de deux variables : I_o et ψ . Si le couple électromagnétique est imposé, la vitesse de rotation et donc la fréquence des courants statoriques de la machine synchrone dépendent de la caractéristique mécanique de la charge entraînée (Fig.17) puisqu'en régime permanent on a : $C_{EM} \approx C_r$.

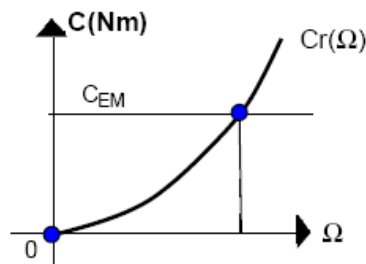


Figure 17

La structure de la figure 16 est totalement réversible :

- Lorsque la machine synchrone fonctionne en moteur, le pont n°2 fonctionne en onduleur tandis que le pont n°1 fonctionne en redresseur et absorbe de la puissance sur le réseau d'alimentation.
- Lorsque la machine synchrone fonctionne en générateur, le pont n°2 fonctionne en redresseur tandis que le pont n°1 fonctionne en onduleur et renvoie de la puissance au réseau d'alimentation.
- Quel que soit le fonctionnement de l'ensemble, le courant I_o ne change jamais de signe et les tensions moyennes aux bornes de chaque pont sont égales en régime permanent (la tension moyenne aux bornes d'une inductance est nulle en régime permanent).

A.2.6 : Asservissement de vitesse de la machine synchrone autopilotée.

Le diagramme structurel de la figure 16 nous a permis de mettre en évidence le principe de contrôle du couple électromagnétique de la machine synchrone autopilotée. Pour asservir la vitesse de rotation, on va généralement procéder comme pour une machine à courant continu en réalisant une régulation "cascade":

- Une boucle de régulation "interne" permet de contrôler le couple électromagnétique.
- Une boucle de régulation "externe" permet de générer la consigne de couple de la boucle "interne" de sorte qu'à la vitesse de rotation de consigne il y ait équilibre du système ($C_{EM} = C_r$).

Il est ici important de se rappeler que dans le cas d'une machine à courant continu, le couple électromagnétique est uniquement fonction du courant d'induit (à flux constant). Dans le cas de la machine synchrone autopilotée, le couple électromagnétique est fonction de I_o et ψ . Il faut donc :

- soit maintenir l'angle ψ constant et tolérer une diminution importante du couple électromagnétique indépendamment de l'amplitude de I_o ,
- soit ajuster l'angle ψ en fonction de l'amplitude de I_o et optimiser ainsi le couple électromagnétique en maintenant l'angle ψ voisin de -30° (Fig. 15).

Le couple électromagnétique de la machine synchrone autopilotée s'exprimant par la relation :

$$C_{EM} = \frac{3\sqrt{5}}{\pi} p \Phi_v I_o \cos\psi$$

où le courant I_o ne change jamais de signe, c'est donc le réglage de ψ qui détermine le signe du couple électromagnétique :

- Si $|\psi| < \pi/2$ alors $C_{EM} > 0$.

- Si $|\psi| > \pi/2$ alors $C_{EM} < 0$.

A partir de ces remarques, il est possible de concevoir le diagramme structurel de la figure 18 pour réaliser l'asservissement de vitesse de la machine synchrone. La valeur ψ tient compte de l'amplitude du courant I_o et du signe de $C_{EM\text{réf}}$.

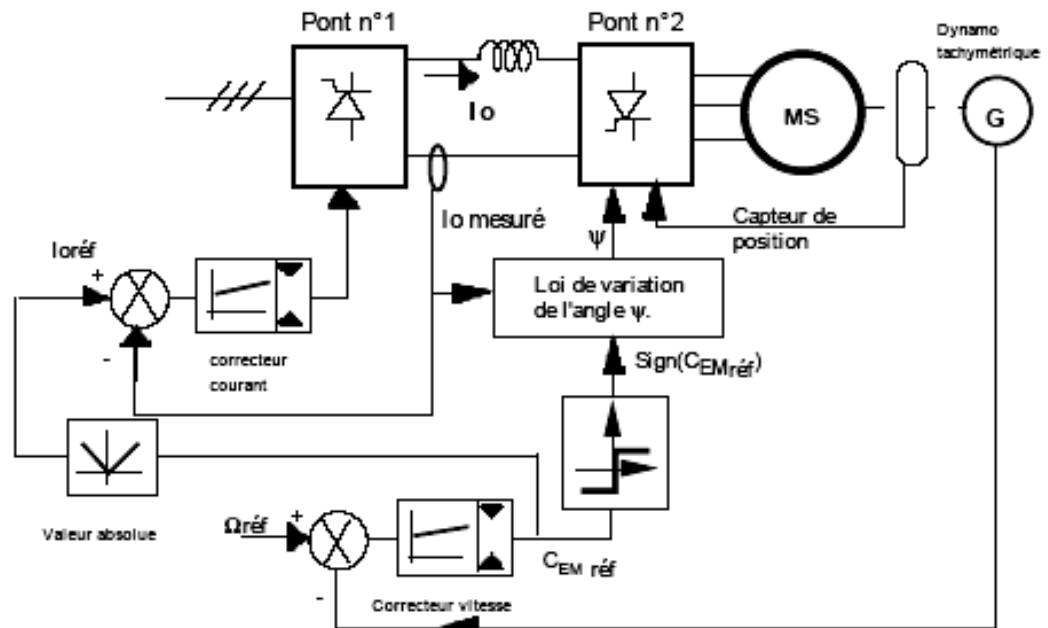


Figure 18

Remarque : Afin de ne pas compliquer le schéma de la figure 18, nous avons volontairement omis le dispositif permettant le démarrage de la machine synchrone. En effet pour des vitesses de rotation inférieures à 10% de la vitesse nominale, les tensions statoriques sont trop faibles pour assurer le blocage correct des thyristors du pont n°2. Il faut donc rajouter un dispositif de commutation forcée des thyristors (exemple figure 19) afin d'assurer à basse vitesse la commutation correcte des courants dans les phases de la machine.

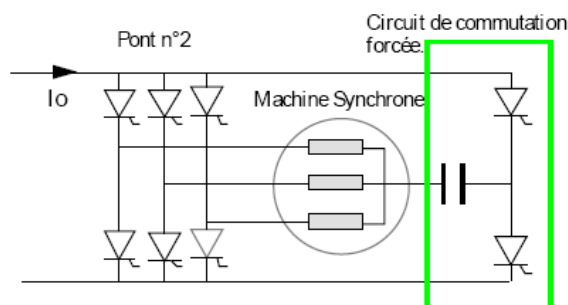


Figure 19

A.2.7 : Conclusions

Le montage que nous venons d'étudier a l'avantage d'utiliser des thyristors qui sont des composants robustes, bon marché et qui fonctionnent ici en commutation naturelle (excepté à basse vitesse).

L'utilisation des thyristors impose toutefois un déclassement de la machine vis à vis du couple nominal ($\psi \neq 0$). Les thyristors permettant de contrôler des puissances élevées (jusqu'à qq 10 MW), ce montage est notamment utilisé en traction électrique. Pour des applications où la charge mécanique présente une faible inertie, une telle structure est mal adaptée puisqu'il y a une ondulation importante sur le couple électromagnétique. Afin de supprimer les ondulations de couple, il faut alimenter la machine synchrone par des courants sinusoïdaux grâce à un onduleur de tension commandé en Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI).

A.3 : Variateurs à onduleurs de tension fonctionnant en MLI.

On utilise l'association d'un onduleur de tension à commande MLI et d'une machine synchrone, le plus souvent à aimants permanents, dans les domaines d'application exigeant des performances dynamiques très élevés : usinage de précision, production automatique, aéronautique et spatial, par exemple. Les puissances mises en jeu vont habituellement du kilowatt à quelques centaines de kilowatts.

Obtention de la réversibilité

L'onduleur de tension est naturellement réversible en tension et en courant de son côté alternatif. Il permet la marche du moteur dans les quatre quadrants du plan couple-vitesse pour autant que la source qui l'alimente soit réversible en courant.

Si l'onduleur est alimenté par une batterie d'accumulateurs, celle-ci constitue une source réversible en courant et la marche dans les quatre quadrants ne pose aucun problème.

Mais dans la plus part des applications industrielles, la tension continu à l'entrée de l'onduleur est obtenue à partir du réseau par redressement et filtrage.

➤ Si on utilise un redresseur à diodes qui est non réversible en courant, il faut placer à l'entrée de l'onduleur un système de dissipation qui permet d'absorber l'énergie renvoyée par l'onduleur lors de la marche dans les quadrants 2 et 4.

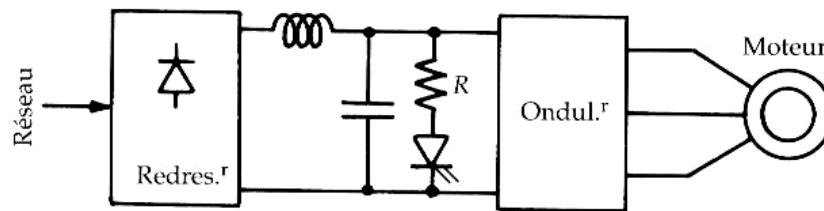


Figure 20

Ce système est formé d'une résistance R dont on a peut faire varier la valeur apparente par hachage.

➤ Si l'on veut récupérer en l'injectant dans le réseau la puissance renvoyée par l'onduleur lorsque la machine fonctionne en génératrice, on peut utiliser deux redresseurs (voir la figure 21). Le première $R_{ed.1}$ fonctionnant à α voisin de 0, fournit la tension U quand la valeur moyenne de I du courant i (et donc I_d) est positive. Le second $R_{ed.2}$, fonctionnant à α voisin de π , fournit la tension U , encore positive, quand I et I_d sont négatifs.

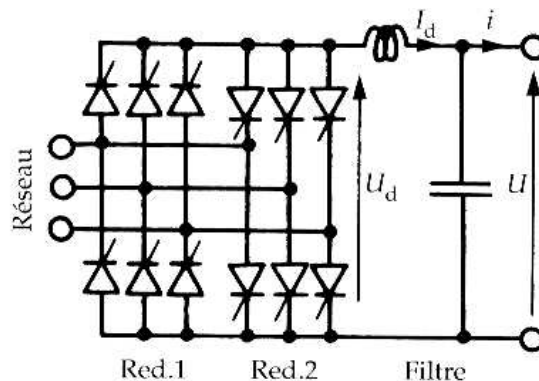


Figure 21

On peut utiliser un seul redresseur et un inverseur (voir la figure 22). Pour la marche en moteur T_{hA} et $T_{h'A}$ sont passants : U_d et U , I et I_d sont positifs. Pour le freinage, on rend T_{hB} et $T_{h'B}$ conducteurs et on commande le redresseur pour que U_d soit négative : U et I_d sont positifs, I et U_d sont positifs.

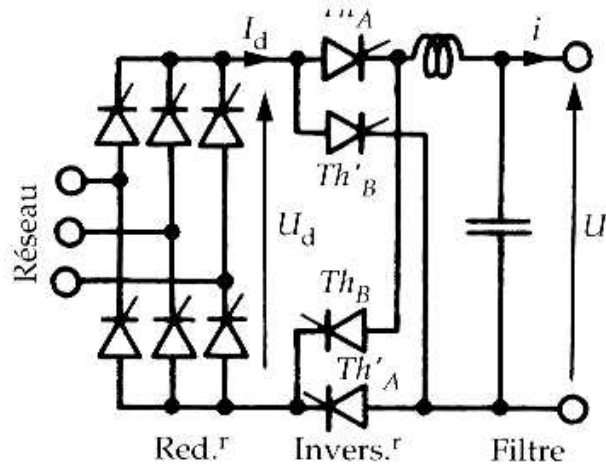


Figure 22

On utilise de plus en plus des redresseurs à modulation de largeur d'impulsions (MLI) qui permettent d'élever le rang des harmoniques des courants pris au réseau et de travailler à $\cos \varphi = 1$. L'emploi d'un redresseur de courant qui a la structure d'un onduleur de tension conduit (voir figure 23) à une structure entièrement symétrique.

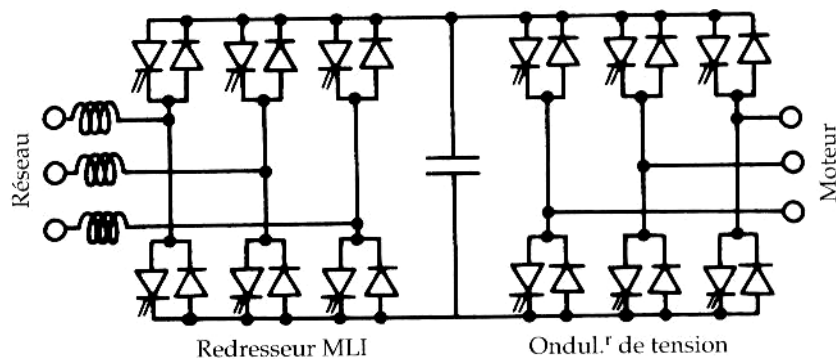


Figure 23

A.3.1 : Rappel - Onduleur de tension MLI.

L'onduleur de tension MLI triphasé (Fig. 25) permet l'échange d'énergie entre une source de tension continu et une charge inductive triphasée. Il est constitué de trois bras utilisant des interrupteurs à trois segments, bidirectionnels en courant et commandés à l'amorçage et au blocage.

Les interrupteurs peuvent être réalisés, suivant la puissance à contrôler, avec des transistors MOS ou bipolaire, des IGBT ou des GTO associés à une diode en antiparallèle pour obtenir la réversibilité en courant.

Sur chaque bras, le rapport cyclique de la commande des interrupteurs est modulé sinusoïdalement à une fréquence f qui est très inférieure à la fréquence de commutation des interrupteurs f_c ($f_c > 10$ à $100 f$).

Pour la phase 1 par exemple, la valeur moyenne de la tension V_{1M} est fonction du rapport cyclique R et a pour expression :

$$V_{1Mo} = \frac{E}{2} (2R - 1)$$

Si le rapport cyclique R est tel que :

$$R = \frac{1}{2} + m \sin \omega t$$

(m : indice de modulation, inférieur à 0,5)

alors la valeur moyenne de $V_{1M}(t)$ varie sinusoïdalement et s'exprime par :

$$V_{1Mo}(t) = m E \sin \omega t$$

$V_{1Mo}(t)$ correspond ici au fondamental de la tension $V_{1M}(t)$ noté $V_{1f}(t)$.

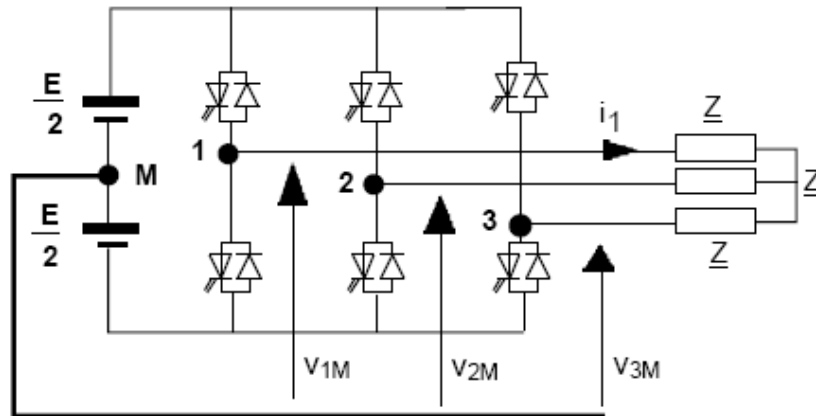


Figure 25

En fonctionnement normal, les composantes fondamentales des tensions V_{1M} , V_{2M} , V_{3M} forment un système triphasé équilibré dont M est le point Neutre.

La commande en Modulation de Largeur d'Impulsion permet de générer en sortie de l'onduleur une tension dont l'allure (pour la phase 1) est précisée à la figure 26. Si la période de commutation des interrupteurs T_c est très petite devant la période T du signal de modulation, les harmoniques de tension de rang bas sont supprimés et les courants de sortie de l'onduleur sont quasi-sinusoïdaux (la charge qui doit être inductive permet le lissage des courants).

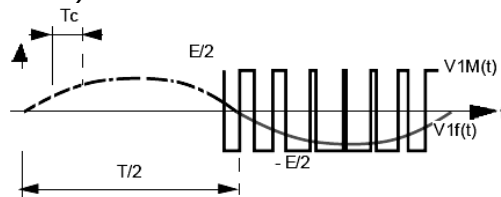


Figure 26

A.3.2 : Autopilotage de la machine synchrone par un onduleur de tension MLI.

On réserve habituellement le qualificatif « d'autopiloté » au moteur synchrone alimenté par un onduleur de courant commuté par machine.

Cette solution est utilisée pour la réalisation d'entraînement de forte et très forte puissance, comme les variateurs à cycloconvertisseurs. Mais elle permet d'atteindre des vitesses élevée contrairement à ce qui se passe avec un cycloconvertisseur et elle nécessite un nombre des thyristors nettement plus faible. En revanche, la régulation est plus complexe et le fonctionnement à très basse vitesse est plus délicat.

a) Principe

Le redresseur à thyristors (figure 27) débite un courant i_d dont une inductance de lissage réduit l'ondulation.

L'onduleur de courant, formé par les 6 thyristors Th_1, Th_2, Th_3 et Th'_1, Th'_2, Th'_3 fournit aux phases du moteur les courants i'_A, i'_B, i'_C . Aux tensions des sorties v'_A, v'_B, v'_C de l'onduleur correspond la tension u à son entrée.

Un capteur tournant avec le rotor indique la position des pôles du rotor par rapport aux phases du stator. L'information qu'il fournit est utilisée pour fixer la position ou il convient de débloquent chacun des thyristors de l'onduleur.

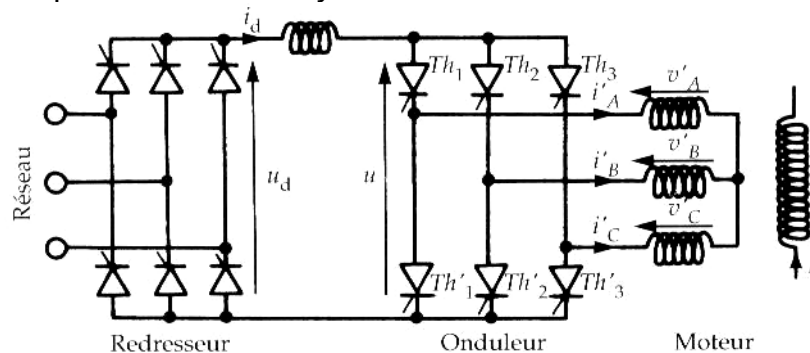


Figure 27

b) Rôle des amortisseurs

➤ Lorsque la machine synchrone est alimentée par un **onduleur de tension**, les tensions appliquées à ses enroulements statoriques sont formées de créneaux rectangulaires et ont un taux d'harmoniques élevé. Le courant harmonique d'un harmonique de tension est d'autant plus réduit que **plus grande est la réactance** que lui présente la machine.

➤ Pour l'alimentation par un **onduleur de courant** c'est le contraire. On impose à la machine des courants formés de créneaux donc très riches en harmoniques. Pour qu'un courant harmonique ne produise pas une tension harmonique trop importante, il faut **réduire la réactance** que lui présente la machine. A cet effet on munit le rotor d'amortisseur.

c) Autopilotage. Autocommutation

Pour qu'à courants dans l'induit et dans l'inducteur donnés, le couple soit maximal, il faudrait que les créneaux des courants injectés par l'onduleur soient centrés sur les sommets des sinusoïdes des forces électromotrices, autrement dit il faudrait que le déphasage Ψ entre le fondamental du courant et le f.e.m. soit égal à 0 ou à π suivant que la machine marche en moteur ou en génératrice.

En réalité, il faut tenir compte du déphasage ϕ entre le fondamental du courant et la tension aux bornes nécessaire pour que la machine assure les commutations et du déphasage δ entre la tension et la f.e.m.

d) Réversibilité

Pour inverser le couple, c'est-à-dire passer du quadrant 1 au quadrant 2, il suffit de faire passer ϕ d'une valeur positive faible à une valeur positive légèrement inférieure à π . Le courant i_d reste positif, c'est la valeur moyenne de la tension u_d ou u qui s'inverse : l'onduleur fonctionne en redresseur vis-à-vis de la machine synchrone et le redresseur en onduleur non autonome vis-à-vis du réseau.

- Le régulateur de vitesse (voir figure 28) fournit une consigne du courant i_c image du couple que le moteur doit développer. La valeur absolue de i_c fixe celle du courant i_d , son signe donne la valeur qu'il convient de donner à φ (φ légèrement positif ou légèrement inférieur à π suivant que i_c est positif ou négatif). La valeur de i_d sert de référence pour le régulateur de courant qui commande le redresseur.
- Les valeurs de i_d et de φ sont utilisées pour construire le diagramme vectoriel de la figure suivant :



A.3.3 Conclusion:

OFPPT/DRIF	61
-------------------	-----------

le montage à thyristors. Les courants statoriques sont ici quasi-sinusoïdaux, ce qui permet de créer un champ tournant statorique circulaire ($H_s = k I_s e^{j\phi_s}$). Ainsi, il n'y a pas d'ondulation sur le couple électromagnétique contrairement au montage utilisant des thyristors. Le fait de pouvoir travailler avec un angle ϕ nul, permet d'obtenir le couple maximum de la machine. L'emploi de cette structure en forte puissance est limité par les performances des interrupteurs de l'onduleur MLI. Aujourd'hui les GTO permettent toutefois de contrôler des puissances de l'ordre du MW avec une fréquence de découpage de quelques centaines d'Hertz. L'inconvénient majeur de la structure étudiée est évidemment la complexité du circuit de commande.

A.4 : Variateurs à cycloconvertisseur

➤ Principe du cycloconvertisseur

La figure 31 donne le schéma de principe d'un cycloconvertisseur triphasé. Chaque phase du récepteur est alimentée par l'une ou l'autre des tensions redressées fournies par les deux redresseurs, montés en parallèle inverse, à la sortie desquels elle est placée.

Un redresseur tous thyristors délivre une tension de sortie u_d dont on peut varier la valeur moyenne entre $U_{d \max}$ et $-U_{d \max}$ par action sur le retard à l'amorçage α des thyristors qui le compose.

On peut par une modulation convenable des angles α , former la tension u_d de portions des sinusoïdes telles que la « valeur moyenne » de u_d varie périodiquement suivant une loi sinusoïdale.

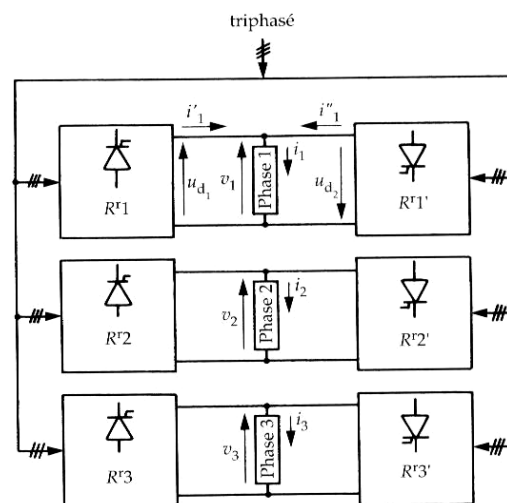


Figure 31

Ainsi la tension v_1 aux bornes de la phase 1 du moteur est-elle fournie par le premier redresseur $R'1$ quand le courant i_1 , qu'absorbe cette phase est positif.

Un deuxième redresseur $R'1'$ est nécessaire pour alimenter la phase 1 quand i_1 est négatif. Par action sur la commande des thyristors des deux redresseurs on fait évoluer v_1 suivant une sinusoïde, aux fluctuations dues à la nécessité d'utiliser les ondes fournies par le réseau près.

Exemple : Pour pouvoir obtenir une approximation suffisante des ondes sinusoïdales, on utilise d'ordinaire des ponts à 6 thyristors.

La figure 32 montre l'alimentation, à partir du réseau triphasé, d'une phase du moteur.

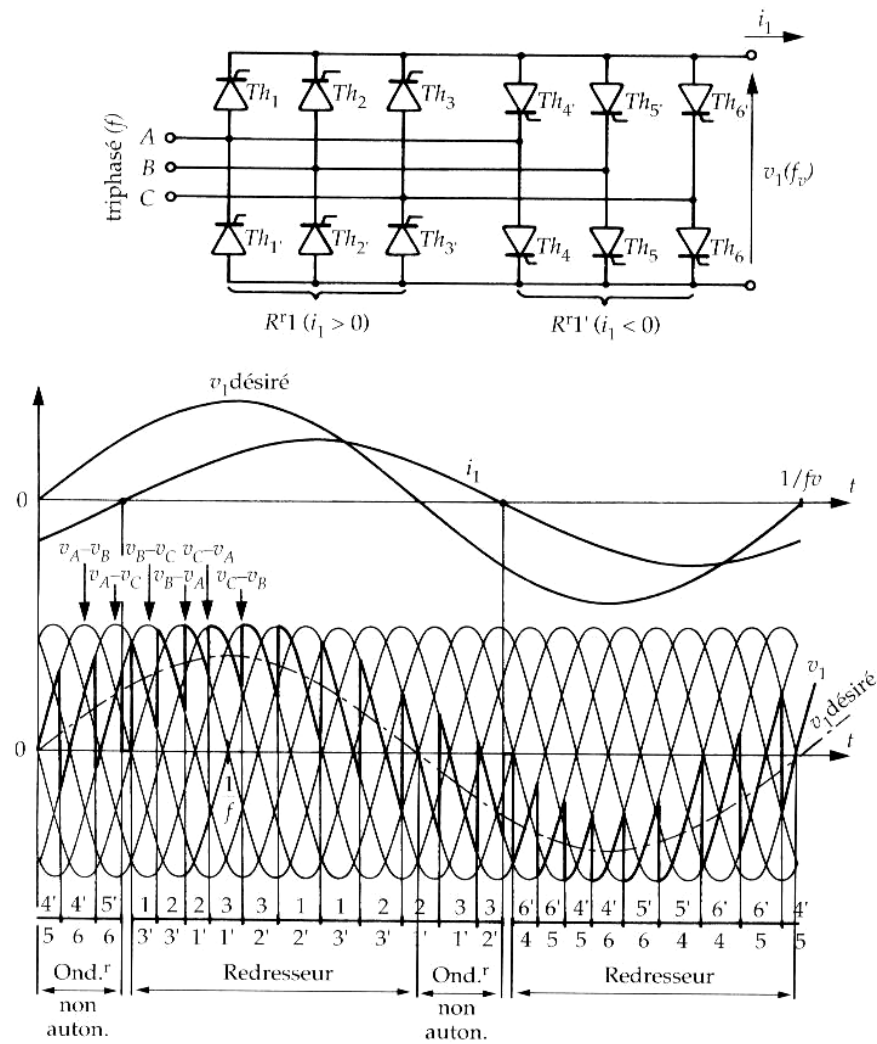


Figure 32

A.5 Conclusions

- L'association machine synchrone - pont à thyristors est aujourd'hui utilisée dans le domaine des fortes puissances ($P > \text{qq MW}$: Traction électrique, propulsion marine). Cette structure a notamment permis de faire de nets progrès par rapport aux entraînements réglés par moteur à courant continu dont la puissance était limitée par la présence du collecteur mécanique.
- L'association machine synchrone - onduleur de tension MLI est largement utilisée dans les entraînements de petites puissances ($\text{qq W} < P < \text{qq kW}$) et notamment en robotique.
- Les machines sont généralement à aimant permanent. A couple électromagnétique égal, les moteurs synchrones grâce à l'absence de collecteur mécanique, permettent des vitesses de rotations plus élevées que les moteurs à courant continu. De plus, du fait de l'absence de collecteur, les machines synchrones ont un moment d'inertie du rotor plus faible que les machines à courant continu ce qui permet d'améliorer les performances dynamiques des systèmes entraînés.
- Dans la gamme des puissances moyennes ($\text{qq } 10 \text{ kW} < P < \text{qq } 100 \text{ kW}$), l'utilisation des machines synchrones est peu courante. C'est ici le domaine de la machine asynchrone dont le coût de fabrication, dans le cas du rotor à cage, est

environ deux fois plus faible que pour une machine synchrone. Aujourd'hui l'asservissement de vitesse d'un moteur asynchrone où le couple électromagnétique est contrôlé par la méthode du flux orienté a les mêmes performances qu'un asservissement numérique utilisant une machine synchrone autopilotée ou une machine à courant continu.

III.3 : Variateurs pour les moteurs asynchrones

B.1 Rappel sur le moteur asynchrone triphasé

Le moteur asynchrone triphasé est formé d'un stator portant un bobinage triphasé à $2p$ pôles réuni à la source fournissant les tensions de fréquence f , d'un rotor polyphasé de même nombre des pôles dont les enroulements sont mis en court-circuit sur eux-mêmes.

Le plus souvent, l'enroulement rotorique est mis en court-circuit dès la construction. Il est alors réalisé sous la forme d'un « cage d'écureuil » : une barre dans chaque encoche, l'ensemble des barres étant relié par deux anneaux d'extrémité. Ce type de moteur correspond à **moteur à cage**.

On peut aussi placer dans les encoches du rotor un bobinage analogue à celui du stator. Les extrémités des trois phases sont alors reliés à trois bagues sur lesquelles frottent trois balais constituant les trois bornes fixes du rotor. Un tel moteur est dit à **rotor bobiné** ou à bagues. Avec cette solution on peut intervenir sur le rotor mais on perd les avantages en matière de coût de fabrication et de robustesse mécanique du moteur à cage.

a) Principe

Les courants statoriques créent un flux tournant à la vitesse synchrone $N_s = \frac{f}{p}$ (tr/s).

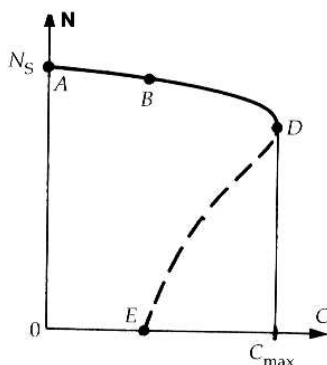
Ce flux balayant les enroulements rotoriques y induit des f.é.m. et des courants puisque le rotor est en court-circuit. L'action du flux sur ces courants qu'il a lui-même induits crée le couple.

b) Glissement : $g = \frac{N_s - N}{N_s}$

c) Fréquence rotorique : $f_R = g.f$

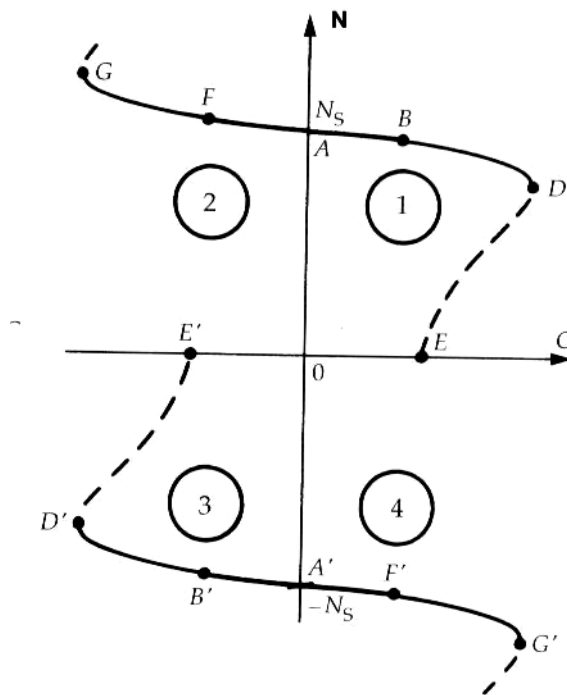
d) Caractéristiques mécaniques. Réversibilité

Si on alimente le moteur à tension V_1 et fréquence f constantes, par exemple par le réseau industriel, la caractéristique mécanique qui donne la vitesse N en fonction du couple C à l'allure représenté sur la figure suivante :



C est nul pour $g = 0$ ou $N = N_s$.

Dans des conditions normales de fonctionnement, le moteur travaille en régime permanent sur la partie AB de la caractéristique entre la marche à vide ($c = 0$) et le fonctionnement nominal qui correspond à un g glissement de quelques centièmes.



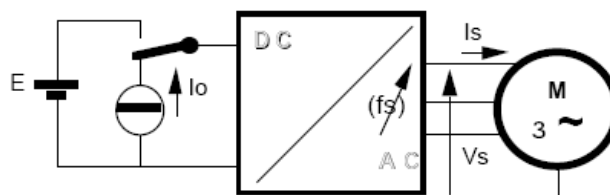
Si au lieu d'entraîner une charge, la machine asynchrone est entraînée, elle fonctionne en **génératrice asynchrone** avec un glissement négatif (branche AFG de la caractéristique mécanique sur la figure ci-contre). Le couple maximal de freinage est très voisin de couple moteur maximal.

Pour **inverser le sens de rotation**, il suffit d'inverser le sens de rotation du flux tournant en permutant deux phases au stator ou, ce qui revient au même, en alimentant le stator par un système inverse de tension au lieu d'un système direct (c'est qu'on peut faire avec un onduleur ou un cycloconvertisseur). Quand g va de 1 à 0 le point de fonctionnement décrit la partie E'D'B'A' de la caractéristique ci-contre. En génératrice, il se déplace sur A'F'G'.

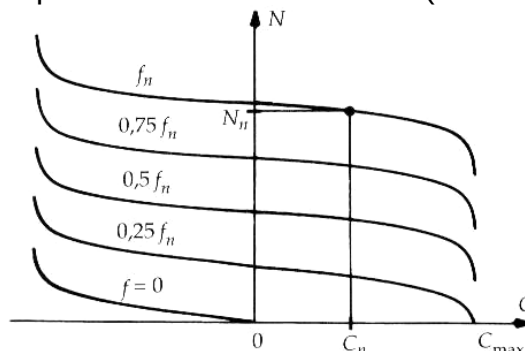
Le moteur peut donc fonctionner dans les quatre quadrants. Dans les quadrants 2 et 4, le freinage et un freinage par récupération. Mais, si le sens d'écoulement de la puissance active peut s'inverser, par contre dans les quatre quadrants de la machine consomme de la puissance active.

Fonctionnement à fréquence d'alimentation variable

L'alimentation à fréquence variable des machines asynchrones se fait à l'aide d'un convertisseur statique généralement continu - alternatif (voir figure ci-dessous). La source d'entrée peut être du type source de courant ou du type source de tension. En sortie du convertisseur, on contrôle l'amplitude des tensions ou des courants statoriques ainsi que leur fréquence f_s .



Si on fait varier la fréquence f d'alimentation en maintenant constante l'amplitude du flux d'entrefer Φ_e grâce à la constance du courant I_m qui le produit, la caractéristique couple-vitesse se déplace parallèlement à elle-même (voir la figure suivante).



On peut aussi obtenir le couple nominal C_n en moteur ou génératrice à toutes les vitesses allant de zéro à la vitesse nominale pour f allant de zéro à sa valeur nominale f_n .

B.2 : Machine asynchrone - onduleur MLI. Contrôle des tensions statoriques.

B.2.1 Principe de la commande en boucle ouverte.

A flux constant, le couple électromagnétique de la machine asynchrone ne dépend que de la pulsation ω_r .

Ainsi, pour différentes valeurs de la pulsation des grandeurs statoriques ω_s obtient-on une famille de caractéristiques Couple-Vitesse, $CEM = f(\omega)$, données sur la figure ci-dessous, qui peut être construite à partir de la figure 31 puisque $\omega = \omega_s - \omega_r$.

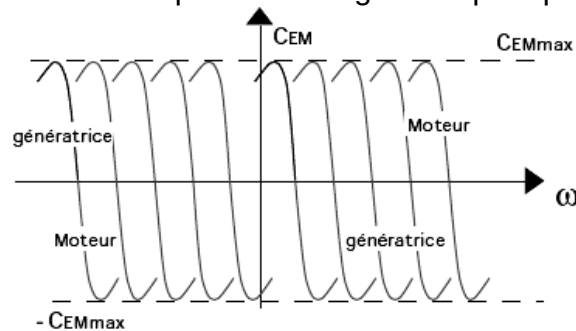


Figure 32

Dans la zone linéaire (faibles glissements), cette famille de caractéristiques Couple-Vitesse est tout à fait analogue à celle d'une machine à courant continu où la tension d'induit constitue le paramètre de réglage de la vitesse. Ainsi pour faire varier en boucle ouverte la vitesse d'une machine asynchrone doit-on faire varier la fréquence d'alimentation au stator tout en maintenant le flux constant.

Les réglages de tension et de fréquence au stator de la machine sont obtenus grâce à un onduleur de tension MLI (Fig. 33). Les composantes fondamentales des tensions statoriques forment un système triphasé équilibré. Leur valeur efficace V_s doit être réglée de façon à maintenir le flux statorique constant pour ne pas déclasser en couple la machine.

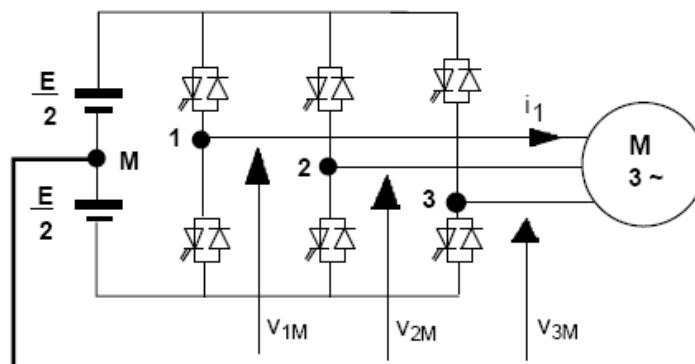


Figure 33

Ainsi, pour maintenir le flux Φ_s constant, il faut que la tension efficace V_s soit proportionnelle à la fréquence d'alimentation statorique :

$$\Phi_s = \frac{V_s}{\omega_s}$$

Toutefois, cette relation n'est pas valable pour des faibles valeurs de la pulsation ω_s car la chute de tension $R_s.I_1$ due à la résistance des enroulements du stator n'est plus négligeable devant le terme $L_s.\omega.I_0$ (Fig. 29). Aussi envisage-t-on sur la plupart des variateurs une compensation de cette chute de tension en augmentant l'amplitude des tensions statoriques pour les faibles valeurs de ω_s (Fig. 34) de façon à maintenir Φ_s constant. D'autre part, si un fonctionnement en survitesse de la machine asynchrone est envisagé, il n'est pas possible de dépasser la tension statorique nominale (claquage des isolants). Le flux Φ_s est alors diminué de même que le couple électromagnétique maximum (Fig. 34).

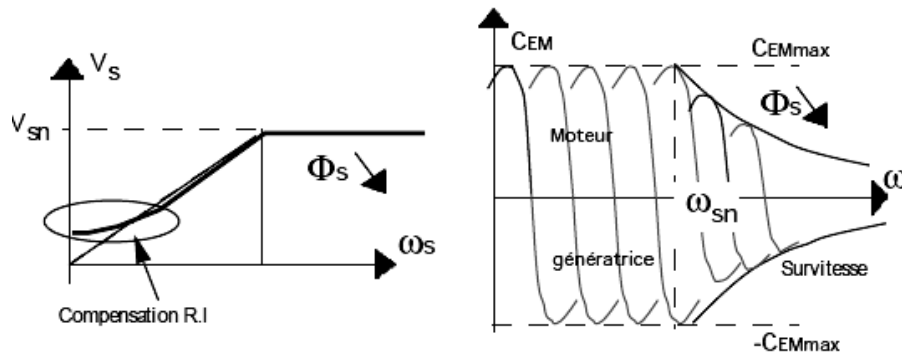


Figure 34

La commande en boucle ouverte ne permet pas de contrôler parfaitement la vitesse de rotation de la machine puisque à pulsation ω_s constante, la vitesse de rotation dépend du couple résistant de la charge entraînée (glissement) (Fig. 35).

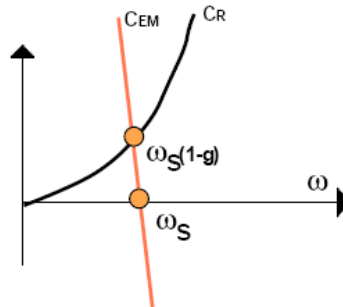
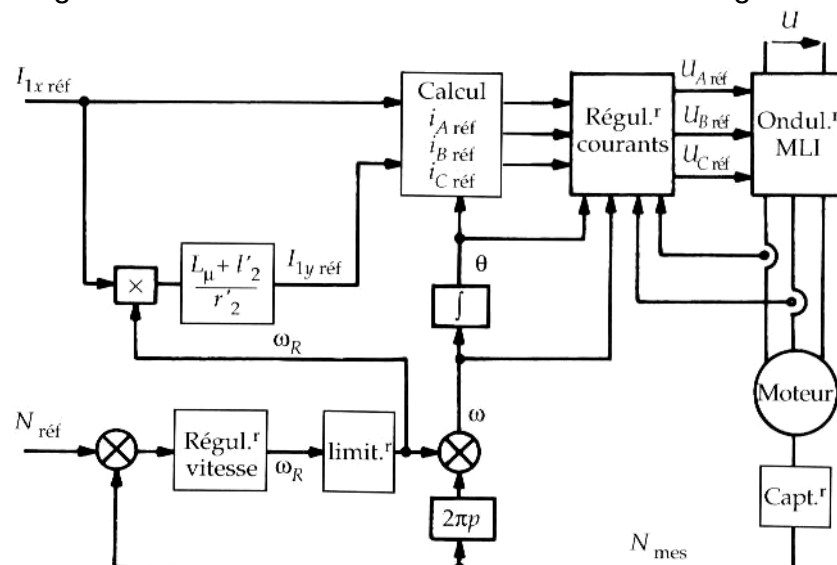


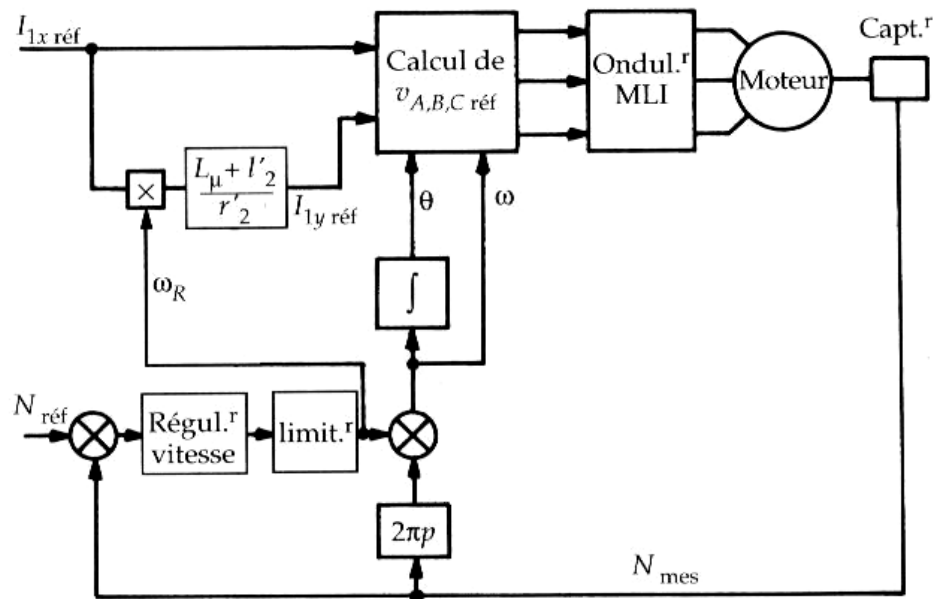
Figure 35

a) Modalités d'implantation

Le schéma de la figure suivante se déduit directement de la stratégie du réglage.



- Le régulateur de vitesse fournit la pulsation ω_R à donner aux grandeurs rotoriques ; la valeur de cette pulsation est limitée de façon à ce que le couple ne dépasse pas sa valeur nominale.
Cette pulsation est ajoutée à celle de $2\pi pN$ correspondant à la vitesse de rotation de manière à obtenir la pulsation ω des grandeurs statoriques. En intégrant ω on obtient θ . La valeur ω_R fixe la valeur de référence de I_{1y} . De I_{1x} , I_{1y} et θ on déduit les références des courants i_{1A} , i_{1B} , i_{1C} à fournir au moteur.
Le régulateur qui asservit les courants dans les enroulements à leurs valeurs de référence fournit les tensions à appliquer à la machine.
- On obtient les meilleures performances du régulateur de courant en formant les tensions de références par la somme des termes prédictifs basés sur les équations liant V_{1x} et V_{1y} aux courants et à ω d'une part, de termes rétroaction fixés par les écarts entre les courants de références et les courants mesurés d'autre part. D'où l'introduction dans ce régulateur de ω et θ pour calculer les termes prédictifs.
- Lorsque les performances dynamiques exigées sont relativement faibles, on peut se passer de la régulation des courants et se contenter d'appliquer au moteur les tensions calculées à partir des équations liant les tensions aux courants en prenant pour ces derniers leurs valeurs de références (voir la figure suivante).



- Dans les réalisations les plus simples, on remplace même le calcul de $v_{1Aréf.}$, $v_{1Bréf.}$, $v_{1Créf.}$ Par une simple loi de proportionnalité entre l'amplitude des tensions et leur pulsation. On a alors : $v_{1Aréf.} = k\omega \cos \theta$

Le schéma structurel de la figure 36 décrit le principe de commande de l'onduleur MLI. Les tensions $V_{1Mréf}$, $V_{2Mréf}$ et $V_{3Mréf}$ sont sinusoïdales. Elles sont générées par un oscillateur commandé en tension dont la fréquence de sortie est proportionnelle à la tension d'entrée $\omega_{sréf}$. L'amplitude V_s des tensions $V_{1Mréf}$, $V_{2Mréf}$ et $V_{3Mréf}$ est contrôlée grâce à des multiplieurs et tient compte de la loi $V_s = f(\omega_s)$ décrite figure 34.

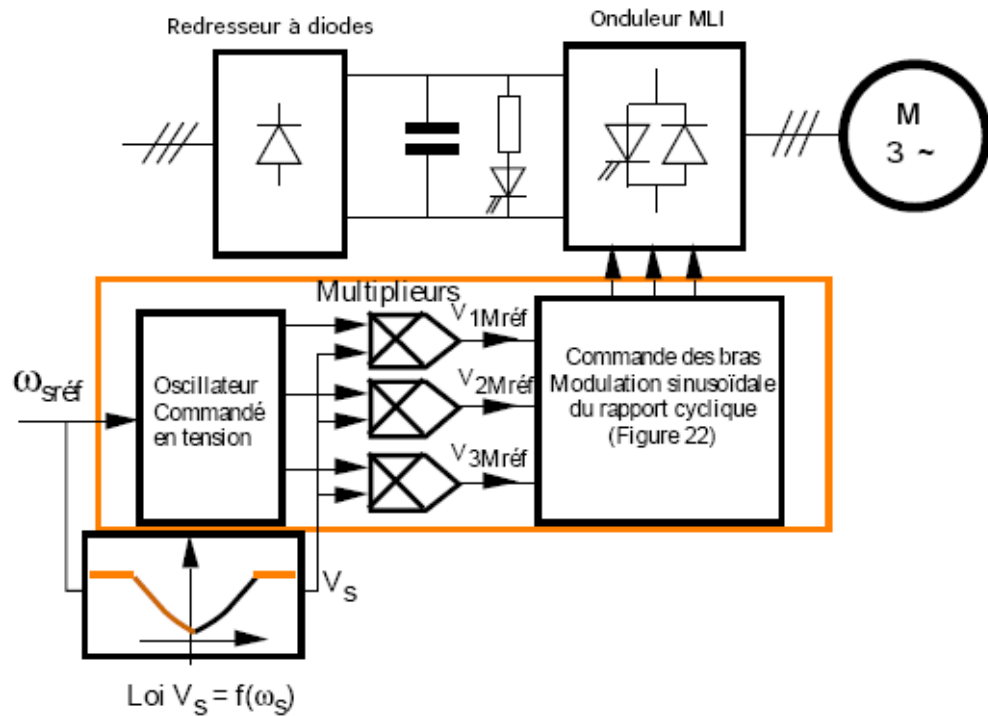


Figure 36

Le convertisseur complet utilise généralement un redresseur à diodes pour alimenter l'onduleur MLI à partir du réseau. A cause du redresseur à diodes, cette structure n'est pas réversible et il faut prévoir un dispositif de freinage rhéostatique lorsque la machine asynchrone fonctionne en génératrice.

B.2.3: Réalisation de l'asservissement de vitesse.

Afin d'asservir la vitesse de rotation, on rajoute une boucle externe qui, à partir de l'erreur de vitesse, permet d'augmenter la fréquence des tensions statoriques de façon à l'erreur de vitesse due au glissement (Fig. 37).

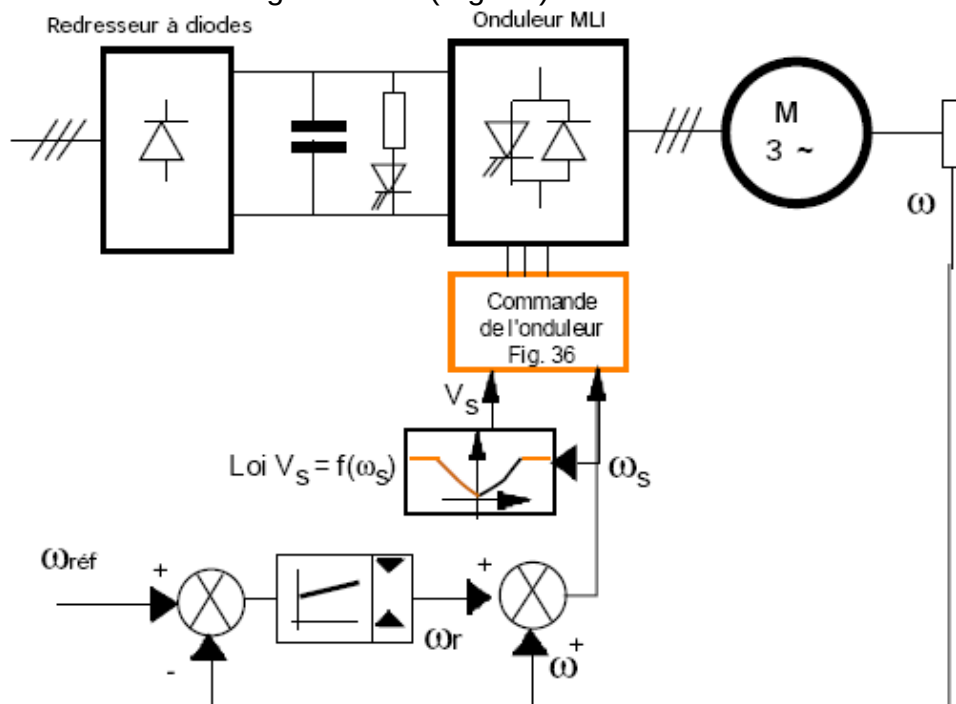


Figure 37

Le correcteur, généralement de type PI, permet d'estimer la pulsation rotorique. La tension de sortie du correcteur notée ω_r est additionnée à la tension image de la vitesse de rotation ω et ceci de façon à obtenir la valeur adéquat pour la pulsation statorique. La pulsation statorique est calculée par la relation : $\omega_s = \omega_r + \omega$. C'est l'autopilotage fréquentiel. **Elle est nécessaire à l'existence d'un couple électromagnétique à valeur moyenne non nulle.**

La sortie du correcteur PI est munie d'un dispositif écrêteur de façon à limiter la valeur de ω_r . Ainsi l'amplitude des courants statoriques est indirectement limitée (Fig. 38).

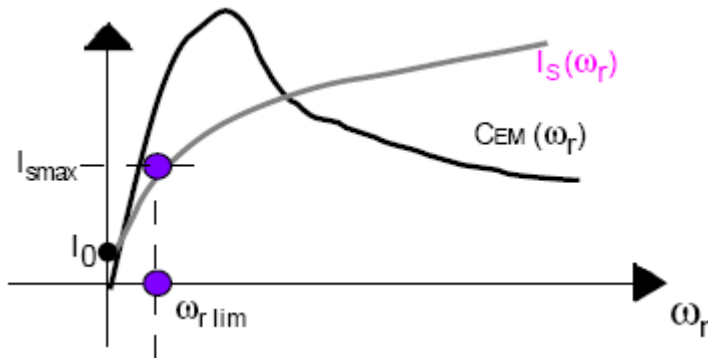


Figure 38

➤ Le contrôle de l'amplitude des courants statoriques est ici basé sur le modèle de Steinmetz de la machine asynchrone qui est uniquement valable en régime permanent. Lors des régimes transitoires, les valeurs instantanées des courants ne sont pas contrôlées.

➤ Afin d'éviter des surintensités importantes en régime transitoire, le gain Intégral du correcteur PI doit être augmenté. De ce fait les variations rapides de ω_r sont évitées mais au détriment de la dynamique du système asservi. Aussi préfère-t-on dans la plupart des cas asservir les courants de sortie de l'onduleur MLI de façon à contrôler parfaitement les valeurs instantanées des courants statoriques de la machine asynchrone.

B.3 : Machine asynchrone - Onduleur MLI. Contrôle des courants statoriques.

B-3-1 : Loi de commande.

Comme dans le cas de la machine synchrone, une boucle de courant permet de contrôler le courant en sortie de chaque bras de l'onduleur MLI.

Pour contrôler le couple électromagnétique de la machine asynchrone, il faut maintenir le flux statorique constant et contrôler la pulsation ω_r . Etant donné que la machine est ici alimentée en courant et non en tension, il est nécessaire de déterminer la loi de variation $I_s = f(\omega_r)$ qui permet de maintenir le flux Φ_s constant.

L'expression simplifiée de la loi $I_s = f(\omega_r)$ peut être trouvée à partir du schéma équivalent de la figure 30. Pour maintenir le flux Φ_s constant, il faut que le courant magnétisant I_0 soit constant ($\Phi_s = L_s I_0$). D'après le schéma équivalent de la figure 30, on a :

$$\underline{I_0} = \underline{I_s} \frac{\underline{Z}}{\underline{Z_0} + \underline{Z}} \rightarrow \underline{I_s} = \underline{I_0} \frac{\frac{R'_r}{g} + j (L_s + N_s) \omega_s}{\frac{R'_r}{g} + j N_s \omega_s}$$

Soit en module, sachant que :

$$\omega_r = g \omega_s : I_s = I_0 \sqrt{\frac{R'r^2 + (Ls + Ns)^2 \omega_r^2}{R'r^2 + Ns^2 \omega_r^2}}$$

La loi $I_s = f(\omega_r)$ est représentée par la courbe de la figure 39.

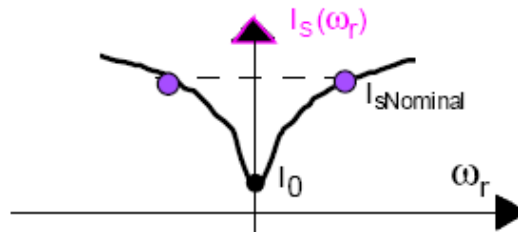


Figure 39

B.3.2 : Réalisation de l'asservissement de vitesse.

Le principe de l'asservissement de vitesse de la machine asynchrone est décrit par le schéma structurel de la figure 40.

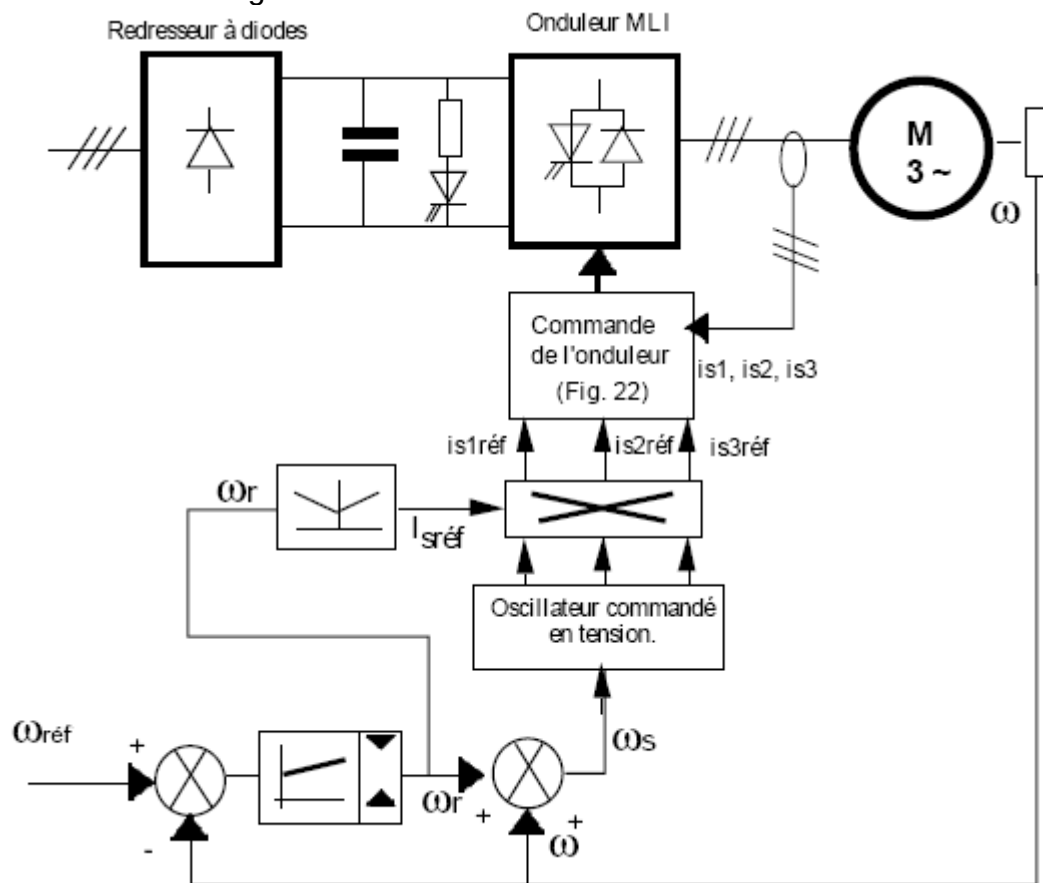


Figure 40

La pulsation rotorique ω_r est estimée grâce au correcteur PI. Pour déterminer la pulsation des courants statoriques, il faut additionner l'image de la vitesse de rotation et l'image de la pulsation rotorique. Ceci permet de réaliser l'autopilotage fréquentiel.

Etant donné que $\omega_r \ll \omega_s$, le capteur de vitesse utilisé doit être numérique (codeur incrémental) afin d'avoir une grande précision sur la mesure de ω .

La loi $i_s = f(\omega_r)$ décrite précédemment permet de fixer l'amplitude des courants de références $i_{s1\text{réf}}$, $i_{s2\text{réf}}$, $i_{s3\text{réf}}$ qui sont générés par un oscillateur commandé en tension. La commande de la figure 40 est complexe et est généralement réalisée en faisant appel aux techniques numériques.

B.3.3 : Convertisseur réversible.

Grâce aux GTO, l'onduleur MLI permet aujourd'hui la variation de vitesse de machine asynchrone jusqu'à des puissances de l'ordre du MW. Dans ces cas là, il est nécessaire de prévoir le freinage de la machine asynchrone en restituant l'énergie au réseau d'alimentation. Pour cela, il est possible de remplacer le redresseur à diodes par une structure onduleur MLI qui fonctionne en redresseur lorsque la machine asynchrone fonctionne en moteur et en onduleur lorsque la machine asynchrone fonctionne en génératrice (Fig. 41).

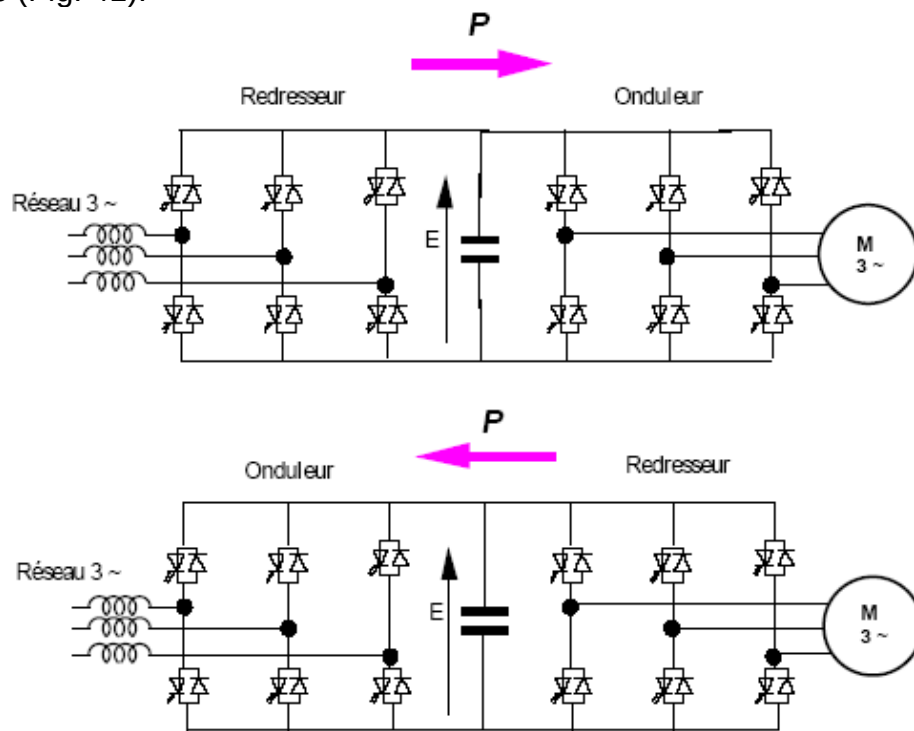


Figure 41

Les inductances connectées côté réseaux permettent le lissage des courants de ligne. Côté réseau, la structure onduleur MLI permet de prélever des courants quasi-sinusoïdaux en phase avec les tensions simples ; ce optimise le facteur de puissance du convertisseur. Il faut noter que c'est la commande de l'onduleur MLI côté réseau qui assure la régulation de la tension continue E . Ce type de dispositif, très récent, est notamment utilisé pour un TGV qui utilise des moteurs asynchrones. L'onduleur MLI connecté côté réseau chemin de fer est bien attendu monophasé.

Avant que les GTO ne permettent la réalisation d'onduleur MLI de forte puissance, il avait été nécessaire de faire appel à des convertisseurs à thyristors pour alimenter à fréquence variable la machine asynchrone. Ainsi un dispositif tout à fait analogue à celui utilisé pour la machine synchrone autopiloté a été réalisé.

B.4 : Association machine asynchrone - commutateur de courant.

B.4.1 : Circuit de puissance.

Le schéma simplifié est donné figure 42. Comme pour l'alimentation de la machine synchrone, le convertisseur côté réseau est un redresseur à thyristors. Par contre, en ce qui concerne l'onduleur alimentant la machine asynchrone, il est impossible d'employer des thyristors fonctionnant en commutation naturelle.

Dans le cas de la machine synchrone, cela était possible parce que les courants dans les phases étaient en avance sur les tensions simples (Cf A-2). Or dans le cas d'une machine asynchrone les courants sont toujours en retard sur les tensions et ce quel que soit le mode de fonctionnement de la machine (Cf schéma équivalent figure 29).

Ainsi, il faut impérativement utiliser des interrupteurs commandés au blocage pour réaliser l'onduleur de courant. Il s'agit d'interrupteur bidirectionnels en tension et unidirectionnels en courant : Type Thyristor-diode-dual

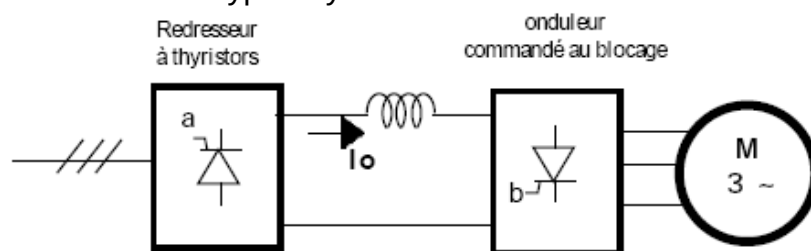


Figure 42

Pour pouvoir réaliser des interrupteurs de type Thyristordiode- dual avec des thyristors, il faut prévoir un circuit de commutation forcée pour assurer le blocage. Cela conduit à la structure de la figure 43 appelée commutateur de courant à diodes d'isolement. Les condensateurs permettent d'appliquer une tension négative aux bornes des thyristors au moment du blocage.

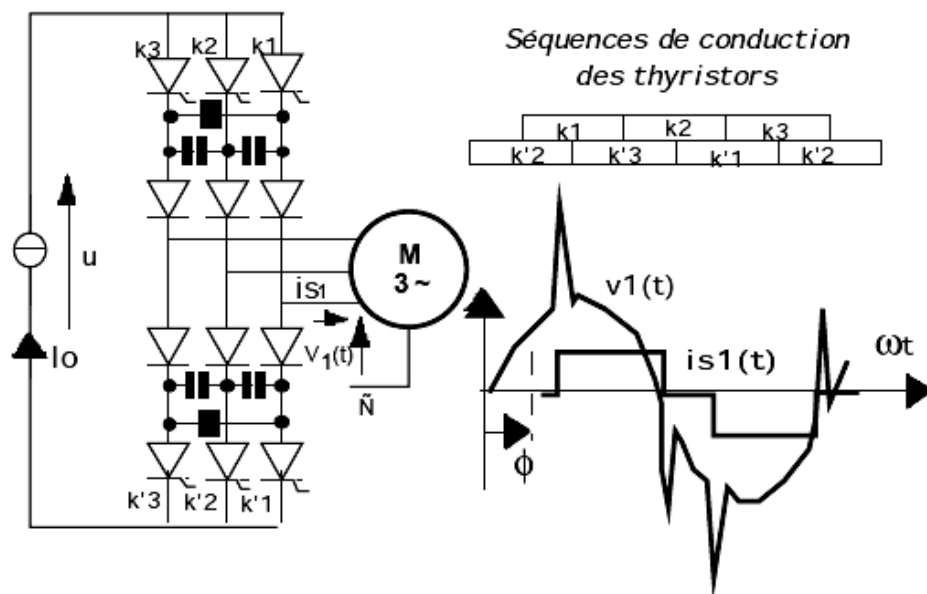


Figure 43

L'inconvénient majeur de ce montage est la présence de surtensions au stator de la machine asynchrone au moment des commutations (Fig. 43). Ces surtensions, dues à l'ouverture d'un circuit inductif (commande au blocage) sont limitées par les condensateurs de commutation forcée. Il faut donc, pour ce type d'alimentation, surdimensionner l'isolant des bobinages du stator.

La structure de la figure 42 présente toutefois l'avantage d'être naturellement réversible.

➤ Lorsque la machine asynchrone fonctionne en moteur le pont à thyristors fonctionne en redresseur et le pont commandé au blocage en onduleur. Lorsque la machine asynchrone fonctionne en génératrice ($\omega_r < 0$), le pont à thyristors fonctionne en onduleur et le pont commandé au blocage fonctionne en redresseur. Comme dans le cas de l'alimentation de la machine synchrone par un commutateur de courant à thyristors, les courants statoriques ne sont pas sinusoïdaux. Il faut donc prévoir un déclasserement de la machine (généralement 10 % de la puissance nominale) à cause des pertes supplémentaires dues aux harmoniques de courant. De plus, le couple électromagnétique va ici aussi présenter une ondulation non négligeable (Fig. 44) ce qui peut être gênant si l'on entraîne une charge à faible inertie.

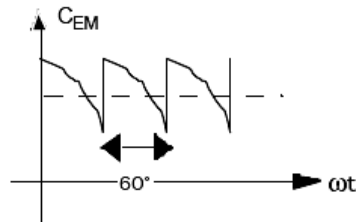


Figure 44

B.4.2 : Asservissement de vitesse - commande du convertisseur.

L'onduleur de courant commandé au blocage permet de commuter le courant dans les phases de la machine asynchrone.

L'amplitude des courants dans les phases de la machine est imposée par la source de courant I_o réalisée avec le redresseur à thyristors (Cf A-2-5). Le principe de contrôle du convertisseur avec autopilotage fréquentiel est identique à celui décrit au paragraphe B-3.

Le schéma structurel de l'asservissement est donné à la figure 45.

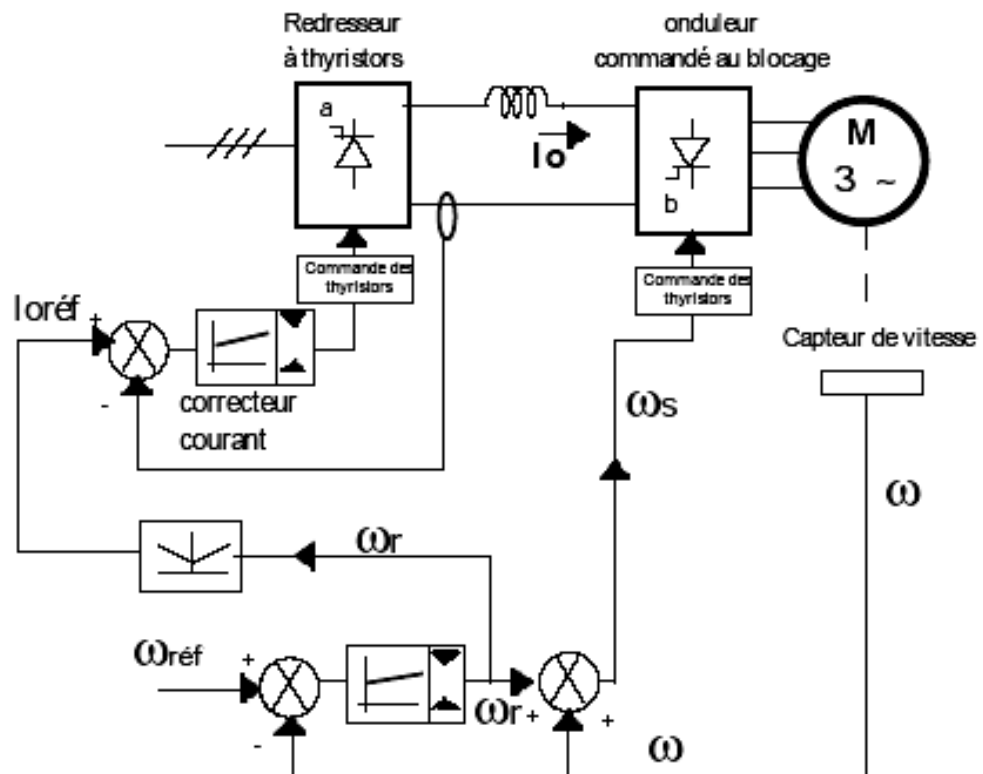


Figure 45

B.4.3 : Conclusions.

Les principes de contrôle du couple électromagnétique de la machine asynchrone que nous venons de décrire ont tous été élaborés à partir du modèle statique valable en régime permanent sinusoïdal *. Ceci a pour conséquence que le couple électromagnétique n'est plus contrôlé lors des régime transitoires (Fig. 46).

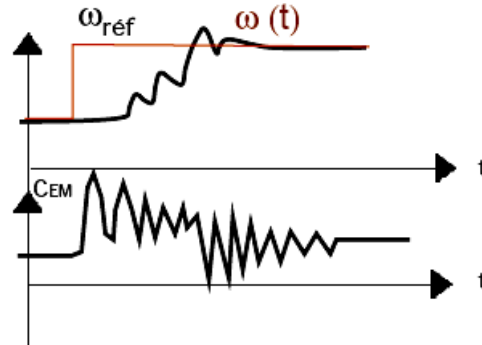


Figure 46

Dans le cas où l'on désire parfaitement contrôler le couple électromagnétique même lors des régimes transitoires, il faut contrôler en permanence l'amplitude et la position relative des champs tournants statorique et rotorique. C'est ce qu'on appelle **le contrôle vectoriel du couple électromagnétique**.

Grâce à ce principe, la machine asynchrone peut remplacer les machines à courant continu et les machines synchrones autopilotées dans la plupart des applications de moyenne puissance.

Pour effectuer un contrôle vectoriel du couple électromagnétique, il faut imposer les courants statoriques de façon à ce que le flux créé par le stator soit perpendiculaire au champ tournant rotor.

Dans le cas de la machine synchrone, le capteur de position du rotor permettait de connaître directement la position du champ tournant rotor. Par contre dans le cas de la machine asynchrone, le champ tournant rotorique "glisse" par rapport au rotor à la pulsation ω_r . Il faut donc calculer à tout instant la position relative du champ tournant rotor et du rotor.

Ceci ne peut se faire qu'à partir d'un modèle mathématique valable en régime transitoire. C'est le modèle de Park !.

L'utilisation du modèle de Park est hors du programme des classes de Technicien Supérieur. Toutefois, le stagiaire intéressé pourra consulter en annexe de cet ouvrage un document concernant le principe du contrôle vectoriel du couple électromagnétique.

III.4 Variateur de vitesse ALTIVAR

Le variateur de vitesse ALTIVAR de Télémécanique (Figure 5.22) est un convertisseur de fréquence destiné à l'alimentation des moteurs asynchrones triphasés à cage, dans une gamme de puissance de 500w à 100Kw selon le modèle.

Ils fonctionnent suivant le principe MLI. Cette technique assure une rotation des moteurs régulière et sans à coup à basse vitesse.

L'Altivar 16 est muni d'un microprocesseur 16 bits qui est l'organe de contrôle, et l'onduleur est un IPM. La programmation des paramètres de réglage et de configuration est réalisée à partir d'un logiciel qui chargée dans le variateur à l'aide d'une interface RS232

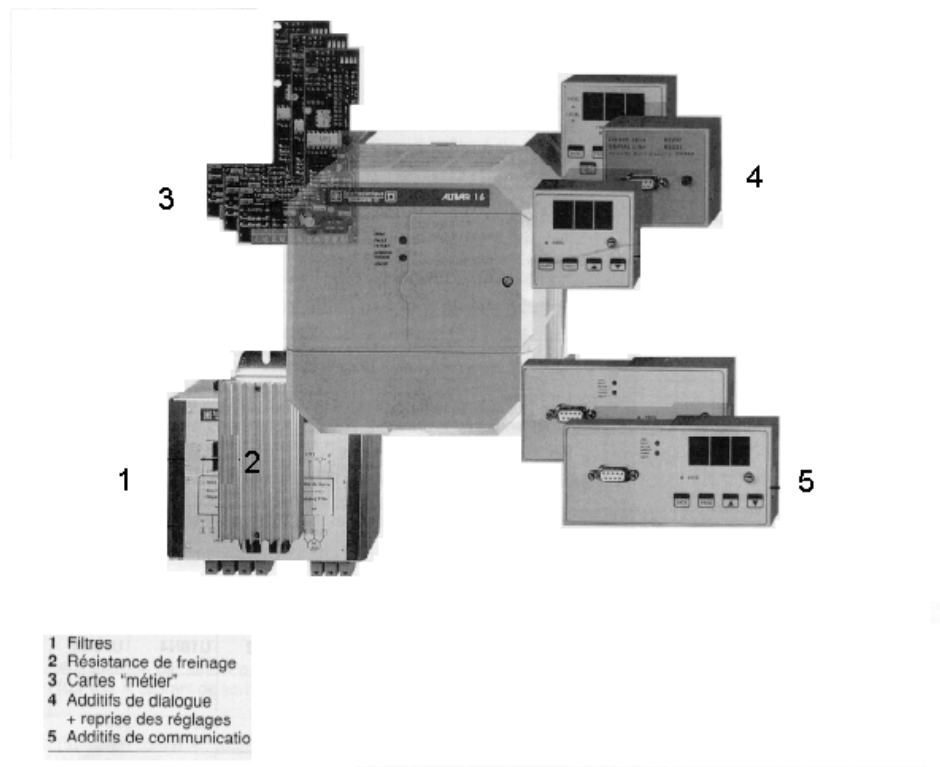


FIGURE 5.22 VARIATEUR DE VITESSE ALTIVAR 16

Les paramètres de réglage standard sont :

- l'accélération ;
- la décélération ;
- la vitesse minimum ;
- la vitesse maximum ;
- le rapport tension/fréquence ;
- la protection thermique (Ith).

C.1 Caractéristiques électriques

La Figure 5.23 donne les caractéristiques du variateur pour différentes puissances de moteurs.

Variateurs avec gamme de fréquence de 0,1 Hz à 50/60 Hz (200/400 Hz avec additif)

Réseau Tension d'alimen- tation V	Courant de ligne (1)		Moteur Puissance indiquée sur plaque		Altivar 16 Courant de sortie permanent		Courant transitoire maximal (2)	Puissance kVA	Référence	Masse kg
	mono- phasé A	tri- phasé A	kW	HP	A	A				
208...240 50/60 Hz monophasé	4	–	0,37	0,5	2,1	3,2	0,9	ATV-16U09M2 (3)	1,800	
	7	–	0,75	1	4	5,4	1,8	ATV-16U18M2 (3)	1,850	
208...240 50/60 Hz monophasé ou triphasé	14	10	1,5	2	7,1	10	2,9	ATV-16U29M2 (3)	3,300	
	18	14	2,2	3	10	14	4,1	ATV-16U41M2 (3)	4,300	
400...460 50/60 Hz triphasé	–	3,3	0,75	1	2,3	3,1	1,8	ATV-16U18N4 (3)	3,400	
	–	6	1,5	2	4,1	5,5	2,9	ATV-16U29N4 (3)	3,400	
	–	9	2,2	3	5,8	7,9	4,1	ATV-16U41N4 (3)	4,400	
	–	12	3	4	7,8	11	5,4	ATV-16U54N4 (3)	4,400	
	–	16	4	5	10,5	14,2	7,2	ATV-16U72N4 (3)	5,000	

FIGURE 5.23 CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES

C.2 Raccordement du variateur

Le variateur peut être alimenté à partir d'un réseau triphasé de 380V ou 220V monophasé selon la puissance (Figure 5.24).

La consigne de vitesse peut être donnée à partir d'un potentiomètre de 2K Ω ou d'un signal de procédé (4-20) mA.

Le sens de marche est établi par des contacts extérieurs pouvant être des interrupteurs, des relais ou un automate programmable. Des contacts de relais (internes aux variateurs) donnent l'état de celui-ci (ils sont utilisés pour signaler à distance l'état du variateur).

Un module de freinage et une résistance peuvent être rajoutés aux variateurs dans le cas de freinage excessif (charge à forte inertie). Ceci empêche que l'énergie soit absorbée par le variateur durant la période de freinage. Enfin, il est recommandé

d'utiliser un filtre entre l'alimentation et le variateur, et un autre entre le variateur et le moteur pour éliminer le bruit et les harmoniques qui sont engendrés par le découpage à haute fréquence du signal de sortie.

ATV-16U09M2 et 16U18M2

Alimentation 208...240 V monophasée

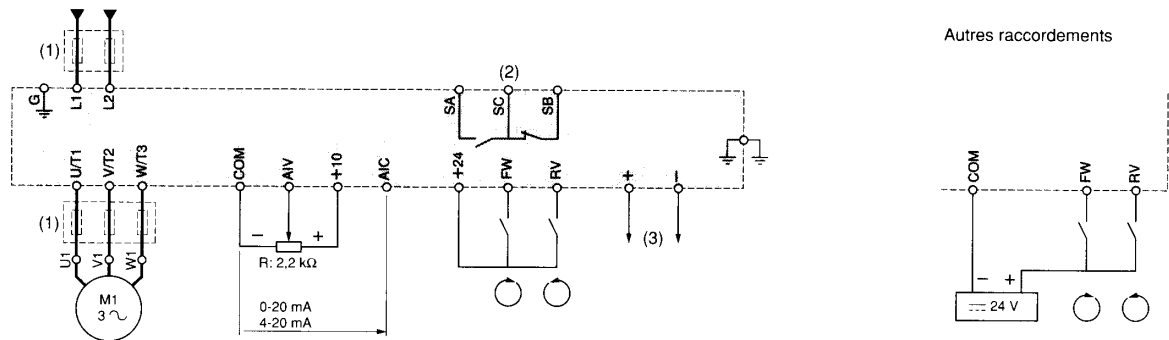


FIGURE 5.24 RACCORDEMENT DU VARIATEUR

C.3 Loi tension- fréquence

En plus des réglages de base, il est possible de programmer trois types différents de lois tension-fréquence, soit : n, p, l (Figure 5.25).

- n : Applications courantes à couple constant (machines moyennement chargées à basse vitesse)
- p : Applications à couple variable (pompes, ventilateurs)
- l : Machines fortement chargées à basse vitesse

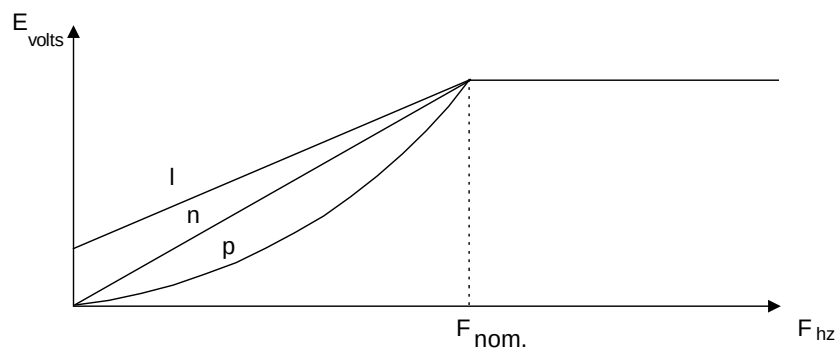


FIGURE 5.25 COURBE TENSION-FRÉQUENCE

C.4 Maintenance du variateur de vitesse ALTIVAR 16

Le variateur de vitesse ALTIVAR 16 nécessite un minimum de maintenance. Le variateur est muni d'une protection contre les courts-circuits, les surcharges, les surtensions et les sous-tensions. Il est possible, en utilisant un module de visualisation (en option) ou le logiciel, de voir les codes de défaut indiquant les différentes pannes. En cas de pannes, le variateur se verrouille et un indicateur lumineux sur le devant du variateur s'actionne. Le

tableau 5-2 indique les codes de défaut possibles avec les causes probables et les procédures de dépannage.

TABLEAU 5-2 TABLEAU DE DÉPANNAGE		
Codes	Causes probables	Procédures de dépannage
Afficheur éteint	- absence de tension ; - tension trop faible.	Vérifier : - la tension ; - les fusibles ou le disjoncteur ; - la séquence d'alimentation ; - le raccordement des bornes L1, L2, (L3) .
PhF	- absence phase réseau ; - variateur non alimenté ; - fusion fusible puissance ; - coupure réseau ($t > 200\text{ms}$)	Vérifier : - la tension ; - les fusibles ou le disjoncteur ; - la séquence d'alimentation ; - le raccordement des bornes L1, L2, (L3) ; - le pont redresseur.
USF	- réseau trop faible ; - baisse de tension passagère.	Vérifier : - la tension d'alimentation ; - le raccordement.
OSF	réseau trop fort.	Vérifier : - la tension d'alimentation ; - la configuration FrS (50 ou 60 Hz).
OLF	Surcharge : déclenchement thermique par surcharge prolongée du moteur.	Vérifier le réglage I_{th} par rapport au courant nominal du moteur. Le réarmement est possible après 7 minutes environ. Couper l'alimentation puis remettre le variateur sous tension.
OBF	Surtension ou surintensité due à un freinage trop brutal ou à une charge entraînant (couple pulsatoire) même avec une option freinage.	- Augmenter le temps de décélération. - Optimiser le gain U_{fr} . - Adjoindre la résistance de freinage ou l'option frein si nécessaire.
drF	Surintensité : - court-circuit ou mise à la terre en sortie du variateur ; - surchauffe du module IPM ; - sous- alimentation de la commande du module IPM ; - régime transitoire excessif ; - court-circuit interne.	- Mettre hors tension, vérifier les câbles de liaison et l'isolement du moteur, variateur débranché . - Augmenter le temps d'accélération ou de décélération . - Vérifier l'état de charge et la température ambiante produite . - Réarmer.
CrF	Défaut de commande de fermeture du relais de charge des condensateurs.	Défaut freinage.
InF	Reconnaissance calibre. défaut de «connectique» interne.	- Vérifier la connectique interne après coupure de l'alimentation et décharge des condensateurs (1mn voyant vert éteint) . - Remettre le variateur sous tension.
EEF	Erreur de mémorisation du EEPROM.	
SLF	Communication rompue avec le variateur.	Vérifier la connexion de l'additif visualisation.

III.5 Application d'un variateur à fréquence variable

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

D.1 Station de pompage avec réducteur de pression, sans variateur

Afin de conserver une pression du réseau (P_r) constante (5.26), le réducteur de pression s'ajuste en fonction de la demande des usagers et la pompe fonctionne à plein régime tout le temps. L'excès d'eau est renvoyé au réservoir d'origine, d'où il en **résulte une perte d'énergie**.

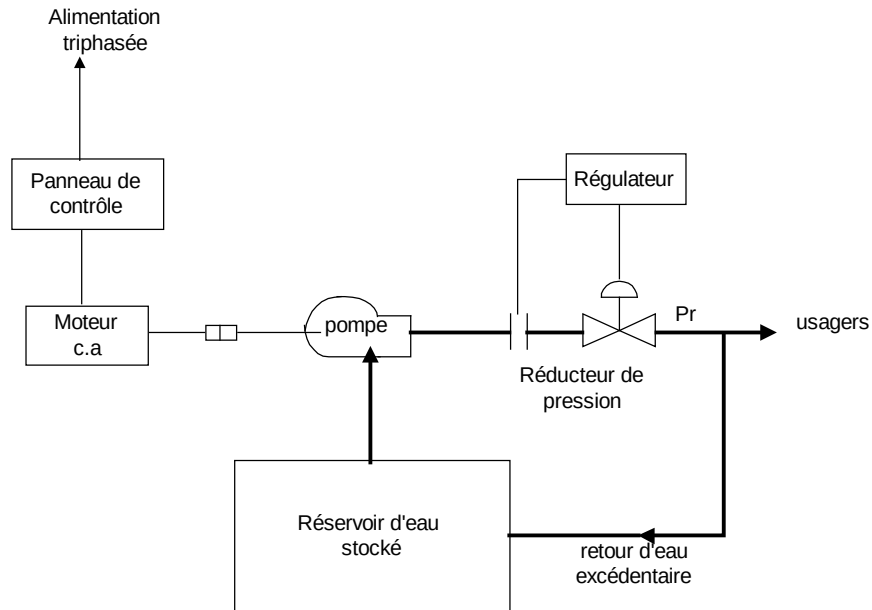


Figure 4.26 Station de pompage sans variateur

Dans ce cas, la régulation de la pression du réseau se fait à l'aide du capteur de pression et du **variateur de vitesse** (Figure 5.27). Celui-ci délivre au moteur la puissance nécessaire afin de s'ajuster à la demande, d'où il en **résulte une économie d'énergie**.

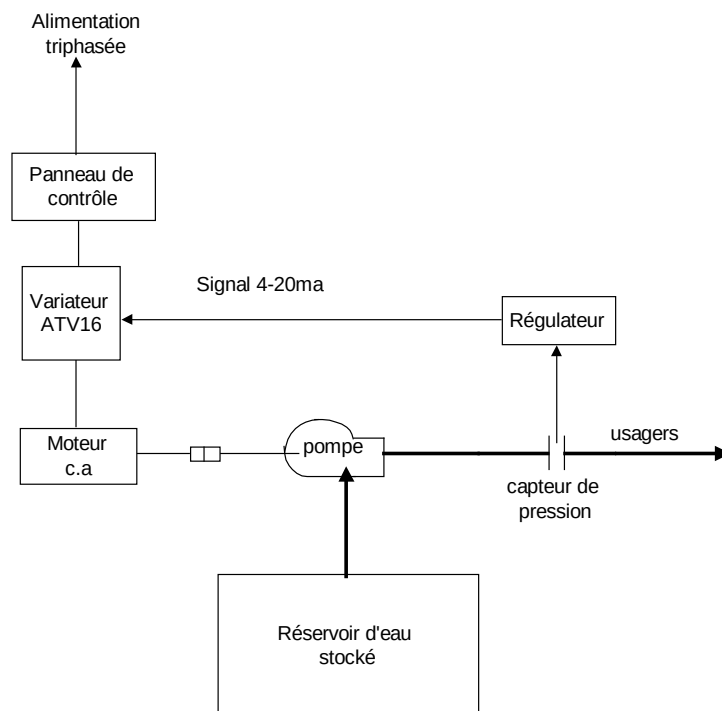
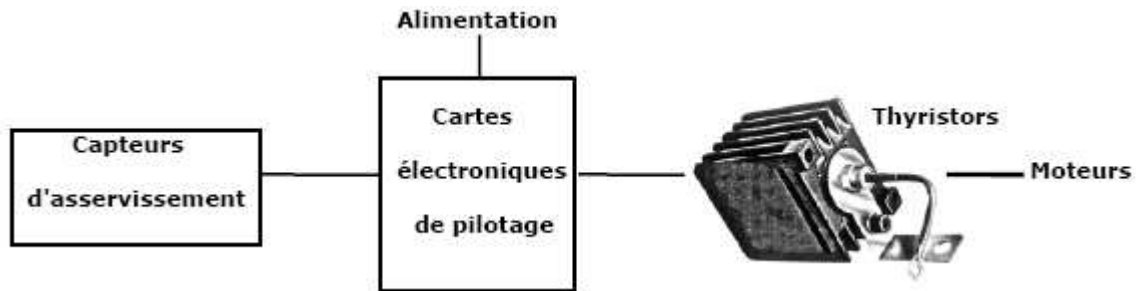


Figure 5.27 station de pompage avec variateur

Chapitre IV

**PROTECTION DES VARIATEURS DE VITESSE
DES MOTEURS ELECTRIQUES**

Les variateurs sont utilisés en très grand nombre dans l'industrie. Quel que soit le type et la puissance des moteurs pilotés, ils ont tous la même configuration.

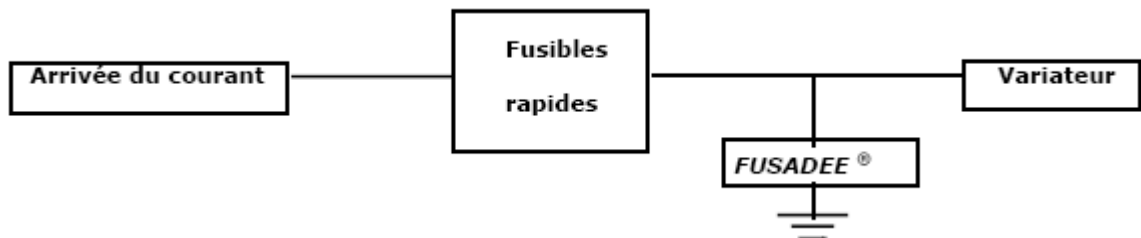


La première difficulté de mise en oeuvre d'une protection foudre réside dans le fait que l'électronique de pilotage est située près de la puissance. De plus, deux données sont à prendre en compte :

- la puissance en question, pilotée par des thyristors très fragiles aux surtensions, peut être importante.
- le régime de neutre utilisé est souvent le IT isolé.

La protection doit en conséquence être placée à l'arrivée «puissance».

Cela est possible sans disjoncteur différentiel jusqu'à 400 Ampères grâce à la présence, dans ce type de matériel, de fusibles ultra-rapides genre 'Protistor' de Ferraz. Les **FUSADEE** doivent être positionnés comme l'indique le schéma ci-dessous :



Les règles de branchement à la terre sont bien sûr toujours les mêmes. Au-delà de 100 VA, il faut prendre des **FUSADEE** 22 x 58 et au-delà de 400 V, on met les **FUSADEE** en série.

FUSIBLES DECONNECTEURS ASSOCIES AU FUSADEE**I - Principe**

La base de l'association est calculée à partir de l' I^2t total du fusible.

- **FUSADEE** 5 kW, associer un fusible dont le I^2t est inférieur ou égal à 20 000 à la tension de service.
- **FUSADEE** 15 kW 15 x 54, associer un fusible dont le I^2t est inférieur ou égal à 100 000 à la tension de service.
- **FUSADEE** 15 kW 22 x 58, associer un fusible dont le I^2t est inférieur ou égal à 150 000 à la tension de service.

II - Tableau de choix pour usages industriels courants

(Intensité nominale du fusible en Ampères)

		400 Volts			500 Volts			660 Volts		
FUSADEE®		5 kW	15 kW 15x54	15 kW 22x58	5 kW	15 kW 15x54	15 kW 22x58	5 kW	15 kW 15x54	15 kW 22x58
	Courbe									
Fusible	gG	50	100	125	50	100	125	40	80	100
Intensité	aM	40	100	125	40	80	100	40	80	100

III - Fusibles protistors

- Aucun calcul, tous les fusibles conviennent jusqu'à 125 A **ET** jusqu'à 1000 V.
- Au delà de 125 A, détermination du fusible associé en calculant l' I^2t et en vérifiant qu'il soit inférieur aux valeurs spécifiées en l.

IV - Régime de neutre

Si le régime de neutre est TN-C, seules les phases sont à protéger

Si le régime de neutre est TN-S, TT ou IT, il faut :

- 2 **FUSADEE** en Monophasé
- **FUSADEE** en Triphasé sans neutre
- **FUSADEE** en Triphasé avec neutre

Chapitre V

Instructions de sécurité et d'emploi relatives aux variateurs de vitesse

1 - Généralités

Selon leur degré de protection, les variateurs de vitesse peuvent comporter, pendant leur fonctionnement, des parties nues sous tension, éventuellement en mouvement ou tournantes, ainsi que des surfaces chaudes.

Le retrait non justifié des protections, une mauvaise utilisation, une installation défectueuse ou une manoeuvre inadaptée peuvent entraîner des risques graves pour les personnes, les animaux et les biens.

Pour informations complémentaires, consulter la documentation.

Tous travaux relatifs au transport, à l'installation, à la mise en service et à la maintenance doivent être exécutés par du personnel qualifié et habilité.

Au sens des présentes instructions de sécurité fondamentales, on entend par personnel qualifié des personnes compétentes en matière d'installation, de montage, de mise en service et d'exploitation du produit et possédant les qualifications correspondant à leurs activités.

2 - Utilisation

Les variateurs de vitesse sont des composants destinés à être incorporés dans les installations ou machines électriques.

En cas d'incorporation dans une machine, leur mise en service est interdite tant que la conformité de la machine avec les dispositions de la directive machine n'a pas été vérifiée. Respecter la norme stipulant notamment que les actionneurs électriques (dont font partie les variateurs de vitesse) ne peuvent pas être considérés comme des dispositifs de coupure et encore moins de sectionnement.

Leur mise en service n'est admise que si les dispositions de la Directive sur la compatibilité électromagnétique sont respectées.

Les variateurs de vitesse répondent aux exigences de la Directive Basse Tension. Les caractéristiques techniques et les indications relatives aux conditions de raccordement selon la plaque signalétique et la documentation fournie doivent obligatoirement être respectées.

3 - Transport, stockage

Les indications relatives au transport, au stockage et au maniement correct doivent être respectées.

Les conditions climatiques spécifiées dans le manuel technique doivent être respectées.

4 - Installation

L'installation et le refroidissement des appareils doivent répondre aux prescriptions de la documentation fournie avec le produit.

Les variateurs de vitesse doivent être protégés contre toute contrainte excessive. En particulier, il ne doit pas y avoir déformation de pièces et/ou modification des distances d'isolement des composants lors du transport et de la manutention. Eviter de toucher les composants électroniques et pièces de contact.

Les variateurs de vitesse comportent des pièces sensibles aux contraintes électrostatiques et facilement endommageables par un maniement inadéquat. Les composants électriques ne doivent pas être endommagés ou détruits mécaniquement (le cas échéant, risques pour la santé !).

5 - Raccordement électrique

Lorsque des travaux sont effectués sur le variateur de vitesse sous tension, les prescriptions nationales pour la prévention d'accidents doivent être respectées. L'installation électrique doit être exécutée en conformité avec les prescriptions applicables (par exemple sections des conducteurs, protection par coupe-circuit à fusibles, raccordement du conducteur de protection).

Des renseignements plus détaillés figurent dans la documentation.

Les indications concernant une installation satisfaisant aux exigences de compatibilité électromagnétique, tels que le blindage, mise à la terre, présence de filtres et pose adéquate des câbles et conducteurs, figurent dans la documentation qui accompagne les variateurs de vitesse.

Ces indications doivent être respectées dans tous les cas, même lorsque le variateur de vitesse porte le marquage CE. Le respect des valeurs limites imposées par la législation sur la CEM relève de la responsabilité du constructeur de l'installation ou de la machine.

6 - Fonctionnement

Les installations dans lesquelles sont incorporés des variateurs de vitesse doivent être équipés des dispositifs de protection et de surveillance supplémentaires prévus par les prescriptions de sécurité en vigueur qui s'y appliquent, telles que la loi sur le matériel technique, les prescriptions pour la prévention d'accidents, etc... Des modifications des variateurs de vitesse au moyen du logiciel de commande sont admises.

Après la mise hors tension du variateur de vitesse, les parties actives de l'appareil et les raccordements de puissance sous tension ne doivent pas être touchés immédiatement, en raison de condensateurs éventuellement chargés. Respecter à cet effet les avertissements fixés sur les variateurs de vitesse.

Pendant le fonctionnement, toutes les portes et protections doivent être maintenues fermées.

7 - Entretien et maintenance

La documentation du constructeur doit être prise en considération.

Chapitre VI

L'installation d'un système de commande électronique de moteurs

VI.1 Les plans et les devis

VI.1.1 Plan_ signifie (dans le sens de ce cours) la représentation d'ensemble d'un équipement industriel qui contient un (ou plusieurs) moteur(s) électrique(s) contrôlé(s) électroniquement.

Afin de devenir opérationnelle cette représentation générale doit être accompagnée par :

- un plan électromécanique contenant les sous-ensembles mécaniques actionnés par le(s) moteur(s) et leurs emplacements sur l'équipement ;
- un plan électrique regroupant les composants électriques de basse tension (dispositifs de protection, de commande, de signalisation, câblage électrique) ; ce plan utilise les symboles de l'électrotechnique ;
- un plan électronique représentant le schéma de l'unité de commande électronique du moteur, plan dans lequel sont utilisés les symboles des composants électroniques de puissance (diac, thyristor, triac, IGBT) ainsi que les symboles de l'électronique de faible puissance (résistor, condensateur, diode, transistor, circuits intégrés, etc).

VI.1.2 Devis¹ représente l'état détaillé et estimatif de travaux à accomplir, qui constitue un avant-projet et non pas un engagement formel.

Un devis doit contenir une liste complète de composants, spécifiant le numéro d'identification dans le schéma de principe, le code, le type, la quantité utilisée de chacun des composants, le prix unitaire de chaque composant et finalement, la valeur totale approximative nécessaire pour l'achat de ces matériaux.

Observation : A ne pas faire confusion entre le devis et **le manuel d'utilisation (ou le livre technique)** d'un produit, celui-ci contenant, non seulement la liste de matériaux, mais aussi, un ensemble d'informations concernant le branchement, la mise en marche, l'utilisation et la maintenance du produit.

VI.2 Normes en vigueur (NFC 51, NFC 53)

En industrie **une norme** signifie une règle fixant les conditions de la réalisation d'une opération, de l'exécution d'un objet ou de l'élaboration d'un produit dont on veut unifier l'emploi ou assurer l'interchangeabilité.

La Norme Française homologuée ou norme NF, c'est un ensemble des prescriptions techniques relatives à un produit ou à une activité déterminée, condensées dans un document établi par l'AFNOR (Association Française de Normalisation).

¹ Selon l'Encyclopédie Larousse

La normes NF C51 établie les règles à respecter lors de l'installation, la mise en marche, l'utilisation et la maintenance des **machines électriques tournantes**.

La normes NF C53 établie les règles à respecter lors de l'installation, la mise en marche, l'utilisation et la maintenance des **équipements électroniques de puissance (voir les commandes électroniques des moteurs)**.

Observations :

Il existe en réalité trois normalisations en électricité :

- internationale : la CEI (Commission Électrotechnique Internationale),
- européenne : e CENELEC (Comité Européen pour la Normalisation en Électricité),
- française : l'UTE (Union Technique de l'Électricité), lesquelles élaborent plusieurs types de documents :
- publications ou recommandations de la CEI ;
- documents d'harmonisation (HD) ou normes européennes (EN) du CENELEC ;
- normes homologuées, normes enregistrées de l'UTE, laquelle édite également des guides ou publications UTE (qui ne sont pas des normes).

La normalisation en France est réglementée par la loi du 24 mai 1941 qui a créé l'Association Française de NORMalisation (AFNOR) et définit la procédure d'homologation des normes. Cette loi est complétée par le décret n° 84-74 du 26 mai 1974, modifié par les décrets n° 90-653 et 91-283.

Les normes homologuées doivent être appliquées aux marchés passés par l'État, les établissements et services publics.

Par ailleurs, une norme homologuée peut être rendue d'application obligatoire par arrêté, mais cette procédure n'a été jusqu'à présent que peu utilisée en électricité (NF C 15-100, NF C 13-200).

Il existe deux grandes familles de normes qui visent d'une part la construction du matériel électrique et d'autre part la réalisation des installations électriques.

Les principales normes de réalisation sont :

- la NF C 15-100 : installations électriques à basse tension,
- la NF C 13-100 : postes de livraison,
- la NF C 13-200 : installations électriques à haute tension,
- la NF C 14-100 : installations de branchement (basse tension).

Parmi les normes de conception, beaucoup plus nombreuses, citons en particulier :

- la NF EN 60529 Juin 2000 : classification des degrés de protection procurés par les enveloppes,
- la NF EN 61140 Mai 2001 : règles de sécurité relatives à la protection contre les chocs électriques,
- la NF EN 60598-2-8 Mars 2001 : baladeuses.

Une marque de conformité est gravée sur les appareils.

Un appareil conforme à une norme est un gage de sécurité.

VI.3 Methode d'installation

L'installation d'un système de commande électronique de moteurs doit être effectuée en conformité avec les prescriptions techniques du fabricant et veillant à respecter strictement les normatifs de protection et sécurité du travail. L'opération effective d'installation doit suivre les étapes suivantes :

- a) **Localisation de l'emplacement de l'armoire électrique** qui logera l'équipement électronique de commande.
Habituellement l'armoire électrique est placé dans le voisinage du moteur afin de permettre une l'accessibilité facile de l'opérateur au organes de commande et de signalisation, et également de permettre la circulation normale du personnel et du materiel vers l'outillage actionné par le moteur contrôlé électroniquement, tout en tenant compte des dimensions de gabarit limite qui doivent être respectées par l'armoire ;
- b) **Choix des appareils électriques de commande**(boutons poussoirs, contacteurs), de protection supplémentaire(sectionneurs, relais thermiques) et de signalisation qui seront placés dans l'armoire, à côté de la commande électronique;
- c) **L'exécution de l'armoire électrique**, selon les plans établi;
- d) **L'emplacement de l'armoire** à l'endroit choisi
- e) **Le raccordement** : - de l'équipement de commande électronique au moteur contrôlé,
- de l'armoire au secteur

VI.4 Mesures de sécurité lors de l'installation

Durant toute intervention (installation, utilisation, maintenance) au niveau d'un équipement électromécanique on doit **respecter strictement** les règles de protection et de sécurité du travail spécifiques pour le poste concerné.

VI.4.1 Prévention - la meilleure strategie contre les accidents de travail.

La prévention technique est basée sur le constat que l'atteinte à l'intégrité, à la santé de l'homme est liée à sa rencontre (ou à la rencontre d'une partie de son corps) avec le danger. Selon les cas, le danger prend la forme

- d'une zone dangereuse,
- d'un phénomène dangereux
- d'une substance dangereuse.

La prévention des atteintes dommageables (accidents, maladies) **passse prioritairement par la mise en oeuvre de mesures techniques et organisationnelles**, visant à éliminer ou réduire les risques, par la mise en place par exemple de protections collectives.

VI.4.2 Protection collective vise l'ensemble de mesures, moyens et aménagements déployés généralement lors de la conception et de la mise en place d'un poste de travail, de sorte que l'endroit respectif ne pose en danger potentiel aucun participant au processus de production.

Concrètement les mesures de protection collective sont matérialisées par :

- le respect des normes de fixation mécanique des supports des machines ayant des parties mobiles ;
- le respect des normes de branchement des tableaux ou armoires électriques (choix du type de câbles électriques, mise à la terre, canalisations, isolation contre le contact accidentel des zones de potentiel dangereux) ;
- signalisation correcte des zones de danger ;
- éclairage approprié du poste de travail

Lorsque ces mesures s'avèrent insuffisantes ou impossibles à mettre en œuvre, le recours aux équipements de protection individuelle s'impose afin de prévenir les risques résiduels aux postes de travail.

VI.4.3 Protection individuelle

Les équipements de protection individuelle (ou EPI) vont du casque aux chaussures de sécurité, en passant par les lunettes, les masques de protection respiratoire, les bouchons d'oreille, les gants, les vêtements de protection, etc. Ils **sont destinés à protéger du ou des risques à un poste de travail** : exposition cutanée ou respiratoire à un agent toxique, chaleur, bruit, écrasement, choc, chute d'objet, électrocution...

La protection individuelle ne peut être envisagée que lorsque toutes les autres mesures d'élimination ou de réduction des risques s'avèrent insuffisantes ou impossibles à mettre en œuvre. La mise en place de protections collectives est toujours préférable.

Les EPI sont parfois à l'origine de gêne ou d'inconfort lorsqu'ils doivent être portés pendant de longues périodes : poids, chaleur, pression excessive sur une partie du corps, gêne auditive ou visuelle... **Il est donc important, pour faciliter le port et l'acceptation de l'EPI, de prendre en compte les caractéristiques de l'utilisateur et celles de son poste de travail.**

VI.5 Installer des câbles et des canalisations

VI.5.1 La pose et l'encastrement des gaines et canalisations

- De façon générale, les fils doivent être posés sous gaine ou conduit. Quant aux câbles, certains peuvent être posés ou encastrés directement (il faut se référer aux spécifications du fabricant).
- Les gaines et câbles peuvent être passés dans les vides de construction (huisserie des portes, entre cloisons), à condition d'être bien isolés et qu'aucune aspérité ne puisse les endommager.
- Les matériels (interrupteurs, prises, ...) ne peuvent être encastrés que dans des boîtes.

- Les saignées pratiquées dans les cloisons et murs ne doivent pas compromettre la solidité de ceux-ci : dans une cloison de 50 mm finie, on peut encastrer une gaine de 15 mm maximum, dans une cloison de 100 mm, une gaine de 20 mm, dans des carreaux de plâtre de 60 mm, une gaine de 16 mm, etc.

VI.5.2. La pose des prises de courant (hauteur par rapport au sol)

- Les prises de courant doivent toutes comporter la terre. De plus, elles doivent être munies d'obturateurs (sécurité enfant).
- Chaque circuit prise est protégé par un disjoncteur (16, 20 ou 32A).
- A l'intérieur : une prise 16A est placée à 5 cm minimum du sol et une prise 32A à 12 cm minimum.
- A l'extérieur : les prises doivent être placées à 1 m du sol et de protection IP25.

VI.5.3 Le passage de plusieurs circuits dans une même gaine

On appelle circuit, l'ensemble des fils alimentés par une même source et protégé par un même dispositif de sécurité (disjoncteur ou fusible).

Une gaine peut accueillir plus d'un circuit si :

- tous les conducteurs sont isolés,
- tous les circuits proviennent du même appareil de protection général (disjoncteur différentiel),
- la section des conducteurs ne doit pas différer de plus de 2 intervalles (1,5 et 2,5 et 4mm² ou 2,5 et 4 et 6 mm²),
- chaque circuit doit être protégé par un disjoncteur.

Dans la pratique, on peut mettre plusieurs circuits dans une même gaine. Il faut cependant respecter le remplissage maximal de la gaine : on ne doit pas "forcer" pour passer les fils.

Exemple : pour une gaine de 16mm², la surface intérieure utile est de 30mm². On pourra passer 3 fils de 1,5mm² (3x8,55 = 26mm² utilisés).

VI.5.4 La section des conducteurs en fonction des prises installées

Lorsque l'on installe une prise de courant, on doit respecter les sections de fils suivantes :

Courant utile de la prise (A)	Section des fils (mm ²)
16	1,5
20 à 25	2,5
32	4
40 à 50	6
63	10

Notez que dans la pratique, on utilise du fil 2,5mm² pour toutes les prises courantes de 16 à 25A.

Chapitre VII

Analyse de l'état réel d'un équipement

VII.1 Généralités

L'état réel (ou actuel) d'un équipement peut être analysé par rapport à *l'état de référence* (ou *de fonctionnement normal*) qui résulte à travers les prescriptions techniques spécifiées par le fabricant dans le manuel d'utilisation du produit.

Afin d'estimer l'état réel est nécessaire de :

- bien connaître le fonctionnement de principe ;
- de mesurer les méthodes et la succession des réglages ;
- de déterminer à l'aide des appareils et instruments de mesure les performances techniques actuelles de l'équipement.

Dans le cas où est déterminée, suite à l'analyse comparative, une différence évidente, au moins pour un paramètre fonctionnel majeur, par rapport à la valeur normale, est nécessaire une intervention de réajustement des réglages de base de l'équipement ou, selon la gravité du dysfonctionnement, la réparation de celui-ci.

VII.2 Poser un diagnostic signifie :

- d'une part, l'ensemble de mesures, de contrôles faites pour déterminer ou vérifier les caractéristiques techniques du système, à des fins de maintenance ou d'amélioration,
- d'autre part, l'identification de la nature du dysfonctionnement par l'interprétation de signes extérieurs et des résultats de la mesure des paramètres fonctionnels.

Nota : En général, un bon diagnostic implique une parfaite connaissance de l'équipement et également une certaine expérience professionnelle dans le domaine de l'électronique industrielle.

VII.3 Sources de problèmes dans un système de commande électronique de moteurs

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

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

Chapitre VIII

Réparation d'un équipement électronique

VIII.1 Règles de sécurité relatives à la réparation de systèmes industriels

Toute activité de remise en état un système industriel constitue une **intervention**, qui peut être définie comme une opération : de courte durée et de faible étendue, réalisée sur une installation ou un équipement et précédée d'une analyse sur place.

Les interventions sont strictement limitées au domaine BT

La publication UTE C 18-510 distingue des interventions :

- de dépannage,
- de connexion avec présence de tension,
- de remplacement.

Plus particulièrement, une intervention de dépannage a pour but de remédier rapidement à un défaut susceptible de nuire :

- à la sécurité des personnes,
- à la conservation des biens,
- au bon fonctionnement d'un équipement ou d'une installation vitale.

Sur les emplacements ou dans les locaux présentant des risques d'explosion, les interventions doivent être exécutées dans le strict respect des consignes de sécurité de l'établissement.

VIII.1.1 Préparation de l'intervention

L'intervenant doit :

- avoir acquis la connaissance du fonctionnement de l'équipement,
- disposer d'appareils de mesurage en bon état,
- assurer la sécurité des tiers et des exécutants,
- se prémunir contre les parties actives voisines.

La connaissance du fonctionnement peut découler de l'étude des schémas et des documents techniques de l'équipement, par une personne pleinement qualifiée.

VII.1.2 Protection des intervenants

Les intervenants doivent :

- ne pas porter d'objets métalliques,
- utiliser les moyens de protection individuels adaptés,
- disposer d'un emplacement dégagé et d'un appui solide,
- s'isoler des éléments conducteurs,
- délimiter l'emplacement de travail et les zones à risques et en interdire l'accès par balisage,

- utiliser des outils isolés ou isolants et des appareils de mesure présentant le maximum de sécurité,
- vérifier avant utilisation le bon état du matériel.

VIII.2 Techniques de dépannage

Le dépannage d'un système automatisé se fait de façon systématique selon les étapes suivantes :

1) Déterminatin des causes possibles du problème

Cette étape consiste à dresser une liste de causes possibles du problème dans l'ordre où elles sont les plus susceptibles de se produire.

2) Vérification des hypothèses et pose d'un diagnostic

Durant cette étape on doit vérifier chacune des hypothèses identifiées à la première étape. Pour ce but on fait appel aux sens (vue, ouïe, odorat, ou toucher) ou aux instruments de mesure appropriés (pince ampèremétrique, multimètre, oscilloscope, tachymètre, etc.). Le résultat des vérifications conduit à poser un bon diagnostic.

3) Correction du problème et remise en service

Cette dernière étape consiste à appliquer le correctif nécessaire pour remettre le système en état de marche. Lorsque le correctif a été apporté, il est important de s'assurer que le fonctionnement est conforme avec les prescriptions du fabricant. Pour ce faire il est conseillé de vérifier :

- les différents modes de marche,
- le fonctionnement des dispositifs de protection,
- la valeur de réglage des principaux points de test, selon la documentation technique du produit.

Observation : L'activité de dépannage / réparation d'un équipement électronique doit adapter les étapes mentionnées aux particularités constructives et fonctionnelles de celui-ci, impliquant une parfaite connaissance du fonctionnement normal du système, la maîtrise de la lecture des schémas électriques et électroniques et des techniques de mesure et d'interprétation des résultats en électronique.

La liste des pannes possibles doit être dressée en corrélation avec le manuel technique du produit et tenant compte du schéma bloc d'ensemble du système technique auquel appartient l'équipement électronique analysé.

A titre d'exemple est présenté ci-dessous le tableau des pannes possibles pour le variateur de vitesse RECTIVAR 4.

TABLEAU 4-1 PROCÉDURE DE DÉPANNAGE

Défauts	Vérifier sur le variateur carte de contrôle carte de puissance		Vérifier le retour de vitesse avec D.T d'armature tension		Vérifier sur le moteur
le moteur ne tourne pas	- le réglage de la limitation la - la liaison 0V-RUN et 0V-INR ; - la référence 0-10V aux bornes 0V et E1	- la tension réseau ; - les fusibles.	-	-	- la tension d'excitation F1+ et F2- ; - usure des balais ; - que le moteur n'est pas calé ;
Le moteur tourne par à coups	Le réglage des gains SPP et SPI	le pont de puissance	-	la compensation de chute RI.	les balais du moteur
Le moteur s'emballe	-	- la position du cavalier F ; - le pont de puissance	- La position du cavalier H ; - le retour DT aux bornes RNA et RNB	- la position du cavalier H en HO-HU ; - le retour de tension	la tension d'excitation.
Instabilité	- Le réglage des gains SPP et SPI ; - la position du cavalier H.	-	L'accouplement DT - moteur	la compensation de chute RI.	
Mauvaise régulation		-	-	la compensation de chute RI.	la valeur de tension nominale d'induit
Le réglage de la vitesse est impossible	La consigne 0-10V aux bornes 0V et E1	le pont de puissance	-	-	-
Fusion des fusibles		- les raccordements (court-circuit ou défaut de masse) ; - le pont de puissance.	-	-	les raccordements (court-circuit ou défaut de masse)

VIII.3 Sélectionner les composants de remplacement

Une fois déterminé les composants défectueux on procède au choix des composants deremplacement à partir des catalogues et tenant compte :

- des caractéristiques techniques des composants d'origine,
- du gabarit des composants de remplacement,
- de la manière de fixation des nouveaux composants, surtout dans le cas des dispositifs de puissance et des condensateurs.

VIII.4 La procedure de remplacement des coposants défectueux

On doit respecter les memes étapes communes pour tous les circuits électroniques :

- dessoudage des composants défectueux ;
- préparation de l'endroit pour la nouvelle soudure ;
- l'emplacement du nouveau composant ;
- la soudure du composant ;
- la vérification de la qualité de la soudure et des éventuels court-circuits avec les pistes voisines.

VIII.5 L'importance de la qualité dans l'exécution des travaux

Durant l'intervention de dépannage une conduite logique, ordonnée, et propre visant :

- le respect des normes de sécurité du travail,
- le respect de l'ordre d'exécution des tâches,
- le choix judicieux des instruments et outils de mesure,
- la propreté et le soin pendant et après le travail,
- représentent non seulement la garantie d'une activité bien accomplie, mais contribue également à la réduction de la durée de l'intervention.

VIII.6 Consigner les interventions a deux significations² majeures dans le contexte de ce cours :

1) Noter par écrit ce qu'on veut retenir ou transmettre

Dans ce sens il est nécessaire de noter par écrit dans le journal de maintenance de l'équipement :

- la date de l'intervention,
- la durée de l'intervention
- la manifestation du défaut,
- la cause du défaut,
- la désignation et le code des composants remplacés,
- les coordonnées des intervenants.

2) Interdire toute action sur un appareil au moyen d'une pancarte, d'un cadenas, d'une goupille, etc.

Les mesures qui doivent être prise afin d'organiser et effectuer une intervention sur un équipement industriel sont stipulées par le document UTE C18-510 duquel on présente ci-dessous les aspects essentiels.

VIII .6.1 La consignation

Les quatre opérations de la consignation sont :

- la séparation,
- la condamnation,
- l'identification,
- la VAT suivie éventuellement de la mise à la terre et en court-circuit (MALT + CCT).

Il existe deux procédures de consignation :

- la consignation générale,
- la consignation en deux étapes.

On doit considérer comme étant sous tension tout ouvrage électrique pour lequel on ne dispose pas d'attestation de consignation.

² Selon l'Encyclopédie Larousse

Contenu des diverses opérations de la consignation

a) Séparation de l'ouvrage des sources de tension

Effectuée au moyen d'organes prévus à cet effet sur tous les conducteurs actifs, neutre compris (sauf en TNC).

La séparation doit être effectuée de façon certaine.

Organes de séparation:

- sectionneurs,
- prises de courant ou prises embrochables,
- de canalisation préfabriquée type canalis,
- retrait de fusible,
- appareils débrochables,
- appareil de commande, de protection ou de coupure d'urgence sous réserve que :
 - o les distances d'isolement entre contacts répondent à la norme des sectionneurs de même tension nominale (Un),
 - o toute fermeture intempestive soit rendue impossible.

b) Condamnation en position "ouverture des organes de séparation"

- Elle a pour but d'interdire la manœuvre de cet organe.
- Elle comprend :
 - o une immobilisation de l'organe,
 - o une signalisation indiquant que cet organe est condamné et ne doit pas être manœuvré (la suppression d'une condamnation ne peut être effectuée que par la personne qui l'a effectuée ou par un remplaçant désigné).

Nota : lorsqu'il est impossible d'immobiliser matériellement par blocage les organes de séparation ou leur dispositif local de commande ou qu'il n'existe pas de dispositif de manœuvre (ponts sur réseau aérien) ou que l'organe n'est pas conçu pour être immobilisé (BTA), les pancartes ou autres dispositifs d'avertissement constituent la protection minimale obligatoire d'interdiction de manœuvre.

c) Identification de l'ouvrage sur le lieu de travail

Elle est basée sur :

- la connaissance de la situation géographique,
- la consultation des schémas,
- la connaissance des ouvrages et de leurs caractéristiques,
- la lecture des pancartes, des étiquettes, ...
- l'identification visuelle.

Nota : pour les conducteurs nus, la vérification d'absence de tension (VAT) et la mise à la terre et en court-circuit (MALT + CCT) a valeur d'identification.

d) Vérification d'absence de tension (VAT) et la mise à la terre et en court-circuit (MALT + CCT)

- Dans tous les cas, la VAT doit se faire aussi près que possible du lieu de travail, sur tous les conducteurs actifs.
- Le bon fonctionnement du matériel doit être contrôlé avant et après la vérification.
- La mise à la terre et en court-circuit (MALT + CCT) doit être réalisée de part et d'autre de la zone de travail et doit intéresser tous les conducteurs actifs.
- Elle n'est pas exigée en BTA, sauf s'il y a :
 - o risque de tension induite,
 - o risque de réalimentation,
 - o présence de condensateurs ou de câbles de grande longueur.
- La mise à la terre est exigée dans le cas d'une ligne aérienne BT sur un support mixte HT/BT quand la HT demeure sous tension.
- Les dispositifs de mise à la terre et en court circuit doivent pouvoir supporter les intensités de court-circuit.

VIII.6.2 Consignation d'une machine ou d'un équipement pour permettre des travaux ou d'interventions

a) Travaux

Lorsqu'il s'agit de révision ou de réparation importante.

b) Intervention

Lorsqu'il s'agit de remédier rapidement à un défaut de fonctionnement d'une machine. Avant toute opération, on procédera à l'élimination générale ou partielle des risques inventoriés dans la zone de travail.

c) Inventaire des risques

Risques inhérents à la machine ou au processus industriel :

- risques électriques,
- risques de remise en mouvement :
 - o par l'entraînement normal (énergie électrique, hydraulique...),
 - o par l'instabilité des mécanismes (balourd),
 - o par les matériaux ou charges transportés non immobilisés,
 - o par les énergies potentielles accumulées, risques dus aux fluides (vapeur, air comprimé, gaz, ...),
- risques dus aux rayonnements (calorifiques, ionisants, ...),
- risques dus aux matières traitées (toxicité, brûlures, ...).

L'élimination de chacun de ces risques s'obtient en exécutant un ensemble d'opérations de séparation, de condamnation, de vérification.

Risques découlant des opérations d'intervention :

- travaux en hauteur (chutes),
- travaux avec flamme nue (incendie, explosion, ...),
- travaux avec engins ou appareillages spécialisés, ...

L'élimination de ces risques s'obtient en adoptant un certain nombre de mesures de protections individuelles (harnais, écran facial de protection, ...) ou collectives (écran, surveillants, ...).

VIII.6.3 Consignation partielle et consignation générale

Consignation partielle

La consignation partielle est l'ensemble des mesures prises pour éliminer un des risques inhérents à la machine ou à l'équipement.

Exemples de consignations partielles :

- consignation arrêt (contre les risques de remise en mouvement),
- consignation fluide,
- consignation électrique (contre les risques de contact avec des lignes de contact d'un pont roulant par exemple).

Consignation générale

Lorsqu'un équipement industriel fait l'objet de l'ensemble des consignations partielles nécessaires pour éliminer chacun des risques existants, cet équipement est déclaré en état de consignation générale.

Nota : certaines circulations de fluides nécessaires à la sauvegarde des matériels (ventilation, circuit de refroidissement) et ne présentant aucun risque pour le personnel sont parfois, exclues de la consignation générale.

VIII.6.4 Interventions et travaux sur machines et équipements industriels

Interventions

Elles comportent généralement les phases suivantes :

- recherche du défaut, sur machine en état de fonctionnement ou de consignation partielle,
- élimination du défaut, sur machine en état de consignation partielle ou générale,
- essais et vérifications, réglages, sur machine en état de consignation partielle ou de fonctionnement.

Travaux

La consignation générale est indispensable.

VIII.6.5 Etat de consignation générale

La consignation générale est demandée par le ou les chargés de travaux au chargé de consignation générale désigné ; celui-ci peut recourir à des agents de consignation partielle dont il doit assurer la coordination.

La réalisation de l'état de consignation générale passe toujours par :

- l'inventaire des risques encourus par le personnel et le matériel,
- l'exécution des opérations aboutissant à la consignation partielle relative à chaque risque recensé,
- la remise d'une attestation de consignation générale à chacun des chargés de travaux concernés ou l'adoption de mesures présentant des garanties

équivalentes (exemple : pose de cadenas par le chargé de consignation et le chargé de travaux).

Nota : lorsqu'elle agit seule, une personne peut être autorisée par son employeur à remplir les fonctions de chargé de consignation générale et de chargé de travaux.

VIII.6.6 Etat de consignation partielle

Dans ce cas, le chargé d'intervention doit être parfaitement informé :

- du fonctionnement de l'équipement industriel (asservissement, cycles, ...),
- du ou des risques non éliminés,
- des règles à observer vis-à-vis des risques subsistants, par exemple :
 - o mise en place d'obstacles autour des machines voisines en fonctionnement,
 - o surveillance par un surveillant de sécurité,
 - o ventilation (toxicité, explosion, ...),
 - o protections individuelles nécessaires.

Lorsqu'un document de consignation partielle est remis, il doit clairement mentionner:

- les consignations partielles réalisées,
- les risques non éliminés.

VIII.6.7 Exemple de consignation partielle : arrêt machine

Inventaire des risques,

- séparation de toutes sources d'énergie par la manœuvre de sectionneurs, vannes, distributeurs,
- condamnation des organes de séparation précédents :
 - en position d'ouverture (énergie électrique),
 - en position de fermeture (énergies hydraulique, pneumatique, vapeur),
- élimination des énergies résiduelles,
- décompression (et mise à l'air libre éventuelle) des capacités pneumatiques ou hydrauliques sous pression, des circuits vapeur, ... et vérification de la décompression,
- mise à la terre et en court-circuit ai nécessaire,
- vérification de l'impossibilité de remise en marche accidentelle par action sur les organes de commande habituels,
- mise en place éventuelle de garde-corps, écrans interdisant l'approche des parties restant en mouvement dans le voisinage,
- remise éventuelle de l'attestation de consignation partielle au chargé de travaux avec indication des limites de la zone de travail.

CHAPITRE IX**Ajuster et calibrer un système de commande électronique de moteurs****IX.1 Règles de sécurité**

Après toute intervention de maintenance ou de réparation il est obligatoire de vérifier et, si nécessaire, de refaire les réglages, non seulement de la partie soumise aux travaux, mais également pour l'ensemble du système (la partie mécanique commandée y comprise).

Pour effectuer les réglages on est est obligés d'actionner, dans la plupart des cas, sous tension, donc on effectue un essai afin de mettre au point le fonctionnement de l'équipement respectif. Durant cette activité on doit respecter les mesures de sécurité suivantes :

- La délimitation matérielle de l'emplacement est réalisée par des cloisons, écrans, barrières.
- Des dispositifs d'avertissement graphiques doivent être placés à l'extérieur.
- Chaque accès doit être équipé d'une lampe rouge allumée avant la mise sous tension et pendant l'essai.
- Les locaux ou emplacements doivent :
 - o Être clairement délimités par le chef d'établissement.
 - o Comporter des points d'alimentation en énergie électrique repérés par une plaque spécifiant la valeur et la nature de la tension. En BTA, ces points doivent être équipés d'un témoin lumineux de présence tension et éventuellement d'absence de tension si le degré IP est inférieur à IP 2X.
- Les appareils de mesure portatifs à main ainsi que les câbles souples doivent être parfaitement isolés et adaptés à la tension. Les conducteurs de raccordement doivent comporter un marquage indélébile de la section et de la tension nominale.
- La protection contre les contacts indirects doit être réalisée pour les matériels en essai.
- Les raccordements des canalisations mobiles aux installations fixes doivent présenter un degré IP 2X minimum en BTA si le courant d'emploi est au maximum de 16 A.

Au-delà, une consigne doit être affichée.

IX.2 Mesurages³**IX.2.1 Prescriptions générales**

Le personnel devra être habilité en tenant compte de l'existence éventuelle de pièces nues sous tension dans le voisinage.

³ Prescriptions de la norme UTE C18-570

Compte tenu des risques très importants liés à ces opérations, le personnel effectuant des mesurages doit utiliser des dispositifs de protection individuelle appropriés, tels que :

- gants isolants, tapis ou tabouret isolant pour éliminer les contacts fortuits,
- écran facial anti UV pour limiter les conséquences d'un court-circuit.

D'autre part, il est impératif de sélectionner rigoureusement le calibre à utiliser (appareils à calibres multiples), d'utiliser du matériel adapté au type de mesurage et aux tensions qui peuvent être rencontrées et de vérifier le bon état des appareils et du matériel de protection (matériel devant par construction être résistant aux erreurs de gammes de mesures).

IX.2.2 Mesurages sans ouverture de circuit

- L'utilisation de voltmètres, de pinces ampèremétriques, pinces homopolaires, de boîtes à bornes d'essais, nécessite que l'opérateur soit habilité indice 1 minimum et travaille soit sur instructions, soit sous la direction d'un chargé de travaux ou d'un chargé d'intervention.
- L'utilisation d'oscilloscopes ou d'appareils similaires nécessite l'intervention d'une personne habilitée BR, ou habilitée B1 sous la direction d'un chargé de travaux ou d'un chargé d'intervention.

IX.2.3 Mesurages nécessitant l'ouverture de circuit

Ils consistent généralement à insérer dans un circuit des appareillages plus ou moins complexes, tels que shunts, transformateurs d'intensité, wattmètres... On appliquera pour ces mesurages la procédure des interventions BT ou celle des travaux hors tension, voire celle des travaux au voisinage.

IX.3 Procédure de calibrage

Le calibrage de tous les paramètres de l'équipement de commande électronique sera réalisé avec les appareils de mesure appropriés (multimètre, oscilloscope, pince ampèremétrique, etc.) selon le manuel de service délivré par le fabricant de l'équipement. La procédure concrète de travail est en fonction du type et de la variante constructive de l'équipement.

A titre d'exemple les paramètres suivants doivent faire l'objet du calibrage :

- le courant maximum fourni au moteur,
- le rapport tension-fréquence,
- le temps d'accélération et le temps de décélération,
- la vitesse min et max de rotation du moteur

IX.4 Vérifier le fonctionnement des dispositifs de sécurité

Après avoir fini le calibrage de la commande électronique il est obligatoire de tester le juste fonctionnement des dispositifs de sécurité :

- l'arrêt du moteur dans le cas de surcharge (courant limite),

- la reinitialisation après une chute accidentale du secteur,
- le fonctionnement correct des limiteurs de fin de course (pour les parties mécaniques en mouvement qui sont actionnées à travers le moteur commandé électroniquement),
- le fonctionnement correct des organes de commande des régimes de fonctionnement de la commande électronique .

IX.5 Vérifier le fonctionnement de l'équipement

Cette étape a comme objectif le test fonctionnel de la commande électronique pour une durée de temps déterminée (habituellement un nombre minimum de 10 cycles technologiques complets du système technique actionné par le moteur commandé électroniquement.).

Si à l'expiration de la période de test tous les paramètres technologiques du système sont conformes avec les valeurs de référence de la documentation, on considère terminée la réparation et on arrête les documents de consignation.

Module 17
***Installation et réparation d'un système
de commande électronique de moteurs***
GUIDE DES TRAVAUX PRATIQUES

I. TP 1 : Redresseur à diodes

I.1. Objectif(s) visé(s) :

- commander un moteur électrique par un système de commande électronique
- interprétation des formes d'ondes des courants et des tensions à la sortie des convertisseurs ;
- branchement opérationnel et sécuritaire d'un moteur électrique à un système de commande électronique ;
- mesure correcte des signaux des convertisseurs.

I.2. Durée du TP:

La durée du travail pratique est de 3 heures.

I.3. Matériel (Équipement et matière d'œuvre) par équipe :

a) Equipement :

- | | |
|--|--------------|
| - module d'ampèremètre et voltmètre c.c. | EMS 8412-06; |
| - module de résistance variable | EMS 8311-06; |
| - alimentation pour mini-module | EMS 8843; |
| - sonde d'intensité | EMS 9052; |
| - module d'alimentation | EMS 8821-16; |
| - sonde de tension | EMS 9053; |
| - moteur à courant continu | EMS 8211; |
| - électrodynamomètre | EMS 8911; |

b) Matière d'œuvre :

- | | |
|-------------------------|-----------|
| - diode de puissance | EMS 8845; |
| - fils de raccordement. | |

I.4. Description du TP :

Les circuits redresseurs à diodes sont des convertisseurs de courant alternatif à courant continu. On les retrouve dans les circuits monophasés et triphasés.

On utilise ces redresseurs dans les systèmes d'alimentation pour les moteurs à courant continu et à courant alternatif.

I.5. Déroulement du TP

1.5.1 Redresseur monophasé

1.5.1.1 Redresseur monophasé simple alternance

1. Montez le circuit de la Figure 1-1 en branchant une charge de 220 ohms.

2. Utilisez le module de résistances variables.

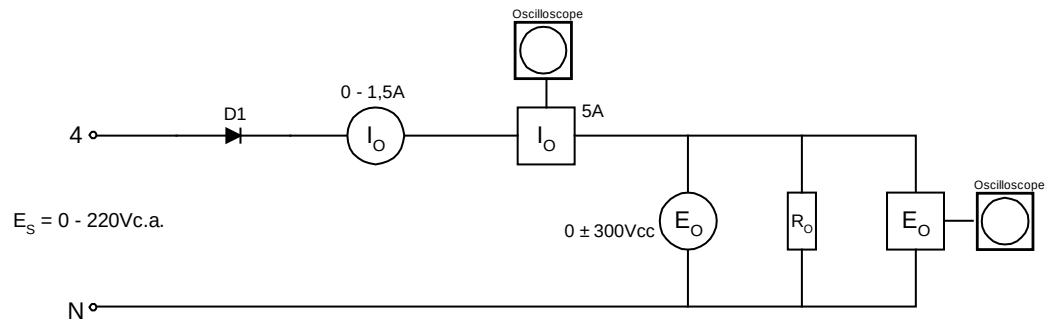


FIGURE 1-1

2. Ajustez la tension d'alimentation à 220Vc.a.
3. Branchez la sonde de tension sur l'échelle de 600V et la sonde de courant du l'échelle de 5 ampères.
4. Déterminez la valeur mesurée par le voltmètre et l'ampèremètre.
 $E_o = \text{_____ Vc.c.}$
 $I_o = \text{_____ Ac.c.}$
5. Tracez, à la Figure 1-2, les formes d'ondes de tension et de courant mesurées à l'oscilloscope.

Alignez ces formes d'ondes par rapport à E_s et indiquez leurs valeurs réelles.

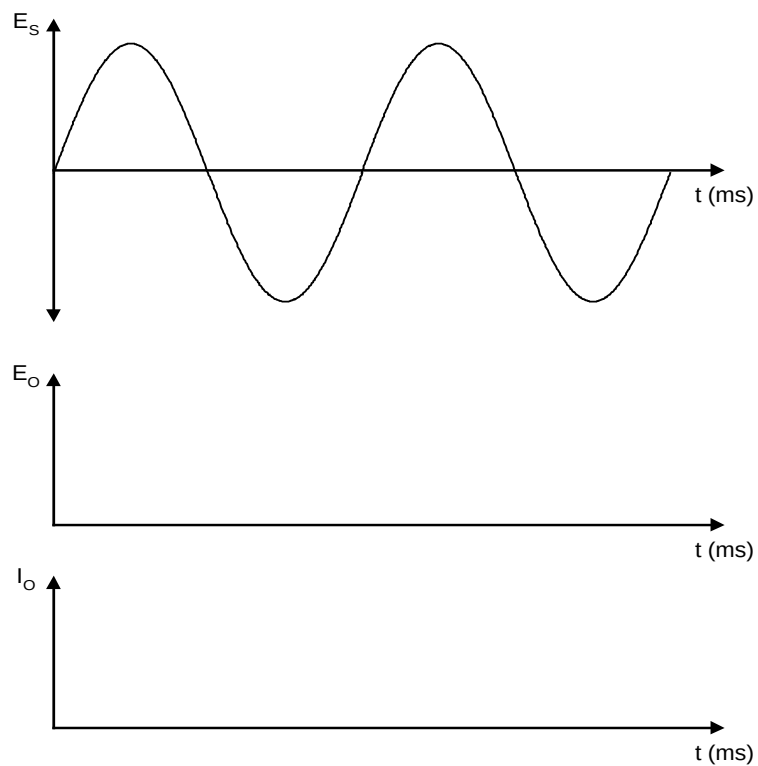


FIGURE 1-2

6. À partir des formes d'ondes, déterminez la valeur moyenne de tension et de courant.

$$E_{O\text{moyen}} = \text{_____} \text{ Vc.c.}$$

$$I_{O\text{moyen}} = \text{_____} \text{ Ac.c.}$$

7. Comparez ces résultats avec ceux obtenus à l'étape 4. Sont-ils identiques?

8. Quel est le rapport entre la tension de sortie et la tension d'alimentation?

$$E_O / E_S = \text{_____}$$

9. Déterminez la fréquence du signal de sortie.

$$F_O = \text{_____} \text{ Hz}$$

1.5.1.2 Redressement monophasé en pont

1. Montez le circuit de la Figure 1-3.

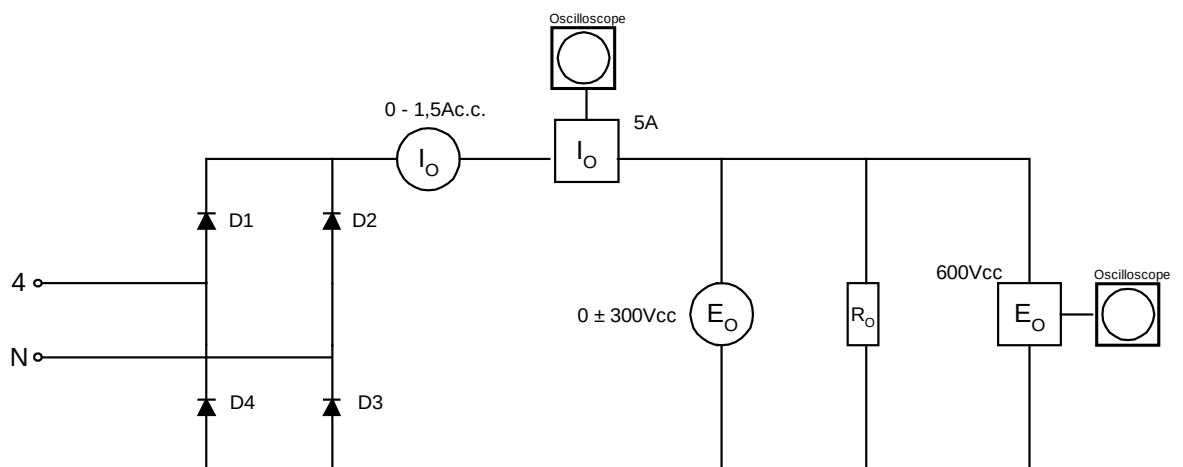


FIGURE 1-3

2. Ajustez la tension d'alimentation à 220Vc.a.
3. Déterminez la valeur mesurée par le voltmètre et l'ampèremètre.
 $E_O = \text{_____} \text{ Vc.c.}$
 $I_O = \text{_____} \text{ Ac.c.}$
4. Tracez la forme d'onde de la tension de sortie et du courant à la Figure 1-4. Indiquez les valeurs réelles.

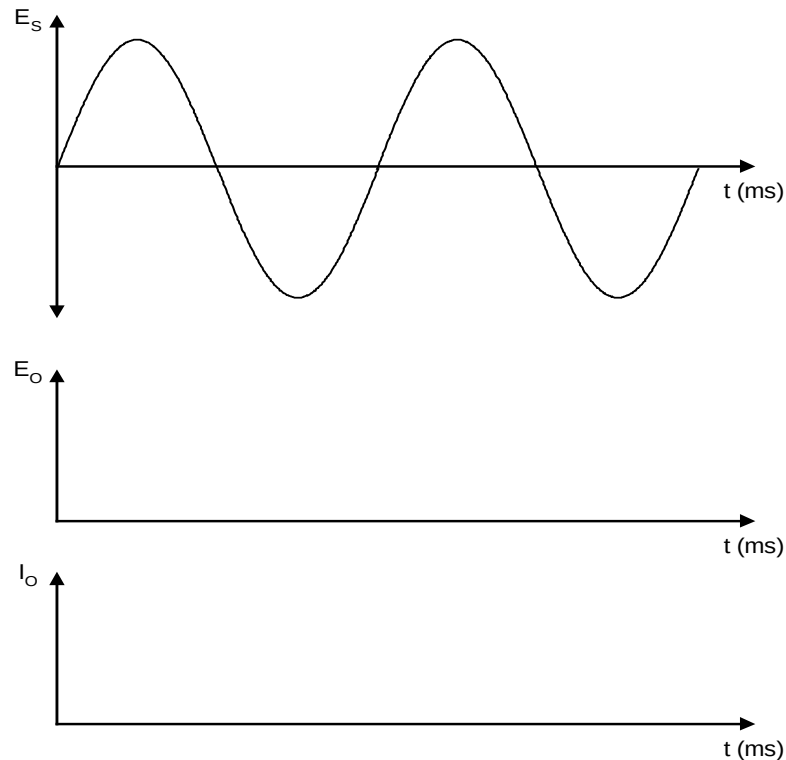


FIGURE 1-4

5. À partir des formes d'ondes, déterminez la valeur moyenne de tension et de courant.

$$E_{O\text{moyen}} = \text{_____ Vc.c.}$$

$$I_{O\text{moyen}} = \text{_____ Ac.c.}$$

6. Comparez ces résultats avec ceux obtenus à l'étape 3. Sont-ils identiques?

7. Quel est le rapport entre la tension de sortie et la tension d'alimentation?

$$E_o / E_s = \text{_____}$$

8. Déterminez la fréquence du signal de sortie.

$$F_o = \text{_____ Hz}$$

9. Coupez l'alimentation.

1.5.2 Redresseur triphasé

Le redresseur triphasé possède plusieurs avantages sur le redresseur monophasé. Il possède une ondulation de sortie supérieure au redresseur monophasé, ce qui nécessite des filtres de moindre importance.

1.5.2.1 Redresseur triphasé simple alternance

- Montez le circuit de la Figure 1-5 en raccordant une charge de 550 ohms.

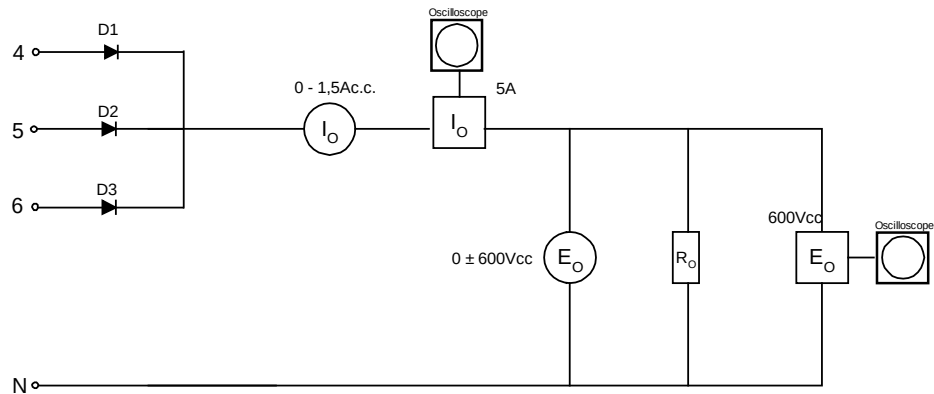


FIGURE 1-5

- Ajustez la tension de la source à 380V(tension de ligne) ou à 220V(tension de phase).
- Déterminez la valeur mesurée par le voltmètre et l'ampèremètre.
 $E_o = \underline{\hspace{2cm}} V_{c.c.}$
 $I_o = \underline{\hspace{2cm}} A_{c.c.}$
- Tracez la forme d'onde de la tension de sortie et du courant à la Figure 1-6. Indiquez les valeurs réelles.

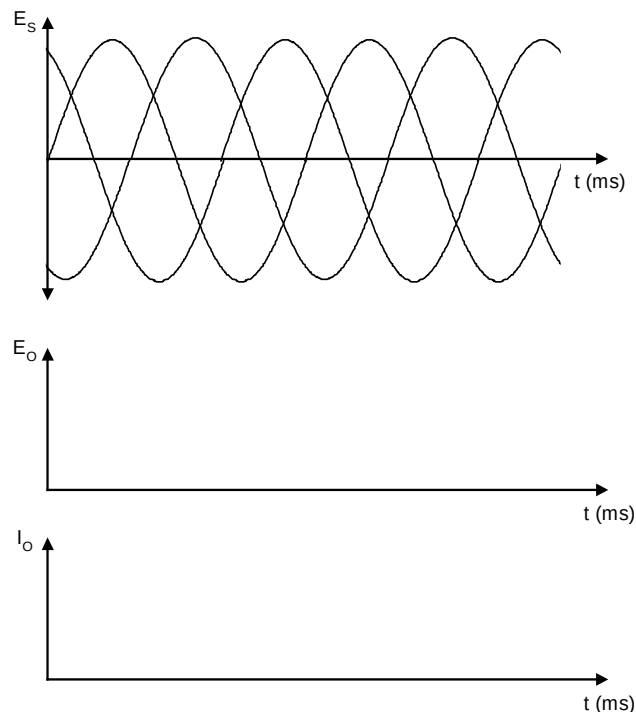


FIGURE 1-6

5. À partir des formes d'ondes, déterminez la valeur moyenne de tension et de courant.

$$E_O = \text{_____} V_{c.c.}$$

$$I_O = \text{_____} A_{c.c.}$$

6. Comparez ces résultats avec ceux obtenus à l'étape 3. Sont-ils identiques?

7. Quel est le rapport entre la tension de sortie et la tension d'alimentation (tension de ligne)?

$$E_O / E_S = \text{_____}$$

8. Déterminez la fréquence du signal de sortie.

$$F_O = \text{_____} \text{Hz}$$

Est-ce que la fréquence d'ondulation est supérieure à celle obtenue avec un redresseur monophasé simple alternance? _____

1. Que se produit-il si une diode devient circuit-ouvert? Débranchez une diode et commentez le signal de sortie.

1.5.2.2 Redresseur triphasé à double alternance

1. Montez le circuit suivant en raccordant une charge de 550 ohms.

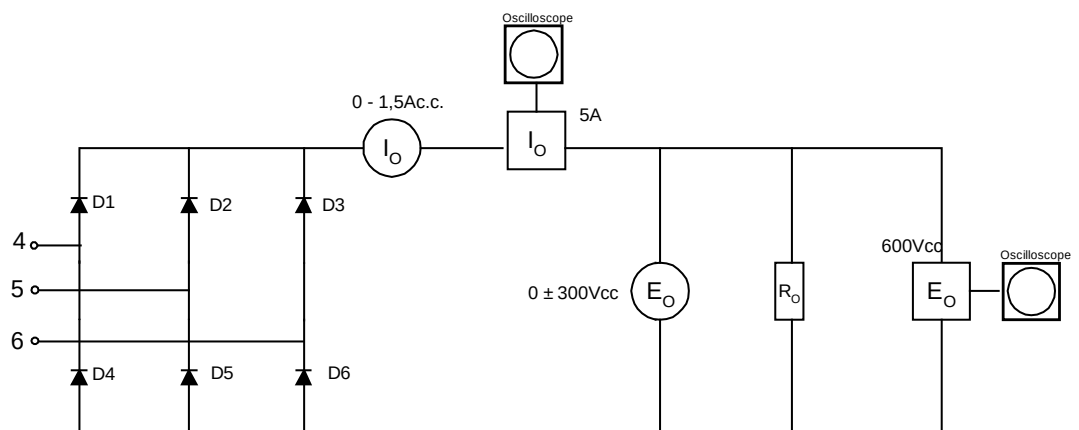


FIGURE 1-7

2. Ajustez la tension de la source à 220V (tension de ligne).
3. Déterminez la valeur mesurée par le voltmètre et l'ampèremètre.
 $E_o = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Vc.c.}$
 $I_o = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Ac.c.}$
4. Tracez la forme d'onde de la tension de sortie et du courant à la figure suivante. Indiquez les valeurs réelles.

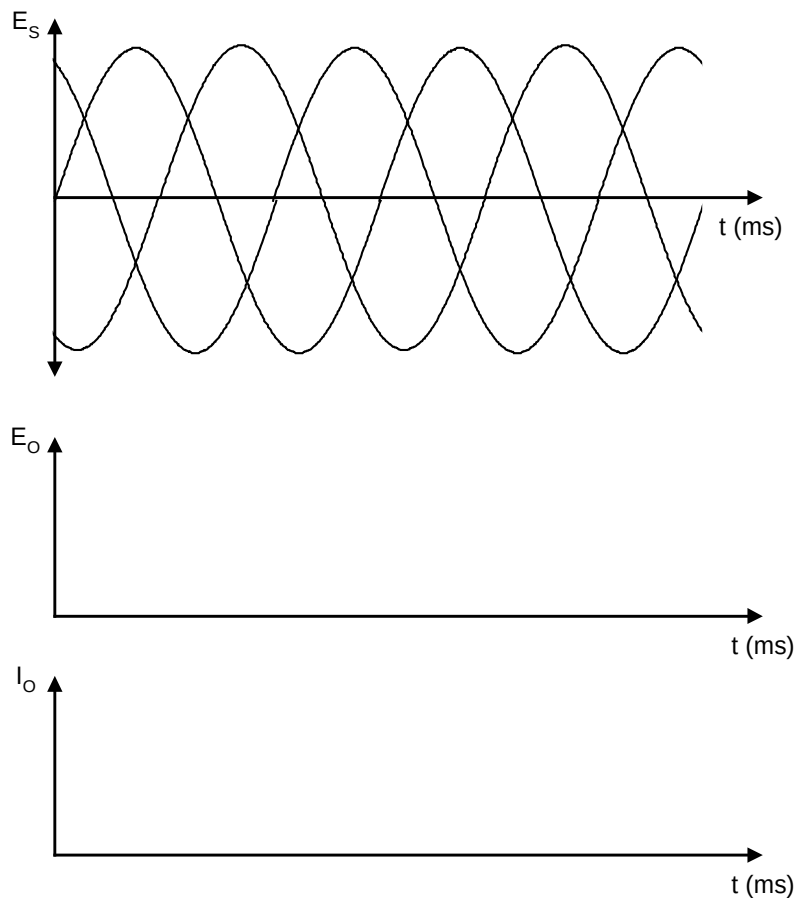


FIGURE 1-8

5. À partir des formes d'ondes, déterminez la valeur moyenne de tension et de courant.
 $E_o = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Vc.c.}$
 $I_o = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Ac.c.}$
6. Comparez ces résultats avec ceux obtenus à l'étape 3. Sont-ils identiques?

7. Quel est le rapport entre la tension de sortie et la tension d'alimentation (tension de ligne)?

$$E_o / E_s = \underline{\hspace{2cm}}$$

8. Déterminez la fréquence du signal de sortie.

$$F_o = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Hz}$$

II. TP 2 : Redresseur à thyristors

II.1. Objectif(s) visé(s) :

- Commander un moteur électrique par un système de commande électronique.
- interprétation des formes d'onde des courants et des tensions à la sortie des convertisseurs;
- branchement opérationnel et sécuritaire d'un moteur électrique à un système de commande électronique;
- mesure correcte des signaux des convertisseurs.

II.2. Durée du TP:

La durée du travail pratique est de 3 heures.

II.3. Matériel (Équipement et matière d'œuvre) par équipe :

a) Équipement :

- module d'alimentation EMS 8821-16;
- module d'ampèremètre et voltmètre c.c. EMS 8412-06;
- module de résistance variable EMS 8311-06;
- alimentation pour mini-module EMS 8843;
- sonde d'intensité EMS 9052;
- sonde de tension EMS 9053;
- moteur à courant continu EMS 8211;
- électrodynamomètre EMS 8911;
- déclencheur de thyristors EMS 9030.

b) Matière d'œuvre :

- diode de puissance EMS 8845;
- thyristors de puissance EMS 8844;
- convertisseur analogique-numérique EMS 9031;
- fils de raccordement

II.4. Description du TP :

Les circuits redresseurs à thyristors sont des convertisseurs de courant alternatif à courant continu de tension variable, selon un angle d'amorçage.

On retrouve ce type de redresseurs dans les variateurs de vitesse pour les moteurs à courant continu. Selon la puissance du moteur, ce type de redresseurs peut être monophasé ou triphasé.

II.5. Déroulement du TP

2.5.1 Le déclencheur à thyristor

Les sorties:

Le déclencheur est constitué de six prises bananes. L'identificateur de ces prises (A+, A-, B+, B-, C+, C-) facilite le branchement des thyristors.

Il existe un décalage de 180° entre la borne positive et la borne négative. Les sorties « + » correspondent aux thyristors (Q₁, Q₂, Q₃), tandis que les sorties « - » correspondent aux thyristors (Q₄, Q₅, Q₆).

L'angle d'amorçage:

- Pour déterminer l'angle d'amorçage « α », on utilise l'équation suivante:

$$\alpha = \frac{180^\circ}{255} \times D$$

- α = angle de déclenchement, en degrés;
- D = donnée de déclenchement, exprimée en notation décimale comprise
- entre 0 et 255.

Par exemple, si l'on désire un angle de 45°, la valeur de D doit être:

$$D = (\alpha \times 255) / 180^\circ$$

$$D = (45^\circ \times 255) / 180^\circ = 63.75$$

Selon le tableau de conversion du convertisseur A/N en annexe du TP1, la valeur binaire de l'affichage doit être:

01000000

Pour une source monophasée, l'angle d'amorçage est déterminé à partir du début de l'alternance, tandis que pour une source triphasée, il se situe au moment où deux tensions de phases ont la même amplitude.

2.5.2 Redresseur commandé monophasé

2.5.2.1 Redresseur commandé monophasé simple alternance

1. Montez le circuit de la Figure 2-1 en branchant une charge de 220 ohms.

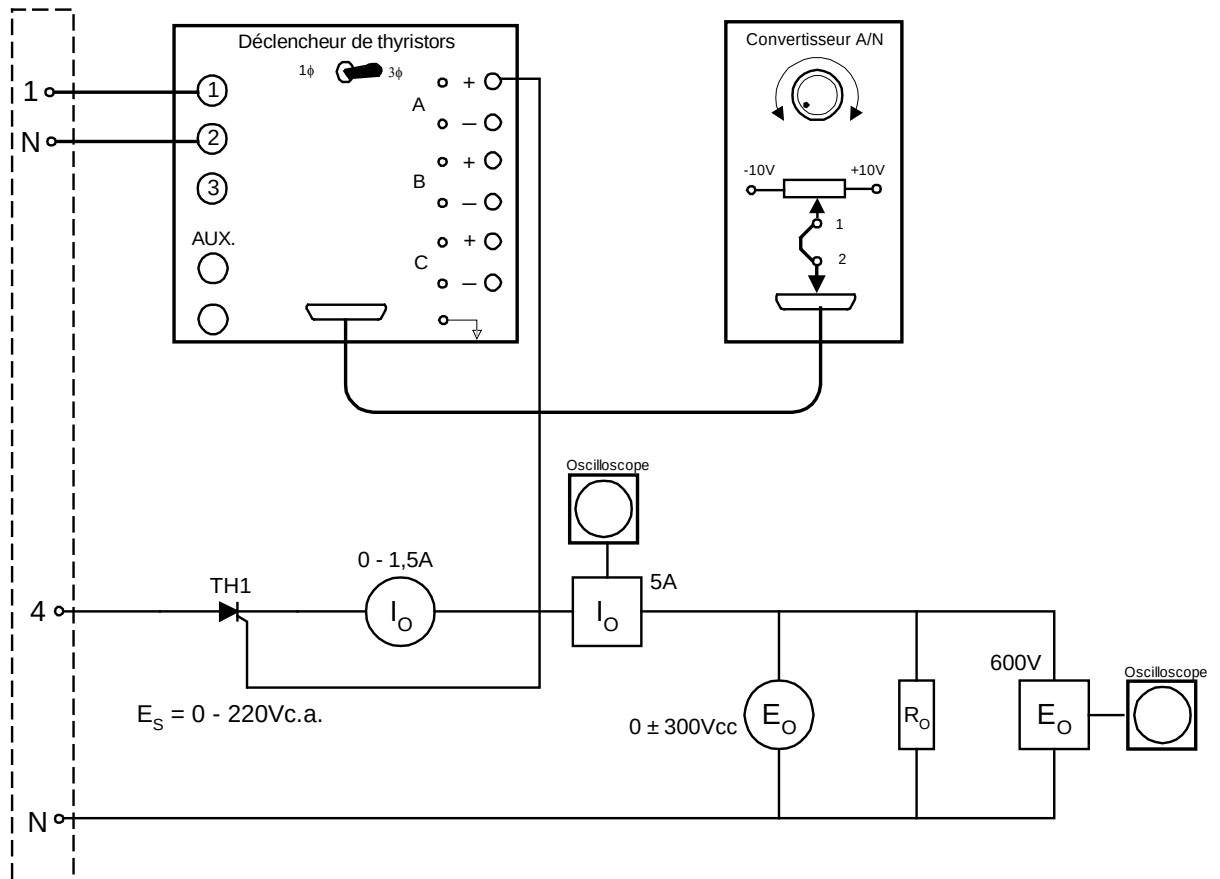


FIGURE 2-1

2. Ajustez la tension E_s à 220Vc.a.
3. Placez l'interrupteur sur le module de déclenchement à 1φ et réglez l'angle d'amorçage pour avoir 90°.
4. Déterminez les valeurs mesurées par le voltmètre et l'ampèremètre.
 $E_o = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Vc.c.}$
 $I_o = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Ac.c.}$
5. Tracez, à la Figure 2-2, les formes d'ondes de tension et de courant mesurées à l'oscilloscope. Alignez ces formes d'ondes par rapport à E_s et indiquez leurs valeurs réelles.

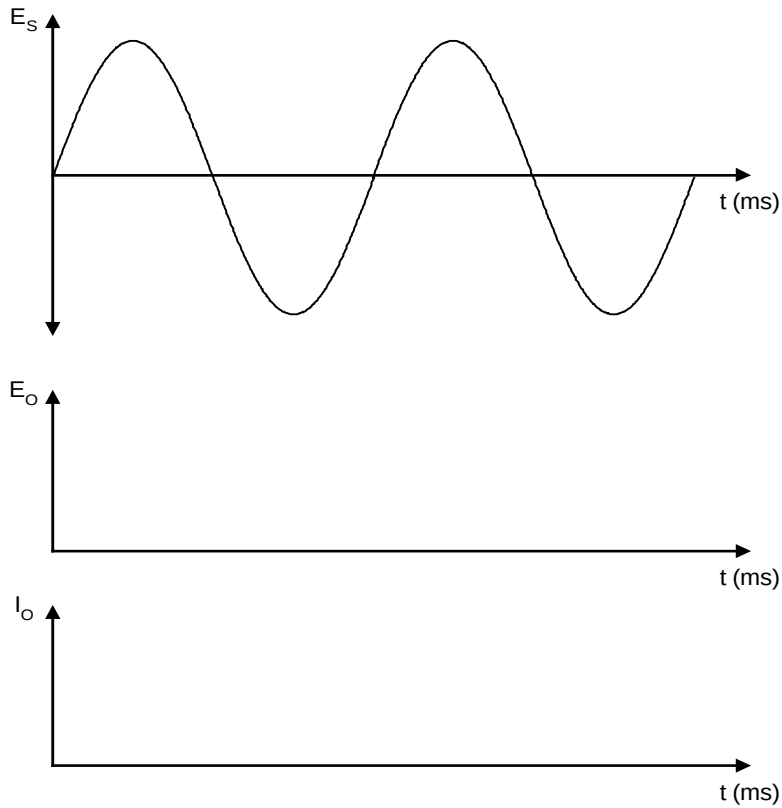


FIGURE 2-2

6. En utilisant l'oscilloscope, déterminez la tension moyenne à la sortie et comparez-la

à celle mesurée avec le voltmètre.

$E_{\text{moyen}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Vc.c.}$

7. Pour différents angles d'amorçage, déterminez E_o . Remplissez le Tableau 2-1: Tension moyenne en fonction de α° .

TABLEAU 2-1: TENSION MOYENNE EN FONCTION DE α°

α°	$E_{\text{Omesuré}}(\text{V})$	$E_{\text{Othéorique}}(\text{V})$
0°		
30°		
60°		
90°		
120°		
150°		
180°		

La valeur théorique est donnée par l'équation suivante:

$$E_{\text{Othéorique}} = (E_{\text{max}} / 2\pi) \times (1 + \cos \alpha)$$

8. Coupez l'alimentation.

2.5.2.2 Redressement commandé monophasé double alternance

- Montez le circuit de la Figure 2-3 en branchant une charge résistive de 220 ohms.

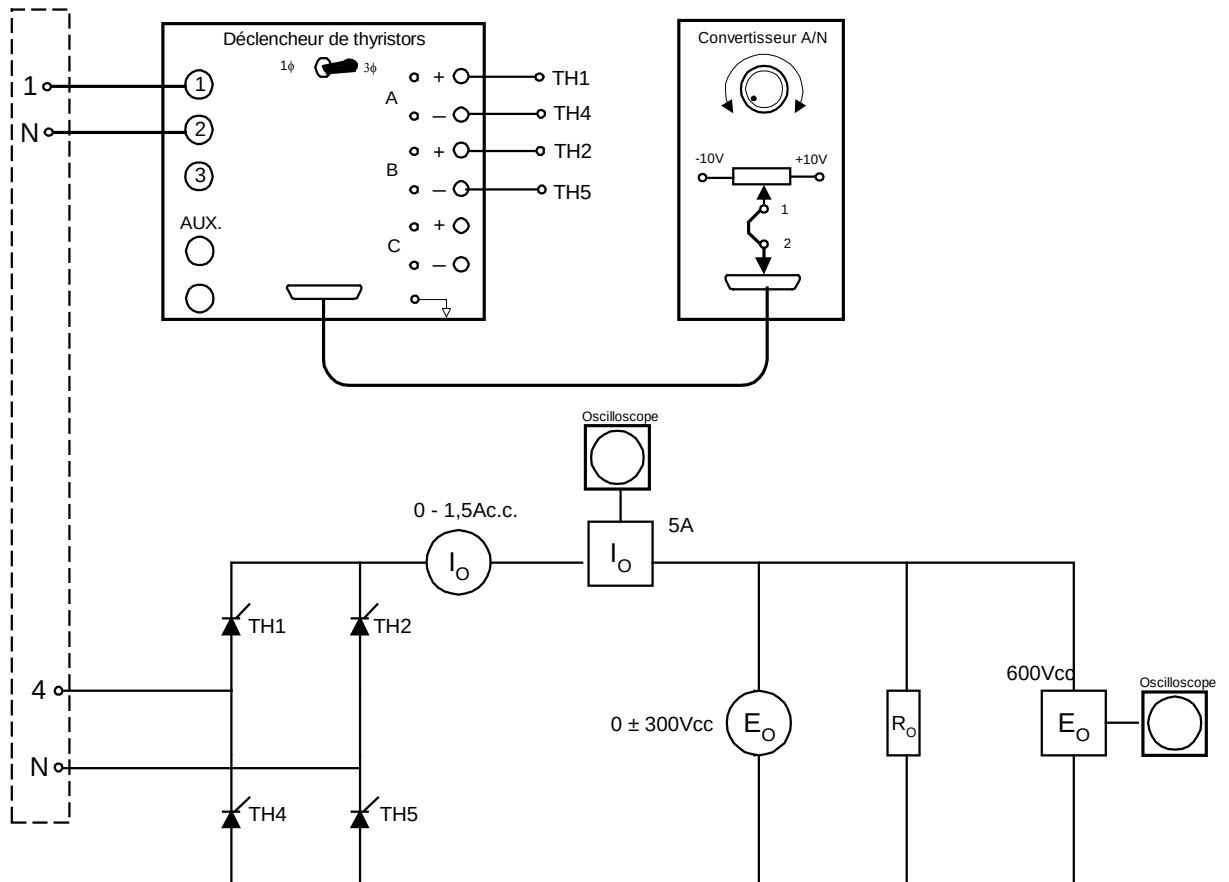


FIGURE 2-3

- Ajustez la tension d'alimentation à 220Vc.a. et réglez l'angle d'amorçage pour avoir 90° .
- Déterminez la valeur mesurée par le voltmètre et l'ampèremètre.
 $E_o = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Vc.c.}$
 $I_o = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Ac.c.}$
- Tracez la forme d'onde de la tension de sortie et du courant à la Figure 2-4. Indiquez les valeurs réelles.

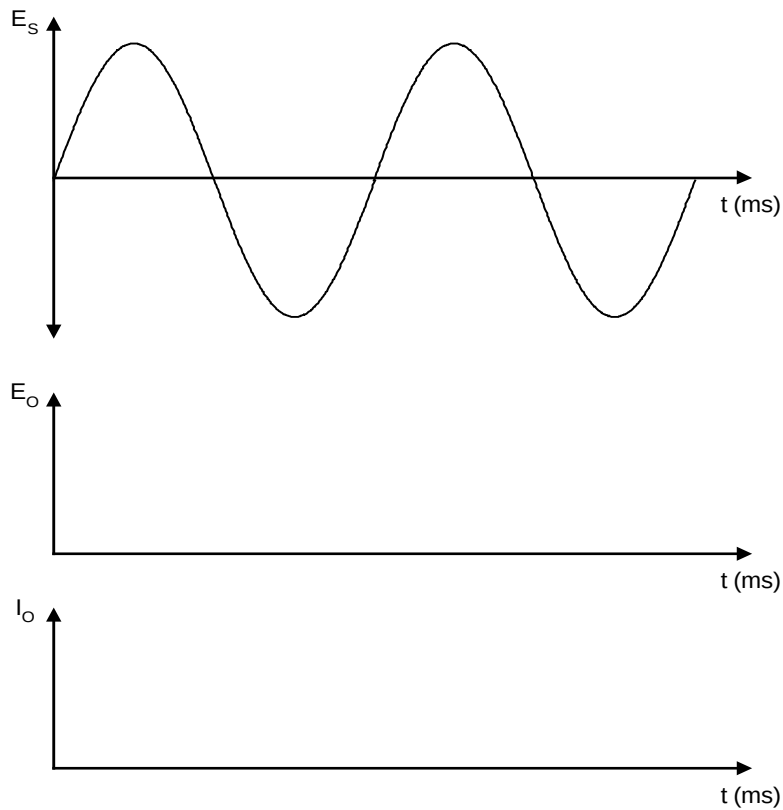


FIGURE 2-4

5. En utilisant l'oscilloscope, déterminez la tension moyenne à la sortie et comparez-la à celle mesurée avec le voltmètre.

$E_{\text{moyen}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Vc.c.}$

6. Pour différents angles d'amorçage, déterminez E_o . Remplissez le Tableau 2-2: Tension moyenne en fonction de α°

TABLEAU 2-2: TENSION MOYENNE EN FONCTION DE α°

α°	$E_{\text{Omesuré}}(\text{V})$	$E_{\text{Othéorique}}(\text{V})$
0°		
30°		
60°		
90°		
120°		
150°		
180°		

La valeur théorique est donnée par l'équation suivante:

$$E_{\text{Othéorique}} = (E_{\text{max}} / \pi) \times (1 + \cos \alpha)$$

2.5.3 Contrôle de vitesse pour un moteur à courant continu

1. Remplacez la charge résistive du circuit précédent par un moteur à courant continu.

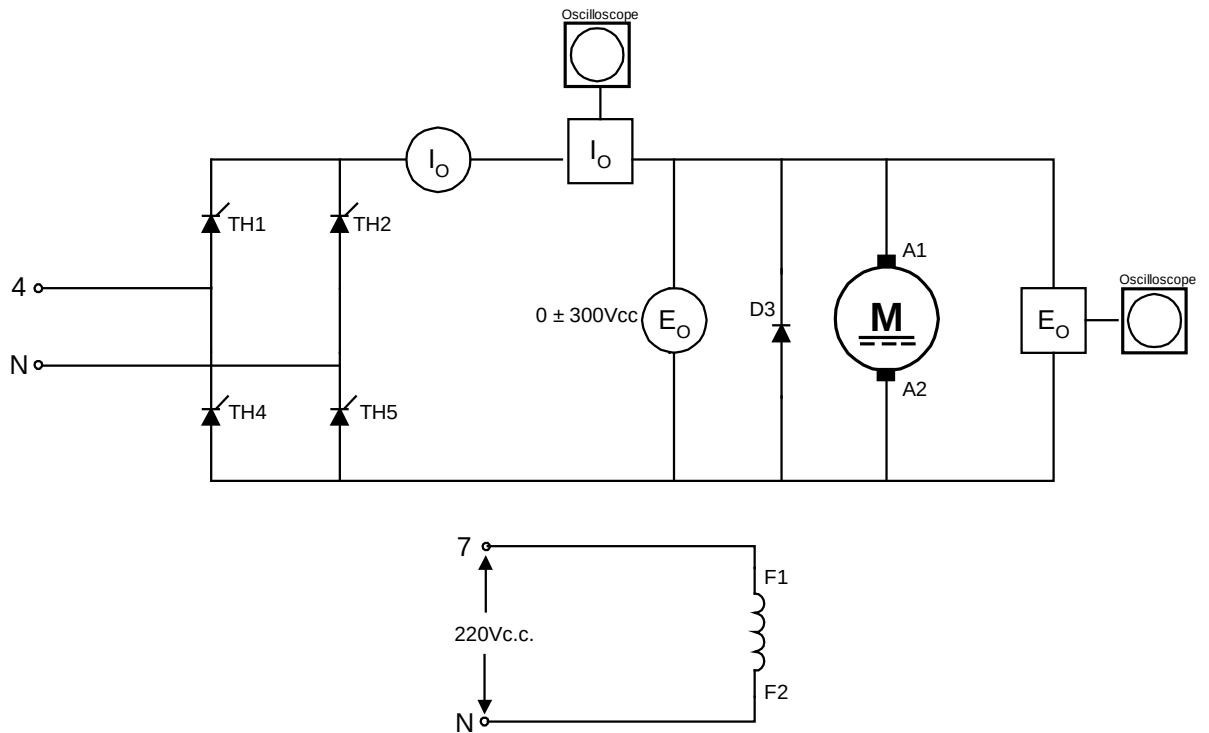


FIGURE 2-5

2. Accouplez l'électrodynamomètre au moteur et ajustez le contrôle à la position médiane.
3. Alimentez et variez l'angle d'amorçage.
4. Que se produit-il?

5. Remplacez TH4 et TH5 par des diodes et vérifiez le fonctionnement du circuit. Est-ce que le circuit se comporte de la même façon qu'avec 4 thyristors?

2.5.4 Redresseur commandé triphasé

2.5.4.1 Redresseur commandé triphasé simple alternance

- Montez le circuit de la Figure 2-6 en raccordant une charge de 550 ohms. Placez l'interrupteur sur le déclencheur en position 3 ϕ .

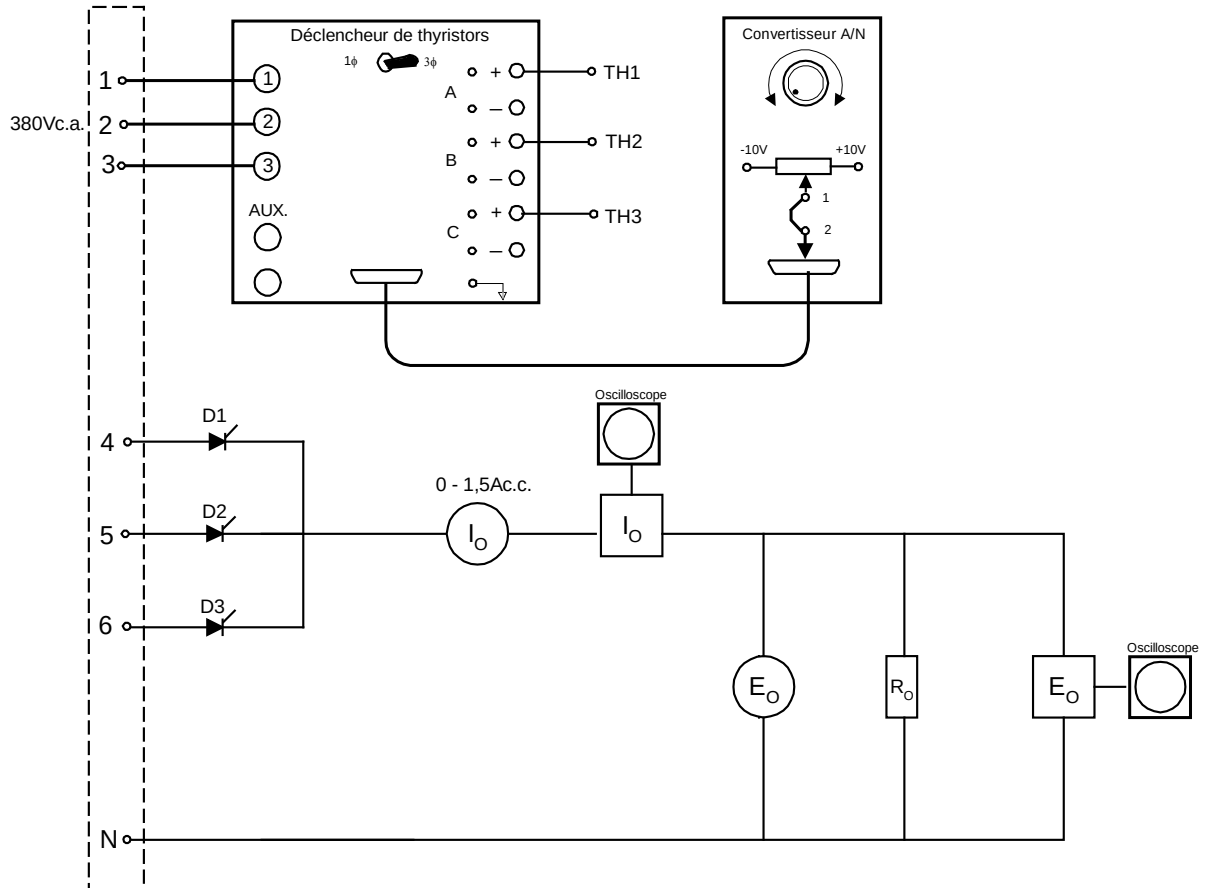


FIGURE 2-6

- Réglez E_s à 380 Vc.a.
- Ajustez l'angle d'amorçage à 30° et déterminez, avec le voltmètre et l'ampèremètre, la tension et le courant à la charge.
 $E_o = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Vc.c.}$
 $I_o = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Ac.c.}$
- En utilisant l'oscilloscope, déterminez la tension moyenne à la charge et comparez-la à celle mesurée avec le voltmètre
 $E_{\text{moyen}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Vc.c.}$
- Pour différents angles d'amorçage, déterminez E_o . Remplissez le tableau suivant:

TABEAU 3-3 : TENSION MOYENNE EN FONCTION DE α°

α°	$E_{\text{Omesuré}}(\text{V})$	$E_{\text{Othéorique}}(\text{V})$
0°		
30°		
60°		
90°		
120°		
150°		
180°		

- La valeur théorique est donnée par les équations suivantes:
 si $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ $E_{\text{moyen}} = (3\sqrt{3} / 2\pi) \times E_{\text{PHmax}} \cos \alpha$
 si $30^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ $E_{\text{moyen}} = (3 E_{\text{PHmax}} / 2\pi) \times (1 + \cos(\alpha + 30^\circ))$
- 7. Coupez l'alimentation.

2.5.4.2 Redresseur commandé triphasé double alternance

1. Montez le circuit de la Figure 2-7 en raccordant une charge de 550 ohms. Placez

l'interrupteur sur le déclencheur en position 3 ϕ .

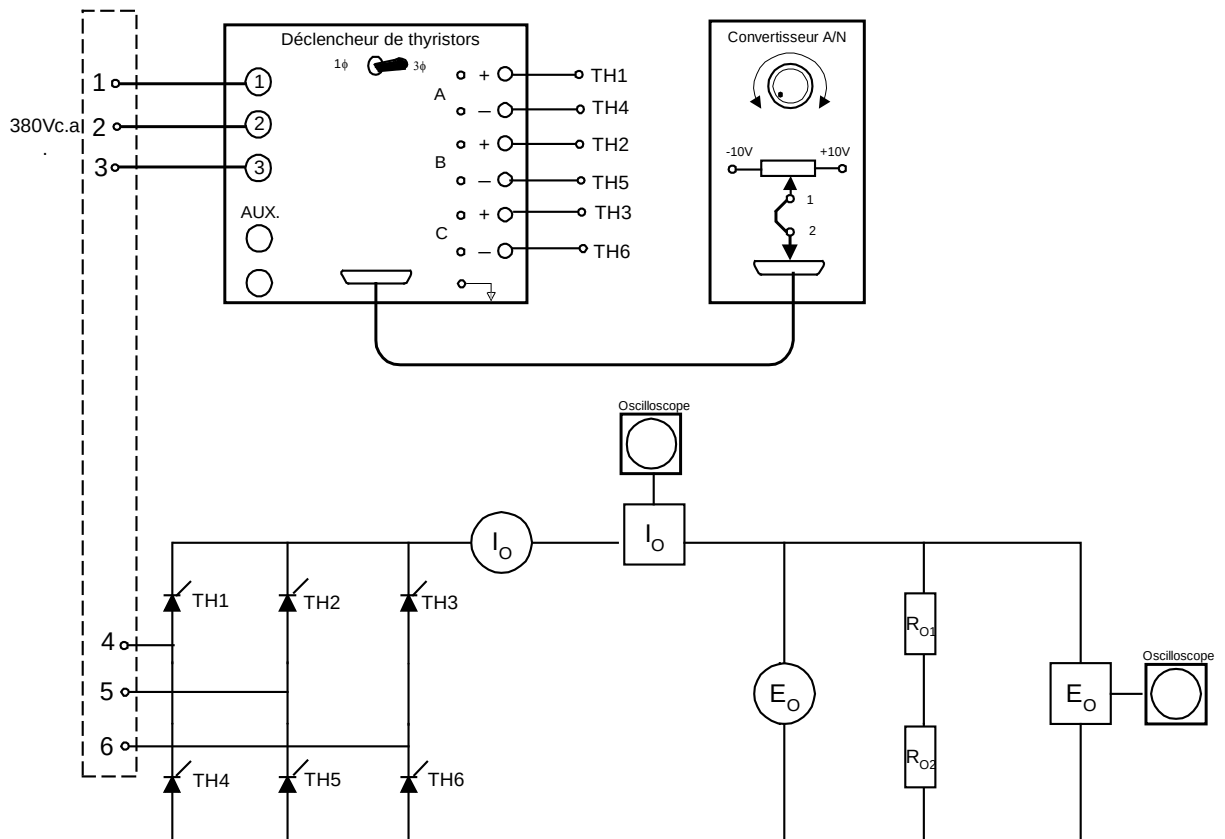


FIGURE 2-7

2. Réglez E_s à 380 Vc.a.

3. Ajustez l'angle d'amorçage à 30° et déterminez, avec le voltmètre et l'ampèremètre, la tension et le courant à la charge.

$$E_O = \text{_____} \text{ Vc.c.}$$

$$I_O = \text{_____} \text{ Ac.c.}$$

5. En utilisant l'oscilloscope, déterminez la tension moyenne à la charge et comparez-la à celle mesurée avec le voltmètre

$$E_{\text{moyen}} = \text{_____} \text{ Vc.c.}$$

6. Pour différents angles d'amorçage, déterminez E_O . Remplissez le tableau suivant:

TABLEAU 2-4 : TENSION MOYENNE EN FONCTION DE α°		
α°	$E_{O\text{mesuré}}(\text{V})$	$E_{O\text{théorique}}(\text{V})$
0°		
30°		
60°		
90°		
120°		
150°		
180°		

La valeur théorique est donnée par les équations suivantes:

$$E_{\text{moyen}} = (3 / \pi) \times E_{\text{LIGNEmax}} \cos \alpha$$

7. Coupez l'alimentation.
8. Donnez une application où l'on retrouve ce redresseur.

9. Pour un angle d'amorçage supérieur à 90° , est-ce que le redresseur peut fournir de l'énergie au réseau ?

III.TP 3 : Gradateur

III.1. Objectif(s) visé(s) :

- Commander un moteur électrique par un système de commande électronique.
- interprétation des formes d'ondes des courants et des tensions à la sortie des convertisseurs;
- branchement opérationnel et sécuritaire d'un moteur électrique à un système de commande électronique;
- mesure correcte des signaux des convertisseurs.

III.2. Durée du TP:

La durée du travail pratique est de 6 heures.

III.3. Matériel (Équipement et matière d'œuvre) par équipe :

a) Équipement :

- module d'alimentation EMS 8821-16;
- module d'ampèremètre et voltmètre c.c. EMS 8412-06;
- module de résistance variable EMS 8311-06;
- alimentation pour mini-module EMS 8843;
- sonde d'intensité EMS 9052;
- sonde de tension EMS 9053;
- moteur universel
- moteur à cage d'écureuil
- électrodynamomètre EMS 8911;
- convertisseur analogique-numérique EMS 9031;
- déclencheur de thyristors EMS 9030.

b) Matière d'œuvre :

- thyristors de puissance EMS 8844;
- fils de raccordement

III.4. Description du TP :

Comparativement au redresseur contrôlé qui alimente des charges à courant continu, le gradateur contrôle des charges à courant alternatif.

On le retrouve dans le contrôle des charges résistives tels les fours électriques, les systèmes d'éclairage, etc. On l'utilise aussi dans le contrôle des moteurs universels et des moteurs asynchrones triphasés. Les démarreurs électroniques à tension réduite pour moteurs asynchrones utilisent le principe de fonctionnement du gradateur.

III.5. Déroulement du TP

3.5.1 Gradateur monophasé

3.5.1.1 Gradateur monophasé avec charge résistive

- Montez le circuit de la Figure 3-1 et assurez-vous que le commutateur du déclencheur est en mode 1 ϕ . Branchez une charge de 220 ohms.

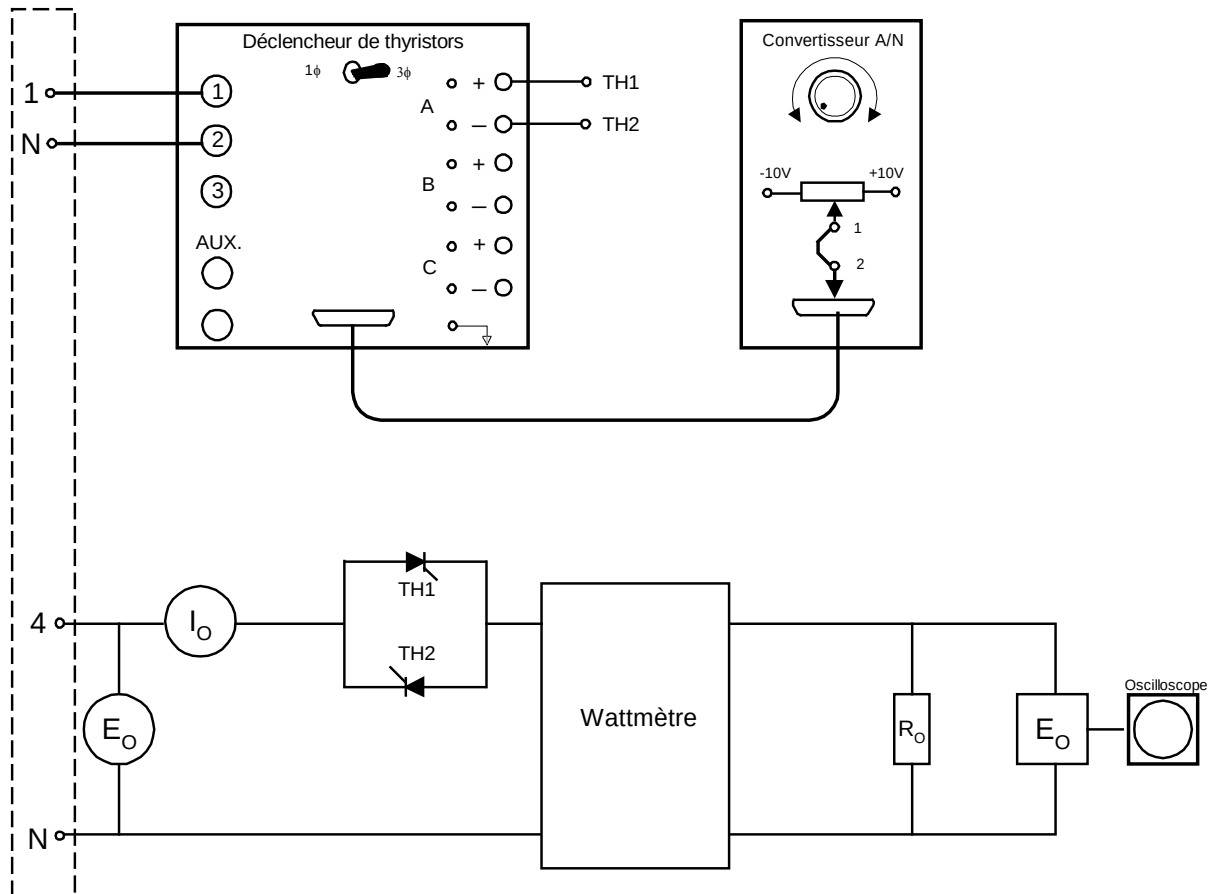


FIGURE 3-1

- Ajustez E_s à 220Vc.a.
- Pour chaque angle d'amorçage indiqué au Tableau 3-1, mesurez le courant et la puissance active. À partir de vos résultats, calculez le facteur de puissance et indiquez ceux-ci dans le Tableau 3-1

TABLEAU 3-1: PUISSANCE DISSIPÉE EN FONCTION DE α

α°	I(A)	$P_o(W)$	F.P. (%)
0°			
30°			
60°			
90°			
120°			
150°			
180°			

9. À l'aide de vos résultats, tracez la courbe de la puissance active en fonction de l'angle d'amorçage.



FIGURE 3-2

5. Pourquoi la puissance active diminue-t-elle lorsqu'on augmente l'angle d'amorçage?

6. Expliquez pourquoi le facteur de puissance diminue avec l'augmentation de l'angle d'amorçage.

7. Tracez la forme d'onde de sortie pour un angle d'amorçage de 90°.

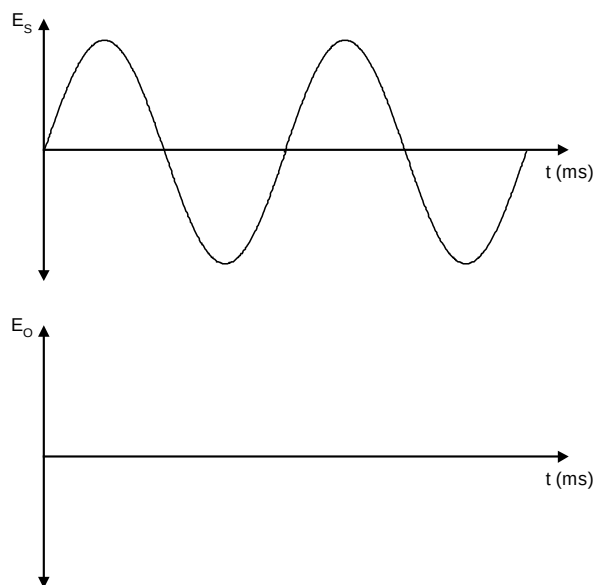


FIGURE 3-3

8. Branchez le voltmètre aux bornes de la charge et mesurez la tension pour un angle de 90°.

$E_o =$ _____

9. Coupez l'alimentation.

3.5.1.2 Contrôle de vitesse pour un moteur universel

Pour varier la vitesse d'un moteur universel, il suffit de varier la tension d'alimentation.

1. Montez le circuit de la Figure 3-4.

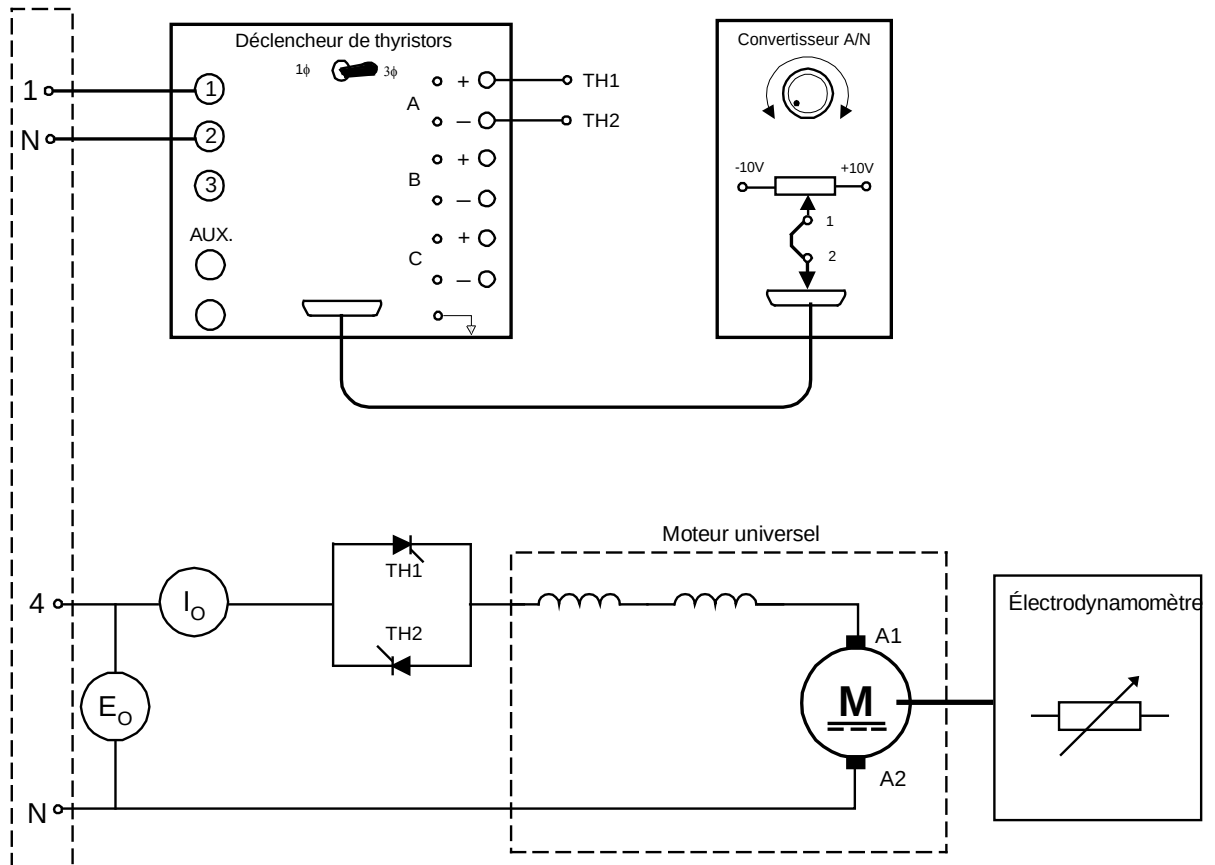


FIGURE 3-4

2. Ajustez E_s à 220Vc.a.
3. Accouplez l'électrodynamomètre sur le moteur et ajustez le contrôle de celui-ci à la position médiane.
4. Si le moteur tourne dans la direction anti-horaire, inversez les enroulements de l'armature.
5. Placez le potentiomètre du convertisseur A/N complètement à gauche, pour avoir un angle d'amorçage de 0° et mesurez la vitesse du moteur.
 $N = \underline{\hspace{2cm}}$ tr /min.
6. Variez le potentiomètre vers la droite et observez la réaction du moteur.

Que constatez-vous?

3.5.2 Gradateur triphasé

3.5.2.1 Contrôle de vitesse pour moteur asynchrone triphasé

On peut changer la vitesse d'un moteur à induction en utilisant trois différentes méthodes:

- en variant la fréquence de la source;
- en variant la résistance de l'induit;
- en variant la tension d'alimentation.

Le gradateur utilise cette dernière méthode. On peut utiliser aussi le gradateur comme dispositif de démarrage à tension réduite.

1. Montez le circuit de la Figure 3-5 en branchant la génératrice à courant continu comme charge pour le moteur à cage d'écureuil. L'interrupteur du déclencheur à thyristors doit être en position 3ϕ .
2. Tournez le potentiomètre du convertisseur pour avoir un angle d'amorçage de 0° .
3. Ajustez E_s pour avoir 220Vc.a., réglez le rhéostat de champ R_F du générateur pour obtenir une tension de 220Vc.c. à ses bornes.
4. Mesurez la vitesse de rotation à l'aide du tachymètre.
 $N = \underline{\hspace{2cm}}$ tr / min.
5. Augmentez progressivement l'angle d'amorçage et notez la réaction du moteur.

Expliquez.

6. Mesurez la vitesse du moteur, la puissance active ainsi que le courant de ligne pour chacun des angles d'amorçage spécifiés au tableau suivant. Calculez le facteur de puissance à partir de vos résultats.
F.P. =

TABLEAU 3-2: VITESSE DU MOTEUR EN FONCTION DE α

α°	Vitesse (tr /min)	I (Ac.a.)	P (W)	F.P. (%)
0°				
30°				
45°				
60°				

75°			
90°			

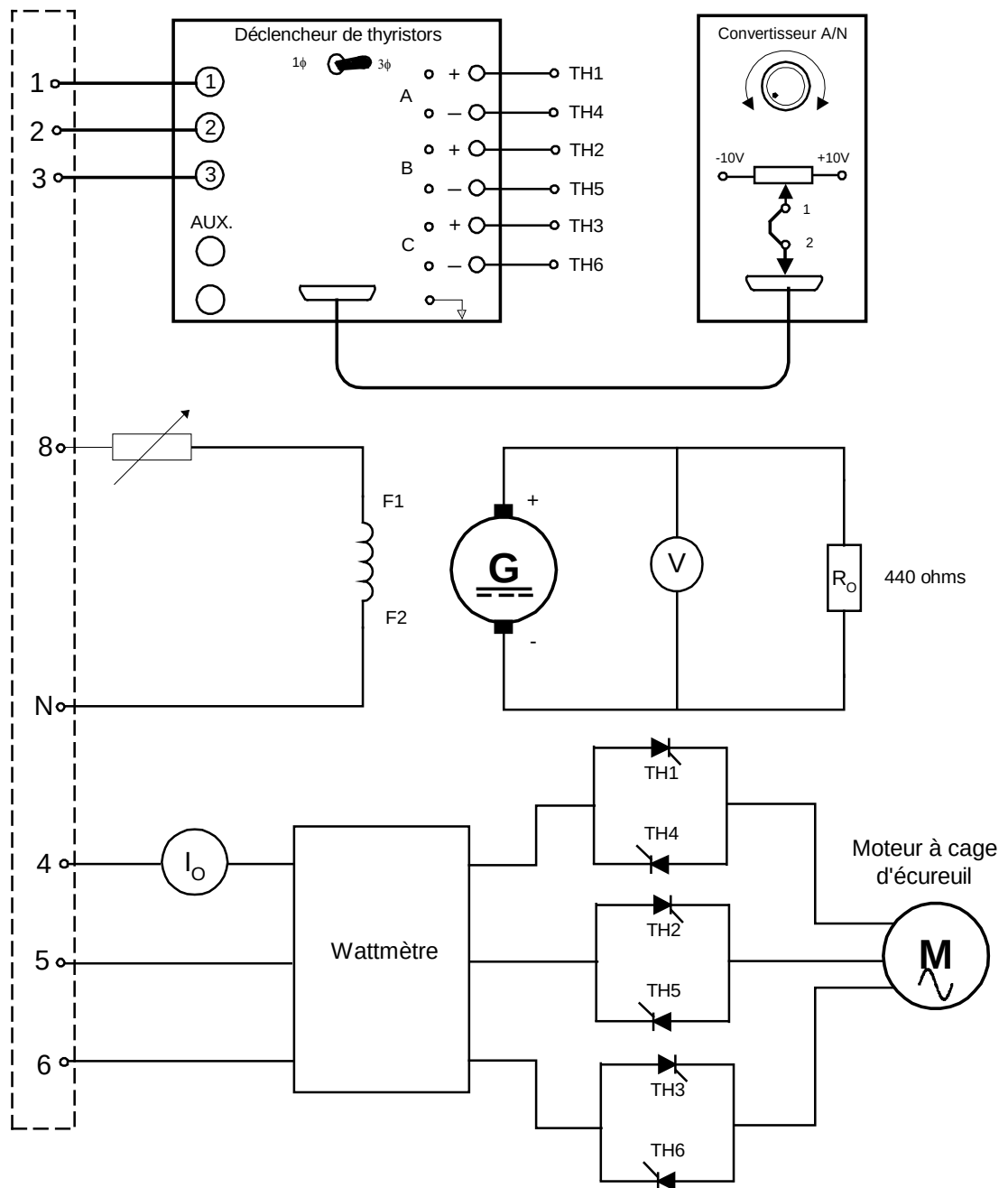


FIGURE 3-5

À partir de vos résultats, tracez la courbe représentant la vitesse du moteur en fonction de l'angle d'amorçage.



FIGURE 3-6

8. Selon la courbe, peut-on dire qu'il s'agit d'une commande de vitesse linéaire?

9. Donnez une application où on retrouve ce circuit ?

IV. TP 4 : L'onduleur

IV.1. Objectif(s) visé(s) :

- Commander un moteur électrique par un système de commande électronique.
- Interprétation des formes d'onde des courants et des tensions à la sortie des convertisseurs;
- Branchement opérationnel et sécuritaire d'un moteur électrique à un système de commande électronique;
- Mesure correcte des signaux des convertisseurs.

IV.2. Durée du TP:

La durée du travail pratique est de 3 heures.

IV.3. Matériel (Équipement et matière d'œuvre) par équipe :

a) Equipement :

- module d'alimentation EMS 8821;
- module d'ampèremètre et voltmètre c.c. EMS 8412;
- module de résistance variable EMS 8311;
- alimentation pour mini-module EMS 8843;
- wattmètre monophasé EMS 8441;
- sonde d'intensité EMS 9052;
- sonde de tension EMS 9053;
- générateur de fonction EMS 9033;
- oscilloscope double trace;

b) Matière d'œuvre :

- thyristors de puissance EMS 8844;
- fils de raccordement.
- transformateur EMS 8347;
- bobine de lissage EMS 8324;

IV.4. Description du TP :

L'onduleur est un convertisseur statique à thyristors ou à transistors, capable de transformer l'énergie d'une source de tension continue en une tension alternative. C'est un dispositif qui accomplit la fonction inverse du redresseur. Il existe deux grandes catégories d'onduleurs: les onduleurs non autonomes et les onduleurs autonomes.

Les onduleurs non autonomes sont utilisés dans le transport de l'énergie en courant continu à haute tension et dans la récupération de l'énergie lors du freinage de puissants moteurs à courant continu.

Les onduleurs autonomes sont utilisés comme alimentation de secours, ce sont des onduleurs à fréquence fixe. Il existe aussi des onduleurs à fréquence variable qu'on utilise dans les variateurs pour moteurs à courant alternatif.

Dans ce TP nous traiterons uniquement des onduleurs autonomes

IV.5. Déroulement du TP

IV.5.1 Onduleur autonome

Fonctionnement

La Figure 0-7 nous montre le principe d'un onduleur autonome.

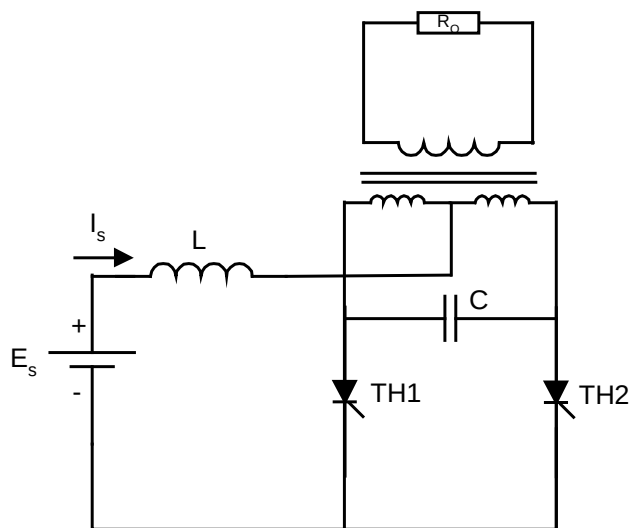


FIGURE 0-7

Les deux thyristors fonctionnent de façon complémentaire. Lorsqu'un thyristor est enclenché, il désamorce l'autre par l'intermédiaire du condensateur.

La bobine L sert à amortir les variations du courant I_s débité par la source à c.c. Le transformateur à prise médiane permet de produire une tension alternative aux bornes de la charge. Ces circuits peuvent fonctionner à plusieurs Kilohertz. Le condensateur est choisi en fonction du temps de blocage des thyristors et de la fréquence du commutation des thyristors.

IV.5.2 Onduleur autonome à fréquence fixe

- Montez le circuit de la figure suivante et ajustez E_s pour avoir 140Vc.c.

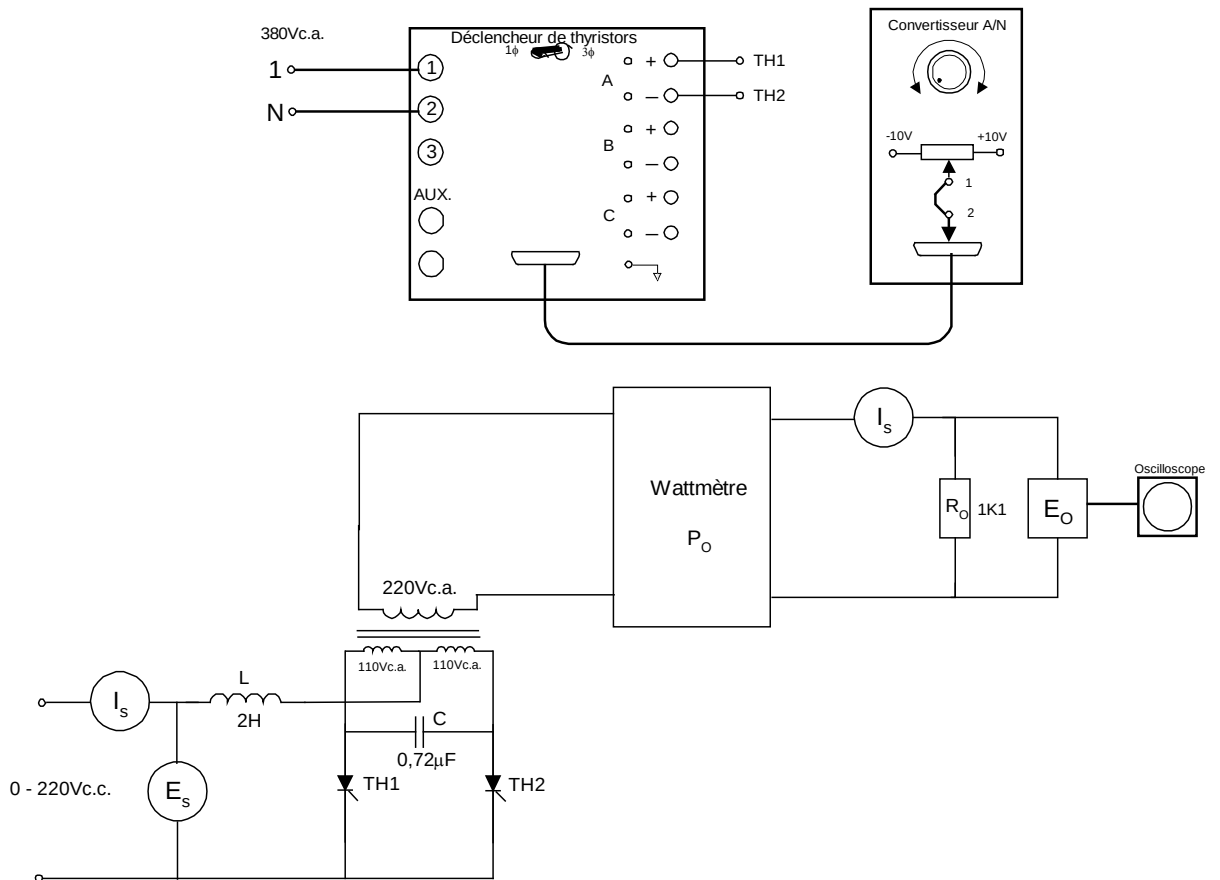


FIGURE 0-8

- Mesurez et notez les valeurs de I_s , I_o , et P_o .

$I_s =$ _____

$I_o =$ _____

$P_o =$ _____

- Calculez le rendement de l'onduleur.

$$n = (P_o / P_s) \times 100 = \text{_____} \%$$

- Tracez la forme d'onde à la sortie de l'onduleur à la Figure 0-9.

- Mesurez la fréquence du signal de sortie.

$F_o =$ _____



Figure 0-9

4.5.3 Onduleur à fréquence variable

Pour varier la fréquence de sortie de l'onduleur, on utilise un oscillateur à fréquence variable pour déclencher les deux thyristors du montage précédent.

1. Montez le circuit de la figure suivante, utilisez le générateur de fonction comme oscillateur.
2. L'oscilloscope doit fonctionner en mode synchronisation externe. L'entrée, prévue à cet effet est branchée à la sortie sync. du générateur de fonctions.

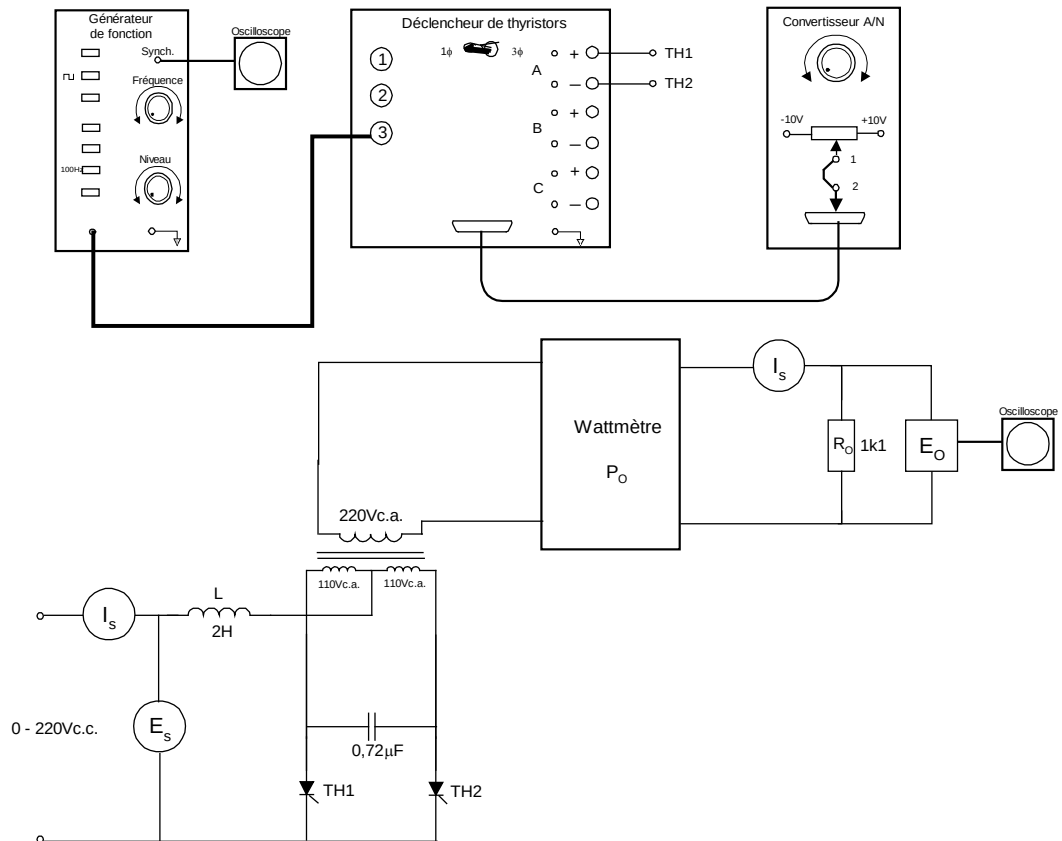


FIGURE 0-10

3. Réglez le niveau du générateur de fonctions pour avoir une amplitude maximum et sélectionnez le signal carré.
4. Réglez E_s au minimum et mettez sous tension.
5. À l'aide de l'oscilloscope, réglez la fréquence du générateur de fonction à 100 Hz.
6. Augmentez E_s jusqu'à 60V. Il ne faut pas que I_s dépasse 1,5A.
7. Augmentez graduellement la fréquence et notez le signal à la sortie. De même diminuez la fréquence et notez le signal à la sortie.
8. Commentez vos résultats.

V. TP 5 : Variateur de vitesse ATV 16

V.1. Objectif(s) visé(s) :

- commander un moteur électrique par un système de commande électronique.
- branchement opérationnel et sécuritaire d'un moteur électrique à un système de commande électronique ;
- utilisation correcte des variateurs de vitesse industriels ;
- calibration juste des paramètres de fonctionnement d'une commande électronique ;
- utilisation du logiciel de communication.

V.2. Durée du TP:

La durée du travail pratique est de 4 heures.

V3. Matériel (Équipement et matière d'œuvre) par équipe :

a) Equipement :

- variateur de vitesse ATV16 ;
- module de communication RS232 ;
- tachymètres ;
- voltmètre.

b) Matière d'œuvre :

- fils de raccordement ;

V.4. Description du TP :

Les variateurs de vitesse ALTIVAR sont des convertisseurs de fréquence destinés à l'alimentation des moteurs synchrones triphasés à cage d'écureuil. La gamme de puissance de ces variateurs se situe entre 0,37 et 110Kw.

Ils fonctionnent suivant le principe « PWM » par découpage d'une tension continue fixe. Cette technique assure une rotation des moteurs régulière, grâce à une forme de courant de sortie très proche de la sinusoïdale.

Le variateur est piloté par une unité de contrôle qui, à l'aide d'un microprocesseur, assure les fonctions de commande des composants de puissance, de dialogue ainsi que de protection et de sécurité.

V.5. Déroulement du TP

5.5.1 Raccordement électrique du variateur

1. Faire le raccordement tel qu'indiqué à la fig. 4-1.
2. Utiliser la console LAB-VOLT avec un contacteur pour alimenter le variateur. Utiliser la source variable.

3. Branchez un voyant lumineux de la console LAB-VOLT sur le contact SA-SC, pour indiquer un défaut du variateur. Référez-vous au manuel de service pour les types de défaut.
4. Utiliser les interrupteurs « FW » et « RV » situés sur la maquette ATV16 pour commander le variateur.

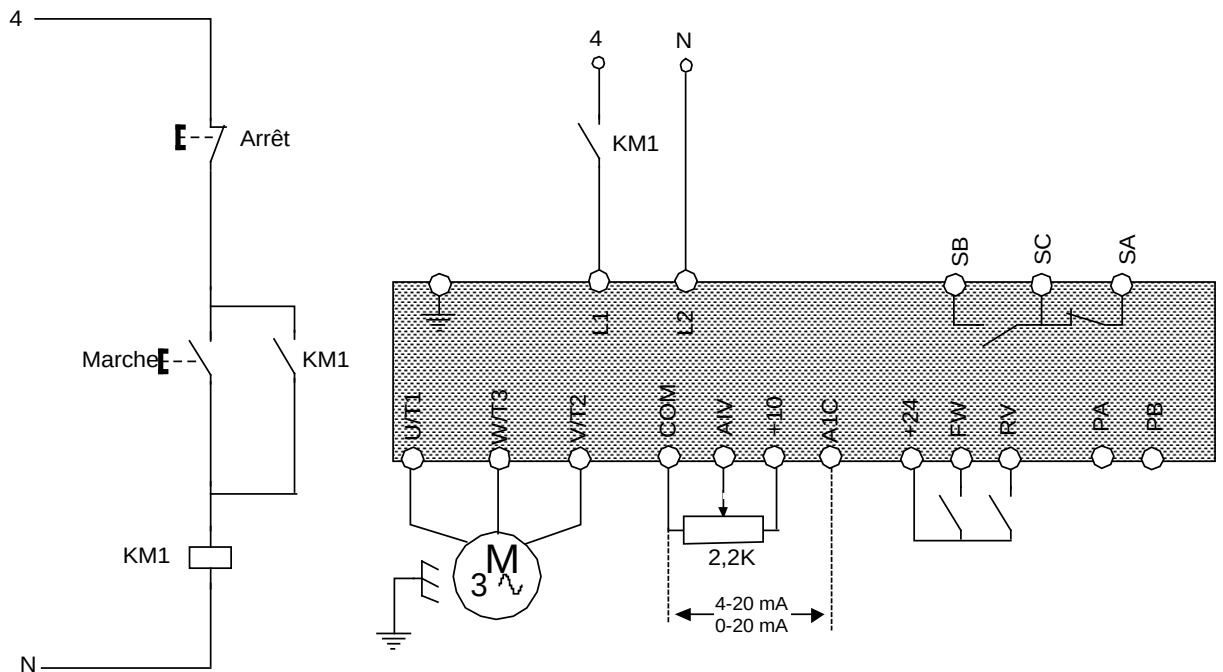


FIGURE 0-1

5.5.2 Caractéristiques du variateur et du moteur

1. En utilisant le manuel de service du fabricant, déterminez les caractéristiques électriques du variateur ATV16.
 - a) Le numéro de série du variateur : _____
 - b) La tension d'alimentation : _____
 - c) Le courant nominal du variateur : _____
 - d) La puissance du moteur permise : _____
 - e) La puissance dissipée du variateur : _____
 - f) Le courant maximal de protection thermique : _____
2. En se référant à la plaque signalétique du moteur, déterminez les caractéristiques suivantes.
 - a) La puissance nominale du moteur : _____
 - b) Le courant nominal du moteur : _____
 - c) La vitesse nominale du moteur : _____
3. Donnez la fonction de chacune des bornes de raccordements du variateur.

Carte de puissance :

- a) (L 1,L2) : _____
- b) (U,V,W) : _____
- c) (SA,SC,SB) : _____
- d) (PA,PB) : _____

Carte de contrôle :

- a) (AIV) : _____
- b) (AIC) : _____
- c) (FW) : _____
- d) (RV) : _____
- e) (+24V) : _____
- f) (+10V) : _____

5.5.3 Mise en service du variateur**5.5.3.1 Programmation du variateur en mode local**

Le mode local permet de programmer le variateur sans être branché à celui-ci. On peut le sauvegarder dans un fichier *.cfg. et le rappeler par la suite. Réalisez les étapes suivantes :

1. Pour accéder au logiciel, tapez la commande ATV16. A partir de la page titre, appuyez 2x « ENTER » pour accéder au menu de base.
2. Sélectionnez Fichier ou la touche Alt- F, choisissez un nouveau fichier et tapez « Enter ».
3. À partir du menu ATV6 /OPTION , configurez les options suivantes et validez celles-ci :
 - Modèle : ATV 16 U09 M2
 - Option : Absente
 - Communication : Absente
 - Cavaliers : 50 Hz, 4-20ma
4. Utilisez régulièrement le menu d'aide « F1 » pour une explication des différentes options des différents menus.
5. A partir du menu de configuration, sélectionnez « Loi U/F moteur » ou F3 et réglez les paramètres suivants :
 - Tension nominale moteur UnS 220V
 - Fréquence nominale moteur FrS 50 hz
 - Fréquence maximale tFr 50 hz
 - Type de loi U/F Uft N
 - Fréquence de découpage (10kz) non
6. A partir du menu de configuration, sélectionnez « Fontions spéciales » ou F4 et réglez les paramètres suivants :
 - Adaptation à la rampe de décélération bra oui

- Compensation de glissement SLP oui
- Injection automatique de cc F < 0.1hz
- Redémarrage automatique Atr oui
- Reprise à la volée Flr non
- Arrêt sur coupure de réseau Stp non
- Rampe linéaire

7. À partir du menu de configuration, sélectionnez « Réglages » ou F6 et configurez les paramètres suivants : (pour changer de champ, utilisez la touche de tabulation)

Vitesse

- Accélération Acc 10.0 s
- Décélération dec 3.0 s
- Petite vitesse LSP 0 hz
- Grande vitesse HSP 50 hz

Courant

- Protection thermique ItH 1.0 A
- Amplitude d'injection cc Idc 1.3 A
- Temps d'injection tdc 0.5 s

Boucle de régulation

- Loi U/F Ufr 20
- Gain de boucle de fréq. FIG 33%

6. Pour sauvegarder le programme sur disquette, sélectionnez le menu fichier ALT-F et sélectionnez «enregistrer sous».
9. Sauvegardez sous le nom a : variat.cfg.

5.5.3.2 Programmation du variateur en mode connecté

Cette commande permet de connecter le variateur à l'ordinateur. Au lancement du logiciel, si le variateur est présent sur le module de communication, le logiciel se placera automatiquement en mode connecté. Si la communication ne s'établit pas, il faut vérifier si le port de communication est le même que celui du logiciel.

Réalisez les étapes suivantes :

1. Branchez le module de communication sur le variateur et reliez, par le câble de communication, le variateur au port série COM 1 de l'ordinateur.
2. Alimentez le variateur.
3. Vérifiez si le logiciel peut passer en mode connecté, si non modifiez le port série dans le menu système.
4. Sélectionnez « Commande/Visu » et commande d'ATV.
5. Appuyez sur la touche F10 pour sauvegarder la configuration que vous avez programmée dans le EEPROM du variateur.
6. Réglez la consigne de vitesse au maximum avec le potentiomètre et validez la marche avant.

7. À l'aide de la fenêtre de signalisation, vérifiez le bon fonctionnement du variateur.
8. Inversez le sens de rotation du moteur et vérifiez son bon fonctionnement.
9. Dans la fenêtre réglages, procédez au changement suivant :

- Accélération 20 S
- Grande vitesse 30 hz

10. Validez le variateur. Que constatez-vous ?

10. Placez la commande en ligne « ON » et la fréquence en ligne « ON ». Placez la consigne « FRL » à 20 hz et validez le variateur avec les touches S « start », T « stop », F « FW/RV ».

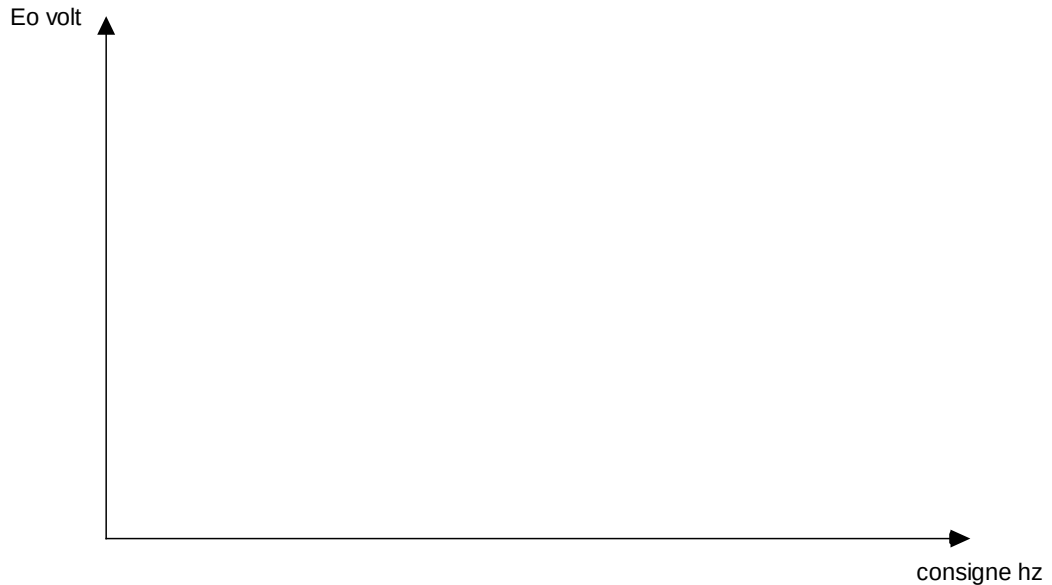
5.5.4 Essai à vide

1. Modifiez les paramètres suivants :
 - Grande vitesse 50hz
 - Accélération 0.1S
2. Branchez un voltmètre entre 2 phases du moteur et, avec un tachimètre, mesurez la vitesse du moteur pour différentes fréquences. Remplissez le Tableau 0-1 : ESSAI à vide

TABLEAU 0-1 : ESSAI À VIDE

Consigne (Hz)	Vitesse (tr/min)		E out (volts)
5			
10			
15			
20			
25			
30			
40			
50			

3. À partir des résultats du Tableau 0-1 : ESSAI à vide, tracez la courbe de Eout en fonction de la consigne.



3. D'après la courbe obtenue, déterminez le rapport tension /fréquence.
 $U/F =$ _____
4. Si vous augmentez le paramètre Ufr à 50, est-ce que la pente augmente sur la courbe ?

5. Débranchez le potentiomètre et branchez la carte 0-1V à 4-20ma. Déterminez la vitesse pour différentes valeurs de courant.

<u>Consigne en courant</u>	<u>Vitesse</u>
4ma	_____
8ma	_____
12ma	_____
16ma	_____
20ma	_____

6. Modifiez les paramètres du variateur pour avoir la plage de vitesse suivante :

4ma-----0 tr/min

20ma-----1500 tr/min

5.5.5 Essai en charge

Pour l'essai en charge, utilisez le moteur à cage d'écureuil de la maquette LAB-VOLT et l'électrodynamomètre comme charge, et placez un ampèremètre sur une phase du moteur. Branchez les enroulements du moteur en triangle.

1. Placez le contrôle de l'électrodynamomètre au minimum et ajustez la vitesse du moteur à 1000 tr/min.
2. Mesurez la vitesse du moteur pour différentes charges. Complétez le Tableau 0-2 :essai en charge.

TABLEAU 0-2 :ESSAI EN CHARGE

Couple (n.m)	Vitesse tr/min
0	
0,2	
0,4	
0,8	
1	
1,2	

- La vitesse change t-elle en fonction de la charge ?

- Modifiez le paramètre «compensation de glissement» et vérifiez si la vitesse change en fonction de la charge.

5.5.6 Dépannage du variateur

Simulez quelques défauts qui peuvent être détecté, par le variateur.

- Placez l'électrodynamomètre au maximum afin de simuler une surcharge et attendez que la protection thermique se déclenche.
- Verifiez le manuel de service et expliquez la procédure pour réarmer le variateur.

- Placez l'electrodynamomètre au minimum et simulez une baisse de tension en diminuant la tension sur l'alimentation variable
.Quelle tension est nécessaire pour produire un défaut du variateur ?
Vérifiez dans le manuel de service

- À partir du logiciel, indiquez les défauts à partir du menu « Défauts passés ».

VI. TP 6 : Variateur de vitesse RECTIVAR 4

VI.1. Objectif(s) visé(s) :

- Commander un moteur électrique par un système de commande électronique.
- Branchement opérationnels et sécuritaire d'un moteur électrique à un système de commande électronique.
- Calibration juste des paramètres de fonctionnement d'un variateur à courant continu.
- Méthode de dépannage.

VI 2. Durée du TP:

La durée du travail pratique est de 4 heures.

VI .3. Matériel (Équipement et matière d'œuvre) par équipe :

a) Equipement :

- variateur de vitesse Rectivar 4 ;
- dynamo tachimétrique;
- tachymètres ;
- console LAB-VOLT ;
- oscilloscope ;
- voltmètre;
- manuel de service du variateur de vitesse RECTIVAR 4.

b) Matière d'œuvre :

- fils de raccordement ;

VI .4. Description du TP :

Le variateur de vitesse RECTIVAR 44 est utilisé pour la régulation de vitesse des moteurs à courant continu à excitation séparée ou à aimants permanents à partir d'un réseau alternatif monophasé. Le variateur permet un fonctionnement dans les quatre quadrants.

VI .5. Déroulement du TP

VI.5.1 Caractéristiques du variateur et du moteur

1. En utilisant le manuel de service du fabricant, déterminez les caractéristiques électriques du variateur RECTIVAR 44.

a) Le numéro de série du variateur : _____

b) La tension d'alimentation : _____

- c) Le courant nominal du variateur : _____
 - d) La puissance maximale moteur : _____
 - e) La tension d'induit recommandée : _____
 - f) La tension d'excitation : _____
2. En se référant à la plaque signalétique du moteur, déterminez les caractéristiques suivantes.
- a) La puissance nominale du moteur : _____
 - b) Le courant nominal du moteur : _____
 - c) La vitesse nominale du moteur : _____
3. Donnez la fonction de chacune des bornes de raccordements du variateur.

Carte de puissance :

- a) (AL1,AL2): _____
- b) (M1, M2): _____
- c) (F1,F2) : _____
- d) (CL1,CL2) : _____

Carte de contrôle :

- a) (RNA, RNB) : _____
- b) (N10, P10) : _____
- c) (E1,0V) : _____
- d) (PL, RUN) : _____
- e) (K1A, K1B) : _____

6.5.2 Mise en service du variateur

6.5.2.1 Configuration de la carte de contrôle

Configurez les cavaliers de la façon suivante :

- 1. F : 50 hz ;
- 2. E : 0 ;
- 3. AT : RAMP ;
- 4. RAMP : 0,5-20s ;
- 5. ISI : 1 ;
- 6. I T : 0
- 7. H : 60V
- 8. AK2 : IA

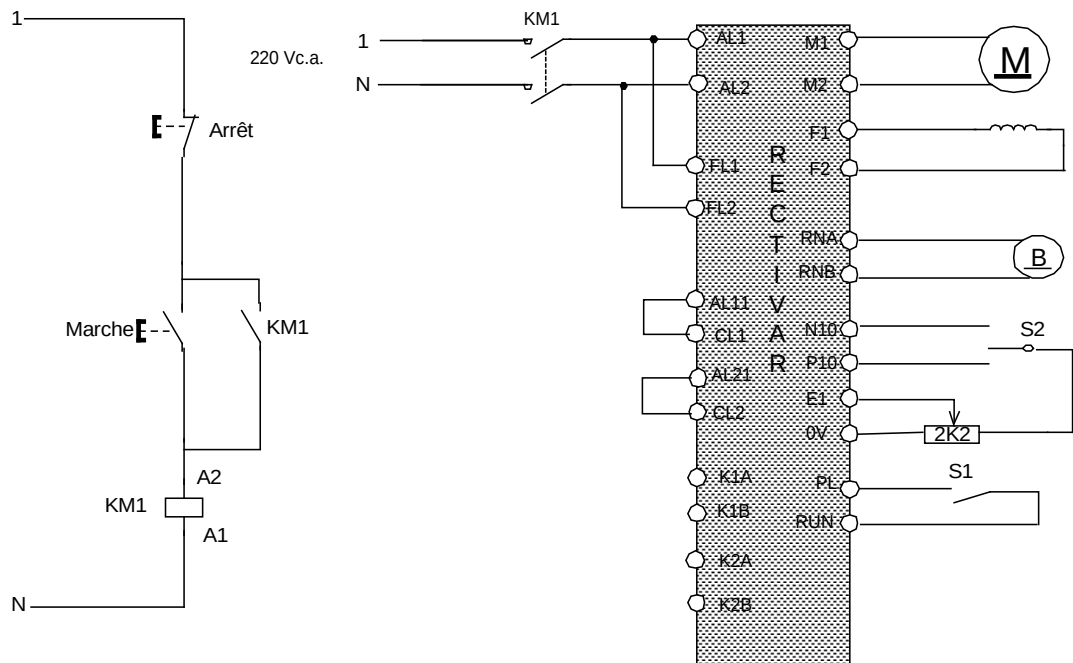
Placez les potentiomètres de la façon suivante :

- 1. ACC : valeur maximum
- 2. DEC : valeur maximum
- 3. HSP : valeur maximum
- 4. IA> : valeur maximum

6.5.2.2 Configuration de la carte de puissance

- 1. F : 1 (190V) ;
- 2. U : (220V) .

1. Faire le raccordement tel qu'indiqué à la figure 7-1.
2. Utiliser la console LAB-VOLT avec un contacteur pour alimenter le variateur.
3. Branchez le moteur à courant continu LEROY SOMER au variateur de vitesse
4. Utiliser l'interrupteur S3 pour inverser le sens de rotation du moteur et le potentiomètre pour varier la vitesse du moteur.
5. Alimentez et vérifiez le bon fonctionnement du variateur dans les deux sens de marche.
6. Si le moteur tourne mais vous ne pouvez varier la vitesse, il se peut que la dynamo tachimétrique soit branchée dans le mauvais sens. Si c'est le cas, coupez l'alimentation, et modifiez le branchement de la dynamo tachimétrique.
7. Mesurez la vitesse du moteur, lorsque le potentiomètre de vitesse est au maximum.
 $N =$ _____
8. Notez le temps que prend le moteur pour atteindre la vitesse maximum
 $T_{acc.} =$ _____
9. Quelle est la tension générée par la dynamo tachimétrique.
 $E_g =$ _____
10. En utilisant l'oscilloscope, constatez la forme d'onde aux bornes de l'induit du moteur. Il est préférable de prendre la mesure en différentielle, soit en utilisant deux sondes. Vous pouvez utiliser aussi le module d'isolation disponible avec l'équipement LAB-VOLT.



6.5.4 Régulation par tension d'armature

1. Expliquez que faut-il faire pour permettre une régulation de vitesse par tension d'armature ? Voir le manuel de service du variateur.

2. Vérifiez le bon fonctionnement du variateur dans les deux sens de marche.
3. Si une charge mécanique peut-être brancher sur le moteur (électrodynamomètre ou frein mécanique) , faites un essai en charge du moteur
4. Ajustez la compensation RI pour permettre une bonne régulation de vitesse du moteur.
5. Vérifiez si la vitesse varie selon la charge.

6.5.5 Dépannage

Prenez une pause et demandez au formateur de placer une panne sur le variateur. Expliquez la procédure de dépannage. Servez vous du manuel de service du variateur.

Procédure de dépannage :

Evaluation de fin de module

Commande électronique de moteurs Examen théorique

Q1 (3 points)

Donnez trois méthodes de variation de vitesse pour les moteurs à courant alternatif.

Q2 (3 points)

Dessinez le diagramme synoptique d'un variateur de vitesse à thyristor pour un moteur à courant continu.

Q3 (3 points)

Quelles sont les deux méthodes permettant la régulation de vitesse d'un moteur à courant continu.

Q4 (3 points)

Dans un régulateur de vitesse pour moteur à courant continu, quel est le rôle du comparateur d'erreur ?

Q5 (3 points)

Pourquoi le variateur de vitesse avec gradateur est peu utilisé comme commande de vitesse pour les gros moteurs triphasés ?

Q6 (3 points)

Quel est l'avantage qu'offre un onduleur à modulation de largeur d'impulsion par rapport à un onduleur à source de tension ?

Q7 (3 points)

Dessinez le circuit de puissance d'un onduleur MLI

Q8 (3 points)

Quelles sont les trois types de lois tension fréquence qu'on peut programmer dans le variateur ATV 16 ?

Q9 (3 points)

Complétez le schéma de raccordement du variateur de vitesse ATV16 . La consigne de vitesse est donnée à partir d'un potentiomètre et le sens de marche à partir d'un sélecteur à trois positions

Q10 (3 points)

On a le code de défaut ObF pour un variateur de vitesse ATV16. Quelles sont les causes de ce défaut et quelles sont les correctifs à apporter ?

Commande électronique de moteurs

Examen pratique (individuel)

Q1 (10 points)

Branchez le variateur ATV 16 à partir de la console LAB-VOLT en utilisant un bouton de marche et d'arrêt pour alimenter le variateur. Branchez au variateur un moteur à cage d'écureuil triphasé.

Q2 (20 points)

En utilisant le logiciel ATV16 programmez en mode local le variateur selon les paramètres suivants :

- Tension nominale moteur 220V
- Fréquence nominale moteur 50 hz
- Fréquence maximale 50 hz
- Type de loi U/F N
- Fréquence de découpage (10kHz) non
- Adaptation à la rampe de décélération oui
- Compensation de glissement oui
- Injection automatique de cc $F < 0.1\text{hz}$
- Rampe linéaire
- Accélération 10.0 s
- Décélération 3.0 s
- Petite vitesse 0 hz
- Grande vitesse 50 hz
- Protection thermique 1.0 A
- Amplitude d'injection cc 1.3 A
- Temps d'injection 0.5 s
- Loi U/F 20
- Gain de boucle de fréq. 33%

1. Placez le logiciel en mode connecté et transférez les données dans le variateur
2. Alimentez le variateur et vérifiez le bon fonctionnement par le formateur.
3. Sauvegardez la configuration sur disquette. Le fichier devra être sauvegarder sous le nom «altivar16».

BIBLIOGRAPHIE

André CHAMPENOIS : Alimentations, Thyristors et optoélectronique, Editions ERPI du
RENOUVEAU Pédagogique

Michel PINARD : Commande électronique des moteurs électriques, DUNOD
L'USINE NOUVELLE

Guy SEGUIER, Robert BAUSIERE, Francis LABRIQUE : Electronique de puissance, DUNOD
SCIENCES SUP.

Hansruedi BUHLER : Réglage de systèmes d'électronique de puissance, PRESSES
POLYTECHNIQUE ET UNIVERSITAIRES ROMANDES, COLLECTION ELECTRICITE

Philippe LADOUX : Variation de vitesse des machines à courant alternatif. **RESEAU
NATIONAL D'ELECTROTECHNIQUE – RESSOURCES**

ANNEXE 1. *Evaluation de fin de module – solutions*

Commande électrique de moteurs Examen théorique Solutionnaire

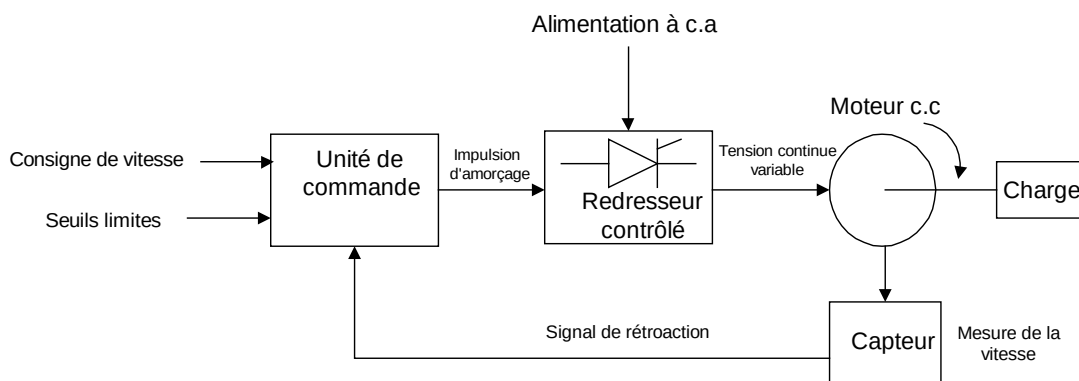
Q1 (3 points)

Donnez trois méthodes de variation de vitesse pour les moteurs à courant alternatif.

- *gradateurs à thyristors;*
- *onduleurs autonomes à fréquence variable;*
- *cycloconvertisseurs*

Q2 (3 points)

Dessinez le diagramme synoptique d'un variateur de vitesse à thyristor pour un moteur à courant continu.



Q3 (3 points)

Quelles sont les deux méthodes permettant la régulation de vitesse d'un moteur à courant continu ?

- *par génératrice tachymétrique ;*
- *par tension d'induit ou f.c.é.m.*

Q4 (3 points)

Dans un régulateur de vitesse pour moteur à courant continu, quel est le rôle du comparateur d'erreur ?

C'est un amplificateur de différence qui compare la consigne à la tension provenant de la génératrice tachymétrique. Cette différence donne l'erreur entre ces deux valeurs au régulateur

Q5 (3 points)

Pourquoi le variateur de vitesse avec gradateur est peu utilisé comme commande de vitesse pour les gros moteurs triphasés ?

À faible vitesse, la forme d'onde est très déformée, ce qui augmente les pertes dans le moteur et détériore le facteur de puissance.

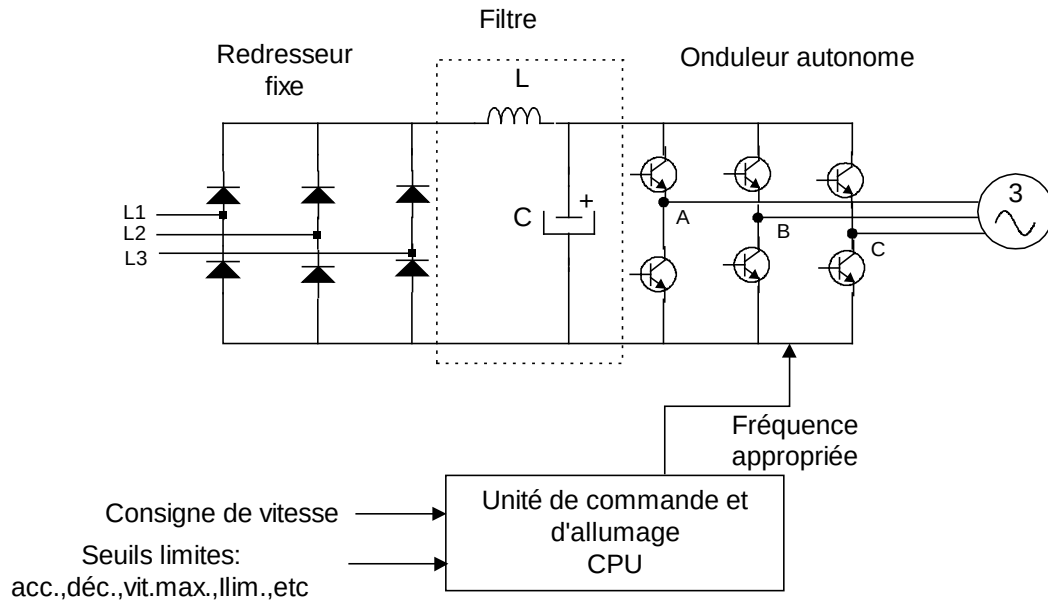
Q6 (3 points)

Quel est l'avantage qu'offre un onduleur à modulation de largeur d'impulsion par rapport à un onduleur à source de tension ?

Les onduleurs à modulation de largeur d'impulsion génèrent des tensions et des courants dont la composante harmonique est relativement élevée.

Q7 (3 points)

Dessinez le circuit de puissance d'un onduleur MLI



Q8 (3 points)

Quelles sont les trois types de lois tension fréquence qu'on peut programmer dans le variateur ATV 16 ?

n : Applications courantes à couple constant (machines moyennement chargées à basse vitesse).

p : Applications à couple variable (pompes, ventilateurs).

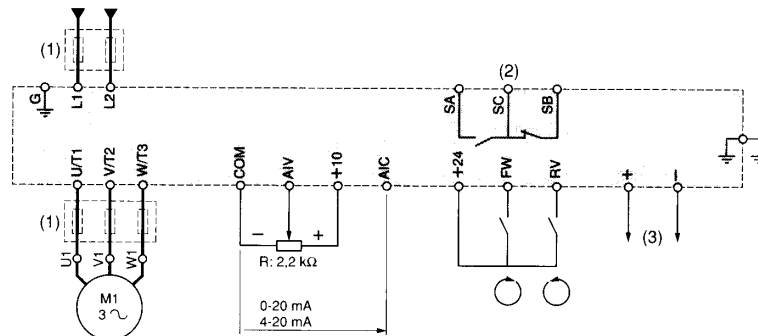
l : Machines fortement chargées à basse vitesse.

Q9 (3 points)

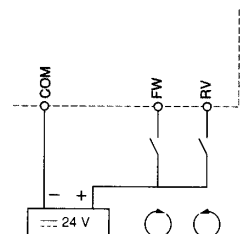
Complétez le schéma de raccordement du variateur de vitesse ATV16 . La consigne de vitesse est donnée à partir d'un potentiomètre et le sens de marche à partir d'un sélecteur à trois positions

ATV-16U09M2 et 16U18M2

Alimentation 208...240 V monophasée



Autres raccords



Q10 (3 points)

On a le code de défaut ObF pour un variateur de vitesse ATV16. Quelles sont les causes de ce défaut et quelles sont les correctifs à apporter ?

Sur tension ou sur intensité due à un freinage trop brutal ou à une charge entraînante (couple pulsatoire) même avec une option freinage.

Les correctifs à apporter sont :

- *augmenter le temps de décélération ;*
- *optimiser le gain Ufr ;*
- *adjoindre la résistance de freinage ou l'option frein si nécessaire ;*

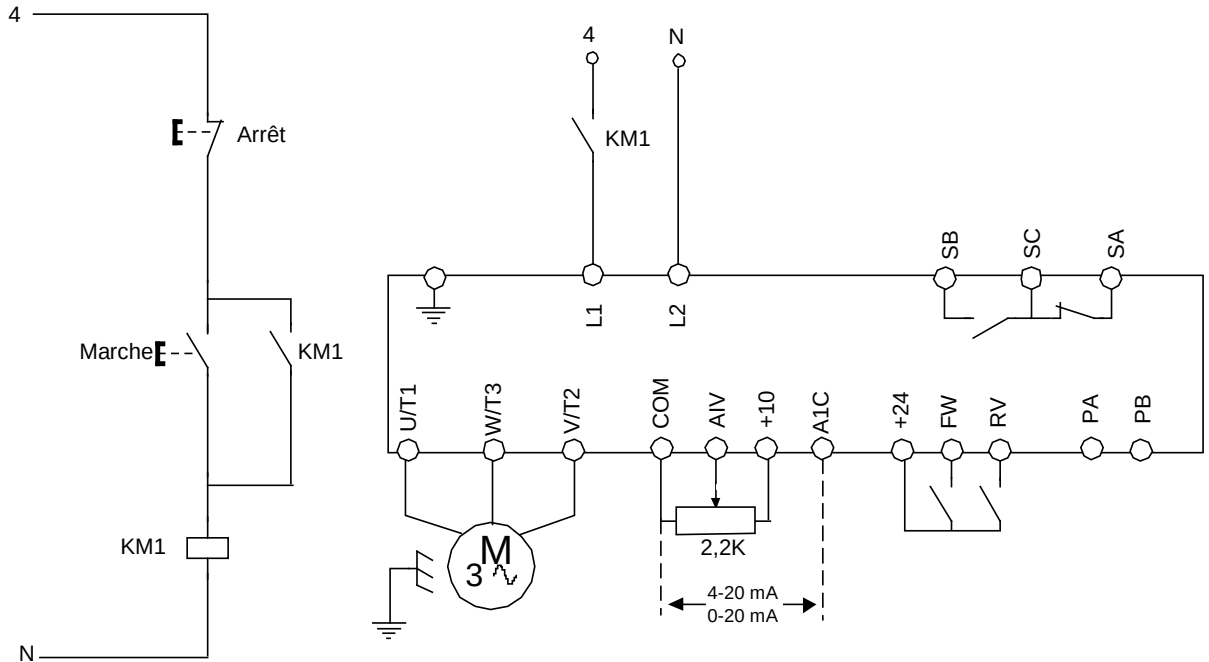
Commande électronique de moteurs

Examen pratique (individuel)

Solutionnaire

Q1 (10 points)

Branchez le variateur ATV 16 selon le schéma suivant.



Vérifier si le stagiaire a bien brancher la maquette ALTIVAR à la console LAB-VOLT en utilisant un contacteur.

Q2 (20 points)

En utilisant le logiciel ATV16 programmez en mode local le variateur selon les paramètres suivants :

- Tension nominale moteur UnS 220V
- Fréquence nominale moteur FrS 50 hz
- Fréquence maximale tFr 50 hz
- Type de loi U/F Uft N
- Fréquence de découpage (10kHz) non
- Adaptation à la rampe de décélération bra oui
- Compensation de glissement SLP oui
- Injection automatique de cc F < 0.1hz
- Redémarrage automatique Atr oui
- Rampe linéaire
- Accélération Acc 10.0 s
- Décélération dec 3.0 s
- Petite vitesse LSP 0 hz
- Grande vitesse HSP 50 hz
- Protection thermique ItH 1.0 A
- Amplitude d'injection cc ldc 1.3 A
- Temps d'injection tdc 0.5 s

- Loi U/F Ufr 20
- Gain de boucle de fréq. Flo 33%

Vérifier si les paramètres sont bien programmés dans le variateur et que la configuration a été sauvegarder sur une disquette. Tester le bon fonctionnement du variateur.