



**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°:28**

**INSTALLATION, REPARATION DE  
COMMANDE ELECTRONIQUE DES  
MOTEURS**

**SECTEUR : ELECTROTECHNIQUE**

**SPECIALITE : ÉMI**

**NIVEAU : TECHNICIEN**

**ANNEE 2007**

## PORTAIL DE LA FORMATION PROFESSIONNELLE AU MAROC

Télécharger tous les modules de toutes les filières de l'OFPPT sur le site dédié à la formation professionnelle au Maroc : [www.marocetude.com](http://www.marocetude.com)

Pour cela visiter notre site [www.marocetude.com](http://www.marocetude.com) et choisissez la rubrique :

### MODULES ISTA



The image shows a screenshot of the website [www.marocetude.com](http://www.marocetude.com). The top navigation bar includes links for HOME, LIVRES, **MODULES ISTA**, ANNUAIRE ECOLES, DOCTORAT, LETTRE DE MOTIVATION, NOUS CONTACTER, and SE CONNECTER. The main header features the logo "Maroc Etude.Com" and the tagline "Connaissance - Métier - Technique". Below the header, there are links for Annonces Google, Emploi Maroc, Messagerie, Telecharger Un Jeu, and Maroc Annonces. A search bar is located in the top right corner. The main content area is divided into three columns. The left column contains a login section with fields for "Identifiant" (containing "sniper") and "Mot de passe", and a "Connexion" button. The middle column features a promotional banner for "MacKeeper" with a "-20%" discount and a "Apply Discount Automatically" button. The right column contains a sidebar with a search bar and a list of links under the heading "Annonces Google", including "Jeu De Jeux", "Jeux Sur Internet", "Ecole Ingénieur", "Dépanner et configurer votre réseau à domicile", "(Outil de Diagnostic)", "Wi-Fi / Ethernet", "Console de jeu", "Imprimante", and "Messagerie". A blue arrow points from the text "MODULES ISTA" to the corresponding link in the navigation menu.

"On ne jouit bien que de ce qu'on partage" [Madame de Genlis]

**Document élaboré par :**

<b>Nom et prénom</b>	<b>EFP</b>	<b>DR</b>
FAURESCU FLORIN	ISTA TAZA	CN
PANTAZICA LUCRETIA	CDC	

## SOMMAIRE

	Page
<i>Présentation du module</i>	7
<b>Première partie - Résumé de théorie</b>	<b>9</b>
<b>1 Types de commande électronique des moteurs</b>	<b>10</b>
1.1. Introduction ...	10
1.2. Commande de moteurs à courant continu	11
1.3. Commande de moteurs asynchrones triphasés	12
<b>2 Le convertisseur alternatif-continu</b>	<b>13</b>
2.1 Le redresseur à tension fixe en commutation naturelle à bas de diodes	13
2.2 Le redresseur à tension variable en commutation contrôlée à base de thyristors (redresseur commandé)	17
<b>3 Le convertisseur continu- continu</b>	<b>22</b>
3.1 Le hacheur dévolteur	22
3.2 Le hacheur survolteur	32
3.3 Les applications des hacheurs	33
<b>4 Commande de vitesse pour moteur à courant continu</b>	<b>34</b>
4.1 Rappel sur les moteurs à CC	34
4.2 Variateur de vitesse à thyristors	36
4.3 Régulation de vitesse	38
4.4 Variateur de vitesse RECTIVAR 4	43
4.5 Variateur de vitesse avec hacheur	50
<b>5 Le convertisseur continu-alternatif</b>	<b>52</b>
5.1 Classification des onduleurs autonomes	52
5.2 Principe de fonctionnement du l'onduleur autonome	53
5.3 L'onduleur monophasé	58
5.4 Onduleurs triphasés autonomes	60
5.5 Applications des onduleurs autonomes	62
5.6 L'onduleur à fréquence variable	63
5.7 Variateur de vitesse ALTIVAR 16	67
5.8 Application d'un variateur à fréquence variable	71
<b>6 Le convertisseur alternatif-alternatif</b>	<b>73</b>
6.1 Le gradateur	73
6.2 Le cycloconvertisseur	76

<b>7. L'installation d'un système de commande de moteurs</b>	<b>79</b>
7.1 Les plans et les devis	79
7.2 Normes en vigueur	79
7.3 Méthodes d'installation	81
7.4 Mesures de sécurité lors de l'installation	81
7.5 Installer les câbles et les canalisations	83
<b>8. Analyse de l'état réel d'un équipement</b>	<b>85</b>
8.1 Généralités	85
8.2 Poser un diagnostic	85
8.3 Sources de problèmes dans un système de commande électronique de moteurs	86
<b>9. Réparation d'un équipement électronique</b>	<b>87</b>
9.1 Règles de sécurité relatives à la réparation des systèmes industriels	87
9.2 Techniques de dépannage	88
9.3 Sélectionner les composants de remplacement	89
9.4 La procédure de remplacement des composants défectueux	89
9.5 L'importance de la qualité dans l'exécution des travaux	90
9.6 Consigner les interventions	90
<b>10. Ajuster et calibrer un système de commande électronique de moteurs</b>	<b>94</b>
10.1 Règles de sécurité	94
10.2 Mesurages	94
10.3 Procédure de calibrage	95
10.4 Vérifier le fonctionnement des dispositifs de sécurité	95
10.5 Vérifier le fonctionnement de l'équipement	96
<b>Deuxième partie- Guide de travaux pratique</b>	<b>97</b>
I. TP1 Redresseur à diodes	98
II. TP2 Redresseur à thyristors	106
III. TP3...Le gradateur	116
IV TP 4 L'onduleur	123
V TP 5 Variateur de vitesse ALTIVAR 16	127
VI TP 6 Variateur de vitesse RECTIVAR 4	134

<i>Troisième partie - Evaluation de fin de module</i>	<b>138</b>
<i>Liste bibliographique</i>	<b>141</b>
<i>Annexe 1 : Evaluation de fin de module – solutions</i>	<b>142</b>
<i>Annexe 2 : Technologie des interrupteurs</i>	<b>149</b>

**MODULE 28 :**

**INSTALLATION, REPARATION 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. Interpréter les directives, les plans et les manuels techniques.

B. Installer un système de commande électronique de moteurs.

C. Vérifier le fonctionnement d'un système de commande électronique de moteurs.

D. Poser un diagnostic.

E. Réparer des d'un système de commande électronique de moteurs.

F. Ranger et nettoyer.

G. Consigner les interventions.

#### CRITERES PARTICULIERS DE PERFORMANCE

- Identification exacte des symboles.
- Repérage de l'information pertinente dans les manuels techniques.

- Installation conforme au plan.
- Raccordement correct.
- Fixation solide.

- Respect des étapes de vérification.
- Fonctionnement correct.

- Justesse du diagnostic.
- Choix judicieux des correctifs à apporter.

- Choix approprié du composant de remplacement.
- Démontage correct
- Montage correct.
- Fonctionnement correct.

- Rangerment 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 (1 à 6), la présentation des convertisseurs statiques les plus utilisés dans la construction des circuits de commandes électroniques des moteurs, accompagnée des schémas pratiques et de l'analyse de fonctionnement. Les deux chapitres suivants présentent l'installation d'un système de commande de moteurs et l'analyse de l'état réel d'un équipement de commande électronique. Les chapitres 9 et 10 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 6 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 28***

# ***INSTALLATION, REPARATION : COMMANDE ELECTRONIQUE DE MOTEURS***

## ***RESUME THEORIQUE***

## CHAPITRE 1

## Types de commande électronique des moteurs

## 1.1 Introduction

Pour des raisons économiques, l'énergie électrique est fournie par des réseaux triphasés (trois tensions sinusoïdales déphasées entre elles de  $\frac{2\pi}{3}$ ) à la fréquence de 50Hz.

Du point de vue de l'utilisateur, l'énergie est souvent utilisée en continu ou à des fréquences différentes de celle du réseau.

Jusqu'au début des années 1970 environ, la mise en forme de l'onde électrique afin de l'adapter aux besoins a été obtenue au moyen de groupes tournants (moteurs). Les performances des composants semi-conducteurs de l'électronique de puissance (diodes, thyristors, triacs, transistors) ont ensuite permis de réaliser de telles conversions; on supprime ainsi les parties tournantes et on réduit la masse, l'encombrement et le coût de ces matériels.

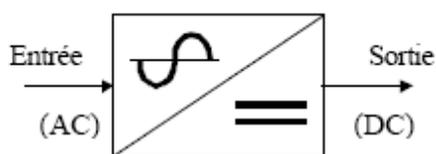
**Les convertisseurs statiques** sont les dispositifs à composants électroniques capables de modifier la tension et/ou la fréquence de l'onde électrique.

On distingue deux types de sources de tension:

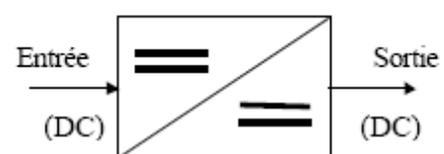
- **Sources de tension continues** caractérisées par la valeur  $V$  de la tension.
- **Sources de tension alternatives** définies par les valeurs de la tension efficace  $V$  et de la fréquence  $f$ .

On différencie quatre types de convertisseurs dont les schémas de principe sont donnés sur la figure ci-dessous:

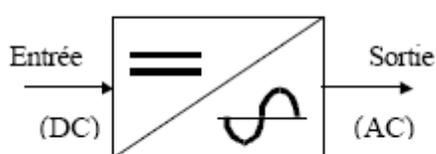
- **Convertisseur alternatif-continu : redresseur ;**
- **Convertisseur continu-continu : hacheur ;**
- **Convertisseur continu-alternatif : onduleur ;**
- **Convertisseur alternatif-alternatif : c'est un gradateur lorsque seule la valeur efficace de la tension alternative est modifiée, sinon c'est un cycloconvertisseur.**



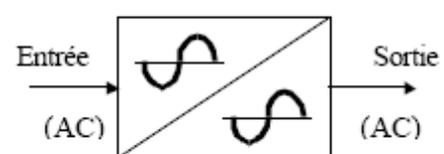
Convertisseur Alternatif (AC) - Continu (DC)



Convertisseur Continu (DC) - Continu (DC)



Convertisseur Continu (DC) - Alternatif (AC)



Convertisseur Alternatif (AC) - Alternatif (AC)

Voilà quelques applications des convertisseurs statiques:

- **Redresseurs** : alimentation des moteurs à courant continu, charge des batteries
- **Hacheurs** : commande des moteurs à courant continu (vitesse variable) ; fonctions d'interrupteur onduleurs ou alimentation à découpage ;
- **Onduleurs** : production de tensions alternatives, alimentation des appareils électriques autonomes, protection contre les surtensions et coupures de réseau (informatique), commande des machines à courant alternatif ;
- **Cycloconvertisseurs** : production des vitesses variables en alternatif (levage, machine-outil).

La commande de vitesse des moteurs constitue l'application la plus importante de l'électronique de puissance. Les installations industrielles utilisent de plus en plus des variateurs électroniques de vitesse à thyristors, soit pour obtenir la vitesse d'entraînement optimale de machines pour chaque étape d'un procédé industriel, soit pour asservir la vitesse d'un ou de plusieurs moteurs entraînant des équipements électromécaniques. Dans le cas des entraînements contrôlés à vitesse variable, on utilise principalement les moteurs à courant continu à excitation séparée et les moteurs à courant alternatif triphasés asynchrones.

## 1.2 Commande de moteurs à courant continu

Les moteurs à courant continu sont alimentés à partir :

- d'un **réseau alternatif** (monophasé ou triphasé) par l'intermédiaire de redresseur à thyristors (Figure 1-1);
- de **redresseurs** à diodes suivis de **hacheurs** à thyristor (Figure 1-2);
- d'une **batterie d'accumulateurs** par l'intermédiaire d'**hacheurs** à thyristors (Figure 1-3).

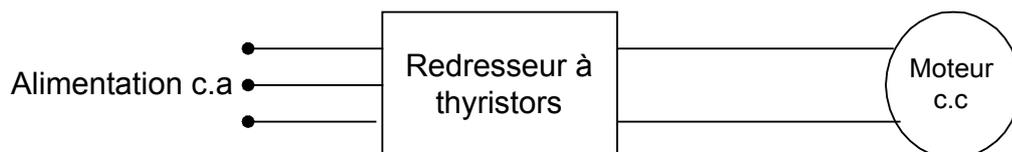


FIGURE 1-1 REDRESSEUR À THYRISTORS

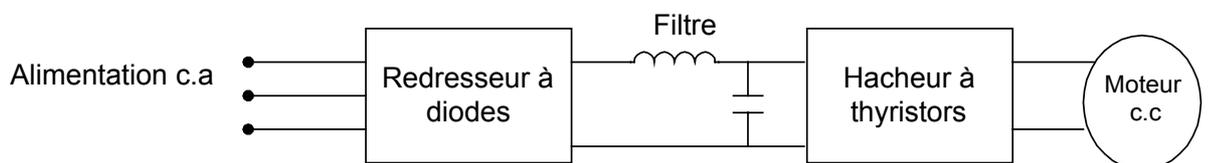


FIGURE 1-2 REDRESSEUR ET HACHEUR DE COURANT

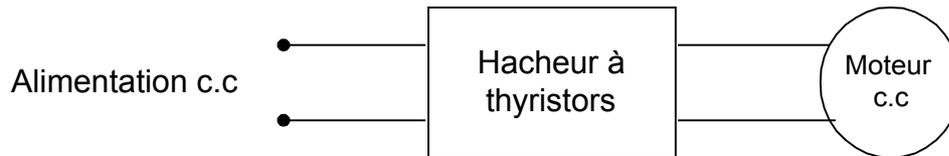


FIGURE 1-3 HACHEUR DE COURANT

### 1.3 Commande de moteurs asynchrones triphasés

Depuis les années 70, on utilise de plus en plus des moteurs à courant alternatif (synchones et asynchrones). Ces moteurs sont plus robustes que les moteurs à courant continu ayant des performances similaires et leur coût est moins élevé.

Les moteurs à courant alternatif sont alimentés par des tensions et des fréquences variables à partir :

- de **gradateurs** à thyristors ( Figure 1.4) ;
- d'**onduleurs autonomes** à fréquence variable (Figure 1.5) ;
- de **cycloconvertisseurs** ( Figure 1.6).

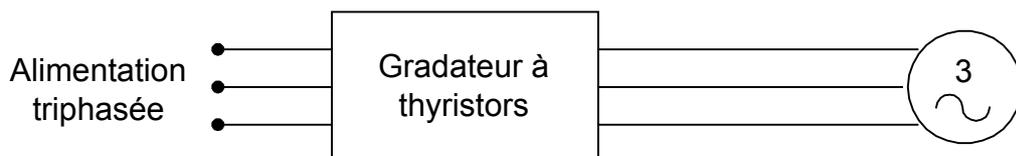


FIGURE 1.4 GRADATEUR

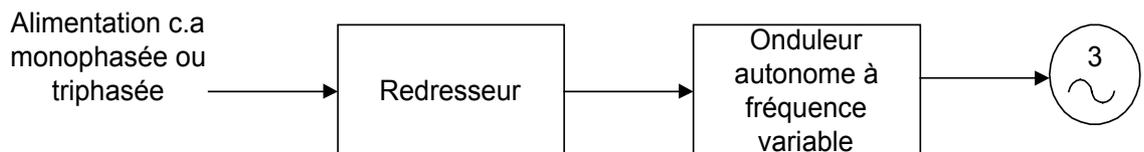


FIGURE 1.5 ONDULEUR AUTONOME À FRÉQUENCE VARIABLE



FIGURE 1.6 CYCLOCONVERTISSEUR

## CHAPITRE 2

**Le convertisseur alternatif continu**

Le convertisseur C.A à C.C nous donne, à partir d'une source de tension alternative monophasée ou polyphasée, une tension continue qui peut être fixe ou variable (Figure 2.1).

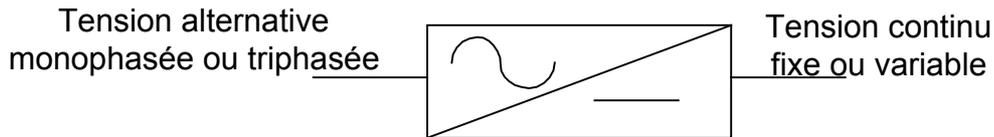


FIGURE 2.1 CONVERTISSEUR ALTERNATIF - CONTINU

**2.1 Le redresseur à tension fixe en commutation naturelle à base de diodes****2.1.1 Le redresseur fixe monophasé**

Le redresseur fixe ou non commandé contient seulement des diodes produisant ainsi une tension continue fixe à sa sortie.

On retrouve deux types de redresseurs monophasés, soit:

- A) le **redresseur simple alternance** ou demi-onde;
- B) le **redresseur double alternance** ou pleine-onde.

**2.1.1 a) Le redresseur simple alternance**

Le redresseur simple alternance est composé d'une seule diode ( Figure 2.2) et la tension moyenne à la charge nous est donnée par l'équation 2.1 :

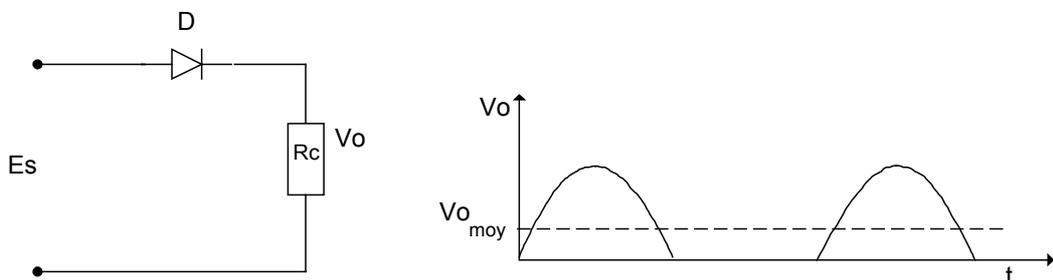


FIGURE 2.2 REDRESSEUR MONOPHASÉ SIMPLE ALTERNANCE

$$V_o \text{ moy} = \frac{E \text{ max}}{\pi} \quad (2.1)$$

**2.1.1. b) Le redresseur double alternance en pont**

Ce redresseur est réalisé à partir de quatre diodes montées en pont (Figure 2.3) et la tension moyenne à la charge est donnée par l'équation 2.2 :

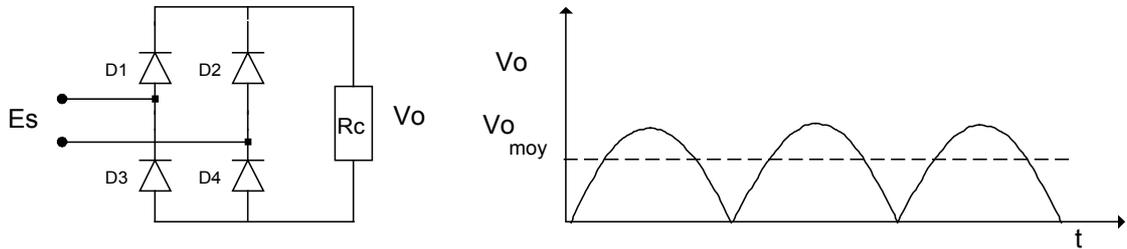


FIGURE 2.3 REDRESSEUR MONOPHASÉ DOUBLE ALTERNANCE

$$V_o \text{ moy} = \frac{2E \text{ max}}{\pi} \quad (2.2)$$

### 2.1.2 Le redresseur fixe triphasé

Le redresseur monophasé est limité à des puissances pouvant atteindre 10 kW. Pour alimenter des puissances supérieures à cette valeur, on utilise des redresseurs triphasés, comme :

- A) Le redresseur en étoile à simple alternance;
- B) Le redresseur en pont.

#### 2.1.2. a) Le redresseur triphasé à simple alternance

Le redresseur triphasé en montage étoile, représentée à la Figure 2.4, comprend un transformateur triphasé dont les enroulements primaires sont branchés en triangle et les enroulements secondaires sont branchés en étoile. Une diode est placée sur chaque phase et la charge résistive est branchée entre le point commun des cathodes des diodes D1, D2, D3 et le point neutre. Chaque diode conduit sur un intervalle de 120°. Elle laisse passer le courant dans l'intervalle de temps où la tension de sa phase est supérieure aux deux autres (Figure 2.5). **Le courant moyen dans chaque diode équivaut au tiers du courant de charge et la fréquence du signal de sortie est égale à trois fois le signal d'entrée.**

Ce redresseur est employé que pour des montages industriels de petites puissances.

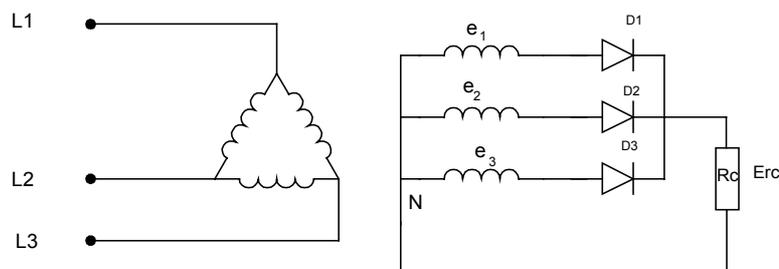


FIGURE 2.4 REDRESSEUR TRIPHASÉ SIMPLE ALTERNANCE

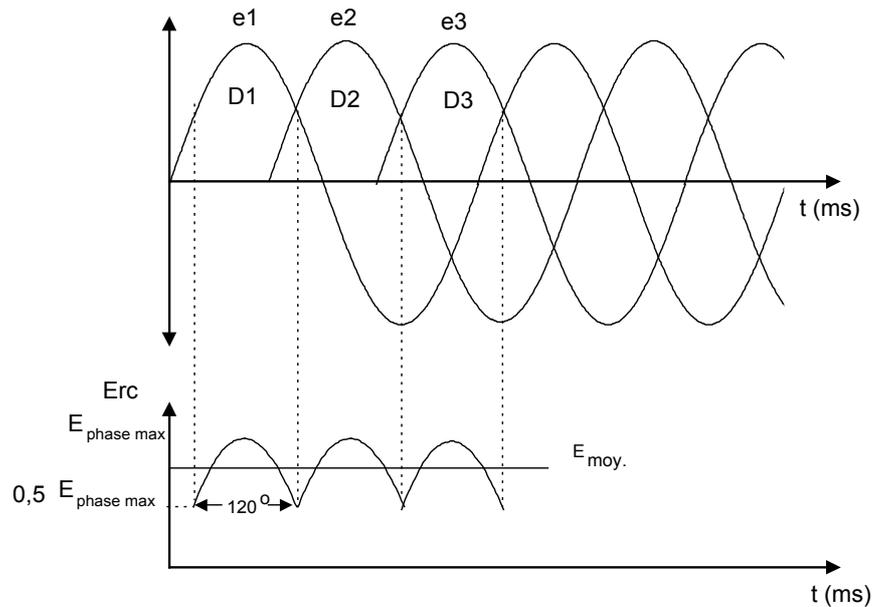


FIGURE 2.5 FORME D'ONDE D'UN REDRESSEUR TRIPHASÉ SIMPLE ALTERNANCE

### Valeurs caractéristiques des tensions et courants:

La valeur moyenne de tension à la charge est donnée par l'équation 2.3 :

$$V_o \text{ moy} = \left( \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \right) E \text{ max} = 0,827 E \text{ max} \quad (2.3)$$

E : tension de phase

### Exemple 2-1:

Dans un redresseur simple alternance triphasé (Figure 2.4), la tension de phase est de 220 V à 50 HZ, et la charge est une résistance de valeur  $R_c=10\Omega$ . En négligeant la chute de tension des diodes, calculez:

- la tension moyenne à la charge ;
- le courant moyen de charge ;
- le courant moyen des diodes ;
- la fréquence du signal à la charge.

### Solutions:

$$a. \quad V_o \text{ moy} = \left( \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \right) E \text{ max} = 0,827 E \text{ max}$$

$$V_o \text{ moy} = 0,8277 \times (220v \times \sqrt{2}) = 256,5354 \text{ V}$$

$$b. \quad I_{rc} = \frac{V_{omoy}}{R_c} = \frac{256,53V}{10\Omega} = 25,65A$$

$$c. \quad I_D = \frac{I_{RC}}{3} = \frac{25,65}{3} = 8,54A$$

$$d. \quad f_o = 3 \times 50 \text{ hz} = 150 \text{ hz}$$

### 2.1.2. b) Le redresseur triphasé en pont

Le redresseur triphasé en pont (Figure 2.6) est un des circuits redresseurs industriels les plus efficaces, il peut être considéré comme redresseur simple alternance à anode commune et cathode commune montés en « tête-bêche ».

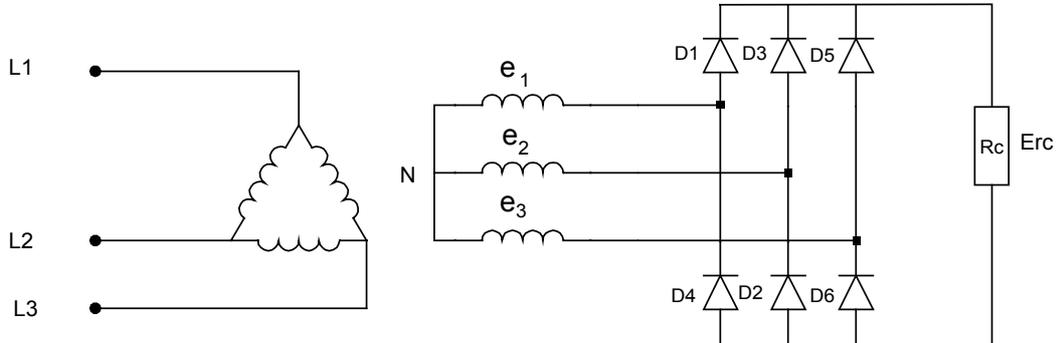


FIGURE 2.6 REDRESSEUR TRIPHASÉ EN PONT

Considérons la représentation graphique des tensions triphasés d'alimentation (Figure 2.7). Quand la tension de phase  $e_1$  est supérieure aux tensions  $e_2$  et  $e_3$ , la diode D1 conduit, et les diodes D2 et D3 sont à l'état bloqué. De même la diode D6 conduit, et les diodes D5 et D6 sont bloquées.

Le même raisonnement s'applique lorsque la tension  $e_2$  est supérieure aux deux (2) autres. Chaque diode conduit pendant un intervalle de  $120^\circ$ . À titre d'exemple, la diode D1 conduit  $60^\circ$  avec D4 et  $60^\circ$  avec D5. **Le courant moyen dans chaque diode est égale au tiers du courant de charge. La fréquence du signal à la sortie équivaut à six fois la fréquence d'entrée.**

Une bobine peut être rajoutée en série avec la charge pour diminuer le taux d'ondulation.

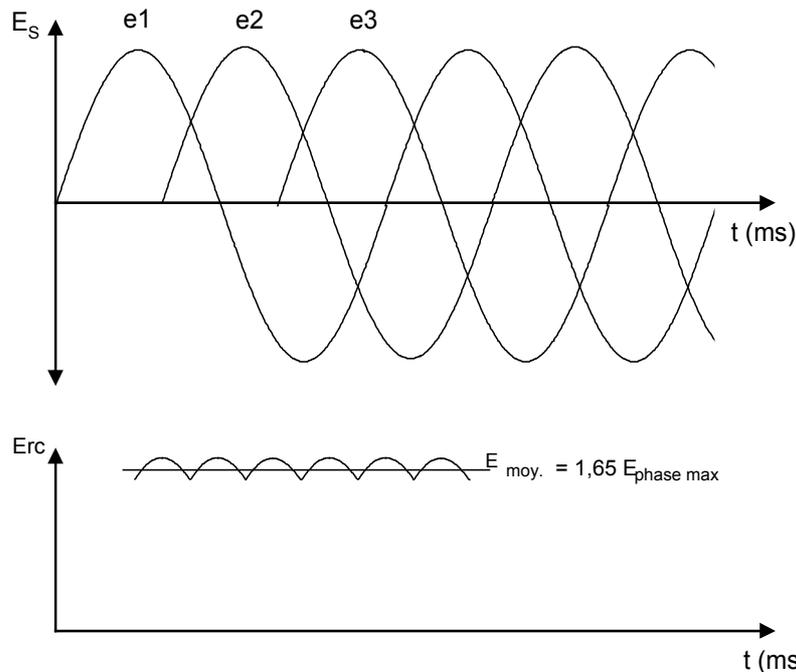


FIGURE 2.7 FORME D'ONDE D'UN REDRESSEUR TRIPHASÉ EN PONT

**Valeurs caractéristiques des tensions et des courants:**

La valeur moyenne de tension à la charge est donnée par l'équation 2.4 :

$$V_{o \text{ moy}} = 1,65 E_{\text{max}} \quad (2.4)$$

$E$  : tension de phase

### Exemple 2-2

Dans un redresseur en pont triphasé (Figure 2.6), la tension au secondaire du transformateur est de 220 V à 50 Hz. La charge est une résistance de 10Ω. En négligeant la chute de tension des diodes, calculez les valeurs suivantes:

- la tension moyenne à la charge ;
- le courant moyen à la charge ;
- le courant moyen des diodes ;
- la fréquence de l'ondulation à la charge.

#### Solutions :

a.  $V_{o \text{ moy}} = 1,65 E_{\text{max}} = 1,65 \times 220\text{V} \times \sqrt{2} = 511,83\text{V}$

b.  $I_{o \text{ moy}} = \frac{V_{o \text{ moy}}}{R_C} = \frac{511,83}{10\Omega} = 51,18\text{A}$

c.  $I_D = \frac{I_{RC}}{3} = \frac{51,18}{3} = 17,06\text{A}$

d.  $f_o = 6 \times 50 \text{ hz} = 600 \text{ hz}$

## 2.2 Le redresseur à tension variable en commutation contrôlée à base de thyristors (redresseur commandé)

Les redresseurs commandés permettent de contrôler la tension moyenne à la charge. On les utilise surtout dans la commande des moteurs à courant continu pour varier la vitesse. On retrouve les redresseurs commandés à simple et double alternance pour des tensions monophasées et triphasées.

### 2.2.1 Le redresseur commandé monophasé

#### 2.2.1. a) Le redresseur commandé monophasé à simple alternance

Pour varier la tension moyenne à la charge, on utilise un thyristor qui est déclenché à partir d'un circuit de commande synchronisé sur le secteur (Figure 2.8). On utilise en général la commande par rampe synchrone.

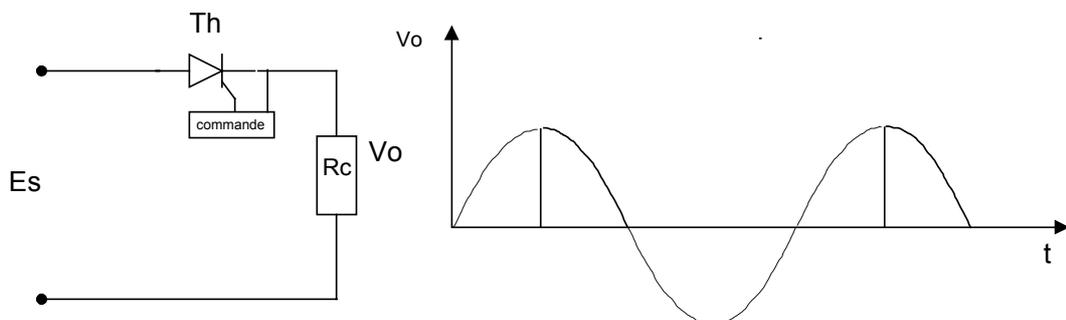


FIGURE 2.8 REDRESEUR COMMANDÉ SIMPLE ALTERNANCE

En l'absence de signal sur la gachette, le thyristor est à l'état bloqué. Si l'on applique une impulsion sur la gachette durant le cycle positif, le thyristor conduit. Il bloque lorsque la tension passe à zéro et durant le cycle négatif.

### Tension moyenne à la charge

La valeur moyenne de tension est donnée par l'équation 2.5 :

$$E_{\text{moy}} = \frac{E_{\text{max}}}{2\pi} (1 + \cos \alpha) \quad (2.5)$$

#### 2.2.1. b) Le redresseur monophasé en pont semi-commandé

Dans le cas du redresseur en pont mixte avec deux thyristors et deux diodes (Figure 2.9), les deux alternances sont contrôlées et le circuit nécessite des signaux de gachette déphasés de 180°. On utilise un transformateur d'impulsion avec deux secondaires pour réaliser l'amorçage.

La diode D5 est utilisée pour assurer le blocage des thyristors dans le cas d'une charge fortement inductive (moteur électrique). Cette diode est aussi appelée (diode de roue libre).

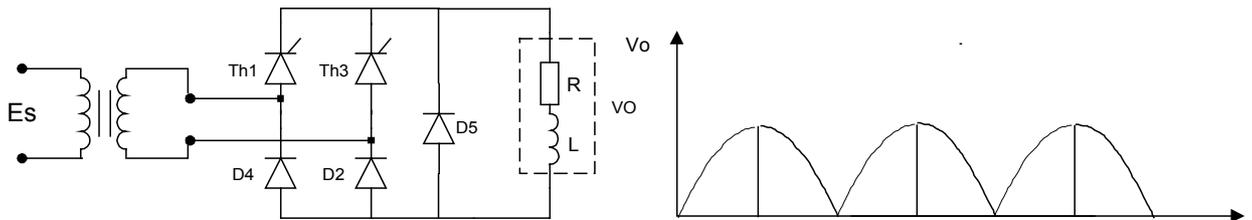


FIGURE 2.9 REDRESSEUR EN PONT SEMI-COMMANDÉ

### Tension moyenne à la charge:

La valeur de tension à la charge est donnée par l'équation 2.6 :

$$E_{\text{moy}} = \frac{E_{\text{max}}}{\pi} (1 + \cos \alpha) \quad (2.6)$$

#### 2.2.1. c) Le redresseur monophasé en pont complètement commandé

On peut réaliser un redresseur en pont en utilisant quatre thyristors (Figure 2.10). Ce circuit nécessite l'utilisation de deux transformateurs d'impulsions avec chacun, deux enroulements au secondaire.

À l'aide de ce redresseur, il est possible de fournir de l'énergie au réseau par l'intermédiaire du transformateur, à condition que l'angle d'amorçage soit supérieur à 90° et que la charge soit fortement inductive comme dans le cas d'un moteur à courant continu en période de freinage.

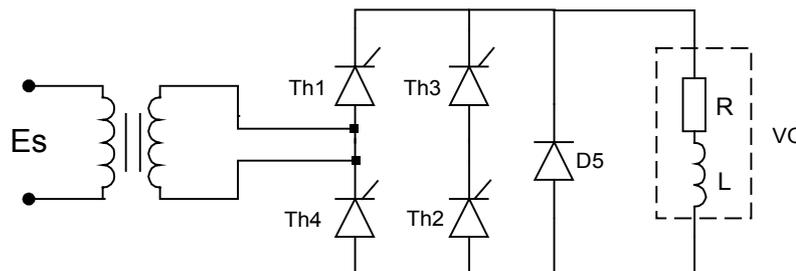


FIGURE 2.10 REDRESSEUR EN PONT COMPLETEMENT COMMANDE

**Exemple 2-3**

Dans le montage en pont de la Figure 2.9, la tension au secondaire du transformateur d'alimentation est de 220 volts à 50 hertz, et la charge a une impédance de 5 ohms.

Calculez:

- la tension moyenne à la charge pour un angle d'amorçage de  $120^\circ$  ;
- la tension inverse de crête (T.I.C) que doivent supporter les diodes et les thyristors.

**Solutions:**

$$a) \quad E_{moy} = \frac{E_{max}}{\pi} (1 + \cos \alpha) = E_{moy} = \frac{220 \times \sqrt{2}}{\pi} (1 + \cos 120^\circ) = 49,36V$$

$$b) \quad \text{T.I.C} = -E_{max} = -310,2V$$

**2.2.2 Le redresseur commandé triphasé****2.2.2. a) Redresseur commandé triphasé à simple alternance**

Ce type de montage correspond à trois circuits redresseurs commandés monophasés à simple alternance qui fonctionnent les uns après les autres (Figure 2.11).

Le circuit de commande du redresseur doit envoyer, sur la gachette des thyristors des impulsions décalés de  $120^\circ$ .

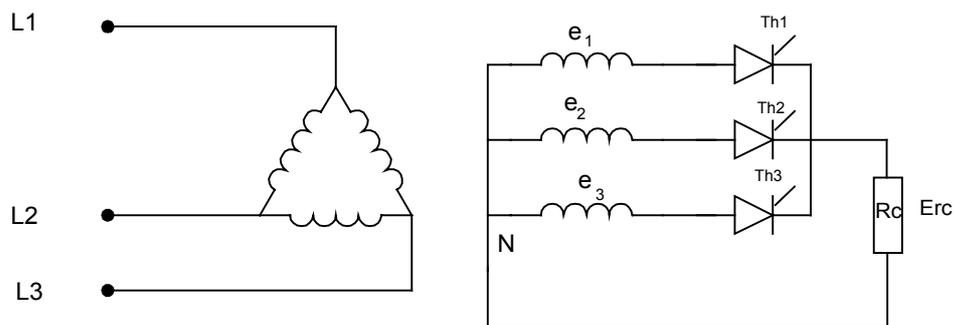


FIGURE 2.11 REDRESSEUR COMMANDÉ TRIPHASÉ À SIMPLE ALTERNANCE

**Tension moyenne à la charge:**

Lorsque l'angle d'amorçage est compris entre  $0^\circ$  et  $30^\circ$ , la tension à la charge n'est pas interrompue. La tension moyenne à la charge est donnée par l'équation 2.7 :

$$E_{moy} = \left( \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \right) E_{max} \cos \alpha \quad (2.7)$$

Quand l'angle d'amorçage devient supérieur à  $30^\circ$ , la valeur moyenne est donnée par l'équation 2.8 :

$$E_{\text{moy}} = \frac{3E_{\text{max}}}{2\pi} [1 + \cos(\alpha + 30^\circ)] \quad (2.8)$$

Dans le cas d'une charge fortement inductive, le circuit peut agir comme redresseur (Figure 2.12) pour un angle situé entre  $0^\circ$  et  $90^\circ$ , et comme onduleur (générateur) pour un angle au dessus de  $90^\circ$ . Dans ce cas-ci, le circuit fournit de l'énergie au réseau (Figure 2.13).

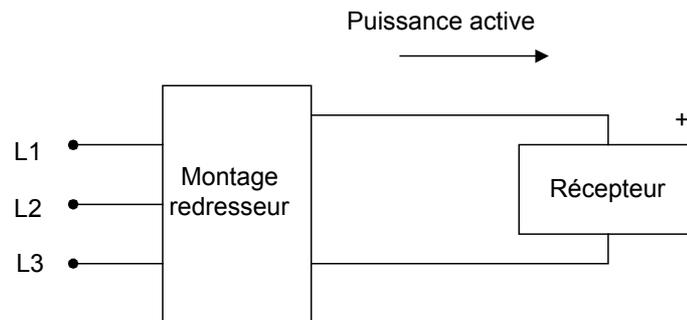


FIGURE 2.12 MONTAGE REDRESSEUR

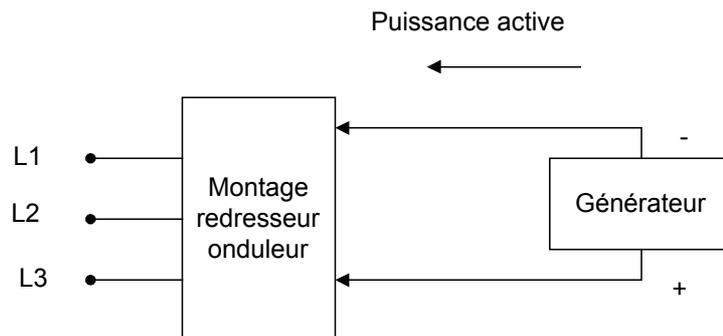


FIGURE 2.13 MONTAGE GÉNÉRATEUR OU ONDULEUR

Ce fonctionnement est utilisé en traction électrique lors du freinage des trains ;durant la période de freinage , les moteurs à courant continu deviennent temporairement des génératrices.

### **2.2.2. b) Redresseur triphasé en pont complètement commandé**

Le redresseur en pont de la Figure 2.14 est constitué de six thyristors qui sont déclenchés à tour de rôle. On observe (Figure 2.15) que le thyristor Th1 est amorcé quand la phase  $e_1$  est durant la période maximum; ensuite, c'est au tour de Th2 d'être amorcé  $60^\circ$  plus tard. Le même scénario se répète avec les thyristors Th3 et Th4. Dans le cas de charge inductive (moteur à courant continu, on branche une diode de roue libre en parallèle avec la charge.

Ce circuit est plus utilisé en industrie que le circuit précédent car il offre un meilleur rendement

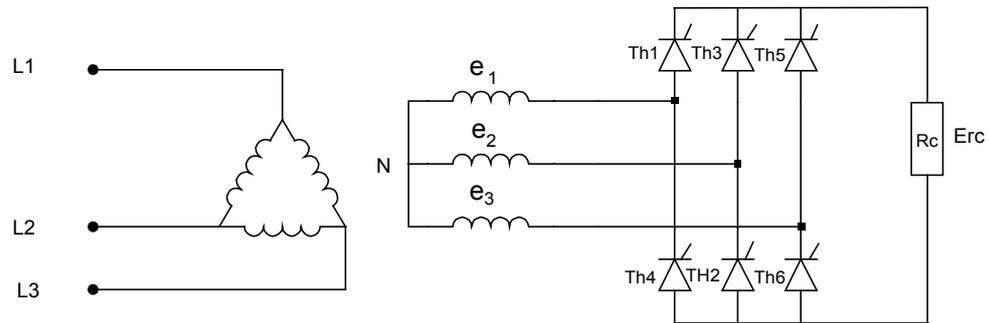


FIGURE 2.14 REDRESSEUR TRIPHASÉ EN PONT COMPLETEMENT COMMANDE

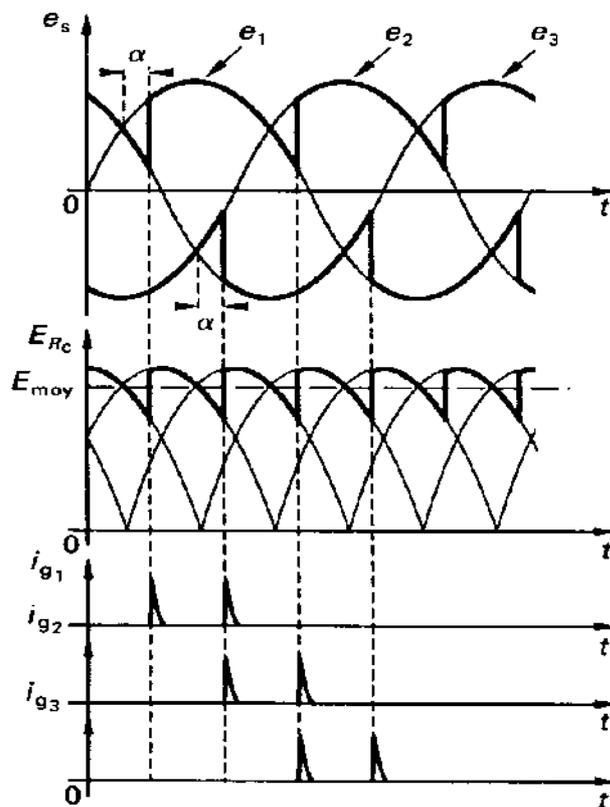


FIGURE 2.15 FORME D'ONDE POUR UN REDRESSEUR TRIPHASÉ EN PONT COMPLETEMENT COMMANDE

### Tension moyenne à la charge

La tension moyenne à la charge est donnée par l'équation 2.9 :

$$E_{\text{moy}} = \left( \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \right) E_{\text{max}} \cos \alpha \quad (2.9)$$

## CHAPITRE 3

### Le convertisseur continu - continu (le hacheur)

Le hacheur est un commutateur statique constitué de thyristors ou de transistors qui permet de transformer une tension continue fixe en une autre tension continue variable (3.1).

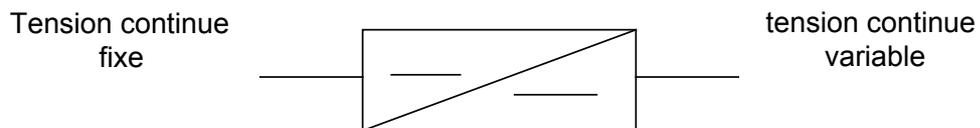


FIGURE 3.1 CONVERTISSEUR CONTINU - CONTINU

On distingue deux types de hacheurs couramment utilisés :

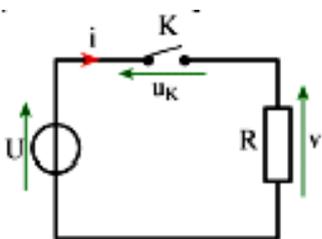
- les **hacheurs dévolteurs** : ceux-ci fournissent, avec un excellent rendement, une tension continue de sortie dont la valeur est inférieure à celle de la tension continue d'entrée.
- les **hacheurs survolteurs** : ceux-ci permettent d'obtenir une tension de sortie supérieure à la tension d'entrée.

Nombreuses sont les applications pour la commande des machines à courant continu et les alimentations à découpage.

#### 3.1 Principe du hacheur dévolteur (série)

##### A. Débit sur une charge résistive

Montage de principe :



$U$  est la source d'alimentation fixe et  $R$  est la charge.

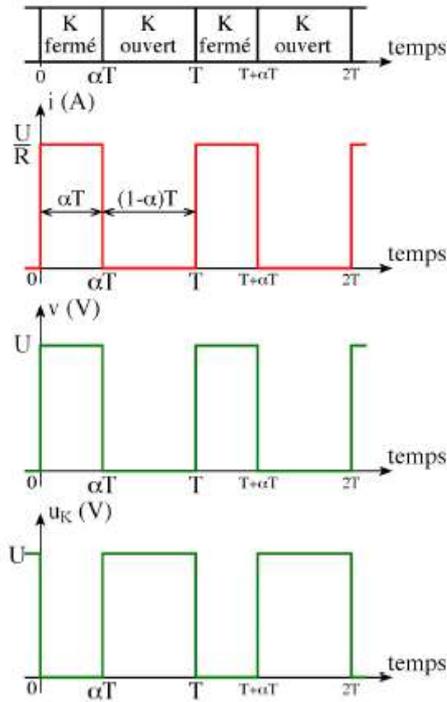
**Analyse de fonctionnement :**

Loi des mailles :  $U - u_K - v = 0$  donc :  $v = U - u_K$

On choisit une période  $T$  et une fraction  $\alpha$  de cette période.

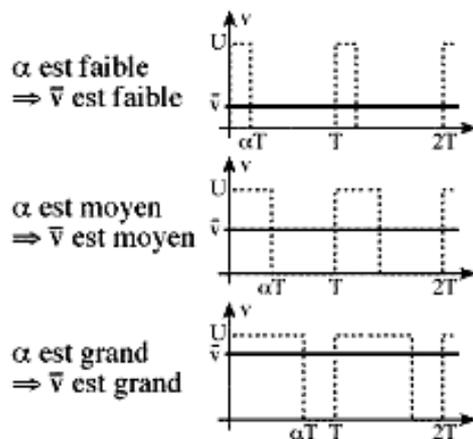
$\alpha$  s'appelle **rappor cyclique**,  $0 < \alpha < 1$ , sans dimension.

- De 0 à  $\alpha T$  : K est fermé  $\Rightarrow u_K = 0$  donc  $v = U$  et  $i = v / R = U / R$
- De  $\alpha T$  à  $T$  : K est ouvert  $\Rightarrow i = 0$ ,  $v = iR = 0$  donc  $u_K = U$



### Commentaires

- La tension de sortie du hacheur (tension  $v$ ) n'est pas continue mais toujours positive. Lorsque la période est assez faible ( fréquence de 100 à 1000 Hz) la charge ne « voit » pas les créneaux mais la valeur moyenne de la tension.
- **Le rapport cyclique  $\alpha$**  peut être réglé. Par conséquent la valeur moyenne  $\bar{v}$  (ou  $\langle v \rangle$ ) de  $v$  va varier.
- Il s'agit d'un **hacheur série** entre la source et la charge.

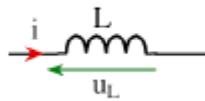


La valeur moyenne de  $v$  en fonction du rapport cyclique  $\alpha$  sur une période est :

$$\bar{v} = \frac{\alpha T \cdot U + (T - \alpha)T \cdot 0}{T} \quad \text{donc} \quad \bar{v} = \alpha U$$

## B. Débit sur une charge inductive

### Propriété des inductances



$$u_L = L \cdot \frac{di}{dt}$$

Equation fondamentale :

De cette équation résident les propriétés ci-dessous :

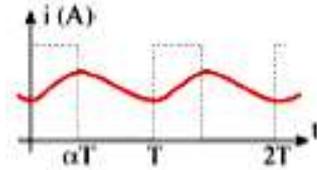
**En régime continu établi** : l'inductance se comporte comme un court-circuit.

**En régime périodique établi** : la tension moyenne est nulle :  $\overline{u_L} = 0$

**En régime quelconque** : d'une façon générale :

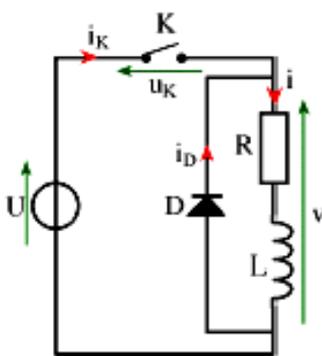
- Le courant dans une inductance ne peut pas subir des discontinuités
- L'inductance s'oppose aux variations du courant qui la traverse, et ce d'autant plus que :
  - L est grand
  - la tension aux bornes de l'inductance est plus faible.

**Conclusion** : L'inductance lisse le courant



La forme du courant pour une charge inductive

**Montage de principe :**

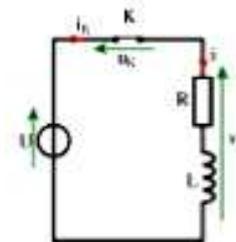


**Loi des mailles** :  $U - u_K - v = 0$  donc :  $v = U - u_K$

**Loi des noeuds** :  $i = i_K + i_D$

### Analyse de fonctionnement

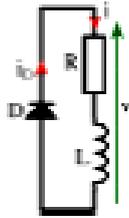
- De 0 à  $\alpha T$  : K est fermé  $\Rightarrow u_K = 0 \rightarrow v = U$  donc  $i = i_K$  et  $i_D = 0$



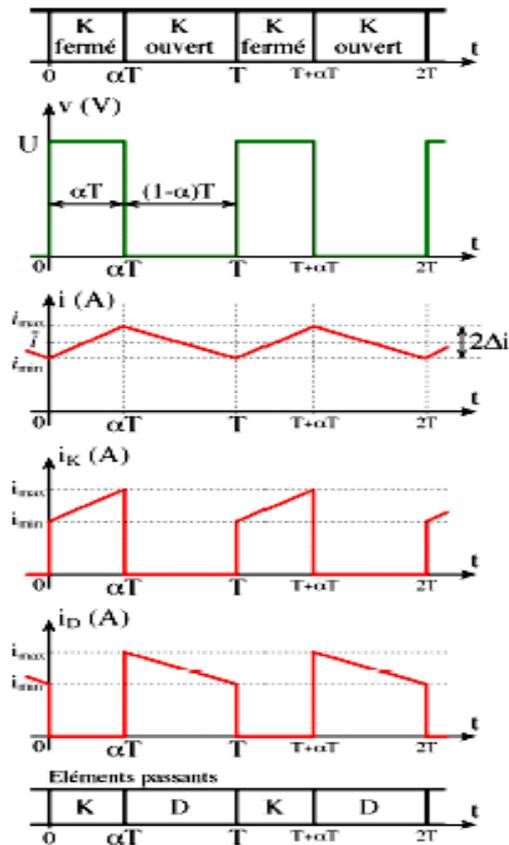
Le courant augmente progressivement (la pente dépend de la valeur de L).

Schéma équivalent est présenté à coté.

- De  $\alpha T$  à  $T$  : K est ouvert  $\Rightarrow v = 0 \rightarrow u_K = U$  donc  $i = i_D$  et  $i_K = 0$



Comme la charge n'est pas alimentée, le courant diminue progressivement.  
Schéma équivalent est présenté à coté.



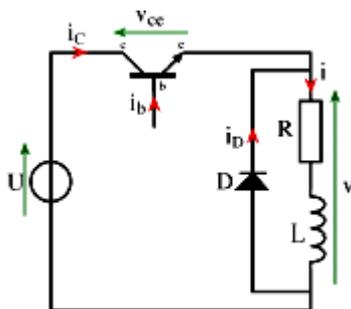
### Commentaires :

A l'ouverture de K, il n'y aura pas d'étincelle puisque le courant imposé par la bobine pourra passer par la diode.

D est appelée **diode de roue libre** car elle est active lorsque la charge n'est pas alimentée. Elle est nécessaire pour un bon fonctionnement du montage.

La bobine lisse le courant. Plus L est grand plus  $\Delta i$  sera petit.

### Exemple de montage

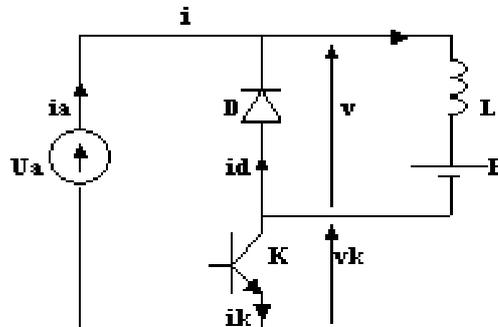


L'interrupteur est remplacé par un transistor  
Le courant  $i_D$  commande la saturation (fermeture) ou le blocage (ouverture) du transistor.

## Montages réels

### Hypothèse

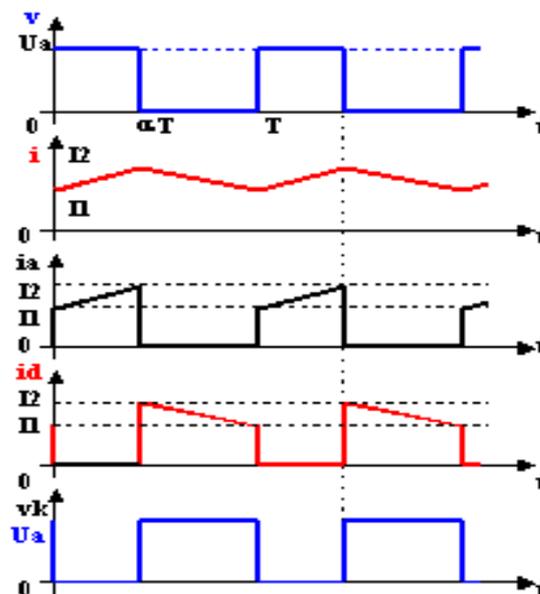
- K est parfait ( $v_k = 0$  en conduction, les temps de commutation sont négligés)
- D est idéale
- Le régime est établi



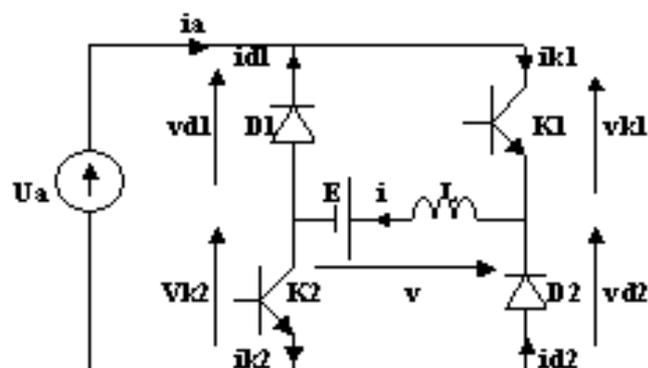
K est commandé en commutation à la période T avec un rapport cyclique  $\alpha$   
Le rapport cyclique est défini comme  $\alpha = (\text{temps de conduction}) / T$

Equation du circuit :  $V = E + L \cdot di/dt$   $U_a = v + v_k$   $I_a = i - id$

### Formes d'ondes en conduction continue



## 2. Hacheur deux cadrans

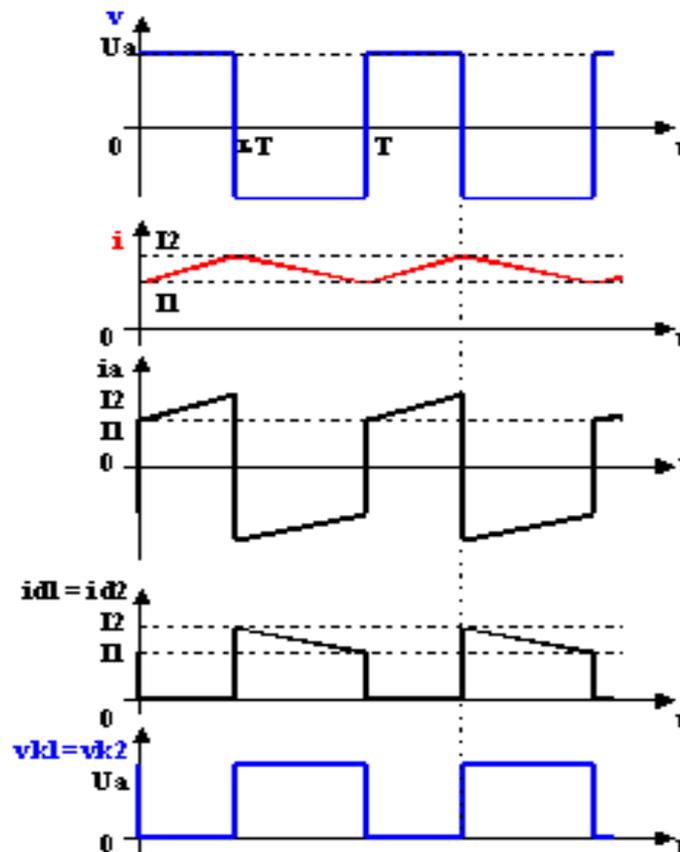


## Hypothèse

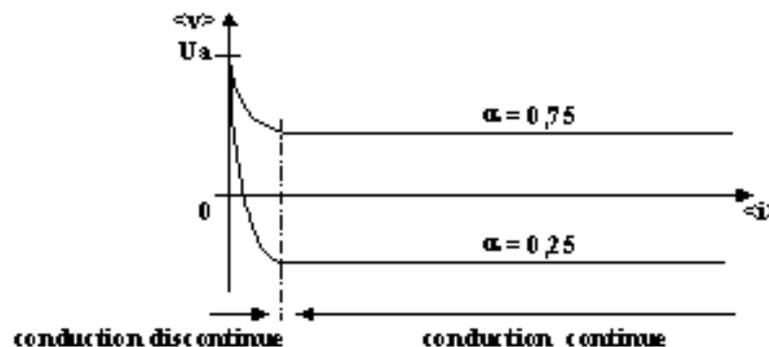
- K est parfait ( $v_k = 0$  en conduction, les temps de commutation sont négligés)
- D est idéale
- Le régime est établi

K1 et K2 sont commandés simultanément avec le même état à la période T et un rapport cyclique  $\alpha$

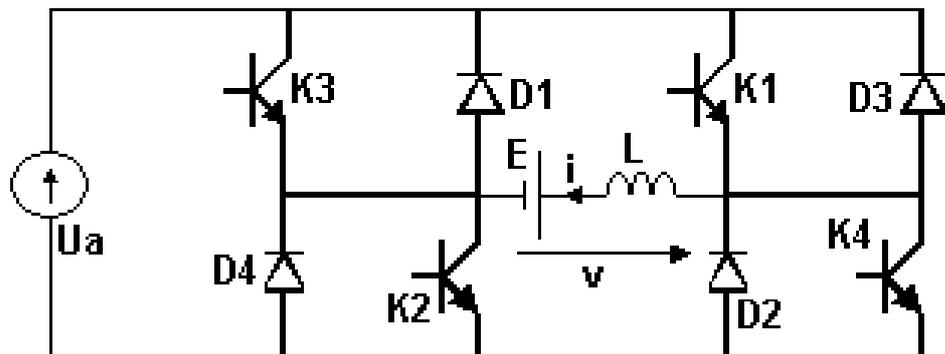
## Formes d'ondes en conduction continue



- En conduction discontinue la valeur moyenne du courant  $i$  est faible.
- Caractéristique de sortie :



### 3. Hacheur quatre quadrants



Pour obtenir une réversibilité quatre quadrants, il suffit d'associer tête bêche deux hacheurs réversibles deux quadrants (K1, K2, D1, D2) et (K3, K4, D3, D4)

Deux stratégies de commande sont utilisées.

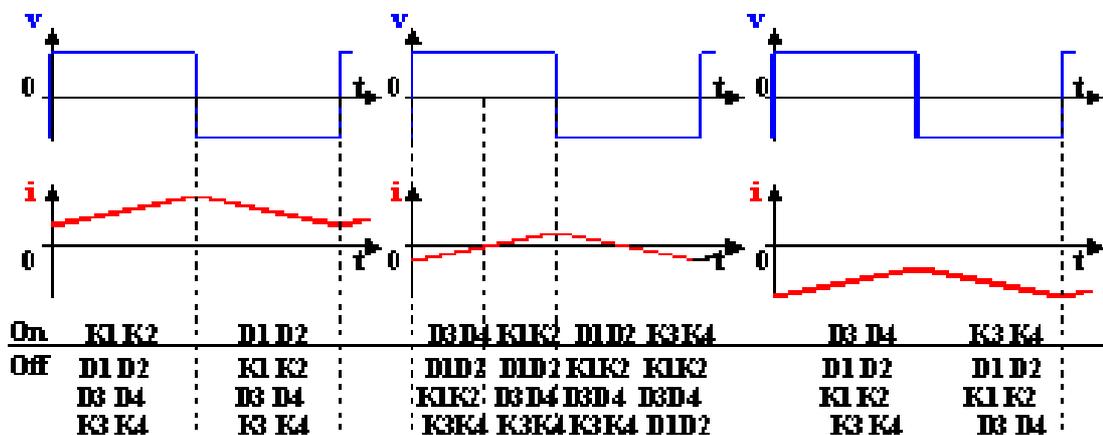
#### 1<sup>er</sup> stratégie de commande

Tous les interrupteurs sont commandés de la même manière quelque soit le quadrant de fonctionnement.

- K1 et K2 sont commandés à la fermeture de 0 à  $\alpha T$  alors que K3 et K4 sont ouverts.
- K3 et K4 sont commandés à la fermeture de  $\alpha T$  à T alors que K1 et K2 sont ouverts.

C'est le sens du courant  $i$  qui détermine les composants actifs. Par exemple si K3 est commandé à la fermeture avec  $i > 0$ , c'est D1 qui conduira. Mais si K3 est commandé à la fermeture avec  $i < 0$ , c'est K3 qui sera traversé par le courant  $i$ .

Exemples d'états des composants en fonction du sens de courant  $i$



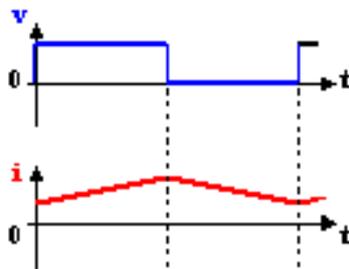
Remarques:

- $\alpha T$  correspond au temps de conduction de K1 et K2, au temps de blocage de K3 et K4
- Comme les formes d'ondes sont identiques à celles du hacheur deux quadrants, la tension  $\langle v \rangle$  est de même expression :  $\langle v \rangle = U_a \cdot (2\alpha - 1)$
- Quelque soit le quadrant, le hacheur contrôle la tension et le courant dans la charge.

## 2<sup>ème</sup> stratégie de commande

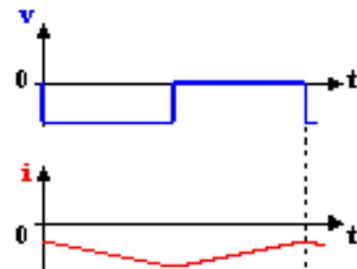
- K1 fonctionne à la fréquence de hachage alors que K2 est fermé en permanence si on souhaite une tension moyenne positive en sortie (K3 et K4 sont bloqués)
- K3 fonctionne à la fréquence de hachage alors que K4 est fermé en permanence si on souhaite une tension moyenne négative en sortie (K1 et K2 sont bloqués)

Formes d'ondes pour  $\langle v \rangle > 0$  et  $i > 0$  :



On	K2 K1	K2 D2
Off	D1 D2 D3 D4 K3 K4	K1 D1 D3 D4 K3 K4

pour  $\langle v \rangle < 0$  et  $i < 0$  :

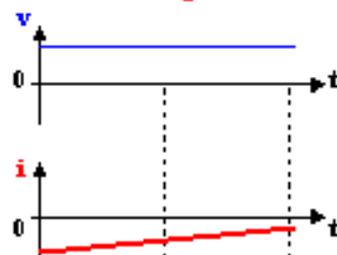


	K3 K4	K4 D4
	D1 D2 K1 K2 D3 D4	D1 D2 K1 K2 D3 K3

$\alpha T$  correspond au temps de conduction de K1 pour  $\langle v \rangle > 0$  et au temps de conduction de K3 pour  $\langle v \rangle < 0$

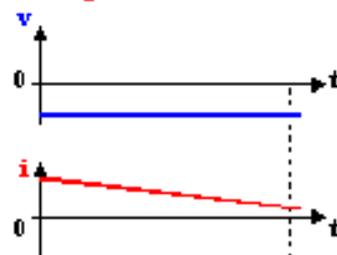
Alors  $\langle v \rangle = \alpha U_a$  si  $K2 = 1$  et  $\langle v \rangle = -\alpha U_a$  si  $K4 = 1$

Formes d'ondes pour  $\langle v \rangle > 0$  et  $i < 0$  :



On	D3 D4	D3 D4
Off	D1 D2 K1 K2 K3 K4	D1 D2 K1 K2 K3 K4

pour  $\langle v \rangle < 0$  et  $i > 0$  :



	D1 D2	D1 D2
	K3 K4 K1 K2 D3 D4	K3 K4 K1 K2 D3 D4

Remarques :

- $\langle v \rangle = U_a$  si  $K2 = 1$  et  $\langle v \rangle = -U_a$  si  $K4 = 1$

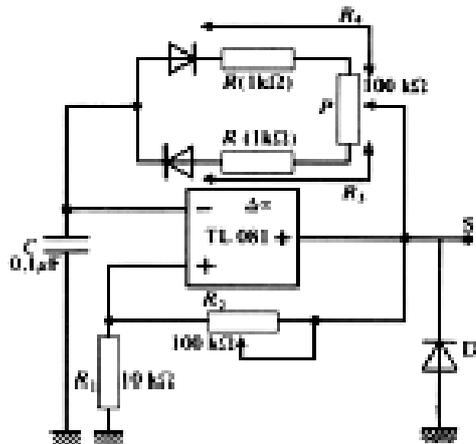
- $L di/dt = (U_a - E)/L$  donc le courant croît si  $K_2 = 1$
- $L di/dt = (-U_a - E)/L$  donc le courant décroît si  $K_4 = 1$
- Ces cas correspondent à un régime transitoire dans lequel le hacheur ne contrôle pas la pente du courant.

### Circuits pour la commande du transistor

Pour alimenter la base du transistor, il faut réaliser un montage électronique délivrant un signal en créneaux avec un rapport cyclique réglable. Il s'agit d'un oscillateur.

Il existe plusieurs circuits intégrés réalisant cette fonction.

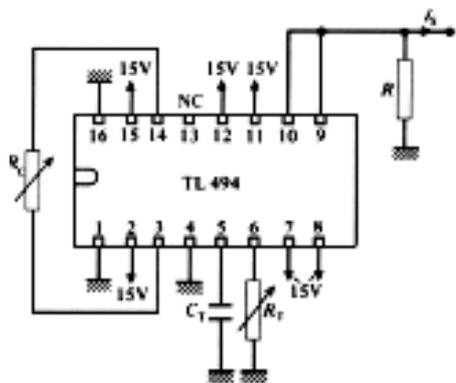
#### **Exemple 1 :**



Le courant de sortie de l'AOP étant très faible (10 à 20 mA), il conviendra d'utiliser un transistor Darlington.

$$T = (R_3 + R_4) \ln \left( 1 + 2 \frac{R_1}{R_2} \right); \quad \alpha = \frac{R_3}{R_3 + R_4}$$

#### **Exemple 2 :**



$$C_T = 0,33 \mu F, R_C = 10 \text{ k}\Omega, R_T = 33 \text{ k}\Omega, R = 1 \text{ k}\Omega/0,5 \text{ W}$$

$R_C$  règle le rapport cyclique.

$R_T$  règle la fréquence.

$$f = \frac{1,1}{R_T C_T}$$

La figure 3.2 représente le schéma de principe d'un hacheur dévolteur muni d'un filtre de sortie LC, qui débite un courant dans une charge résistive. L'ouverture et la fermeture périodique de l'interrupteur S permet de hacher la tension continue d'entrée pour produire une tension de sortie variable. L'inductance réduit l'ondulation du courant de charge et le condensateur C maintient la tension de sortie sensiblement continue. La diode assure la continuité du courant dans la charge lorsque l'interrupteur est ouvert. La forme d'onde à la sortie du hacheur est montrée à la Figure 3.3

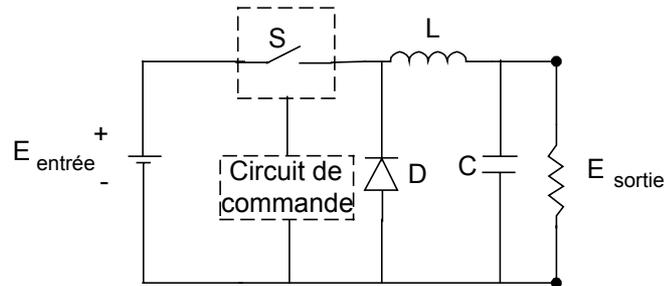


FIGURE 3.2 LE HACHEUR DÉVOLTEUR

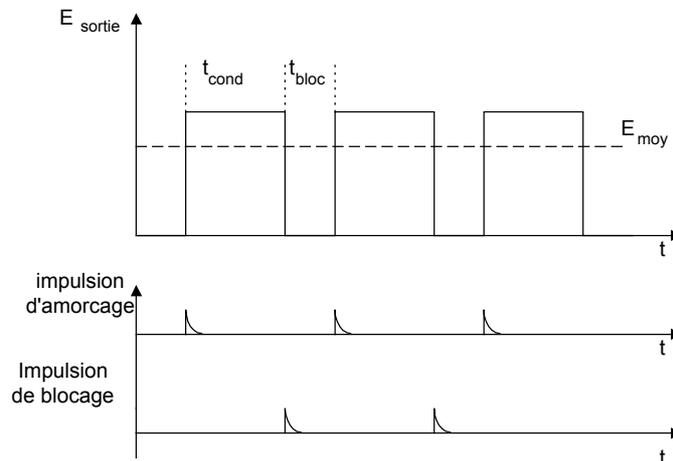


FIGURE 3.3 FORME D'ONDE À LA SORTIE D'UN HACHEUR DÉVOLTEUR

La tension de sortie est donnée par l'équation :

$$E_{\text{moy}} = E_{\text{entrée}} \left( \frac{t_{\text{cond}}}{T_h} \right) \quad (3.1)$$

$T_h$  : période de hachage

$t_{\text{cond}}$  : période conduction du thyristor

L'amorçage des thyristors alimentés en courant continu ne présente pas de difficulté particulière. Par contre, leur désamorçage nécessite des circuits supplémentaires de blocage.

Il existe de nombreux dispositifs hacheurs qui se différencient les uns des autres par leur circuit de blocage. Le rôle de ce circuit est de forcer l'extinction du thyristor principal à la fin du temps de conduction. La Figure 3.4 représente un

hacheur dévolteur dont le thyristor principal (Th1) est bloqué à l'aide d'un thyristor auxiliaire (Th2) et d'un circuit LC.

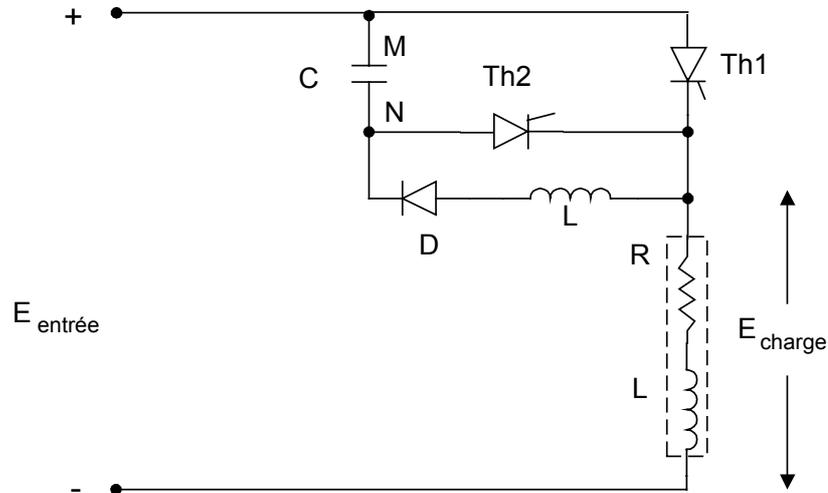


FIGURE 3.4 HACHEUR DÉVOLTEUR AVEC SON CIRCUIT DE DÉSAMORÇAGE

Pour permettre au condensateur de se charger M(+) et N(-), le thyristor Th2 doit être amorcé le premier, alors Th1 est à l'état bloqué. Lorsque le condensateur est chargé, le thyristor Th2 se bloque. Quand Th1 est amorcé, le courant circule dans la charge, et le condensateur se charge dans l'autre polarité à travers L et D. Lorsque le thyristor Th2 est amorcé, une tension négative est appliquée sur Th1 par le condensateur, et Th1 se bloque. Et ensuite le cycle recommence.

### 3.2 Le hacheur survolteur

Le schéma de principe d'un hacheur survolteur est illustré à la Figure 3.5. Le thyristor qui joue le rôle de commutateur statique est placé en parallèle avec la charge. Lorsque th1 est à l'état passant, la bobine se charge à travers l'alimentation. Lorsque Th1 bloque, la tension appliquée à la charge devient la somme de la tension de la bobine et de la source. La tension de sortie nous est donnée par l'équation 3.2. On retrouve ce hacheur dans certaines commande de moteurs qui permettent la récupération d'énergie sur le réseau, pendant la période de freinage du moteur.

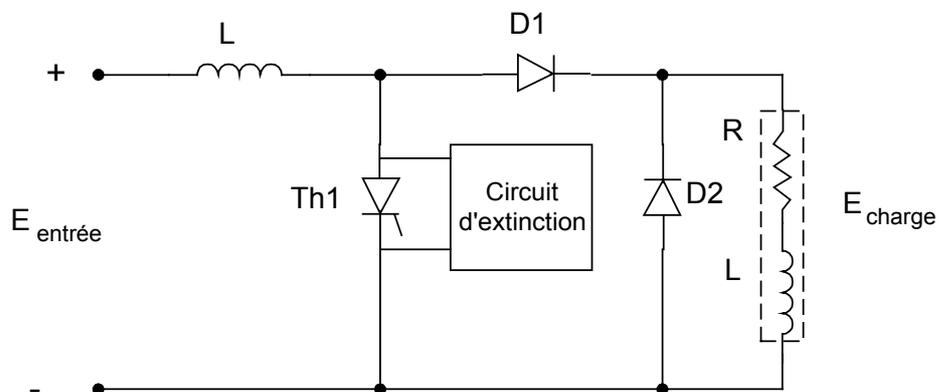


FIGURE 3.5 HACHEUR SURVOLTEUR

$$E_{\text{moy}} = E_{\text{entrée}} \left( \frac{T_h}{T_h - T_{\text{cond}}} \right) \quad (3.2)$$

### **Exemple 3.1**

Un hacheur dévolteur alimente une charge résistive de  $65\Omega$  à partir d'une batterie d'accumulateurs de 60V. Le temps de conduction est de 30% de la fréquence de hachage qui est de 500HZ. Calculez :

- la période de hachage ;
- le temps de conduction ;
- la tension moyenne à la sortie.

### **Solutions**

- $T = \frac{1}{F} = \frac{1}{500\text{HZ}} = 2\text{ms}$
- $t_{\text{cond}} = 0.30 \times 2\text{ms} = 0,6\text{ms}$
- $E_{\text{moy}} = 60\text{V} \times \frac{0,6\text{ms}}{2\text{ms}} = 18 \text{ V}$

### **3.3 Les applications des hacheurs**

Les hacheurs sont utilisés dans de nombreuses applications industrielles, surtout dans le domaine de la traction électrique. Ils alimentent et contrôlent la vitesse des moteurs à courant continu qui équipent les locomotives électriques, les métros et les véhicules à batterie d'accumulateurs (charriots élévateurs, voitures électriques et locomotives de mines).

Les hacheurs de petite puissance ( 0 à 100KW) sont généralement employés dans les véhicules électriques à batteries. Les hacheurs de puissance > 100KW sont utilisés dans les locomotives électriques qui fonctionnent à partir d'un réseau à courant continu (circuit redresseur).

## CHAPITRE 4

## Commande de vitesse pour moteur à courant continu

Les moteurs à courant continu sont utilisés dans de nombreuses applications industrielles, bien que leur construction soit plus complexe que celle des moteurs à courant alternatif.

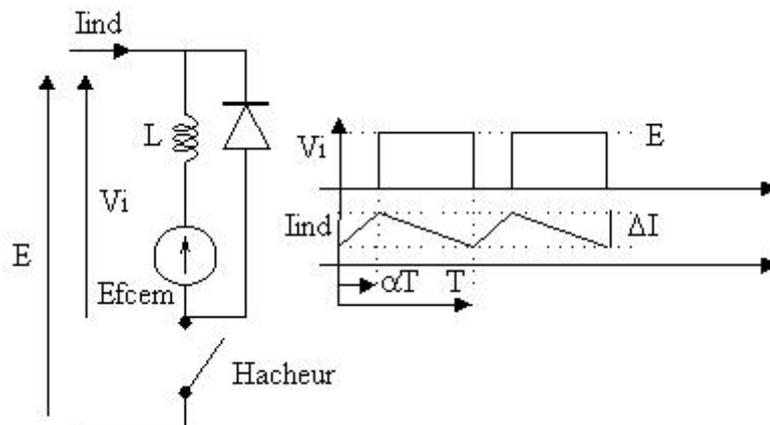
4.1 Rappel sur le moteur a courant continu

Le moteur à courant continu et excitation séparée est constitué de deux enroulements indépendants. Le premier dit " inducteur " génère un champ magnétique permanent, le second dit " induit " est bobiné sur le rotor. Le schéma électrique équivalent de l'induit est un réseau R,L , $E_{f_{cem}}$  série. La force contre électromotrice  $E_{f_{cem}}$  est égale à  $K.\Phi N$  où  $\Phi$  est le flux généré par l'excitation et  $N$  la vitesse de rotation. Si l'on asservit le courant d'induit, on pilotera le moteur à couple constant quelque soit la charge. Si l'on mesure la vitesse de rotation de l'arbre, on pourra alors réaliser une commande en vitesse.

**Attention** : l'alimentation de l'excitation ne doit jamais être coupée avant celle de l'induit. En effet, une telle opération entraîne une brusque diminution de  $\Phi$  ; Compte tenu de l'inertie du moteur,  $E_{f_{cem}}$  se maintient constant de sorte que  $N$  croît rapidement en provoquant un emballement du moteur avec un effet gyroscopique potentiellement " dévastateur ".

## 1) Moteur idéal

En négligeant la résistance d'induit du moteur dans un premier temps, on a le chronogramme suivant :



L'expression de l'ondulation résiduelle de courant  $\Delta I$  en régime établi nous donne :

$$\Delta I = \alpha T (E - E_{f_{cem}})/L \text{ et } \Delta I = (1-\alpha) T E_{f_{cem}} / L$$

D'où on tire :

$$E_{f_{cem}} = \alpha.E = V_i \text{ moyen}$$

et par suite :

$$N = \alpha \tilde{E} / K.\Phi$$

La vitesse de rotation est donc bien proportionnelle à la tension moyenne appliquée à l'induit.

La puissance électrique  $P_a$  absorbée par l'induit vaut :  $P_a = V_{i \text{ moyen}} \cdot I_{\text{ind}} \text{ moyen}$

Elle est transformée en puissance mécanique :  $P_m = C_m \cdot N$ . D'où l'on tire la relation de proportionnalité du couple moteur au courant moyen d'induit :

$$C_m = I_{\text{moyen}} \cdot (K \cdot \Phi)$$

**Dans le cas idéal, la vitesse de rotation et le couple sont deux grandeurs indépendantes.**

## 2) Imperfections du moteur

- Pertes mécaniques par frottement secs => Couple de cédage : couple minimum pour vaincre les frottements secs.
- Pertes par frottement visqueux : fonction de la vitesse.
- Pertes Joules dans l'induit (bobinage, balais et collecteur) :  $R = 15 \Omega$

En tenant compte de la résistance d'induit  $R$ , le courant  $I_{\text{ind}}$  décrit des arcs d'exponentielle de constante de temps  $L/R$ . Le couple et la vitesse ne sont plus indépendants : si le couple résistant augmente,  $I_{\text{moyen}}$  augmente, la  $f_{\text{cem}}$  diminue et  $N$  diminue. Le rendement également diminue (augmentation des pertes joules en  $I^2$ ).

**Les avantages de ces moteurs sont :**

- une large gamme de variations de vitesse au-dessus et au-dessous de la vitesse de régime ;
- un fonctionnement avec des couples constants ou variables ;
- une accélération, un freinage et une inversion du sens de rotation très rapide, ce qui est avantageux dans le cas des appareils de levage et des machines outils ;
- une vitesse de rotation qui peut être réglée par l'intermédiaire d'un système de rétroaction ;
- la possibilité de fonctionner comme générateur lors du freinage par récupération d'énergie.

## 3) Caractéristiques d'un moteur à courant continu

- La vitesse d'un moteur à courant continu est inversement proportionnelle au flux inducteur et directement proportionnelle à la force contre-électromotrice du moteur. Cette relation nous est donnée par :

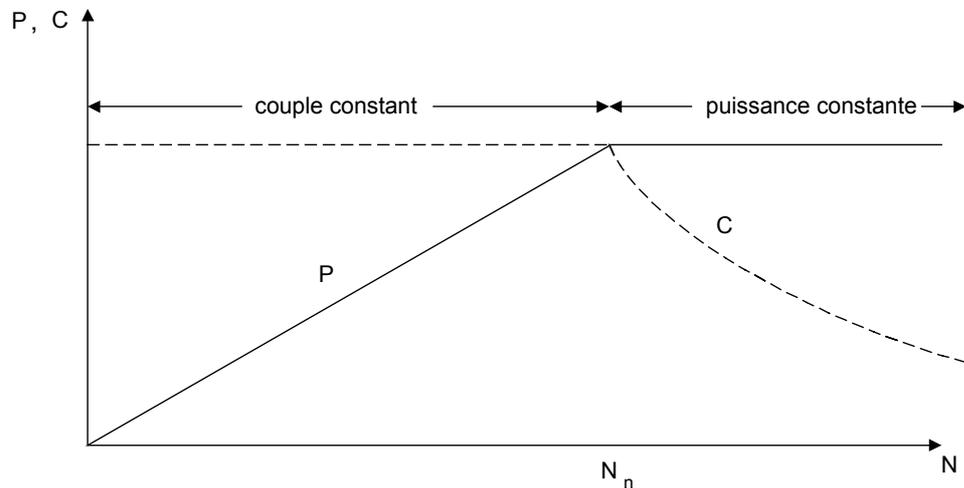
$$N = \frac{F.C.E.M}{K\phi} \quad (\text{Equation 4-1})$$

- Le couple du moteur est proportionnel au flux inducteur et au courant de l'inducteur :  $C = K \times \phi \times I_A$  (Equation 4-2)
- La puissance mécanique est proportionnelle au couple et à la vitesse du moteur :

$$P = 0,105 \times C \times N \quad (\text{Erreur ! Source du renvoi introuvable.})$$

On peut faire fonctionner le moteur à couple constant en variant la tension de l'induit. Dans ce cas, la puissance varie en fonction de la vitesse. Si on varie le flux inducteur et si l'on garde la tension de l'induit constante, le couple variera inversement proportionnellement à la vitesse du moteur, et la puissance demeurera constante.

La Figure 4-4 nous montre la relation entre le couple et la puissance du moteur en fonction de la vitesse.

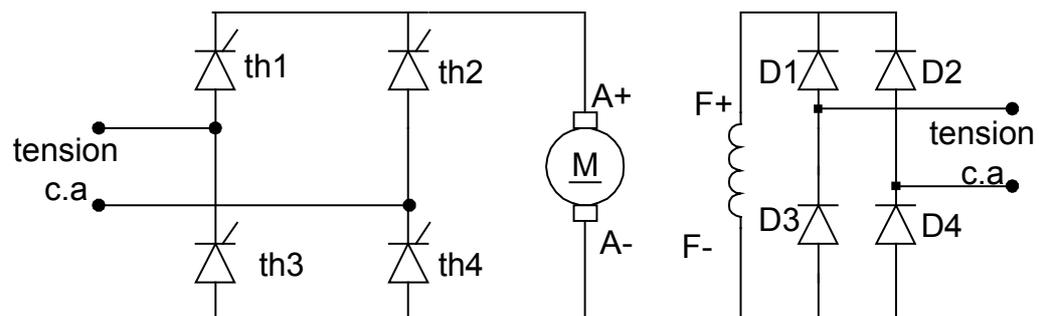


**FIGURE 4-4 PUISSANCE ET COUPLE EN FONCTION DE LA VITESSE**

Dans l'industrie, 90% des applications fonctionnent à couple constant. Ainsi on retrouve le fonctionnement à puissance constante dans les pompes, les machines outils et les systèmes d'enroulement.

## 4.2 Variateur de vitesse à thyristors

Les convertisseurs alternatif- continu sont les variateurs de vitesse les plus répandus pour les moteurs à courant continu, puisqu'ils utilisent directement la tension du réseau. Ils sont monophasés ou triphasés. Les ponts monophasés sont utilisés dans les variateurs de faible puissance (jusqu'à 10kw environ). Ils comprennent soit un pont complet de quatre thyristors (Figure 4-5) ou un pont mixte à deux thyristors et deux diodes. Les ponts triphasés sont employés pour les puissances supérieures à 10kw. On peut choisir un pont complet à six thyristors ou mixte à trois thyristors et trois diodes.



**FIGURE 4-5 REDRESSEUR À THYRISTORS MONOPHASÉS**

## Variateur de vitesse réversible

Un variateur est réversible lorsqu'il permet un changement rapide du sens de marche. Cela nécessite une commande à quatre cadrants. La Figure 4-6 représente les quatre cadrants dans lesquels un variateur réversible peut fonctionner. La vitesse est indiquée sur l'axe horizontal et le couple, sur l'axe vertical.

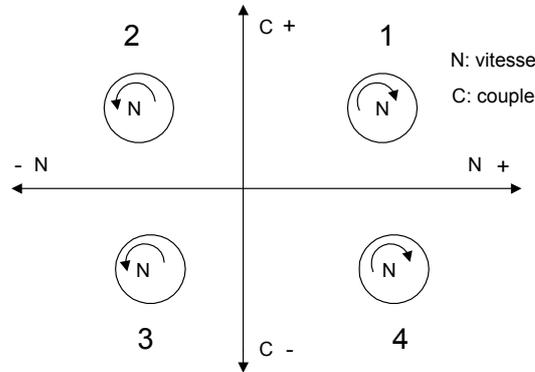


FIGURE 4-6 REPRÉSENTATION DES QUATRE QUADRANTS DU COUPLE ET DE LA VITESSE

Premier quadrant : Le moteur fonctionne dans le sens direct. Le couple et la vitesse sont positifs.

Deuxième quadrant : Le moteur fonctionne en sens inverse (vitesse négative) et le couple est positif (période de freinage ou récupération)

Troisième quadrant : Le moteur fonctionne en sens inverse et le couple est négatif.

Quatrième quadrant : Le couple est négatif et la vitesse est positive (période de freinage ou récupération).

### Déroulement d'un cycle normal :

Démarrage dans le sens direct (quadrant 1) ; freinage et récupération (quadrant 4).  
Démarrage dans le sens inverse (quadrant 3) ; freinage et récupération (quadrant 2).

Pour réaliser un variateur de vitesse réversible à quatre quadrants, on utilise le montage de la Figure 4-7 qui est constitué de deux ponts à thyristors.

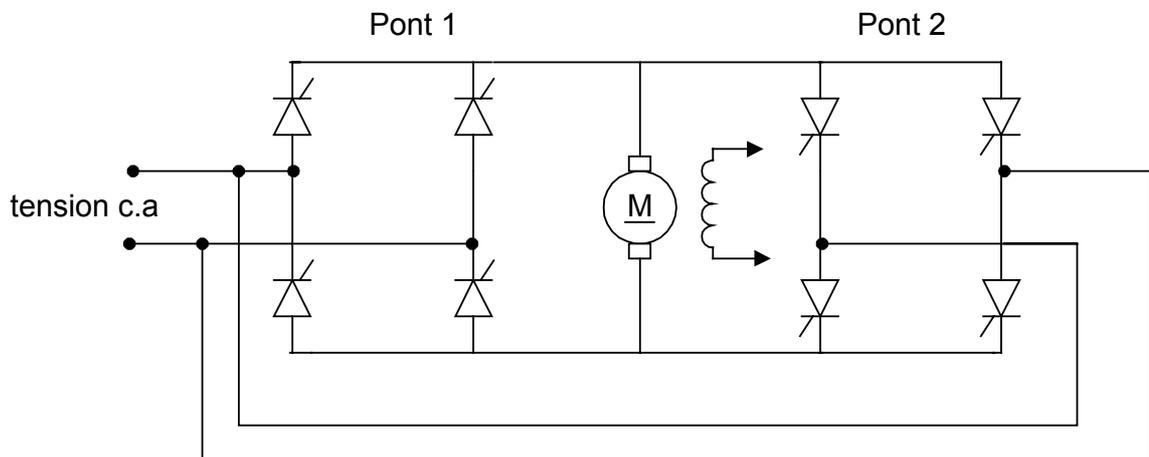


FIGURE 4-7 REDRESSEUR RÉVERSIBLES À THYRISTORS

### 4.3 Régulation de vitesse

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 4-8 présente les principaux éléments d'un variateur de vitesse pour un moteur c.c à excitation séparée.

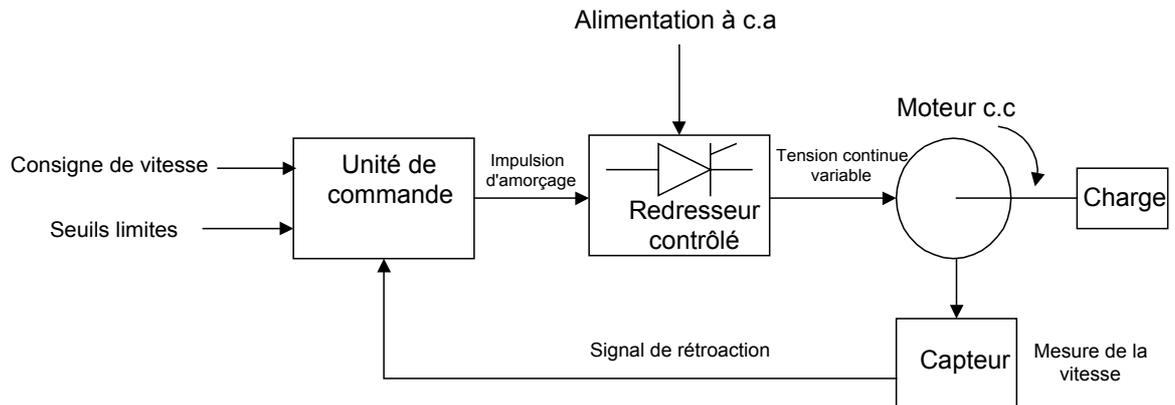


FIGURE 4-8 DIAGRAMME SYNOPTIQUE D'UN VARIATEUR DE VITESSE POUR UN MOTEUR À C.C

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.

#### 4.4 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 4-9 montre les différents éléments d'une boucle de régulation utilisant une génératrice tachymétrique.

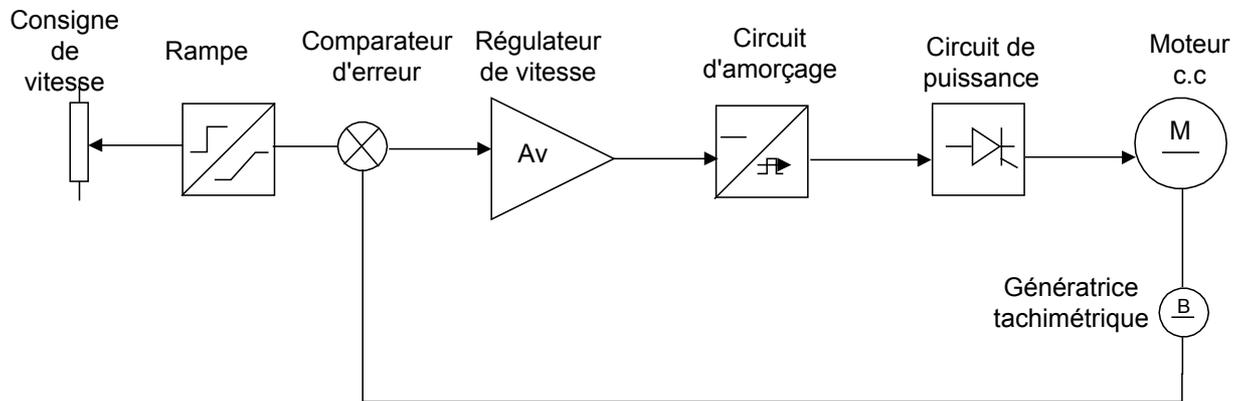


FIGURE 4-9 ASSERVISSEMENT DE VITESSE D'UN MOTEUR C.C

- **La rampe** (Figure 4-10)

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.

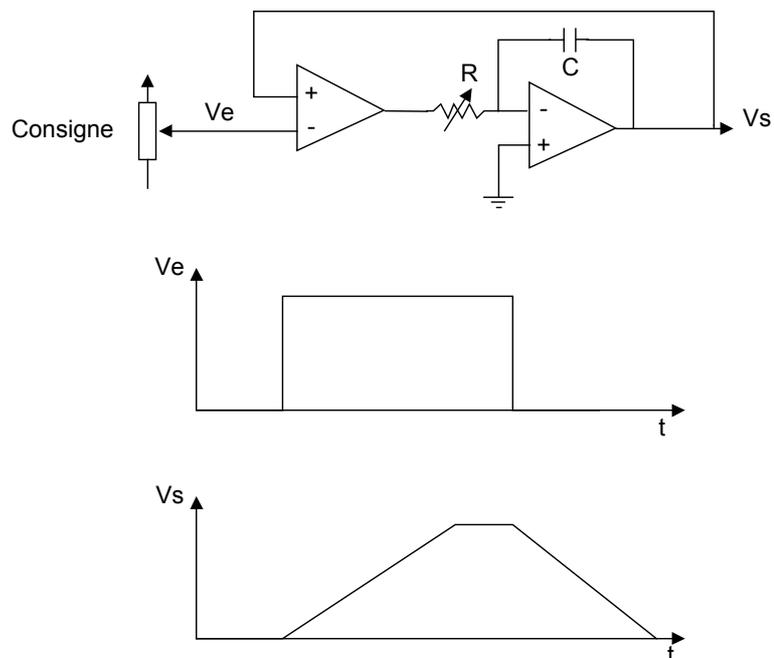


FIGURE 4-10 CIRCUIT DE LA RAMPE D'ACCÉLÉRATION

• **Le comparateur** (Figure 4-11)

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.

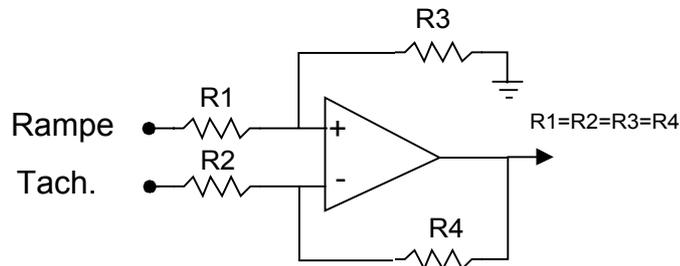


FIGURE 4-11 COMPAREUR D'ERREUR

• **Le régulateur** (Figure 4-12)

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.

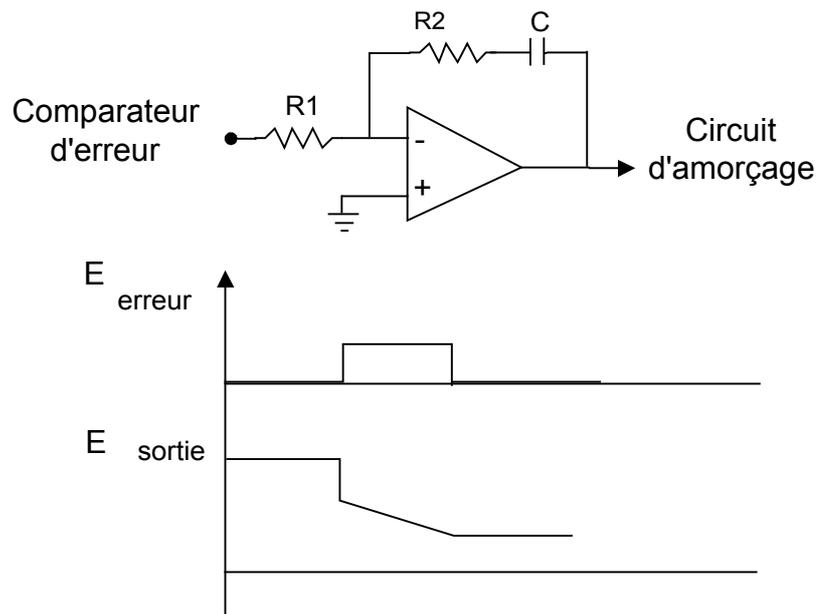


FIGURE 4-12 RÉGULATEUR PI

**Circuit d'amorçage** (Figure 4-13)

C'est un circuit qui permet d'amorcer à un moment bien précis 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.

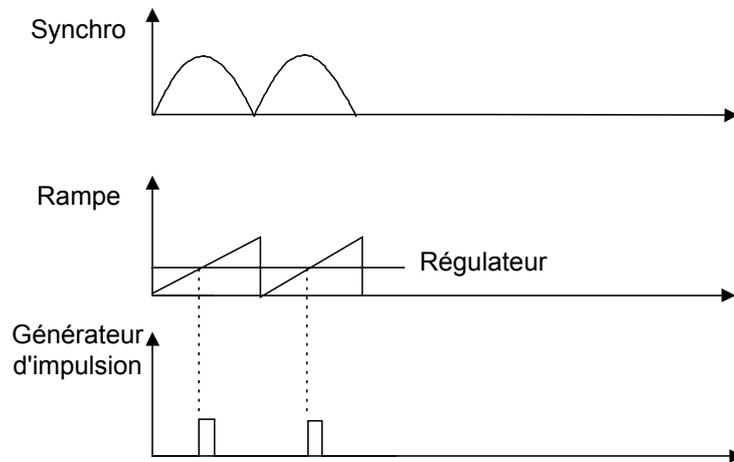
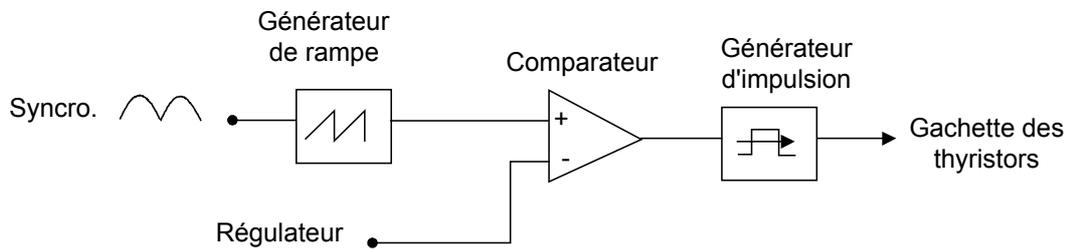


FIGURE 4-13 CIRCUIT D'AMORÇAGE

### 4.3 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.) (Figure 4-14). 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.

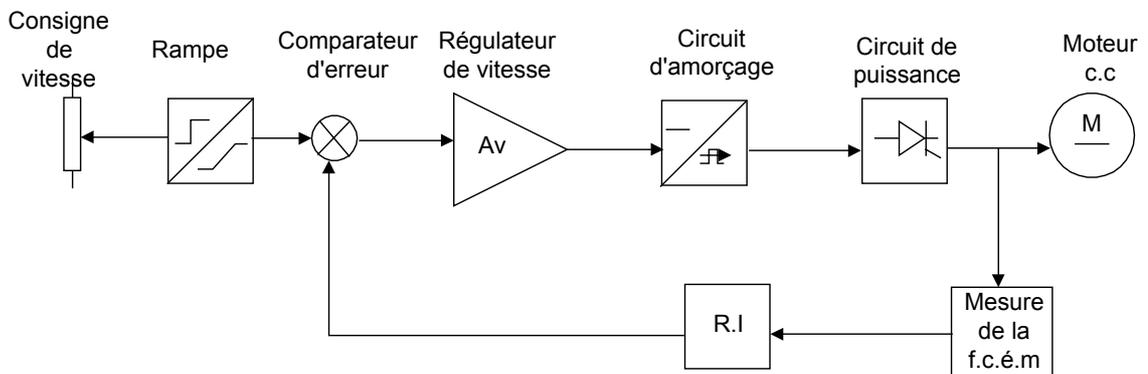


FIGURE 4-14 RÉGULATION PAR FORCE CONTRE-ÉLECTROMOTRICE

**Limitation de courant** (Figure 4-15)

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 .

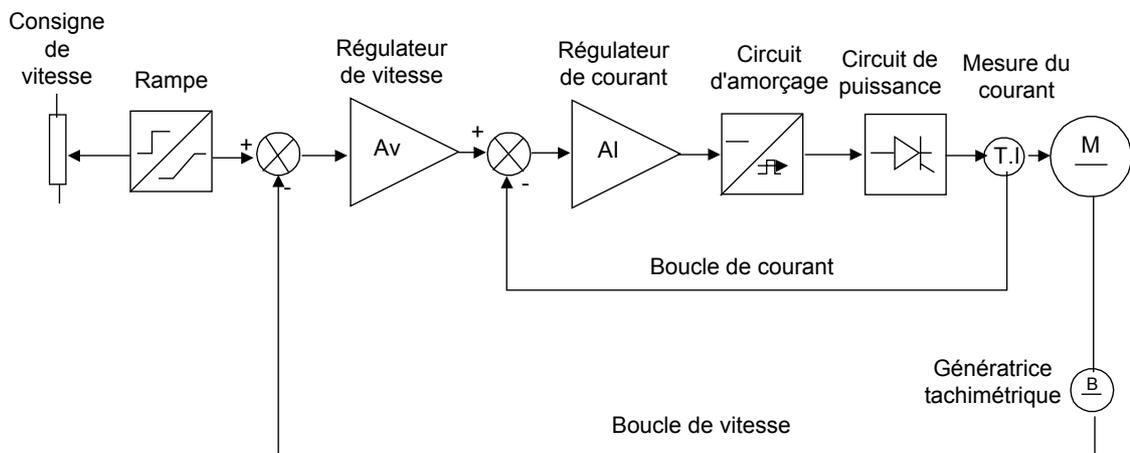


FIGURE 4-15 ASSERVISSEMENT AVEC LIMITATION DE COURANT

## 4.4 Variateur de vitesse Rectivar 4

### 4.4.1 Discussion

Les variateurs de vitesse RTV-44 (Figure 4-16) 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.

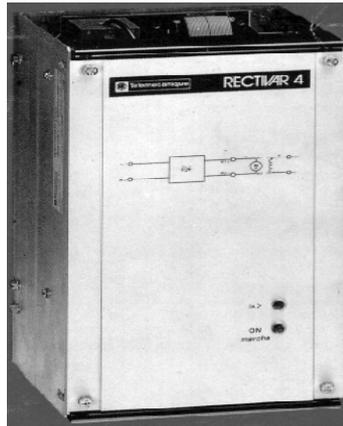
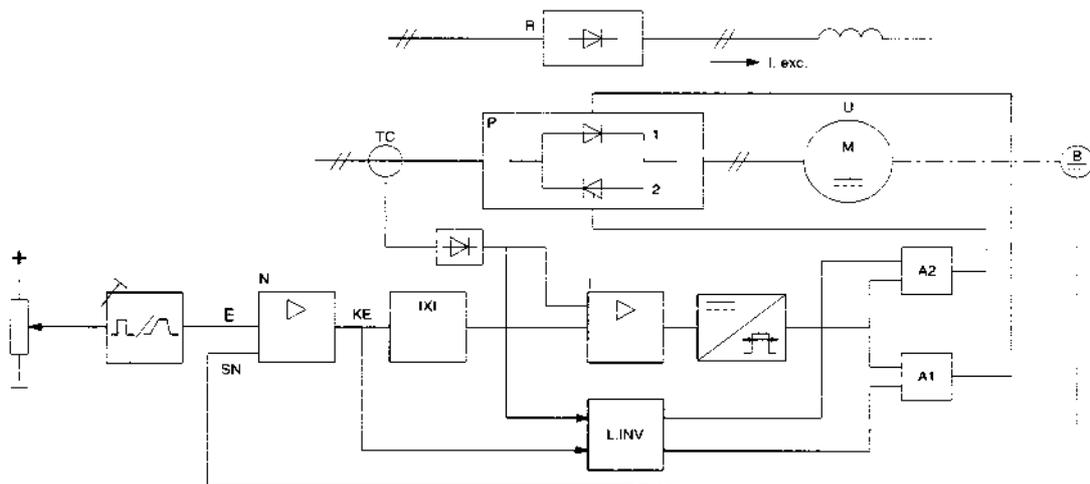


FIGURE 4-16 RECTIVAR 4

### 4.4.2 Schéma fonctionnel

La Figure 4-17 nous met en relief le schéma fonctionnel du variateur RECTIVAR 4



P1 : pont de Graëtz 1 phase  
P2 : pont de Graëtz 1 phase  
TC : mesure du courant moteur  
B : mesure de la vitesse moteur  
R : alimentation des inducteurs  
L.INV : Logique d'inversion

FIGURE 4-17 SCHÉMA FONCTIONNEL

### 4.4.3 Caractéristiques électriques

Alimentation monophasée		Courant côté continu		Moteur			Tension d'induit recommandée	Excitation		Courant	RECTIVAR (1)		
Tension	Courant ligne	Maximal permanent	Pointe	Fuissance maximale limitation (2) classique	à rabatement			Tension redressement double alternance	simple alternance		Référence	Masse	
U eff. V	I eff. A	I <sub>m</sub> A	I <sub>p</sub> A	Cd/Cn = 1,2 I <sub>n</sub> A	P kW	I <sub>d</sub> /I <sub>n</sub> = 1,5 P <sub>n</sub> kW	P <sub>c</sub> kW	UA V	V	V	I <sub>ex</sub> 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

FIGURE 4-18 CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES

### 4.4.4 Raccordement

La figure (Figure 4-19) nous montre le raccordement électrique suggéré par le fabricant, pour un fonctionnement dans les deux sens de marche et avec 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

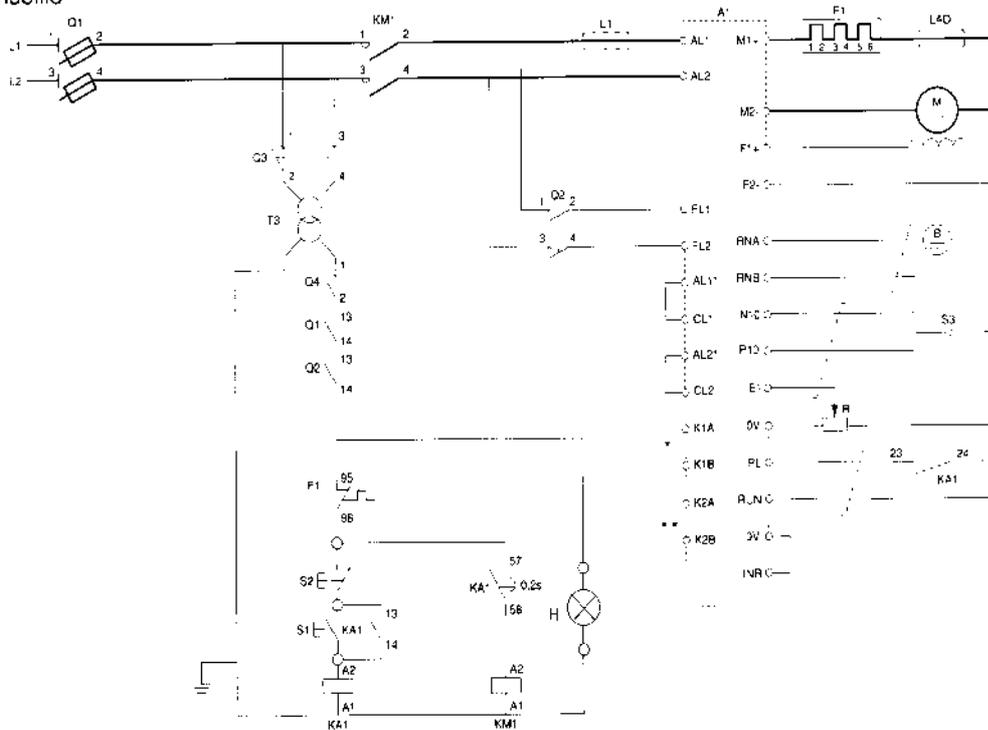


FIGURE 4-19 CIRCUIT DE RACCORDEMENT

#### 4.7.5 Carte de contrôle

La Figure 4-20 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

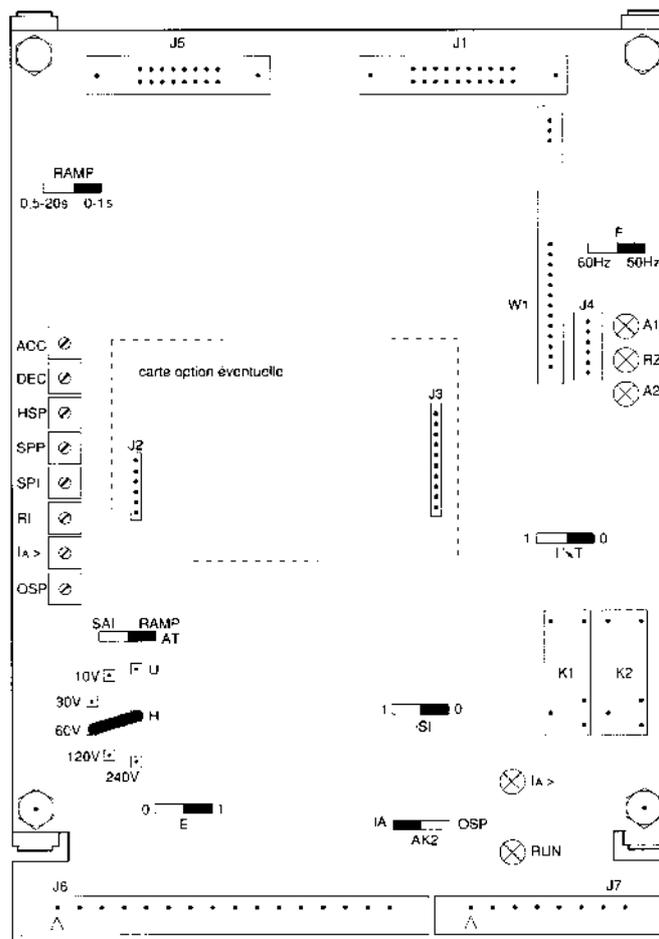


FIGURE 4-20 CARTE DE CONTRÔLE

#### 4.4.6 Choix d'un variateur pour un convoyeur transportant des agrégats

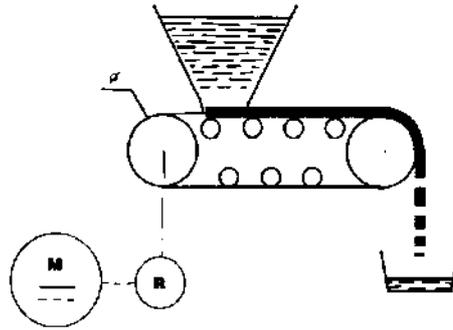


FIGURE 4-21 CONVOYEUR À AGRÉGATS

##### 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 :

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

- Vitesse de rotation des tambours

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

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

- Puissance utile du tapis :

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

- 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

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

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

### 4.4.7 Schéma synoptique

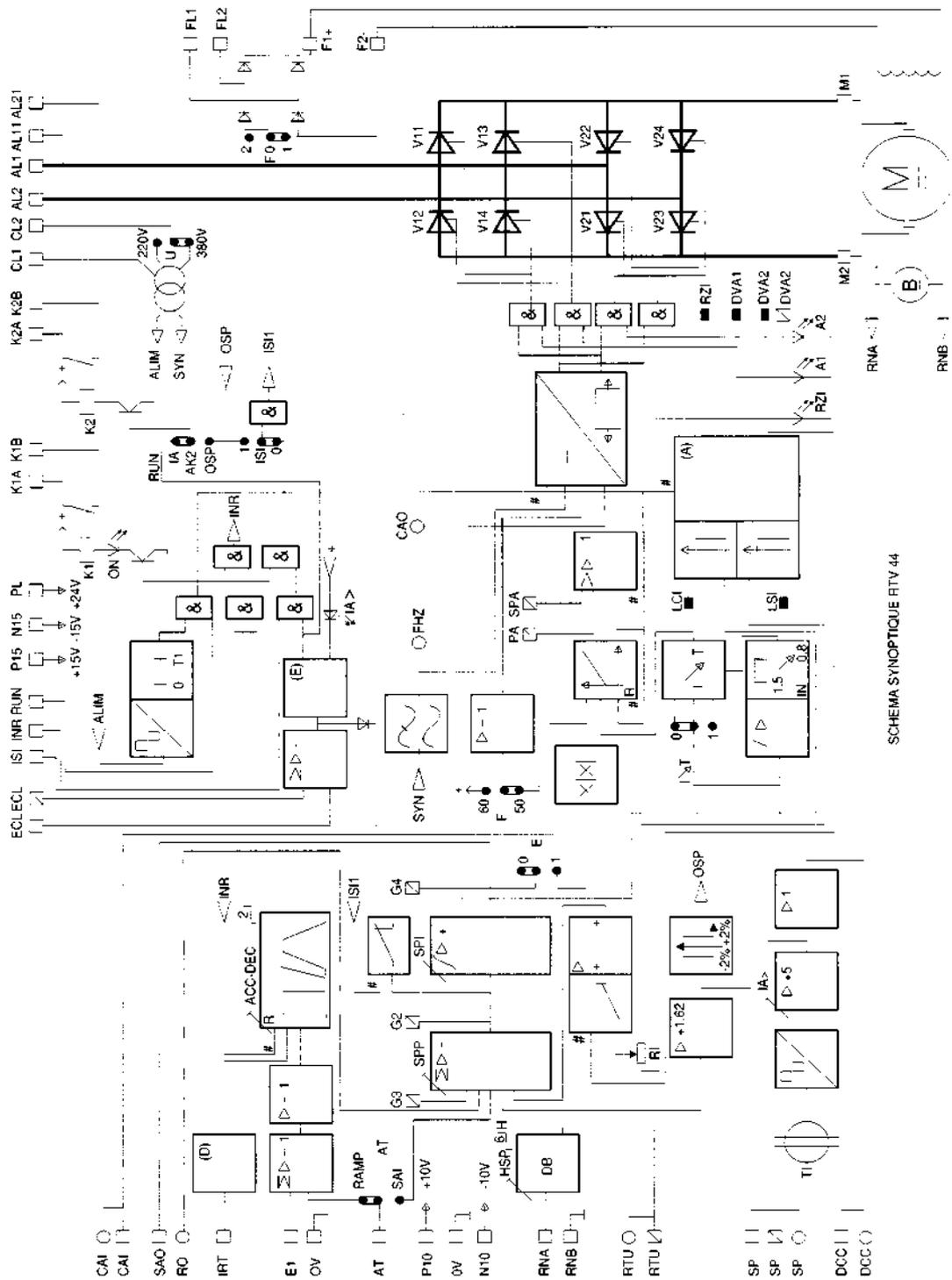


FIGURE 4-22 SCHÉMA SYNOPTIQUE

### 4.4.8 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 constructeur. 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	<ul style="list-style-type: none"> <li>• le réglage de la limitation la</li> <li>• la liaison 0V-RUN et 0V-INR ;</li> <li>• la référence 0-10V aux bornes 0V et E1</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• la tension réseau ;</li> <li>• les fusibles.</li> </ul>	-	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• la tension d'excitation F1+ et F2- ;</li> <li>• usure des balais ;</li> <li>• que le moteur n'est pas calé ;</li> </ul>
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	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• la position du cavalier F ;</li> <li>• le pont de puissance</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La position du cavalier H ;</li> <li>• le retour DT aux bornes RNA et RNB</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• la position du cavalier H en HO-HU ;</li> <li>• le retour de tension</li> </ul>	la tension d'excitation.
Instabilité	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le réglage des gains SPP et SPI ;</li> <li>• la position du cavalier H.</li> </ul>	-	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		<ul style="list-style-type: none"> <li>• les raccordements (court-circuit ou défaut de masse) ;</li> <li>• le pont de puissance.</li> </ul>	-	-	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 0-23) ;
- remplacez le ou les composants défectueux.

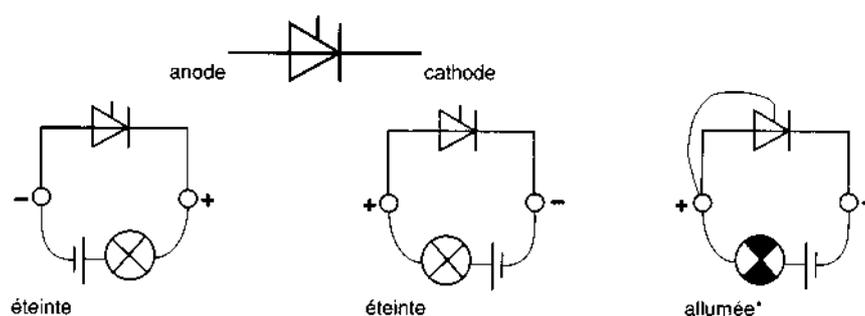


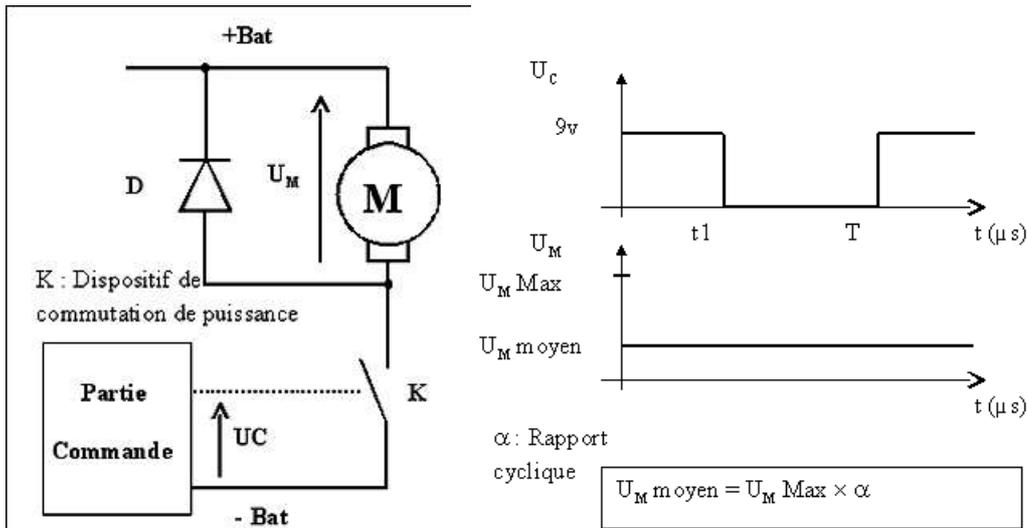
FIGURE 0-23 CIRCUIT DE TEST

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.

## 4.5 Variateurs de vitesse avec hacheur



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).

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 (Figure 4-24), tandis que les variateurs à thyristors sont utilisés avec les moteurs « shunt » ou à aimant permanent.

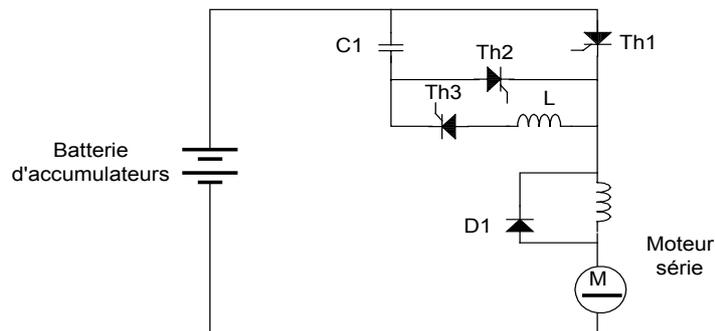


FIGURE 4-24 CIRCUIT D'UN HACHEUR DE COURANT

### 4.5.1 Commande moteur par hacheur à IGBT

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

- 1) Réglage du couple moteur  $C_m = K I_{\text{moy}} \Phi$ , 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).

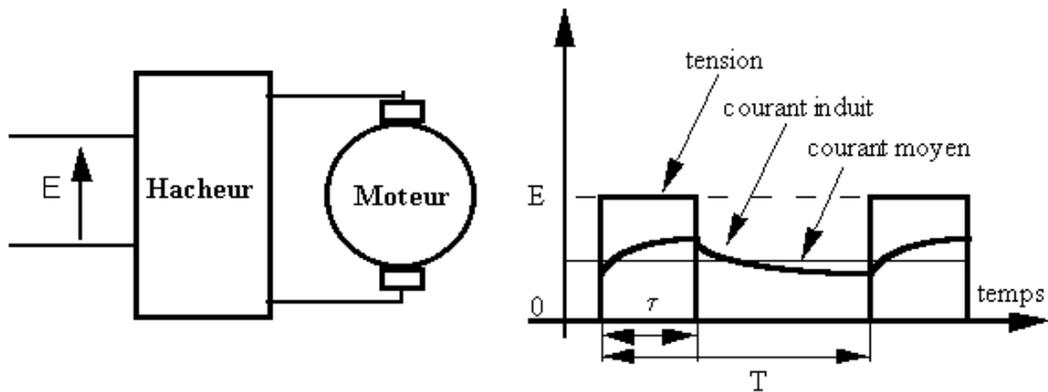


Figure 1

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 :

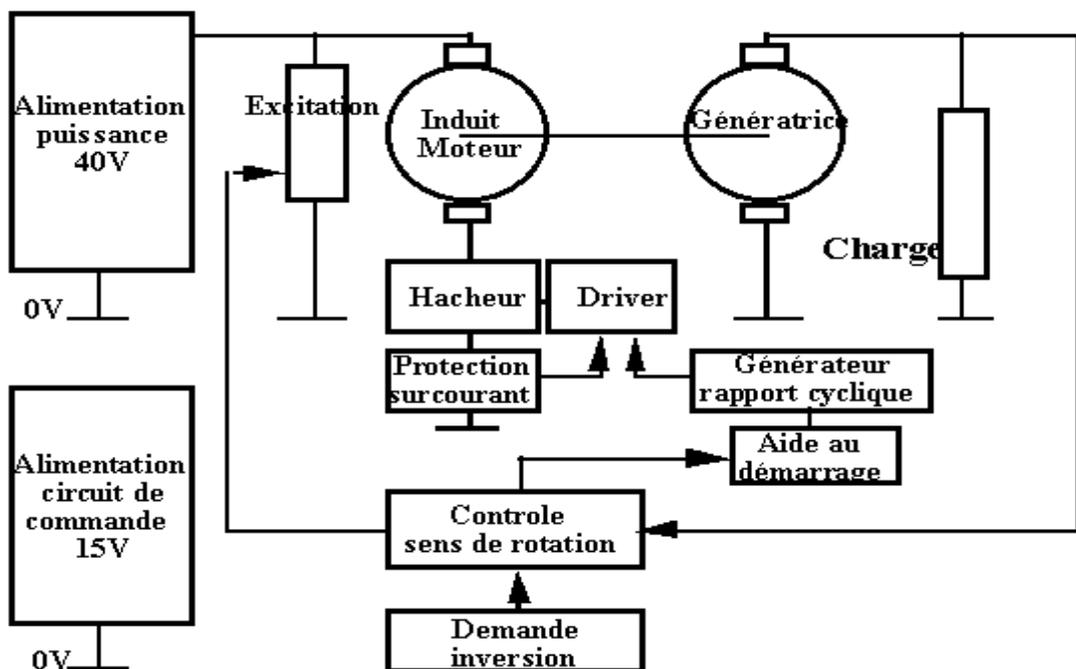


Figure 2

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 là d'un capteur "vrai" de vitesse).

## CHAPITRE 5

**Le convertisseur continu - alternatif (l'onduleur)**

Un onduleur est un convertisseur statique capable de transformer l'énergie d'une source de tension continue en une tension alternative. Il s'agit d'un dispositif électronique qui accomplit la fonction inverse du redresseur.

- **Les onduleurs autonomes** (ou oscillateurs) sont capables de générer leur propre fréquence et leur propre tension alternative. Dans ces onduleurs la commutation des thyristors est *forcée*.
- **Les onduleurs non autonomes** ont la particularité que la fréquence et la tension alternative sont imposées par le réseau qu'ils alimentent. Dans ces onduleurs la commutation est *naturelle* (dans le sens que ce sont les tensions alternatives du réseau qui effectuent le transfert du courant d'un thyristor à l'autre).

On traitera dans ce chapitre uniquement des onduleurs autonomes.

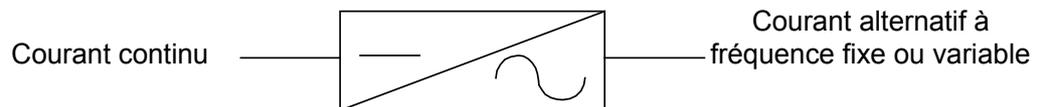


FIGURE 5.1 REDRESSEUR CONTINU-ALTERNATIF

**5.1 Classification des onduleurs autonomes**

Les onduleurs autonomes se classent en deux groupes :

- Onduleurs à fréquence fixe : ceux-ci sont utilisés comme alimentation de sécurité dans les centres hospitaliers, les centrales téléphoniques, les ordinateurs, etc. Ces onduleurs sont alimentés à partir d'une batterie d'accumulateurs.
- Onduleurs à fréquence variable : ceux-ci sont alimentés en courant continu à partir du réseau alternatif par l'intermédiaire d'un redresseur. Ils fournissent des tensions de fréquence et d'amplitude variables utilisées pour contrôler la vitesse de moteurs à courant alternatif.

Les onduleurs autonomes se classent aussi d'après la forme d'onde de leur tension de sortie

:

- **Onduleurs à onde rectangulaire** : L'onde de sortie est rectangulaire. L'amplitude de l'onde de sortie dépend de la valeur de la tension d'entrée.

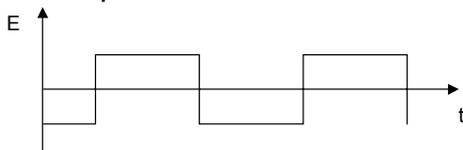


FIGURE 5.2 FORME D'ONDE RECTANGULAIRE

- **Onduleurs en créneaux de largeur variable** : L'onde de sortie est constituée par des créneaux rectangulaires alternatifs et séparés par une zone morte à tension nulle. La tension de sortie varie si on agit sur la durée des créneaux.

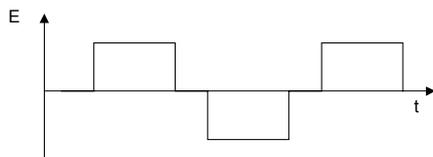


FIGURE 5.3 FORME D'ONDE EN CRENEAUX

- **Onduleurs à modulation d'impulsion (PWM)<sup>1</sup>** (Figure 5.4). L'onde de sortie est formée de trains d'impulsions positifs et négatifs, de largeur et d'espacement variable. La résultante de la forme de sortie se rapproche d'une sinusoïde

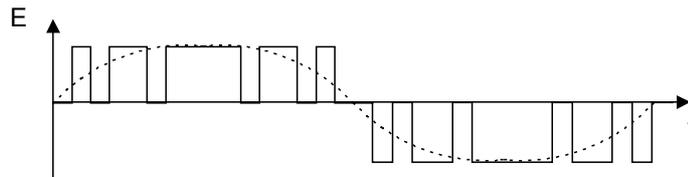


FIGURE 5.4 FORME D'ONDE À MODULATION DE LARGEUR D'IMPULSION

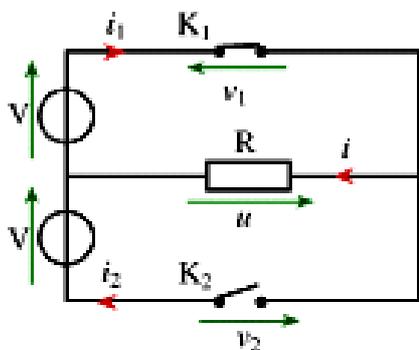
## 5.2 Principe de fonctionnement

### A. Débit sur charge résistive

#### a) Commande symétrique

Il s'agit d'actionner alternativement les interrupteurs K1 et K2 durant des intervalles de temps réguliers.

#### Montage



$$\begin{aligned} \text{Relations : } i &= i_1 - i_2 \\ V - v_1 - u &= 0 \\ V + u - v_2 &= 0 \end{aligned}$$

#### Analyse

- De 0 à T/2 : K1 est fermé  $\Rightarrow v_1 = 0$   
K2 est ouvert  $\Rightarrow i_2 = 0$

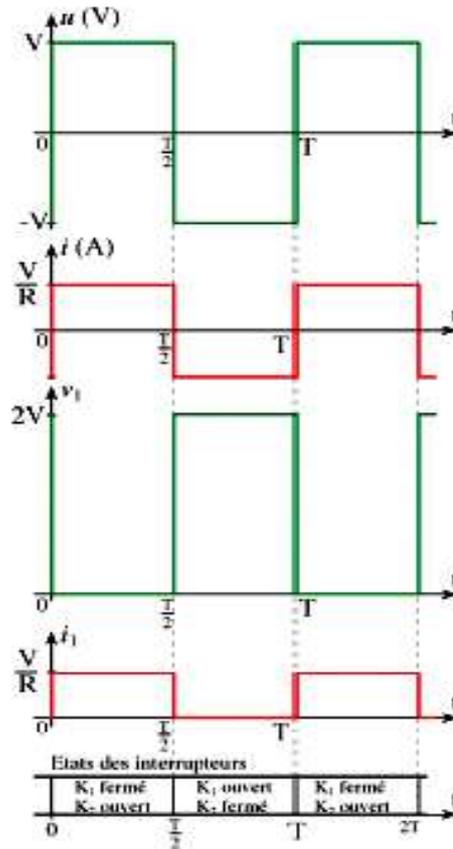
Donc :  $u = V$  et  $i = i_1 = V / R$  et  $v_2 = v + U = 2 V$

- De T/2 à T : K1 est ouvert  $\Rightarrow i_1 = 0$   
K2 est fermé  $\Rightarrow v_2 = 0$

Donc :  $u = -V$  et  $i = -i_2 = -V / R$  et  $v_1 = V - u = 2 V$

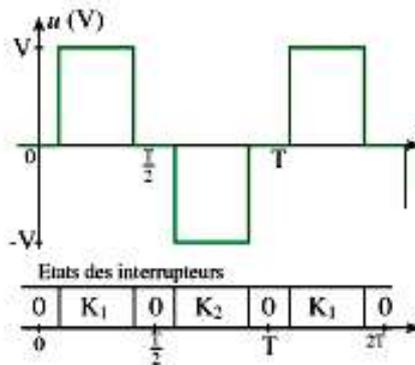
<sup>1</sup> PMM= Pulse Width Modulation; Width= largeur

## Chronogrammes

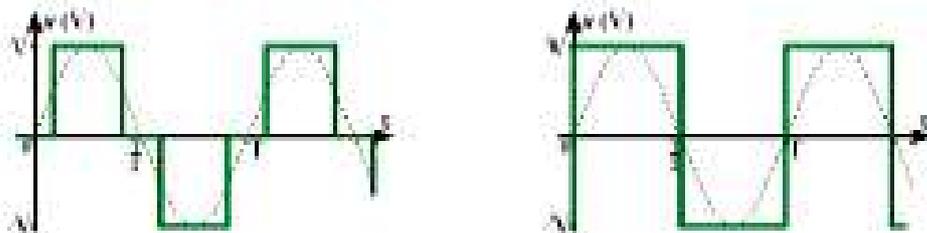


### b) Commande décalée

L'idéal serait d'obtenir une tension de sortie  $u$  de forme sinusoïdale. La commande décalée fournit un signal plus proche de la forme sinusoïdale que la commande précédente.



La forme d'onde obtenue avec une commande décalée est plus proche d'une forme sinusoïdale que les créneaux obtenus avec la commande symétrique.



### c) Interrupteurs électroniques

Il faut un interrupteur électronique pouvant être commandé à l'ouverture et la fermeture

- transistor
- thyristor avec un circuit d'extinction du courant

Ces composants ne laissent passer le courant que dans un sens.

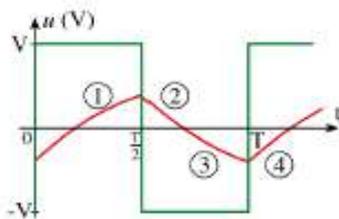
### B. Débit sur charge inductive

#### a) Analyse du problème

Très souvent la charge est inductive : moteur synchrone, bobinage de chauffage. Dans ce cas la forme du courant est différente de celle de la tension. En effet si la tension peut changer subitement de valeur, le courant du fait de l'inductance du circuit va varier progressivement.

**Rappel** : le courant à travers une inductance ne peut subir de discontinuité. Nous allons constater qu'il y a un échange d'énergie entre la source et la charge dans les deux sens. En effet, une partie de l'énergie fournie à la charge est stockée dans l'inductance puis restituée à la source : on dit qu'il y a récupération d'énergie.

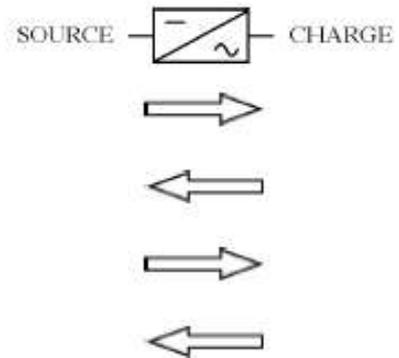
Chronogrammes :



Analyse :

- ①  $u > 0$   
 $i > 0$
- ②  $u < 0$   
 $i > 0$
- ③  $u < 0$   
 $i < 0$
- ④  $u > 0$   
 $i < 0$

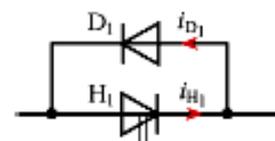
Sens du transfert d'énergie :



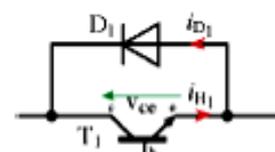
#### b) Conséquences

Un interrupteur électronique étant en général unidirectionnel, pour permettre au courant de circuler dans le sens opposé à celui permis par l'interrupteur, on place une diode de façon à réaliser un montage dit **antiparallèle**.

Montage antiparallèle :



Si H<sub>1</sub> est un transistor :

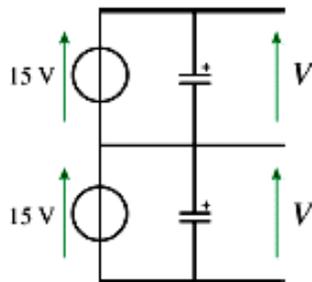




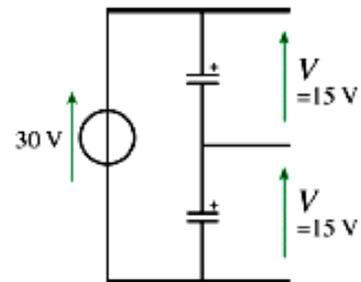
Symbole d'un interrupteur unidirectionnel pouvant être commandé à l'ouverture et la fermeture :

### c) Remarques

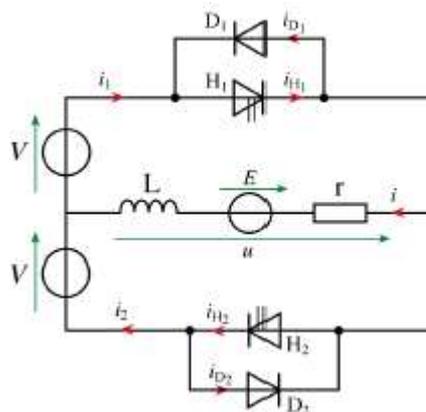
Il faut que la source d'énergie supporte le courant en sens inverse. Il faut donc utiliser des batteries ou des alimentations couplées en parallèle avec des condensateurs.



ou  
avec  
 $C = 4700 \mu\text{F} - 30\text{V}$



### d) Etude du montage



### Analyse partielle

De 0 à  $t_1$ ,  $i < 0$  et  $u > 0$

C'est la diode qui conduit.  $p = ui < 0$ , il y a récupération par la source d'une partie de l'énergie fournie à la charge durant la phase précédente.

$D_1$  est dite **diode de récupération**.

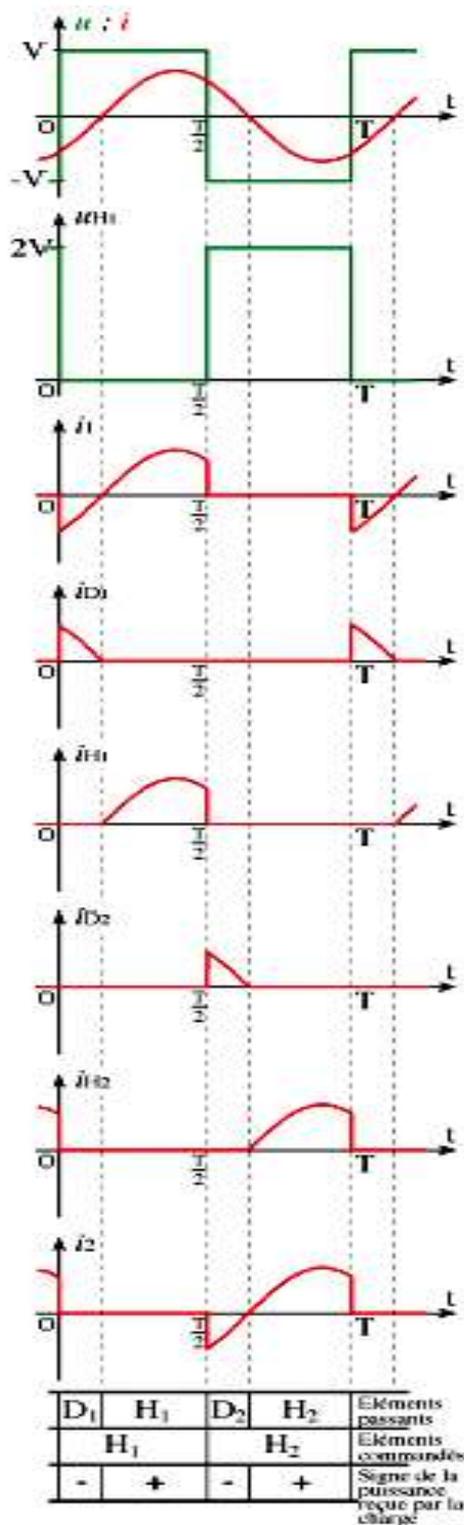
Durant ce temps l'interrupteur  $H_1$  est déjà commandé mais comme le courant est en sens inverse il reste bloqué.

### Remarques

L'intensité  $i$  du courant dans la charge est sinusoïdale tandis que la tension est en créneaux,  $i$  étant décalé en arrière par rapport à  $u$ .

Cette situation se rencontre si la charge est active comme par exemple un moteur asynchrone.

## Chronogrammes

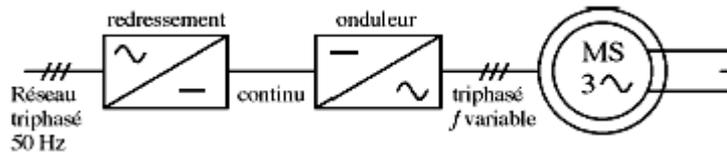


### C. Applications

#### a) Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone

La vitesse d'un moteur synchrone est fixée par la pulsation des courants statoriques. Pour changer de vitesse il faut donc changer la fréquence des tensions d'alimentation.

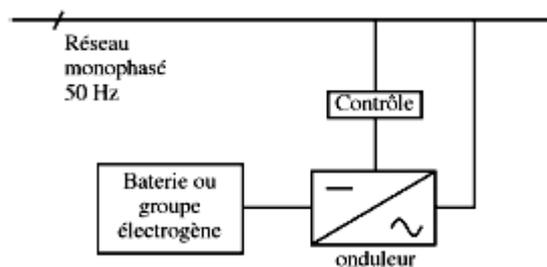
Il faut donc redresser la tension du réseau puis l'onduler à la fréquence désirée.



**Remarque :** pour que la puissance du moteur reste nominale lorsque la fréquence varie, il faut en fait conserver le rapport  $f/V$  constant (Si la fréquence augmente, il faut augmenter la tension d'alimentation proportionnellement).

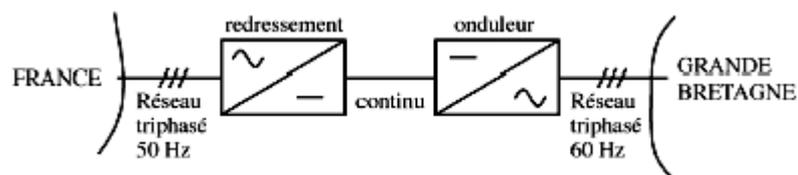
## b) Alimentation de secours

Lors d'une panne d'électricité, un onduleur assure la continuité de l'alimentation des machines à partir de batteries. En informatique professionnelle, un onduleur est indispensable pour éviter la perte d'informations en cas de panne de secteur.



## d) Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes

La France fournit de l'énergie électrique à la Grande-Bretagne, mais la fréquence du réseau anglais est 60 Hz. Il faut donc adapter la fréquence.



## 5.3 L'onduleur monophasé

### 5.2.1 L'onduleur monophasé à thyristors et transformateur

L'onduleur de la Figure 5.5 comprend deux thyristors, un transformateur à point milieu, un condensateur de commutation C et une inductance série L.

Les deux thyristors, Th1 et Th2, sont à l'état passant à tour de rôle, ce qui produit des impulsions de courant de sens inverse, I1 et I2, dans les deux moitiés du primaire du transformateur. On obtient, au secondaire du transformateur, une tension alternative de forme rectangulaire (Figure 5.6). Le condensateur de commutation C empêche les deux thyristors de laisser passer le courant en même temps, de sorte qu'il provoque le blocage d'un thyristor lorsque l'autre s'amorce.

L'inductance de lissage L tend à garder un courant constant dans le circuit. Il en résulte que les courants I1 et I2 sont égaux et de forme rectangulaire. Pour

faire varier la fréquence de l'onduleur, il suffit de changer la fréquence des signaux appliqués sur les gâchettes. On peut obtenir une fréquence comprise entre quelques hertz et 5 KHz, selon les caractéristiques du transformateur et des thyristors.

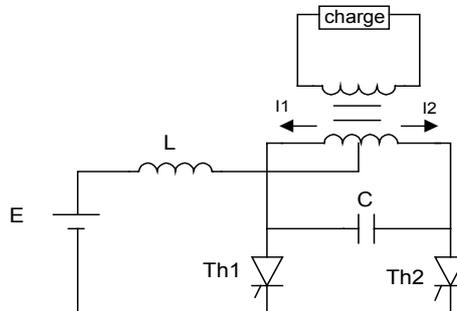


FIGURE 5.5 ONDULEUR AUTONOME MONOPHASÉ

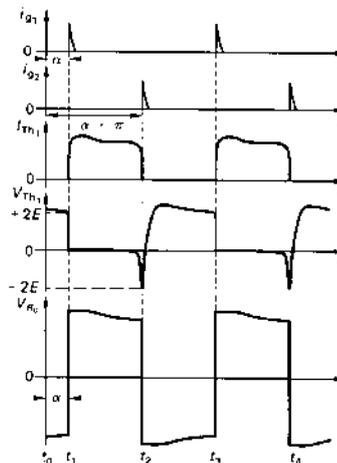


FIGURE 5.6 FORME D'ONDE D'UN ONDULEUR MONOPHASÉ

### 5.2.2 L'onduleur monophasé en pont

L'onduleur monophasé en pont de la Figure 5.7 comprend quatre thyristors ou quatre transistors utilisés comme interrupteurs électroniques ainsi que quatre diodes de récupération montées en parallèle inverse aux bornes des thyristors. Les circuits de blocage des thyristors ne sont pas représentés sur la figure..

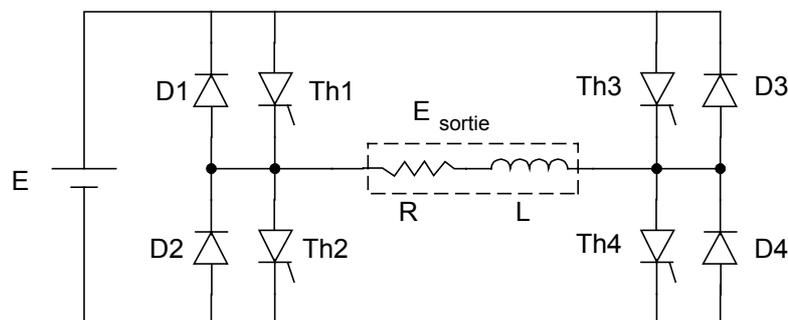


FIGURE 5.7 ONDULEUR MONOPHASÉ EN PONT

## Commande symétrique

Dans le cas d'une commande symétrique (Figure 5.8), l'amorçage des thyristors Th1 et Th4 a lieu en même temps, et il en est de même pour Th2 et Th3.

La tension de sortie est rectangulaire, et sa valeur efficace est égale à E.

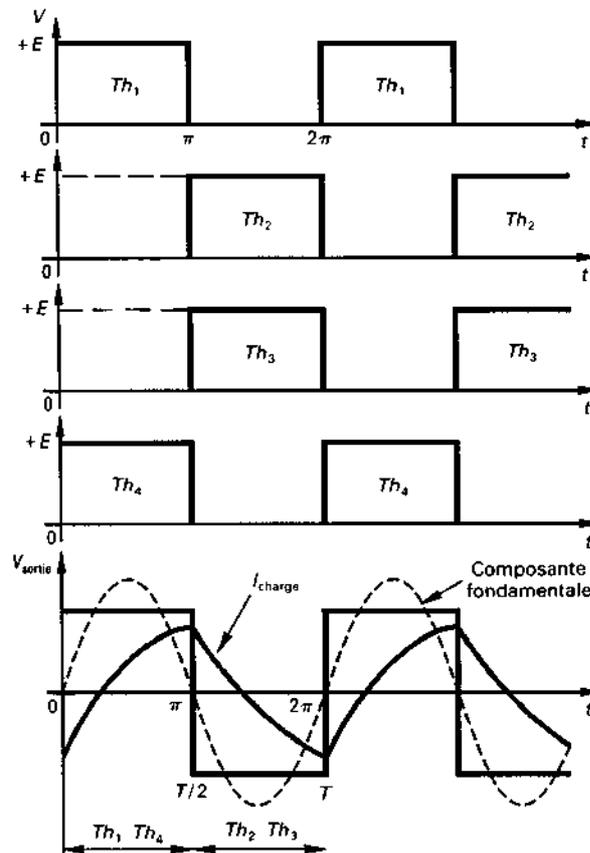


FIGURE 5.8 FORME D'ONDE POR UNE COMMANDE SYMÉTRIQUE

## Commande décalée

Dans le cas d'une commande décalée, les quatre thyristors sont amorcés et bloqués selon la séquence indiquée à la Figure 5.9.

La tension de sortie est égale à E lorsque Th1 et Th4 laissent passer le courant en même temps, et elle est égale à -E quand Th3 et Th2 sont à l'état passant en même temps. Il y a deux intervalles durant lesquels la tension de sortie est nulle.

La tension de sortie a la forme de créneaux séparés par des intervalles dont la largeur est ajustable. En variant l'angle de décalage, on fait varier la valeur efficace.

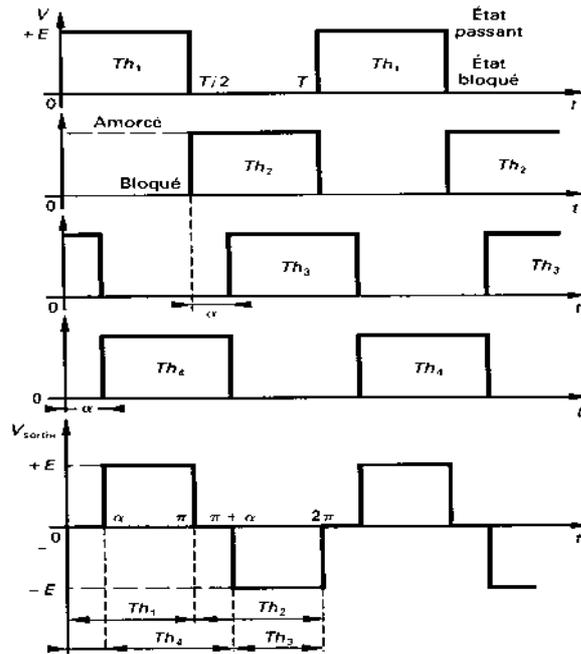


FIGURE 5.9 FORME D'ONDE POR UNE COMMANDE DÉCALÉE

## 5.4 Onduleurs triphasés autonomes

La Figure 5.10 représente le montage de principe (sans les circuits de commande des thyristors) d'un onduleur triphasé autonome qui peut alimenter des charges triphasées équilibrées qui sont groupées en étoile ou en triangle. Dans ce montage, trois thyristors sont en conduction à chaque instant. Deux thyristors d'un même bras Th1 et Th4 sont amorcés à 180° de décalage. Les thyristors des bras voisins sont amorcés à 120° de décalage des autres bras. La tension de sortie résultante est en forme de créneaux et déphasée de 120°.

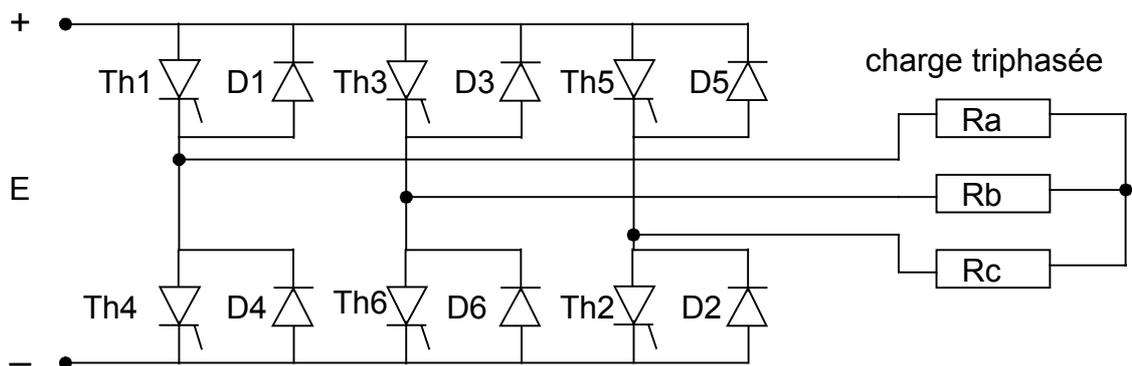


FIGURE 5.10 ONDULEUR AUTOMOME TRIPHASÉ AVEC THYRISTORS

Pour des puissances plus petites, on peut remplacer les six thyristors par des transistors (Figure 5.11) qui ne nécessitent pas de circuits d'extinction utilisés avec les thyristors.

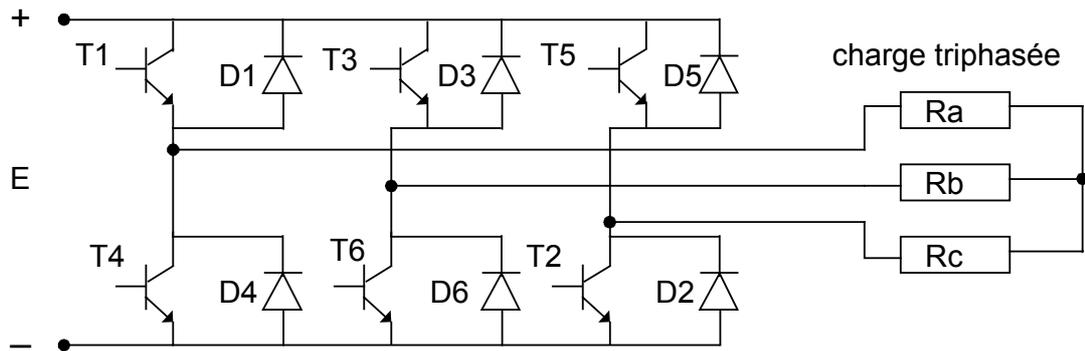


FIGURE 5.11 ONDULEUR AUTOMOTE TRIPHASÉ AVEC TRANSISTORS

## 5.5 Application des onduleurs autonomes

Les onduleurs autonomes à fréquence fixe sont surtout utilisés dans les alimentations de sécurité qui se substituent automatiquement au réseau alternatif en cas de panne de courant. Ces alimentations de secours sont appelées UPS (Uninterruptible Power Supplies). La Figure 5.12 donne le schéma de principe d'un UPS.

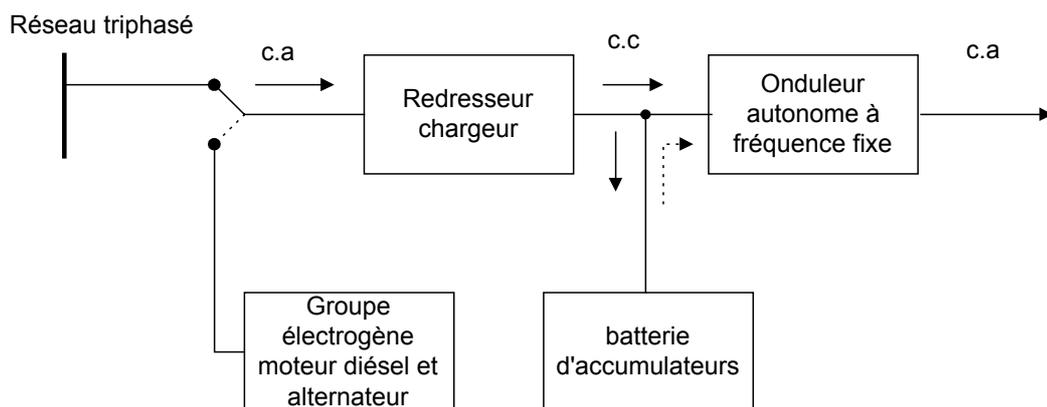


FIGURE 5.12 ALIMENTATION DE SECOURS (UPS)

Le système comprend :

- Un redresseur chargeur régulé qui charge la batterie d'accumulateurs, tout en fournissant le courant nécessaire à l'onduleur.
- Une batterie d'accumulateurs qui assure le fonctionnement autonome de l'onduleur lorsque le réseau alternatif est interrompu.
- Un onduleur autonome qui fournit une tension de sortie alternative sinusoïdale régulée à la fréquence de 50 Hz avec un taux d'harmoniques qui est inférieur à 5%.
- Des commutateurs électromécaniques qui permettent de relier le réseau ou l'onduleur à la charge.
- Un générateur diesel qui démarre après un court délai lors de la panne de courant et qui s'arrête lorsque le courant est rétabli.

Les alimentations de secours sont surtout utilisées pour alimenter des équipements qui requièrent un fonctionnement permanent. Les applications les plus courantes sont :

- l'alimentation d'ordinateurs ;
- les systèmes de guidage d'avion (radio, radar). ;
- le fonctionnement des blocs opératoires dans les hôpitaux ;
- l'éclairage de sécurité de salle de conférence ;
- les circuits d'alarme contre les incendies.

Les onduleurs à fréquence variable sont surtout utilisés dans :

- La commande de vitesse des moteurs alternatifs généralement asynchrones.
- l'alimentation d'ozoneurs, de générateurs à ultra son et de fours à induction.

## 5.6 L'onduleur à fréquence variable

La méthode la plus utilisée pour varier la vitesse d'un moteur triphase est sans aucun doute celle utilisée par l'onduleur autonome à fréquence variable.

Dans ce type de variateurs, différents montages sont utilisés, et chacun d'eux présente des avantages et des inconvénients selon le domaine d'application. On retrouve :

- l'onduleur autonome à source de tension ;
- l'onduleur à modulation de largeur d'impulsion (M LI) .
- 

### 5.6.1 L'onduleur autonome à source de tension

Ce variateur de vitesse est constitué d'un redresseur triphasé à thyristors complètement commandés, suivi d'un filtre de tension (inductance et condensateur) et d'un onduleur autonome à thyristors ou à transistors (Figure 5.13).

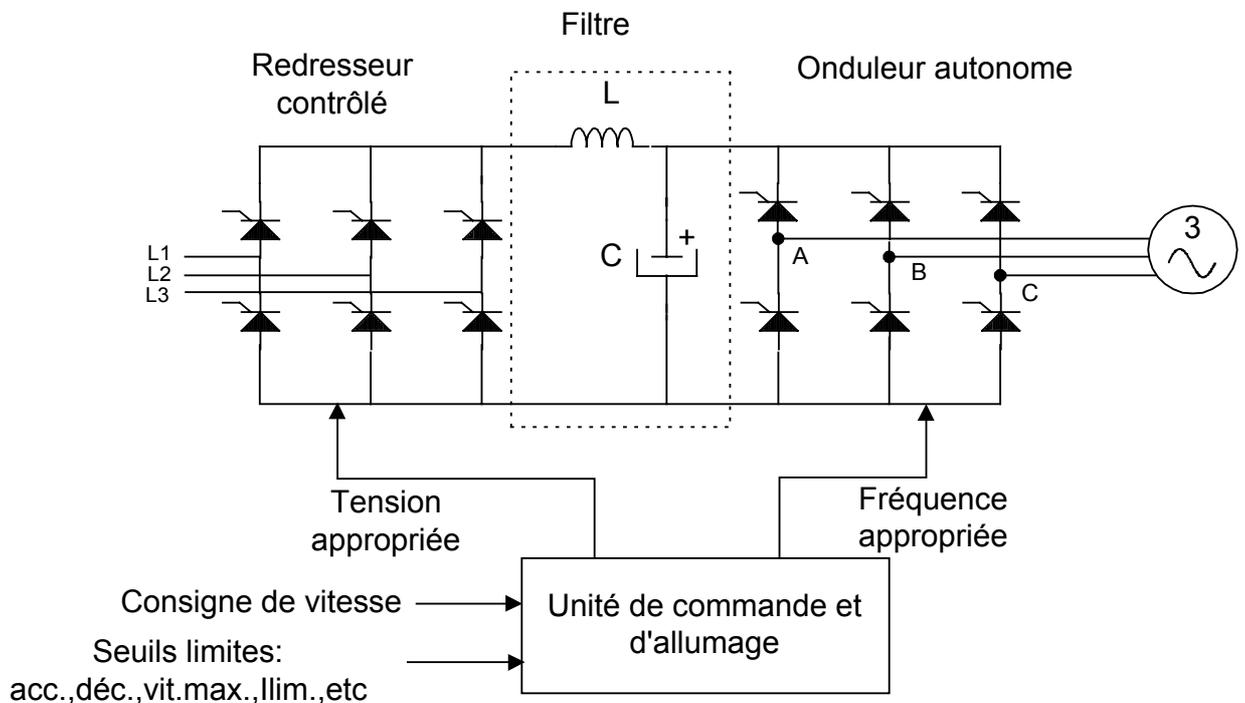


FIGURE 5.13 ONDULEUR À TENSION VARIABLE

Afin de maintenir un couple constant à la charge, le redresseur fournit à l'onduleur une tension qui est proportionnelle à la fréquence. Le rapport entre la tension et la fréquence est un paramètre qu'il est possible d'ajuster selon l'application..

La Figure 5.14 montre la courbe tension-fréquence pour un fonctionnement normal, la tension augmente de façon linéaire jusqu'à la fréquence nominale (50Hz) et reste constante au- dessus de 50Hz. De 0 à 50Hz, on a un fonctionnement en couple constant et lorsque la fréquence est supérieure à 50Hz, le couple diminue mais la puissance reste constante.

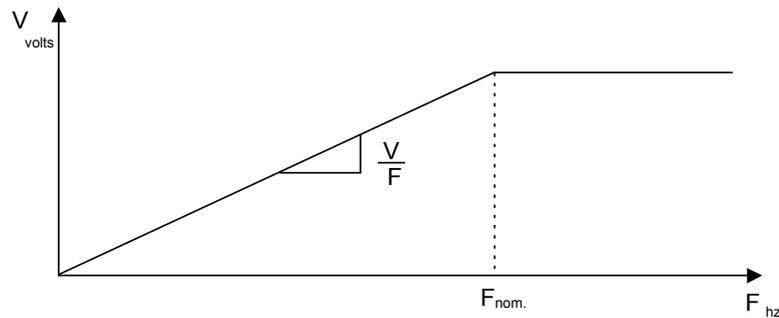


FIGURE 5.14 COURBE TENSION-FRÉQUENCE

La commutation de l'onduleur autonome produit aux bornes du moteur une tension alternative de forme rectangulaire. La durée de chaque alternance est de 120°, et l'amplitude augmente avec la fréquence. La Figure 5.15 représente la forme d'onde entre deux phases du moteur.

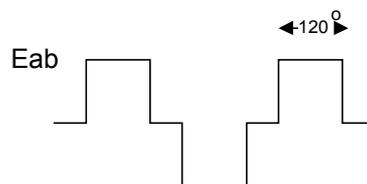


FIGURE 5.15 FORME D'ONDE DE SORTIE D'UN ONDULEUR À TENSION VARIABLE

L'action de l'onduleur peut être simulé par trois interrupteurs de la Figure 5.16. La séquence d'ouverture et de fermeture qui est réglée par l'unité de commande est donné au Tableau 5.1. La séquence de commutation se fait en 6 étapes (intervalle de 60°), après quoi le cycle recommence. Les tensions alternatives qui en résultent sont montrées à la Figure 5.17.

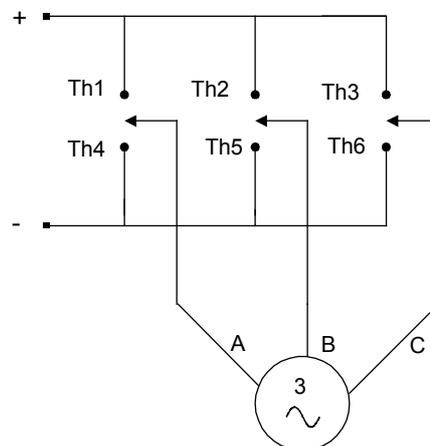


FIGURE 5.16 CIRCUIT ÉQUIVALENT DE L'ONDULEUR

TABLEAU 5.1 COMMUTATION DES THYRISTORS

Thyristors	t1	t2	t3	t4	t5	t6
Th1		x	x	x		
Th2				x	x	x
Th3	x	x				x
Th4	x				x	x
Th5	x	x	x			
Th6			x	x	x	

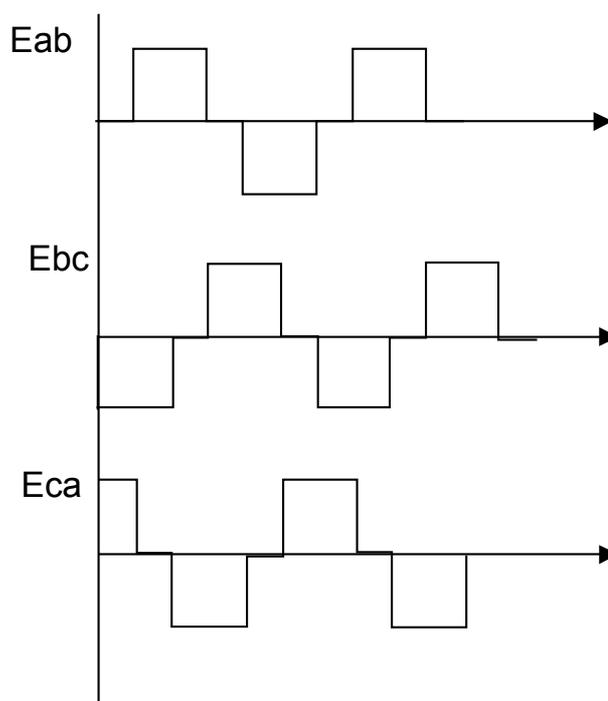


FIGURE 5.17 TENSION AUX BORNES DU MOTEUR

Ce système d'entraînement permet de faire varier simultanément la vitesse de plusieurs moteurs. Il peut alimenter des moteurs asynchrones et synchrones. Dans ce dernier cas, on peut faire varier la vitesse d'un groupe de moteurs avec grande précision.

En pratique, la vitesse est variable dans un rapport de 1 à 10. Les moteurs ont une capacité typique comprise entre 15 Kw et 230 Kw.

### 5.6.2 L'onduleur autonome à modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Les onduleurs à source de tension génèrent des tensions et des courants dont la composante harmonique est relativement élevée. Ces harmoniques produisent des couples pulsatifs. Quand le moteur tourne à une vitesse relativement élevée, ces pulsations sont amorties par l'inertie mécanique. Cependant, à basse vitesse, elles peuvent produire une vibration considérable.

Dans certaines applications, comme les machines outils, ces vibrations sont inacceptables si la haute précision est recommandée. Dans ce cas, un système d'entraînement utilisant un onduleur à modulation de largeur d'impulsion (MLI) est la solution.

Ce type de variateur est composé (Figure 5.18) d'un pont redresseur qui produit une tension constante, d'un filtre et d'un onduleur à thyristor ou à transistor. Grâce aux signaux émis par l'unité de commande d'allumage, l'onduleur génère une série d'impulsions de tension positives d'amplitude constante, suivies par une série d'impulsions semblables mais de signe contraire (Figure 5.19). La largeur de ces impulsions et les intervalles les séparant sont ajustés de sorte que la forme d'onde se rapproche d'une sinusoïde. À basse fréquence, les impulsions sont moins larges ce qui donne une tension efficace moins grande permettant de garder le rapport tension fréquence constant.

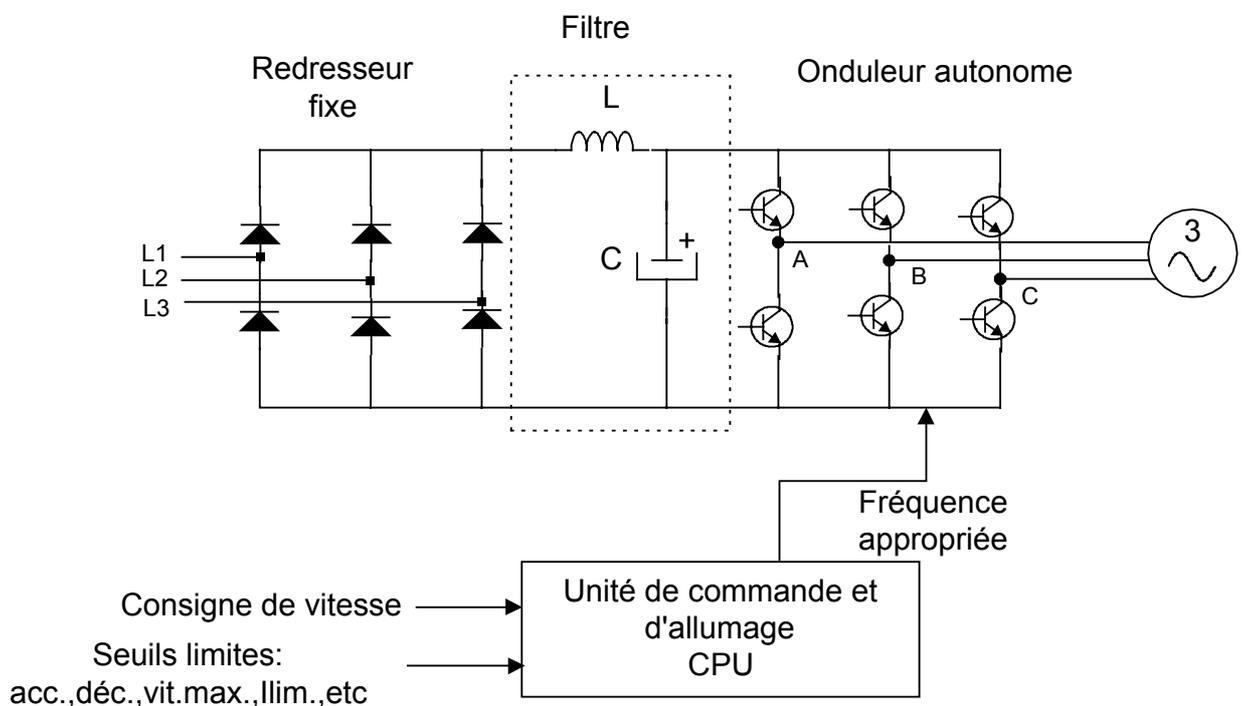


FIGURE 5.18 ONDULEUR MLI

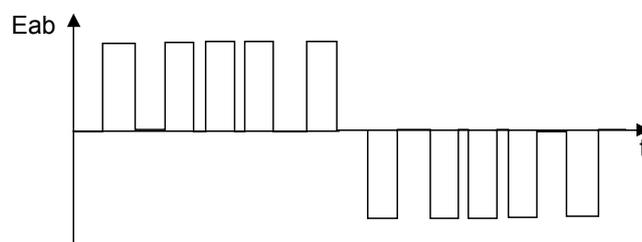


FIGURE 5.19 FORME D'ONDE DE SORTIE D'UN ONDULEUR MLI

La commande de l'onduleur MLI est effectuée **par ordinateur**.

Le logiciel tient compte de l'amplitude et de la fréquence désirées, et ajuste la largeur et le nombre d'impulsions en conséquence, de façon à optimiser la performance du moteur.

La fréquence de découpage ou porteuse peut être supérieure à 10 KHz dans certain variateur. On utilise ce type d'entraînement pour commander les moteurs d'induction dont la puissance est comprise entre 500w et 500Kw. Le rapport des vitesses peut être aussi élevé que 100 à 1.

Les variateurs à MLI de basse puissance utilisent des transistors IGBT « Insulated Gate Bipolar Transistor ». Leur circuit équivalent correspond à un transistor bipolaire combiné à un transistor MOS (Figure 5.20). Ce transistor permet une réponse en fréquence jusqu'à 20Khz. et peut supporter des courants pouvant atteindre 600A. Il existe des ponts onduleurs à six transistors de puissance IGBT. Ces ponts sont appelés IPM « Intelligent Power Module » (Figure 5.21).

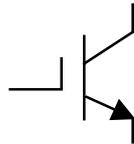


FIGURE 5.20 SYMBOLE D'UN TRANSISTOR IGBT

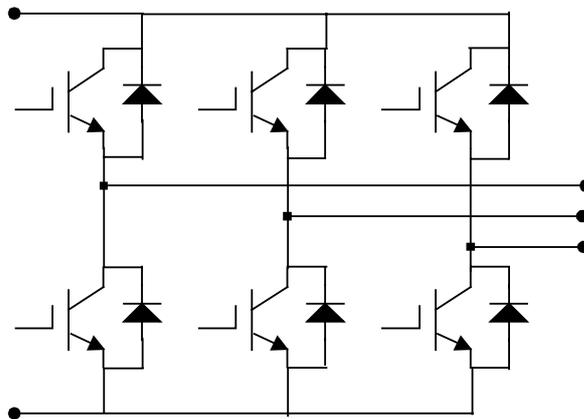


FIGURE 5.21 MODULE IPM

**Remarque :** Il est important de souligner qu'un *onduleur autonome* peut fournir une puissance active et une puissance réactive à la charge. Par contre, un *onduleur non autonome* absorbe toujours de la puissance réactive du réseau auquel il est connecté.

## 5.7 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

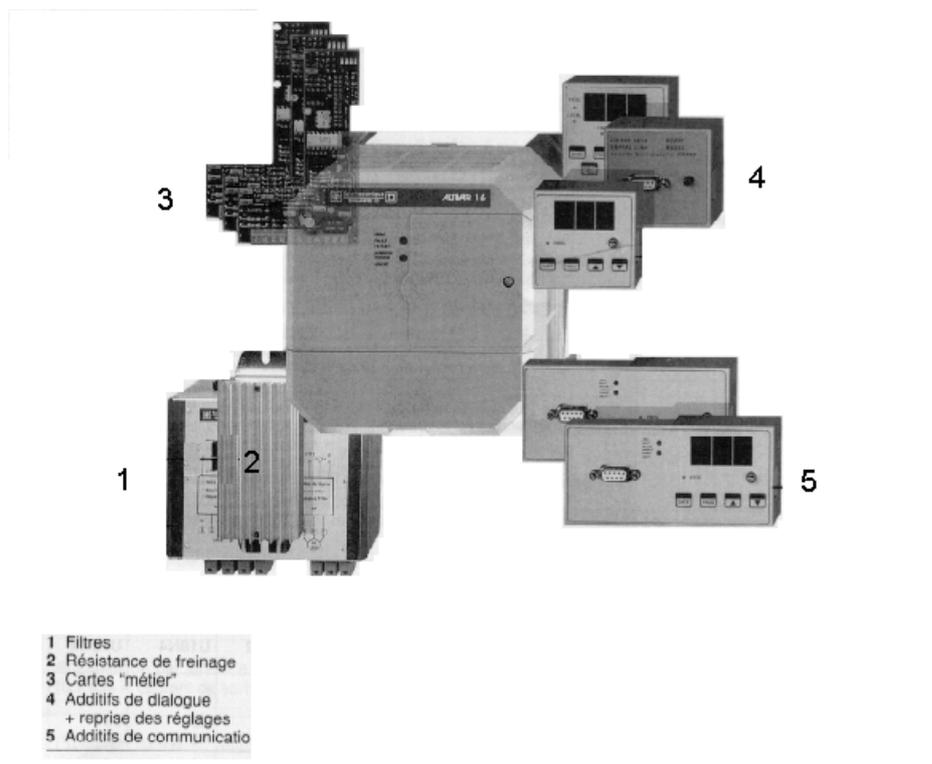


FIGURE 5.22 VARIATEUR DE VITESSE ALTIVAR 16

Les paramètres de réglage standard sont :

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

### 5.7.1 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		Puissance kVA	Référence	Masse kg
	Courant mono- phasé A	tri- phasé A	kW	HP	Courant de sortie permanent A	Courant transitoire maximal (2) 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

**5.7.2 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 $\Omega$  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

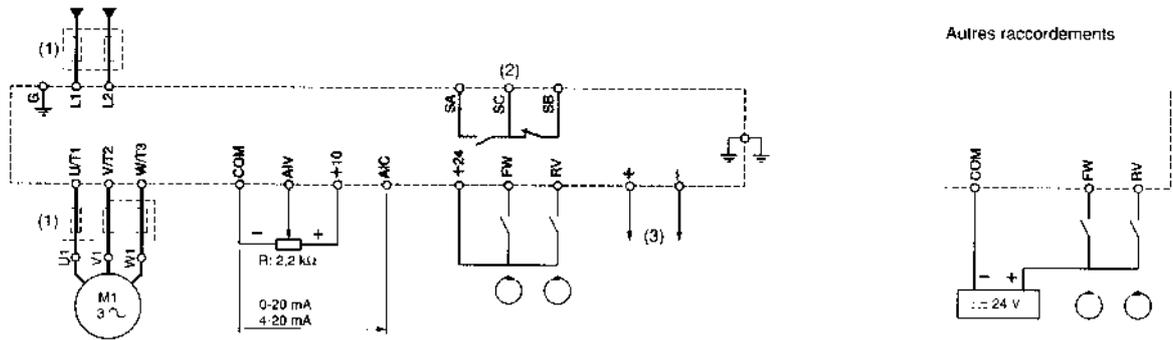


FIGURE 5.24 RACCORDEMENT DU VARIATEUR

### 5.7.3 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

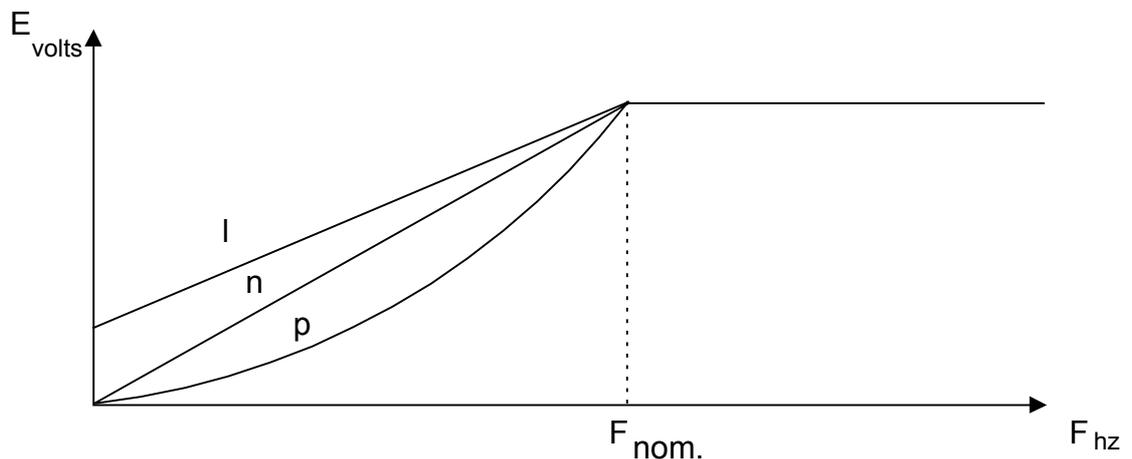


FIGURE 5.25 COURBE TENSION-FRÉQUENCE

### 5.6.4 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	<ul style="list-style-type: none"> <li>absence de tension ;</li> <li>tension trop faible.</li> </ul>	Vérifier : <ul style="list-style-type: none"> <li>la tension ;</li> <li>les fusibles ou le disjoncteur ;</li> <li>la séquence d'alimentation ;</li> <li>le raccordement des bornes L1, L2, (L3) .</li> </ul>
PhF	<ul style="list-style-type: none"> <li>absence phase réseau ;</li> <li>variateur non alimenté ;</li> <li>fusion fusible puissance ;</li> <li>coupure réseau (<math>t &gt; 200\text{ms}</math>)</li> </ul>	Vérifier : <ul style="list-style-type: none"> <li>la tension ;</li> <li>les fusibles ou le disjoncteur ;</li> <li>la séquence d'alimentation ;</li> <li>le raccordement des bornes L1, L2, (L3) ;</li> <li>le pont redresseur.</li> </ul>
USF	<ul style="list-style-type: none"> <li>réseau trop faible ;</li> <li>baisse de tension passagère.</li> </ul>	Vérifier : <ul style="list-style-type: none"> <li>la tension d'alimentation ;</li> <li>le raccordement.</li> </ul>
OSF	<ul style="list-style-type: none"> <li>réseau trop fort.</li> </ul>	Vérifier : <ul style="list-style-type: none"> <li>la tension d'alimentation ;</li> <li>la configuration FrS (50 ou 60 Hz).</li> </ul>
OLF	Surcharge : déclenchement thermique par surcharge prolongée du moteur.	Vérifier le réglage lH 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	Surintensité due à un freinage trop brutal ou à une charge entraînant (couple pulsatoire) même avec une option freinage.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Augmenter le temps de décélération.</li> <li>Optimiser le gain Ufr .</li> <li>Adjoindre la résistance de freinage ou l'option frein si nécessaire.</li> </ul>
drF	Surintensité : <ul style="list-style-type: none"> <li>court-circuit ou mise à la terre en sortie du variateur ;</li> <li>surchauffe du module IPM ;</li> <li>sous- alimentation de la commande du module IPM ;</li> <li>régime transitoire excessif ;</li> <li>court-circuit interne.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mettre hors tension, vérifier les câbles de liaison et l'isolement du moteur, variateur débranché .</li> <li>Augmenter le temps d'accélération ou de décélération .</li> <li>Vérifier l'état de charge et la température ambiante produite .</li> <li>Réarmer.</li> </ul>
CrF	Défaut de commande de fermeture du relais de charge des condensateurs.	Défaut freinage.
InF	Reconnaissance calibre. <ul style="list-style-type: none"> <li>défaut de «connectique» interne.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vérifier la connectique interne après coupure de l'alimentation et décharge des condensateurs (1mn voyant vert éteint) .</li> <li>Remettre le variateur sous tension.</li> </ul>
EEF	Erreur de mémorisation du EEPROM.	
SLF	Communication rompue avec le variateur.	Vérifier la connexion de l'additif visualisation.

## 5.8 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.

### 5.8.1 Station de pompage avec réducteur de pression, sans variateur

Afin de conserver une pression du réseau ( $P_r$ ) constante ( Figure 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**.

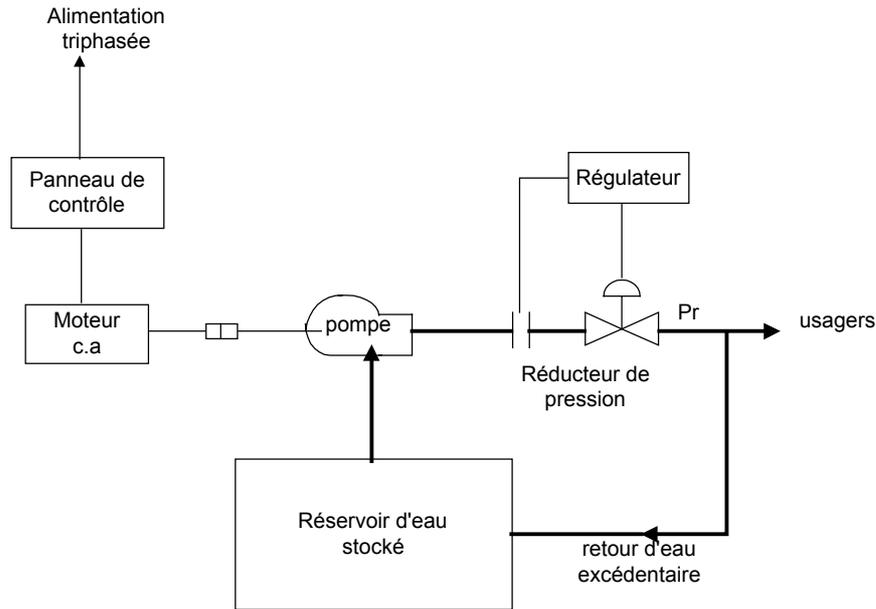


FIGURE 5.26 STATION DE POMPAGE SANS VARIATEUR

### 5.8.2 Station de pompage avec 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**.

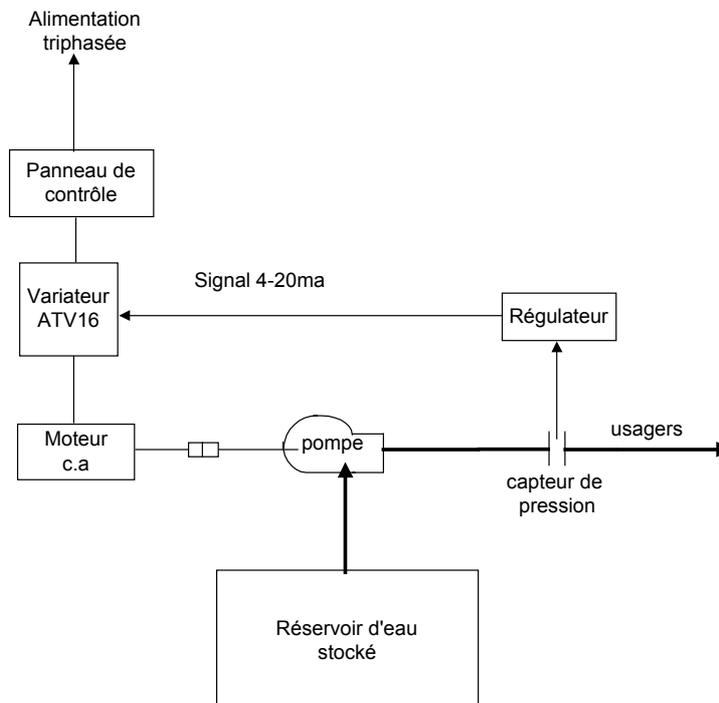


FIGURE 5.27 STATION DE POMPAGE AVEC VARIATEUR

## CHAPITRE 6

### Le convertisseur alternatif- alternatif

Ce dispositif ( Figure 6.1) permet de convertir une tension alternative à fréquence fixe en une tension alternative à tension variable (gradateur) ou à fréquence variable (cycloconvertisseur).

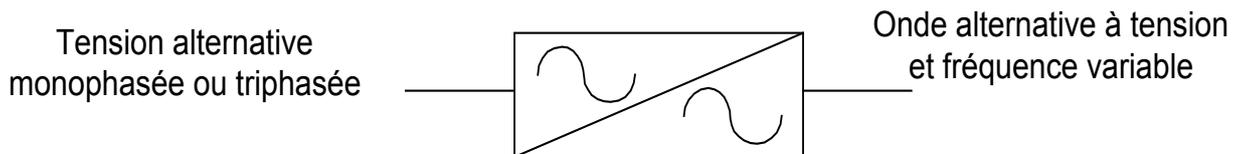


FIGURE 6.1 CONVERTISSEUR ALTERNATIF-ALTERNATIF

#### 6.1 Le gradateur

Un **gradateur** est un dispositif de l'électronique de puissance destiné à modifier un signal électrique dans le but de faire varier sa tension efficace de sortie et de modifier ainsi la puissance dans la charge. Ce dispositif est utilisé sur des tensions alternatives (souvent sinusoïdales) : c'est un convertisseur direct alternatif-alternatif.

Le gradateur utilise un triac pour faire varier la tension efficace en sortie du montage.

Pour les équipements de forte puissance les gradateurs peuvent être réalisés par des groupes de thyristors montés en anti-parallèle, ou bien éventuellement, par des associations thyristors-diodes dans le cas de raccordement à des réseaux polyphasés.

Les gradateurs sont utilisés pour réaliser des variateurs pour certains appareils fonctionnant sur le réseau (lampes halogènes, aspirateurs domestiques, outillage électroportatif, ...), pour la régulation de chauffage électrique, ainsi que dans de nombreux processus industriels ( float glass pour la fabrication du verre, réchauffage de fluides en pétrochimie, fours à diffuser, bancs d'essais de cyclage thermique, etc.).

##### 6.1.1 Le gradateur monophasé

En utilisant deux thyristors montés en parallèle inverse, nous pouvons contrôler la puissance dans une charge résistive de zéro à sa pleine puissance (Figure 6.2). Pour obtenir des angles d'amorçage égaux, il faut appliquer à chaque thyristor des signaux de gachette isolés et déphasés de 180°. Le signal de commande peut varier de 0° à 180°.

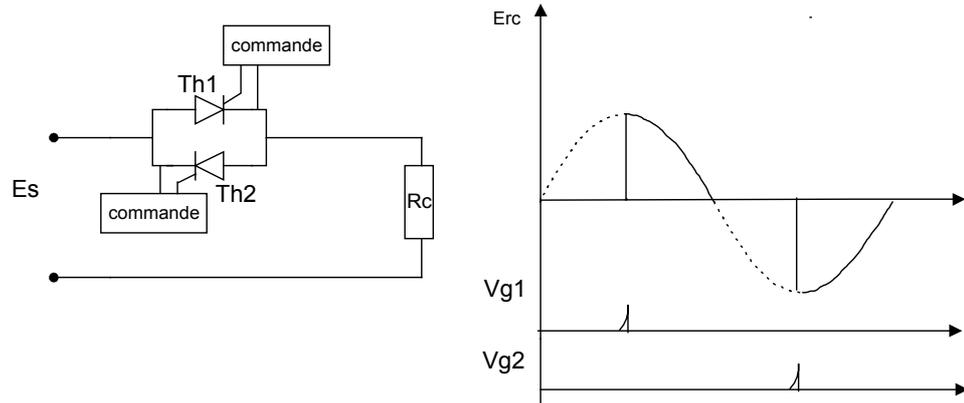


FIGURE 6.2 GRADATEUR MONOPHASÉ

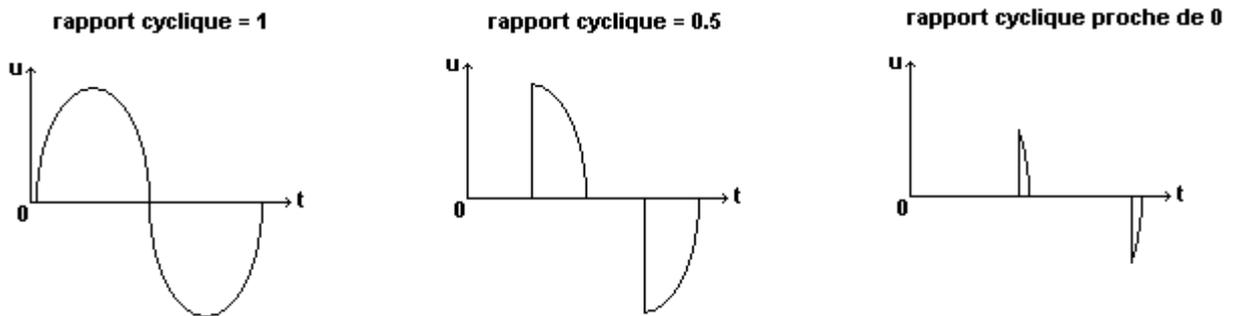
La valeur efficace de la tension aux bornes d'une charge résistive est donnée par l'équation 6.1.

$$E_{\text{eff}} = \left( \frac{E_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \right) \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}} \quad (6.1)$$

$\alpha$  : angle d'amorçage compris entre  $0^\circ$  et  $180^\circ$

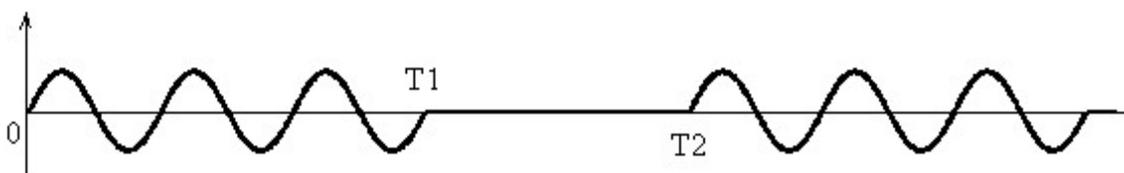
### Commande par angle de phase

L'interrupteur autorise le passage du courant durant un temps plus ou moins long de la demi-période. Ce temps est défini par le rapport cyclique qui est le rapport du temps de fermeture divisé par la demi-période, il est donc compris entre 0 et 1. Quand il est égal à 0 la tension de sortie est quasiment nulle et quand il est égal à 1 la tension de sortie est la même que celle de l'entrée (du réseau). Le signal de commande, appelé angle de retard à l'ouverture, doit être synchrone avec la tension aux bornes de l'interrupteur



### Commande par train d'onde

L'interrupteur autorise le passage du courant pendant une durée  $T_1$  correspondant à un nombre **entier** de demi-périodes du secteur. Puis il coupe pendant le reste de la période  $T_2$  de fonctionnement. On règle le transfert d'énergie en faisant varier le rapport  $T_1/T_2$ . Ce procédé est réservé aux machines à fortes inerties telles que les fours, le chauffage (dans ce cas inertie thermique).



**Exemple 6.1**

Un gradateur monophasé est alimenté par une source de 220 volts à 50hz. Calculez la tension efficace et la puissance débitée dans une charge de  $10\Omega$ , pour un angle de  $90^\circ$ .

**Solution**

$$E_{\text{eff}} = \left( \frac{E_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \right) \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$$

$$E_{\text{eff}} = 220V \sqrt{1 - \frac{90}{180} + \frac{\sin 2 \times 90}{360}} = 220V \times 0,5 = 110V$$

$$P = \frac{E^2}{R} = \frac{110V^2}{10} = 1210W$$

**6.1.2 Le gradateur triphasé**

Le gradateur triphasé est constitué de trois groupes de deux thyristors montés en parallèle-inverse (Figure 6.3). Ces groupes de thyristors peuvent alimenter des charges branchées en étoile ou en triangle. Pour permettre au courant de circuler dans les charges, deux thyristors doivent être simultanément à l'état passant soit : Th1 avec Th5 ou Th3 avec Th2. Afin d'avoir un bon fonctionnement, chaque thyristor doit recevoir une deuxième impulsion déphasée de  $60^\circ$  après la première impulsion. Les formes d'ondes pour un signal d'amorçage de  $100^\circ$  sont illustrées à la Figure 6.4.

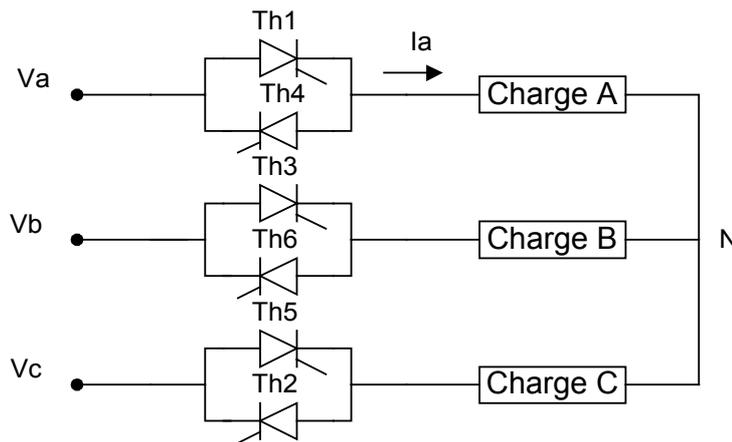


FIGURE 6.3

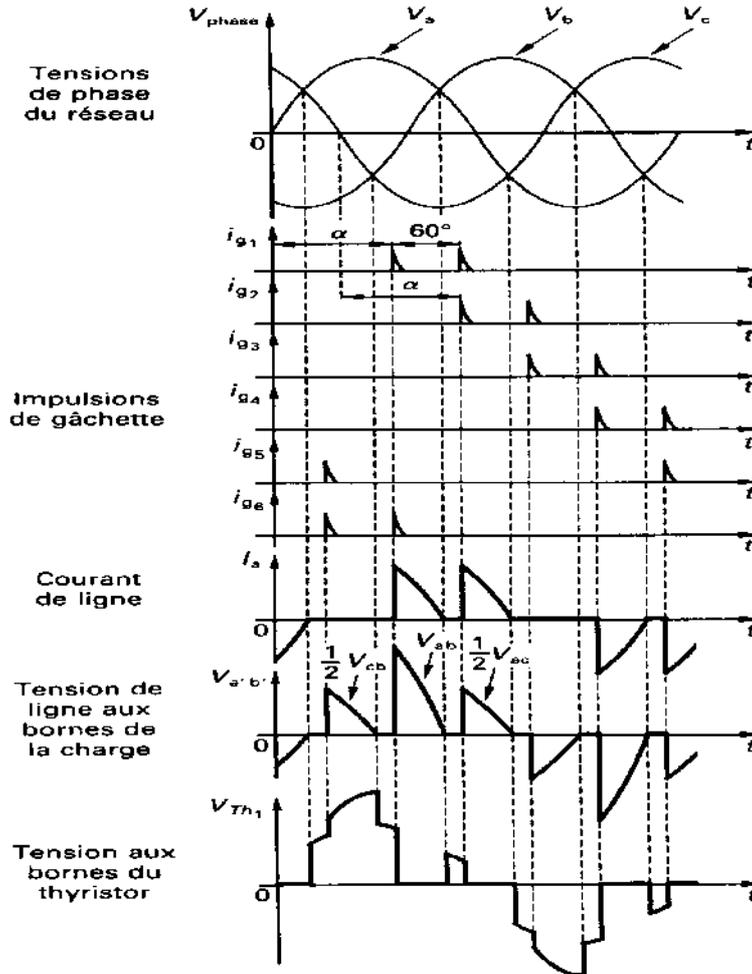


FIGURE 6.4 FORME D'ONDE POUR UN GRADATEUR TRIPHASÉ

### 6.1.3 Application des gradateurs

On retrouve des gradateurs pour les systèmes à vitesse variable dans des installations telles que les engins de levage où le rendement n'est pas une contrainte, étant donné la fréquence et la durée de leur utilisation.

Notons que le démarrage se fait facilement à tension croissante et n'entraîne donc pas de surintensité dans le moteur. Cette propriété des gradateurs est aussi utilisée dans des systèmes de démarrage et de freinage de moteurs de grande puissance (> 30kw). On le retrouve dans l'industrie sous le nom de démarreur ralentisseur ou <softstart> tel que l'Altistart de la compagnie Télémécanique .

On utilise aussi les gradateurs pour l'alimentation des moteurs monophasés universels qu'on utilise dans plusieurs appareils ménagers ou de bricolage à vitesse variable.

## 6.2 Le cycloconvertisseur

Le cycloconvertisseur est un système de conversion statique qui, à partir d'un réseau alternatif d'une fréquence donnée, fournit à une charge du courant

alternatif à une fréquence plus basse et variable. On retrouve des cycloconvertisseurs monophasés et triphasés.

En effet le cycloconvertisseur est une forme de convertisseur matriciel (c'est-à-dire que pour  $N$  phases à l'entrée et  $P$  phases à la sortie, il faut  $N \times P$  interrupteurs bidirectionnels). Ces interrupteurs bidirectionnels sont une association de deux thyristors (en anti-parallèle), ou un triac, dont la commutation au blocage se fait de manière naturelle avec le passage par zéro du courant qui les traverse.

On peut aussi réaliser ce schéma avec des interrupteurs bidirectionnels bicommandables (à base de transistor ou de thyristor GTO), mais le terme *cycloconvertisseur* est réservé à ceux utilisant des thyristors.

Généralement, l'amplitude et la fréquence de la tension d'entrée sont fixes, tandis que celles de la tension de sortie sont variables (mais ce n'est pas obligatoire).

Contrairement aux convertisseurs indirects (redresseurs-onduleurs), un cycloconvertisseur à thyristors ne peut fabriquer qu'une fréquence inférieure à celle de l'entrée.

Ce montage n'est plus que rarement utilisé, en particulier à cause de la mauvaise qualité des formes d'ondes obtenues, sauf pour les très fortes puissances (quelques dizaines de mégawatts et au-delà), où son faible coût fait oublier ses inconvénients.

Le principe de fonctionnement est expliqué à partir du montage de la Figure 6.5. Le cycloconvertisseur est constitué par six thyristors montés en parallèle inverse et alimentés par un transformateur à prise médiane. Les thyristors Th1 et Th3 forment le groupe convertisseur positif alors que Th2 et Th4 constituent le groupe négatif.

Les thyristors Th1 et Th3 sont amorcés à chaque alternance, pour un total de sept impulsions (Figure 6.6). Par la suite, les thyristors Th2 et Th4 du groupe négatif sont amorcés le même nombre de fois et avec le même retard. La tension de sortie est ainsi formée de la juxtaposition de fractions de sinusoïdes successives qui proviennent de la tension d'entrée. La fréquence de la tension à la charge est égale à  $1/7$  de la fréquence d'entrée. Le même principe de fonctionnement s'applique pour les cycloconvertisseurs triphasés.

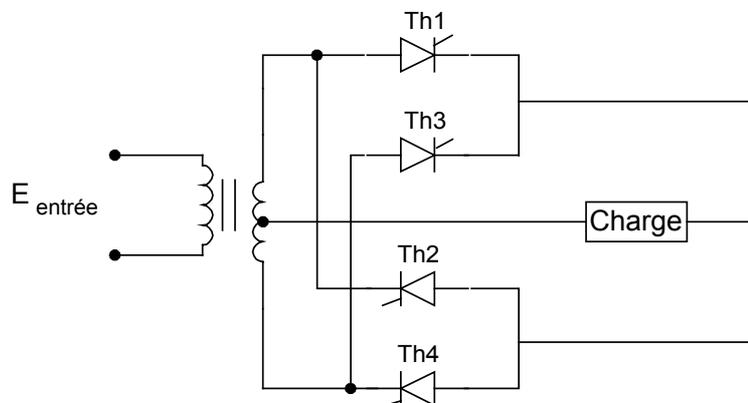


FIGURE 6.5 CYCLOCONVERTISSEUR MONOPHASÉ