

# **CHAPITRE I : LES REDRESSEURS, PRINCIPE ET APPLICATION**

## I- Introduction :

Ce premier chapitre sera consacré en totalité au circuit de redressement. Dans ce chapitre nous allons parler en premier lieu des composants utilisés habituellement dans les circuits de redressements, comme les diodes et les thyristors. Dans ce contexte nous donnerons leurs caractéristiques statiques et ainsi leurs principes de conversion AC-DC. Puis nous parlerons en détail des circuits à diodes et à thyristors généralement utilisés pour effectuer cette opération.

## II- Système de contrôle de puissance électrique :[1][4]

Pour bien comprendre la fonctionnalité des circuits de puissance, le schéma synoptique global ci-dessous montre les liens entre les différents étages qui participent dans la conversion d'énergie électrique. On va présenter maintenant et brièvement le rôle de chaque circuit dont il traite un domaine de recherche particulier.

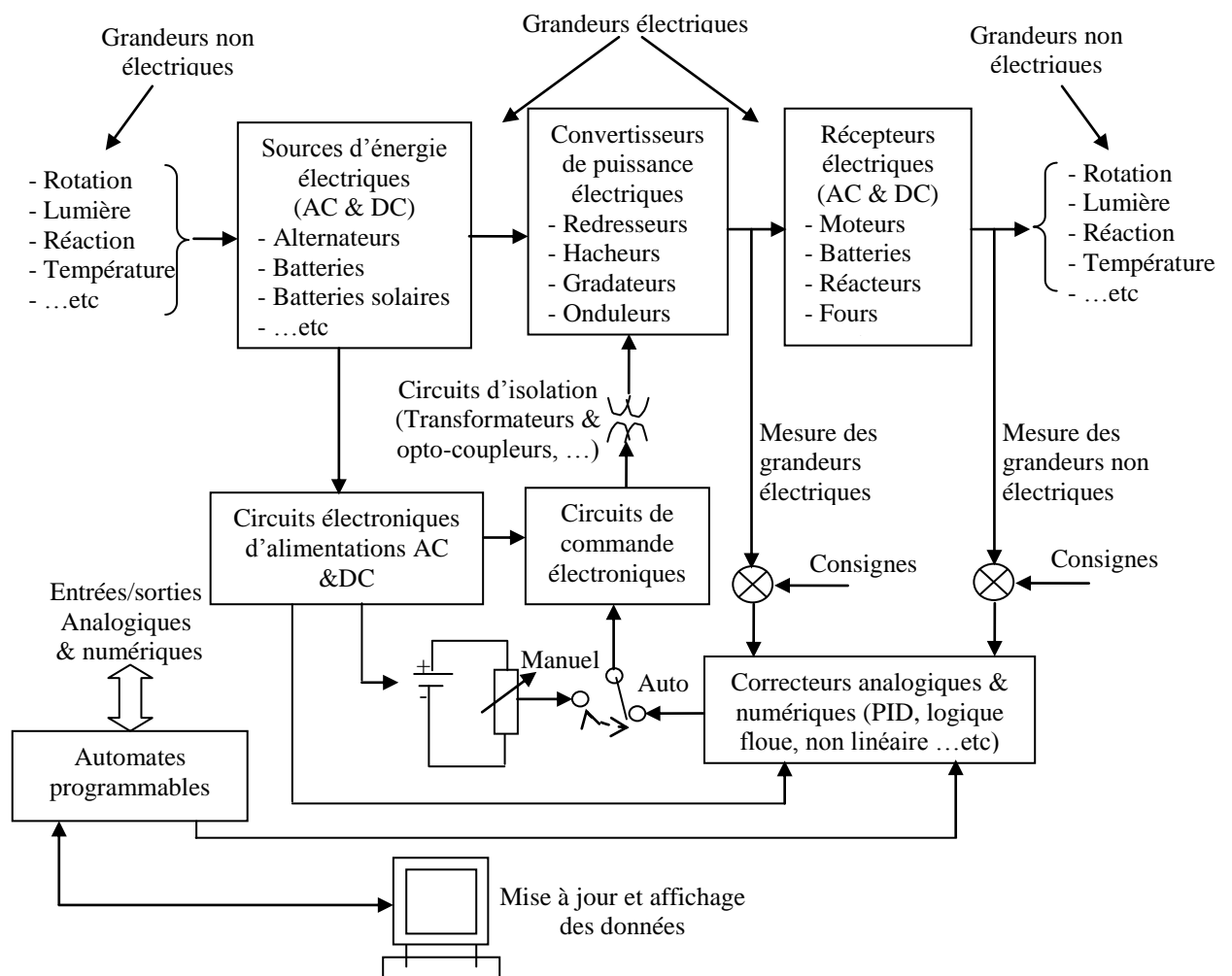


Figure Ch.1-1 : Schéma bloc pour le contrôle du débit de puissance électrique dans un récepteur

Dans ce qui suit nous allons expliquer brièvement les éléments constituant ce schéma synoptique.

**a) Grandeurs non électriques :**

Ce sont des phénomènes physiques qui causent la création des charges électriques continues (DC) ou alternatives (AC).

**b) Sources d'énergie électrique :**

ce sont des générateurs conçus pour la transformation d'une grandeur physique en une grandeur électrique AC ou DC.

**c) Convertisseurs de puissance électrique :**

Le circuit de puissance sert à convertir et contrôler la forme du signal d'entrée électrique AC ou DC vers une forme d'onde plus adaptée au récepteur ou à l'utilisation.

**d) Récepteurs électriques :**

Pour nos besoins éventuels, on exploite cette énergie électrique préparée à la sortie du circuit de puissance dans un récepteur qui peut être AC ou DC.

**e) Correcteurs analogiques & numériques :**

Afin de commander les grandeurs de sortie avec une grande fiabilité et sans intervention de l'être humain, des correcteurs automatiques ont été conçus qui peuvent agir sur l'erreur de commande.

**f) Circuits de commande électronique :**

Le signal de commande généré par les contrôleurs influe d'une manière automatique sur la génération des impulsions de commande pour la commutation des dispositifs de puissance.

**g) Circuits d'isolation galvanique :**

Pour éviter les courts-circuits dans le circuit de puissance et aussi pour protéger les circuits de commande, des circuits d'isolation galvaniques sont utilisés.

**h) Circuits électroniques d'alimentation :**

Les circuits de commande, régulation, automates, ...etc nécessitent des sources d'alimentations AC ou DC pour leur fonctionnement normal.

### i) Automates programmables :

C'est le cerveau du contrôle logique et séquentiel du système et qui assure ainsi le diagnostic, la réparation, la protection, l'affichage, ...etc.

## III- Caractéristiques des composants de redressement :[1][2]

### III-1- Diodes de puissance

La caractéristique de la diode de puissance ressemble à celle d'une diode normale utilisée dans les applications électroniques à faibles puissances (Figure Ch.1-2). La différence demeure seulement dans la technique du dopage et généralement la diode de puissance a une forme géométrique un peu importante par rapport à une diode simple.

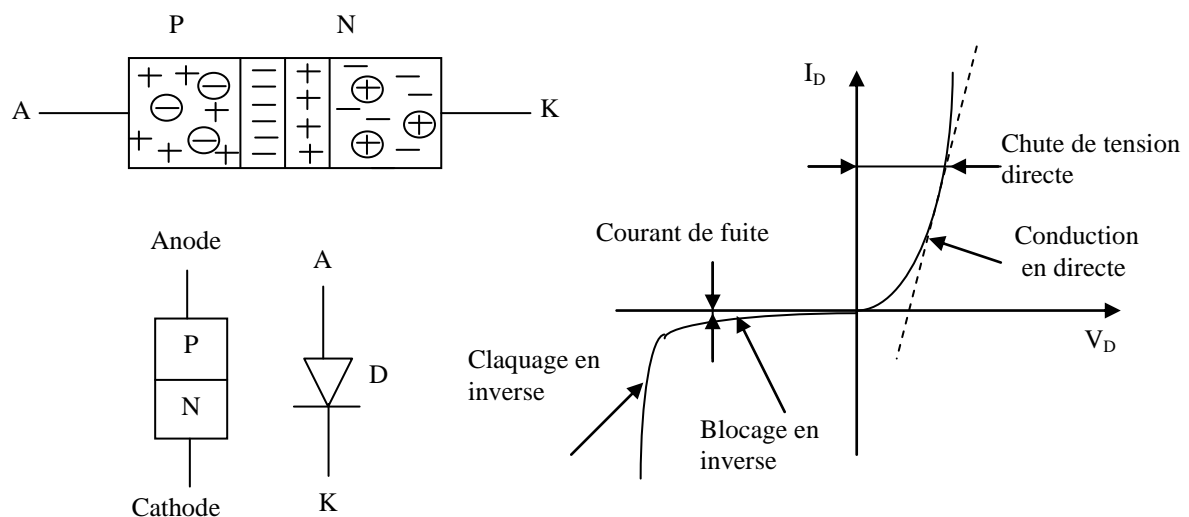


Figure Ch.1-2 Caractéristiques de la diode

Dans l'EP, on doit tenir compte les grandeurs nominales du courant direct efficace et la tension inverse afin d'éviter le claquage du semi conducteur. Il existe plusieurs types de diodes de puissance chacune fonctionne dans des conditions bien déterminées. Effectivement, le fabricant indique les plages du fonctionnement normal des dispositifs telles que le courant direct, la tension inverse, la température, la pression, ...etc.

### III-2- Thyristors (SCR) :

Le thyristor est conçu pour le contrôle en commutation dans le but de faire passer une certaine quantité désirée d'énergie électrique vers le récepteur. Un thyristor est un dispositif à quatre couches PNPN et il a une 3<sup>ème</sup> borne appelée gâchette. Il est constitué de trois diodes en série de sens tels qu'ils empêchent toute conduction. La caractéristique inverse est identique à celle de la diode, et la caractéristique directe du thyristor a plusieurs formes en fonction de la valeur de la tension appliquée à ses bornes (Figure Ch.1-3).

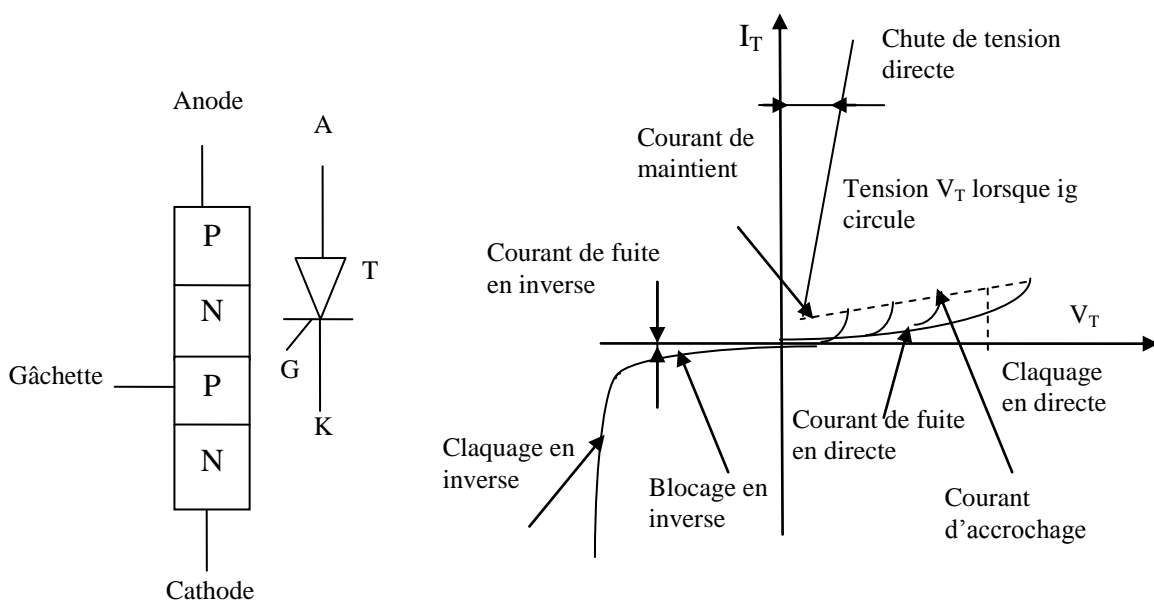


Figure Ch.1-3 Caractéristiques du thyristor (SCR)

Le schéma équivalent du thyristor peut être donné en fonction de deux transistors PNP et NPN connectés d'une façon comme montré dans la Figure Ch.1-4.

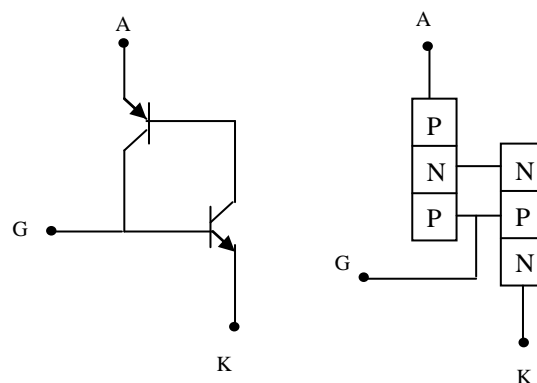


Figure Ch.1-4 : Schéma équivalent du thyristor avec deux transistors

Si le courant de gâchette est absent, le transistor NPN reste bloqué à cause de l'absence de son courant de base malgré que  $V_{AK} > 0$ . Lorsqu'on injecte un courant de gâchette,  $I_G$  pendant un moment, ceci provoque un passage du courant de base du transistor NPN et le composant devient passant. Maintenant si on élimine le courant  $I_G$ , des charges stockées dans le transistor PNP excitent une circulation de son courant de collecteur vers la base du transistor NPN et le thyristor reste encore passant. Pour désamorcer le thyristor, il faut ramener le courant d'anode au dessous du niveau de maintien. En outre, pour bloquer le thyristor, le circuit externe accepte un courant inverse d'anode. Le courant inverse crée des charges dans les couches PN et permet aux deux jonctions extérieures de bloquer tout courant inverse supplémentaire. Un temps typique de 10 à 100  $\mu s$  doit s'écouler avant de pouvoir de nouveau appliquer une tension directe sans désamorçage (Figure Ch.1-5).

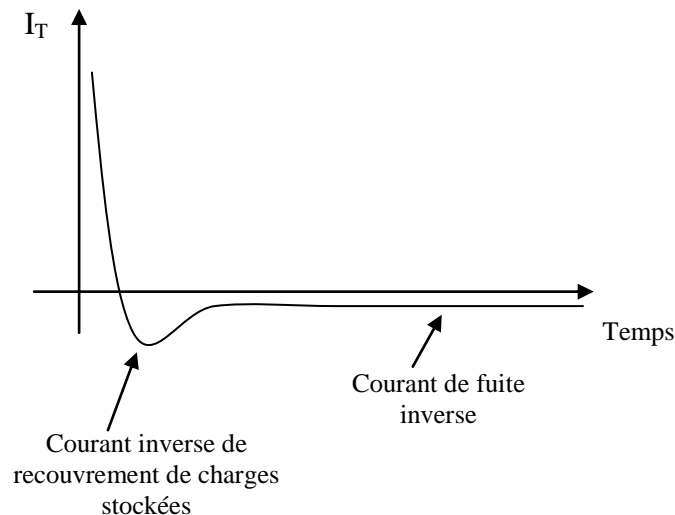


Figure Ch.1-5 : Evolution du courant d'anode pendant la commutation

## VI- Exemples de dispositifs de puissance :[2]

Certaines références des composants de puissance utilisés dans la conversion d'énergie sont citées ci-après (Tableau 1, 2,3).

## VI -1- Références de diodes de puissances :









Référence	Photo	Description
<b>1112723-01</b>		Double diode de puissance
<b>1N3880</b>		Diode redresseur de puissance
<b>40HFR10</b>		Diode de puissance : 100V/40A
<b>85HFR20</b>		Diode redresseur de puissance
<b>BYT08PI200</b>		Diode de puissance haute
<b>DS110-04A</b>		Diodes redressement : 400V/160A
<b>GB4R</b>		Diodes de puissance silicium
<b>MA4PK3001</b>		Diode pin haute tension

Table -1 Diodes de puissance

## VI -2- Références de thyristors, les triacs et les diacs:




Référence	Photo	Description
00564-506-251K		Thyristor
154-08		Triac
22RIA40		Triac-Thyristor-Diac

Table -2 Thyristors, Triac et Diac

## VI -3- Références de transistors de puissances :





Référence	Photo	Description
2N1616		Transistor de puissance silicium vcbo 60V, dissipation 85 W
2N3055		Transistor de puissance
6MBP20JB060		Transistor de puissance : 600V/20A
BLY14		Transistor de puissance radio fréquence Description : Si NPN Power HF BJT

Table -3 Transistors de puissance



## V- Les redresseurs (convertisseurs AC/DC)

Les redresseurs se sont des convertisseurs statiques qui transforment un courant alternatif à un courant continu constant ou réglable (Figure Ch.1-6).

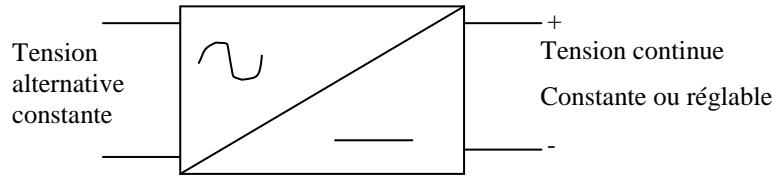


Figure Ch.1-6 Convertisseurs AC/DC

Dans les circuits de redressement classiques, on utilise les diodes de puissance et les thyristors (SCR : Silicon controlled rectifier). Pour les redresseurs à commande MLI, on utilise les transistors de puissance. On classe les divers redresseurs en trois catégories : Les redresseurs non commandés (tout diodes), les redresseurs totalement commandés (tout thyristors) et les redresseurs semi commandés (mixtes). Ils se divisent en deux grands groupes, les redresseurs simples et double alternance.

- En pratique, les redresseurs sont utilisés beaucoup dans l'industrie et surtout dans l'entraînement à des vitesses variables des machines fonctionnant sous tension continue, alimentations fixes ainsi que les chargeurs de batteries.

### V-1- Redresseurs monophasés

L'ordre d'ondulation d'un redresseur est égale le nombre de périodes de la tension redressée pendant une période de l'alimentation alternative. L'étude des circuits redresseurs qui se suivent repose sur les hypothèses suivantes :

- Les chutes de tension des diodes et les thyristors sont négligeables
- Si  $V_{AK} > 0$ , la diode est considérée comme un interrupteur fermé
- Si  $I_D = 0$ , la diode est considérée comme un interrupteur ouvert

#### V-1-1- Redresseur monophasé simple alternance non commandé : [2],[4],[6]

Les redresseurs non commandés ne comportent que des diodes. Ils fournissent une tension de sortie moyenne fixe pour une tension alternative d'alimentation donnée. En pratique,

Les redresseurs monophasés simples alternances ne sont pas employable mais ils sont théoriquement considérables juste pour comprendre le principe de fonctionnement des redresseurs qui se suivent.

Soit le montage (Figure Ch.1-7) suivant du redresseur monophasé simple alternance qui alimente une charge générale inductive (R, L).

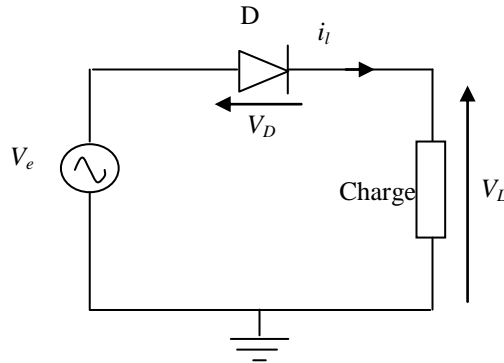


Figure Ch.1-7 Redresseur non commandé sans  $D_L$

Le circuit est alimenté par une tension alternative donnée par :

$$V_e = V_m \sin(\omega t)$$

L'inductance retarde la variation du courant, le courant de charge existe encore à la fin de l'alternance et la diode reste à l'état passant. Alors, la charge voit la tension d'alimentation négative jusqu'à l'annulation du courant. La tension de charge instantanée permet de déterminer la forme d'onde du courant  $i_L(t)$ . Les formes d'ondes des tensions et des courants dans le circuit sont représentés dans les Figure Ch.1-8.

- La tension moyenne dans ce cas est :

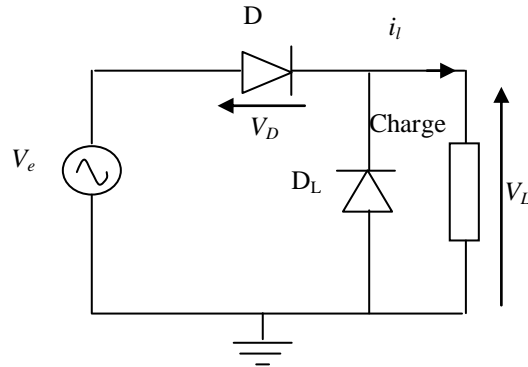
$$V_{Lmoy} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\varphi} V_m \cdot \sin(\theta) d\theta$$

Où  $\varphi$  est obtenu on met l'équation  $i_L(t)=0$

- Pour une charge résistive,  $V_{Lmoy}$  devient :

$$V_{Lmoy} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V_m \cdot \sin(\theta) d\theta = \frac{V_m}{\pi}$$

- Pour empêcher l'inversion de la tension de charge, on met une diode aux bornes de la charge appelée diode de roue libre  $D_L$  (Figure Ch.1-9). Alors,  $V_{Lmoy}$  s'exprime comme suit

Figure Ch.1-9 Redresseur non commandé avec  $D_L$ 

$$V_{Lmoy} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V_m \cdot \sin(\theta) d\theta = \frac{V_m}{\pi}$$

- Le tracé des courbes des tensions et des courants est montré par la Figure Ch.1-10.

On remarque que la forme du courant de charge est lissée à celui du montage précédent sans  $D_L$

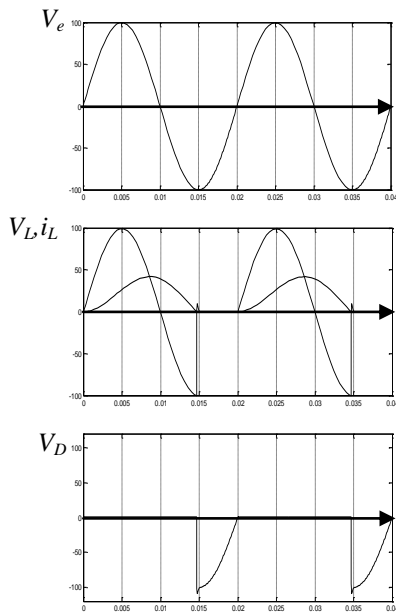


Figure Ch.1-8 Formes d'ondes

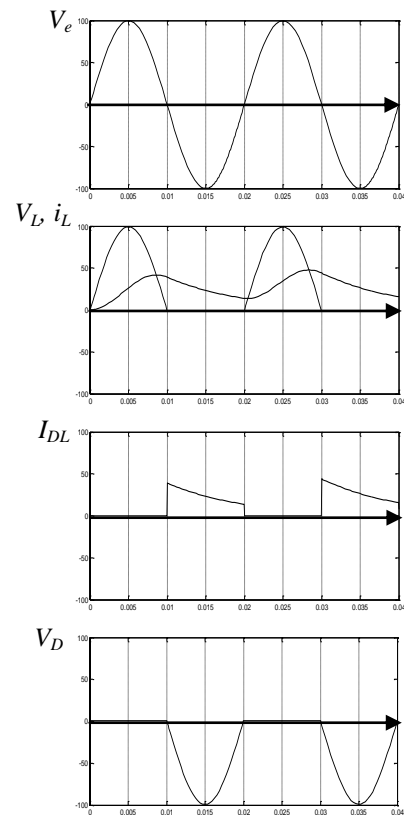


Figure Ch.1-10 Formes d'ondes

- Le rôle de  $D_L$  est de commuter ou de transmettre le courant de charge hors du redresseur chaque fois que  $V_L$  tend à s'inverser et donc permettre à tous les thyristors de reprendre leur état bloqué.

### V-1-2- Redresseur monophasé simple alternance totalement commandé : [1],[4]

On règle la tension moyenne de charge en grandeur et en signe en contrôlant l'angle de retard (amorçage). Ce type de convertisseurs sont souvent appelés des convertisseurs bidirectionnels car la puissance peut circuler dans les deux sens entre l'alimentation et la charge.

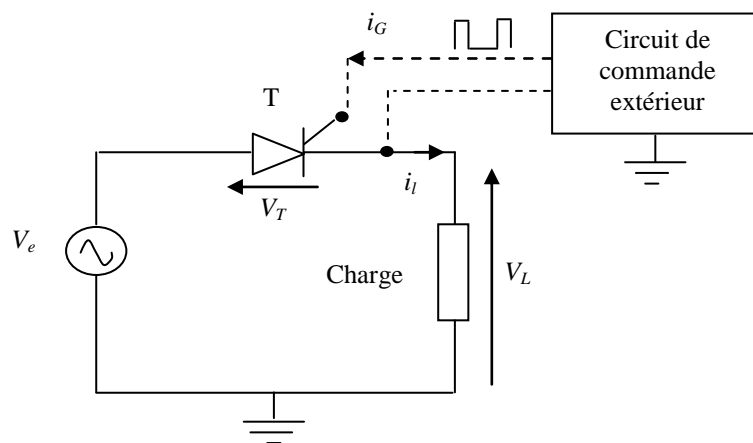


Figure Ch.1-11 Redresseur totalement commandé

Le montage redresseur totalement commandé est représenté ci-contre (Figure Ch.1-11). Le thyristor ne conduit que si  $V_T > 0$  et si la gâchette a reçue une impulsion d'amorçage  $i_G$  par un circuit externe de commande. L'angle d'amorçage  $\alpha$  est compté par rapport aux instants de commutation naturelle. L'équation  $Ri_L + L \frac{di_L}{dt} = V_L$  régit la forme du courant de charge durant l'état passant du thyristor.

Quand l'impulsion arrive, elle trouve que  $V_T > 0$  et le thyristor change sans état où il devient passant. Le courant d'anode croît d'une manière non linéaire et décroît à partir de  $\omega t > \pi$  jusqu'à la valeur zéro à l'instant  $\omega t = \varphi$  le thyristor cesse à conduire, les formes d'ondes peuvent être tracées comme montré par la Figure Ch.1-12.

- La tension moyenne vaut :

$$V_{L\text{moy}} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\varphi} V_m \cdot \sin(\theta) d\theta \quad \text{Avec } 0 \leq \alpha \leq \pi/2$$

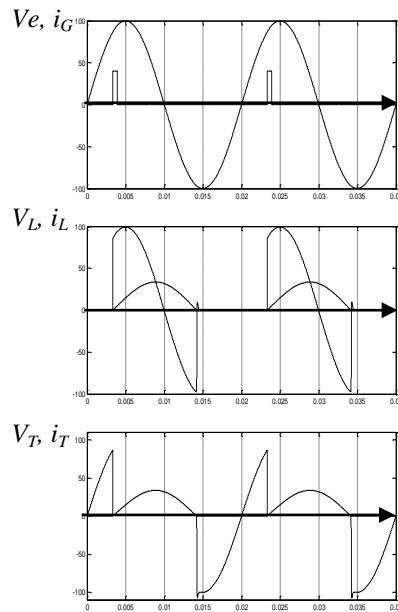


Figure Ch.1-12 Formes d'ondes

### V-1-3- Redresseur monophasé simple alternance semi commandé : [1],[2],[6]

Ce genre de redresseurs comporte des thyristors et des diodes (Figure Ch.1-13) - Ils empêchent la tension de charge de s'inverser. Ils règlent la tension moyenne continue. Ils sont appelés des convertisseurs unidirectionnels car la puissance ne peut s'écouler que de l'alimentation vers le récepteur.

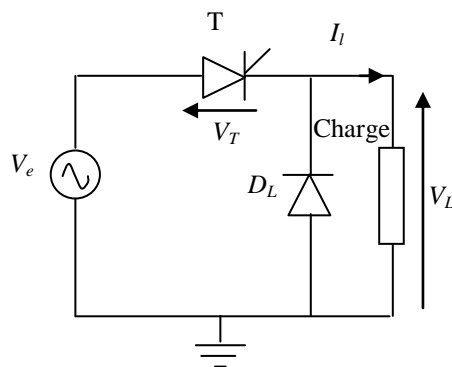


Figure Ch.1-13 Redresseur semi commandé

- Si  $V_e < 0 \Rightarrow V_L = 0$ , le courant,  $i_L$  décroît exponentiellement.
- Si le  $i_L$  décroît au dessous du niveau de maintien de la diode, le débit dans la charge est discontinu. D'après les allures représentées dans la Figure Ch.1-14, la tension moyenne égale

$$V_{Lmoy} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m \cdot \sin(\theta) d\theta = \frac{V_m}{2\pi} (1 + \cos(\alpha)) \quad \text{Avec} \quad 0 \leq \alpha \leq \pi$$

La diode de roue libre permet au thyristor de repasser à l'état bloqué en fin de l'alternance.

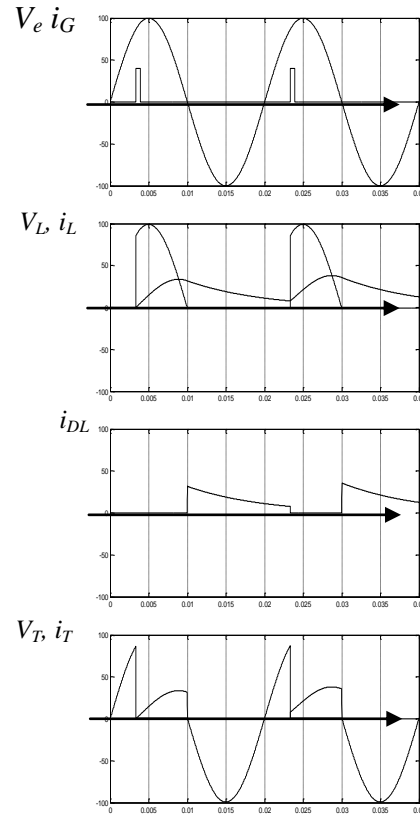


Figure Ch.1-14 Formes d'ondes

#### V-1-4- Redresseur monophasé double alternance non commandé : [2],[6]

Le montage redresseur en pont est donné en Figure Ch.1-15.

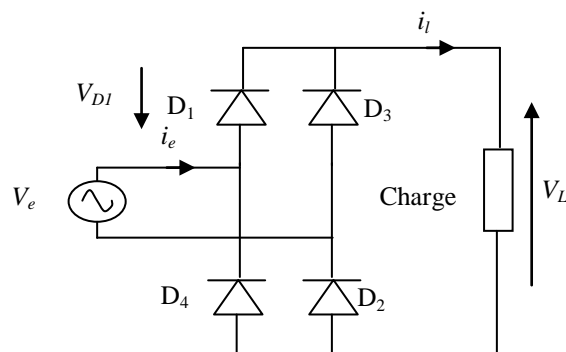


Figure Ch.1-15 Redresseur en pont non commandé

Durant l'alternance positive de la source, les diodes  $D_1$  et  $D_2$  conduisent car elles sont polarisées en directe ( $V_L = V_e$ ). Pendant l'alternance négative,  $D_3$  et  $D_4$  conduisent qui donne  $V_L = -V_e$  alors que le courant de charge garde le même sens. La tension inverse maximale pour chaque diode égale la valeur maximale de la tension d'alimentation.

- L'expression de la tension moyenne vaut :

$$V_{Lmoy} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_m \cdot \sin(\theta) d\theta = \frac{2V_m}{\pi} \cong 0.63V_m$$

On remarque que  $V_{Lmoy}$  égale le double à celle du montage redresseur monophasée simple alternance. Les courbes de ce montage sont obtenues par la Figure Ch.1-16.

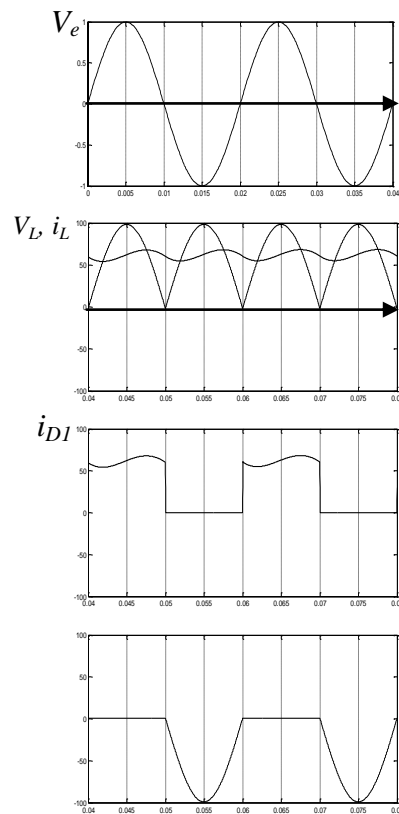


Figure Ch.1-16 Formes d'ondes

#### V-1-5- Redresseur monophasé double alternance totalement commandé : [4],[6]

- Dans ce cas, le montage ne comporte que des thyristors. Il n'y a de conduction jusqu'à l'amorçage des thyristors. Pour qu'un courant circule, il faut amorcer les thyristors  $T_1$  et  $T_2$

simultanément ainsi  $T_3$  et  $T_4$  dans l'alternance suivante. Pour que l'amorçage soit simultané, un même circuit amorce deux thyristors. Le transformateur d'impulsion donne deux sorties isolées car les cathodes des thyristors sont à des potentiels différents dans le circuit de puissance. La Figure Ch.1-17 montres le circuit redresseur en pont avec circuit d'amorçage.

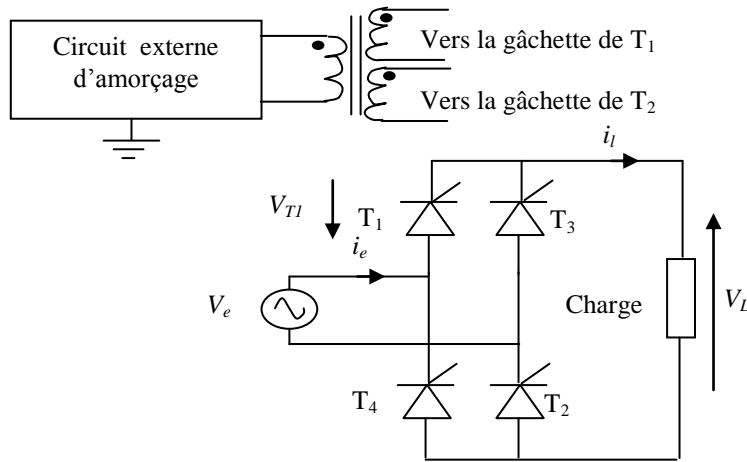


Figure Ch.1-17 Redresseur en pont totalement commandé

La tension de charge commence à s'inverser si  $\alpha > 0$ . Si on a une Charge fortement inductive, on obtient un courant lissé et le courant d'entrée a une forme rectangulaire.

La valeur crête de la tension du thyristor est  $V_m$ . Les formes d'ondes de ce convertisseur sont représentées dans la Figure Ch.1-18.

-  $V_L$  a une valeur moyenne donnée par

$$V_{Lmoy} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} V_m \cdot \sin(\theta) d\theta = \frac{2V_m}{\pi} \cos(\alpha) \cong 0.63V_m \cos(\alpha)$$

Avec ;  $0 \leq \alpha \leq \pi/2$

- Si on met une  $D_L$  aux bornes du récepteur,  $V_{Lmoy}$  devient

$$V_{Lmoy} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m \cdot \sin(\theta) d\theta = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha)$$

Avec  $0 \leq \alpha \leq \pi$



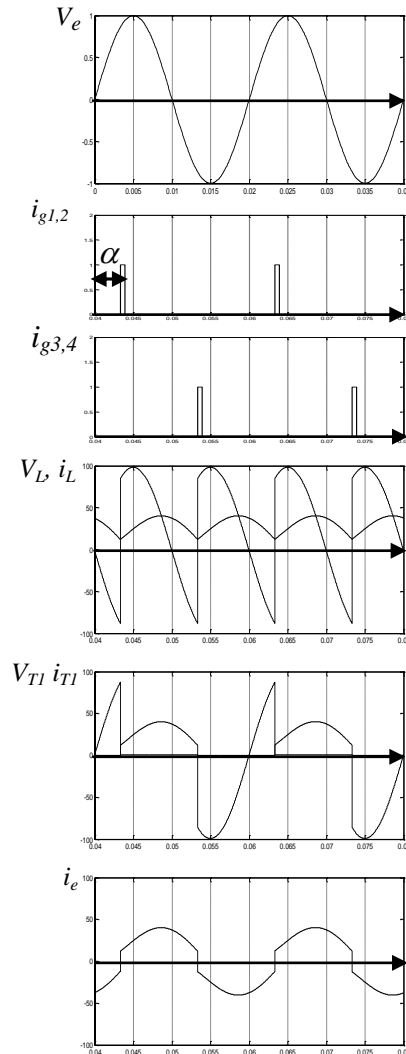


Figure Ch.1-18 Formes d'ondes

### V-1-6- Redresseur monophasé double alternance semi commandé :[2]

Deux thyristors et deux diodes permettent de commander la tension redressée moyenne (Figure Ch.1-19). Le courant d'entrée passe par  $T_1$ ,  $T_2$  et  $D_1$ ,  $D_2$  assurent le retour du courant. Les thyristors commutent lorsqu'ils sont amorcés et les diodes commutent aux zéros de la tension d'alimentation. La tension de charge élaborée ne devient jamais négative même sans  $D_L$ .

$D_L$  fournit un chemin parallèle préférentiel à ce trajet de roue libre comparativement à la combinaison série d'un thyristor et d'une diode par exemple  $T_1$ ,  $D_1$ .

$$-i_e = i_{T1} - i_{T4} = \begin{cases} i_L & \text{si } T_1 \text{ est conduit} \\ -i_L & \text{si } T_4 \text{ est conduit} \end{cases}$$

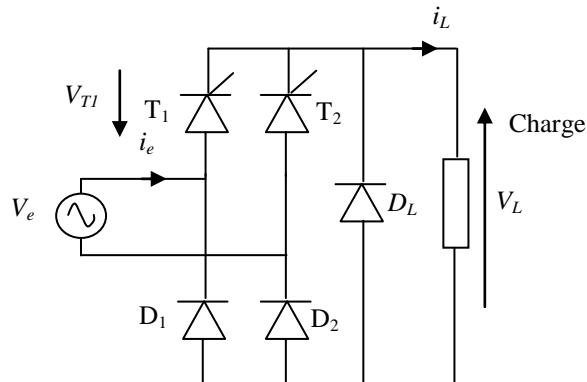


Figure Ch.1-19 Redresseur en pont semi commandé

$D_L$  permet donc au thyristor de repasser à l'état bloqué. D'après les courbes représentées par la Figure Ch.1-20, La valeur moyenne de  $V_L$  égale :

$$V_{Lmoy} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m \cdot \sin(\theta) d\theta = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha)$$

Avec  $0 \leq \alpha \leq \pi$

La durée de conduction de chaque composant de puissance vaut  $\pi$ . Le redresseur semi commandé est meilleure marché à celui du redresseur totalement commandé ( $T_1, D_2$  au lieu  $T_1, T_2$ ). On ne peut utiliser le convertisseur semi commandé dans le mode onduleur assisté en raison de ses étapes à valeur nulle. Seul le montage totalement commandé (tout thyristor) permet d'inverser le signe de  $V_L$ .

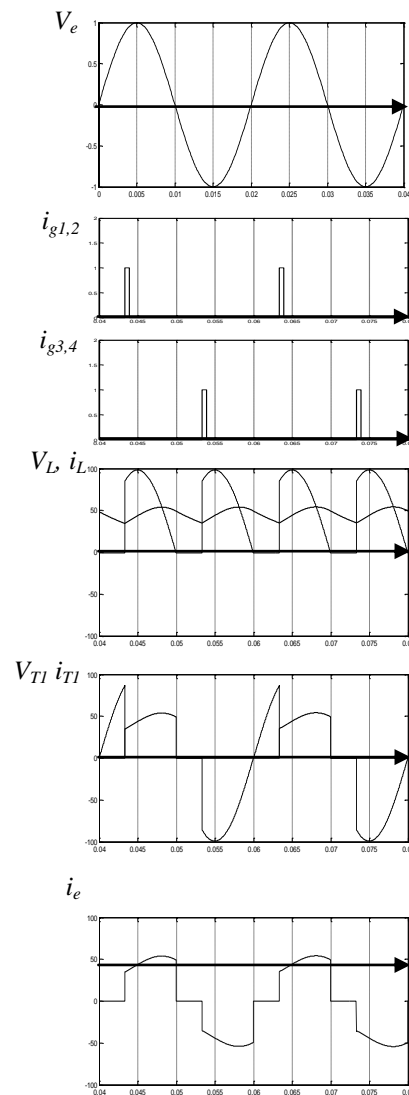


Figure Ch.1-20 Formes d'ondes

## V-2- Applications des redresseurs :[5][3]

Parmi les applications connus des redresseurs on site, les chargeurs de batteries, Les groupe électrogène (électro-générateur), et aussi les contrôleurs de vitesse des machines DC. Cette dernière application est très importante et elle sera objet de notre étude et qui consiste en la commande d'un moteur DC par microcontrôleur 16F876A. Les figures suivantes donnent les circuits électriques des deux premières applications tan disque la dernière sera traité en détail dans ce qui suit.

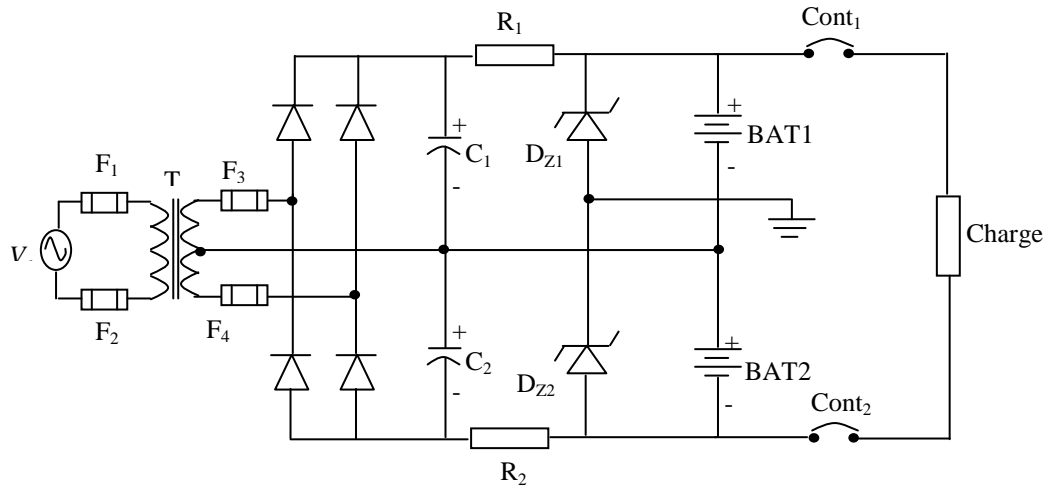


Figure Ch.1-21 Chargeur de batterie

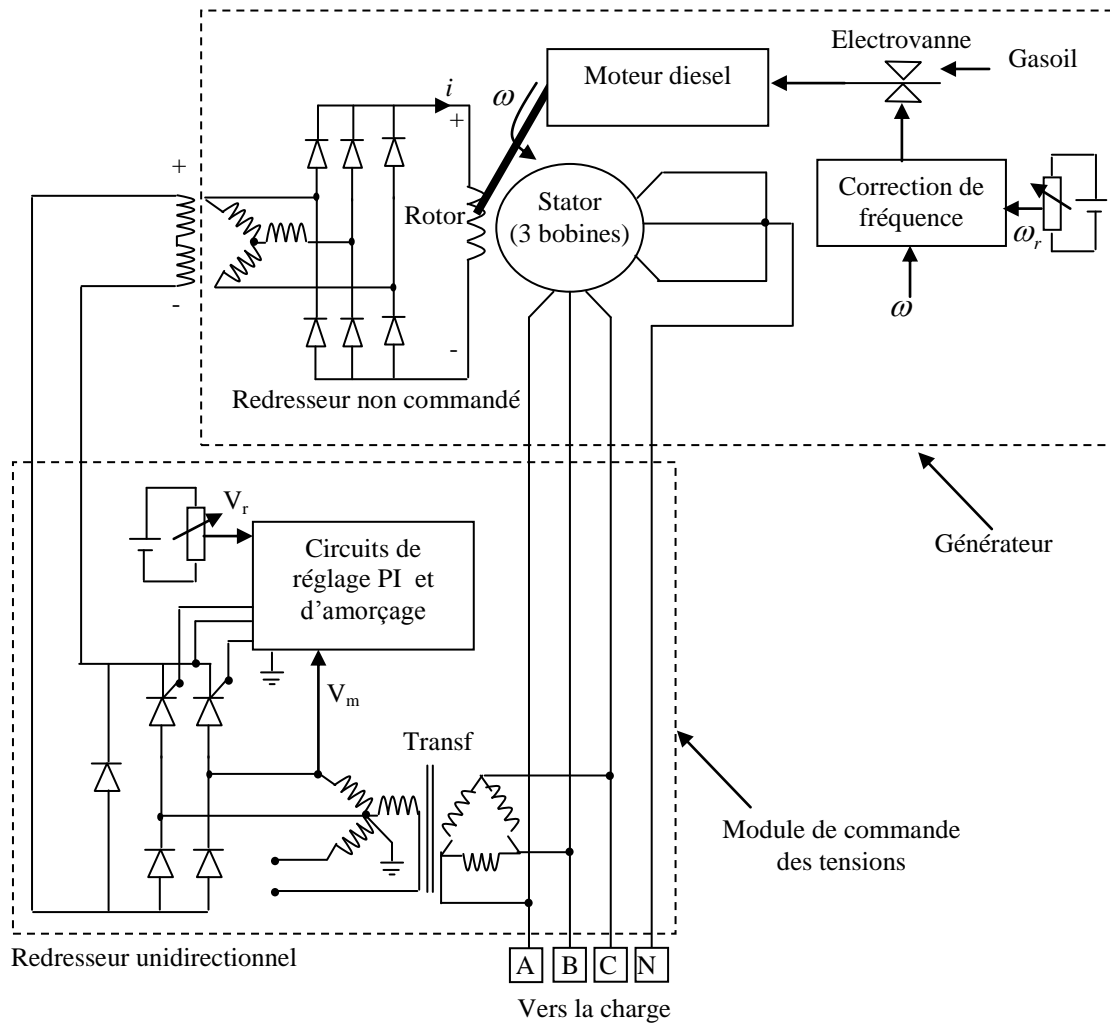


Figure Ch.1-22 Contrôleur des tensions alternatives d'un générateur via une excitatrice auxiliaire

**VI- Contrôle de vitesse de la machine DC : [3],[4],[6]**

A partir de l'équation différentielle du circuit d'induit pour le moteur à excitation shunt on peut écrire

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a = V_l - k\omega$$

Et de l'équation du mouvement du système mécanique s'écrit comme

$$J \frac{d\omega}{dt} + f\omega = ki_a - \tau_r$$

Où :

$R_a$  : résistance de l'induit,  $L_a$  : l'inductance de l'induit ,  $K$  : la constante du couple,  $J$  : le moment d'inertie,  $f$  : coefficient du frottement,  $\tau_r$  : Couple résistant

Le variateur de vitesse de la machine DC comme montré dans la Figure Ch.1-23 utilise un convertisseur AC/DC totalement commandé. L'objectif est alors de contrôler la puissance électrique dans le moteur et aussi pour récupérer une certaine quantité d'énergie vers la source pendant le freinage de ce dernier. La vitesse actuelle du moteur peut être observée en fonction de deux grandeurs mesurées qui sont la tension redressée et le courant du moteur. La correction de la vitesse et du courant est assurée par un compensateur de type PI mais sous réserve que la puissance et le couple ne dépassent pas ses valeurs nominales. Le contrôle manuel via un potentiomètre peut être aussi considéré en cas d'urgence. Le circuit d'amorçage délivre des impulsions d'amorçage vers les thyristors du pont SCR synchronisées par rapport aux signaux d'alimentation. Le signal de commande  $U_c$  influe sur l'angle de retard des impulsions par rapport aux instants des commutations naturelles.

En générale, des éléments de protection sont toujours installés dans le circuit de puissance et le circuit de commande tels que les disjoncteurs, les fusibles, les fils absorbants des parasites dues aux effets extérieur, capteurs de température, les filtres passe-bas, refroidisseurs, ...etc.

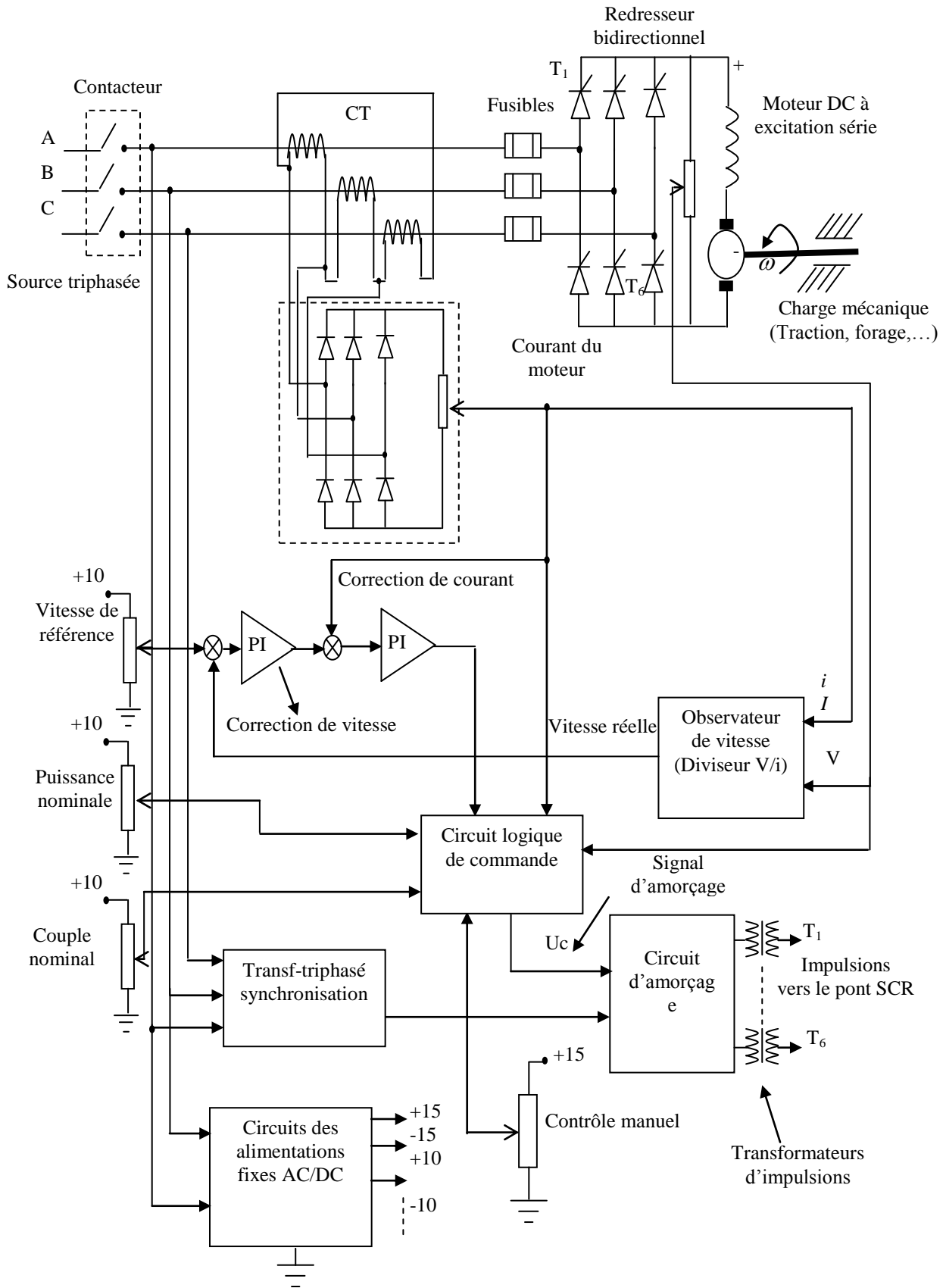


Figure Ch.1-23 Variateur de vitesse de la machine DC

**VII- Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons fait un tour d'horizon des composants électroniques utilisées dans l'électronique de puissance entre autre on a situé les diodes de puissance, les diac les thyristors et les triacs. Puis nous avons par la suite donné les principaux circuits de redressement du plus simple à celui totalement commandé et nous avons donné le principe de fonctionnement de chacun d'eux. A la fin nous avons traité le mécanisme de variation de vitesse dans les machines à courant continu, car cela est à la base de la carte que nous allons développer en chapitre 3. L'élément délivrant les signaux de commandes des thyristors sera dans notre travail, un microcontrôleur du type 16F876A. Le choix de ce circuit de commande vient du fait qu'il est doté de convertisseurs analogique-numérique intégré et de port délivrant un signal module de modulation en fréquence en largeur qui est très important pour la commande des thyristors.