

LES INTERRUPTEURS SEMI-CONDUCTEURS

I- Présentation:

Les systèmes utilisés en Électrotechnique permettent de transformer la nature de l'énergie électrique et de convertir l'énergie électrique en une autre forme d'énergie (mécanique, thermique, chimique, lumineuse, ...). L'électronique, l'automatique et l'informatique s'intéressent essentiellement au traitement du signal (ou de l'information).

Les systèmes de l'électrotechnique traditionnelle (machines tournantes, éclairage, chauffage, climatisation, ...) permettant la conversion de l'énergie électrique, ne peuvent pas toujours être reliés directement à une source électrique. Il faut alors avoir recours à un dispositif, jouant le rôle d'interface, permettant d'adapter (de transformer) les caractéristiques de la source afin d'assurer le bon fonctionnement (et d'introduire des moyens de réglage de transfert d'énergie). Ce dispositif est un **convertisseur électrique**.

Lorsque l'interface est réalisée par des moyens purement électroniques (semi conducteurs), elle est alors appelée **convertisseur statique**. Ces convertisseurs statiques peuvent se trouver aussi bien discipline technologique associée à ces réalisations est appelée **Électronique de Puissance**. Elle permet:

- Une utilisation plus souple et plus adaptée de l'énergie électrique,
- Une amélioration de la gestion, du transport et de la distribution de l'énergie électrique,
- Une réduction des masses et des volumes, mais aussi du bruit.

Un convertisseur statique est un dispositif, à base de semi-conducteurs, qui transforme de l'énergie électrique disponible, en une forme appropriée pour alimenter une charge.

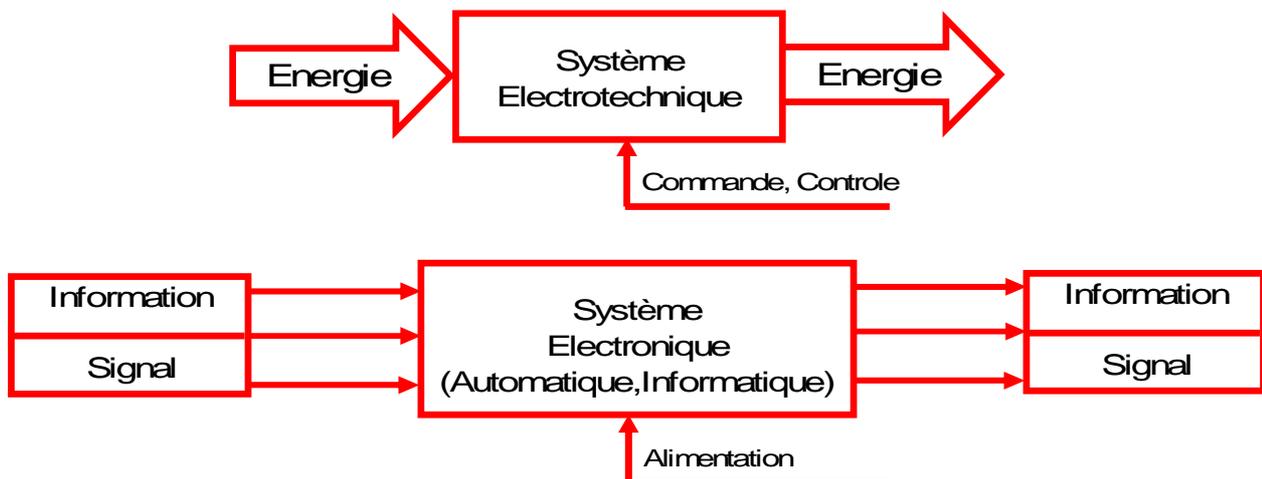


Figure 1. Complémentarité de l'électrotechnique par rapport à l'électronique, l'automatique et Informatique

I- Fonctions de base et terminologie des convertisseurs statiques:

L'énergie électrique est disponible soit sous forme alternative (réseau de distribution électrique, alternateurs) soit sous forme continue (batterie d'accumulateurs, génératrice à courant continu, cellules photovoltaïques, pile à combustible, ...). La charge peut nécessiter une alimentation en alternatif ou en continu. Il existe donc **quatre fonctions de base des convertisseurs statiques**. Ces convertisseurs transforment directement l'énergie électrique, sont appelés mono-étages.

Un **convertisseur statique** est dit **réversible** lorsque l'énergie, peut transiter (en général, être contrôlée) de manière bidirectionnelle, c'est à dire aussi bien dans un sens que dans l'autre. Les notions d'entrée et de sortie ne sont alors plus évidentes.

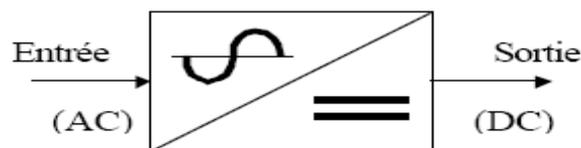
Un convertisseur non réversible transfère l'énergie d'une source vers une charge utilisatrice.



Figure 2. Réversibilité (et non réversibilité) des convertisseurs statiques.

A- Conversion Alternatif – Continu (AC/DC):

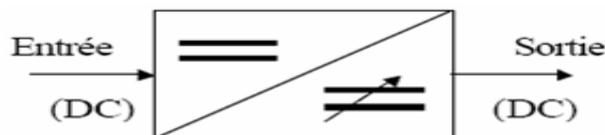
Le convertisseur jouant le rôle d'interface entre une source alternative et une charge alimentée en continu, est appelé : **Redresseur (Rectifier)**.



Le plus souvent, il est alimenté par le réseau à fréquence industrielle. La tension (ou le courant) de sortie peut être, ou non, réglable par rapport à la grandeur d'entrée (tension ou courant).

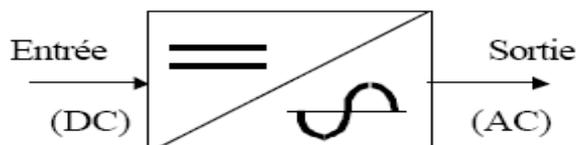
B- Conversion Continu – Continu (DC/DC):

Le convertisseur jouant le rôle d'interface entre une source continue et une charge alimentée en continu, est appelé : **Hacheur (Chopper)**.



C- Conversion Continu – Alternatif (DC/AC):

Le convertisseur jouant le rôle d'interface entre une source continue et une charge alimentées suivant le type de charge, ce convertisseur est appelé **onduleur autonome ou assisté**. Dans le dernier cas, le convertisseur est composé de thyristors, sa structure est la même que le redresseur réversible (AC-DC / DC-AC).



D- Conversion Alternatif – Alternatif (AC/AC):

Ces convertisseurs permettent d'obtenir une tension alternative variable de fréquence constante ou variable, à partir d'une source alternative. Trois types sont possibles:

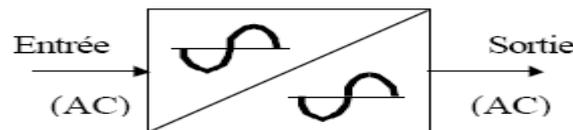
1. Soit convertir une tension alternative de valeur efficace fixe en une tension alternative variable. C'est le **gradateur**

2. Soit convertir une tension alternative de valeur efficace fixe en une tension alternative de valeur efficace variable et de fréquence variable inférieure à la fréquence de la source.

C'est le **cyclo-convertisseur**.

3. Soit convertir une tension alternative de valeur efficace fixe en une tension alternative de valeur efficace variable avec tension et fréquence variable. La fréquence de la tension de sortie peut être supérieure ou inférieure à la fréquence de la source.

C'est un convertisseur **alternatif-continu-alternatif**: un redresseur commandé est utilisé pour obtenir une tension continu variable; et un onduleur est utilisé pour obtenir, à partir la tension continu, une tension de sortie à tension et fréquence variable.



II- Applications des convertisseurs statiques:

1- Applications domestiques:

- Alimentation des appareils électroniques (TV, PC, magnétoscopes, ...).- Électroménager (aspirateur, réfrigérateur, lave-linge, lave-vaisselle, robots culinaires, ...).- Éclairage. - Chauffage.- Appareil électroportatif (perceuse, ...).- Actionneurs domotiques (volets roulants, stores électriques, ...).

L'utilisation de l'**électronique de puissance** prend de plus en plus d'importance pour deux raisons principales:

- Les coûts de fabrication diminuent (facteur primordial dans les domaines de la grande série),
- les contraintes sur les niveaux de perturbations et le rendement augmentent.

2- Applications industrielles:

- Pompes, compresseurs. -Variation de vitesse. -Chariots électriques. -Chauffage par induction. - Grues. - Fours (à arcs, à résistance).- Appareils de soudage.- Électrolyse.- Onduleurs de secours.

3- Transport:

- Réseaux de bord d'avion, commande électrique.
- Traction électrique (trains, métros, voitures électriques, ...).
- Propulsion électrique des navires, génération d'électricité à bord des navires.
- Génération de l'énergie électrique par des cellules photovoltaïques, les stations spatiales.

4- Production et Distribution de l'électricité:

- Compensateur de puissance réactive et filtrage actif (augmenter le facteur de puissance d'une installation et limiter les harmoniques de courant sur le réseau).
- Dispositif de stockage de l'énergie.

Les applications les plus puissantes des convertisseurs statiques concernent le transport courant continu - haute tension (CC-HT).

III. Constitution des convertisseurs statiques:

Une conversion d'énergie doit être faite avec le meilleur rendement, pour les raisons suivantes:

- difficulté d'évacuer (dissiper) les pertes si elles sont trop importantes,
- le coût des dispositifs dissipateur de chaleur est important,
- la fiabilité d'un composant (d'un système) diminue quand sa température augmente,

- il faut assurer une autonomie suffisante des appareils fonctionnant sur piles ou batteries,
- il est nécessaire de conserver un bilan économique satisfaisant.

Dans le cas où les semi-conducteurs de puissance peuvent être considérés comme des interrupteurs parfaits, l'analyse du principe de fonctionnement des convertisseurs de puissance est évidemment grandement facilitée.

IV. Les interrupteurs semi conducteurs:

Dans ce chapitre, nous allons décrire simplement les principales caractéristiques externes des composants. Ils peuvent être classés en trois groupes :

1. **Diodes.** États fermé ou ouvert contrôlés par le circuit de puissance.
2. **Thyristors.** Fermé par un signal de commande, mais doit être ouvert par le circuit de puissance.
3. **Interrupteurs commandables** à l'ouverture et à la fermeture. Ouverts et fermés par un signal de commande.

La catégorie des interrupteurs commandables inclut de nombreux types de composants :

- Transistors Bipolaires à Jonctions (Bipolar Junction Transistors - BJTs);
- Transistors à effet de champ Metal-Oxyde-Semi conducteur (MOSFETs);
- Thyristors commandés à l'ouverture (Gate-Turn-Off Thyristors - GTO Thyristors);
- Transistors bipolaires à grille isolée (Insulated Gate Bipolar Transistors - IGBTs);
- Thyristors MOS Commandés (MOS-Controlled Thyristors - MCTs).

1. Diodes

La figure ci dessous décrit les différentes diodes existantes, le symbole de la diode et sa caractéristique statique $i_D = f(V_D)$. Lorsque la diode est polarisée en direct, elle commence à conduire à partir d'une faible tension de seuil V_{seuil} directe de l'ordre de 1V. Lorsque la diode est polarisée en inverse, seul un faible courant de fuite négligeable (quelques mA) circule jusqu'à atteindre la tension d'avalanche. En fonctionnement normal, la tension inverse ne doit pas atteindre la tension d'avalanche.

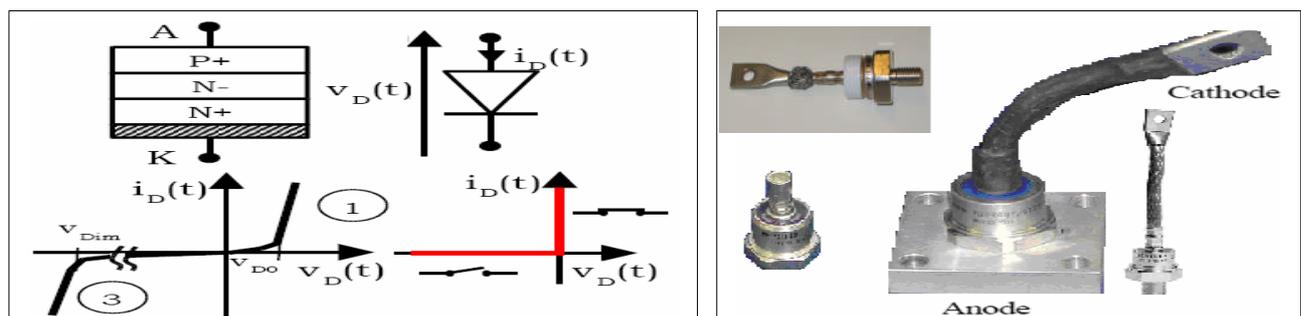


Figure 3. Structure. Symbole. Caractéristiques réelle et idéale d'une diode à jonction PN.

2. Thyristors

La figure 4 décrit le symbole du thyristor et sa caractéristique statique $i_A = f(V_K)$. Le courant principal circule de l'anode (A) vers la cathode (K). En polarisation directe, le thyristor possède deux caractéristiques selon qu'il est commandé ou non. Il peut supporter une tension directe positive sans conduire comme décrit sur la figure 4 (**état off**).

Lorsque le thyristor est polarisé en direct, il peut être placé dans l'état on en appliquant une **impulsion de courant positive sur la gâchette (G)**. La caractéristique $i_A = f(V_K)$ résultante est décrite sur la figure 4 (**état on**).

Lorsque le thyristor commence à conduire, le courant de gâchette peut être annulé. Le thyristor ne peut alors plus être placé à l'état **off** par la gâchette et se comporte comme une diode. Il se bloque seulement au moment où le courant i_A s'annule.

En polarisation inverse, à des niveaux de tension inférieurs à la tension d'avalanche inverse, seul un courant de fuite négligeable circule dans le thyristor.

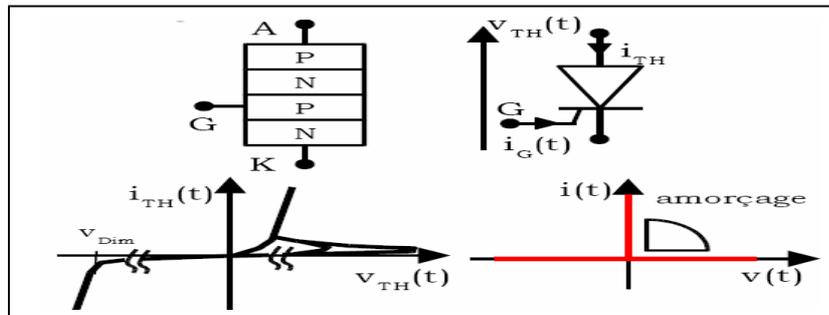


Figure 4. Structure, Symbole, Caractéristiques réelle et idéale d'un thyristor.

Dans les documentations des fabricants de composants, il existe différents types de conceptions des thyristors comme l'indique la figure 5.



Figure 5. Différentes représentations des thyristors sur le marché

3. Transistor MOSFET

Le transistor MOSFET est un interrupteur unidirectionnel en tension et bidirectionnel en courant. A l'avantage d'une commande relativement simple qui nécessite peu de puissance. En électronique de puissance, il est utilisé comme élément de commutation et par conséquent présente deux états distincts.

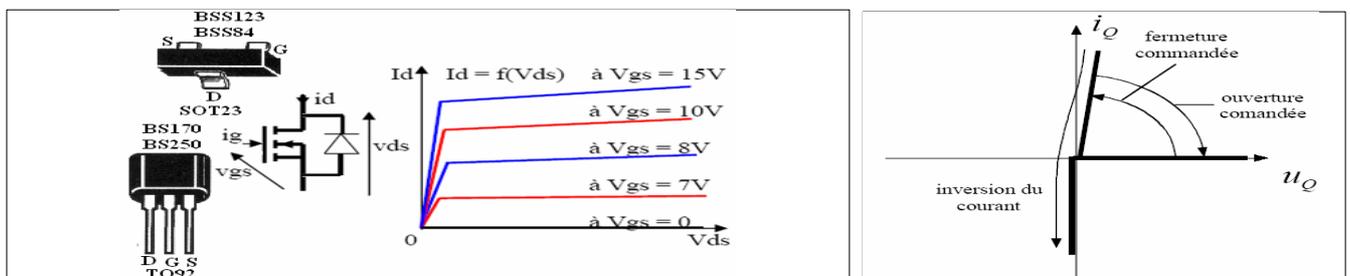


Figure 6. Structure d'un transistor MOSFET à canal N et à enrichissement, Symbole, Caractéristique.

4. Transistors IGBT

Les concepteurs ont voulu avoir les avantages suivants :

- Tension élevée à l'état ouvert,
- Tension faible à l'état fermé,
- Facile à commander,
- Bonnes performances dynamiques.

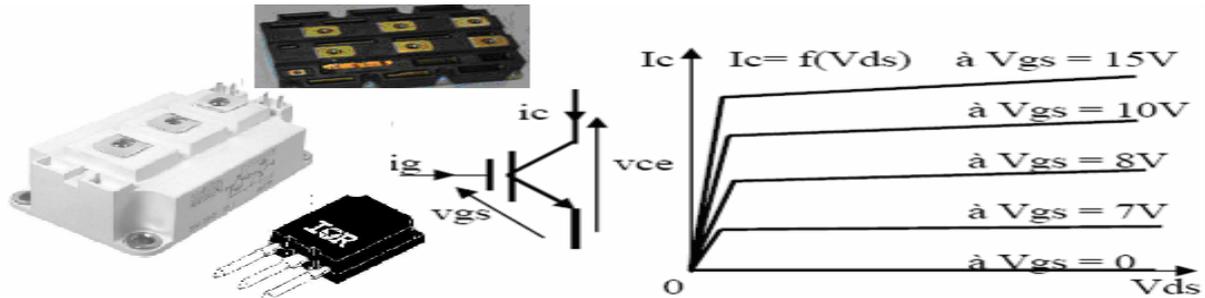


Figure 7. Structure d'un transistor IGBT, Symbole et Caractéristiques.

Les IGBT sont très répandus dans les systèmes de conversion conçus depuis les années 1990. Il est utilisé dans le domaine des moyennes et fortes puissances.

Ce composant est commandé en tension. L'amorçage est identique à celui du MOSFET.

Ces composants sont de plus en plus utilisés dans les systèmes modernes de traitement de l'énergie électrique, comme les onduleurs, les redresseurs MLI, les convertisseurs multi-niveaux, ...

5- Thyristors GTO

Par rapport au thyristor classique, le thyristor GTO est en plus commandable à l'ouverture par un courant, i_G , négatif.

Ce composant entièrement commandable est à trois segments à la différence des transistors précédents.

Du point de vu de sa commande, la gâchette est parcourue en permanence lors de la phase de conduction, par le courant i_G . Sa commande est donc plus difficile à mettre en oeuvre que pour les composants à grille isolée.

Un autre inconvénient est la présence de pertes importantes lors de l'ouverture.

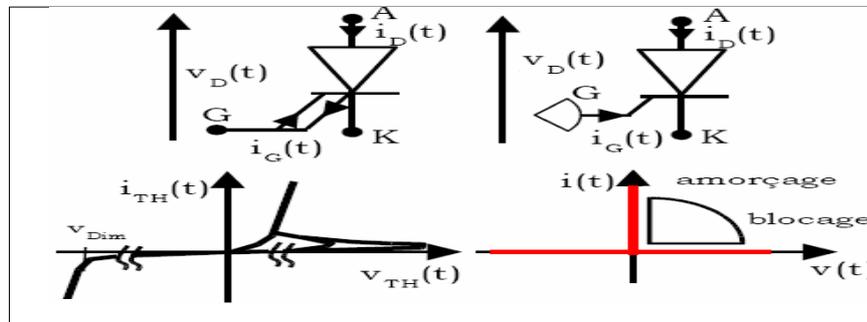


Figure 8. Symboles, Caractéristiques réelle et idéale d'un Thyristor GTO.

6- Comparaison entre les différents interrupteurs entièrement commandables

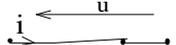
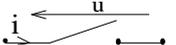
Ce tableau représente les caractéristiques des différents interrupteurs. Il est bien évident qu'un tel tableau ne peut pas faire apparaître les subtilités entre les différents semi-conducteurs. Il permet d'avoir une vue d'ensemble de leurs performances.

	Puissance d'utilisation	Rapidité de commutation
BJT	Moyen	Moyen
MOSFET	Faible	Rapide
IGBT	Moyen	Moyen
GTO	Fort	Lent

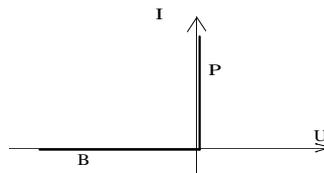
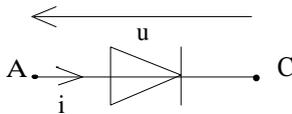
En résumé:

Alimentation	Récepteur	Convertisseurs
Alternatif (U_1, f_1)	Continu U_2 fixe ou variable	Redresseur
Continu U_1	Alternatif (U_2 et f_2 fixe ou variable)	Onduleur
Continu U_1	Continu U_2 variable	Hacheur
Alternatif (U_1, f_1)	Alternatif (U_2, f_2)	Gradateur (U_2 variable f_2 fixe) . Redresseur + Onduleur (U_2, f_2 variable)

II. LES INTERRUPTEURS ELECTRONIQUES:

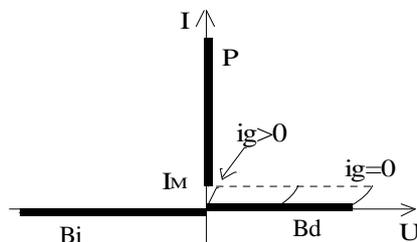
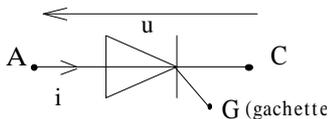
Passant : 	Bloqué: 
---	--

La Diode .



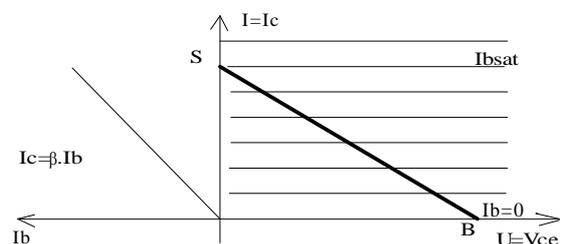
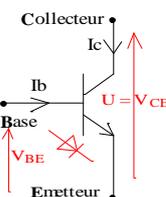
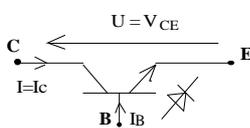
- * Conditions de conduction : $u > 0$
- * Etat passant (P) : $u \approx 0,7V \approx 0$ et $i > 0$ le point de fonctionnement dépend de la charge .
- * Conditions de blocage : $u < 0$
- * Etat bloqué (B) : $i \approx 0 \quad \forall u < 0$

Le thyristor .



- * Conditions de conduction : Il faut $u > 0$ et des impulsions de gâchette .
- * Etat passant (P) : $u \approx 1,1V \approx 0$ et $i > 0$ le point de fonctionnement dépend de la charge .
- * Conditions de blocage : $I < I_{\text{Maintien}}$ ou $u < 0$
- * Etat bloqué (B) : $i \approx 0 \quad \forall u < 0$

Le Transistor (NPN) .

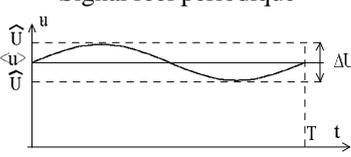
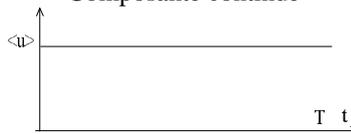
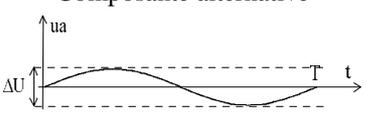


7- Grandeurs caractéristiques

CARACTERISTIQUES DES SIGNAUX PERIODIQUES ET LEURS MESURES .

	Valeur Moyenne	Valeur efficace
Définition	$\langle i \rangle = \frac{1}{T} \text{Aire}(i,t) = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt$	$I = \sqrt{\langle i^2 \rangle}$: Racine carrée de la moyenne des carrés RMS: root mean square.
Mesure	- ∇ appareil en position continu (—) ou DC - Un voltmètre analogique (à aiguille) magnétoélectrique (symbole : ) sur la position DC. - Un voltmètre numérique sur la position DC (continue , =)	- Signal Alternatif sinusoïdal: ∇ appareil en position alternatif ou AC - Signal quelconque: RMS en position AC ou AC+DC (ci-dessous) - Un voltmètre analogique ferromagnétique (symbole: ) sur la position AC. - Un voltmètre numérique dit RMS capable de mesurer la valeur efficace d'une tension de forme quelconque sur la position AC. - Bien sûr les ferromagnétiques et les numériques RMS permettent de mesurer la valeur efficace d'une grandeur alternative sinusoïdale et ce sur les positions AC ou AC+DC.

Remarque : Composantes continue et alternative d'un signal périodique : $U = \langle U \rangle + U_a$.

Signal réel périodique	Composante continue	Composante alternative
 <p>* Le signal réel est observé avec l'oscilloscope en position DC * $U^2 = \langle u \rangle^2 + U_A^2 \Rightarrow$ RMS (AC+DC) * ond = $\frac{\Delta U}{\langle u \rangle} = \frac{\hat{U} - \check{U}}{\langle u \rangle}$</p>	 <p>* La composante continue est la valeur moyenne du signal (supprimé en position AC de l'oscilloscope) * Appareils en position continu (—) ou (DC) .</p>	 <p>* Signal observé avec l'oscilloscope en position AC. La valeur moyenne de la composante alternative est nulle $\langle u_A \rangle = 0$. * Sa valeur efficace vaut : $U_A = \sqrt{\langle u_A^2 \rangle} \Rightarrow$ Appareils RMS (AC)</p>

CONVERTISSEURS AC/DC

1- Introduction

Le principe de fonctionnement consiste en une modification périodique du circuit électrique entre les connections d'entrée (réseau) et de sortie (récepteur) du dispositif redresseur, de façon à recueillir en sortie des tensions et des courants d'ondulations suffisamment faibles pour être négligées.

Pour l'étude nous distinguerons les montages redresseurs à diodes, à thyristors et mixtes.

2- Plan d'étude des montages redresseurs

Lors de l'étude, nous considérerons que les éléments électroniques constituant les montages, diodes et thyristors, seront considérés comme des interrupteurs parfaits. En particulier on négligera la chute de tension à leurs bornes lorsqu'ils sont passants, et on supposera que les courants qui les traversent peuvent varier instantanément lors des commutations.

REDRESSEMENT NON COMMANDÉ MONOPHASÉS

1- Commutation simple alternance à diode

1.1- Débit sur une charge résistive

1- Schéma de principe

On envisage une structure comportant une source sinusoïdale et une diode pour atteindre une charge résistive. On distingue alors les trois blocs précédemment définis: une source, un commutateur et la charge.

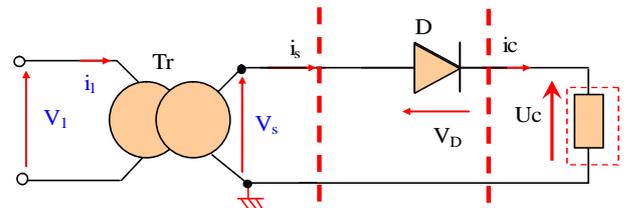


Figure 1. Montage d'un redresseur monophasé alimentant une charge purement résistive

2- Etude du fonctionnement

Dès que la tension d'entrée V_s est positive, la diode devient passante jusqu'à ce que le courant qui la traverse s'annule. Or $i_c(t)$ s'annule pour $t=T/2$. À partir de cet instant, la diode est bloquée. Par conséquent, la tension aux bornes de la charge résistive est:

$$\begin{cases} \text{Pour } 0 < t < \frac{T}{2} & U_c(t) = V_s = V_{\max} \sin(\omega t) \\ \text{Pour } \frac{T}{2} < t < T & U_c(t) = 0 \end{cases}$$

3- Etude des tensions

La valeur moyenne de la tension $U_c(t)$ est donc:

$$\langle U_c(t) \rangle = U_{\text{Cmoy}} = \frac{1}{T} \int_0^T U_c(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} V_{\max} \sin(\omega t) dt = \frac{V_{\max}}{\pi}$$

La valeur moyenne de la tension de sortie est positive et dépend uniquement des paramètres de la tension d'entrée.

- La tension maximale à supporter par les diodes en inverse est: $V_{D\max} = V_{D2}(\omega t = \pi/2) = -V_m$

4- Etude des courants

La valeur moyenne du courant $i_c(t)$ est donc:

$$\langle i(t) \rangle = I_{\text{Cmoy}} = \frac{1}{T} \int_0^T i_c(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \frac{V_{\max}}{R} \sin(\omega t) dt = \frac{V_{\max}}{\pi \cdot R}$$

La présence de la diode impose que le courant ait un signe constant. La valeur moyenne de ce courant est imposée par les paramètres de la source et de la charge résistive.

Les oscillogrammes sont donnés par la figure 2.

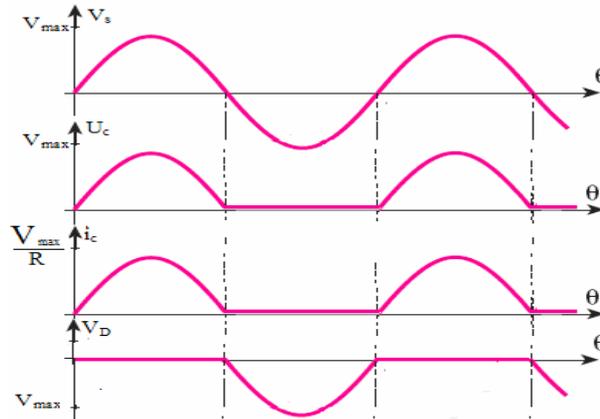


Figure 2. Chronogrammes des tensions et du courant pour une charge R.

1.2- Débit sur une charge inductive

En électrotechnique les charges sont souvent combinées: inductive et résistive. Le schéma permettant la nouvelle étude est ci-dessous:

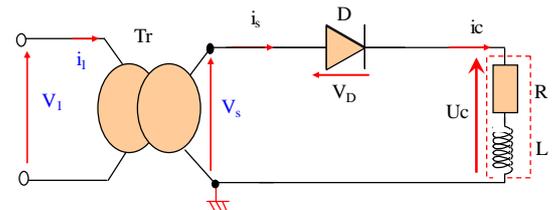


Figure 3. Montage d'un redresseur monophasé alimentant une charge inductive

La diode conduit dès que la tension V_s est positive.

Pour le courant $i_c(t)$, on assiste à un régime transitoire régit par l'équation différentielle suivante:

$$L \frac{di_c}{dt} + Ri_c = v_e(t) = V_{max} \cdot \sin(\omega t)$$

La résolution de l'équation différentielle admet deux solutions:

- Solution homogène $i_H(t)$: $L \frac{di_H}{dt} + Ri_H = 0 \Rightarrow i_H(t) = K \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$ Avec $\tau = \frac{L}{R}$

- Solution particulière $i_P(t)$: $j.L \omega I_P + R.I_P = V_s \Rightarrow I_P \cdot (R + j.L \omega) = V_s$

D'où:

$$I_P = \frac{V_s}{R + j.L \omega} \text{ Avec } \begin{cases} \|I_P\| = \frac{V_s}{\sqrt{R^2 + (L \omega)^2}} \\ \varphi = -\text{tg}^{-1}\left(\frac{L \omega}{R}\right) \end{cases}$$

Ainsi:

$$i_P(t) = \frac{V_s}{\sqrt{R^2 + (L \omega)^2}} \sin(\omega t + \varphi)$$

Donc La solution générale est:

$$i_G(t) = i_H(t) + i_P(t) = K \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{V_s}{\sqrt{R^2 + (L \omega)^2}} \sin(\omega t + \varphi)$$

Condition initiale à:

$$t = 0 \Rightarrow i_G(0) = 0 \Rightarrow K + \frac{V_s}{\sqrt{R^2 + (L \omega)^2}} \sin(\varphi) = 0$$

$$K = -\frac{V_s}{\sqrt{R^2 + (L \omega)^2}} \sin(\varphi)$$

Finalement l'expression générale $i_G(t)$ est:

$$i_G(t) = \frac{V_s}{\sqrt{R^2 + (L \omega)^2}} \left[\sin(\omega t + \varphi) - e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \sin(\varphi) \right]$$

On remarque la superposition du régime transitoire (terme exponentiel) et du régime permanent faisant apparaître le déphasage φ du courant sur la tension.

Le courant i_c ne s'annule pas pour $\theta = \pi$, mais un peu au-delà. La diode est alors en conduction forcée si bien que la tension V_s devient négative jusqu'à l'annulation de i_c .

Les oscillogrammes sont donnés par la figure.

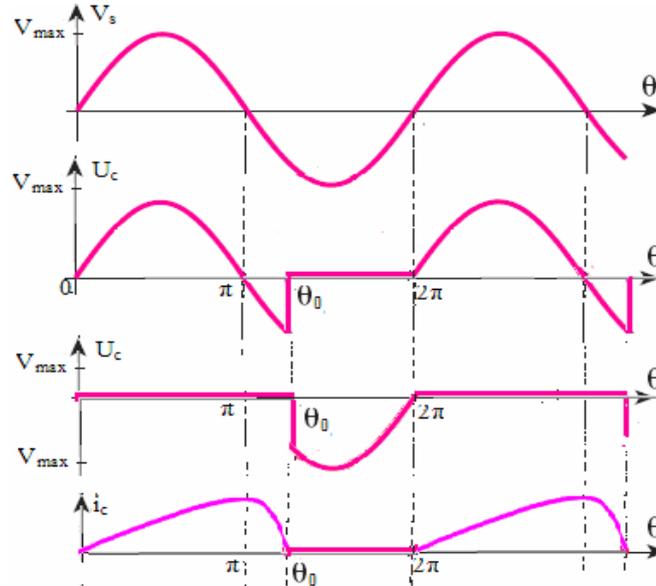


Figure 4. Chronogrammes des tensions et du courant pour une charge R-L.

Les performances du montage sont médiocres, la tension redressée U_c étant en partie négative, sa valeur moyenne est diminuée par rapport au cas d'une charge résistive.

1.3- Débit sur une charge inductive avec diode roue libre

Pour éviter cet inconvénient, on emploie une diode D_r dite «roue libre», montée en parallèle inverse sur la charge inductive.

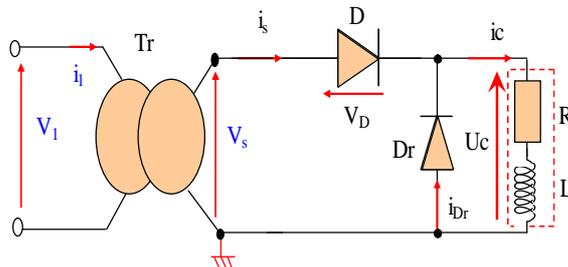


Figure 5. Montage d'un redresseur monophasé avec diode roue libre

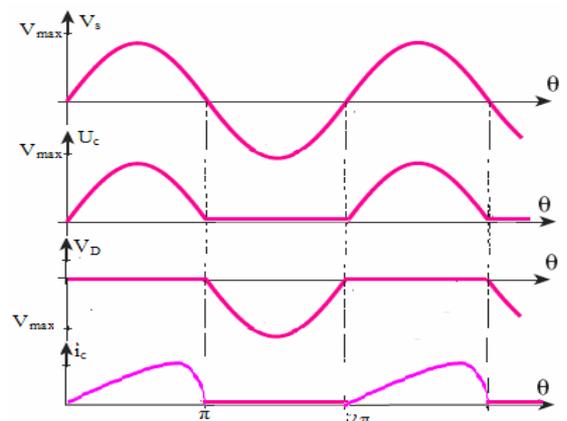


Figure 6. Chronogrammes des tensions et du courant pour une charge RL avec diode roue libre

La nouvelle structure représentée sur la figure ci-dessus, assure une phase de roue libre qui s'inspire de démagnétisation du circuit inductive.

Durant l'alternance positive de la tension V_s , la diode D est passante, si bien que D_r est bloquée.

Le comportement du montage est connu. Dès que V_s s'annule la diode D peut se bloquer car la diode D_r prend le relais de la conduction du courant i_c dans la charge. D_r conduisant, la tension à

ses bornes U_c est nulle. L'énergie emmagasinée dans l'inductance est dissipée dans la résistance R et le courant i_c décroît et s'annule en 0 . L'annulation du courant caractérise un fonctionnement en **conduction discontinue**. Si l'énergie est suffisante, le courant ne s'annule pas, c'est la **conduction continue**.

2- Commutation parallèle simple - P2 à diodes

1- Schéma de principe

Le montage redresseur P2 à diodes est constitué de deux diodes connectées en sortie d'un transformateur à point milieu:

2- Etude du fonctionnement

A partir du réseau monophasé, on obtient par l'intermédiaire du transformateur à point milieu deux tensions sinusoïdales V_1 et V_2 de même amplitude et déphasées entre elles de π :

$$V_2(t) = V_m \sin \omega t = V_m \sin (\omega t + \pi) = -V_1(t) = -V_m \sin \omega t$$

Les différentes phases de fonctionnement du montage sont alors décrites par le tableau suivant:

Intervalles	Diode passante	Tensions aux bornes des diodes bloquées	Tension redressée
$0 \leq \omega t < \pi$	D_1	$V_{D2} = V_2 - V_1 + V_{D1} \approx V_2 - V_1$	$U_c = V_1$
$\pi \leq \omega t < 2\pi$	D_2	$V_{D1} = V_1 - V_2 + V_{D2} \approx V_1 - V_2$	$U_c = V_2$

3- Etude des tensions

- Valeur moyenne de la tension redressée est donnée par:

$$\langle u \rangle = U_{moy} = \frac{1}{T} \int_0^T U_c(t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_m \cdot \sin \omega t \cdot d\omega t = \frac{V_m}{\pi} [-\cos \omega t]_0^{\pi} = \frac{2V_m}{\pi}$$

- Tension inverse maximale aux bornes des diodes bloquées

La tension aux bornes de la diode D_i est: $V_{Di} = V_{Dj} - V_j + V_i \approx V_i - V_j \quad i \in \{1,2\} \quad j \in \{2,1\}$

$$0 \leq \omega t < \pi \quad V_{D2} \approx V_2 - V_1 = -2V_m \sin \omega t$$

$$\pi \leq \omega t < 2\pi \quad V_{D1} \approx V_1 - V_2 = 2V_m \sin \omega t$$

La tension maximale à supporter par les diodes en inverse est: $V_{Dmax} = V_{D2}(\omega t = \pi/2) = -2V_m$

4- Etude des courants

Les valeurs maximale, moyenne et efficace de ces courants:

$$i_{max} = I_c \quad i_{moy} = \frac{1}{T} \int_0^T i_i(t) dt = \frac{I_c}{2} \quad , \quad i_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_i^2(t) dt} = \frac{I_c}{\sqrt{2}} \quad i \in \{1,2\}$$

3- Commutation parallèle double - PD2 à diodes

1- Schéma de principe

Le montage redresseur PD2 à diodes, ou pont de Graëtz, est constitué de quatre diodes connectées deux par deux en inverse:

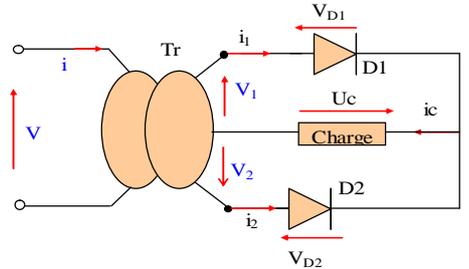


Figure 7. Montage d'un redresseur monophasé à point milieu

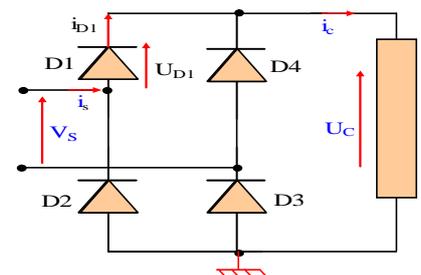


Figure 8. Montage d'un redresseur monophasé alimentant une charge inductive

2- Etude du fonctionnement

Les différentes phases de fonctionnement du montage sont alors décrites par le tableau suivant:

Intervalles	Diodes passantes	Tensions aux bornes des diodes bloquées	Tension redressée
$0 \leq \omega t < \pi$	D_1, D_3	$V_{D2} = -V_s + V_{D1} \approx -V_s$ $V_{D1} = -V_s + V_{D2} \approx -V_s$	$U_c = V_s$
$\pi \leq \omega t < 2\pi$	D_2, D_4	$V_{D1} = V_s + V_{D2} \approx V_s$ $V_{D2} = V_s + V_{D1} \approx V_s$	$U_c = -V_s$

3- Etude des tensions

- La valeur moyenne de la tension redressée est donnée par:

$$\langle u \rangle = U_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T U_c(t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_m \cdot \sin \omega t \cdot d\omega t = \frac{V_m}{\pi} [-\cos \omega t]_0^{\pi} = \frac{2V_m}{\pi}$$

- La tension maximale à supporter par les diodes en inverse est: $V_{D\text{max}} = V_{D2} (\omega t = \pi/2) = -V_m$

4- Etude des courants

Les valeurs maximale, moyenne et efficace de ces courants:

$$i_{\text{max}} = I_c \quad i_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T i_i(t) dt = \frac{I_c}{2} \quad , \quad i_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_i^2(t) dt} = \frac{I_c}{\sqrt{2}} \quad i \in \{1,2\}$$

On supposera que la charge est suffisamment inductive pour maintenir le courant de sortie constant. Les oscillogrammes sont donnés par la figure.

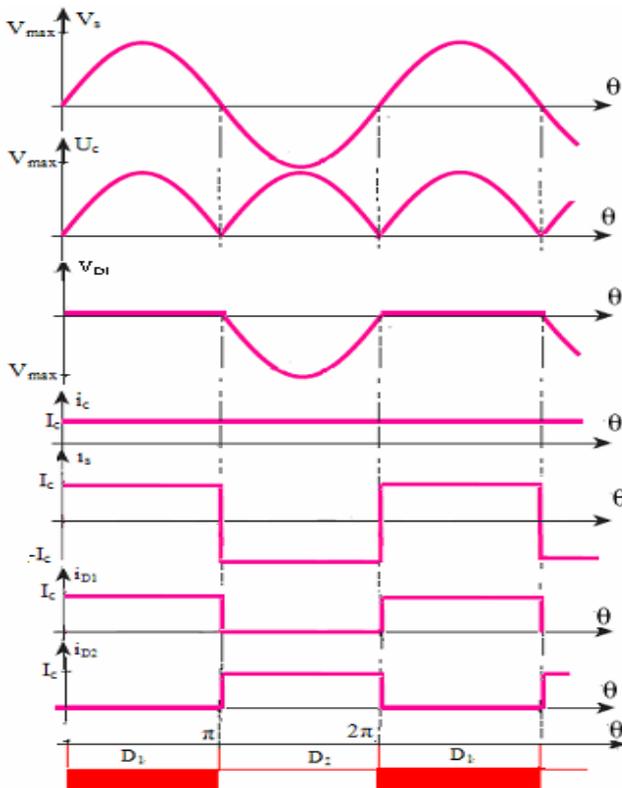


Figure 9. Forme d'onde sur un point milieu (redresseur double alternance)

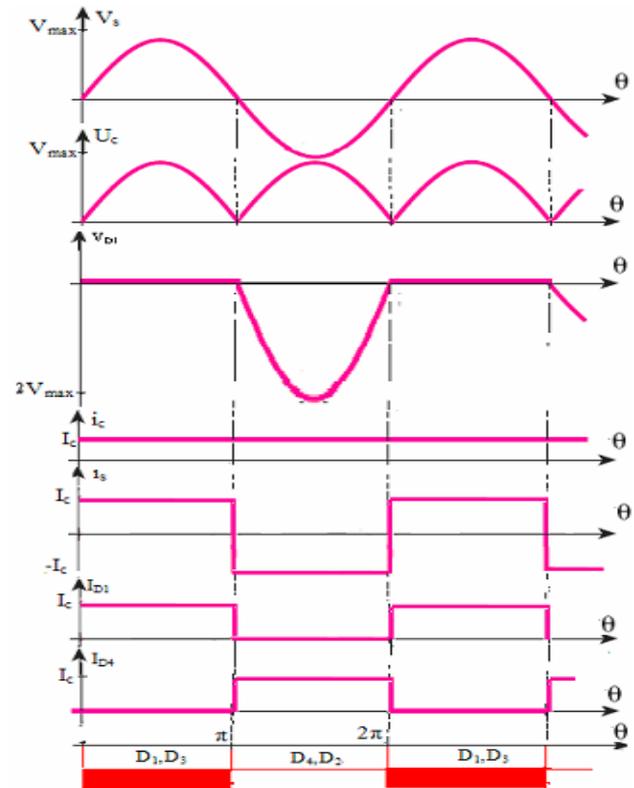


Figure 10. Forme d'onde sur un pont de greatz (redresseur double alternance)

REDRESSEMENT COMMANDÉ MONOPHASÉS

1- Commutation simple alternance à thyristor

Un montage redresseur commandé permet d'obtenir une tension continue réglable (de valeur moyenne non nulle) à partir d'une tension alternative sinusoïdale (de valeur moyenne nulle). L'utilisation de commutateurs commandable tels que les thyristors permet de réaliser des redresseurs dont la tension moyenne de sortie peut varier en fonction de l'angle d'amorçage α des commutateurs.

1.1- Débit sur une charge résistive:

À $t = t_0$, on amorce le thyristor en agissant sur sa gâchette. Il se met en régime de conduction jusqu'à ce que $i_c(t)$ s'annule à l'instant $t=T/2$, puis il se bloque spontanément. Il restera alors bloqué jusqu'à ce qu'il soit réamorçé. L'angle α correspondant à t_0 ($\alpha=2\pi.t_0/T$) s'appelle l'angle de retard à l'amorçage. Par conséquent, la tension aux bornes de la charge résistive est:

$$\begin{cases} \text{Pour } \theta \in \left[\alpha, \frac{T}{2} \right] & U_c(t) = V_s = V_{\max} \sin(\omega t) \\ \text{Pour } \theta \in [0, \alpha] \cup \theta \in \left[\frac{T}{2}, T \right] & U_c(t) = 0 \end{cases}$$

Les oscillogrammes sont donnés par la figure.

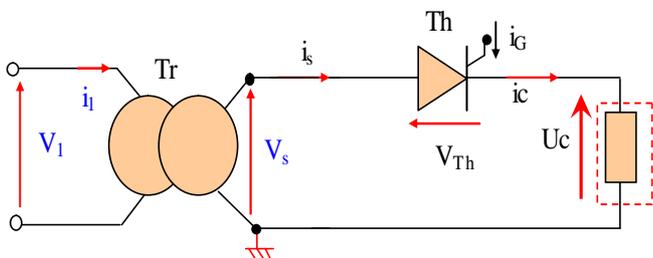


Figure 1. Montage d'un redresseur monophasé alimentant une charge purement résistive

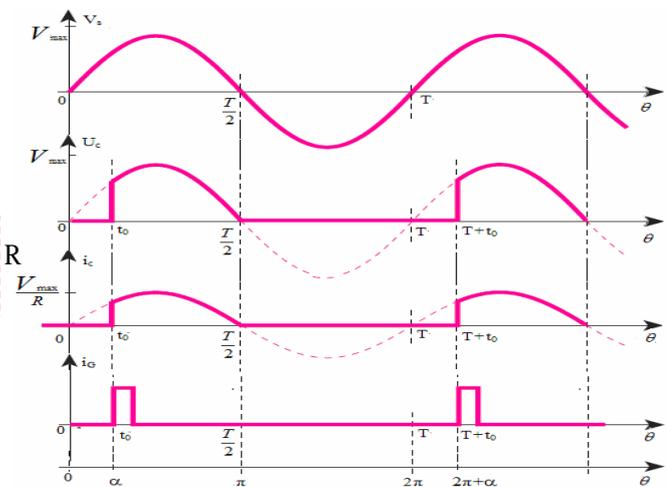


Figure 2. Forme d'onde redressement commandé monoalternance sur charge résistive

3- Etude des tensions : La valeur moyenne de la tension $U_c(t)$ est donc:

$$\langle U_c(t) \rangle = U_{Cmoy} = \frac{1}{T} \int_T U_c(t) dt = \frac{1}{T} \int_{\alpha}^{\frac{T}{2}} V_{\max} \sin(\omega t) dt = \frac{V_{\max}}{\pi} (1 + \cos \alpha)$$

La valeur moyenne de la tension de sortie U_c peut être ajustée en fonction de la valeur de l'angle de retard à l'amorçage α .

4- Etude des courants

La valeur moyenne du courant $i_c(t)$ est donc:

$$\langle i(t) \rangle = I_{Cmoy} = \frac{1}{T} \int_T i_c(t) dt = \frac{1}{T} \int_{\alpha}^{\frac{T}{2}} \frac{V_{\max}}{R} \sin(\omega t) dt = \frac{V_{\max}}{\pi \cdot R} (1 + \cos \alpha)$$

1.2- Débit sur une charge inductive

En électrotechnique les charges sont souvent combinées: inductive et résistive. Le schéma permettant la nouvelle étude est représenté sur la figure 3.

L'expression générale $i_G(t)$ est:
$$i_G(t) = \frac{V_M}{Z} \left[\sin(\omega t - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{R}{L\omega}(\omega t - \alpha)} \right]$$

Les performances du montage sont médiocres, la tension redressée U_c étant en partie négative, sa valeur moyenne est diminuée par rapport au cas d'une charge résistive. Pour éviter cet inconvénient, on emploie une diode Dr dite «roue libre», montée en parallèle inverse sur la charge inductive.

1.3- Débit sur une charge inductive avec diode roue libre

La nouvelle structure représentée sur la figure 4,

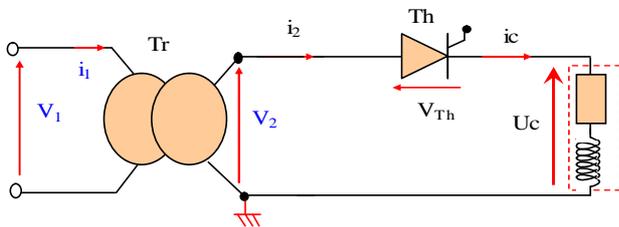


Figure 3. Montage d'un redresseur avec une charge inductive

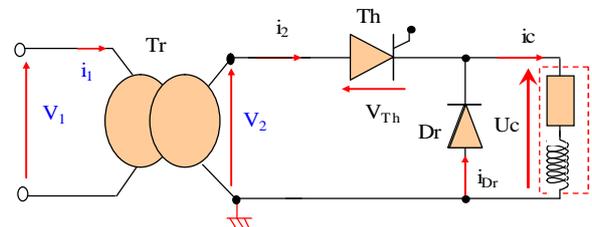


Figure 4. Charge R-L avec diode roue libre

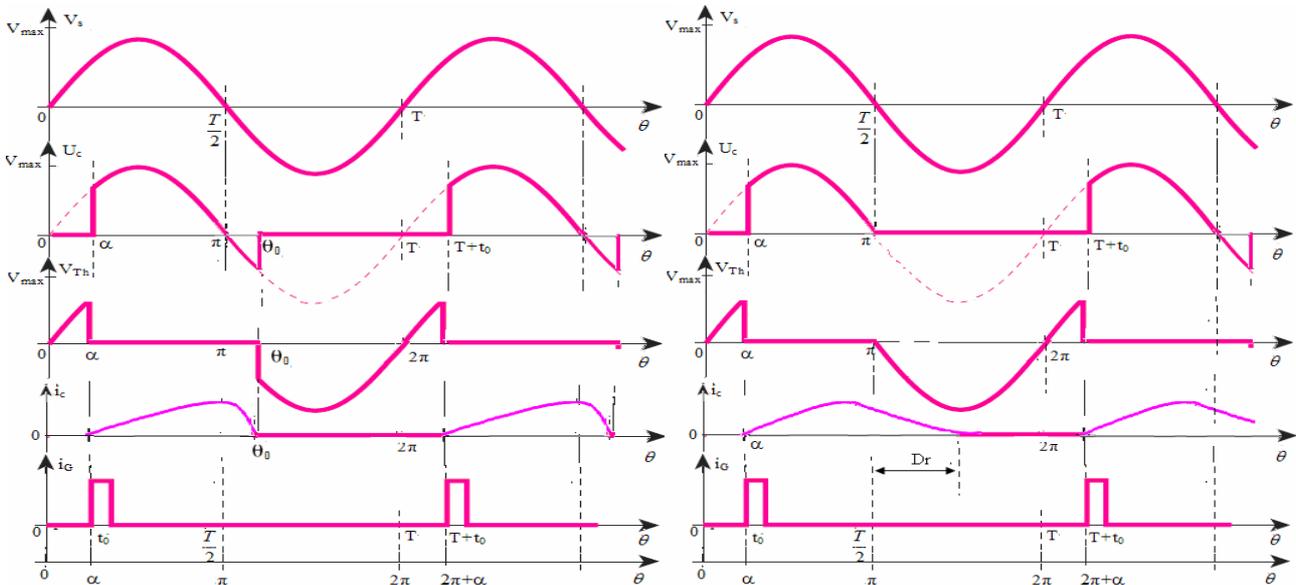


Figure 5. Chronogrammes des tensions et du courant pour une charge RL sans et avec diode

2- Commutation parallèle simple - P2 à thyristors

1- Schéma de principe

Le montage redresseur P2 à thyristors est constitué de deux thyristors connectés en sorties d'un transformateur à point milieu.

A partir du transformateur à point milieu deux tensions sinusoïdales V_1 et V_2 déphasées entre elles de π :

$$V_1(t) = V_m \sin \omega t = -V_2(t)$$

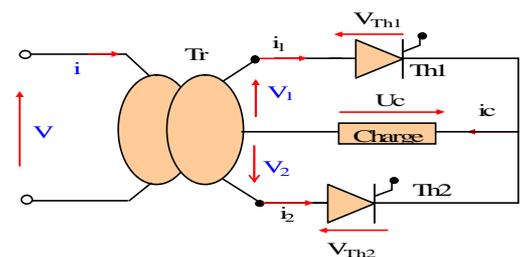


Figure 6. Redresseur commandé à point milieu

Les impulsions de déblocage sont envoyées sur les gâchettes des thyristors respectivement aux angles. Pour Th_1 $\omega t = \alpha + 2k\pi$ Pour Th_2 $\omega t = (\alpha + \pi) + 2k\pi$

2- Etude du fonctionnement

Les différentes phases de fonctionnement du montage sont alors décrites par le tableau suivant:

Intervalles	Thyristors passants	Tensions aux bornes des thyristors bloqués	Tension redressée
$\alpha \leq \omega t < 2\pi + \alpha$	Th_1	$V_{Th2} = V_2 - U_c$	$U_c = V_1$
$\pi + \alpha \leq \omega t < 2\pi + \alpha$	Th_2	$V_{Th1} = V_1 - U_c$	$U_c = V_2$

- La tension aux bornes du thyristor th_i est: $V_{Thi} = V_{Thj} - V_j + V_i \approx V_i - V_j$ $i \in \{1,2\}$ $j \in \{2,1\}$

La tension aux bornes du thyristor bloqué th_2 est:

$$\left. \begin{array}{l} \alpha \leq \pi/2 \quad V_{Thmax} = V_{th2} (\omega t = \pi/2) = -2V_m \\ \alpha > \pi/2 \quad V_{Thmax} = V_{th2} (\omega t = 3\pi/2) = 2V_m \end{array} \right\} V_{Thmax} = \pm 2V_m$$

2- Commutation parallèle double - PD2 à thyristors

Le montage redresseur PD2 à thyristors est constitué de quatre thyristors connectés deux par deux en inverse:

Les impulsions de déblocage sont envoyées sur les gâchettes des thyristors respectivement aux angles.

Pour th_1 et th_4 $\omega t = \alpha + 2k\pi$,

Pour th_2 et th_3 $\omega t = (\alpha + \pi) + 2k\pi$

Les différentes phases de fonctionnement du montage sont alors:

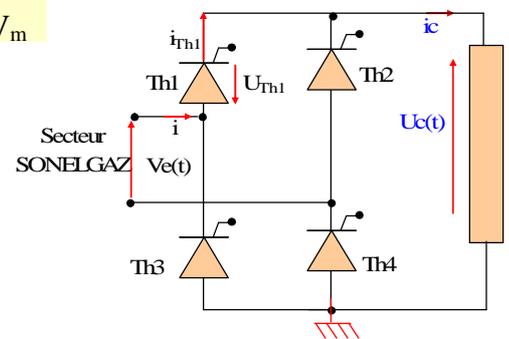


Figure 7. Redresseur commandé en pont sur charge R L.

Intervalles	Thyristors passants	Tensions aux bornes des thyristors bloqués	Tension redressée
$\alpha \leq \omega t < \pi + \alpha$	th_1, th_4	$V_{th2} = -V_s + V_{th1} \approx -V_s$ $V_{th3} = -V_s + V_{th4} \approx -V_s$	$U_c = V_s$
$\pi + \alpha \leq \omega t < 2\pi + \alpha$	th_2, th_3	$V_{th1} = V_s + V_{th2} \approx V_s$ $V_{th4} = V_s + V_{th3} \approx V_s$	$U_c = -V_s$

1- Etude des tensions

- La valeur moyenne de la tension redressée est donnée par:

$$\langle u \rangle = U_{moy} = \frac{1}{T} \int U_c(t) dt = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} V_m \cdot \sin \omega t \cdot d\omega t = \frac{V_m}{\pi} [-\cos \omega t]_{\alpha}^{\pi+\alpha} = \frac{2V_m}{\pi} \cdot \cos \alpha$$

Deux cas sont à considérer:

- $\alpha \leq \pi/2$, la valeur moyenne de la tension redressée est positive, le transfert de puissance se fait du coté alternatif vers le coté continu, le système **fonctionne en redresseur**.

- $\alpha > \pi/2$, la valeur moyenne de la tension redressée est négative, le transfert de puissance se fait du coté continu vers le coté alternatif, le système **fonctionne en onduleur**. Le réseau continu néanmoins à imposer la fréquence et à fournir de la puissance réactive, d'où la précision parfois ajoutée dans la dénomination **d'onduleur non-autonome**.

2- Etude des courants

Les valeurs maximale, moyenne et efficace de ces courants sont:

$$i_{max} = I_c \quad i_{moy} = \frac{1}{T} \int i_i(t) dt = \frac{I_c}{2} \quad , \quad i_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int i_i^2(t) dt} = \frac{I_c}{\sqrt{2}} \quad i \in \{1,2\}$$

On supposera que la charge est suffisamment inductive pour maintenir le courant de sortie constant. Les oscillogrammes sont donnés par la figure.

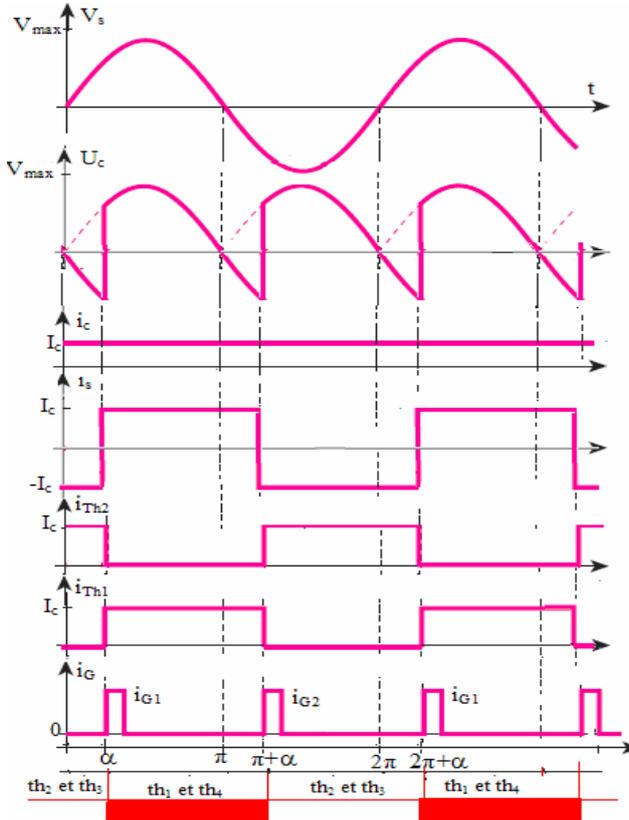
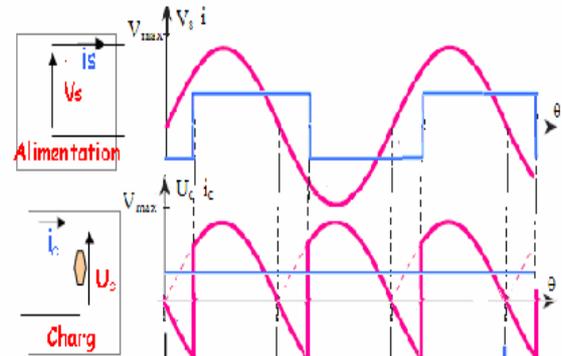


Figure 10. Forme d'onde sur un pont mixte



ALIMENTATION	Signe de V_s	+	+	-	-	+	+	-
	Signe de i_s	-	+	+	-	-	+	+
	Signe de la Convention	-	+	-	-	-	+	-
GENERATEUR								
RECEPTEUR	Fonctionnement	R	G	R	G	R	G	R
	Signe de U_c	-	+	-	-	+	+	-
	Signe de i_c	+	+	+	-	+	+	+
RECEPTEUR								
Fonctionnement	G	R	G	R	R	R	G	
Fonctionnement	0n	Re	0r	Red	Re	Rec	0n	

Figure 11. Représente les puissances transférées

3- Commutation parallèle double - PD2 mixte

1- Schéma de principe

Le montage redresseur PD2 mixte de deux thyristors Et de diodes connectés comme suit:

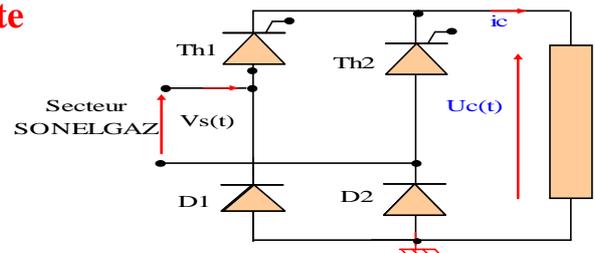


Figure 12. Redresseur commandé mixte

2- Etude du fonctionnement

Les impulsions de déblocage sont envoyées sur les gâchettes des thyristors respectivement aux angles. Pour $th_1 \quad \omega t = \alpha + 2k\pi$, Pour $th_2 \quad \omega t = (\alpha + \pi) + 2k\pi$

Les différentes phases de fonctionnement du montage sont alors décrites par le tableau suivant:

Intervalles	Éléments passants	Tensions aux bornes des éléments bloqués	Tension redressée
$\alpha \leq \omega t < \pi$	th_1, D_2	$V_{th2} = -V_s + V_{th1} \approx -V_s$ $V_{D1} = -V_s + V_{D2} \approx -V_s$	$U_c = V_s$
$\pi \leq \omega t < \pi + \alpha$	th_1, D_1	$V_{th2} = -V_s + V_{th1} \approx -V_s$ $V_{D2} = V_s + V_{D1} \approx V_s$	$U_c = 0$
$\pi + \alpha \leq \omega t < 2\pi$	th_2, D_1	$V_{th1} = V_s + V_{th2} \approx V_s$ $V_{D2} = V_s + V_{D1} \approx V_s$	$U_c = -V_s$
$2\pi \leq \omega t < 2\pi + \alpha$	th_2, D_2	$V_{th1} = V_s + V_{th2} \approx V_s$ $V_{D1} = -V_s + V_{D2} \approx -V_s$	$U_c = 0$

3- Etude des tensions

- La valeur moyenne de la tension redressée est donnée par:

$$\langle u \rangle = U_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_T U_c(t) dt = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m \cdot \sin \omega t \cdot d\omega t = \frac{V_m}{\pi} [-\cos \omega t]_{\alpha}^{\pi} = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha)$$

- Tensions maximales aux bornes des diodes et des thyristors bloqués

$$\left. \begin{array}{l} \alpha \leq \pi/2 \quad V_{\text{thmax}} = V_{\text{th2}}(\omega t = \pi/2) = -V_m \\ \alpha > \pi/2 \quad V_{\text{thmax}} = V_{\text{th2}}(\omega t = 3\pi/2) = +V_m \end{array} \right\} V_{D1} = -V_s + V_{D2} \approx -V_s$$

La tension maximale à supporter par les diodes en inverse est $V_{D\text{max}} = V_{D1}(\omega t = \pi/2) = -V_m$

4- Etude des courants

Les valeurs maximale, moyenne et efficace de ces courants sont:

$$i_{\text{max}} = I_c \quad i_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_T i_i(t) dt = \frac{I_c}{2} \quad , \quad i_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_T i_i^2(t) dt} = \frac{I_c}{\sqrt{2}} \quad i \in \{1,2\}$$

On supposera que la charge est suffisamment inductive pour maintenir le courant de sortie constant. Les oscillogrammes sont donnés par la figure.

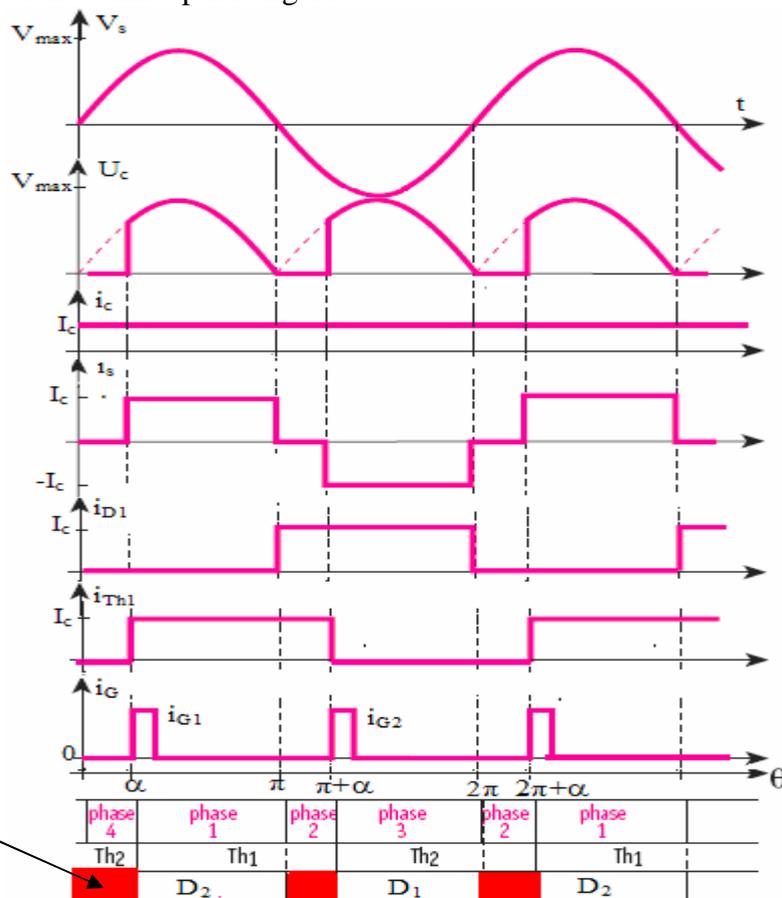


Figure 13. Forme d'onde sur un pont mixte (redresseur double alternance)

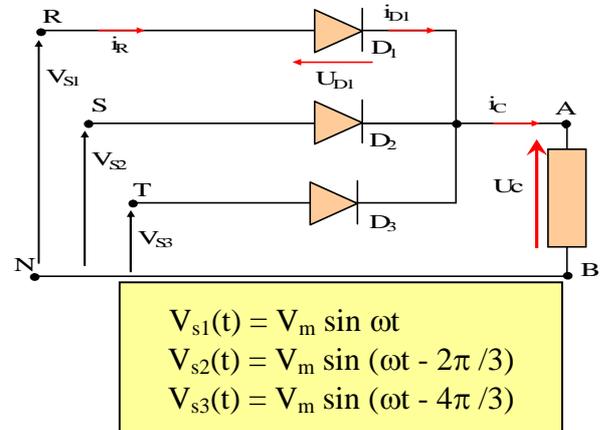
REDRESSEURS TRIPHASÉS

1- Commutation parallèle simple P3 à diodes

1- Schéma de principe

Le montage redresseur P3 à diodes est constitué de trois diodes, connectées chacune à une phase du secondaire d'un transformateur triphasé.

A partir du réseau triphasé, on obtient au secondaire du transformateur un système triphasé équilibré de tensions (V_{s1} , V_{s2} , V_{s3}), qu'on notera:

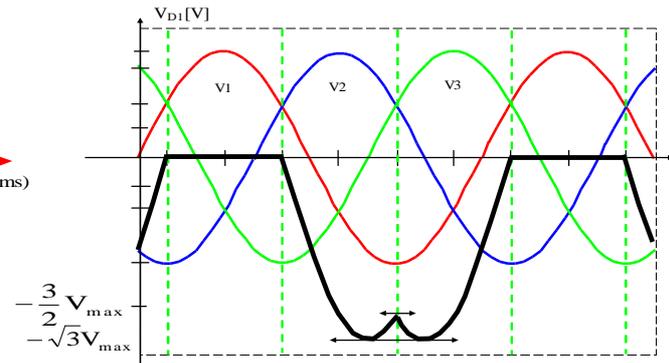
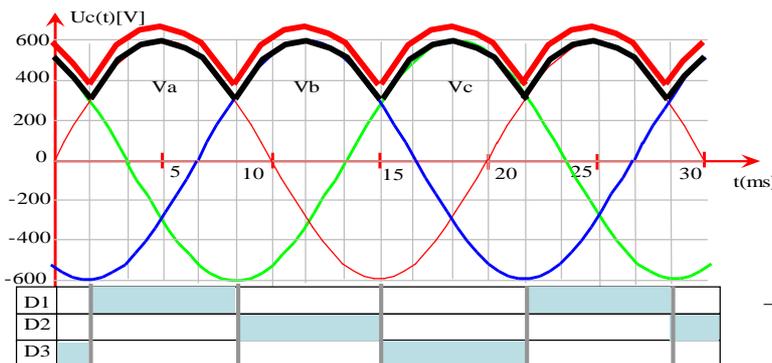


2- Etude du fonctionnement

Les différentes phases de fonctionnement du montage sont alors décrites par le tableau suivant:

Intervalles	Diode passante	Tensions aux bornes des diodes bloquées	Tension redressée
$\pi/6 \leq \omega t < 5\pi/6$	D ₁	$V_{D2} = V_{D1} - V_{s1} + V_{s2} \approx V_{s2} - V_{s1}$	$U_c = V_{s1}$
$5\pi/6 \leq \omega t < 3\pi/2$	D ₂	$V_{D2} = 0$	$U_c = V_{s2}$
$3\pi/2 \leq \omega t < 13\pi/6$	D ₃	$V_{D2} = V_{D3} - V_{s3} + V_{s2} \approx V_{s2} - V_{s3}$	$U_c = V_{s3}$

Les trois diodes forment un redresseur plus positif, qui laisse passer à tout instant la plus positive des tensions, soit :



3- Etude des tensions

- La valeur moyenne de la tension redressée est donnée par:

$$\langle U \rangle = U_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_T U_c(t) dt = \frac{3}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} V_m \cdot \sin \theta \cdot d\theta = \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi}$$

- Tension inverse maximale aux bornes des diodes bloquées

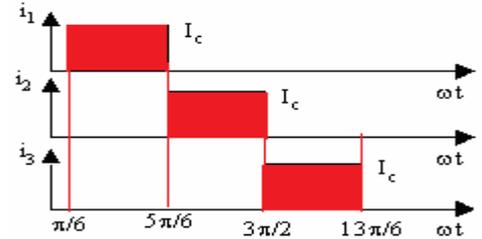
Lorsque la diode D_i ($i \in \{1, 2, 3\}$) est passante, la tension aux bornes de D_j bloquée ($j \in \{1, 2, 3\}$) est :

$$V_{Dj} = V_{Di} - V_{si} + V_{sj} \approx V_{sj} - V_{si} \quad i \in \{1, 2, 3\} \quad j \in \{1, 2, 3\}.$$

La tension maximale à supporter en inverse par les diodes est : $V_{D_{\text{max}}} = V_{D2}(\omega t = \pi/3) = -\sqrt{3}V_m$

4- Etude des courants

Les formes d'ondes des courants dans ces dernières:



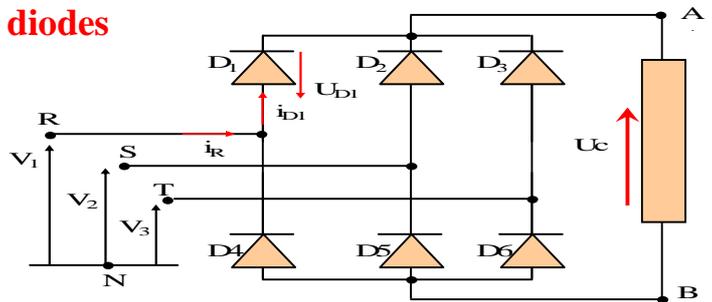
D'où les expressions de i_{max} , i_{moy} et i_{eff} , les valeurs maximale, moyenne et efficace de ces courants:

$$i_{max} = I_c \quad i_{moy} = \frac{1}{T} \int i_i(t) dt = \frac{I_c}{3} \quad , \quad i_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int i_i^2(t) dt} = \frac{I_c}{\sqrt{3}} \quad i \in \{1,2,3\}$$

2- Commutation parallèle double PD3 à diodes

1- Schéma de principe

Le montage redresseur PD3 à diodes est constitué de six diodes, connectées deux par deux en inverse

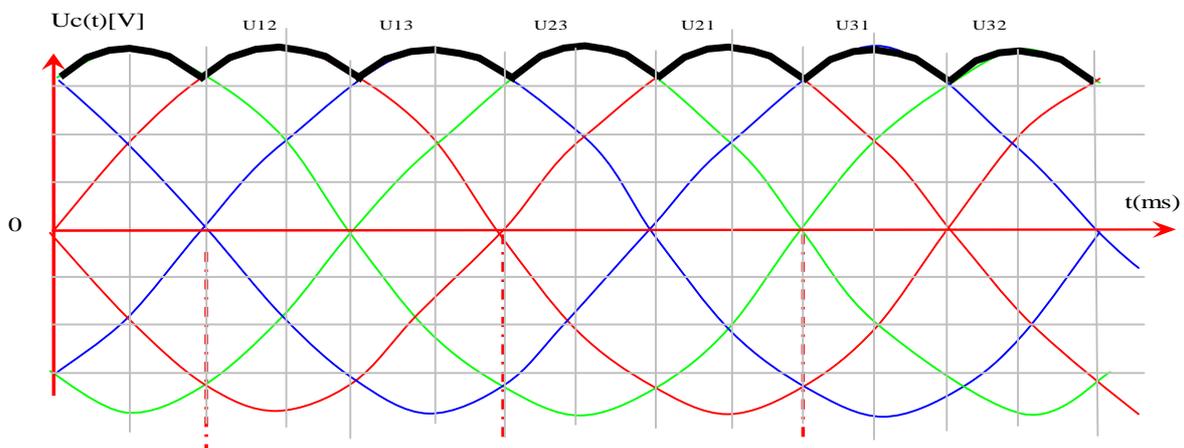


2- Etude du fonctionnement

Les différentes phases de fonctionnement du montage sont alors décrites par le tableau suivant:

Intervalles	Diodes passantes	Tension aux bornes de la diode D2	Tension redressée
$\pi/6 \leq \omega t < \pi/2$	D1, D5	$V_{D2} = V_{D1} - V_{s1} + V_{s2} \approx V_{s2} - V_{s1}$	$U_c = V_{s1} - V_{s2}$
$\pi/2 \leq \omega t < 5\pi/6$	D1, D6	$V_{D2} = V_{D1} - V_{s1} + V_{s2} \approx V_{s2} - V_{s1}$	$U_c = V_{s1} - V_{s3}$
$5\pi/6 \leq \omega t < 7\pi/6$	D2, D6	$V_{D2} = 0$	$U_c = V_{s2} - V_{s3}$
$7\pi/6 \leq \omega t < 3\pi/2$	D2, D4	$V_{D2} = 0$	$U_c = V_{s2} - V_{s1}$
$3\pi/2 \leq \omega t < 11\pi/6$	D3, D4	$V_{D2} = V_{D3} - V_{s3} + V_{s2} \approx V_{s2} - V_{s3}$	$U_c = V_{s3} - V_{s1}$
$11\pi/6 \leq \omega t < 13\pi/6$	D3, D5	$V_{D2} = V_{D3} - V_{s3} + V_{s2} \approx V_{s2} - V_{s3}$	$U_c = V_{s3} - V_{s2}$

Les trois diodes D1, D2, D3 forment **un commutateur plus positif**, qui laisse passer à tout instant la plus positive des tensions, et les diodes D4, D5, D6 forment **un commutateur plus négatif**, qui laisse passer la plus négative des tensions. La tension redressée est à tout instant la différence entre ces deux tensions, soit :



3- Etude des tensions

La valeur moyenne de la tension redressée est donnée par:

$$\langle U \rangle = U_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_T U_c(t) dt = \frac{3}{2\pi} \int_{\pi/6}^{\pi/2} V_m \left[\sin \theta - \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \right] d\theta = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi}$$

D'après l'étude du fonctionnement, lorsque la diode D_i ($i \in \{1, 2, 3\}$) est passante, la tension aux bornes de D_j bloquée ($j \in \{1, 2, 3\}$) est : $V_{D_j} = V_{D_i} - V_{s_i} + V_{s_j} \approx V_{s_j} - V_{s_i}$ $i \in \{1, 2, 3\}$ $j \in \{1, 2, 3\}$

De même, lorsque la diode D'_i ($i \in \{1, 2, 3\}$) est passante, la tension aux bornes de D_j bloquée ($j \in \{1, 2, 3\}$) est : $V_{D_j} = V_{s_i} - V_{s_j} + V_{D'_i} \approx V_{s_i} - V_{s_j}$ $i \in \{1, 2, 3\}$ $j \in \{1, 2, 3\}$

La tension maximale à supporter par les diodes en inverse correspond à la tension maximale

$$V_{D_{\text{max}}} = V_{D_2}(\omega t = \pi/3) = -\sqrt{3}V_m$$

4- Etude des courants

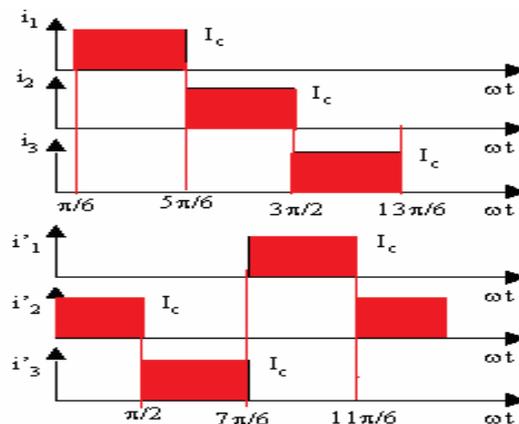
Le courant de sortie étant considéré comme constant, de valeur I_c , et les diodes parfaites, on déduit de l'étude du fonctionnement les formes d'ondes des courants dans ces dernières:

i_1, i_2, i_3 sont respectivement les courants dans les diodes D_1, D_2, D_3 .

i'_1, i'_2, i'_3 sont respectivement les courants dans les diodes D_4, D_5, D_6 .

D'où les expressions de $i_{\text{max}}, i_{\text{moy}}$ et i_{eff} , les valeurs maximale, moyenne et efficace de ces courants:

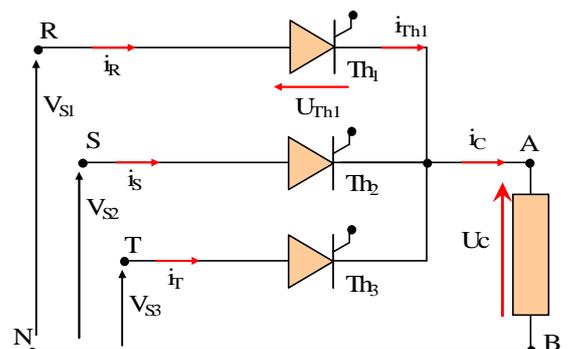
$$i_{\text{max}} = I_c \quad i_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_T i_i(t) dt = \frac{I_c}{3} \quad , \quad i_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_T i_i^2(t) dt} = \frac{I_c}{\sqrt{3}} \quad i \in \{1, 2, 3\}$$



3- Commutation parallèle simple P3 à thyristors

1- Schéma de principe

Le montage redresseur P3 à thyristors est constitué de trois thyristors, connecté chacun à une phase du secondaire d'un transformateur triphasé, dont les enroulements secondaires sont groupés en étoile.



Les thyristors sont débloqués avec un retard en angle de α , c'est à dire que des impulsions de déblocage sont envoyées sur les gâchettes des thyristors respectivement aux angles:

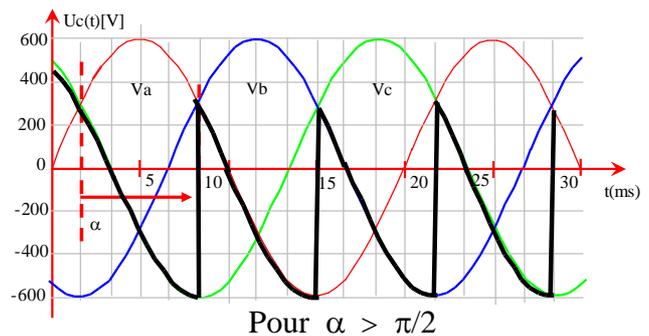
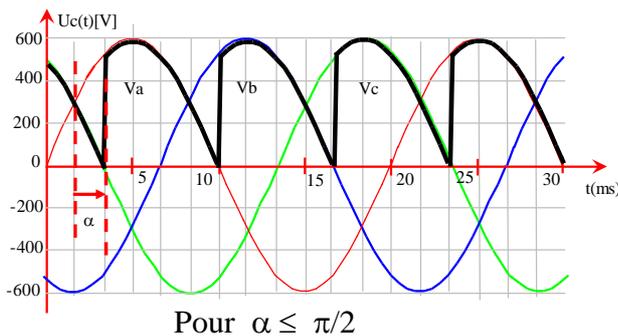
$$\begin{aligned} \text{Pour } th_1 & \quad \omega t = (\pi/6 + \alpha) + 2k\pi \\ \text{Pour } th_2 & \quad \omega t = (5\pi/6 + \alpha) + 2k\pi \\ \text{Pour } th_3 & \quad \omega t = (3\pi/2 + \alpha) + 2k\pi \end{aligned}$$

2- Etude du fonctionnement

Les différentes phases de fonctionnement du montage sont alors décrites par le tableau suivant:

Intervalles	Thyristors passants	Tensions aux bornes des diodes	Tension redressée
$\pi/6 + \alpha \leq \omega t < 5\pi/6 + \alpha$	th_1	$V_{th2} = V_{th1} - V_{s1} + V_{s2} \approx V_{s2} - V_{s1}$	$U_c = V_{s1}$
$5\pi/6 + \alpha \leq \omega t < 3\pi/2 + \alpha$	th_2	$V_{th1} = V_{th2} - V_{s2} + V_{s1} \approx V_{s1} - V_{s2}$	$U_c = V_{s2}$
$3\pi/2 + \alpha \leq \omega t < 13\pi/6 + \alpha$	th_3	$V_{th2} = V_{th3} - V_{s3} + V_{s2} \approx V_{s2} - V_{s3}$	$U_c = V_{s3}$

D'après le tableau ci-dessus, la forme d'onde de la tension redressée est:



3- Etude des tensions

La valeur moyenne de la tension redressée est donnée par:

$$\langle u \rangle = U_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_{\tau} U_c(t) dt = \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{5\pi}{6} + \alpha} V_m \cdot \sin \theta \cdot d\theta = \frac{3\sqrt{3} V_m}{2\pi} \cos \alpha$$

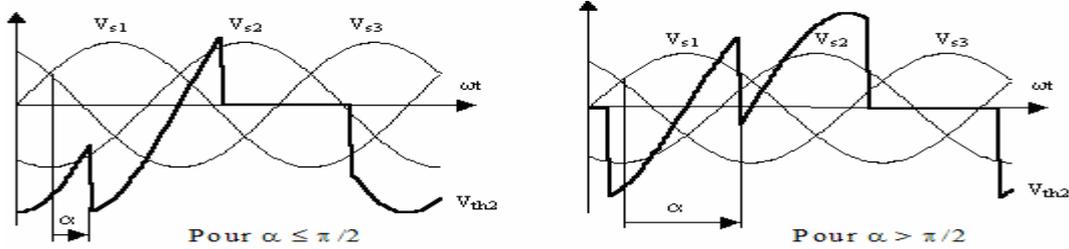
Rappelons que le retard à l'amorçage α est compris dans l'intervalle $[0, \pi[$. Deux cas sont à considérer:

- $\alpha \leq \pi/2$, la valeur moyenne de la tension redressée est positive, il en est donc de même pour la puissance active fournie par le réseau au récepteur ($P = U_{c\text{moy}} I_c$); le transfert de puissance se fait du coté alternatif vers le coté continu, le système fonctionne en **redresseur**.
- $\alpha > \pi/2$, la valeur moyenne de la tension redressée est négative ainsi donc que la puissance active; le transfert de puissance se fait du coté continu vers le coté alternatif, le système fonctionne en **onduleur** ou **redresseur inversé**. Le réseau continu néanmoins à imposer la fréquence et à fournir de la puissance réactive, d'où la précision parfois ajoutée dans la dénomination **d'onduleur non-autonome**.
- Tensions maximales aux bornes des thyristors bloqués

Lorsque le thyristor th_i ($i \in \{1, 2, 3\}$) est passant, la tension aux bornes de th_j bloqué ($j \in \{1, 2, 3\}$) est: $V_{thj} = V_{thi} - V_{si} + V_{sj} \approx V_{sj} - V_{si}$ $i \in \{1, 2, 3\}$ $j \in \{1, 2, 3\}$

ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

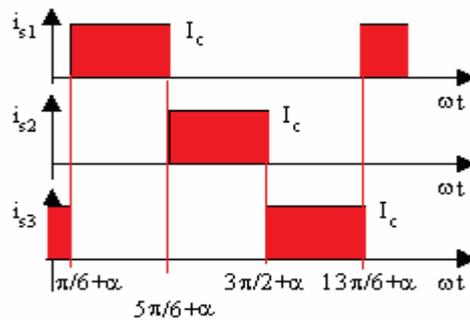
Considérons, par exemple, le thyristor th_2 , la tension à ses bornes a l'allure suivante:



La tension maximale à supporter par les thyristors est : $V_{thmax} = \pm \sqrt{3}V_m$

4- Etude des courants

Le courant de sortie étant considéré comme constant, de valeur I_c , et les thyristors parfaits, on déduit de l'étude du fonctionnement les formes d'ondes des courants dans ces derniers:

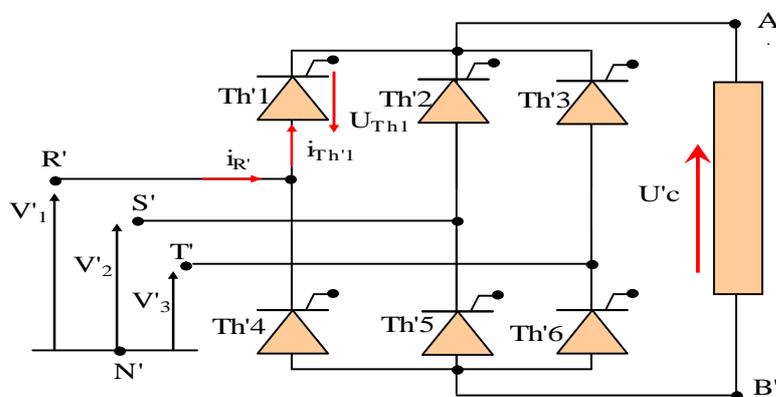


i_1, i_2, i_3 sont respectivement les courants dans les thyristors th_1, th_2, th_3 .

D'où les expressions de i_{max} , i_{moy} et i_{eff} , les valeurs maximale, moyenne et efficace de ces courants:

$$i_{max} = I_c \quad i_{moy} = \frac{1}{T} \int_T i_i(t) dt = \frac{I_c}{3} \quad , \quad i_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_T i_i^2(t) dt} = \frac{I_c}{\sqrt{3}} \quad i \in \{1,2,3\}$$

2- Commutation parallèle double PD3 à thyristors



CONVERTISSEURS AC/AC

1- Introduction

Un gradateur est un interrupteur statique caractériser par un fonctionnement avec un phénomène de commutation naturelle.

1- Schéma de principe

L'élément de base est formé de deux thyristors montés en têtes bêtes (ou en anti-parallèle) et placés entre la source et le récepteur (figure 1). La source de la tension V_s est supposée parfaite; elle fournit une tension sinusoïdale.

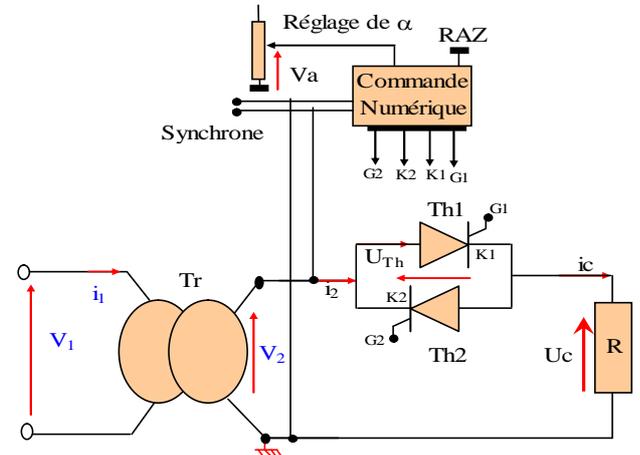


Figure 1. Schéma d'un gradateur et sa commande numérique

2- Etude du fonctionnement

Quand on envoie une impulsion sur la gâchette d'un des deux thyristors, celui-ci conduit si la tension appliquée entre son anode et sa cathode est positive puis il se bloque lorsque le courant qui le traverse s'annule. Le fonctionnement du gradateur monophasé doit être envisagé suivant la nature de la charge

1-Charge résistive :

Les thyristors sont débloqués avec un retard en angle de α , c'est à dire que des impulsions de déblocage sont envoyées sur les gâchettes des thyristors respectivement aux angles.

Pour Th_1 $\omega t = \alpha + 2k\pi$

Pour Th_2 $\omega t = (\alpha + \pi) + 2k\pi$

2- Etude du fonctionnement

Les différentes phases de fonctionnement du montage sont alors décrites par le tableau suivant:

Intervalles	Thyristors passants	Tensions aux bornes des thyristors bloqués	Tension redressée
$0 \leq \omega t < \alpha$	Aucun	$V_{Th2} = V_2 - U_c$	$U_c = V_1$
$\alpha \leq \omega t < \pi$	Th_1	$V_{Th2} = V_1 - U_c$	$U_c = 0$
$\pi \leq \omega t < \pi + \alpha$	Aucun	$V_{Th2} = V_2 - U_c$	$U_c = V_1$
$\pi + \alpha \leq \omega t < 2\pi$	Th_2	$V_{Th2} = 0$	$U_c = 0$

$$U_c(\theta) = \begin{cases} V_M \sin \theta \rightarrow \theta \in [\alpha, \pi] \cup [\pi + \alpha, 2\pi] \\ 0 \text{ ailleurs} \end{cases}$$

- La valeur efficace de la tension de la tension au bornes de la charge est donnée par:

$$U_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_T U_c^2 dt} = V_{\text{eff}} \sqrt{\left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}\right)}$$

La tension redressée a donc l'allure suivante:

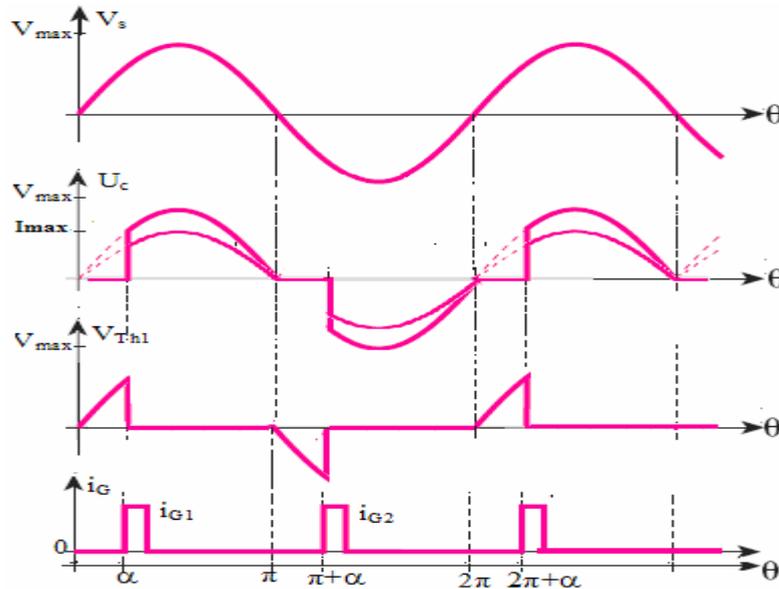


Figure 2. Allure de la tension et du courant aux bornes de la charge purement résistive

2- Charge résistive et inductive:

Dans le cas d'une charge inductive nous devons tenir compte de la valeur relative du retard à l'amorçage α , et du déphasage propre du circuit φ . Ce dernier réduit la plage de variation de l'angle α . Pour un circuit R-L série (Figure 3), savons que:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{L \omega}{R} \quad \text{et} \quad Z = \sqrt{R^2 + L \omega^2}$$

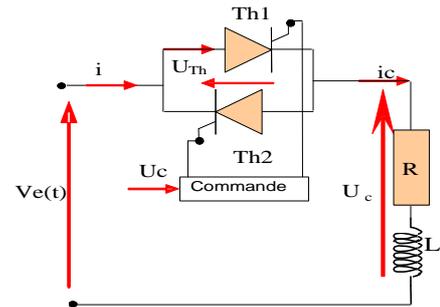


Figure 3. Montage d'un gradateur avec une charge R-L

Lors de l'allumage, l'expression du courant est donnée par :

$$L \frac{di_c}{dt} + Ri_c = v_c(t) = V_{\max} \cdot \sin(\omega t)$$

Solution homogène $i_H(t)$ donne: $L \frac{di_H}{dt} + Ri_H = 0 \Rightarrow i_H(t) = K \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$ Avec $\tau = \frac{L}{R}$

Solution particulière $i_p(t)$ donne: $i_p(t) = \frac{V_{s\max}}{Z} \sin(\omega t - \varphi)$

D'où, la solution générale $i_G(t)$ est :

$$i_G(t) = \frac{V_{s\max}}{Z} \sin(\omega t - \varphi) + K \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Les conditions initiales : à $t = \alpha \Rightarrow i_G = 0$ $K = -\frac{V_{s\max}}{Z} \sin(\alpha - \varphi) e^{\frac{\alpha}{\omega \tau}} \Rightarrow i_H(t) = -\frac{V_{s\max}}{Z} \left[\sin(\alpha - \varphi) e^{\frac{\alpha - \omega t}{\omega \tau}} \right]$

$$i_G(t) = \frac{V_{s\max}}{Z} \left[\sin(\omega t - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{\frac{\alpha - \omega t}{\omega \tau}} \right]$$

Ainsi:

L'analyse du courant $i_G(t)$, permet d'avoir trois cas possibles suivant le signe de $(\alpha - \varphi)$.

■ Cas où $\alpha = \varphi \Rightarrow i_G(t) = \frac{V_{s\max}}{Z} [\sin(\omega t - \varphi)]$

■ Cas où $(\varphi < \alpha < \pi)$:

Dans cas il n'y a pas de régime transitoire

L'allure est représentée ci-dessous

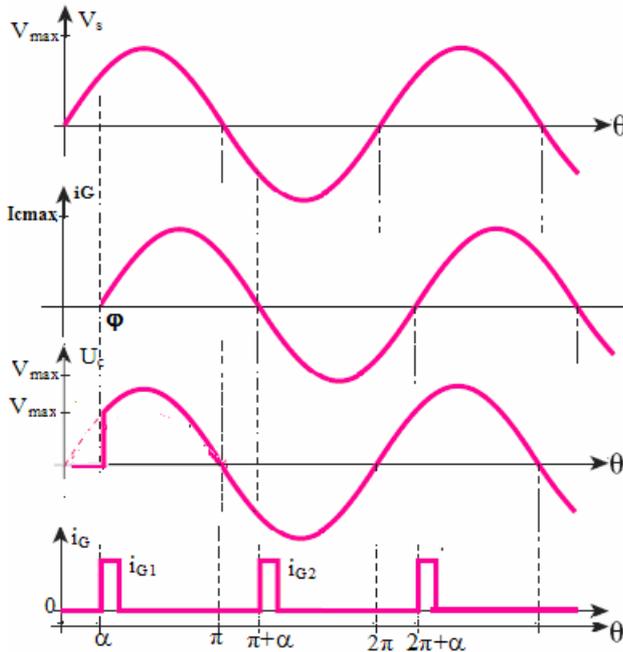


Figure 4. Allure de la tension et du courant aux bornes de la charge R-L avec $\alpha = \varphi$

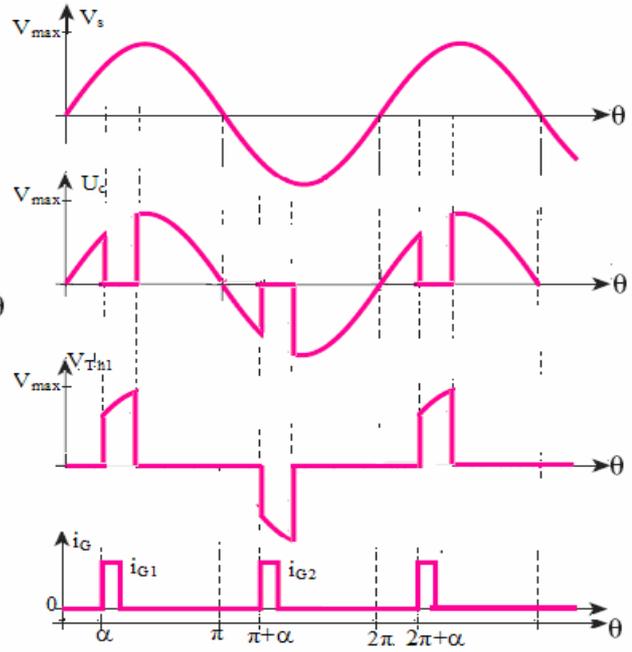


Figure 5. Les allures de la tension et du courant aux borne de R-L pour $\alpha > \varphi$

■ Cas où ($\alpha < \varphi$):

Lorsque l'angle α est inférieur à φ , le fonctionnement dépend de la nature des signaux appliqués aux gâchettes.

- brèves impulsions (Impulsion de courte durée).

Dans ce cas, on constate que le thyristor Th_1 sera en conduction lors de l'arrivée de l'impulsion sur le deuxième thyristor, cependant ce dernier ne peut pas conduire. Ainsi, seul un thyristor conduit et ce montage fonctionne en un redresseur simple alternance.

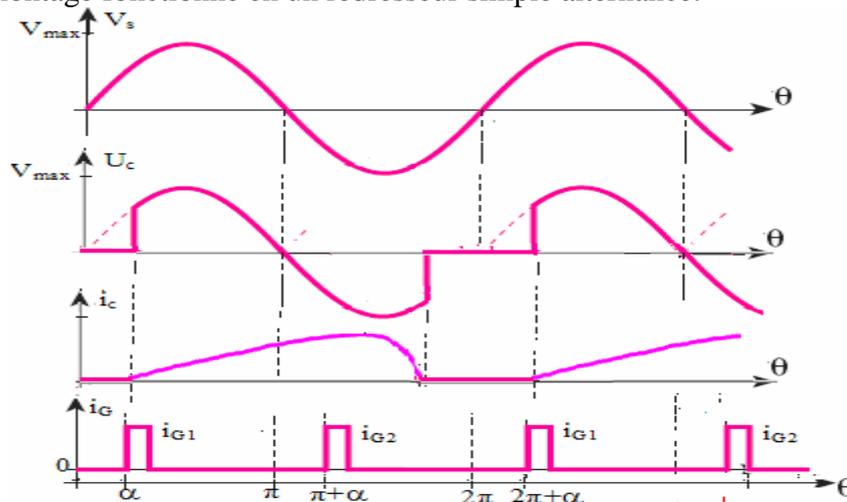


Figure 6. Les allures de la tension et du courant aux borne de R-L pour $\alpha > \varphi$

- Train impulsions (Commande par impulsion large)

Dans ce cas, on doit utiliser un train d'impulsions afin d'assurer la conduction de deuxième thyristor lors de l'arrêt de conduction (extinction) de premier thyristor.

CONVERTISSEURS DC/DC

1. LES HACHEURS

Les hacheurs sont des convertisseurs directs du type continu-continu. Leur utilisation permet la conversion et le traitement de l'énergie électrique dans des structures où n'apparaissent que des sources d'énergie à courant continu avec souplesse.

Le principe du hacheur est basé sur l'ouverture et la fermeture régulière d'un interrupteur statique (thyristor ou transistor) faisant partie d'un circuit électronique généralement simple placé entre l'entrée (la source d'énergie) et la sortie (utilisateur). Le réglage relatif des temps d'ouverture et de fermeture de l'interrupteur permet le contrôle de l'échange d'énergie.

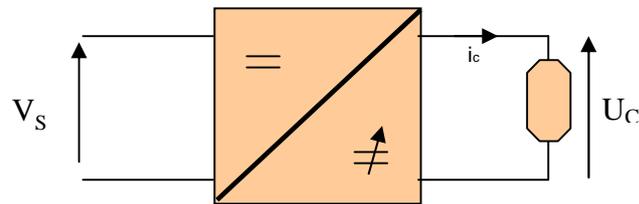
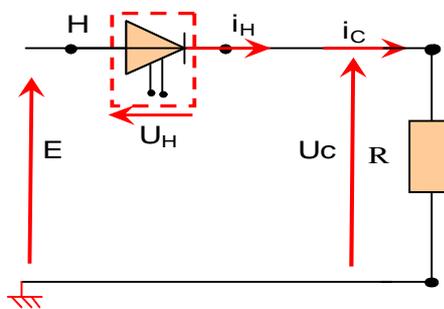


Figure 1. Structure d'un convertisseur statique Continu - Continu

2- Hacheur Série: hacheur survolteur

Il est appelé aussi abaisseur de tension, dévolteur, Buck convertter. Ce hacheur commande le débit d'un générateur de tension Vs, dans un récepteur de courant.

2.1-Charge résistive :



Etat 0 : H ouvert $\Rightarrow i_c = 0$

Etat 1 : H fermé $\Rightarrow i_c = \frac{E}{R}$

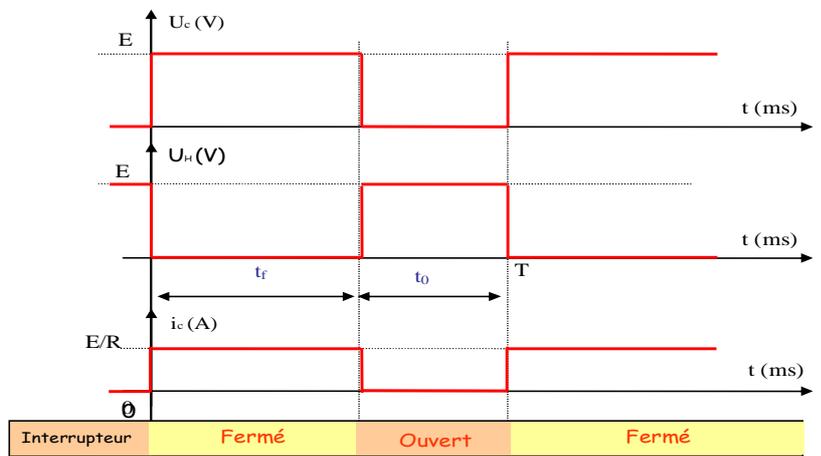


Figure 3. Chronogrammes des tensions et du courant pour une charge R.

Rapport cyclique :

Le rapport cyclique est le rapport entre le temps de conduction de l'interrupteur, et, la période du signal. C'est un nombre sans dimension, noté α , compris entre 0 et 1.

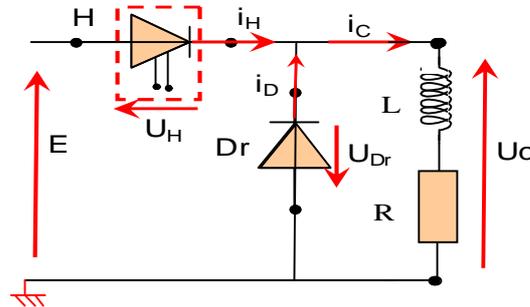
t_f : temps de fermeture .et t_o : temps d'ouverture.

On définit le rapport cyclique $\alpha = \frac{t_f}{T} = \frac{\text{temps de conduction de l'interrupteur}}{\text{période du signal}}$

Valeur moyenne de Uc:

La tension moyenne et le courant moyen sont respectivement $\bar{U}_c = \alpha.E$ et $\bar{i}_c = \frac{\bar{U}_c}{R} = \alpha. \frac{E}{R}$

2.2- Charge résistive et inductive:



Fonctionnement:

On ferme H \Rightarrow courant dans la charge (accumulation de l'énergie)

On ouvre H \Rightarrow décharge de inductance à travers la diode (période de roue libre).

$$U_c = R i_c + L \frac{d i_c}{d t} = E$$

Après que le régime transitoire est disparu, on trace l'allure du courant de charge en régime permanent et on suppose à $t=0$, $i_c(0)=I_{\min}$ et à $t=t_f$, $I_c(t_f)=I_{\max}$.

$$i_c(t) = A e^{-t/\tau} + \frac{E}{R} \quad \text{avec} \quad \tau = \frac{L}{R}$$

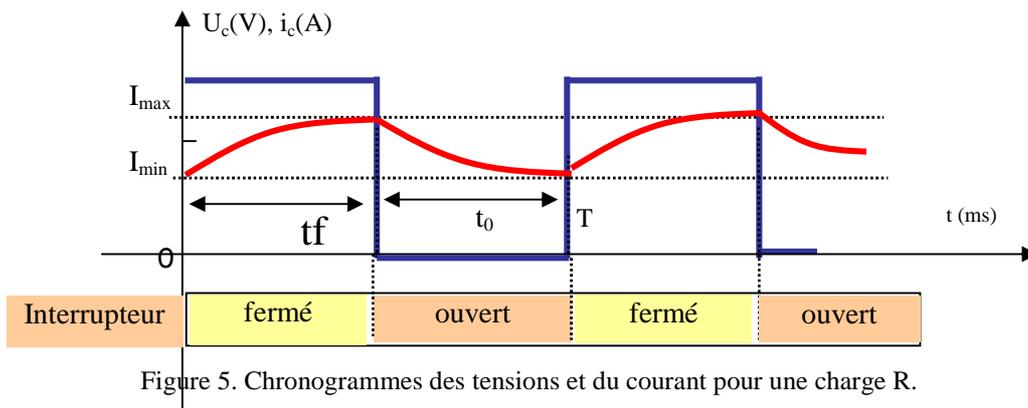


Figure 5. Chronogrammes des tensions et du courant pour une charge R.

3- Linéarisation du courant i_c

Lorsque x est grand on approxime e^{-x} par une droite et par conséquent la fonction $i_c(t)$ dans chaque phase tend à devenir affine (rectiligne). De cette constatation, on va faire une approximation à chaque phase de fonctionnement de remplacer le terme $R \cdot i_c$ par le terme $R \cdot \bar{I}_c$.

Il est à remarquer que $E_c + R \cdot \bar{I}_c = \bar{U}_c = \alpha \cdot E$

$$\begin{cases} \text{H fermé} \Rightarrow E = E_c + R \cdot \bar{I}_c + L \frac{d i_c}{d t} \Rightarrow E = \alpha E + L \frac{d i_c}{d t} \\ \text{H ouvert} \Rightarrow 0 = E_c + R \cdot \bar{I}_c + L \frac{d i_c}{d t} \Rightarrow 0 = \alpha E + L \frac{d i_c}{d t} \end{cases}$$

$$\text{H fermé} : L \frac{d i_c}{d t} = E(1 - \alpha) \Rightarrow \frac{d i_c}{d t} = E \frac{(1 - \alpha)}{L} = \text{cte} \Rightarrow i_c(t) = E \frac{(1 - \alpha)}{L} t + I_{\max}$$

$$(\text{à } t = 0, i_c = I_{\min}) \text{ à } t_1 = t_f = \alpha \cdot T \text{ où H va être ouvert} \quad I_{\max} = E \frac{(1 - \alpha)}{L} \alpha \cdot T + I_{\min}$$

H ouvert: $L \frac{di_c}{dt} = -\alpha \cdot E \Rightarrow \frac{di_c}{dt} = -\frac{\alpha}{L} E$

$i_c(t_f) = I_{\min}$ $i_c(t) = \frac{\alpha E(t - \alpha T)}{L} + I_{\min}$ à $t_2 = T$ où H va être fermé $i_c = I_{\max}$.

$I_{\max} = \frac{E(1-\alpha)\alpha T}{L} + I_{\min}$

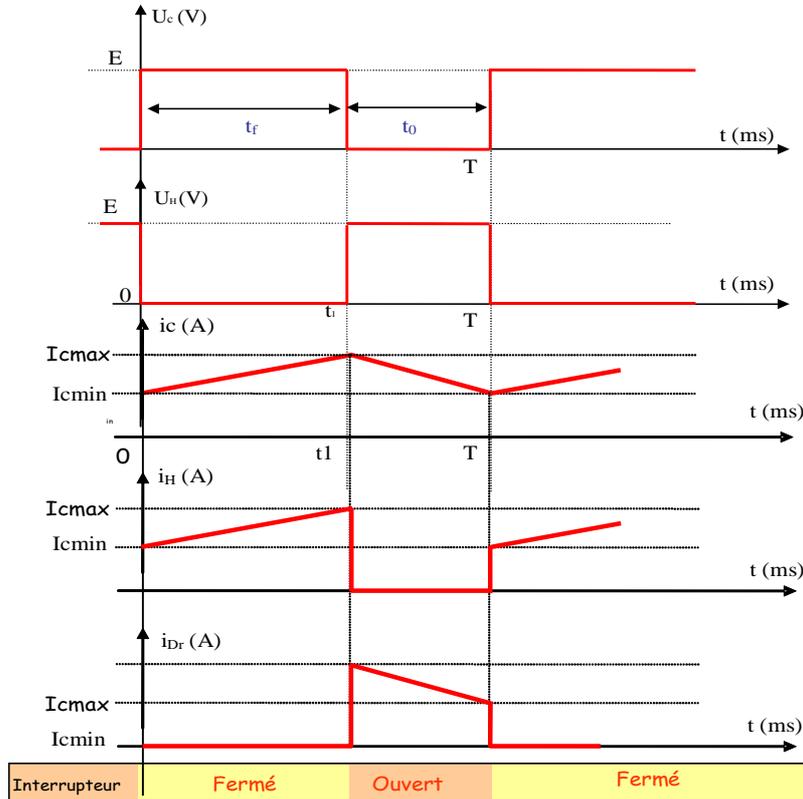


Figure 6. Chronogrammes des tensions et du courant pour une charge R-L.

Pour calculer la valeur moyenne de l'intensité du courant dans la charge, nous utiliserons le fait que l'intensité i_c est portée par des segments de droites, la valeur moyenne se calcule donc en prenant les deux extremums, et en calculant directement la moyenne entre eux.

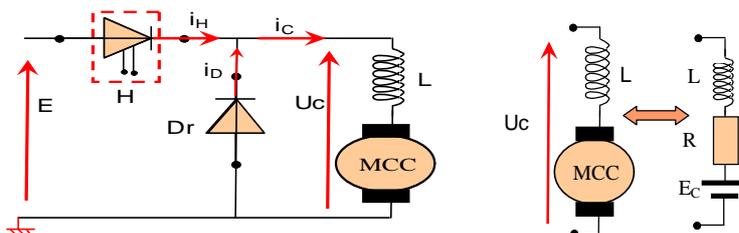
$\bar{I}_C = \frac{I_{CM} + I_{Cm}}{2}$

Pour calculer la valeur moyenne du courant dans la diode et l'interrupteur électronique, nous utiliserons la même méthode des aires que celle utilisée pour calculer la valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge.

$\bar{I}_D = (1-\alpha) \cdot \bar{I}_C$

$\bar{I}_H = \alpha \cdot \bar{I}_C$

2.3- Charge comportant un électromoteur:



1- Conduction interrompue:

H est fermé $\Rightarrow U_c = E = R \cdot i_c + L \frac{di_c}{dt} + E_c$, on définit t_r temps de roue libre

$t_0 > t_r$ le courant s'annule avant la fermeture de H et

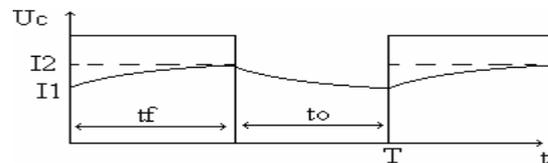
$I_{max} = 0$ on distingue 3 phases.

- H fermé: i_c croît de 0 à I_{min} et $U_c = E$
- H ouvert et D passante: i_c décroît de I_{min} à 0 et $U_c = 0$
- H ouvert et D non passante: $i_c = 0$ et $U_c = E_c$

2- Conduction ininterrompue:

$t_0 < t_r$ H est refermé avant que i_c s'annule il y a deux phases:

$$\begin{cases} \text{H fermé} \Rightarrow E = E_c + R \cdot i_c + L \frac{di_c}{dt} \\ \text{H ouvert} \Rightarrow 0 = E_c + R \cdot i_c + L \frac{di_c}{dt} \end{cases}$$



Le courant varie entre I_{min} et I_{max} $\bar{U}_c = \alpha \cdot E$

$$U_c = E_c + R \cdot i_c + L \frac{di_c}{dt} \Rightarrow \bar{U}_c = E_c + R \cdot \bar{I}_c \Rightarrow \bar{I}_c = \frac{\bar{U}_c - E_c}{R} = \frac{\alpha E - E_c}{R}$$

4- Ondulation du courant

Le courant dans la charge i_c varie entre I_{min} et I_{max} , nous appelons ondulation Δi_c la demi-différence $\frac{I_{min} - I_{max}}{2}$. Elle peut être calculé avec :

$$\Delta I_c = \frac{\alpha(1 - \alpha)E \cdot T}{2L}$$

5. Analogie avec le transformateur:

- Puissance fournie par la source: $P_1 = E \cdot \bar{I} = \alpha \cdot E \cdot \bar{I}_c$
- Puissance reçue par la charge: $P_2 = \bar{U}_c \cdot \bar{I}_c = \alpha \cdot E \cdot \bar{I}_c$

	Transfo de rapport de transformation m	Hacheur de rapport cyclique α .
Tension	$\frac{U_2}{U_1} = m$	$\frac{U_c}{E} = \alpha$
Courants	$\frac{I_2}{I_1} = \frac{1}{m}$	$\frac{I_c}{I} = \frac{1}{\alpha}$
Puissances	$P_1 = P_2$	$P_1 = P_2$

Le hacheur peut être considéré comme un transformateur à courant continu

6. Procédure de réglage: influence des paramètres de réglage:

Pour faire varier la tension moyenne du hacheur, il faut faire varier le rapport cyclique α , ce qui amène à considérer deux procédés de réglage:

- réglage à T_f constant et T variable.
- réglage à T_f variable et T constant.

1- Réglage à T constant et Tf variable: procédé valable pour la puissance

$T = T_f + t_o$ (avec t_f : temps de fermeture et t_o : temps d'ouverture)

$$\text{or } \Delta I_c = \frac{\alpha(1-\alpha)ET}{2L} = \frac{E}{2L} \frac{1}{f} \alpha(1-\alpha) = \frac{ET}{2L} \frac{t_f}{T} \left(1 - \frac{t_f}{T}\right) = \frac{E}{2L} \frac{t_f}{T} (T - t_f) \Rightarrow \Delta I_c = \frac{E}{2L} t_f \left(1 - \frac{t_f}{T}\right)$$

$$\text{L'ondulation est maximale } \left(\frac{\partial \Delta I_c}{\partial \alpha} = 1 - 2\alpha = 0 \Rightarrow \alpha = 0,5 \right). \text{ Pour } \alpha = 0,5 \Rightarrow \Delta I_{c\max} = \frac{ET}{8L}$$

Pour une valeur donnée de T donc de la fréquence de fonctionnement du hacheur, l'ondulation ΔI_c est théoriquement nulle pour $\alpha=0$ et $\alpha=1$.

L'ondulation passe par un maximum pour $\alpha=0,5$ c'est à dire pour une tension de sortie moitié de la tension d'entrée.

L'ondulation est inversement proportionnelle à la fréquence, ce type de réglage ne fournit pas des tensions de sortie très basses surtout si la fréquence est élevée (T petite) car le rapport cyclique ne peut descendre au dessous d'une valeur minimale qui dépend de l'interrupteur et du circuit de commande, or dans de nombreux cas on est appelé à fonctionner avec des tensions de sortie voisines de zéro par exemple dans le cas du démarrage d'une machine à courant continu.

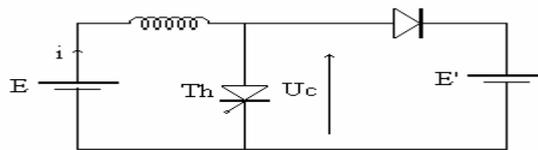
2- Réglage à t_f constant et T variable: cas des hacheurs autonomes auto-oscillant

$$\Delta I_c = \frac{E}{2R\tau} t_f \left(1 - \frac{t_f}{T}\right) = \frac{E}{2R} \frac{t_f}{\tau} (1-\alpha)$$

- L'ondulation sera d'autant plus faible que le temps t_f est très petits. Ce type de réglage est particulièrement bien adapté au cas où la tension de sortie du hacheur doit prendre des valeurs très faibles. Pour la commande des machines on est amené à réaliser des commandes à fréquences variables et rapport cycliques variables.

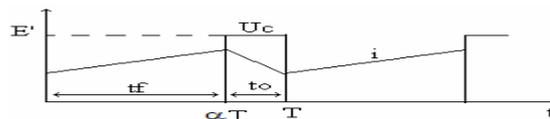
3- Hacheur parallèle: hacheur survolteur

Par rapport à la précédente structure, les rôles de générateur et de récepteur sont inversés entre la source de tension et la source de courant :



Dans un premier temps t_f , T_h fermé on stocke directement l'énergie électromagnétique dans l'inductance L ($U_c=0$).

Dans un second temps, on ouvre T_h (commutation forcée) l'inductance L se décharge à travers D, donc $E' > E$ $U_c = E'$.



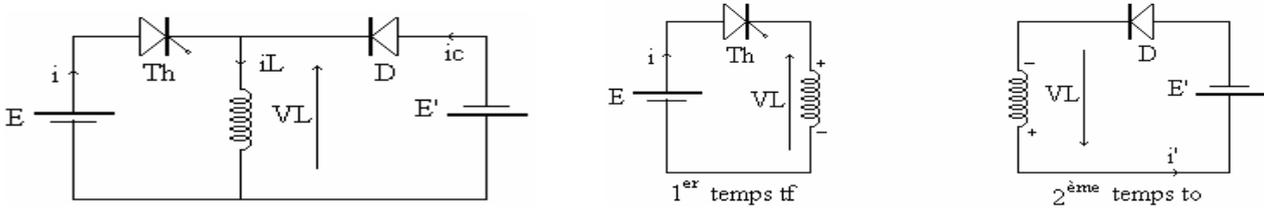
La valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge:

$\overline{U_c} = \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T E' dt = E'(1-\alpha)$ or $E = V_{L\text{moy}} + U_{c\text{moy}} = U_{c\text{moy}} = \overline{U_c}$, car la valeur moyenne $V_{L\text{moy}}$ est nulle, toute l'énergie emmagasinée pendant t_f est restituée pendant t_o donc:

$$\overline{U_c} = E = E'(1-\alpha) \Rightarrow E' = \frac{E}{1-\alpha}$$

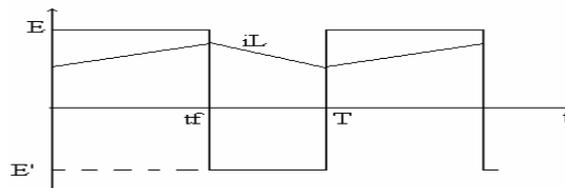
Ce hacheur est élévateur de tension de même $I_{\text{sortie}} = (1-\alpha)I_{\text{entrée}}$.

4- Hacheur survolteur-dévolteur



Dans un premier temps la source E est fermée sur une inductance qui stocke de l'énergie.

Dans un second temps t_0 , la source est déconnectée et l'inductance restitue l'énergie accumulée à la charge (représentée par une fcm fictive E').



$$V_{lmoy} = \frac{1}{T} \int_0^{tf} E dt + \frac{1}{T} \int_{tf}^T E' dt = \frac{E \cdot T_f}{T} - E' + \frac{tf \cdot E'}{T} = E\alpha - E' \cdot \alpha - E' = 0 \Rightarrow E' = \frac{\alpha}{1 - \alpha} E$$

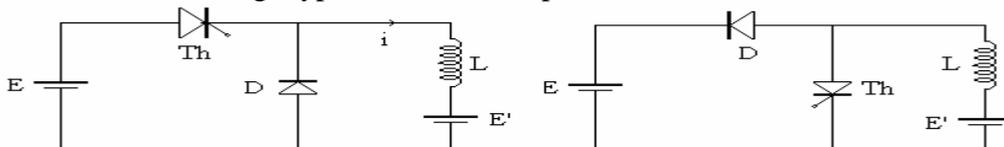
On a un hacheur abaisseur par $\alpha < 0,5$ et élévateur par $\alpha > 0,5$

$$i_{moy} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} i_{cmoy}$$

La puissance transistée $P = E \cdot i_{moy} = E \cdot \frac{\alpha}{1 - \alpha} i_{cmoy}$

5. Réversibilité des hacheurs

Pour transférer l'énergie d'une source E à une charge se présentant comme une fcm E' telle que $E' < E$ l'utilisation d'un montage type dévolteur s'impose.



Pour inverser le sens du transfert de l'énergie, il faut bien entendu que la source E soit susceptible de recevoir de l'énergie, la charge susceptible d'en fournir d'où l'utilisation du montage survolteur. La charge peut être un moteur à courant continu par exemple.

5.1. Hacheur réversible en tension (deux quadrants).

La structure recherchée doit permettre une réversibilité en tension de la source de courant qui reste unidirectionnelle en courant.

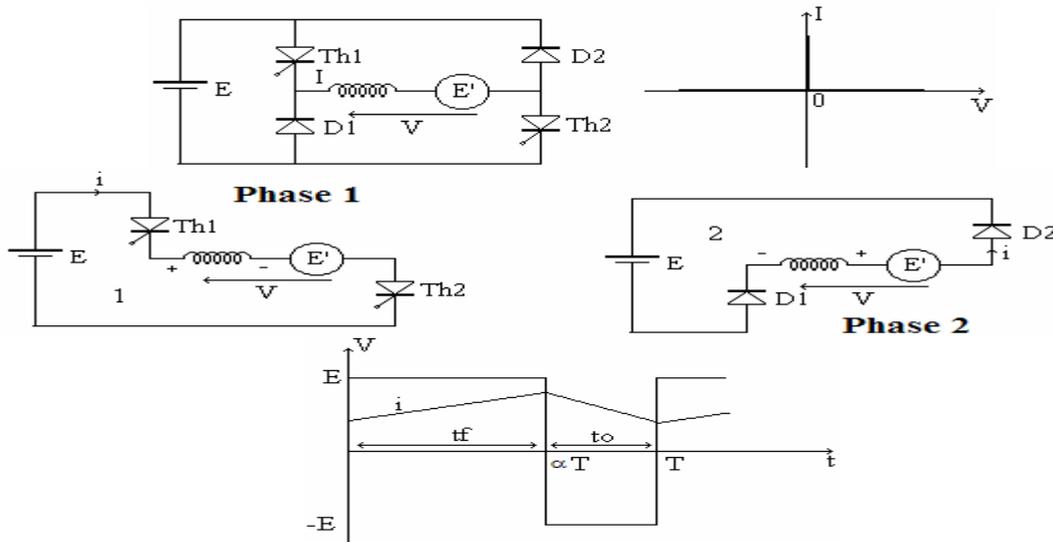
Pour un MCC, le convertisseur doit permettre un fonctionnement réversible (moteur-génératrice) par réversibilité du flux d'excitation.

La réversibilité n'étant pas la même dans les deux sources, les phases actives de fonctionnement dans les deux cas nécessitent un croisement de l'interconnexion des sources.

La combinaison des deux structures nous permet de concevoir un montage dont le schéma de principe est celui ci.

Ce montage nécessite l'inversion de la polarité de la fcm E', Pour passer au fonctionnement dévolteur à un fonctionnement survolteur, si la charge est un inductif d'une MCC on inversera la polarité de l'inducteur.

ELECTRONIQUE DE PUISSANCE



$$V_{\text{moy}} = E(2\alpha - 1) \cong E'$$

Le sens du courant dans la charge reste le même, mais la tension E' peut varier entre E et $-E$.

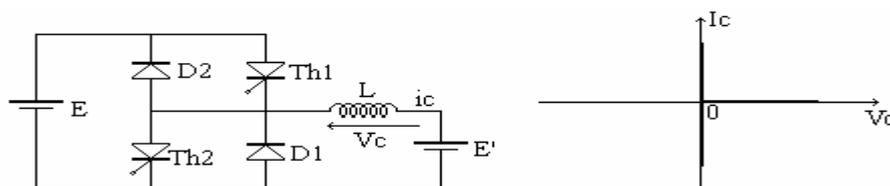
5.2- Hacheur réversible en courant (2 quadrants).

Les sources d'entrée et de sortie sont toujours de natures différentes, mais la structure recherchée doit permettre une réversibilité en puissance moyenne du dispositif. Pour fixer les idées, cette structure doit pouvoir s'appliquer à l'alimentation d'une MCC par un hacheur et permettre des phases de traction et de freinage sans réversibilité de la vitesse (tension unidirectionnelle), mais avec réversibilité de couple (réversibilité de courant).

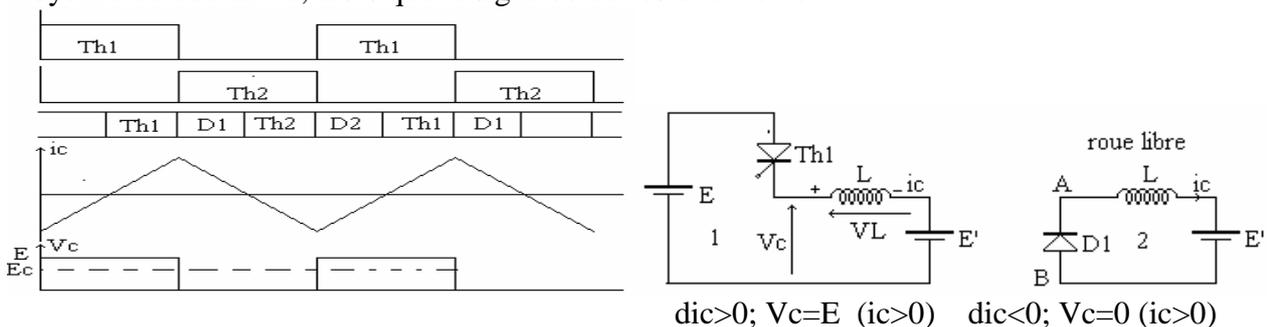
Puisqu'on n'a pas de réversibilité en tension, les modes d'interconnexion des deux sources sont représentés sur la figure , qui se comporte :

- Comme un hacheur dévolteur lorsque la source de courant impose un courant positif ($I > 0$) ;
- Comme un hacheur survolteur lorsque la source de courant impose un courant négatif ($I < 0$).

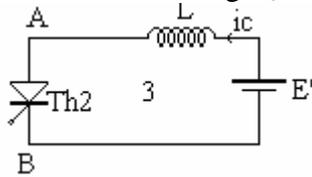
La combinaison des structures (hacheurs parallèle-hacheur série) nous permet de réaliser le montage suivant:



On commande alternativement Th_1 et Th_2 pour obtenir un changement de signe de la valeur moyenne du courant i_c , alors que le signe de E_c reste le même.



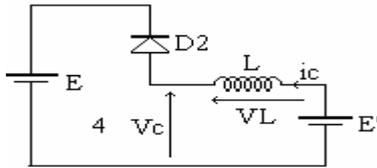
Th₂ est susceptible de conduire, il conduit au moment où le courant de charge i_c s'annule.
La bobine se charge (accumulation de l'énergie).



$$V_A - V_B = E_C + V_L \text{ avec } V_L = L \frac{di_c}{dt} < 0$$

di_c < 0; i_c < 0; V_c = 0

On bloque Th₂ et D₂ conduit suivant la séquence suivante:



di_c > 0; i_c < 0; V_c = E

lorsque le courant s'annule, on amorce Th₁ et le cycle recommence.

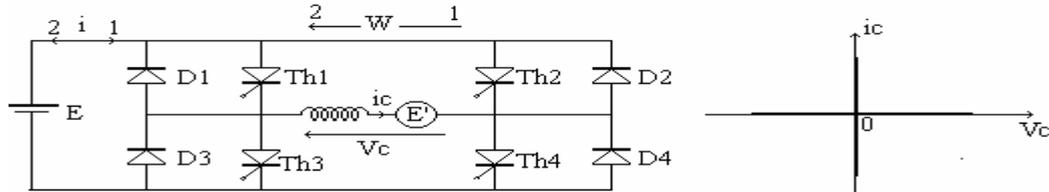
5.3- Hacheur réversible en tension et en courant (4 quadrants)

La structure recherchée doit permettre une réversibilité totale en tension et en courant de la source de courant.

La source de tension impose une tension E constante, mais doit être réversible en courant.

La structure générale du convertisseur sera forcément une structure en pont.

La structure se déduit par superposition des deux structures précédentes, d'où le montage ci-dessous: (séquences de fonctionnement voir les onduleurs).



- Th₁ et Th₄ commandés simultanément; Th₂ et Th₃ bloqués.

$$V_{cmoy} = E(2\alpha - 1) \quad \begin{array}{l} \text{si } \alpha > 0,5; V_{cmoy} > 0 \\ \text{si } \alpha < 0,5; V_{cmoy} < 0 \end{array}$$

si $\alpha > 0,5$ E' > 0 i et w (énergie) sens 1

si $\alpha < 0,5$ E' < 0 i et w sens 2

i_c dans le sens 1

- Th₂ et Th₃ commandés; Th₁ et Th₄ bloqués.

si $\alpha > 0,5$ E' > 0 i et w sens 2

si $\alpha < 0,5$ E' < 0 i et w sens 1

CONVERTISSEURS DC/AC

1- Onduleur autonome:

Un onduleur autonome est un convertisseur statique (**Continu – Alternatif**) fournissant à partir d'une source de courant continu une onde de tension ou de courant de fréquence variable.

- Un commutateur de tension est un onduleur dont l'onde de tension est imposée à la charge.
- Un commutateur de courant est un onduleur dont l'onde de courant est imposée à la charge.

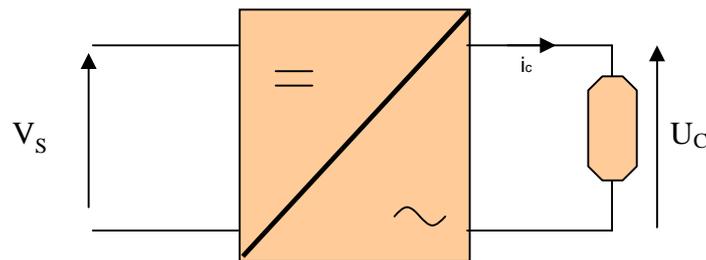


Figure 1. Structure d'un convertisseur statique **Continu - Alternatif**

Un onduleur est assisté, si la fréquence et la tension sont imposées par le réseau, dans le cas présent nous pourrions régler la fréquence et la tension, l'onduleur sera donc autonome.

2- Onduleur à deux interrupteurs électroniques:

2.1- Charge résistive:

Deux alimentations délivrant deux tensions, continues et égales, alimentent une charge résistive par l'intermédiaire de deux interrupteurs H_1 et H_2 . Ces deux interrupteurs peuvent être des transistors ou des thyristors, composants électroniques unidirectionnels commandés. Ils sont tels que si le premier est ouvert, l'autre est nécessairement fermé et inversement. Le basculement des interrupteurs est pratiquement instantané. Le montage est donné par la figure suivante.

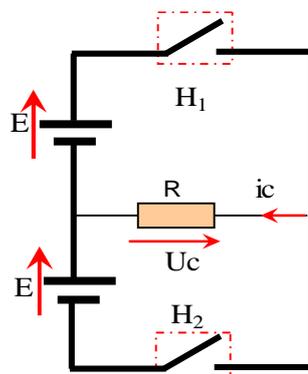


Figure 2. Représente un onduleur à deux interrupteurs

La tension U_c ne peut donc prendre que les deux valeurs suivant le cas:

- H_1 fermé H_2 ouvert $U_c = E.$
- H_1 ouvert H_2 fermé $U_c = -E.$

La valeur moyenne de U_c est $\bar{U}_c = 0V$ de même pour le courant $\bar{I}_c = 0A.$

La valeur efficace de U_c est $U_c = E$. et pour le courant est $I_c = \frac{E}{R}$.

La fréquence $f = \frac{1}{T}$ est imposée par le dispositif de commande des interrupteurs.

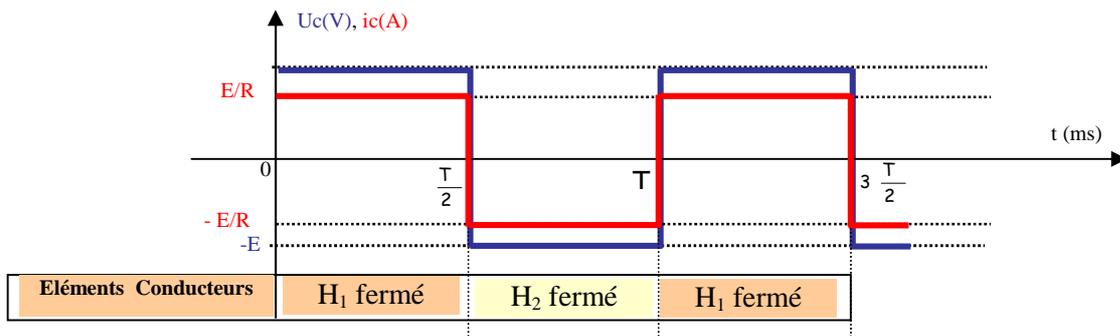


Figure 3. Chronogrammes de la tension et du courant pour une charge R.

A partir de deux tensions continues fixes, nous avons maintenant un courant alternatif de fréquence réglable.

2.2- Charge résistive et inductive:

Pour une charge fortement inductive. Ce nouveau composant oblige l'adjonction de deux diodes montées en antiparallèle sur les interrupteurs comme l'indique la figure 4. Elles permettent ainsi à la bobine, de restituer l'énergie emmagasinée, lors de l'ouverture des interrupteurs, permettant au courant de ne pas subir de discontinuité.

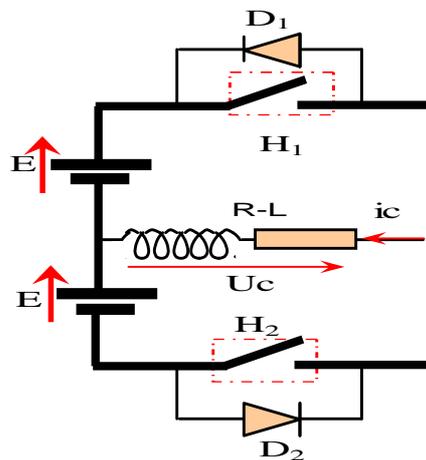


Figure 4. Représente un onduleur à deux interrupteurs alimentant une charge inductive

La tension U_c ne peut donc prendre que les deux valeurs suivantes :

- H₁ fermé H₂ ouvert $U_c = E$.
- H₁ ouvert H₂ fermé $U_c = -E$.

La représentation de la tension U_c ne change pas avec la charge, les calculs des valeurs moyenne et efficace s'effectuent comme précédemment (Charge résistive).

Les diodes D_1 et D_2 ne jouent aucun rôle dans la représentation de la tension.

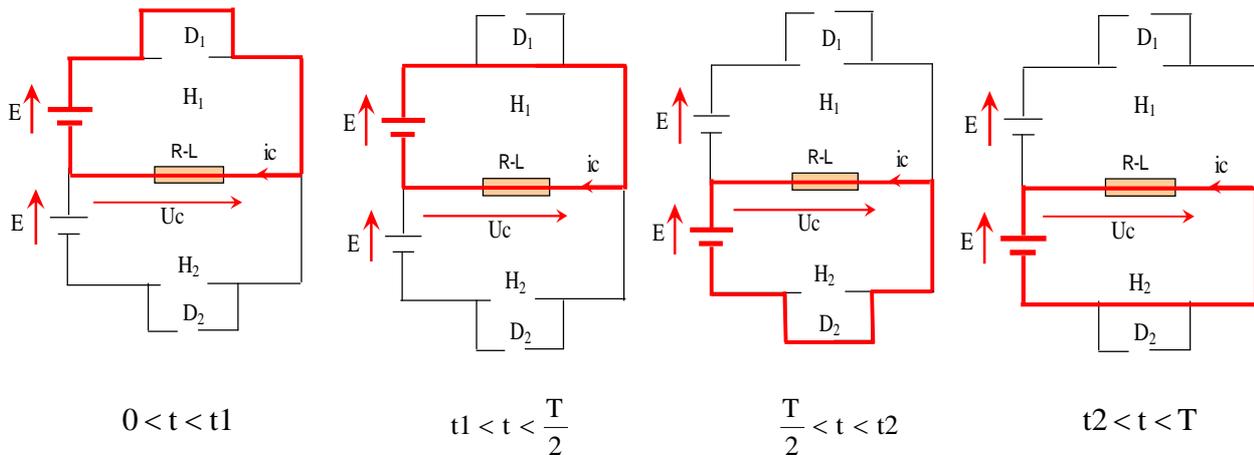
Le courant i_c n'est plus la réplique de la tension, l'intensité du courant dans la charge peut être positive alors que la tension à ses bornes est tantôt positive et tantôt négative, il en est de même lorsque l'intensité du courant i_c est négative, les diodes sont donc essentielles dans l'étude de la circulation du courant.

L'étude porte essentiellement sur la circulation du courant. Le signe de U_c et le sens de i_c , indique les composants passants et non passants. Toutes les données sont contenues dans le tableau suivant:

Temps	Courant i_c	Tension U_c	Interrupteurs Commandés	Eléments Passants
$0 < t < t_1$	$i_c < 0$	$U_c > 0, U_c = E$	H_1 : fermé	D_1 Passante
$t_1 < t < \frac{T}{2}$	$i_c > 0$	$U_c > 0, U_c = E$	H_1 : fermé	H_1 Passante
$\frac{T}{2} < t < t_2$	$i_c < 0$	$U_c < 0, U_c = -E$	H_2 : fermé	D_2 Passante
$t_2 < t < T$	$i_c > 0$	$U_c < 0, U_c = -E$	H_2 : fermé	H_2 Passante

- Fonctionnement:

- Lorsque le produit $U_c \cdot i_c > 0$: la charge reçoit de l'énergie électrique.
- Lorsque le produit $U_c \cdot i_c < 0$: la charge restitue de l'énergie électrique à l'une des deux sources, nécessairement réversibles. C'est une phase de récupération.



Les chronogrammes des courants dans chaque composant sont représentés ci-après:

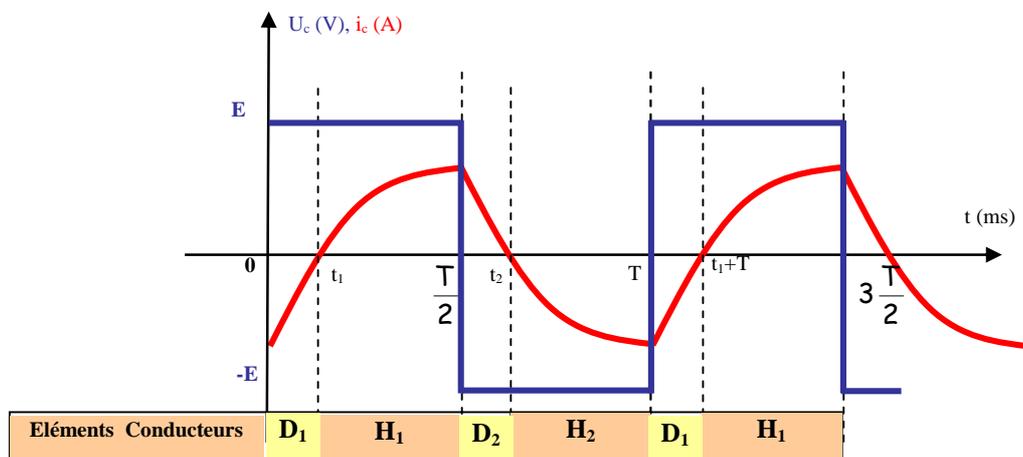


Figure 5. Chronogrammes de la tension et du courant pour une charge R-L.

3- Onduleur à quatre interrupteurs électroniques (Onduleur en pont):

Ce type d'onduleur comporte quatre diodes sont montées en antiparallèle sur quatre interrupteurs électroniques unidirectionnels et commandés comme l'indique la figure 6. La tension de sortie a une valeur réglable grâce au décalage de l'angle d'allumage es interrupteurs statiques.

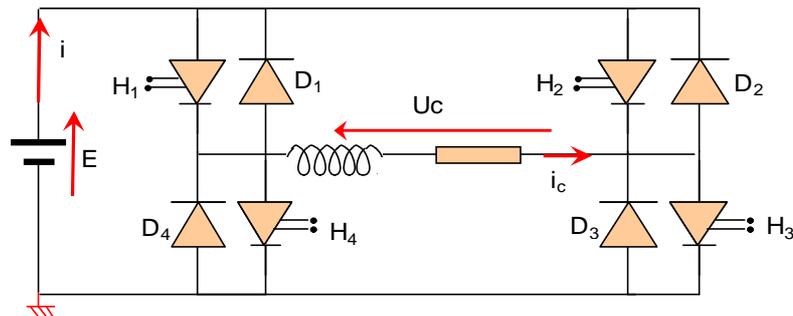


Figure 6. Représente un onduleur à quatre interrupteurs alimentant une charge inductive

3.1- Commande symétrique:

La commande du pont est symétrique H_1 et H_3 sont fermés simultanément pendant la moitié de la période. Le reste de la période voit la fermeture des interrupteurs H_2 et H_4 . Lorsque H_1 et H_3 sont fermés, les deux autres interrupteurs sont nécessairement ouverts.

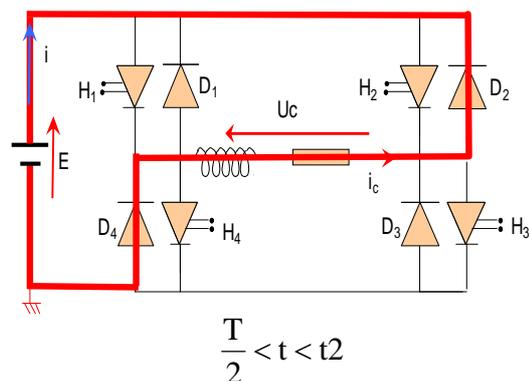
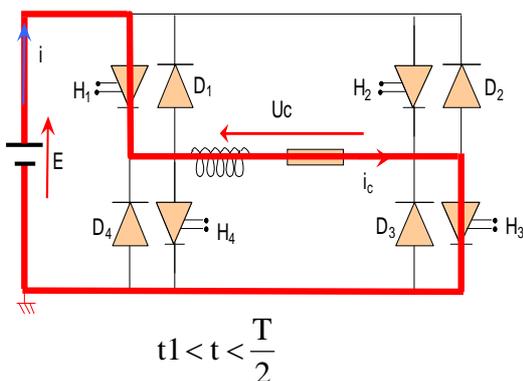
La tension U_c ne peut donc prendre que les deux valeurs suivantes :

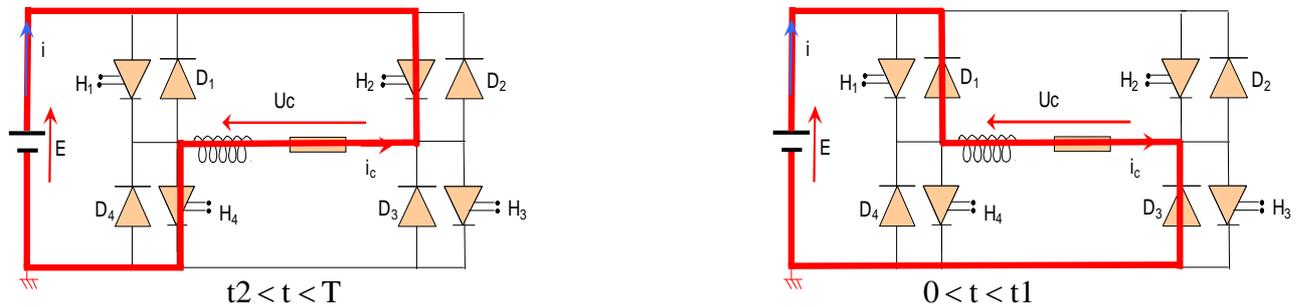
- H_1 et H_3 fermés H_2 et H_4 ouverts $U = E$.
- H_2 et H_4 fermés H_1 et H_3 ouverts $U = - E$.

- Etude des séquences de conduction :

Toutes les données sont contenues dans le tableau suivant :

Temps	Courant i_c	Tension U_c	Interrupteurs Commandés	Eléments Passants
$t_1 < t < \frac{T}{2}$	$i_c > 0$	$U_c > 0$	H_1 et H_3 fermés	H_1 et H_3 passants
$\frac{T}{2} < t < t_2$	$i_c > 0$	$U_c < 0$	H_2 et H_4 fermés	D_2 et D_4 passantes
$t_2 < t < T$	$i_c < 0$	$U_c < 0$	H_2 et H_4 fermés	H_2 et H_4 passants
$0 < t < t_1$	$i_c < 0$	$U_c > 0$	H_1 et H_3 fermés	D_1 et D_3 passantes





Les chronogrammes des tensions et du courant dans chaque composant sont représentés ci-après:

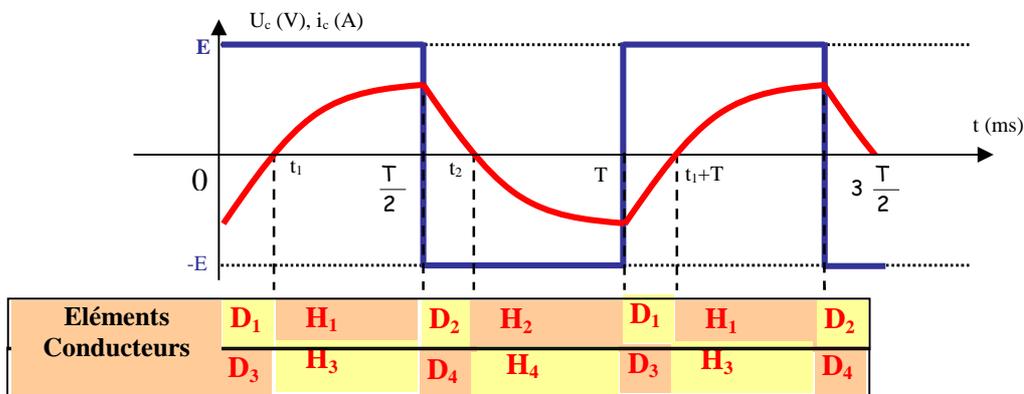


Figure 7. Chronogrammes de la tension et du courant pour une Commande symétrique.

3.2- Commande décalée:

La commande du pont n'est plus symétrique H₁ et H₃ ne sont pas nécessairement fermés en même temps, il en est de même pour H₂ et H₄. Pendant la première demi période H₁ et H₃ sont fermés simultanément puis c'est au tour de H₃ et H₄ d'être fermés conjointement. Pendant la seconde demi période H₄ reste fermé avec H₂, puis revient H₁ avec H₂.

La tension U_c peut prendre maintenant les nouvelles valeurs suivantes :

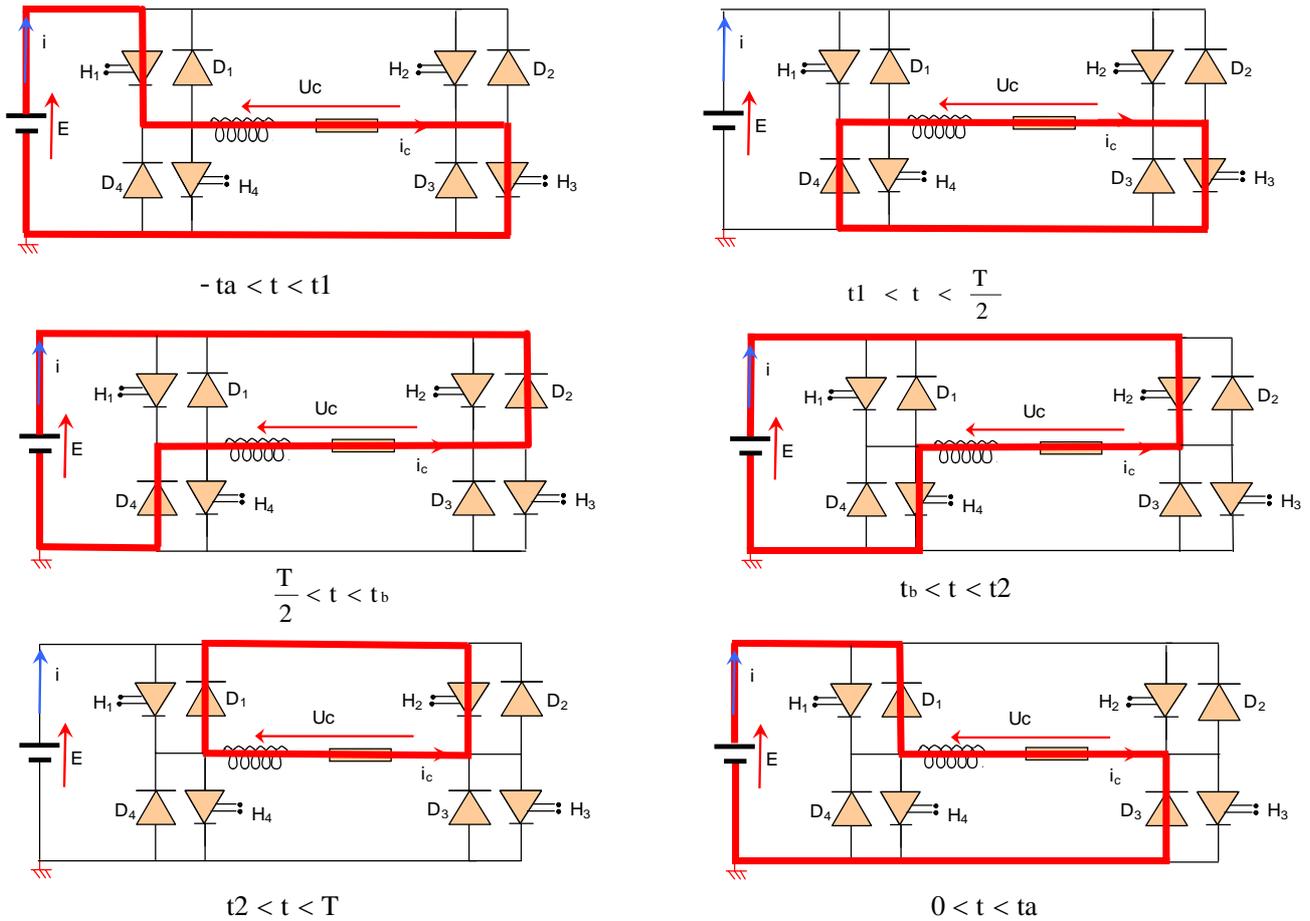
- H₁ et H₃ fermés H₂ et H₄ ouverts U_c = E.
- H₃ et H₄ fermés H₁ et H₂ ouverts U_c = 0.
- H₄ et H₂ fermés H₁ et H₃ ouverts U_c = - E.
- H₂ et H₁ fermés H₃ et H₄ ouverts U_c = 0.

Toutes les données sont contenues dans le tableau suivant :

Temps	Courant i _c	Tension U _c	Interrupteurs Commandés	Eléments Passants
t _a < t < t ₁	i _c > 0	U _c > 0	H ₁ et H ₃ fermés	H ₁ et H ₃ passants
t ₁ < t < T/2	i _c > 0	U _c = 0	H ₃ et H ₄ fermés	H ₃ et D ₄ passants
T/2 < t < t _b	i _c > 0	U _c < 0	H ₂ et H ₄ fermés	D ₂ et D ₄ passants
t _b < t < t ₂	i _c < 0	U _c < 0	H ₂ et H ₄ fermés	H ₂ et H ₄ passantes
t ₂ < t < T	i _c < 0	U _c = 0	H ₁ et H ₂ fermés	H ₂ et D ₁ passants
0 < t < t _a	i _c < 0	U _c > 0	H ₁ et H ₃ fermés	D ₁ et D ₃ passantes

- Etude du fonctionnement :

- Lorsque $U_c i_c > 0$: la charge reçoit de l'énergie électrique.
- Lorsque $U_c i_c < 0$: la charge restitue de l'énergie électrique (phase de récupération).
- Lorsque $U_c = 0$: la charge restitue de l'énergie électrique sur elle-même. (phase roue libre).



Les chronogrammes des courants dans chaque composant sont représentés ci-après:

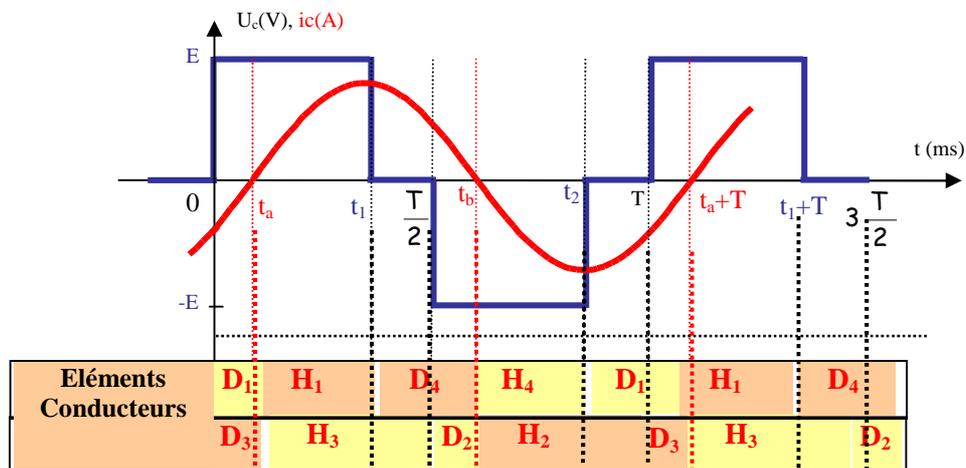


Figure 8. Chronogrammes de la tension et du courant pour une Commande décalée.

La charge est inductive, le courant dans la charge i_c est sinusoïdal. Le courant i_c est en retard par rapport à la tension aux bornes de la charge, il est représenté ci après:

La valeur moyenne de U_c est : $\bar{U}_c = 0V$; la valeur efficace de U_c est: $U_c = E \sqrt{2 \frac{t_1}{T}}$.

4. Onduleur de tension triphasé:

Un onduleur triphasé se comporte de trois phases dont les ondes de tensions sont déphasés respectivement de $2\pi/3$ et $4\pi/3$ par rapport à l'une d'elles.

Nous nous intéresserons uniquement à la structure de l'onduleur à trois bras et à interrupteurs en série. Considérons le schéma ci-dessous (trois onduleurs monophasés en pont).

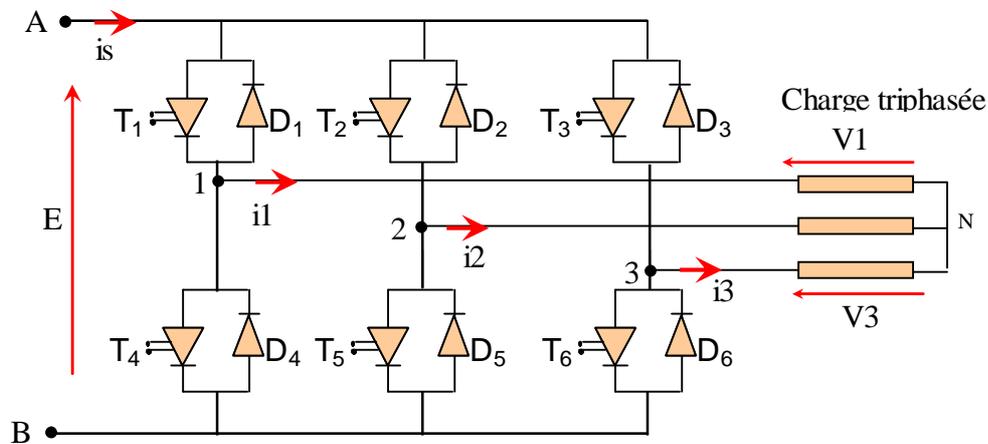


Figure 9. Représentation d'un onduleur triphasé

On suppose que la charge est supposée équilibrée

Nous avons immédiatement les relations suivantes au niveau de la charge :

$$\begin{cases} i_1 + i_2 + i_3 = 0 \\ V_1 + V_2 + V_3 = 0 \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} U_{12} = V_1 - V_2 \longrightarrow (1) \\ U_{23} = V_2 - V_3 \longrightarrow (2) \\ U_{31} = V_3 - V_1 \longrightarrow (3) \end{cases}$$

En effectuant membre à membre la différence entre les équations (1) et (3), on obtient :

$$U_{12} - U_{31} = 2.V_1 - V_2 - V_3 = 3.V_1$$

On arrive ainsi à l'expression de la tension simple : $V_1 = \frac{1}{3} \cdot (U_{12} - U_{31})$

Et par permutation circulaire des indices 1,2,3, on peut établir les expressions des deux autres tensions simples

$$V_2 = \frac{1}{3} \cdot (U_{23} - U_{12})$$

$$V_3 = \frac{1}{3} \cdot (U_{31} - U_{23})$$

Représentons les différentes allures des graphes des tensions simples v_1 et v_2 que nous allons construire à partir des tensions composées.

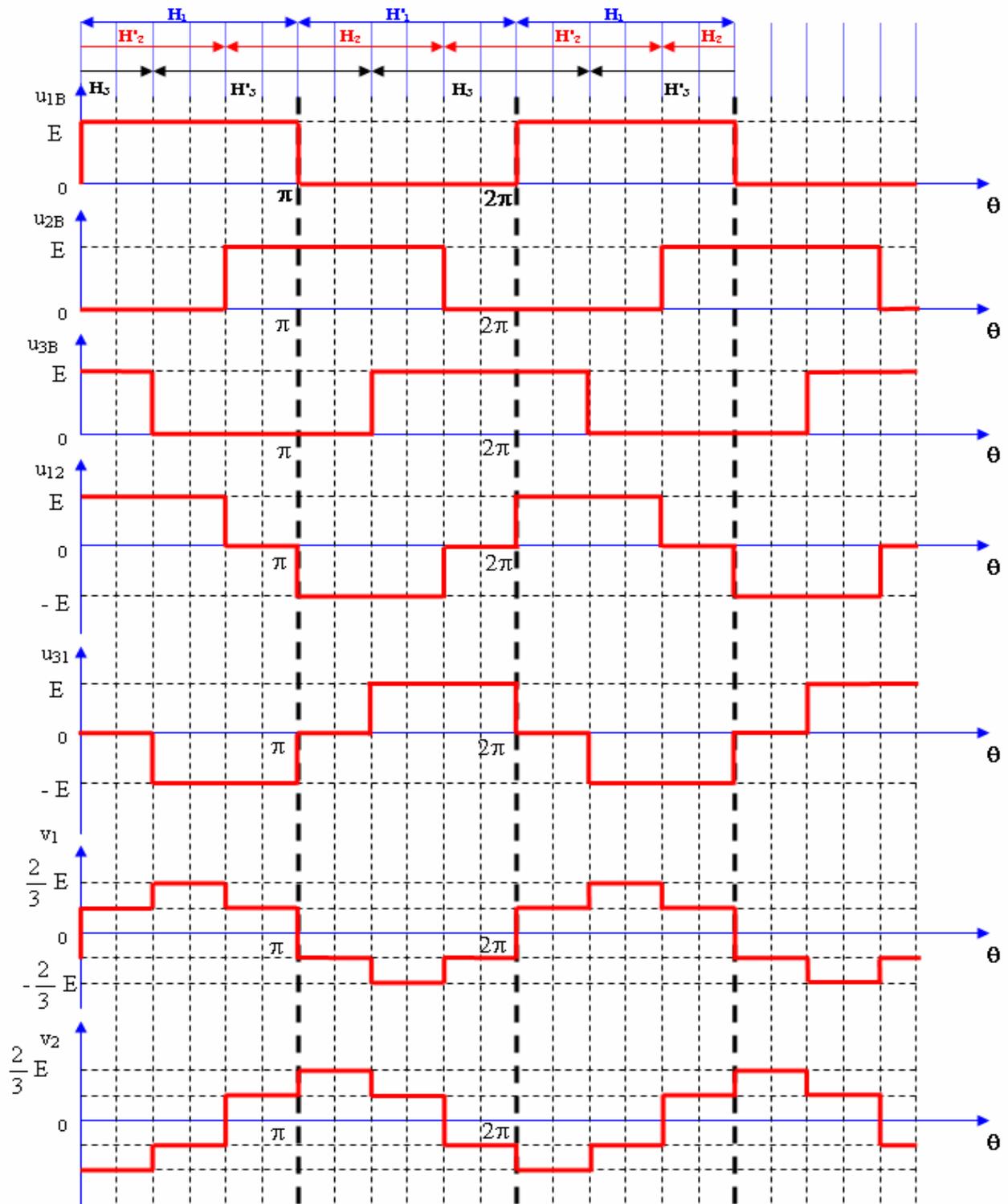


Figure 10. Chronogrammes des tensions d'un onduleur de tension triphasé