

CHAPITRE III : LES ONDULEURS AUTONOMES

1. Introduction

Les onduleurs sont des convertisseurs statiques permettant, à partir d'une tension continue, d'obtenir des grandeurs électriques alternatives. Ils sont utilisés principalement dans deux catégories d'appareils: Les alimentations sans coupures (Ex: onduleurs pour l'informatique, ...). La source continue est souvent constituée de batteries. La tension engendrée est souvent d'amplitude et de fréquence fixe. Les variateurs de vitesse pour machine à courant alternatif. La source continue est obtenue à partir du redressement du réseau. La tension engendrée est de fréquence variable, ce qui fait varier la vitesse des machines à courant alternatif. Dans ce cas, il convient que l'amplitude de cette tension soit également variable. La stratégie de commande de l'onduleur dépendra de l'application envisagée. On se limitera ici à la commande Pleine Onde et à la commande MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion).

2. Onduleur monophasé en pont

L'onduleur monophasé en pont est un montage constitué de 4 soupapes (IGBT, MOS, ...) schématisés par les 4 interrupteurs K_1, K_2, K_3, K_4 , avec leurs diodes de roue libre. Le schéma de principe de ce montage est donné ci-dessous.

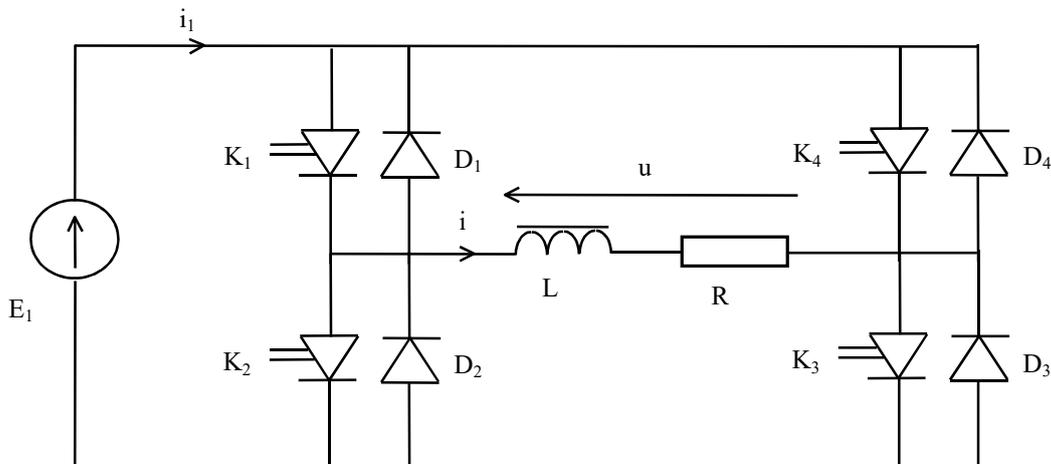


Schéma de principe de l'onduleur en Pont

Le montage est constitué de deux bras d'onduleur: le bras A constitué de K_1 et K_2 , le bras B constitué de K_4 et K_3 .

Si on considère A, K_1, K_2, B, K_4, K_3 comme des variables logiques (fonctionnement en soupapes), on obtient les équations logiques suivantes:

- | | | |
|-----------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| ○ Soupape K_i | $K_i=0 \Rightarrow$ Transistor bloqué | $K_i=1 \Rightarrow$ Transistor saturé |
| ○ Bras A | $A = 0 \Rightarrow K_1 = 0, K_2 = 1$ | $A = 1 \Rightarrow K_1 = 1, K_2 = 0$ |
| ○ Bras B | $B = 0 \Rightarrow K_3 = 1, K_4 = 0$ | $B = 1 \Rightarrow K_3 = 0, K_4 = 1$ |

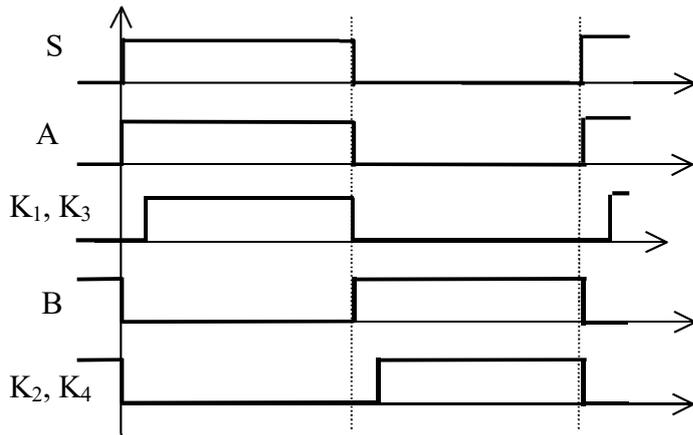
2.1 Etude du fonctionnement de la partie puissance

Nous allons illustrer le fonctionnement dans le cas de la commande pleine onde.

a. Commande pleine onde

Dans cette commande, K_1 et K_3 sont commandés en même temps, saturés pendant l'alternance positive et bloqués pendant l'alternance négative. De même pour K_2 et K_4 , bloqués pendant l'alternance positive et saturés pendant l'alternance négative.

En reprenant les notations ci-dessus, on peut écrire: $S \quad A \quad \bar{B} \quad K_1 \quad \bar{K}_2 \quad K_3 \quad \bar{K}_4$, où S est le signal de synchronisation. On obtient le chronogramme de commande ci-dessous.



Chronogramme de commande

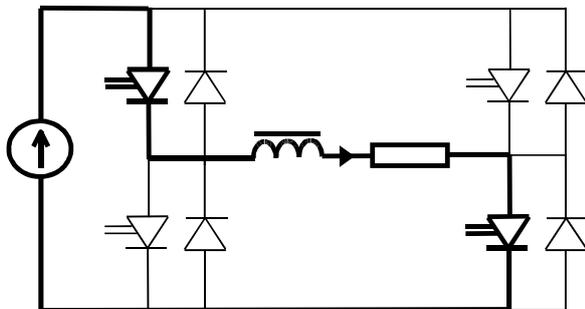
On remarque que $A \quad \bar{B}$, c'est une commande complémentaire.

On remarquera, en début d'alternance un temps mort (retard à la saturation des transistors) permettant au transistor conduisant précédemment de se bloquer.

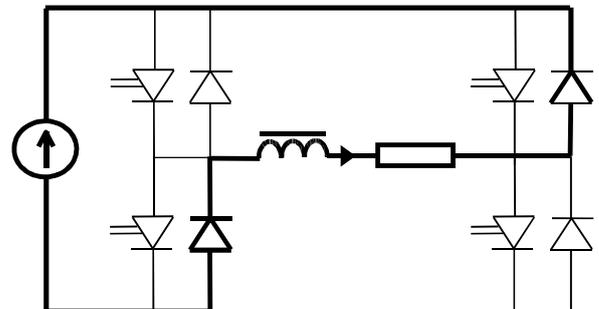
On remarquera que ce sont les blocages des transistors qui délimitent les alternances.

2)- Mailles de Conduction:

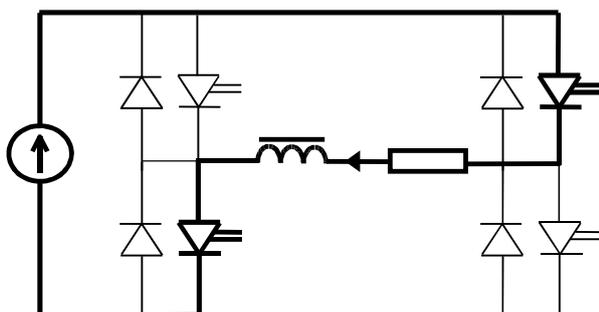
Avec cette commande, il y a enchaînement de quatre mailles de conduction:



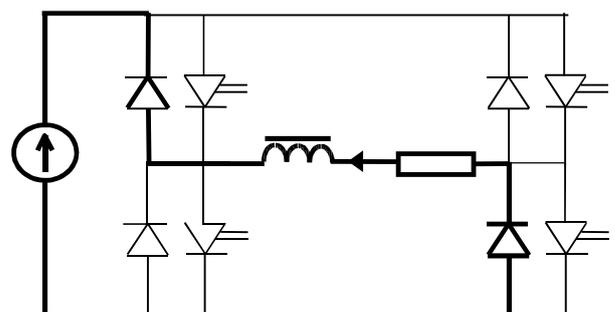
1) - Accumulation alternance positive



2) - Restitution alternance négative



3) - Accumulation alternance négative



4) - Restitution alternance positive

Le signe de l'alternance est déterminé par le signe de $u(t)$.

Chaque alternance débute par une phase de restitution et se termine par une phase d'accumulation.

Les mailles 1) et 4) ont même équation : $L \frac{di}{dt} + Ri = u = E_1$

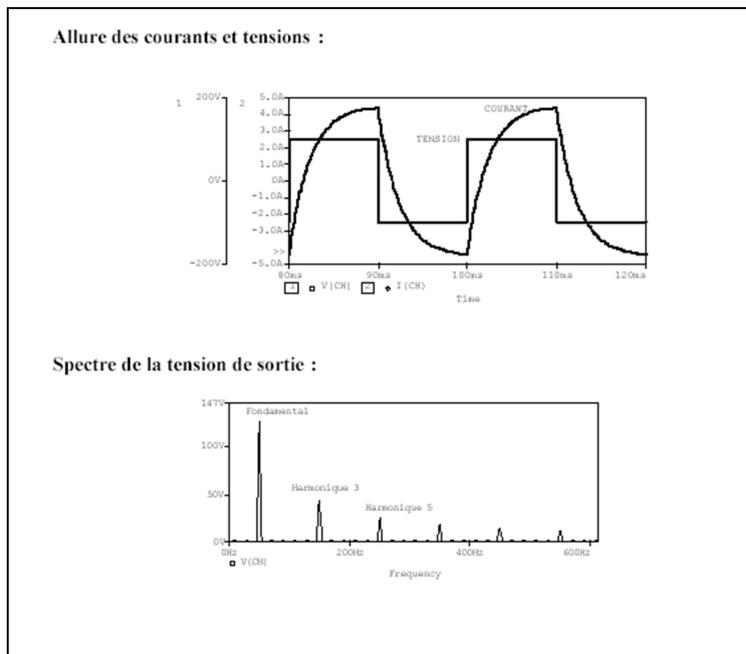
Les mailles 2) et 3) ont même équation : $L \frac{di}{dt} + Ri = u = -E_1$

3) fonctionnement sur charge R, L

a. Commande pleine onde

a.1 Résumé des résultats

La commande Pleine Onde est une commande complémentaire où le signal de synchronisation a une fréquence constante ainsi qu'un rapport cyclique constant égal à un demi.



D'après ce qui précède, la tension $u(t)$ est signal carré d'amplitude E_1 .

Le courant $i(t)$ sera la réponse à $u(t)$ par l'équation différentielle: $L \frac{di}{dt} + Ri = u = \pm E_1$

Suivant la demi-période corresponde.

a.2 Etude du courant de sortie

Les conditions initiales permettent de déterminer l'amplitude du courant:

$[0, T/2]$

$$L \frac{di}{dt} + Ri = u = E_1$$

Alors :

$$i(t) = -(I_0 + E/R)e^{-t/\tau} + \frac{E_1}{R}$$

Avec I_0 la valeur maximale du courant et $\tau=L/R$

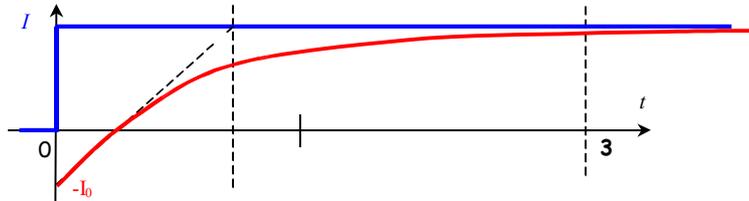
$[T/2, T]$

$$L \frac{di}{dt} + Ri = u = -E_1$$

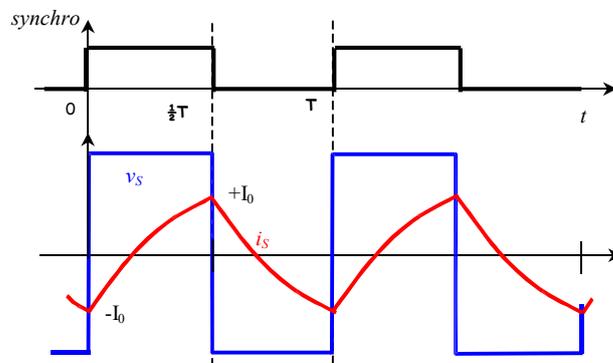
Alors :

$$i(t) = (I_0 + \frac{E}{R}) e^{-\frac{(t-T/2)}{\tau}} - \frac{E_1}{R}$$

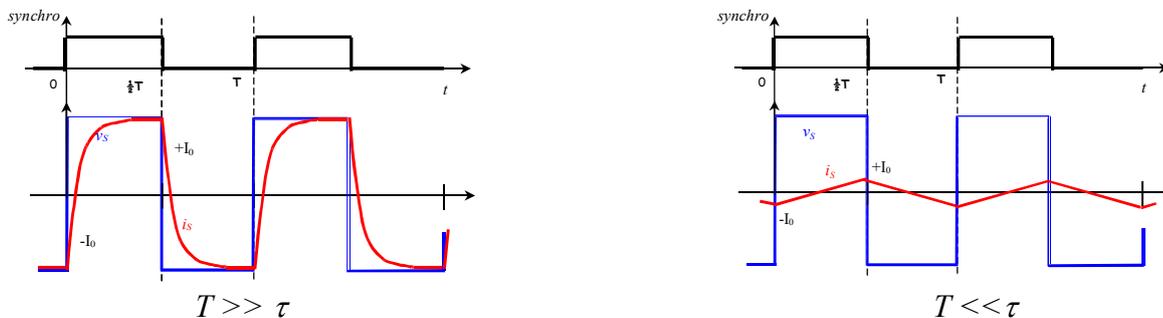
Le spectre est composé d'un harmonique impair sur deux. L'enveloppe spectrale varie en n où n est le rang de l'harmonique considérée. On constate que $u(t)$ est riche en harmoniques de rang faible, ce qui rend le filtrage du courant peu aisé.



Le chronogramme de l'intensité du courant :



La valeur du rapport $x=T/\tau$ influe fortement sur la forme du courant :

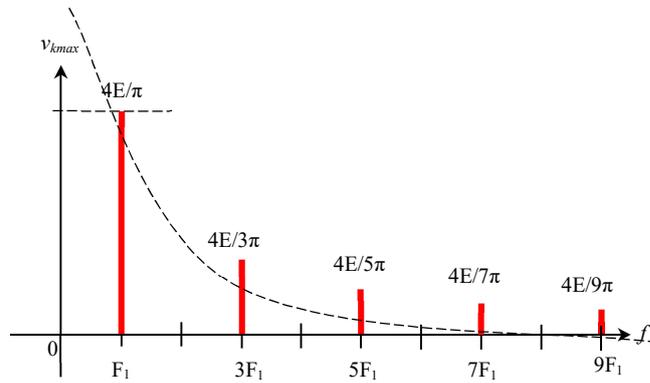


a.3 Spectre de la tension ondulée

L'onde $u(t)$ présente une symétrie par rapport à l'origine O, et sa série de Fourier est constituée par des termes en sinus de rangs impairs :

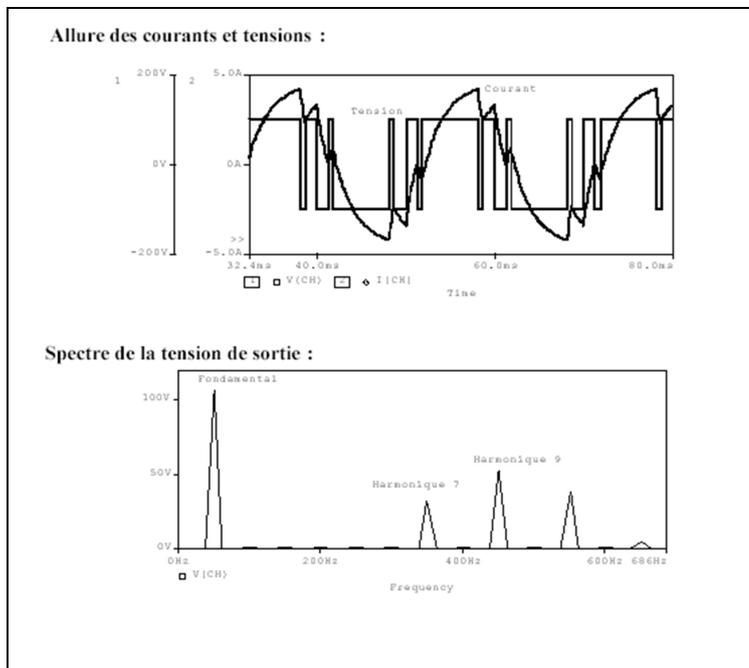
$$u(t) = \frac{4.E}{\pi} \left(\sin \theta + \frac{1}{3} \sin 3\theta + \frac{1}{5} \sin 5\theta + \frac{1}{7} \sin 7\theta + \dots + \frac{1}{K} \sin K\theta \right) \text{ K étant un entier impair.}$$

On obtient le spectre :



2)- COMMANDE M.L.I. CALCULEE

Il s'agit d'une commande devant donner un courant à fréquence fixe. On cherche à éliminer certaines fréquences des spectres de la tension et du courant.



Pour éliminer des harmoniques du spectre de la tension, on effectue des commutations supplémentaires dans les alternances. Ici, les angles de commutation sont calculés afin d'éliminer les harmoniques 3 et 5.

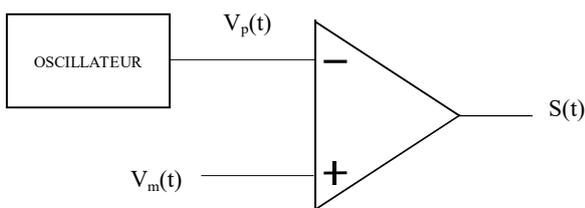
On observe que les formes d'ondes se rapprochent un peu plus de la sinusoïde que dans la commande pleine onde.

Le spectre de la tension est nettement amélioré.

Le spectre du courant sera meilleur encore car la charge constitue un filtre passe bas qui sera d'autant plus efficace que les harmoniques seront de rang élevé.

3)- LE MODULATEUR M.L.I. (Modulation de Largeur d'Impulsion):

Le schéma synoptique d'un modulateur M.L.I. est donné ci-dessous:

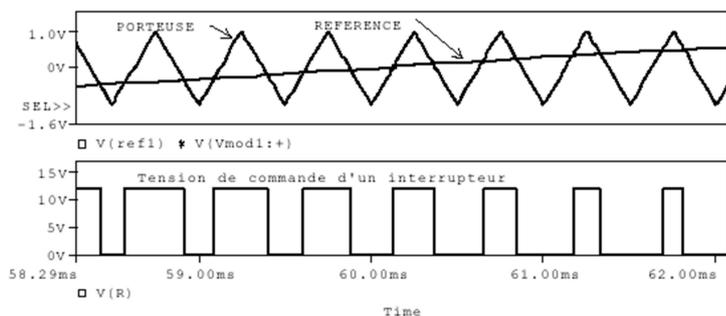


Principe du modulateur M.L.I.

La porteuse, $V_p(t)$ est un signal triangulaire symétrique et régulier de fréquence et d'amplitude constante.

Le signal modulant, $V_m(t)$ est le signal que l'on veut reproduire à l'aide l'onduleur.

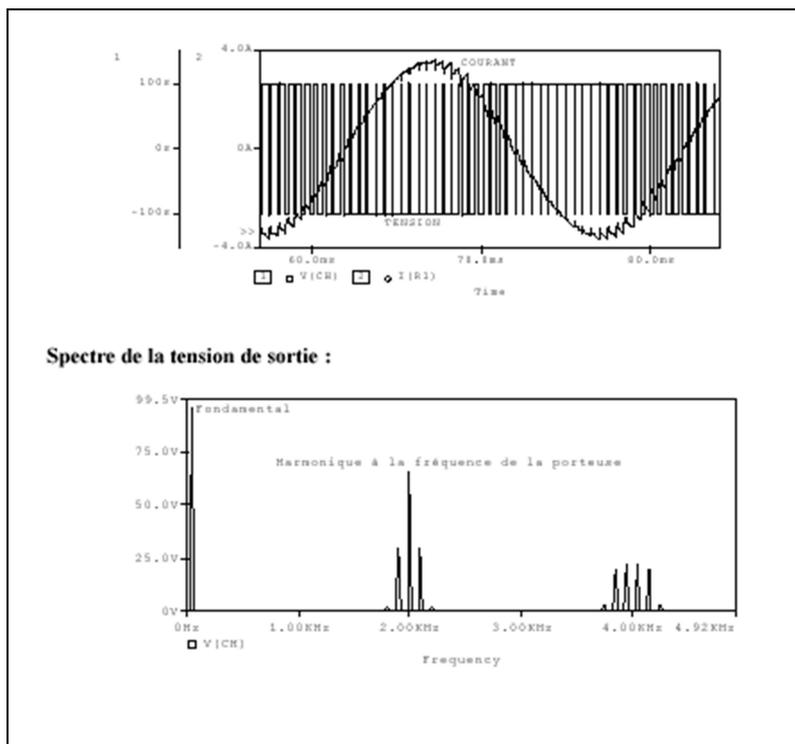
Le signal modulé, $S(t)$ est le signal de synchronisation de la commande du pont



Le chronogramme ci-contre illustre un fonctionnement du modulateur M.L.I.

On remarquera que le signal modulant se retrouve codé dans le rapport cyclique du signal modulé.

4)- LA MODULATION M.L.I. (+E, -E):



Pour la forme d'onde ci-contre, le signal modulant est une sinusoïde.

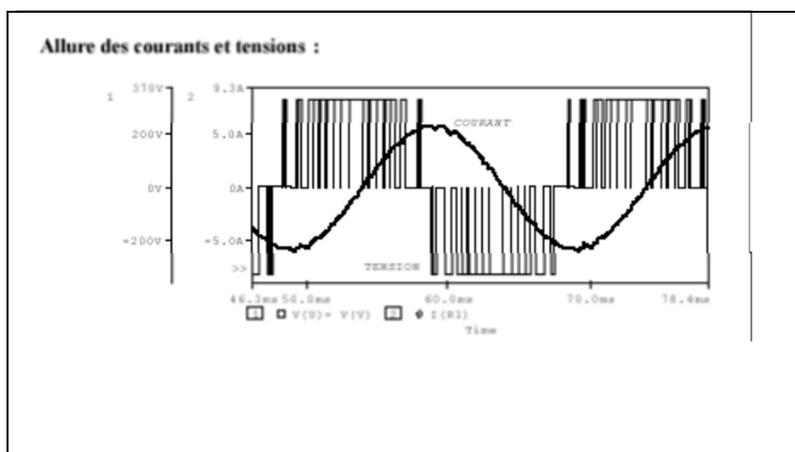
La tension en sortie d'onduleur est un signal rectangulaire d'amplitude E_1 et de rapport cyclique variant comme le signal modulant, donc de manière sinusoïdale.

On constate que le courant en sortie de l'onduleur est quasi sinusoïdal (quasi-identique au signal modulant). On dira que l'onduleur en pont se comporte comme un démodulateur M.L.I. en ce qui concerne le courant quand la charge est du type R, L (filtre passe bas).

On constate que la partie basse fréquence du spectre reproduit le spectre du signal modulant.

5)- LA MODULATION M.L.I. (+E, 0, -E):

Il s'agit d'une variante dans la commande du pont. Le signal de commande est envoyé au premier bras d'onduleur. Le deuxième bras du pont est commandé par le signe du signal modulant.



Pour la forme d'onde ci-contre, le signal modulant est une sinusoïde.

On constate que le courant en sortie de l'onduleur est de meilleure qualité par rapport à la modulation précédente.

De même, on constate que le spectre de la tension est plus

favorable.

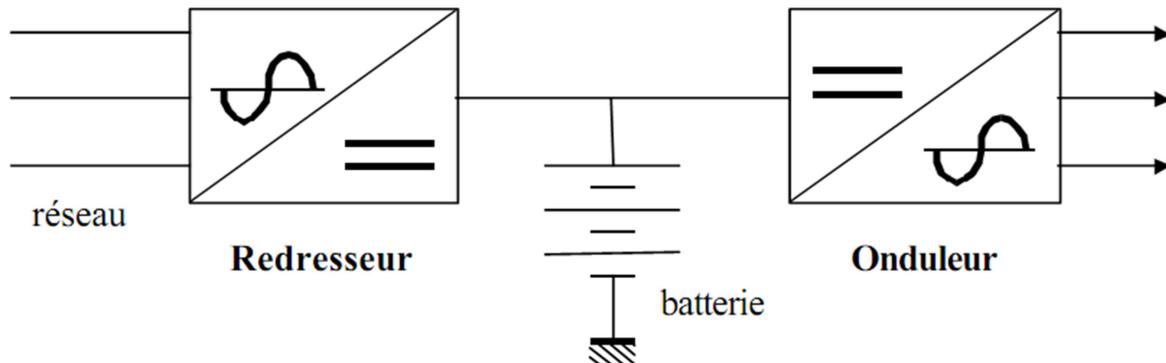
6. Applications des onduleurs

Nous citons quelques domaines d'application :

- Production de tensions sinusoïdales de fréquences moyennes (de quelques kHz à quelques 10Khz): soudage, chauffage par induction,
- Alimentations alternatives de secours fonctionnant sur batteries d'accumulateurs,
- Alimentation des moteurs à courant alternatif à fréquence variable.

Exemple : Alimentation de secours.

On considère le schéma de la figure suivante :



Les alimentations de secours sont destinées à remplacer le réseau de distribution (monophasé ou triphasé) en cas de défaillance du réseau. On les utilise dans les deux cas suivants :

- Pour les installations qui nécessitent la continuité de l'alimentation : hôpitaux, centraux téléphoniques, circuits de sécurité,...
- Pour les appareils (ordinateurs, ...) qui exigent non seulement la continuité de leur alimentation, mais encore la protection contre les perturbations du réseau de distribution (variations de tension, parasites, coupures, ...).

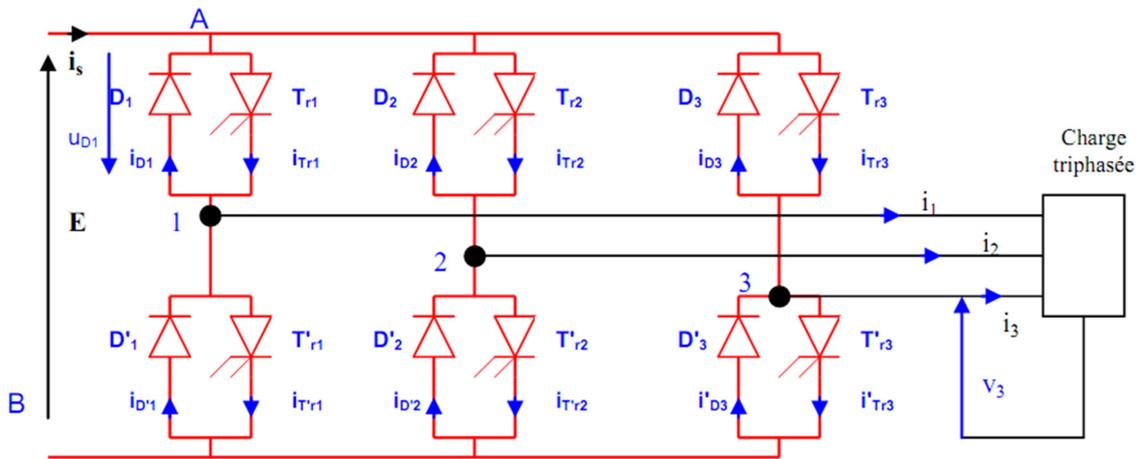
Les alimentations de secours comportent trois parties principales:

- un redresseur-chargeur, alimenté par le réseau, constitué soit d'un pont à diodes suivi d'un hacheur, soit d'un pont commandé,
- Une batterie d'accumulateurs,
- Un onduleur de fréquence 50Hz délivrant une tension parfaitement sinusoïdale.

7. Onduleur de tension triphasé

Nous nous intéresserons uniquement à la structure de l'onduleur à trois bras et à interrupteurs en série.

Considérons le schéma ci-dessous :



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

$$\begin{cases} i_1 + i_2 + i_3 = 0 \\ v_1 + v_2 + v_3 = 0 \end{cases} \text{ et } \begin{cases} u_{12} = v_1 - v_2 \longrightarrow (1) \\ u_{23} = v_2 - v_3 \longrightarrow (2) \\ u_{31} = v_3 - v_1 \longrightarrow (3) \end{cases}$$

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 et 3, on peut établir les expressions des deux autres tensions simples :

$$\begin{aligned} v_2 &= \frac{1}{3} \cdot (u_{23} - u_{12}) \\ v_3 &= \frac{1}{3} \cdot (u_{31} - u_{23}) \end{aligned}$$

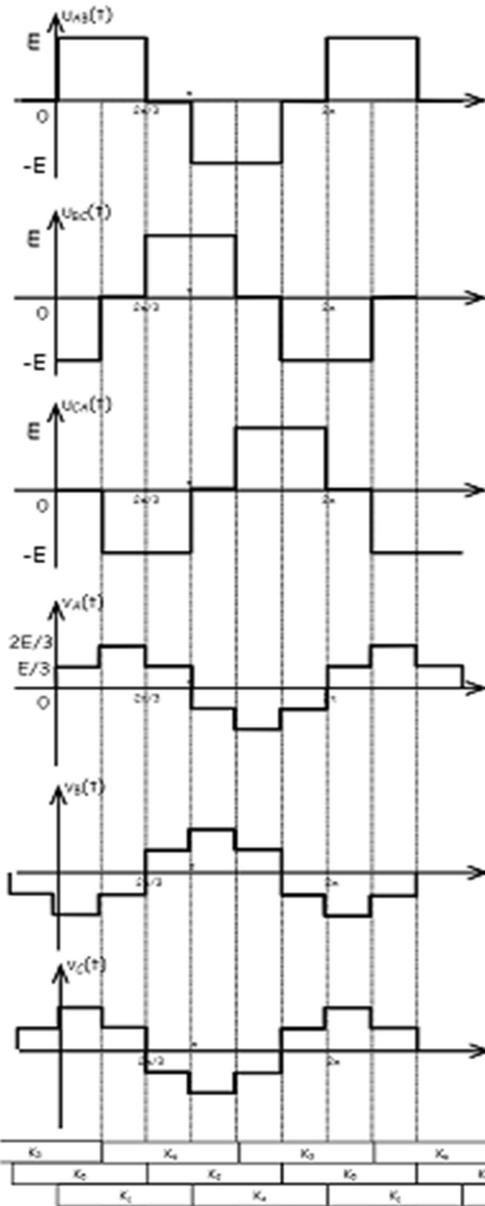
7.1. Différents types de commandes

a. Commande adjacente type 180°

Chaque interrupteur est commandé pendant 180°. Les commandes des interrupteurs d'une même branche (bras) sont adjacentes. Les commandes des interrupteurs de deux branches différentes sont décalées de 120°.

K1		K4		K1	
K5		K2		K5	
K3	K6		K3		K6

La tension de sortie est fixz quelle que soit la charge. On trouve la même forme pour la tension entre phases que pour un pont monophasé avec commande décalée et $\beta=60^\circ$ (minimum d'harmoniques et suppression du 3 et multiples du 3).



La valeur efficace de U est

$$U = \sqrt{\frac{2}{3}} E$$

La valeur efficace de la tension simple est

$$V = \frac{\sqrt{2}}{3} E$$

Les harmoniques de v_A sont

$$v(t) = \frac{2E}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{2k+1} \sin((2k+1)\omega t)$$

b. Commande disjointe : type 120° ou 150°

Chaque interrupteur est commandé pendant 120° ou 150°. Il y a un trou de 60° (ou 30°) entre les commandes des deux interrupteurs de d'une même branche (commande disjointe).

Les commandes des interrupteurs d'une branche sont décalées de 120° par rapport aux interrupteurs de la branche suivante.

K1	K4	K1	K4
K5	K2	K5	K2
K6	K3	K6	K3

7.2 Onduleur à modulation de largeur d'impulsion

Les principes et les procédés sont les mêmes que ceux utilisés pour les onduleurs monophasés, aux deux détails suivants près:

- Les différentes voies étant décalées entre elles d'un tiers de période, il faut créer trois commandes distinctes. En particulier, pour la MLI en temps réel, on utilisera donc trois modulantes et, a priori, trois porteuses (on peut cependant employer une porteuse commune dans la plupart des cas).
- On montre que les harmoniques multiples de 3 présents dans les tensions par voie ne sont pas transmis vers les tensions de sortie. En MLI pré-calculée, il n'est donc pas utile de les éliminer ce qui permet de gagner un rang d'harmoniques avec un découpage donné. On peut également utiliser cette propriété dans le cadre de la MLI en temps réel en ajoutant à la modulante un harmonique 3 de caractéristiques adéquates, ce qui permet d'obtenir une valeur efficace maximale de fondamental égale à $0,8E$ sans perte de découpages au lieu de $0,71E$ pour la MLI monophasée.