

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohammed Seddik BENYAHIA- Jijel



Faculté des Sciences et de la Technologie

Département d'Automatique

Notes de cours : **Pr. Boubakir Ahsene**

Module : Association Convertisseurs-Machines

Master 1 : Automatique et Systèmes & Automatique et informatique industrielle

2023-2024

Objectifs de l'enseignement :

Etudier les différentes associations convertisseurs aux machines électriques tournantes afin de contrôler le couple et la vitesse d'un système.

Connaissances préalables recommandées :

L'étudiant devra posséder les connaissances suivantes :

- Electronique de puissance.

Contenu de la matière :

Chapitre 1. Convertisseurs continu-alternatif

- Convertisseur électrique,
- Convertisseur Continu Alternatif : Onduleurs
- Alimentation Sans Interruption
- Onduleur
- Les interrupteurs
- Types de commande des interrupteurs et critère de choix
- Onduleur de tension monophasée à 2 interrupteurs :
- Onduleurs triphasés :

Chapitre 2. Variateurs des moteurs à courant continu

- Entraînements à vitesse variable des machines électriques
- Moteur à courant continu : Principe de fonctionnement et constitution.
- Variation de vitesse des machines à courant continu.

Chapitre 3. Variateurs des moteurs asynchrones et synchrones :

- Le moteur asynchrone
- Variateurs des moteurs asynchrones
- Variateurs des moteurs synchrones.
- Modélisation et Commande de la Machine Asynchrone

Chapitre 4. Critères de choix et mise en œuvre d'un entraînement à vitesse variable.

Mode d'évaluation :

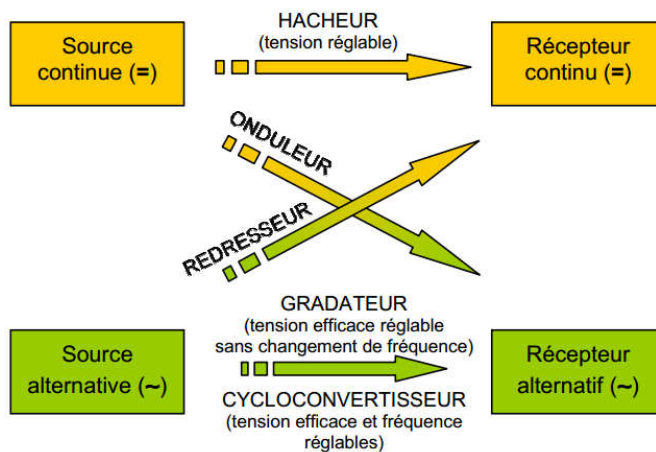
Contrôle continu : 40% ; Examen: 60%.

Chapitre 1. Convertisseurs continu-alternatif

1.1. Convertisseur électrique

Un convertisseur électrique (statique) est un système permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné en la convertissant. Les premiers convertisseurs de puissance électrique ont été réalisés avec des machines électriques couplées mécaniquement. Avec l'apparition des semi-conducteurs et de l'électronique de puissance, avec les diodes, les transistors, thyristors etc... les systèmes de conversion deviennent de plus en plus élaborés et ne nécessitent plus de machines tournantes. C'est l'ère **des convertisseurs statiques**.

On distingue plusieurs familles de convertisseurs statiques :



Un convertisseur statique d'énergie est dit **réversible** lorsque **l'énergie** peut transiter dans **les deux sens** (source → récepteur ou récepteur → source) de manière naturelle ou commandée.

Exemple : Lors du freinage d'une voiture électrique, l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique (moteur → génératrice) qui sert à recharger les accumulateurs à travers le redresseur réversible (redresseur commandé).

1. ALTERNATIF / CONTINU

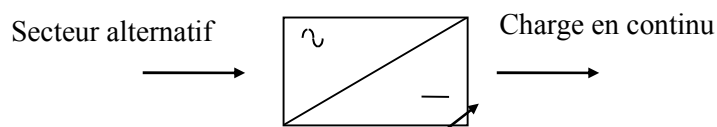
REDRESSEUR

A tension fixe

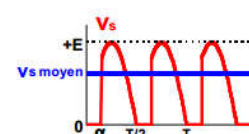
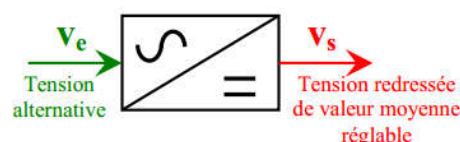
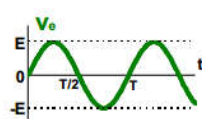


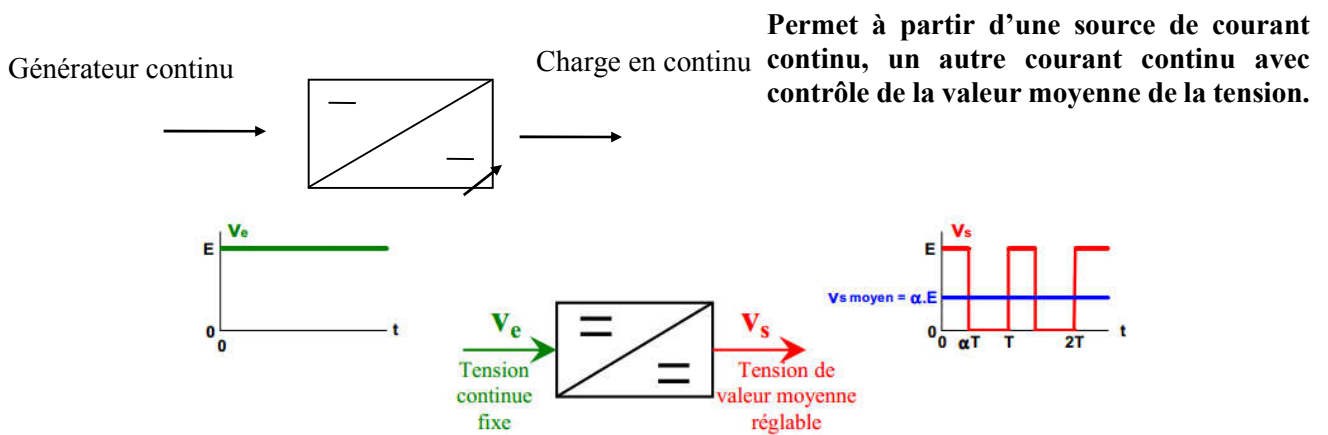
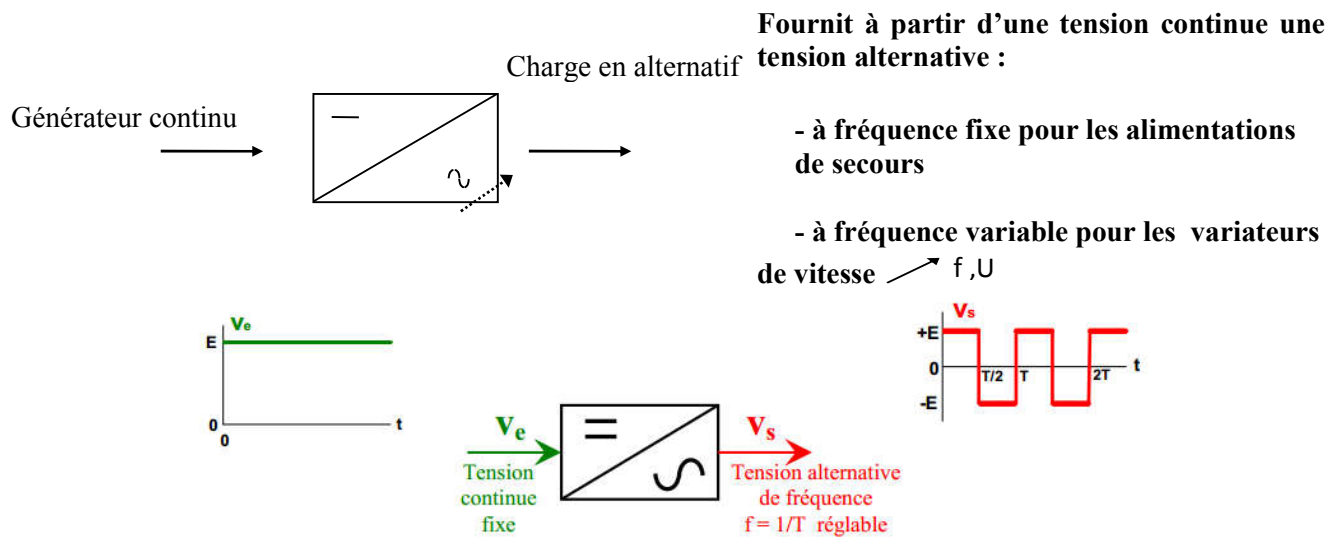
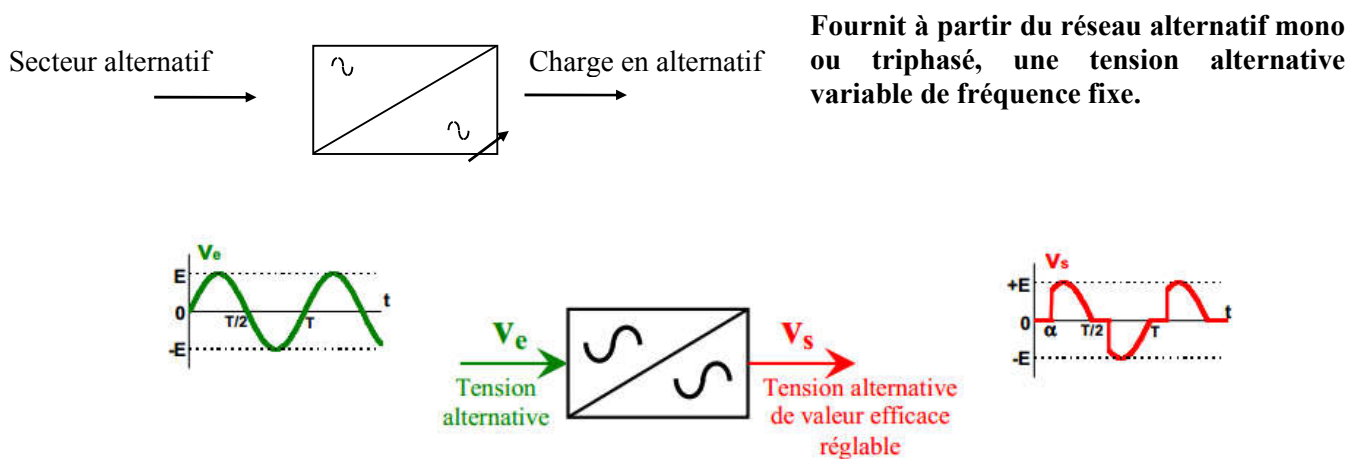
Permet à partir d'une tension alternative d'obtenir une tension continue ou redressée.

A tension contrôlée



Permet à partir d'une tension alternative d'obtenir une tension continue ou redressée de valeur moyenne variable.



2. CONTINU / CONTINU**HACHEUR****3. CONTINU / ALTERNATIF****ONDULEUR****4. ALTERNATIF / ALTERNATIF****GRADATEUR**

1.2. Convertisseur Continu Alternatif : Onduleurs

1.2.1. Définitions

C'est un convertisseur statique qui permet d'alimenter une charge **en alternatif** à partir d'une **source continue**.

On les retrouve dans deux types de systèmes :

- ♦ **Les Alimentations Sans Interruption** (ASI ou UPS en anglais) (ou alimentation statique sans coupure (ASSC)). Elles servent d'alimentation de secours et elles permettent de fournir **un courant alternatif stable** et dépourvu de coupures ou de micro-coupures, quoi qu'il se produise sur le réseau électrique. La source continue est généralement une batterie d'accumulateurs. La fréquence est l'amplitude sont fixées (Les alimentation sans interruption seront étudiées dans ce qui suit).
- ♦ **Les variateurs de vitesse** pour machines à courant alternatifs. Ils sont utilisés dans la commande de vitesse et/ou de couple pour les moteurs asynchrones et les moteurs synchrones. La source continue est obtenue par redressement du réseau. La fréquence est l'amplitude sont contrôlées.



On peut classer les onduleurs selon plusieurs critères

A	- Les onduleurs monophasés ou triphasés .
B	- Les onduleurs de courant : la source d'entrée est une source de courant, la source de sortie est une source de tension. - Les onduleurs de tension : la source d'entrée est une source de tension, la source de sortie est une source de courant.
C	- Les onduleurs autonomes : la fréquence des grandeurs de sortie dépend de la commande. - Les onduleurs non autonomes ou assistés : la fréquence des grandeurs de sortie est imposée par la source de sortie elle-même (il s'agit du réseau alternatif dans le cas des redresseurs fonctionnant en onduleur non autonome).
D	- Les onduleurs à onde rectangulaire . - Les onduleurs en créneaux de largeur variable (ou à onde décalée). - Les onduleurs à modulation de largeur d'impulsions (MLI) .

1.3. Alimentation Sans Interruption

Une **alimentation sans interruption** (ASI), **alimentation statique sans coupure** (ASSC) (en anglais uninterruptible power supply ou UPS) ou, du nom d'un de ses composants, l'onduleur (en anglais inverter), est un dispositif de l'électronique de puissance qui permet de fournir un courant alternatif stable et dépourvu de coupures ou demicro-coupures, quoi qu'il se produise sur le réseau électrique



1.3.1. Constitution :

Elle repose sur la mise en cascade des dispositifs suivants :

- un convertisseur de courant alternatif (venant de la prise de courant) en courant continu appelé redresseur ;
- un dispositif de stockage de l'énergie (batterie d'accumulateurs, supercondensateurs, volant d'inertie, etc.),
- un convertisseur produisant du courant alternatif (pour la sortie de l'appareil), appelé onduleur ou « mutateur » fonctionnant à fréquence fixe.

1.3.2. Applications

Les applications sont très diversifiées en termes de puissance : elles vont du simple onduleur d'un ordinateur particulier (éviter la perte de données), au système de secours de centrale nucléaire (éviter la fusion du cœur), en passant par l'alimentation des réseaux critiques nécessitant une continuité dans l'alimentation électrique (par exemple blocs opératoires des hôpitaux).

1.3.3. Topologies

Bien qu'il existe sur le marché plusieurs types d'ASI, différents du point de vue de leur configuration ou de leur architecture, on parvient généralement à les classer parmi les trois topologies suivantes : **en attente passive (offline ou passive standby)**, **en interaction avec le réseau (line-interactive)** et à **double conversion (online ou double conversion)**. Ces expressions désignent l'état de l'onduleur lors du fonctionnement normal du réseau électrique (**mode normal de l'ASI**).

Quelle que soit sa topologie, l'ASI fonctionne selon le même principe : lorsque la tension du réseau d'entrée sort des tolérances spécifiées de l'ASI, ou lors d'une défaillance de ce réseau, l'ASI se met **en mode autonome**. Ce mode est maintenu pendant toute la durée d'autonomie de la batterie ou, suivant le cas, jusqu'à ce que le réseau revienne dans les tolérances spécifiées, ce qui entraîne un retour au mode normal.

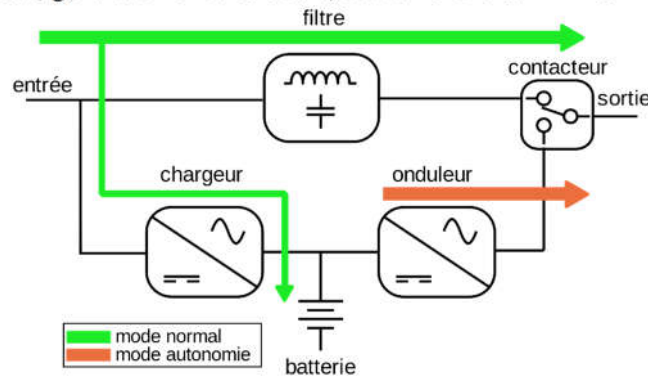
En attente passive

a. En mode normal

L'onduleur est en attente, isolé de la charge par l'interrupteur d'ASI. La charge est alimentée directement par le secteur, ou par l'entremise d'un filtre ou conditionneur qui élimine certaines perturbations électriques. Le chargeur, branché sur le réseau, assure la recharge de la batterie ;

b. En mode autonome

L'alimentation de la charge est transférée du réseau vers l'onduleur via l'interrupteur d'ASI. Le temps de permutation de l'interrupteur, généralement très court, est de l'ordre de 10 ms.



ASI fonctionnant en attente passive

Simple et économique, cette configuration n'offre qu'une protection élémentaire. La charge n'est pas véritablement isolée par rapport au réseau électrique et la régulation de fréquence y est inexistante.

En interaction avec le réseau

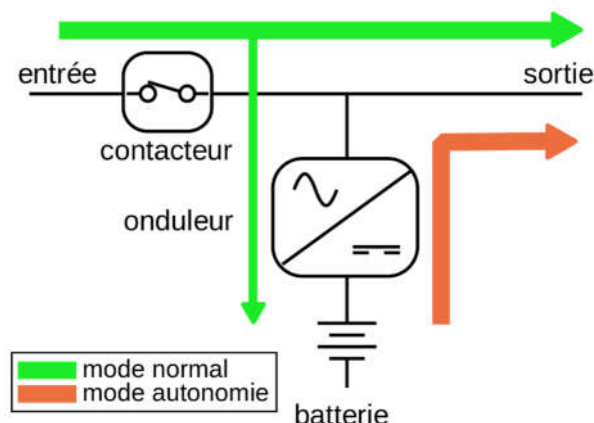
a. En mode normal

La charge est alimentée par le « réseau conditionné » constitué par l'onduleur en parallèle (en interaction) avec le réseau. L'onduleur, à fonctionnement réversible, conditionne la puissance de sortie et assure la recharge de la batterie.

b. En mode autonome

L'onduleur et la batterie assurent l'alimentation de la charge. Le contacteur de puissance coupe l'alimentation d'entrée pour éviter un retour d'alimentation depuis l'onduleur.

L'interaction avec le réseau permet une certaine régulation de la tension de sortie mais elle reste moins efficace que celle effectuée sur l'ASI à double conversion.



ASI fonctionnant en interaction avec le réseau

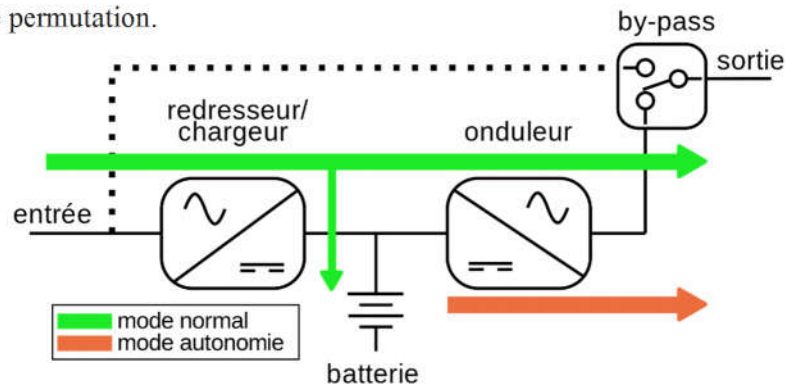
À double conversion

a. En mode normal

L'onduleur est en série entre le réseau et la charge. La puissance fournie à la charge transite en permanence par le duo chargeur-onduleur qui réalise une double conversion alternatif/continu - continu/alternatif.

b. En mode autonome

L'onduleur et la batterie assurent l'alimentation de la charge. Cette configuration est la plus coûteuse, mais aussi la plus complète au point de vue de la protection de la charge. L'onduleur régénère en permanence la tension fournie par le réseau, ce qui permet une régulation précise de la tension et de la fréquence de sortie (il y a même possibilité de fonctionner en convertisseur de fréquence, lorsque cela est prévu). De plus, l'isolement de la charge par rapport au réseau élimine les reports des perturbations du réseau électrique sur la sortie de l'ASI. Par ailleurs, le passage du mode normal au mode autonome s'effectue instantanément, sans aucun délai de permutation.



ASI fonctionnant en double conversion

L'ASI comporte un contacteur statique de dérivation pour rediriger la charge vers le réseau (ou vers une source auxiliaire constituée par exemple d'une génératrice diesel), dans l'éventualité d'une défaillance de l'ASI ou avant la fin d'autonomie de ses batteries. L'ASI étant synchronisée avec le réseau de dérivation, ce transfert s'effectue sans coupure.

Grâce à ses nombreux avantages, l'ASI à double conversion est un excellent choix pour protéger les sites et les applications critiques. La puissance et l'autonomie vont être des facteurs clés pour déterminer à quel moment il faut démarrer un groupe électrogène en cas d'interruption prolongée du secteur.

1.4. Onduleur

Définition : Un onduleur est un convertisseur statique continu – alternatif.

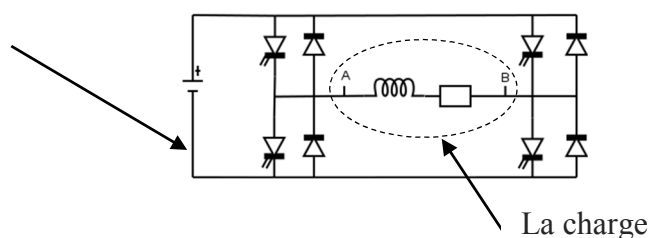
Symbole :

Principe

Les onduleurs sont basés sur une structure **en pont en H**, constituée le plus souvent d'interrupteurs électroniques tels que les **IGBT**, **transistors de puissance** ou **thyristors**. Par un jeu de commutations commandées de manière appropriée (généralement **une modulation de largeur d'impulsion**), on module la source afin d'obtenir un signal alternatif de fréquence désirée.

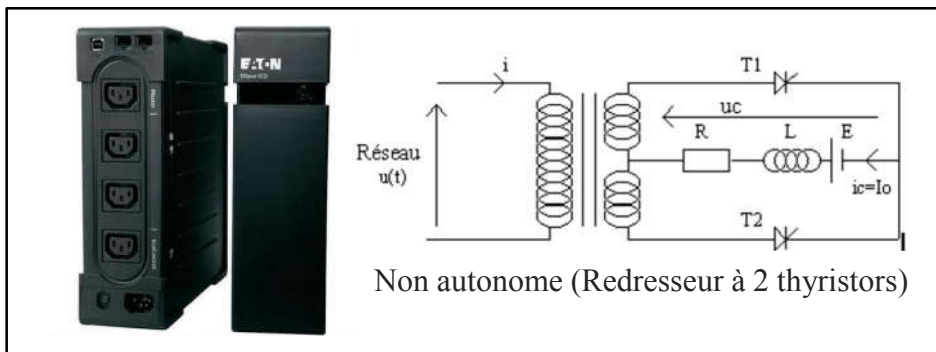


L'onduleur



Il existe différents types d'onduleurs :

- Les onduleurs de tension et les onduleurs de courant ;
 - Les onduleurs autonomes et les onduleurs non autonomes
- ✓ **Autonome** : Impose sa propre fréquence à la charge. Il n'a pas toujours besoin de réseau électrique pour fonctionner. (par exemple un convertisseur de voyage que l'on branche sur la prise allume-cigare d'une voiture utilise le 12 V continu du véhicule pour générer du 120 ou 230 V, alternatif en 50 ou 60 Hz) ;
- ✓ **Non autonome (ou assisté)** : Par opposition, un onduleur non autonome ou assisté (redresseur avec transfert d'énergie du continu vers l'alternatif) voit sa fréquence imposée par celle du réseau sur lequel il est branché.



Non autonome

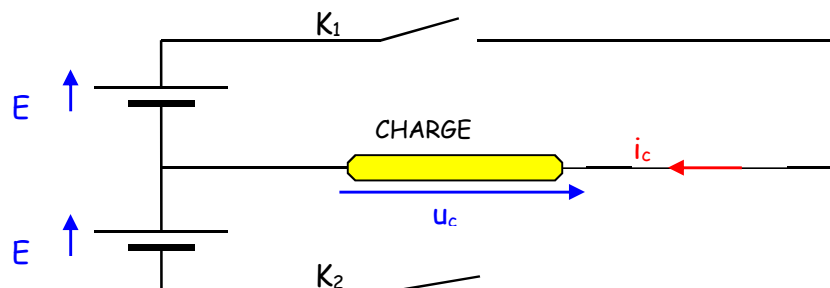


autonome

1.4.1. Principe d'un onduleur : Exemple un onduleur à deux interrupteurs électroniques

1.4.2. Charge résistive

Deux alimentations délivrant deux tensions, continues et égales, alimentent une charge résistive par l'intermédiaire de deux interrupteurs K_1 et K_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 sur la figure suivante.



Les flèches sur les interrupteurs indiquent le sens passant de ces derniers. Il est important de noter que le courant ne peut circuler que dans ce sens.

a – Etude de la tension aux bornes de la charge :

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

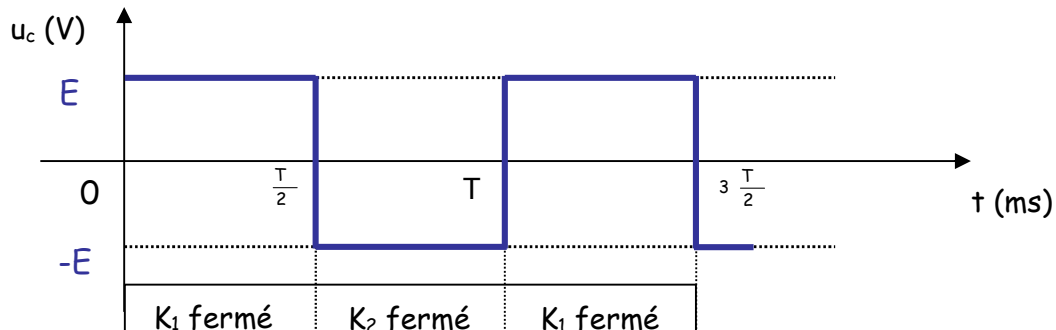
. K1 fermé K2 ouvert $u_c = E$.

. K1 ouvert K2 fermé $u_c = -E$.

La valeur moyenne de u_c est donc : $\bar{U}_c = 0 \text{ V}$.

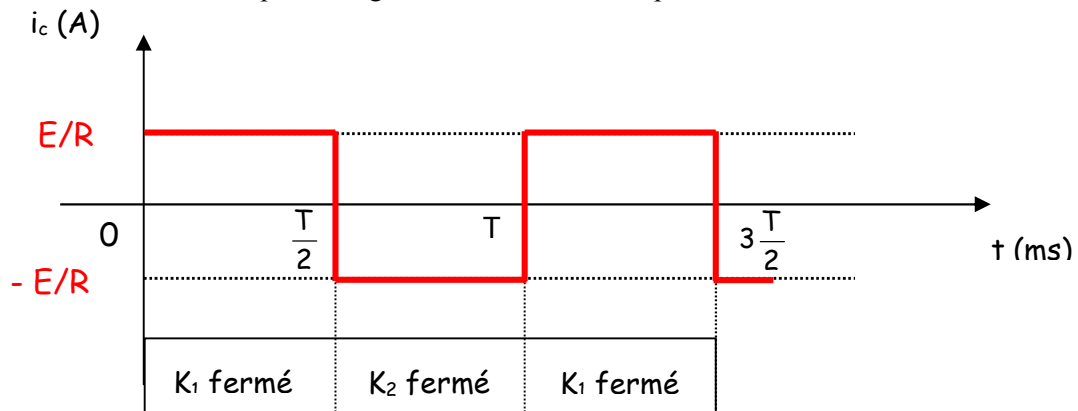
La valeur efficace de u_c est donc : $U_c = E$.

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



b – Etude du courant dans une charge résistive :

La charge résistive ne modifie pas l'image du courant, dont la représentation est la suivante :

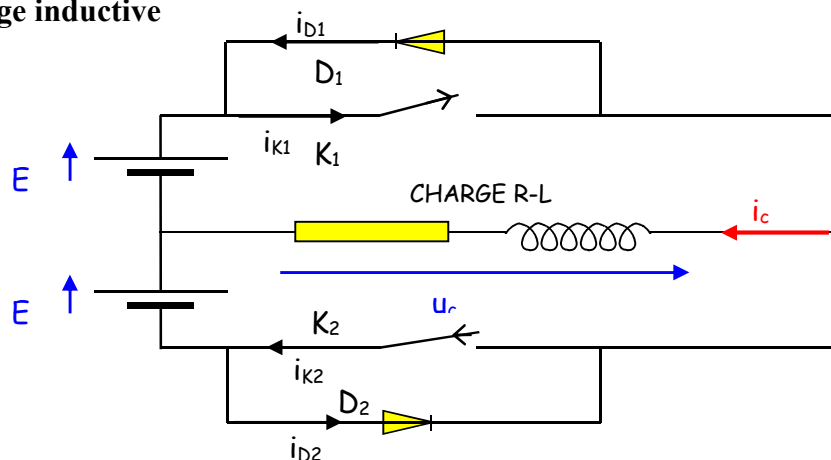


- La valeur moyenne de i_c est donc : $\bar{I}_c = 0 \text{ A}$.

- La valeur efficace de i_c est donc : $I_c = \frac{E}{R}$.

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

1.4.3. Charge inductive



La charge est maintenant composée d'une résistance associée à un élément fortement inductif. Ce nouveau composant oblige l'adjonction de deux diodes montées en antiparallèle sur les interrupteurs.

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.

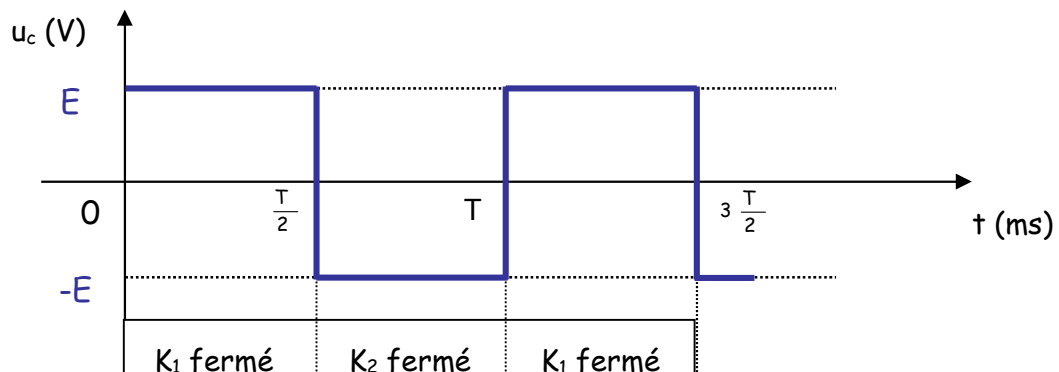
a – Etude de la tension aux bornes de la charge :

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

- K1 fermé K2 ouvert $u_c = E$.
- K1 ouvert K2 fermé $u_c = -E$.

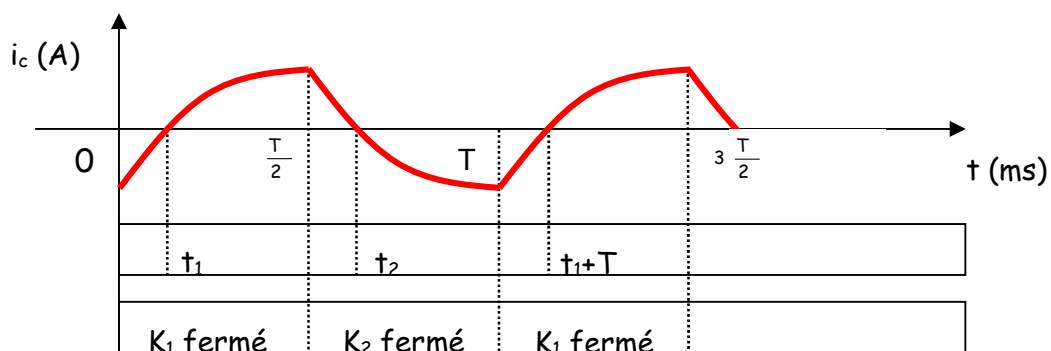
La représentation de la tension u_c ne change pas avec la charge, les calculs des valeurs moyenne et efficace s'effectuent comme précédemment.

Les diodes D1 et D2 ne jouent aucun rôle dans la représentation de la tension qui est la suivante.



b - Visualisation du courant dans une charge inductive :

La charge est maintenant inductive, le courant i_c n'est plus la réplique de la tension, les courbes obtenues sont représentées ci-après :



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.

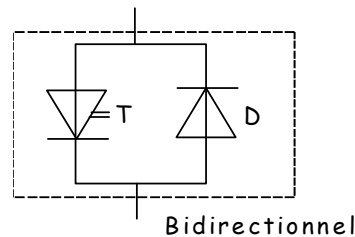
1.5. Les interrupteurs :

Les interrupteurs électroniques sont, ou **des transistors** ou **des thyristors** fonctionnant en commutation; ils sont rendus bidirectionnels par la mise en antiparallèle de diodes. Par la suite, nous ne préciserons plus la nature des composants : transistors ou thyristors; ils seront désignés par H.

Justification : Dans le cas d'une charge inductive, l'annulation du courant i et celle de la tension u ne sont pas simultanée (loi de Lenz).

Rappel: Le courant à travers une inductance ne peut subir de discontinuité. Lorsque K2 est ouvert et K1 fermé ($u = E$), l'intensité du courant peut être positive ou négative. Or un transistor (K1) ne laisse passer le courant que s'il est positif.

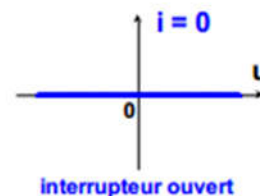
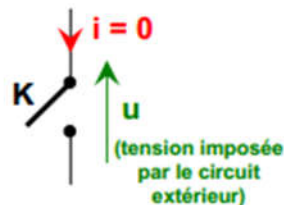
Afin de permettre la circulation du courant dans les deux sens, on place une diode en formant un montage dit antiparallèle.



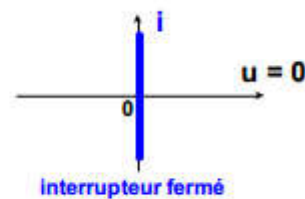
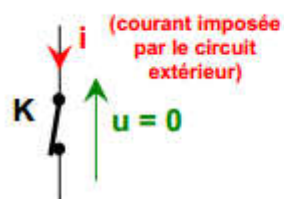
- Les interrupteurs parfaits :

Un interrupteur parfait possède deux états : "Ouvert (OFF)" et "Fermé (ON)"

Interrupteur ouvert (position OFF : $i = 0$)

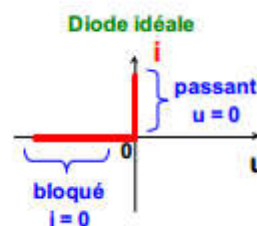
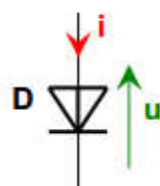


Interrupteur fermé (position ON : $u = 0$)



- Les interrupteurs à semi-conducteurs

a- La diode idéale (interrupteur non commandé) :



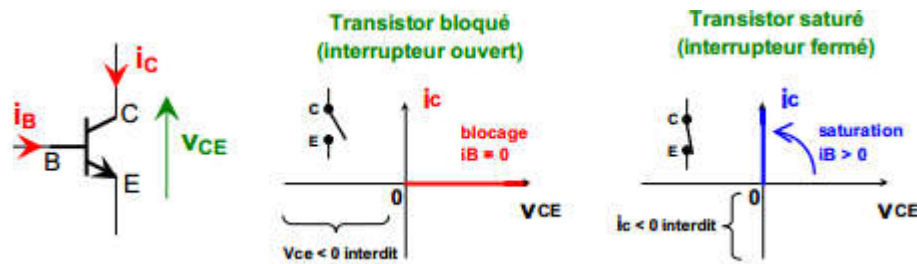
La diode passe de l'état bloqué à l'état passant lorsque u ou i change de signe (positif).

La diode passe de l'état passant à l'état bloqué lorsque u ou i change de signe (négatif).

La commutation est spontanée car elle ne dépend que de signe du courant ou de la tension du circuit extérieur.

b- Le transistor bipolaire :

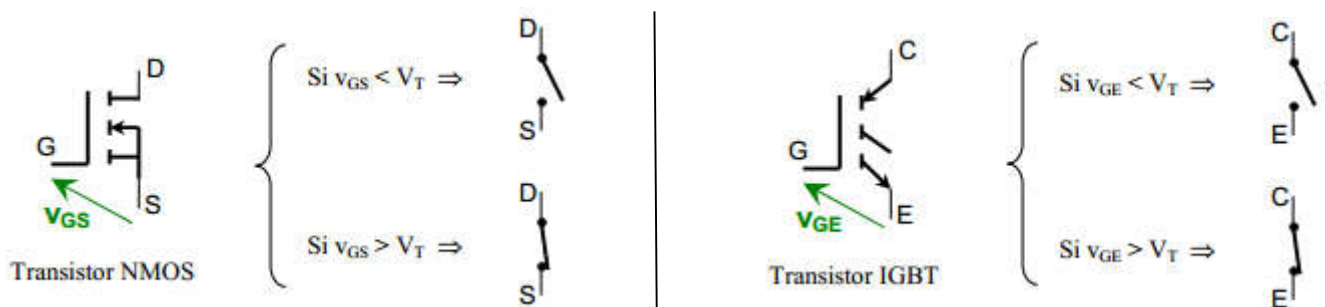
Cet interrupteur est commandable à l'ouverture et à la fermeture, la commutation se fait par une action électrique (injection d'un courant de base i_B).



Lorsque le transistor est saturé (interrupteur fermé) le courant i_C et la tension v_{CE} ne doivent pas être négatif. Le transistor est donc un interrupteur commandé unidirectionnel en tension et en courant.

C- Les transistors MOS et IGBT :

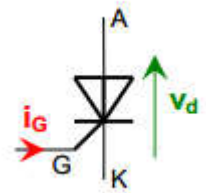
Ces transistors, plus performants, ont le même comportement que le bipolaire à la différence qu'ils se commandent avec une tension (le courant de commande est très faible).



d- Le thyristor

Le thyristor est **une diode commandée** qui ne permet donc le passage du courant que dans un sens. De plus il n'est commandable qu'à la fermeture. L'ouverture s'effectue lors de la disparition du courant direct (voir diode).

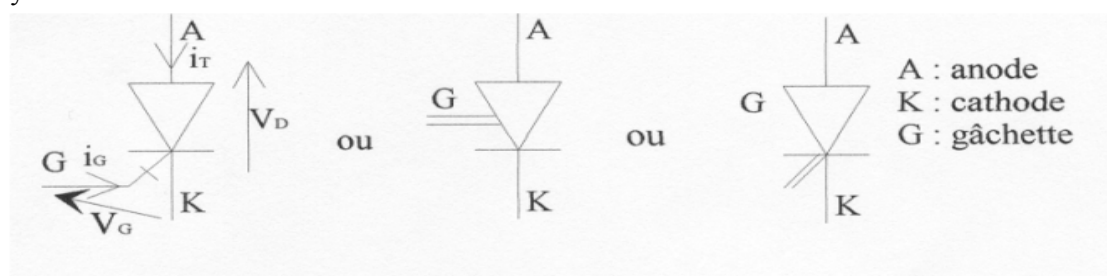
Le thyristor se comporte donc comme une diode dont la mise en conduction dans le sens passant sera autorisée par une impulsion de courant sur la gâchette (retard α à l'amorçage réglable).



e- LE GTO (Gate Turn-Off thyristor)

C'est un thyristor dont la fermeture est commandée par la gâchette mais dont l'ouverture peut également être commandée par la gâchette. Donc le GTO s'ouvre de façon naturelle ou par impulsion sur sa gâchette, **ce qui est nouveau**.

Ses trois symboles sont :



1.6. Types de commande des interrupteurs et critère de choix:

On peut commander un onduleur autonome soit avec **une commande symétrique**, une **commande décalée** ou une **commande MLI**, nous présentons dans le tableau suivant le principe de chaque type de commande.

Les tensions de commande sont périodiques mais non sinusoïdales.

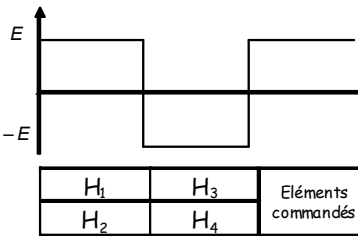
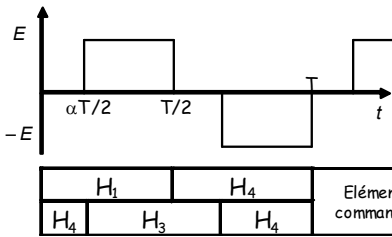
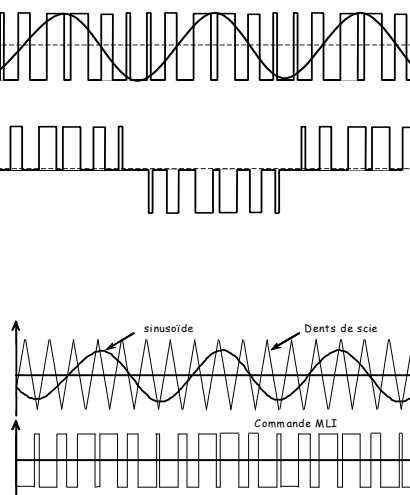
Les harmoniques sont gênants pour les machines électriques (bruit, vibrations) et un taux THD (taux de distorsion harmonique ou **Total Harmonic Distortion** en anglais qui est un indicateur de la qualité du traitement du signal dans un appareil) de 5% est recommandé par la norme EN 6100-3-2. La qualité de la tension ou du courant généré est caractérisé par le taux de distorsion en courant ou tension

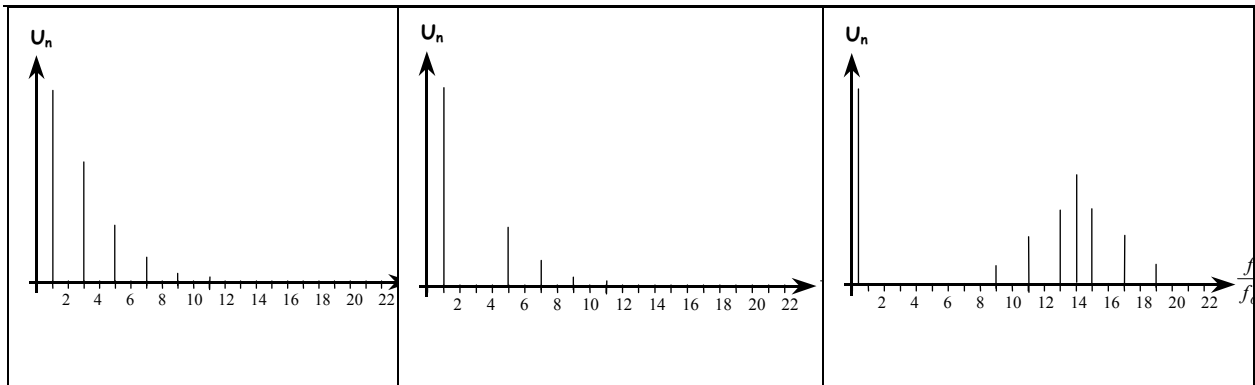
$$THD = \frac{\sqrt{V^2 - V_1^2}}{V_1} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad \text{ou par le taux global de distorsion } TGD = \frac{\sqrt{V^2 - V_1^2}}{V} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V}.$$

où V est la valeur efficace globale du signal de sortie, et V_1 est la valeur efficace de l'harmonique de rang 1 (le fondamental) et V_n est la valeur efficace de l'harmonique de rang n .

Rappelons cependant que pour un circuit inductif, les *harmoniques de rang élevé sont "étouffées"* (la réactance est $X = nL\omega$ pour l'harmonique de rang n).

On cherche à obtenir une tension u_c où **seules subsisteraient des harmoniques de rangs élevés, facilement filtrables (par un filtre passe- bas)**.

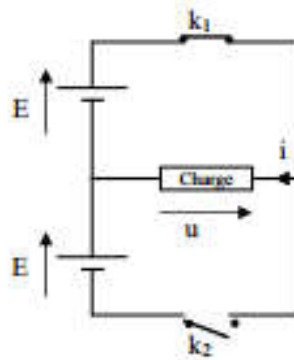
– Symétrique (à deux états : $\pm E$) : pour les onduleurs à 2 ou 4 interrupteurs (en pont)	– Décalée (à trois états $\pm E$ et 0) : pour l'onduleur en pont	– à MLI : pour l'onduleur en pont															
 <table border="1" data-bbox="247 1653 571 1724"> <tr> <td>H_1</td> <td>H_3</td> <td rowspan="2">Eléments commandés</td> </tr> <tr> <td>H_2</td> <td>H_4</td> </tr> </table>	H_1	H_3	Eléments commandés	H_2	H_4	 <table border="1" data-bbox="641 1653 999 1724"> <tr> <td>H_1</td> <td>H_4</td> <td rowspan="2">Elément commandé</td> </tr> <tr> <td>H_4</td> <td>H_3</td> </tr> </table>	H_1	H_4	Elément commandé	H_4	H_3	 <table border="1" data-bbox="1031 1691 1442 1870"> <tr> <td>H_1</td> <td>H_4</td> <td rowspan="2">Commande MLI</td> </tr> <tr> <td>H_4</td> <td>H_3</td> </tr> </table>	H_1	H_4	Commande MLI	H_4	H_3
H_1	H_3	Eléments commandés															
H_2	H_4																
H_1	H_4	Elément commandé															
H_4	H_3																
H_1	H_4	Commande MLI															
H_4	H_3																



- Avec une commande décalée, l'observation des spectres montre que l'onduleur à commande décalée présente un spectre plus favorable que celui à commande symétrique. En effet la décomposition en série de Fourier du signal montre que seuls les harmoniques de rang n impair existent et ont pour amplitude :
$$b_n = \frac{4E}{n\pi} \cos \frac{n\alpha\pi}{2}$$
. On arrive donc, pour un décalage convenable ($\alpha = 1/3$) à supprimer l'harmonique de rang 3.

- Avec une commande MLI, beaucoup plus répandue, les harmoniques proches du fondamental sont éliminés (les harmoniques de fréquences élevées sont faciles à filtrer) les courants alimentant un moteur asynchrone sont alors sinusoïdaux.

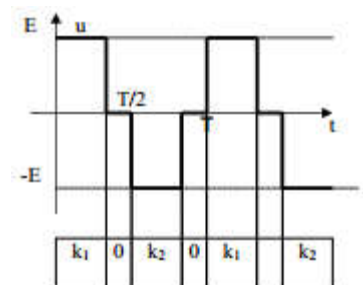
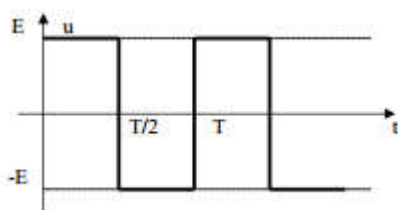
Exemple illustratif de la commande symétrique/ décalée (la commande MLI est illustrée prochainement) :



a- Commande symétrique

Pour $0 \leq t < \frac{T}{2}$ l'interrupteur électronique k_1 est fermé, k_2 est ouvert et $u = E$.

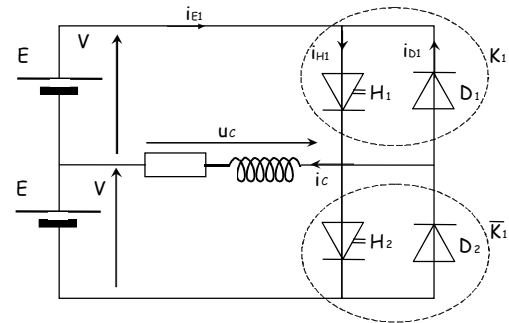
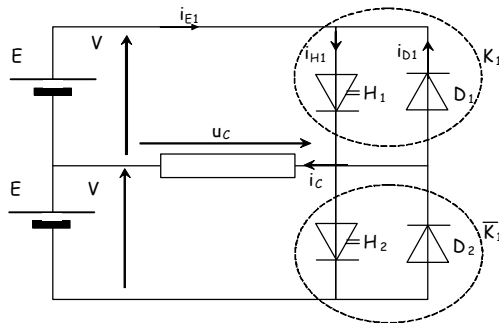
Pour $\frac{T}{2} \leq t < T$ l'interrupteur électronique k_2 est fermé, k_1 est ouvert et $u = -E$.



b- Commande décalée :

La tension u peut prendre 3 valeurs :

- Pour k_1 est fermé ; $u = E$
- $u = 0$.
- Pour k_2 est fermé, $u = -E$.

1.7. Onduleur de tension monophasée à 2 interrupteurs :**Schéma de principe :****1.7.1. Alimentation d'une charge résistive:**

Le courant suit la tension et donc de la même forme au coefficient R près ($u_c = Ri_c$)

1.7.2. Alimentation d'une charge inductive:

Dans le cas d'une charge inductive, l'annulation du courant et celle de la tension ne sont pas simultanées.

Lorsque H_2 est ouvert et H_1 fermé ($u_c = E$), le courant est soit positif soit négatif.

H_1 est unidirectionnel en courant et ne laisse passer le courant que si celui-ci est positif.

Pour assurer la circulation du courant dans les deux sens, on doit placer une diode en **antiparallèle** avec H .

L'onduleur de tension à commande symétrique impose aux bornes de la charge, quelle que soit la nature de celle-ci, une tension alternative de valeur efficace $U = E$, de fréquence f égale à celle de la commande.

L'expérience, appuyée par les graphiques de la figure, montre que les instants t_1 et t_2 dépendent de l'impédance de la charge. Malgré les phases de récupération, il y a globalement transfert d'énergie de la source de tension vers la charge.

Analyse:**Séquence des commandes des interrupteurs :**

- De 0 à $T/2$: K_1 est commandé
- De $T/2$ à T : K_2 est commandé

La diode placée en antiparallèle permet le passage du courant dans les 2 sens.

Etude de $u_c(t)$:

- De 0 à $T/2$: $u_c(t) = E$
- De $T/2$ à T : $u_c(t) = -E$

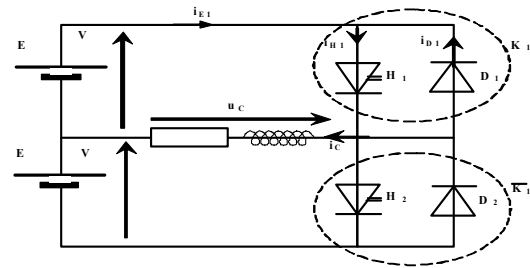
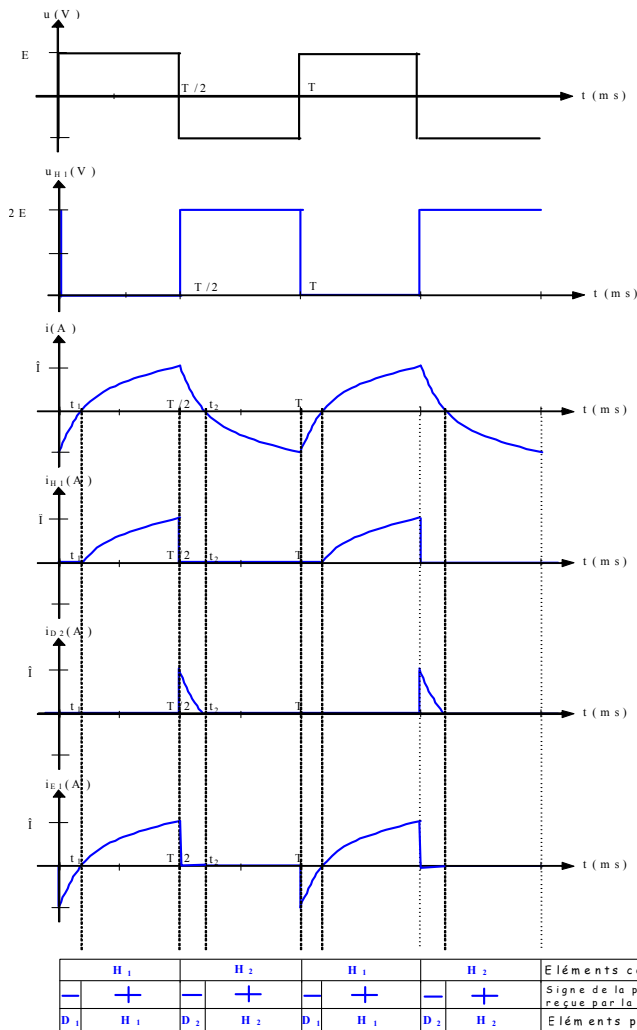
La valeur moyenne de $u_c(t)$: $\langle u_c(t) \rangle = 0$

La valeur efficace de $u_c(t)$: $U_c = E$

Décomposition spectrale de $u_c(t)$:

La tension $u_c(t)$ est une fonction créneau impaire, sa décomposition ne contient que des termes en

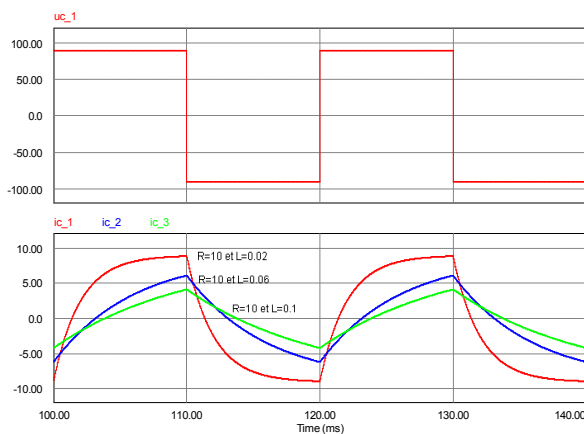
sinus et ne présente que des harmoniques pairs : $u_c(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{4E}{(2k+1)\pi} \sin(2k+1)\omega t$



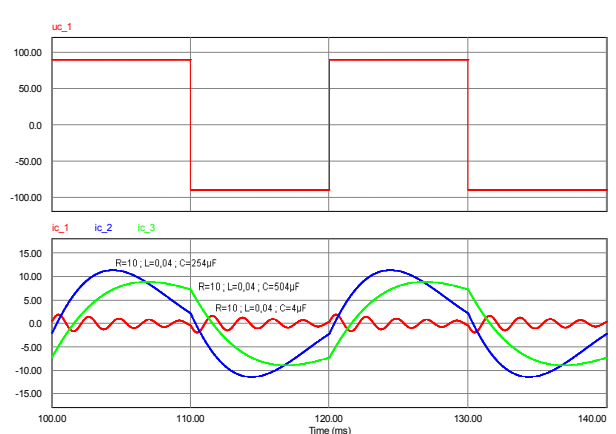
Etude des courants:

Exemples: Le courant dépend de la nature de la charge

Exemple de courants pour diverses valeurs de l'inductance d'une charge RL



Exemple de courants pour diverses valeurs de l'inductance d'une charge RLC



Constatations:

Comme le courant n'est pas sinusoïdal, il est riche en harmoniques (de même fréquences que la tension) qui

- génèrent des couples pulsatoires néfastes sur les machines tournantes
- génèrent des parasites radioélectriques pouvant perturber des signaux de commande.

Méthode d'étude:

On peut associer une impédance complexe $\underline{Z}_{(n\omega)}$ à chaque harmonique de rang n de la tension.

D'après le théorème de superposition, le courant $i(t)$ ne contient que les harmoniques de la tension $u(t)$

Ainsi pour chaque harmonique :

$$i(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{4E}{(2k+1)\pi |Z_{(2k+1)\omega}|} \sin \left[(2k+1)\omega t - \arg \left(\underline{Z}_{(2k+1)\omega} \right) \right]$$

Approximation du premier harmonique :

On approxime le courant à son 1^{er} harmonique

Le courant fourni par une source est donc $\langle i_E \rangle = \frac{I\sqrt{2}}{\pi} \cos \theta_1$. Avec $\theta_1 = \arg(\underline{Z}_{1\omega})$

La puissance fournie par une source est donc $\langle p_{1source} \rangle = \langle E \times i_E \rangle = \frac{EI\sqrt{2}}{\pi} \cos \theta_1$

La charge absorbe la puissance de chaque source soit le double $\langle p_{charge} \rangle = \frac{2EI\sqrt{2}}{\pi} \cos \theta_1$

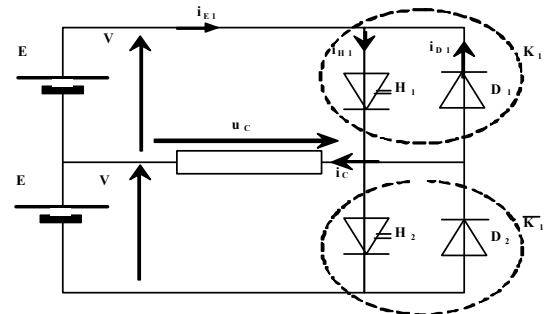
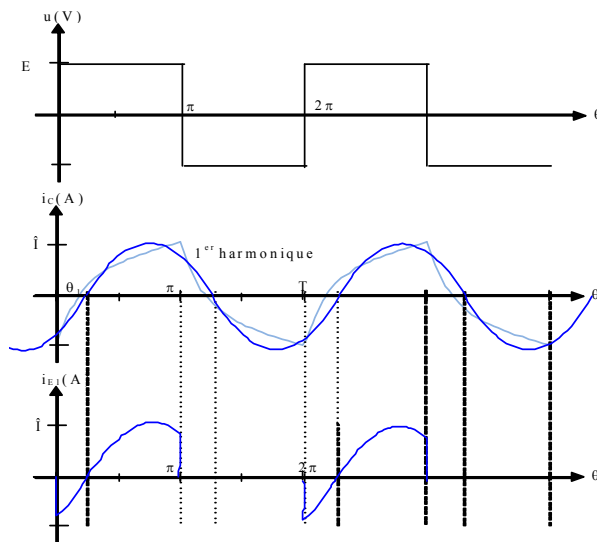
**Onduleur de tension monophasée à 4 interrupteurs ou en pont :****1.7.3. Commande symétrique :****Schéma:**

Schéma du montage: (R: 40 Ω; C: 10μF)

Pour une fréquence donnée (100Hz), suivant la valeur de L on peut observer différents comportements de l'intensité en fonction de u:

- $L > 0.25 H$: i est en retard sur u
- $L < 0.25 H$: i est en avance sur u
- $L = 0.25 H$: u et i sont en phase

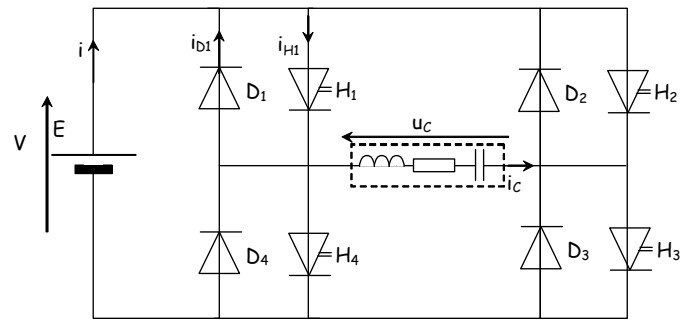
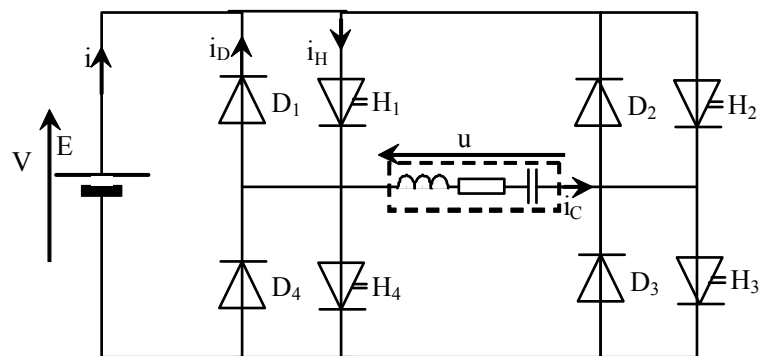
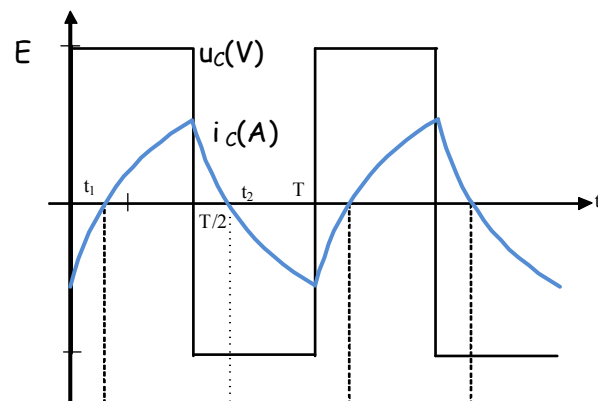


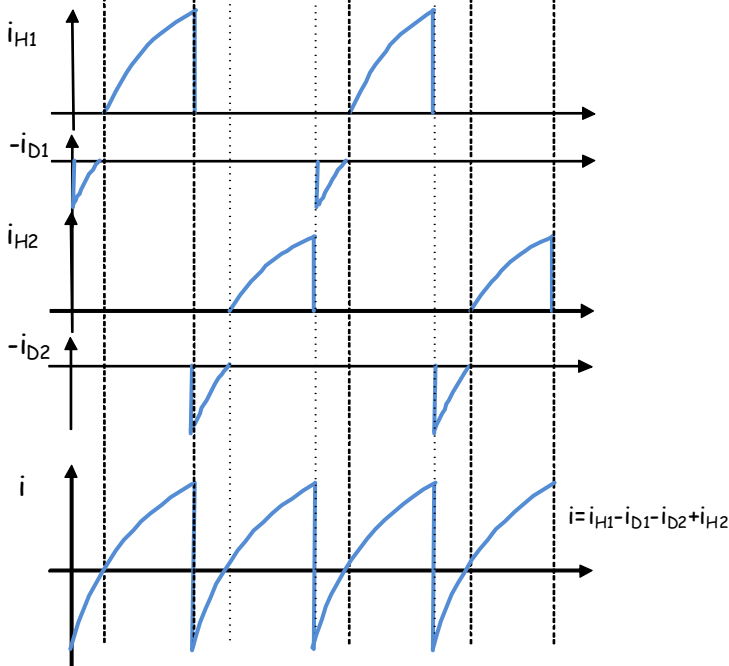
Figure 1

Courbes représentatives:

Courbes représentatives : pour $L = 0.4 H$



H_1	H_3	H_2	H_4	H_1	H_3	H_2	H_4	Éléments commandés
-	+	-	+	-	+	-	+	Signe de la puissance reçue par la charge
D_1	H_1	D_2	H_2	D_1	H_1	D_2	H_2	Éléments passants
D_3	H_3	D_4	H_4	D_3	H_3	D_4	H_4	

**Etude de $u_c(t)$:**

- De 0 à $T/2$: $u_c(t) = E$
- De $T/2$ à T : $u_c(t) = -E$

La valeur moyenne de $u_c(t)$:

$$\langle u_c(t) \rangle = 0$$

La valeur efficace de $u_c(t)$:

$$U_c = E$$

Décomposition spectrale de $u_c(t)$:

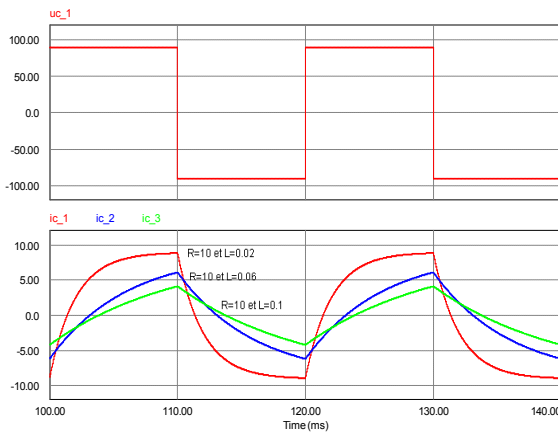
La tension $u_c(t)$ est une fonction créneau impaire, sa décomposition ne contient que des termes en sinus et

ne présente que des harmoniques pairs : $u_c(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{4E}{(2k+1)\pi} \sin((2k+1)\omega t)$.

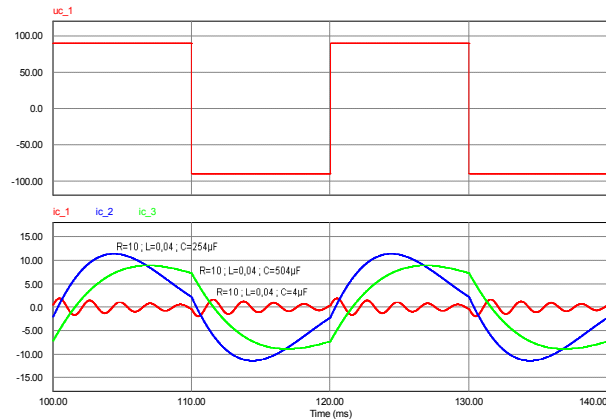
Etude des courants:**Exemples:**

Le courant dépend de la nature de la charge.

Exemple de courants pour diverses valeurs de l'inductance d'une charge RL



Exemple de courants pour diverses valeurs de l'inductance d'une charge RLC

**Constatations:**

Comme le courant n'est pas sinusoïdal, il est riche en harmoniques (de même fréquences que la tension) qui

- génèrent des couples pulsatoires néfastes sur les machines tournantes
- génèrent des parasites radioélectriques pouvant perturber des signaux de commande.

Méthode d'étude:

On peut associer une impédance complexe $Z_{(n\omega)}$ à chaque harmonique de rang n de la tension.

D'après le théorème de superposition, le courant $i(t)$ ne contient que les harmoniques de la tension $u(t)$

Ainsi pour chaque harmonique :

$$i(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{4E}{(2k+1)\pi |Z_{(2k+1)\omega}|} \sin\left[(2k+1)\omega t - \arg(Z_{(2k+1)\omega})\right]$$

Approximation du premier harmonique :

On approxime le courant à son 1^{er} harmonique

Le courant fourni par la source est donc $\langle i_E \rangle = \frac{2I\sqrt{2}}{\pi} \cos \theta_1$. Avec $\theta_1 = \arg(Z_{1\omega})$

La charge absorbe la puissance de la source soit $\langle p_{charge} \rangle = \langle Ei_E \rangle = \frac{2EI\sqrt{2}}{\pi} \cos \theta_1$

Critique du montage:

U_{eff} ne peut être réglée sauf si E varie.

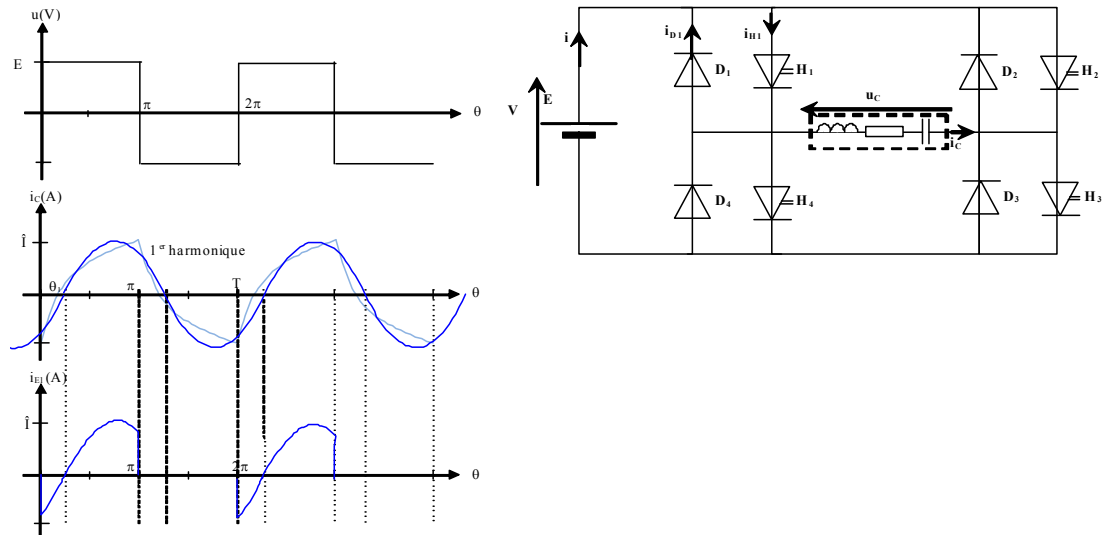
$$U_C = E$$

Cette commande génère beaucoup d'harmoniques de tension et de courant qui servent peu au transfert d'énergie.

Pour avoir un transfert d'énergie correct, il faut diminuer les harmoniques de tension et courant de façon à les rendre sinusoïdaux.

Il y a possibilité de filtrer soit la tension soit le courant mais le calcul du filtre est délicat et son coût peut être important.

On préfère modifier la commande de telle sorte que le courant ou la tension se rapproche du sinusoïdal. (suppression d'harmoniques). C'est la commande décalée ou la commande MLI.



1.7.4. Commande décalée :

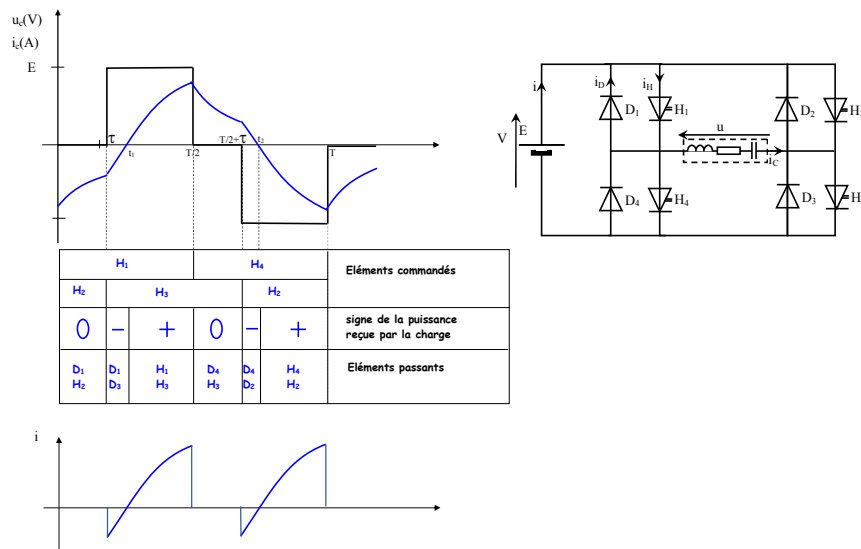
La commande des interrupteurs est décalée.

Ce décalage permet de faire varier la valeur efficace de la tension d'alimentation.

Suivant la valeur de ce décalage des harmoniques sont éliminés.

Courbes représentatives

Il suffit pour cela de décaler la commande des interrupteurs



Tension aux bornes de la charge:**Valeur efficace de la tension:**

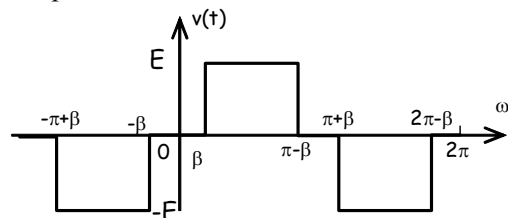
En traçant $u^2(t)$, on obtient:

$$U^2 = \frac{E^2 \left(\frac{T}{2} - \tau \right)}{\frac{T}{2}} \text{ ce qui donne } \boxed{U = E \sqrt{1 - \frac{2\tau}{T}}}$$

En faisant varier τ on peut faire varier la tension efficace de la tension fournie par l'onduleur

Harmoniques de la tension:

La décomposition en série de Fourier d'une telle tension est



$$v(t) = \frac{4E}{\pi} \times \sum_{k=0}^{\infty} \left[\frac{1}{2k+1} \cos((2k+1) \cdot \beta) \cdot \sin((2k+1) \cdot \omega t) \right]$$

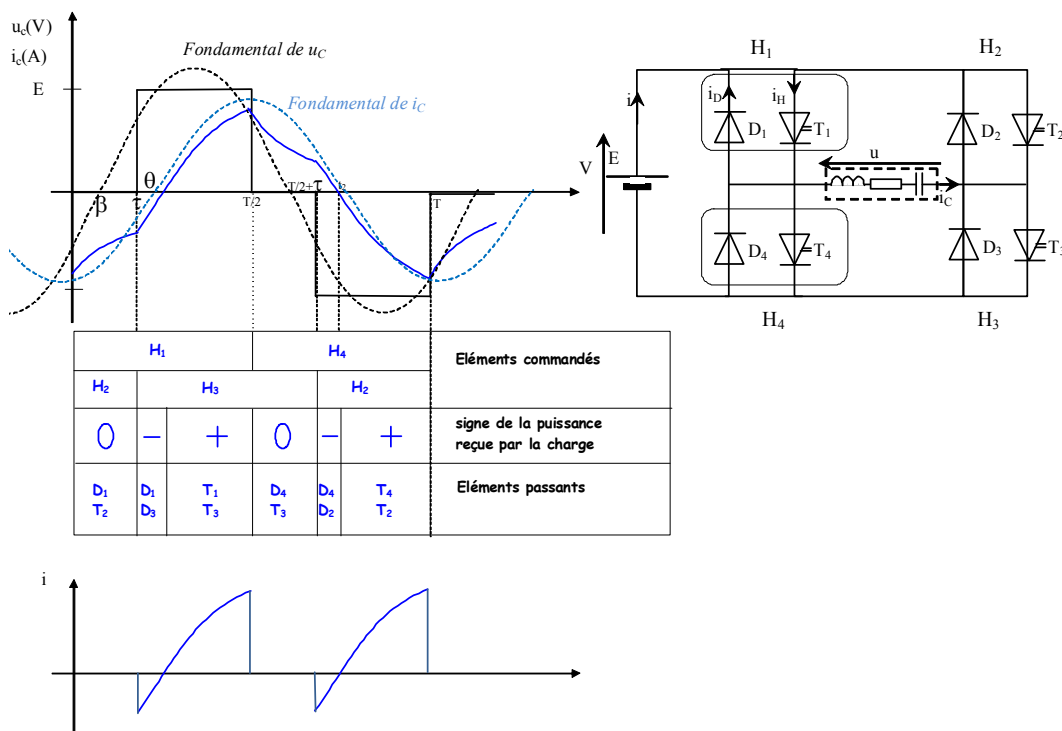
Attention $\beta = \tau/2$

On s'aperçoit que l'on peut éliminer certains harmoniques par un choix judicieux de β .

Il suffit pour cela de choisir la valeur de β qui annule l'harmonique k choisi, ce qui est vérifié par

$$\cos((2k+1) \cdot \beta) = 0$$

Exemple : pour éliminer l'harmonique 3 : $k=1$ donc $\cos 3\beta = 0$ ce qui est vérifié pour $3\beta = \pi/2$ donc pour $\beta = \pi/6$

Courants dans la charge:

La valeur moyenne de i est $\langle i \rangle = \frac{I\sqrt{2}}{\pi} (\cos \tau - \cos(\theta - \tau))$

La puissance fournie par la source est $P = E \langle i \rangle = \frac{EI\sqrt{2}}{\pi} (\cos \tau - \cos(\theta - \tau))$

1.7.5. Commande à modulation de largeur d'impulsion : MLI ou (PWM)

La commande des interrupteurs se fait par des tensions modulées. La tension de sortie est alors découpée et le courant est pratiquement sinusoïdal.

a. **Commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI) :**

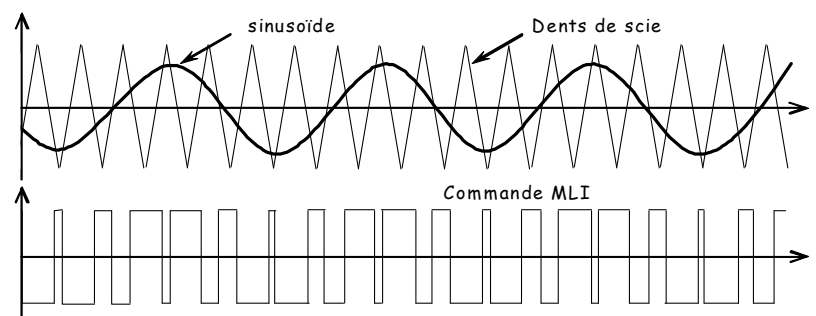
Elaboration de la commande MLI :

On compare deux tensions : - une en triangle ou en dents de scie v_t de fréquence f_p (**porteuse**).

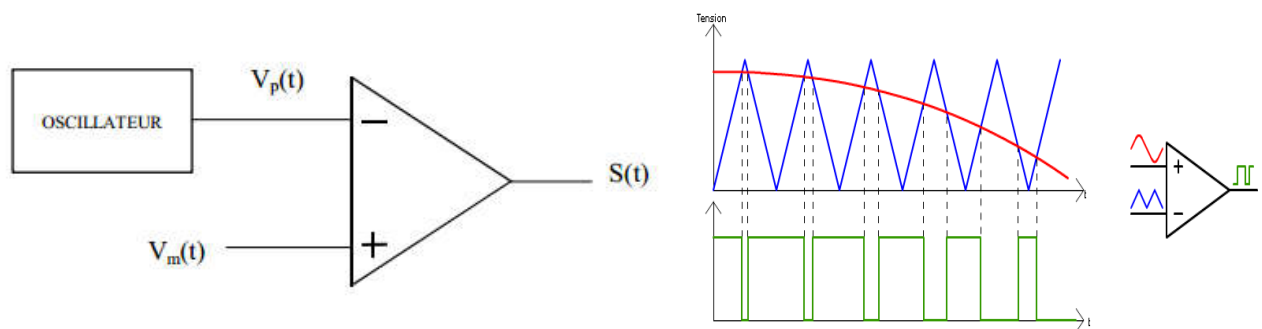
- une sinusoïdale v de fréquence f (**référence**).

Si $v > v_t$, $v_{\text{sortie}} = 1$; Si $v < v_t$, $v_{\text{sortie}} = 0$.

Exemples de modulations :



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



Principe du modulateur M.L.I.

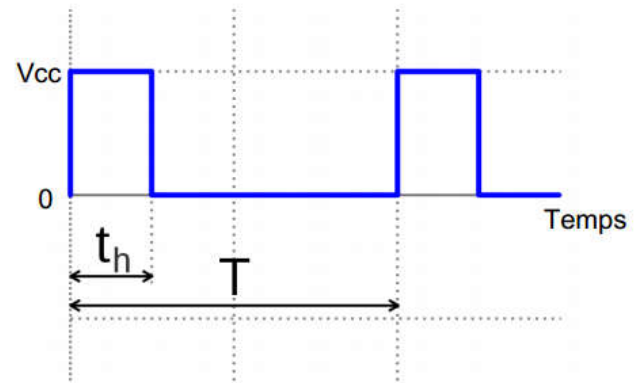
- La porteuse, $V_p(t)$ est un signal triangulaire symétrique et régulier de fréquence et d'amplitude constante.
- Le signal modulant, $V_m(t)$ est le signal **que l'on veut reproduire à l'aide l'onduleur**.
- Le signal modulé, $S(t)$ est le signal de synchronisation de la commande du pont

Le PWM est un signal numérique, donc la tension peut prendre deux valeurs seulement. Dans certains cas très spécifiques (onduleurs à MLI par exemple) on fabrique un troisième niveau en inversant la tension du niveau haut.

Le signal est carré. Le niveau bas correspond généralement à 0 Volt. La période est notée T ; la durée de l'impulsion (pour laquelle la tension est celle de l'état haut) est appelée t_h .

Si la période change, le signal n'est plus vraiment périodique au sens strict.

On appelle alors T la **pseudo période**.



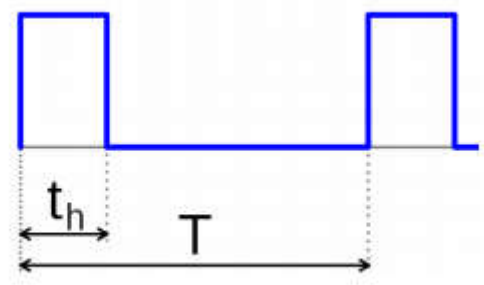
Rapport cyclique :

On appelle rapport cyclique le rapport :

$$\alpha = 100 \frac{t_h}{T} \text{ exprimé en pourcentage.}$$

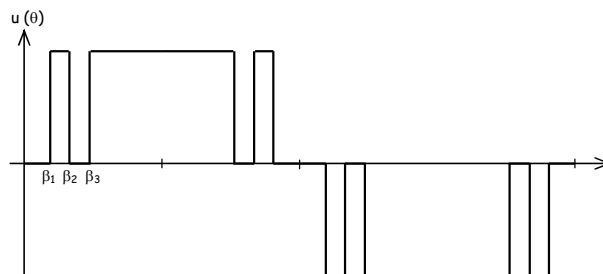
Si $t_h = 0$ alors $\alpha = 0\%$ et la tension moyenne de sortie est nulle.

Si $t_h = T$ alors $\alpha = 100\%$ et la tension moyenne de sortie est égale à V_{cc} .



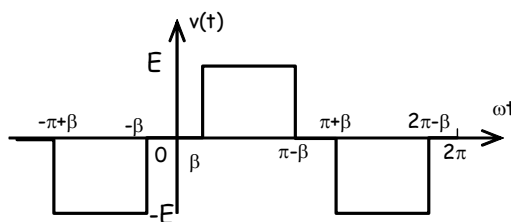
b. Commande à angles pré calculés :

On cherche à éliminer les harmoniques de faibles rang. On élimine les harmoniques de rang $3f, 5f, 7f, \dots$ par l'introduction de fentes dans une forme d'onde rectangulaire.

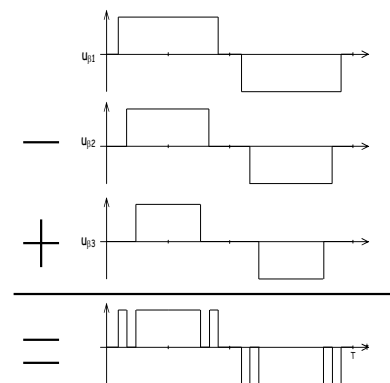


Il faut déterminer les angles $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_5$.

On considère que u est la somme algébrique de forme d'onde en créneaux du type :



$$v(t) = \frac{4E}{\pi} \times \sum_{k=0}^{\infty} \left[\frac{1}{2k+1} \cos((2k+1) \cdot \beta) \cdot \sin((2k+1) \cdot \omega t) \right]$$



$$u(\theta) = u_{\beta1} + u_{\beta3} + u_{\beta5} - u_{\beta2} - u_{\beta4}$$

Dans l'expression ci-dessus, pour éliminer les harmoniques n , il faut

$$\cos n\beta_1 + \cos n\beta_3 + \cos n\beta_5 - \cos n\beta_1 - \cos n\beta_4 = 0$$

5 angles donc 5 équations sont nécessaires.

La résolution donne :

$$\beta_1 = 18,17^\circ, \beta_2 = 26,64^\circ, \beta_3 = 36,87^\circ, \beta_4 = 52,9^\circ, \beta_5 = 56,69^\circ.$$

Dans ce cas là, U_{eff} est fixe et dépend de $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_5$.

Caractéristiques de la MLI :

Indice de modulation : $m = f_p / f$

Coefficient de réglage : $r = V_{\text{max}} / V_{t_{\text{max}}}$

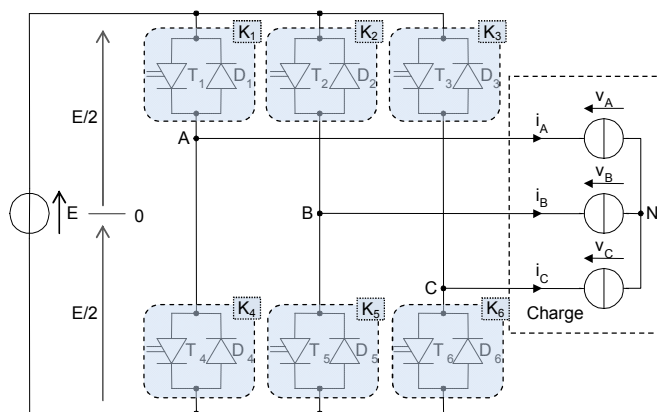
Avantages de la MLI :

- ✓ Permet de produire un courant de charge très voisin d'une sinusoïde.
- ✓ Permet de réaliser une tension $u_c(t)$ aux bornes de la charge dont la décomposition en série de Fourier ne contient pas d'harmoniques à fréquence trop basses (difficilement filtrable) ou interdites (résonances...)

1.8. Onduleurs triphasés :

On peut réaliser un onduleur triphasé en groupant trois onduleurs monophasés. Il suffit **décaler d'un tiers de période les commandes des trois phases**. Pour un onduleur triphasé, les commandes des interrupteurs d'un bras sont complémentaires. Pour chaque bras, il y a donc deux états indépendants. Ces deux états peuvent être considérés comme une grandeur booléenne.

Schéma de principe:



Commande adjacente : Type 180°

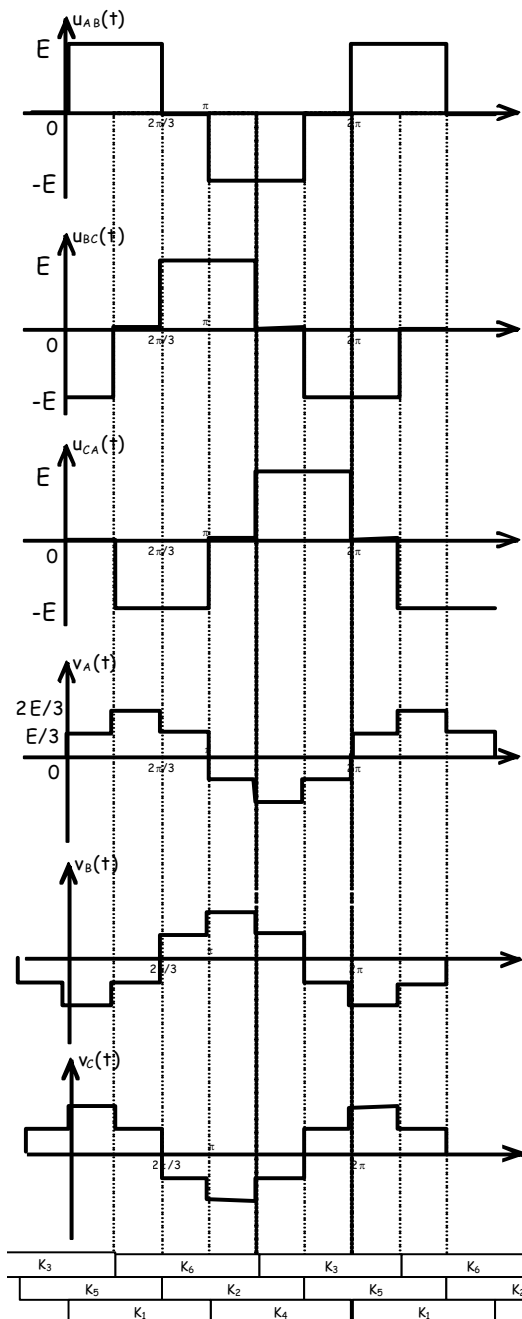
Chaque interrupteur est commandé pendant 180°.

Les commandes des interrupteurs d'une même branche 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 fixe quelle que soit la charge. On retrouve la même forme pour la tension entre phases que pour un pont monophasé avec commande décalée et $t_1=60^\circ$. (minimum d'harmoniques et suppression 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

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

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 de deux interrupteurs d'une même branche. (commande disjointe).

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

K1		K4		K1	
K5		K2		K5	K2
	K6		K3		K6

La forme de la tension de sortie dépend de la nature de la charge.

La commande disjointe permet d'avoir des courbes plus voisines de la sinusoïde. Le taux de composantes harmoniques de rang faible est minimal pour 150° . Ce choix simplifie le problème de filtrage mais complique la commande (enclenchement et déclenchement d'interrupteurs tous les 30°).

Commande MLI :

Les commandes des interrupteurs sont obtenues par comparaison de 3 signaux sinusoïdaux décalés de $2\pi/3$ avec un signal triangulaire. Même forme de tension de sortie qu'en monophasé.