

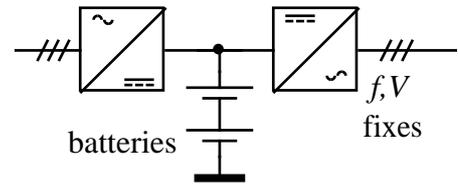
C25 - Onduleurs



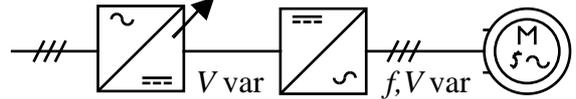
• Utilisations de la conversion continu-alternatif

- Alimentation sans coupure :

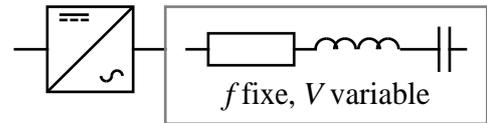
En temps normal, la batterie est maintenue en charge, mais l'énergie est fournie par le réseau via le redresseur et l'onduleur. En cas de défaut de réseau, l'énergie est fournie par la batterie via l'onduleur.



- Alimentation des moteurs CA à f et V variables : (éventuellement réversible)



- Alimentation de charges réactives (fours,...) : (ou onduleurs "à résonance")



• Principe de fonctionnement

C'est celui d'un amplificateur symétrique. MAIS :

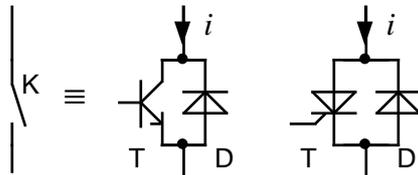
- Le rendement théorique d'un amplificateur de puissance est toujours inférieur à 1, sauf s'il travaille en classe D (cf §C21). Pour réaliser un onduleur, il faut donc travailler en commutation, en approchant la forme sinusoïdale par des signaux rectangulaires dont on ajuste le rapport cyclique.

- Pour des raisons technologiques, les transistors de puissance sont de type NPN (et non PNP). Sauf à faible puissance, on ne peut donc utiliser le schéma à transistors complémentaires (cf §A21).

Interrupteurs : à transistor NPN (ou thyristor si grande puissance), + diode de récupération (indispensable si la charge est inductive).

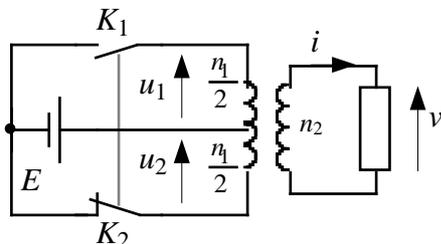


Règle de conduction



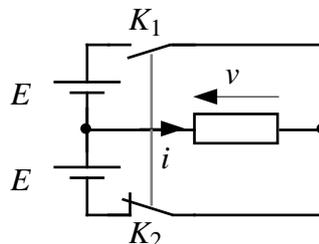
- K ouvert \Leftrightarrow T bloqué ET D en inverse
- K fermé \Leftrightarrow T commandé :
 - si $i > 0$: T conduit
 - si $i < 0$: D conduit

- Montages demi-pont à deux interrupteurs : nécessitent un point milieu pour fabriquer une tension alternative à partir d'une tension continue, soit avec un transformateur à point milieu (cf §C24), soit avec une source à point milieu :



$$K_2 \text{ fermé} \Rightarrow u_2 = E \Rightarrow v = \frac{2n_2}{n_1} E$$

$$K_1 \text{ fermé} \Rightarrow u_1 = -E \Rightarrow v = -\frac{2n_2}{n_1} E$$

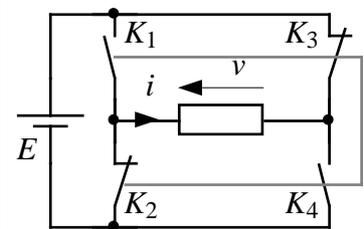


$$K_2 \text{ fermé} \Rightarrow v = E$$

$$K_1 \text{ fermé} \Rightarrow v = -E$$

- Montage en pont à quatre interrupteurs

(K_1, K_2) et (K_3, K_4) :
 ↓ "bras de commutation"



$$K_{1,4} \text{ fermés} \Rightarrow v = E$$

$$K_{2,3} \text{ fermés} \Rightarrow v = -E$$

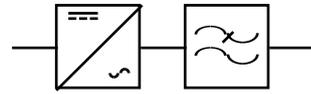
• **Qualité du signal de sortie**

Le spectre d'un signal rectangulaire inclut une onde fondamentale (rang $n = 1$, pulsation ω_1) et des ondes harmoniques (rang $n > 1$, pulsation $\omega_n = n\omega_1$) d'amplitude plus ou moins importante. Dans ce qui suit, on compare les performances de chaque type d'onduleur au cas idéal (onde sinusoïdale pure de pulsation ω_1) en calculant le spectre du signal généré. On cherche à diminuer le plus possible l'amplitude des harmoniques de rang *faible* car :

- les harmoniques de rang élevé sont faciles à filtrer : un onduleur est toujours suivi d'un filtre passe-bas.

- sur charge inductive, ce sont les harmoniques de rang faible qui génèrent les courants les plus importants.

La qualité de l'onde de tension obtenue sera évaluée par le THD (cf §A16), ou taux d'harmonique ramené au fondamental (THD idéal = 0%). On pourrait aussi calculer le THD du courant, mais celui-ci dépend également de la charge.



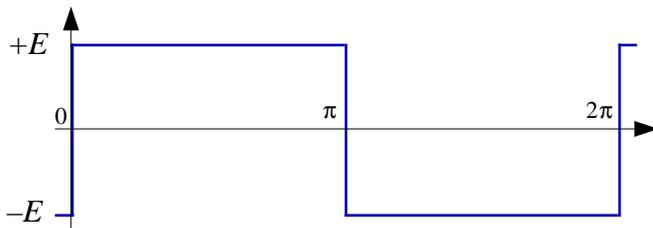
$$I_n = \frac{V_n}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega_1^2 n^2}}$$

$\Rightarrow I_n \searrow$ si $n \nearrow$

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_{1\text{eff}}}$$

• **Mutateur** (ou onduleur à commande symétrique)

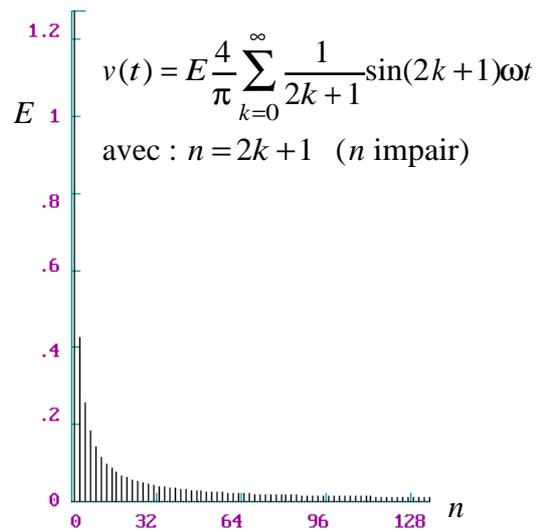
Signal :



Le THD est très mauvais, de l'ordre de 48% :

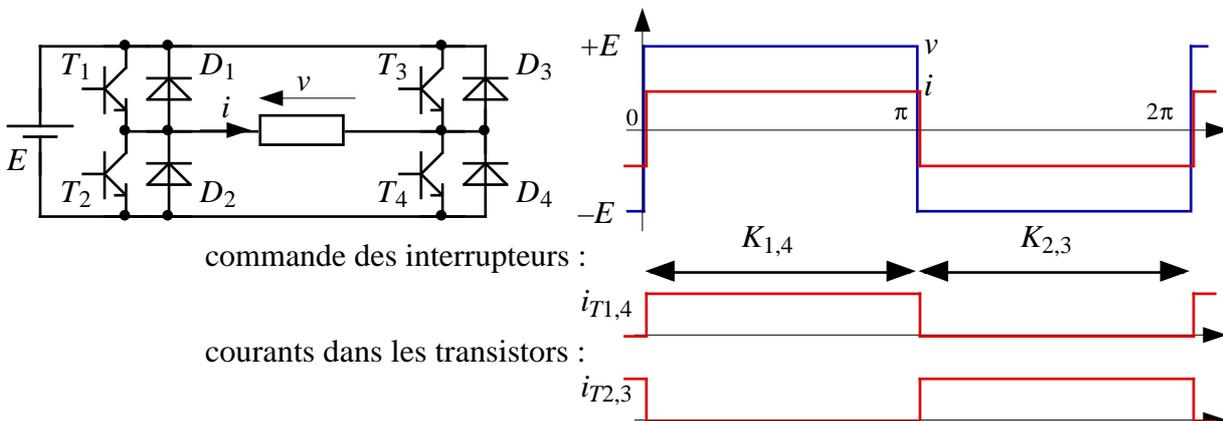
$$THD = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(2k+1)^2}} \approx 0,48$$

Spectre :

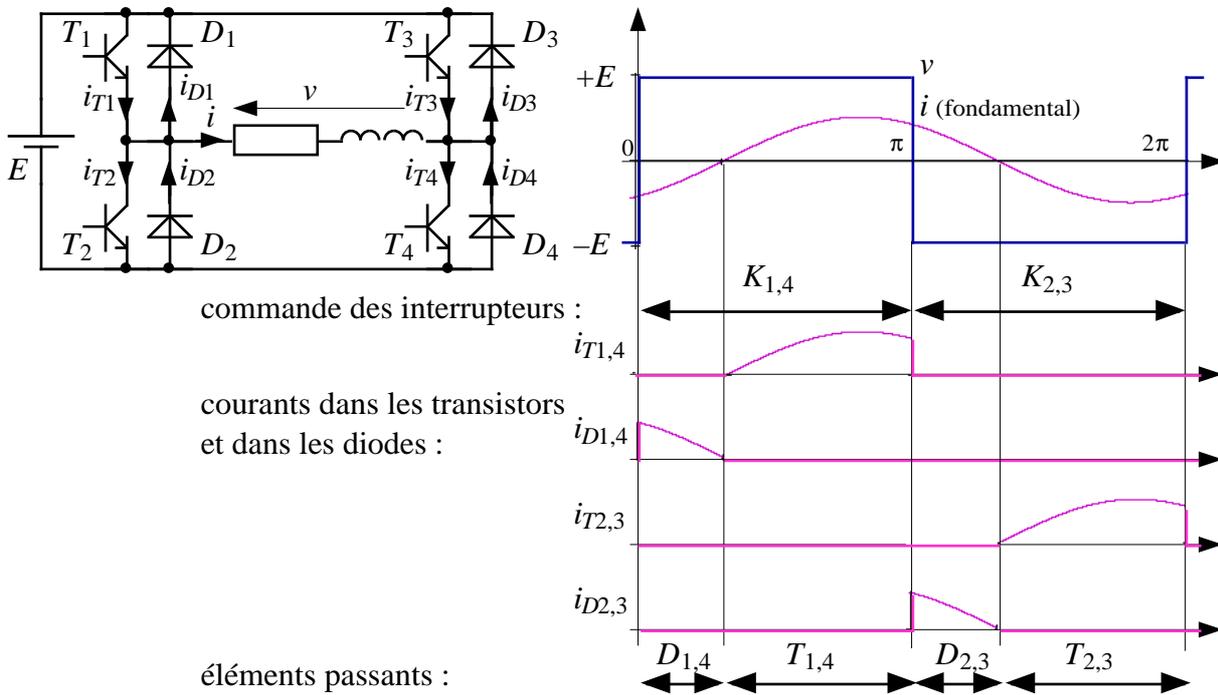


Ordre de conduction des semiconducteurs dans un mutateur en pont :

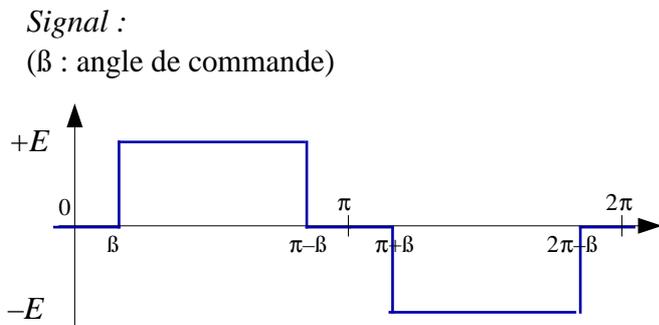
- sur charge résistive : ici les diodes de récupération sont sans objet.



- sur charge réactive : charge inductive (R,L) ou circuit résonant (R,L,C). La charge a pour effet de filtrer le courant (filtre passe-bas du premier ou du second ordre). Grossièrement, ne subsiste que le fondamental. L'ordre de commande des interrupteurs entraîne l'ordre de conduction des semiconducteurs, en appliquant la règle énoncée plus haut.

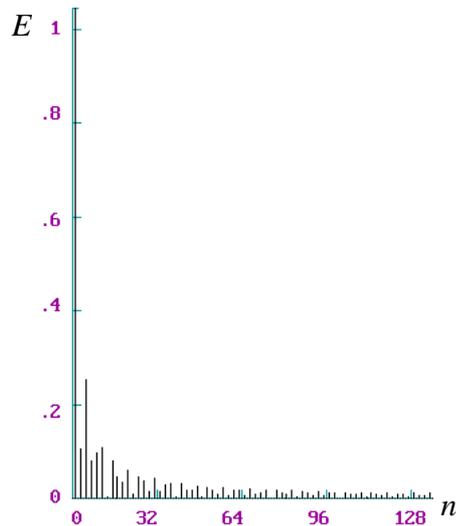


• **Onduleur en créneaux** (ou onduleur à commande décalée)



Le THD dépend de l'angle de commande β . Comme le montre la courbe ci-dessous, sa valeur minimum est de l'ordre de 29%, pour $\beta \approx 23^\circ$.

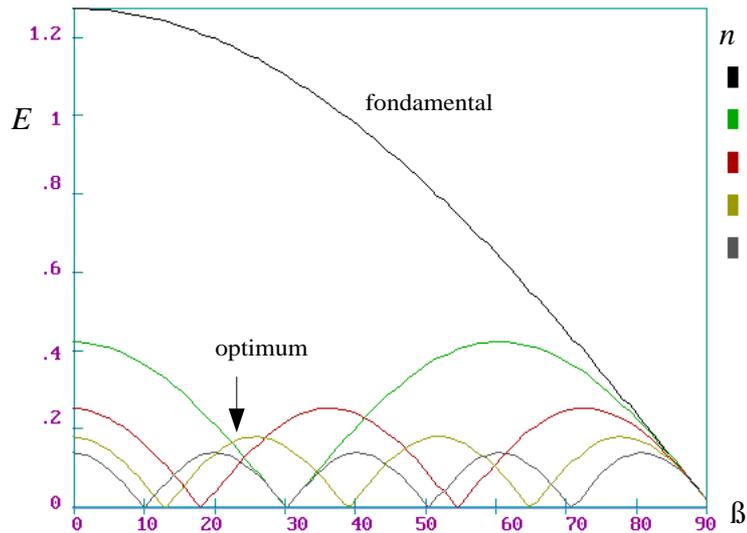
Spectre (exemple : $\beta = 35^\circ$) :



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

avec : $n = 2k + 1$ (n impair)

amplitude des premières harmoniques en fonction de β



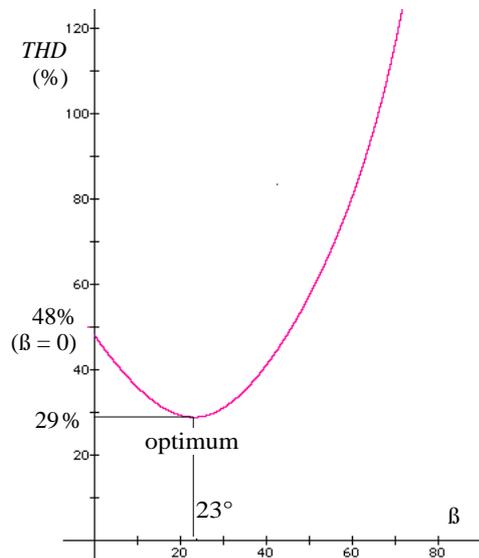
Comme $V_{eff}^2 = V_{1eff}^2 + V_{2eff}^2 + V_{3eff}^2 + etc,$

$$\text{il vient : } THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_{neff}^2}}{V_{1eff}} = \frac{\sqrt{V_{eff}^2 - V_{1eff}^2}}{V_{1eff}}$$

Sachant que $V_{1eff} = E \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cos \beta$ et que

$$V_{eff} = E \sqrt{1 - \frac{2\beta}{\pi}}, \text{ on en déduit :}$$

$$THD_{\%} = 100 \frac{\sqrt{\pi^2 - 2\pi\beta - 8\cos^2 \beta}}{2\sqrt{2} \cos \beta}$$

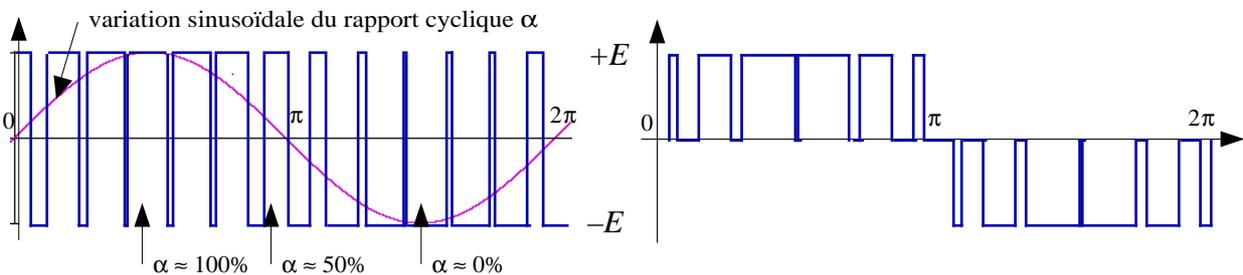


• **Onduleur MLI**

Onduleur à Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI ou PWM : *Pulse Width Modulation*) ou à Modulation d'Impulsions en Durée (MID). C'est, de loin, l'onduleur le plus performant.

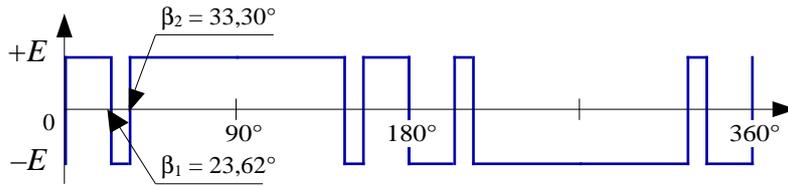
- pleine onde (ou bipolaire) :

- demi-onde (ou unipolaire) :



On montre qu'il est possible, en calculant soigneusement les angles de commutation, d'annuler complètement les harmoniques de rang faible. Cela est assuré dans les onduleurs industriels par un système à microprocesseur dans lequel sont mis en mémoire les valeurs des angles de commutation. En se limitant aux harmoniques de rang faible, le THD est alors voisin de zéro.

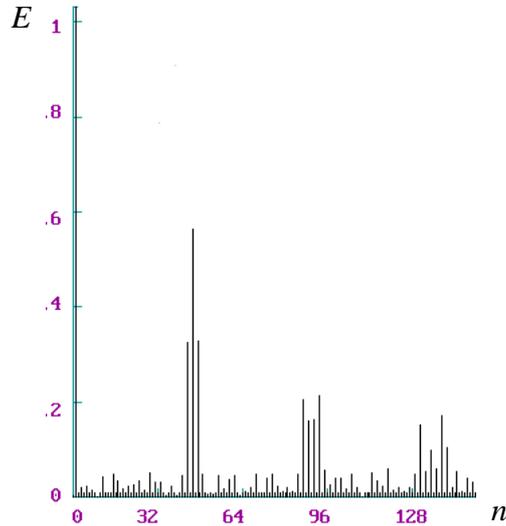
Exemple : avec seulement trois commutations par quart de période on peut annuler complètement les harmoniques de rang 3 et 5 :



On peut aussi approcher ce résultat à l'aide d'un modulateur analogique MID avec un taux de modulation m voisin de 1 (cf §B34). On aboutit au résultat suivant :

Spectre (exemple d'une MID analogique avec $f_{\text{porteuse}} = 45 f_{\text{modul.}}$ et $m = 1$) :

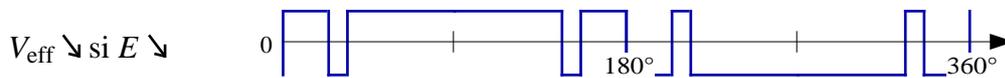
On constate que le spectre est très riche en harmoniques HF, notamment autour de $n = 45, 90$, etc, mais qu'en revanche les harmoniques BF sont très faibles. Il est facile, par un simple filtrage passe-bas, d'éliminer les harmoniques HF (qui de toutes façons n'entraînent que des courants négligeables si la charge est très inductive).



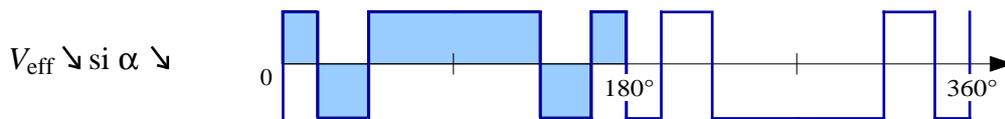
Contrôle de la tension

Pour contrôler la valeur efficace de la tension de sortie de l'onduleur, plusieurs solutions sont possibles :

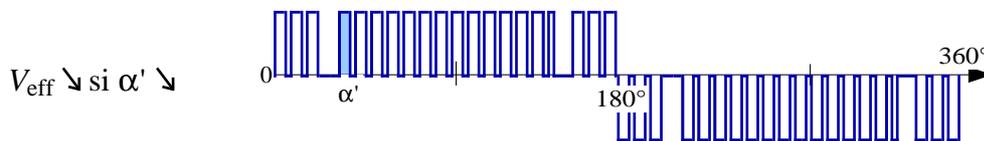
- variation de E à l'aide d'un hacheur ou d'un redresseur commandé :



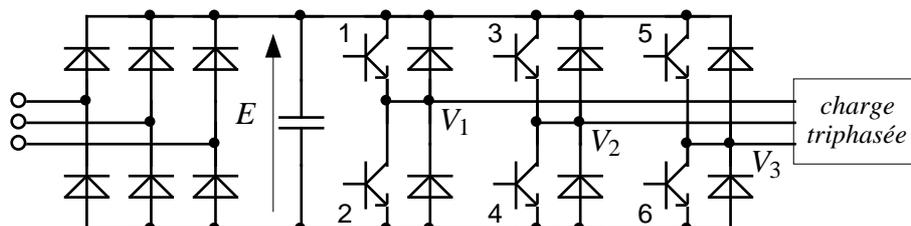
- E fixe mais angles β_i variables pour agir sur le rapport cyclique global donc sur la valeur efficace de la tension de sortie v :



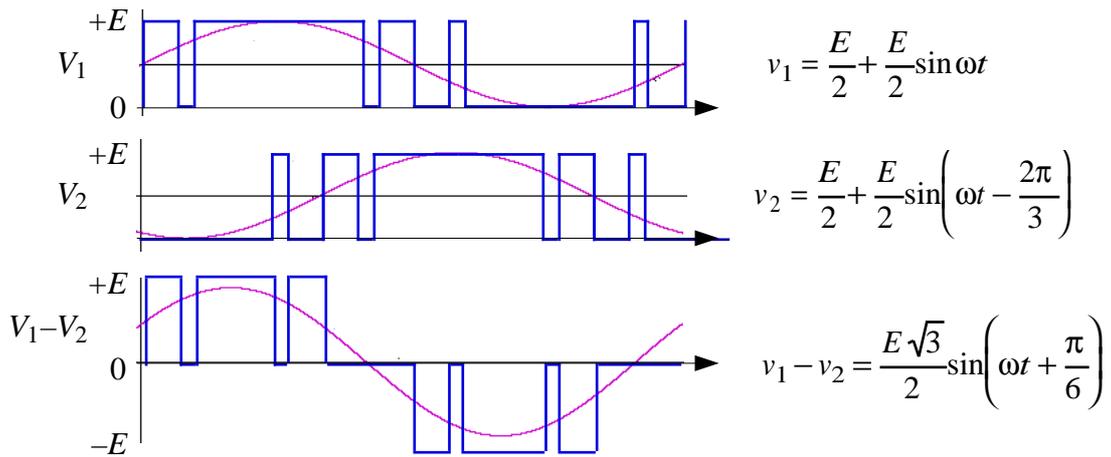
- E et β_i constants, mais surmodulation HF à rapport cyclique variable α' :



Onduleur MLI triphasé :



Principe de fonctionnement (pour une phase) :



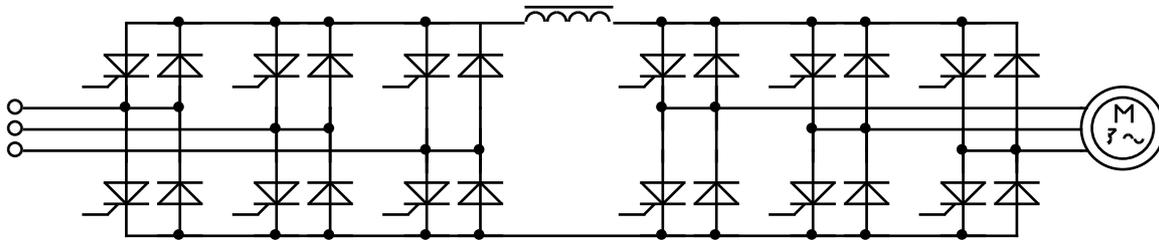
• **Onduleurs réversibles**

Un onduleur "assisté" ou "non autonome" est un système de commutation à thyristors, à fréquence fixe, dont les instants de commutations sont imposées par la charge, inductive et active. Son fonctionnement est réversible (redresseur ↔ onduleur). *Exemple* : redresseur en pont complet à thyristors sur charge inductive, cf §C22)

Un onduleur "autonome" est un système de commutation à transistors ou à thyristors, de fréquence variable, dont les instants de commutations sont imposées par des circuits externes. La charge est quelconque. Cet onduleur n'est pas réversible.

Un onduleur (ou commutateur) de courant est intermédiaire entre ces deux systèmes. Deux groupes de thyristors (éventuellement de type GTO) et une inductance de lissage permettent un fonctionnement réversible à fréquence variable, sur une charge inductive et active.

Schéma de **principe** d'un commutateur de courant triphasé :



Résumé :

Type d'onduleur	Commutateurs	Réversibilité	Fréquence	Charge	Commutations	Schéma bloc (variateurs de vitesse)
Assisté	Thyristors	Oui	Fixe	Inductive et active	Par la charge	
De tension	Transistors ou thyristors	Non	Variable	Quelconque	Par un circuit de commande	
De courant	Thyristors	Oui	Variable	Inductive et active	Par la charge et par un circuit de commande	