



Electronique de Puissance Avancée

Dr. Chawki GHENNAI

Département Electrotechnique

Faculté de Technologie

Université Batna 2

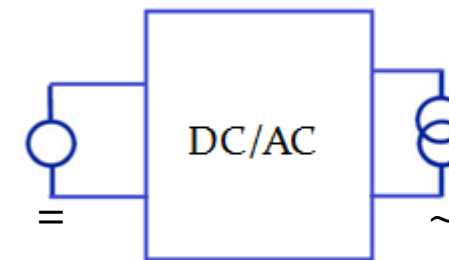
Cours 4

Convertisseurs DC/AC

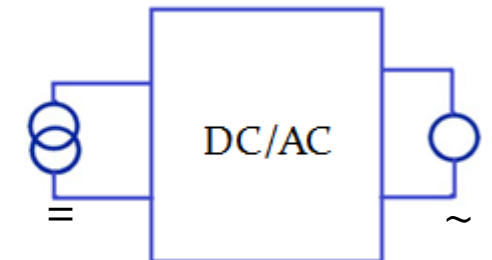
Un convertisseur DC/AC ou onduleur, c'est un convertisseur assurant la conversion continu-alternatif. Alimenté par une source continue, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie pour obtenir à la sortie une tension et un courant alternatif.

La structure d'un onduleur dépend essentiellement de la nature des sources d'entrée et de sortie entre lesquelles il est monté. On distingue dans ce cas deux types d'onduleurs:

- **Onduleurs de tension:** reliant une source de continue à une source de courant alternatif.
- **Onduleurs de courant:** placés entre une source de courant continu et une source de tension alternative



Onduleur de tension



Onduleur de courant

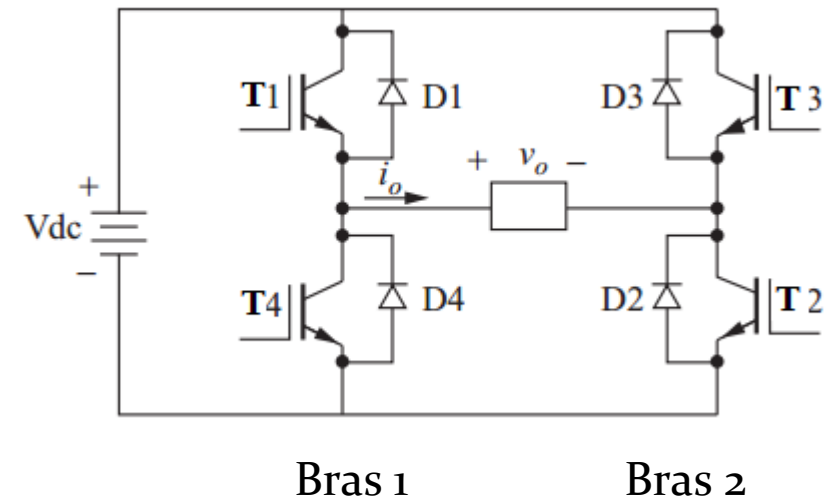
Onduleur de tension monophasé

Structure et principe de fonctionnement:

La structure de base et celle en pont constitue de deux bras. Chaque bras est réalisé par deux interrupteurs réversibles en courant:

Les règles d'interconnexions des sources exigent que les interrupteurs de chaque bras soient complémentaires, d'où les séquences de fonctionnement possibles sont:

Séquences	Interrupteurs ON	Tension de sortie v_o
Séq ₁	T ₁ et T ₂	+Vdc
Séq ₂	T ₃ et T ₄	-Vdc
Séq ₃	T ₁ et T ₃	0
Séq ₄	T ₄ et T ₂	0



Onduleur de tension monophasé

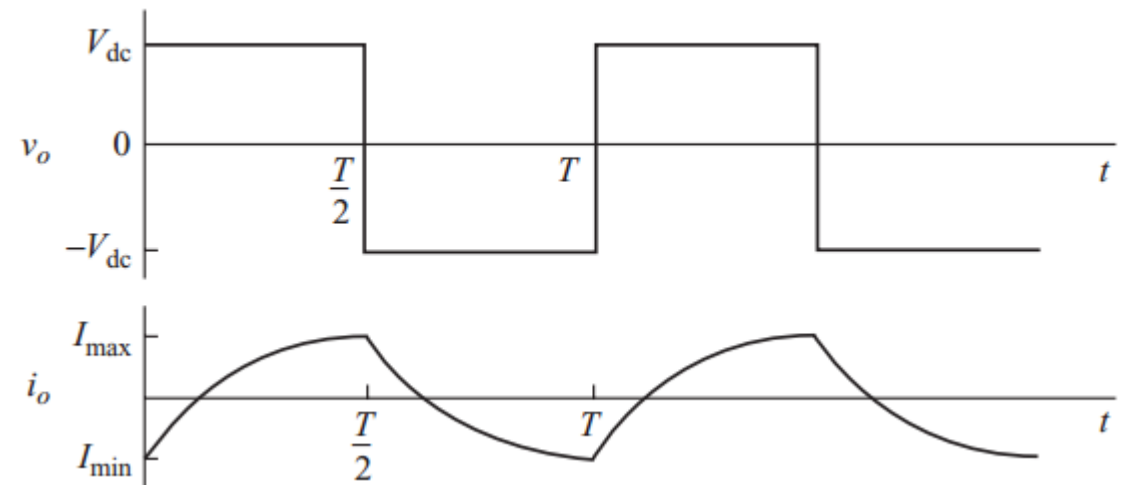
Commande simultanée ou pleine onde:

Dans cette technique, on commande simultanément les interrupteurs (T_1, T_2) et (T_3, T_4) pour obtenir les séquences 1 et 2. La durée de chacune des séquences est $T/2$.

La tension de sortie v_o est une onde d'un seul créneau par alternance. Le courant i_o pour une charge inductive varie entre I_{min} et I_{max} comme il est représenté ci-contre.

La valeur efficace de la tension est donnée par:

$$V_{\text{eff}} = V_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_o^2(t) dt} = V_{dc}$$



Onduleur de tension monophasé

Analyse des Harmoniques:

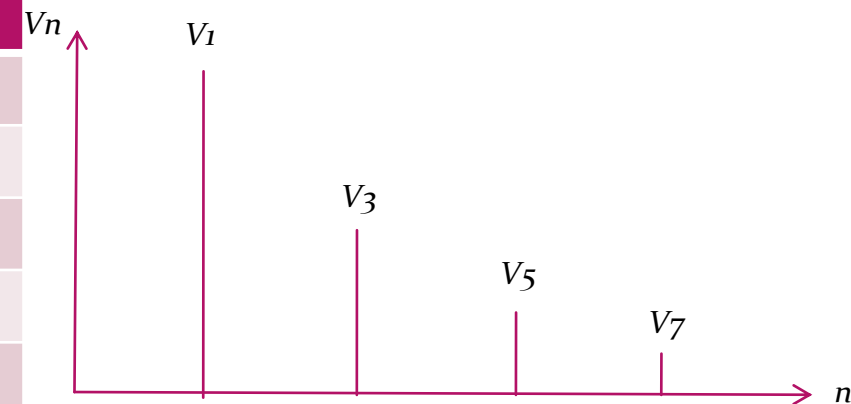
C'est une approche très utile pour l'analyse des onduleurs est d'exprimer la tension de sortie et le courant de charge en termes d'une série de Fourier. Ceci nous permet d'évaluer le taux de distorsion harmonique.

Pour un signal carré tel que v_o , la série de Fourier ne contient que les harmoniques impaires et peut être représenté par:

$$v_o(t) = \sum_n \frac{4V_{dc}}{n\pi} \sin n\omega_0 t \quad n = 1,3,5,7,\dots$$

$$V_n = \frac{4V_{dc}}{n\pi} \text{ est l'amplitude d'harmonique d'ordre } n$$

n	V_n
1	$4V_{dc}/\pi$
2	0
3	$4V_{dc}/3\pi$
4	0
5	$4V_{dc}/5\pi$
6	0
7	$4V_{dc}/7\pi$



Spectre de la tension v_o

Onduleur de tension monophasé

Le taux de distorsion harmonique: (abrégé THD, *total harmonic distortion* en anglais) représente la variation d'un signal par rapport à une référence. Dans le cas des onduleurs le THD représente le degré de pollution harmonique générée à la sortie des onduleurs. Le taux de distorsion harmonique de la tension est donné par:

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (V_{n,\text{rms}})^2}}{V_{1,\text{rms}}} = \frac{\sqrt{V_{\text{rms}}^2 - V_{1,\text{rms}}^2}}{V_{1,\text{rms}}}$$

EXEMPLE :
Dans la commande simultanée

$$V_{\text{eff}} = V_{\text{dc}}$$
$$V_1 = \frac{4V_{\text{dc}}}{\pi} \quad \text{c'est l'amplitude de l'onde fondamentale}$$
$$V_{1,\text{eff}} = \frac{V_1}{\sqrt{2}} = \frac{4V_{\text{dc}}}{\sqrt{2}\pi}$$
$$\text{THD} = \frac{\sqrt{V_{\text{dc}}^2 - \frac{8V_{\text{dc}}^2}{\pi^2}}}{\frac{4V_{\text{dc}}}{\sqrt{2}\pi}} = 48,3\%$$

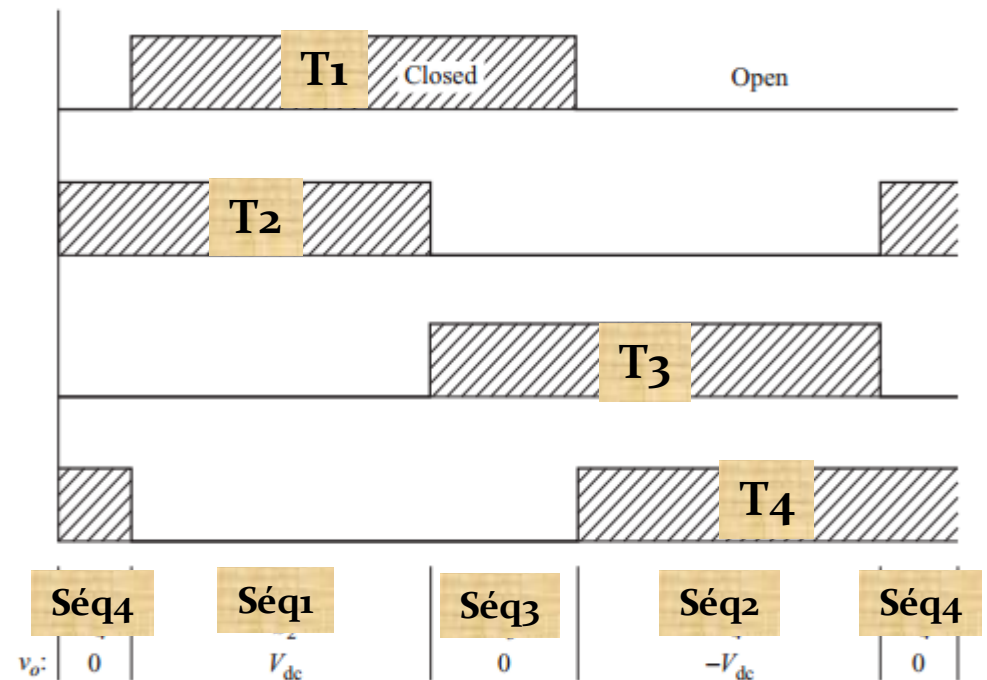
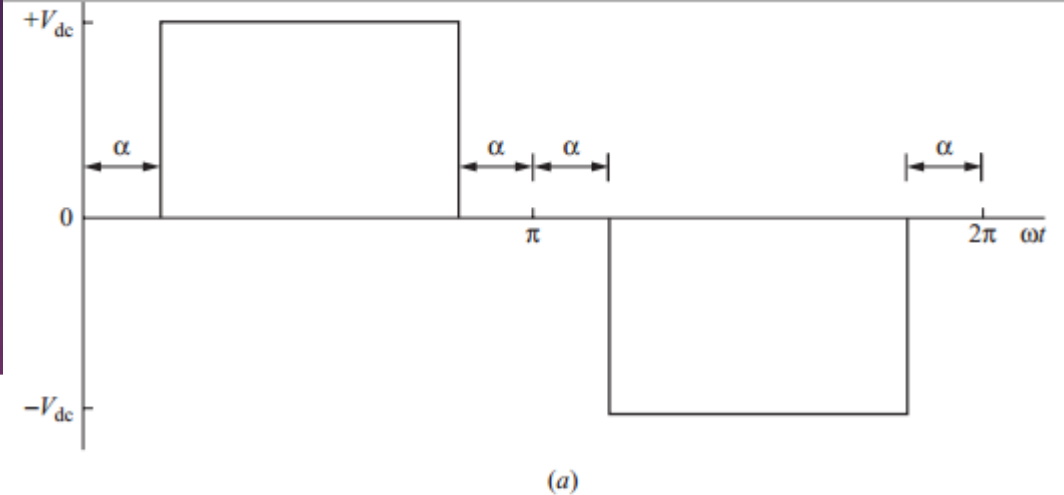
Onduleur de tension monophasé

Commande décalée: Dans la commande simultanée, la tension efficace aux bornes de la charge est constante est égale à V_{dc} . Pour avoir régler la tension de sortie v_o , on utilise la commande décalée. Cette stratégie de commande consiste à obtenir aux bornes de la charge des paliers à tension nulle.

La valeur efficace de la tension de sortie est donnée par:

$$V_{eff} = V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi-\alpha} V_{dc}^2 d(\omega t)} = V_{dc} \sqrt{1 - \frac{2\alpha}{\pi}}$$

On remarque que la tension V_{eff} peut être contrôlée par l'angle α .



Onduleur de tension monophasé

Analyse des Harmoniques:

Le développement en série de Fourier de l'onde v_o ne contient que les harmoniques impaires et peut être représenté par:

$$v_o(t) = \sum_n V_n \sin(n\omega_0 t) \quad n = 1, 3, 5, 7, \dots$$

L'amplitude du n -ième harmonique est donnée par: $V_n = \frac{4V_{dc}}{n\pi} \cos(n\alpha)$

➤ En particulier, l'amplitude de la fréquence fondamentale ($n = 1$) est contrôlable en ajustant l'angle de décalage α :

$$V_1 = \left(\frac{4V_{dc}}{\pi} \right) \cos \alpha$$

➤ Le contenu harmonique peut également être contrôlé en ajustant l'angle α . Si $\alpha = 30^\circ$ l'amplitude du troisième harmonique $V_3 = 0$. Ceci est important car la troisième harmonique peut être éliminée de la tension et du courant de sortie.

Onduleur de tension monophasé

Autres harmoniques peuvent être éliminées par choisir un angle dont la valeur fait le terme cosinus égale à zéro. Le n-ième harmonique est éliminé si:

$$\alpha = \frac{90^\circ}{n}$$

Exercice:

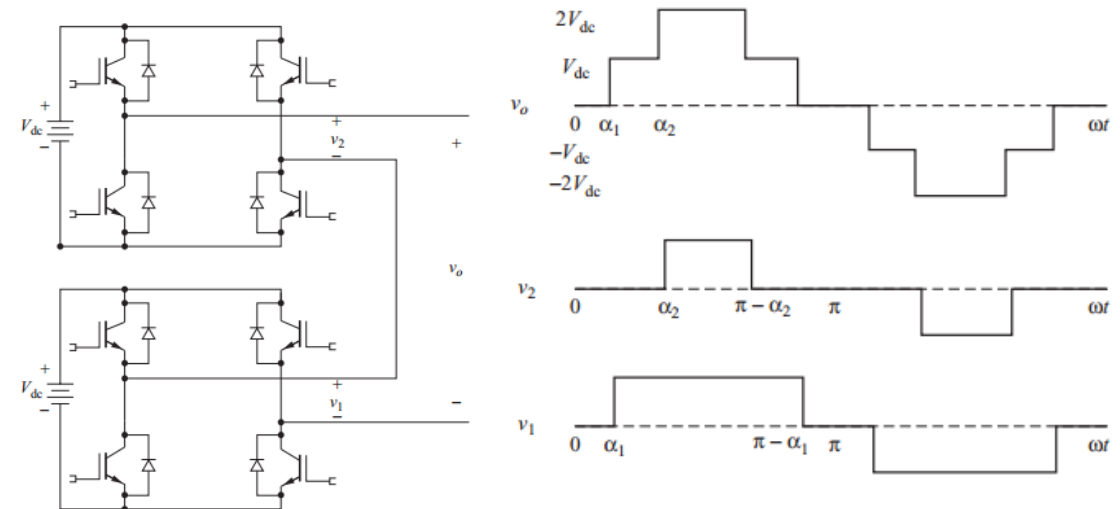
1. Tracer le spectre de la tension de sortie v_o d'un onduleur de tension en pont monophasé à commande décalée dont l'angle de décalage $\alpha=30^\circ$.
2. Calculer le THDv
 $V_{dc} = 100V$

Onduleur de tension monophasé multiniveaux

Le concept de l'onduleur en pont à commande décalée peut être étendu à d'autres circuits qui peuvent produire des tensions de sortie multiniveaux dont les formes sont plus proches des sinusoïdes. Ces types d'onduleurs réduisent ainsi le contenu harmonique. L'onduleur à multiniveaux convient aux applications telles que les entraînements des moteurs à vitesse variable et dans les installations des énergies renouvelables telles que les systèmes photovoltaïques.

Onduleur à deux niveaux

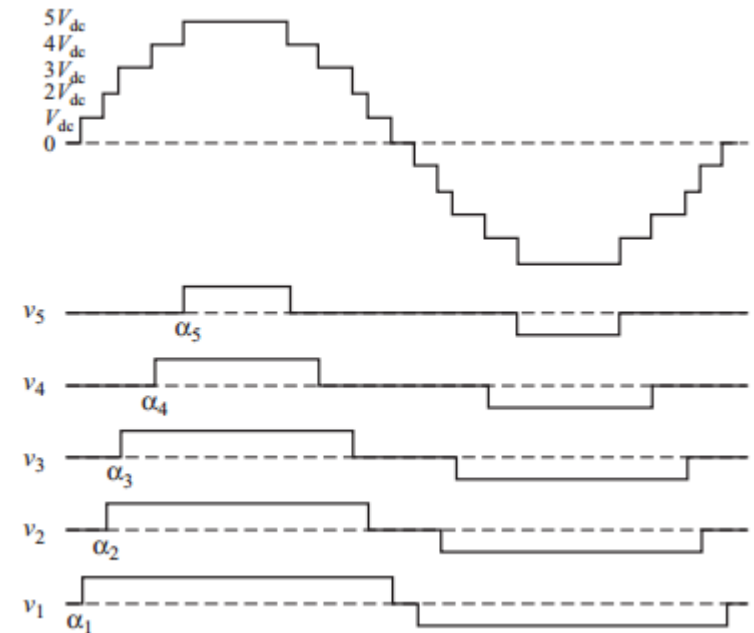
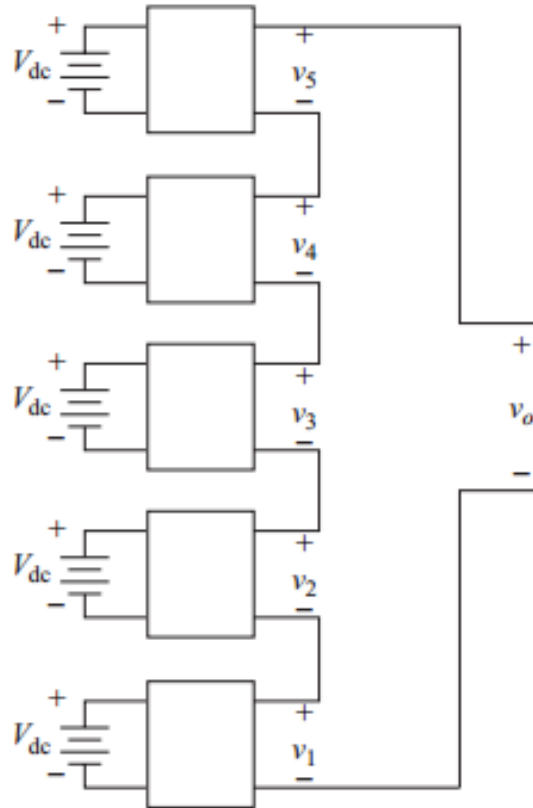
Réalisé avec deux cellules pont montées en cascade à commande décalée avec les angles de décalage α_1 et α_2 .



Onduleur de tension monophasés multiniveaux

Onduleur à cinq niveaux

Réalisé avec trois cellules pont montées en cascade à commande décalée avec les angles de décalage α_1 , α_2 , α_3 , α_4 et α_5



Onduleurs de tension monophasé MLI

Techniques de commande MLI sinus-triangulaire

Pour obtenir les signaux de commande des interrupteur, Ces techniques de commande sont basées sur la comparaison d'une onde sinusoïdale dite *onde de modulation ou référence* et une onde triangulaire de haute fréquence dite *porteuse*. Deux techniques MLI sinus-triangulaire seront présentées ci-dessous:

- MLI sinus-triangulaire *bipolaire*
- MLI sinus-triangulaire *unipolaire*

La modulation de largeur d'impulsion (MLI) permet de réduire le taux de distorsion harmonique totale du courant de la charge. La tension de sortie MLI non filtrée aura un THD relativement élevé, mais les harmoniques seront à des fréquences beaucoup plus élevées, ce qui facilitera le filtrage.

Onduleurs de tension monophasé MLI

MLI sinus-triangulaire *bipolaire*

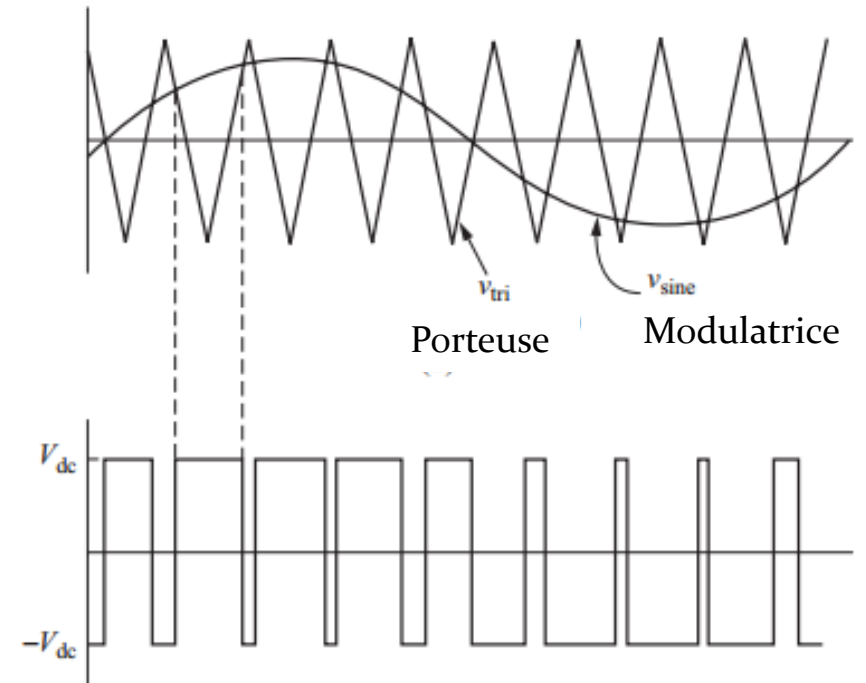
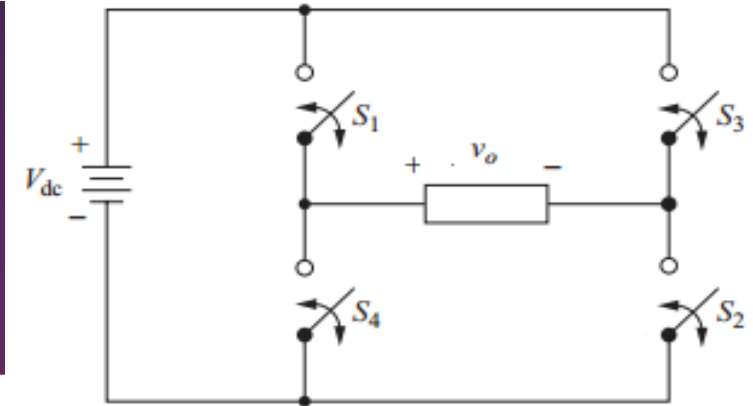
Le principe la MLI de cette technique est illustré par la figure ci-contre. La tension de sortie de l'onduleur est donnée par les conditions suivantes:

$$\text{si } v_{\text{sine}} > v_{\text{tri}} \quad v_o = +V_{\text{dc}}$$

$$\text{si } v_{\text{sine}} < v_{\text{tri}} \quad v_o = -V_{\text{dc}}$$

Les états des interrupteurs de l'onduleur en pont sont:

Interrupteurs ON	comparaison	v_o
S ₁ et S ₂	$v_{\text{sine}} > v_{\text{tri}}$	$+V_{\text{dc}}$
S ₃ et S ₄	$v_{\text{sine}} < v_{\text{tri}}$	$-V_{\text{dc}}$

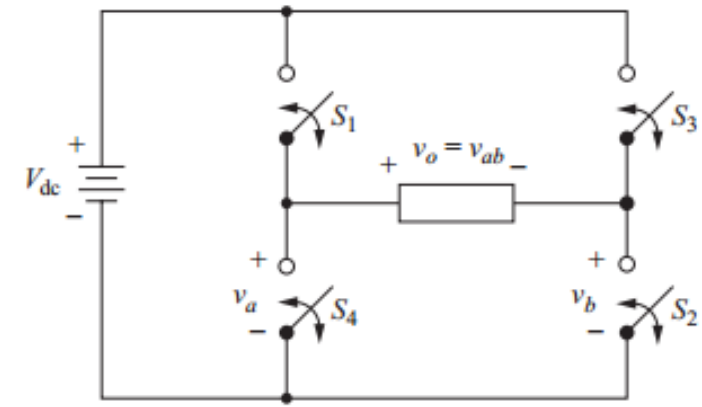


Onduleurs de tension monophasé MLI

MLI sinus-triangulaire *unipolaire*

La tension de sortie dans ce cas prend les valeurs zéro et $+V_{dc}$ pendant l'alternance positive et zéro $-V_{dc}$ pendant l'alternance négative. Les états des interrupteurs sont donnés comme suit:

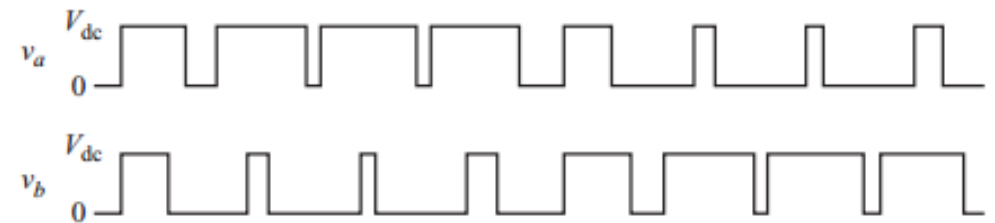
Interrupteurs ON	comparaison
S_1	$V_{sine} > V_{tri}$
S_2	$-V_{sine} < V_{tri}$
S_3	$-V_{sine} > V_{tri}$
S_4	$V_{sine} < V_{tri}$



(a)



(b)



(c)



(d)

Onduleurs de tension monophasé MLI

Paramètres de la MLI sinus-triangulaire

Onde de modulation:

$$v_{\text{sine}} = r \cdot \sin(\omega t)$$

avec $\omega = 2\pi f$

f : c'est la fréquence de l'onde fondamentale

r : c'est le coefficient de réglage $0 \leq r \leq 1$

l'amplitude de l'onde fondamentale de v_o est

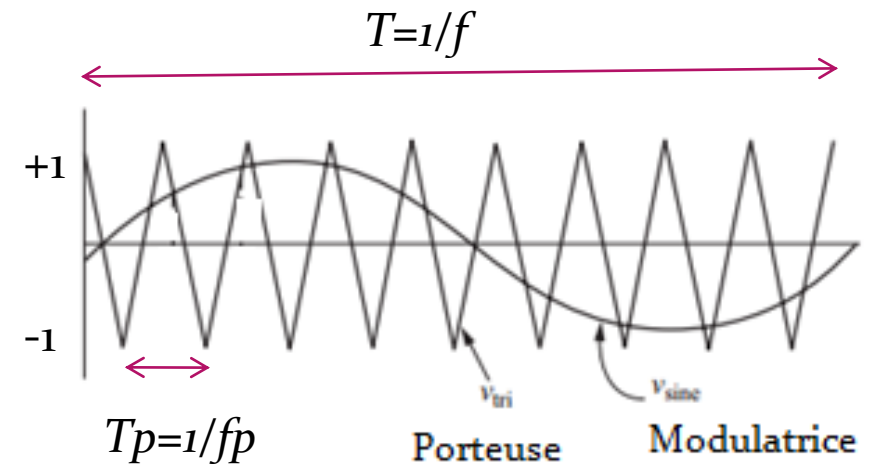
$$V_1 = r \cdot V_{dc}$$

Onde porteuse:

f_p : la fréquence de la porteuse $f_p = 1/T_p$

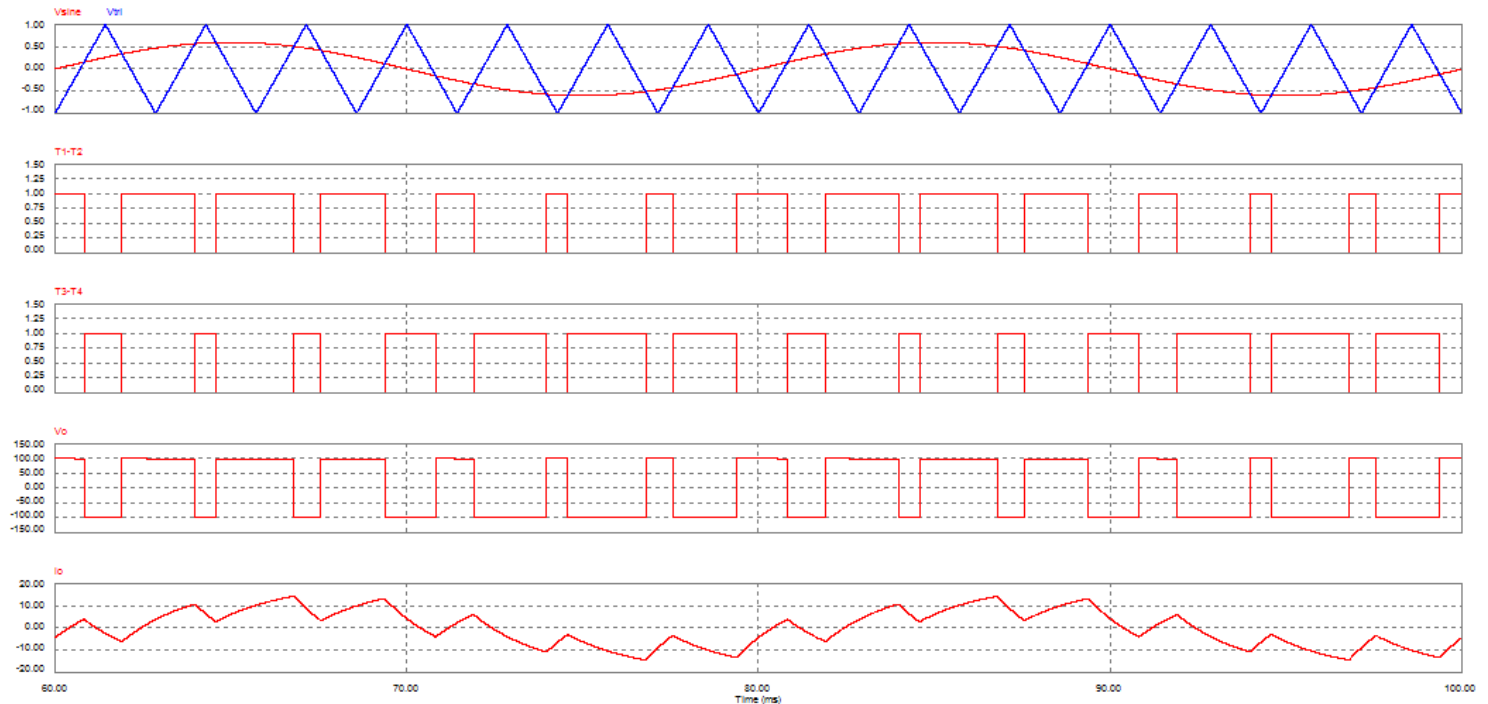
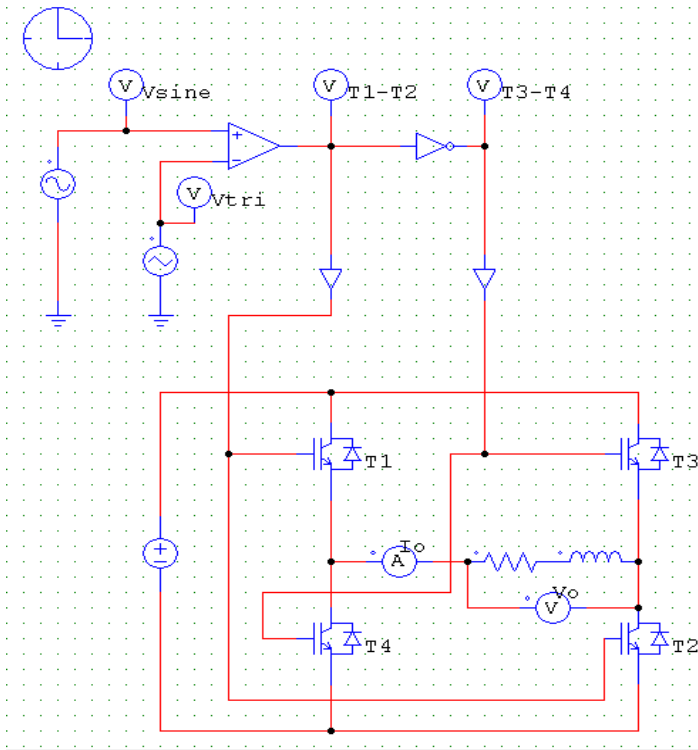
Indice de modulation:

$$m = f_p / f$$



Onduleurs de tension monophasé MLI

Exemple de simulation PSIM de la technique MLI sinus-triangulaire bipolaire



Onduleurs de tension monophasé MLI

Exercice:

Soit l'onduleur de tension monophasé en pont dont la forme de la tension de sortie est représentée sur la figure 2. La charge est de nature inductive R-L, $V_{dc} = 100V$ et $\alpha = 18^\circ$

1. Tracer les chronogrammes des signaux de commande des 4 interrupteurs électroniques
2. Calculer les amplitudes des harmoniques de la tension de sortie jusqu'à l'ordre $n=6$
3. Montrer que la valeur efficace de la tension de sortie $V_{eff} = V_{dc} \sqrt{1 - \frac{2\alpha}{\pi}}$
4. Calculer la valeur efficace de la tension de sortie V_{eff}
5. Calculer le taux de distorsion harmonique $THD_v\%$
6. On donne en régime permanent, la forme d'onde du courant i_o , tracer le chronogramme de i_{Q1}

Onduleurs de tension monophasé MLI

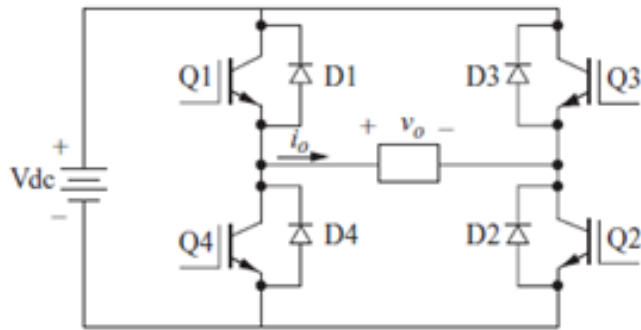


Figure 1

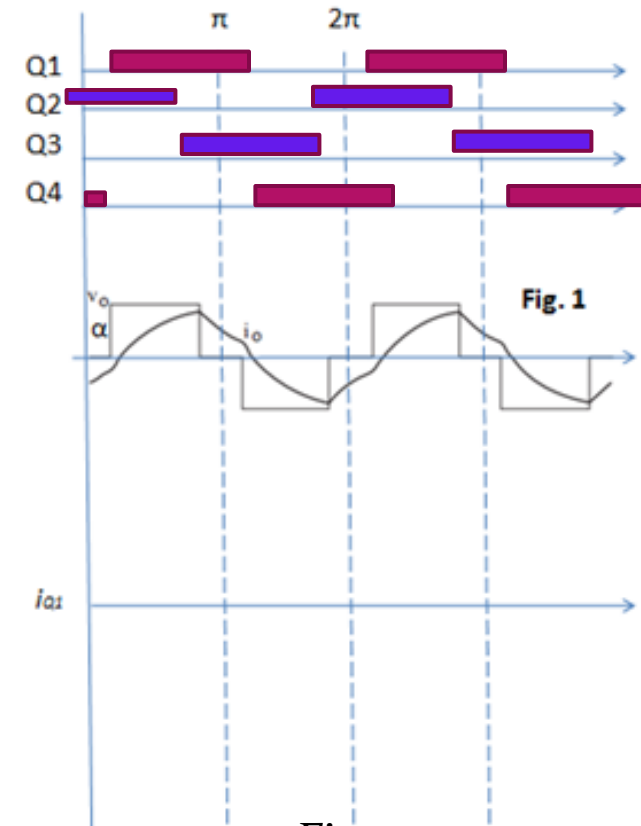
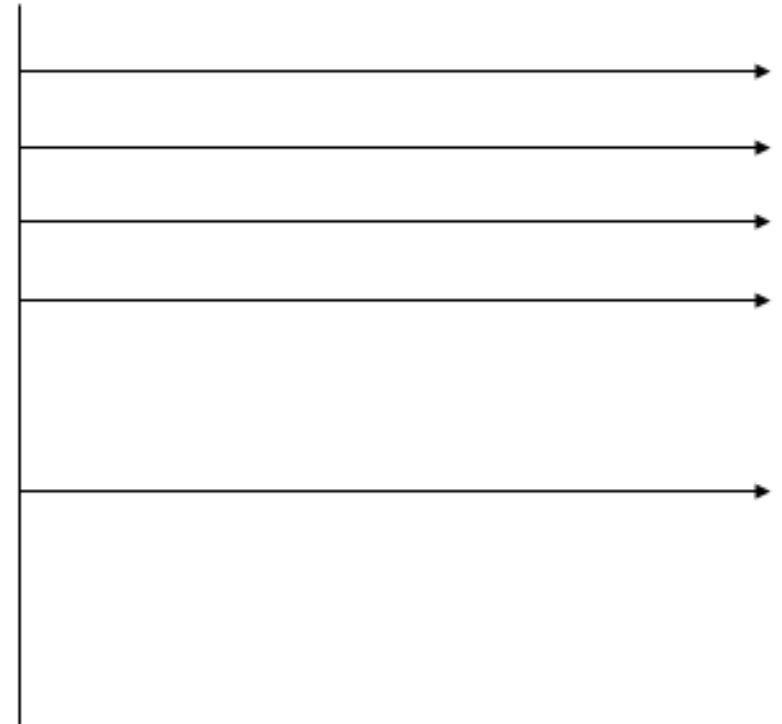
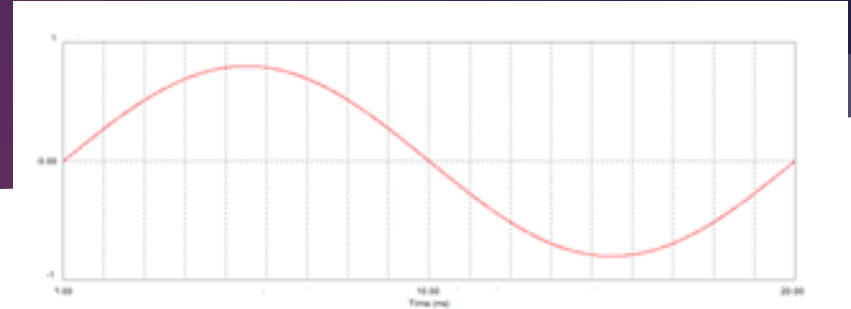


Figure 2

Onduleurs de tension monophasé MLI

Suite exercice:

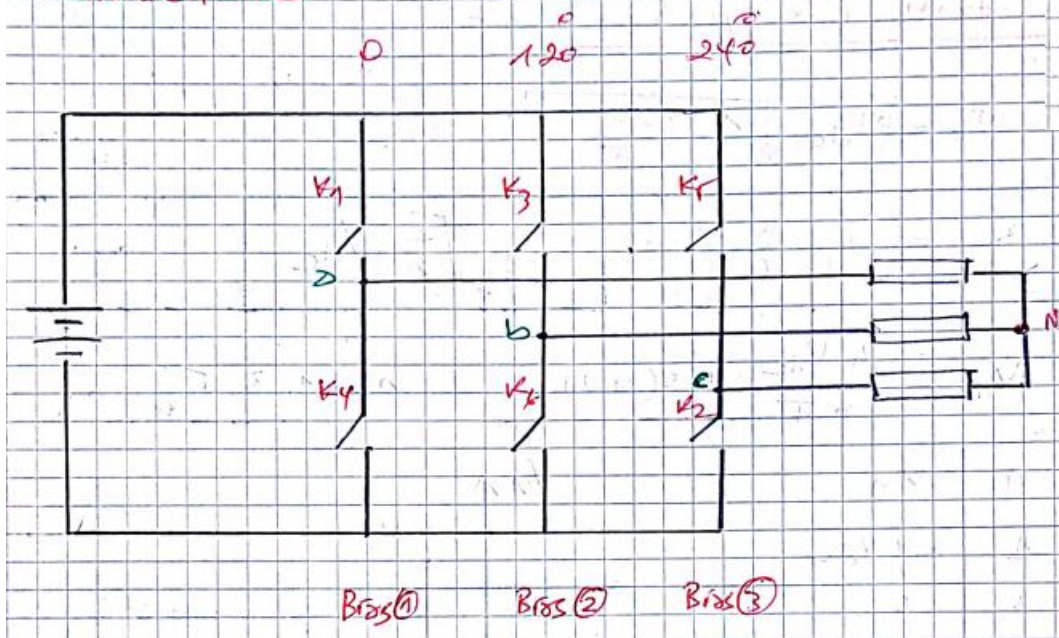
Pour améliorer les performances de l'onduleur en pont de l'exo précédent, on utilise la stratégie de commande MLI sinus-triangulaire unipolaire. Pour l'onde de modulation de la figure ci-contre, tracer les chronogrammes des signaux de commande ainsi que la forme de la tension v_o correspondants à un indice de modulation $m_f=9$



Onduleurs de tension triphasé

onduleur de tension Triphasé

Structure

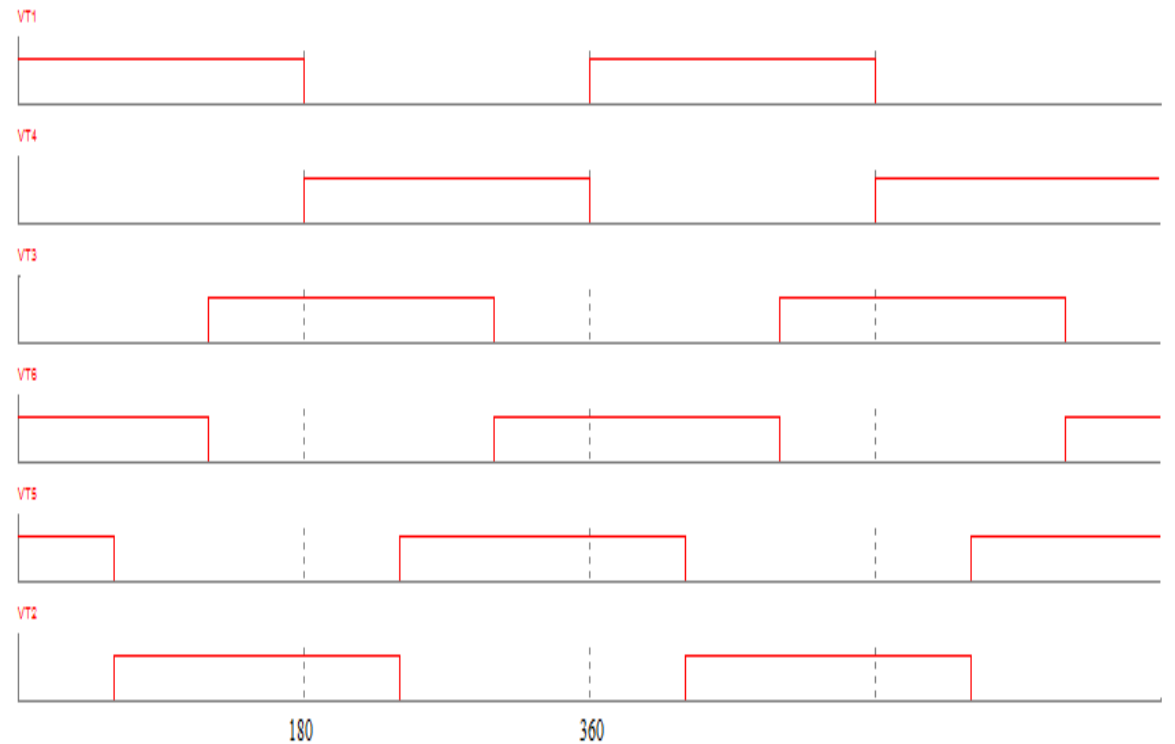
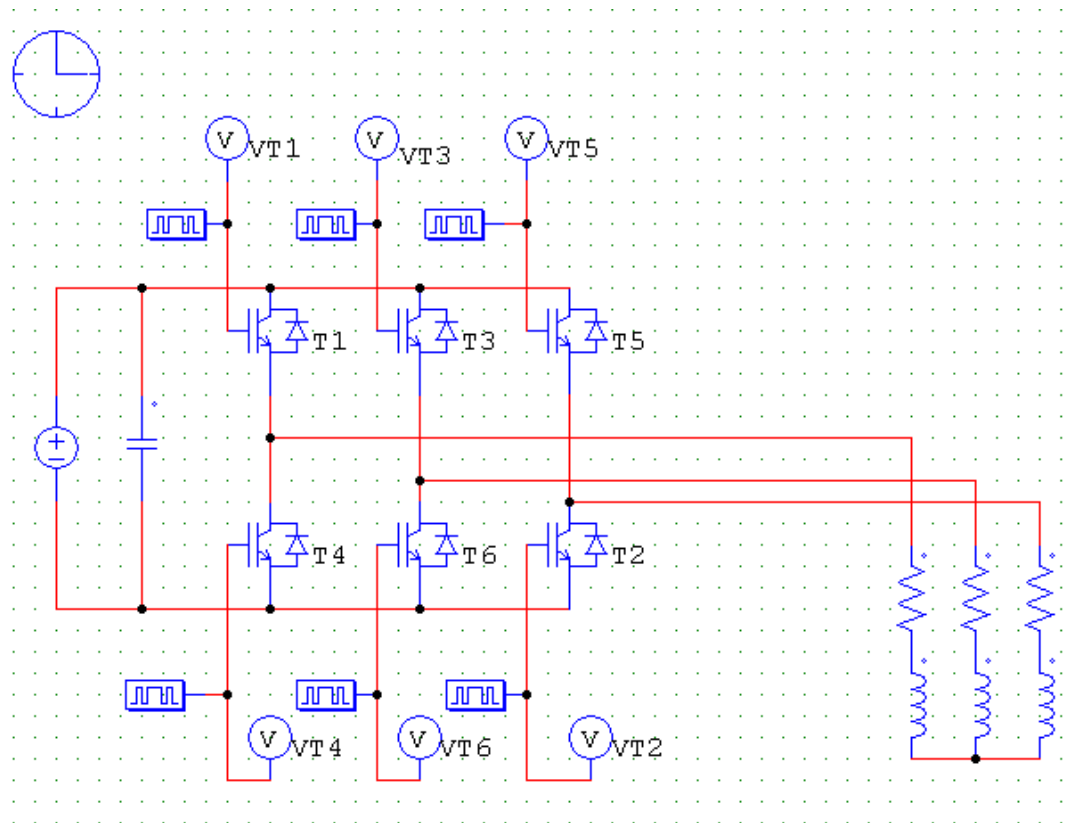


$K_1 \rightarrow K_6$ interrupteurs réversibles en courant
 $K_1 = K_4$
 $K_3 = K_6$
 $K_5 = K_2$

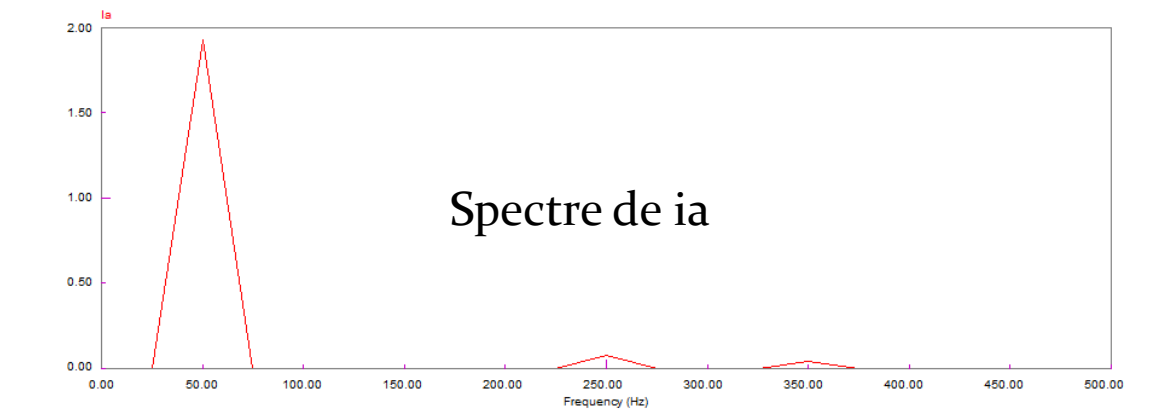
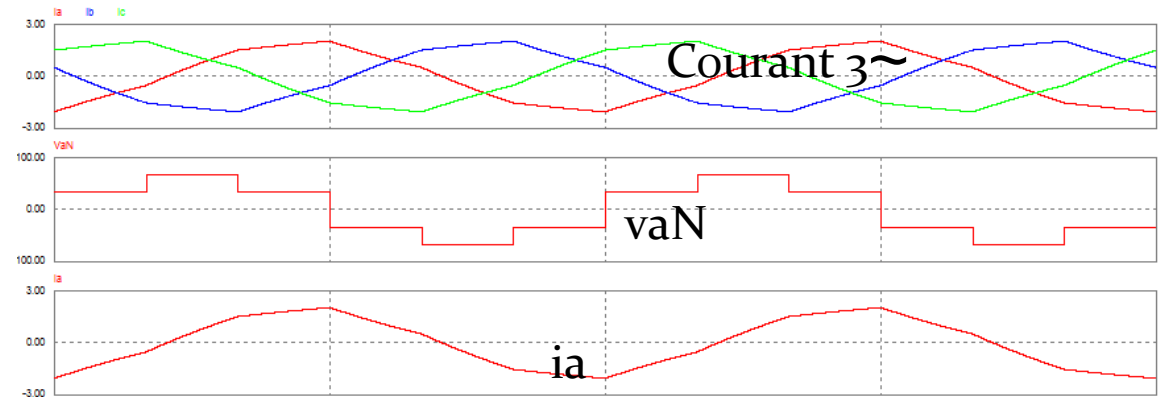
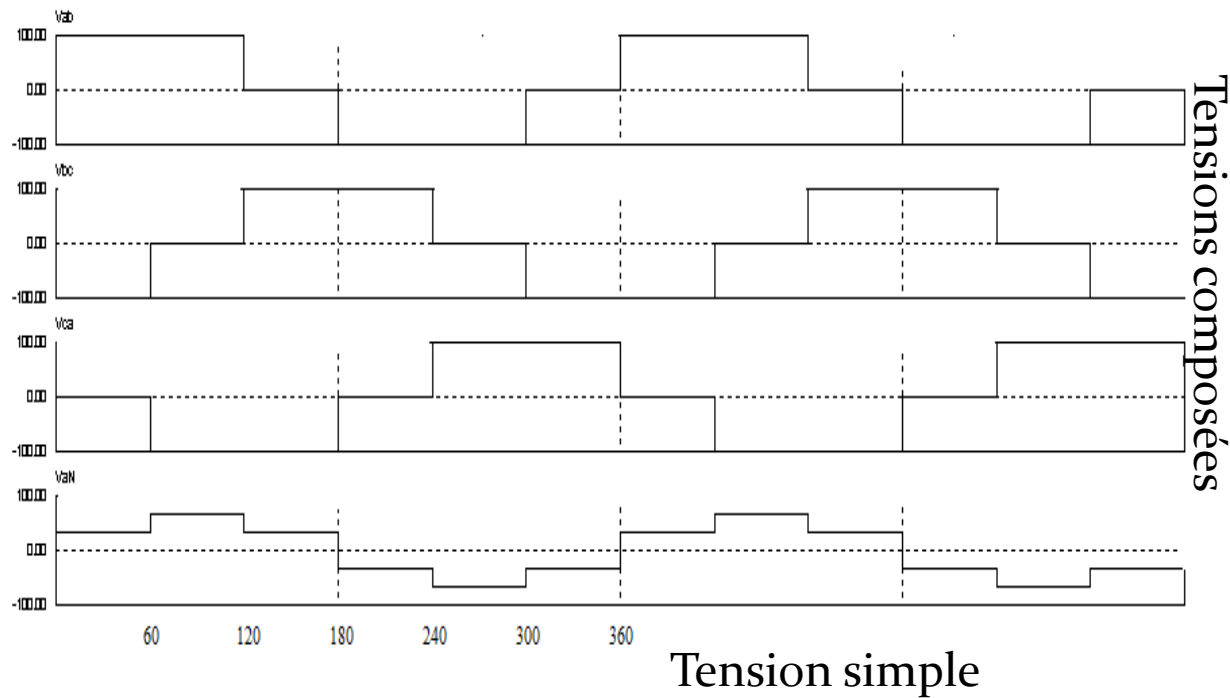
Common de 180°

- * chaque interrupteur est fermé pendant $180^\circ/360^\circ$
 - * la common de du Bras (1) est décalé du Bras (2) de 120°
- $\text{Bras (1)} \quad \text{Bras (2)} \quad \text{Bras (3)}$

Onduleurs de tension triphasé



Onduleurs de tension triphasé



Onduleurs de tension triphasé

Remarques:

- Il y'a 6 séquences différentes dont la durée de chacune est 60° pendant une période de fonctionnement (360°)
- À chaque instant trois interrupteurs sont à l'état ON
- La tension composée prend les valeurs $\pm V_{dc}$ ou la valeur zéro
- La tension simple prend les valeurs $\pm 2V_{dc}/3$ ou $\pm V_{dc}/3$
- Le 3ième harmonique et ses multiples sont nulles
- La forme d'onde du courant est très proche de la forme sinusoïdale

Onduleurs de tension triphasé MLI

Les techniques de commande MLI peuvent être aussi utilisées pour les onduleurs triphasés avec les mêmes avantages que pour le cas des onduleurs monophasés:

Réduction du filtre et des harmoniques

Réglage de l'amplitude de l'onde fondamentale.

Le principe de la MLI pour l'onduleur triphasé est similaire à celle de l'onduleur monophasé.

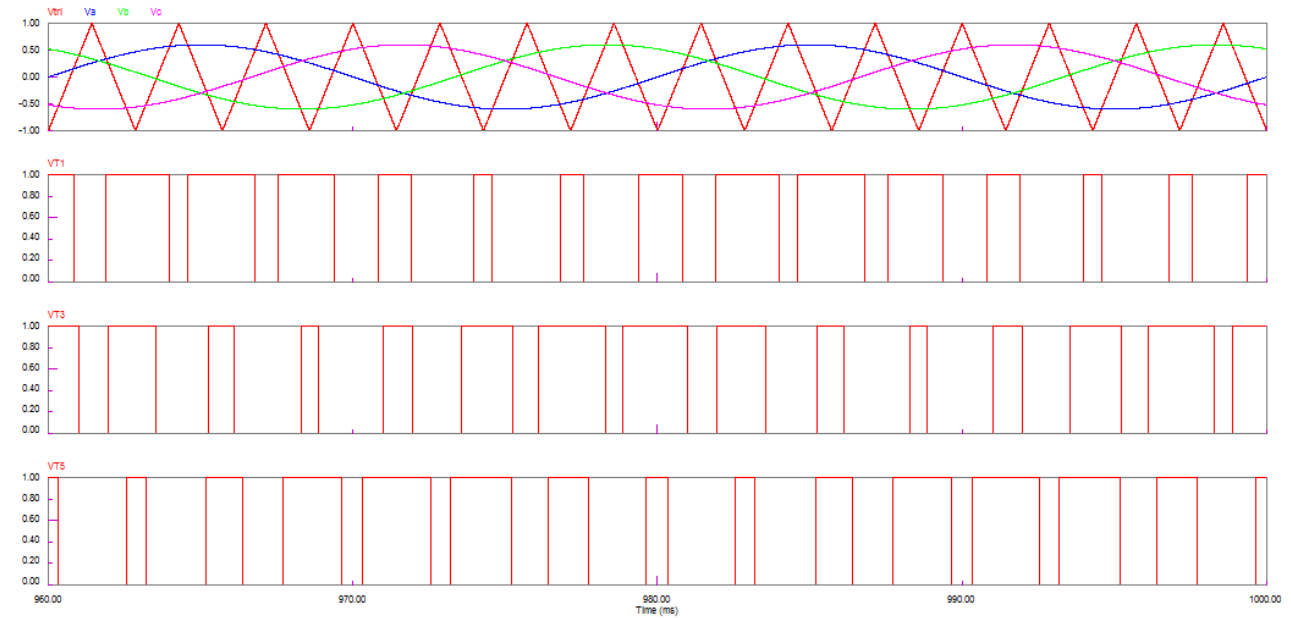
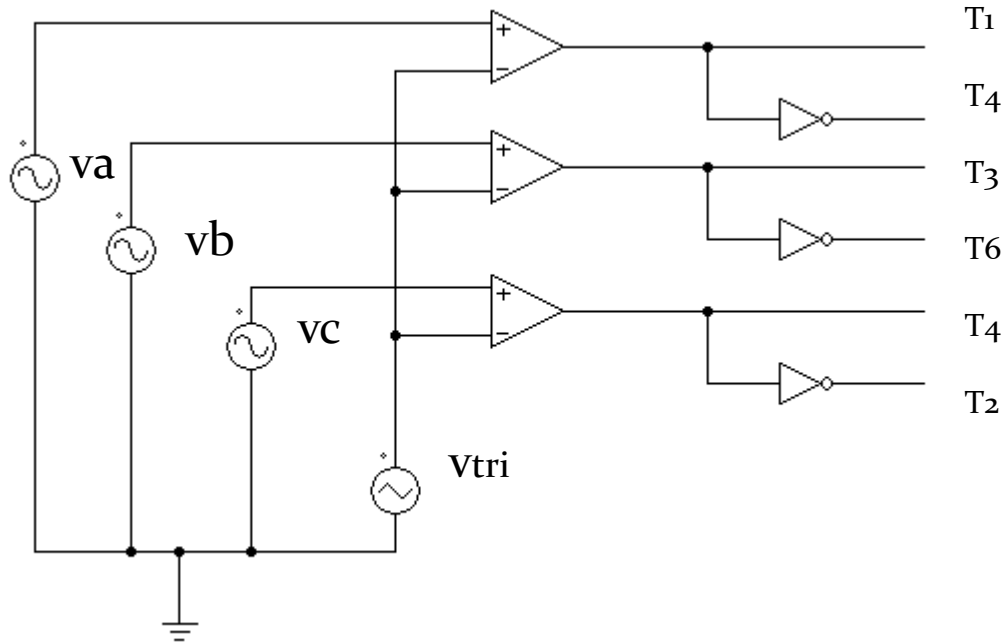
Fondamentalement, chaque bras de l'onduleur est contrôlé en comparant une onde sinusoïdale dite onde de modulation ou référence avec une onde porteuse triangulaire. Pour créer le décalage de 120° entre phases, on utilise trois ondes de modulation formant un système triphasé

La fréquence fondamentale de la sortie est la même que celle de l'onde de référence, et l'amplitude de la sortie est déterminée par les amplitudes relatives des ondes de référence .

Comme dans le cas de l'onduleur triphasé à commande 180° , les interrupteurs dans chaque bras sont complémentaires.

Onduleurs de tension triphasé MLI

Schéma synoptique



Onduleurs de tension triphasé MLI

