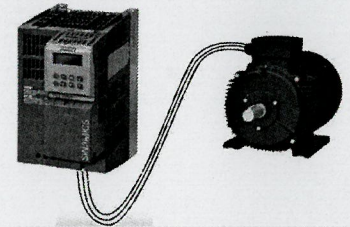


Onduleur triphasé

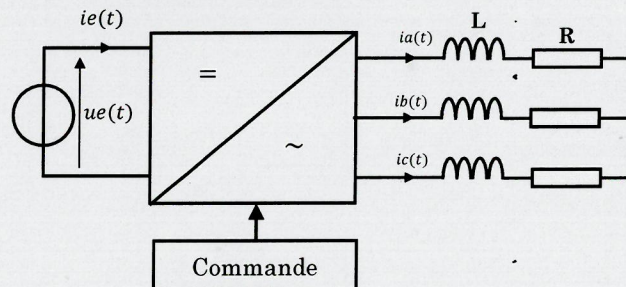
I. Introduction

1. Définition

Les onduleurs triphasés convertissent le courant continu en courant alternatif triphasé pour alimenter des moteurs, l'intégration des énergies renouvelables, l'UPS, le transport ferroviaire et les véhicules électriques. Ils sont essentiels pour assurer une distribution efficace et fiable de l'électricité dans divers domaines industriels et résidentiels.



Onduleur triphasé



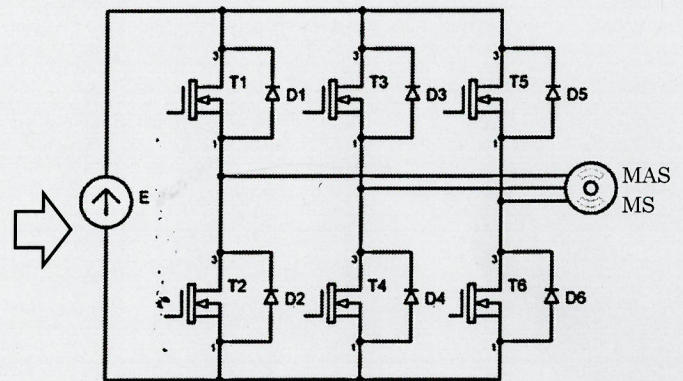
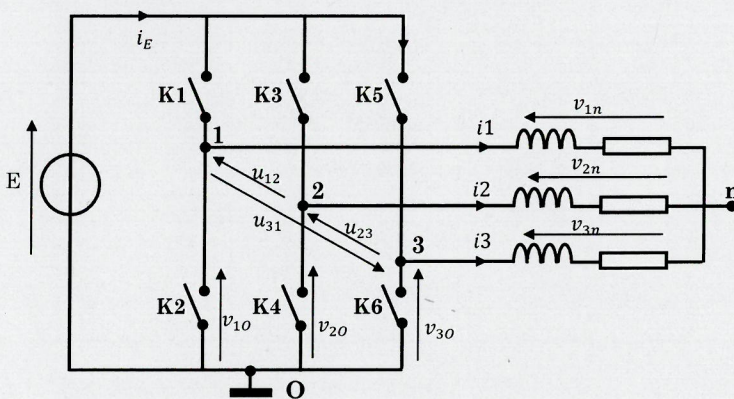
2. Hypothèse d'étude

- la source d'entrée fournit une tension idéale constante ($u_e(t) = E$).
- la charge est une source de courant (soit une MAS ou MS) et à tendance inductive ;
- Les courant qui traverse la charge généralement des courants alternatifs sinusoïdaux équilibrés.
- Tous les interrupteurs de puissance sont idéaux, ce qui assure un fonctionnement parfait de l'onduleur sans pertes.

II. Onduleur de tension triphasé

1. Structure

Un onduleur triphasé est habituellement constitué de six interrupteurs unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant. Sa structure se compose ainsi :



Structure à transistor MOSFET

Pour assurer la conformité aux règles d'interconnexion des sources, il est nécessaire de commander les interrupteurs de la manière suivante : $K_2 = \overline{K_1}$, $K_4 = \overline{K_3}$ et $K_6 = \overline{K_5}$

Les onduleurs triphasés sont équipés de différentes commandes pour réguler leurs trois bras. Voici quelques exemples de ces commandes :

- La commande 180°
- La commande 120°
- La commande MLI (PWM)

Au cours actuel, nous allons nous concentrer exclusivement sur l'étude de deux commandes spécifiques : la commande 180° et la commande MLI.

2. Les formes des tensions

2.1. Tensions v_{10} , v_{20} et v_{30} : tensions aux bornes des interrupteurs

La tension v_{io} dépend de l'état d'ouverture ou de fermeture des interrupteurs. Ces différents états sont récapitulés dans le tableau ci-dessous :

	K1 fermé	K1 ouvert		K3 fermé	K3 ouvert		K5 fermé	K5 ouvert
Tension v_{10}	E	0	Tension v_{20}	E	0	Tension v_{30}	E	0

Questions 1 : présenter les graphiques illustrant les formes d'onde de v_{10} , v_{20} et v_{30} .

2.2. Les tensions simples en fonction des tensions composées : $[v_{1n}, v_{2n}, v_{3n}] = f(u_{12}, u_{23}, u_{31})$

Hypothèse : la charge est équilibrée, les tensions simples forment un système triphasé équilibré : $v_{1n} + v_{2n} + v_{3n} = 0$

Question 2 : démontrez que $v_{1n} = \frac{1}{3} (u_{12} - u_{31})$? En déduire aussi v_{2n} et v_{3n}

<p>On a : $v_{1n} + v_{2n} + v_{3n} = 0 \Rightarrow v_{1n} = -v_{2n} - v_{3n}$</p> <p>$\Rightarrow 2v_{1n} + v_{1n} = 2v_{1n} - v_{2n} - v_{3n}$</p> <p>$\Leftrightarrow 3v_{1n} = 2v_{1n} - v_{2n} - v_{3n}$ car $v_{3n} = v_{31} - v_{1n}$</p> <p>d'où : $v_{1n} = \frac{1}{3} (v_{1n} - v_{2n} - [v_{31} - v_{1n}]) \Rightarrow v_{1n} = \frac{1}{3} (u_{12} - u_{31})$</p>	<p>v_{1n}</p> <p>v_{2n}</p> <p>v_{3n}</p>	<p>$v_{1n} = \frac{1}{3} (u_{12} - u_{31})$</p> <p>$v_{2n} = \frac{1}{3} (u_{23} - u_{12})$</p> <p>$v_{3n} = \frac{1}{3} (u_{31} - u_{23})$</p>
---	--	--

2.3. Les tensions simples : $[v_{1n}, v_{2n}, v_{3n}] = f(v_{10}, v_{20}, v_{30})$

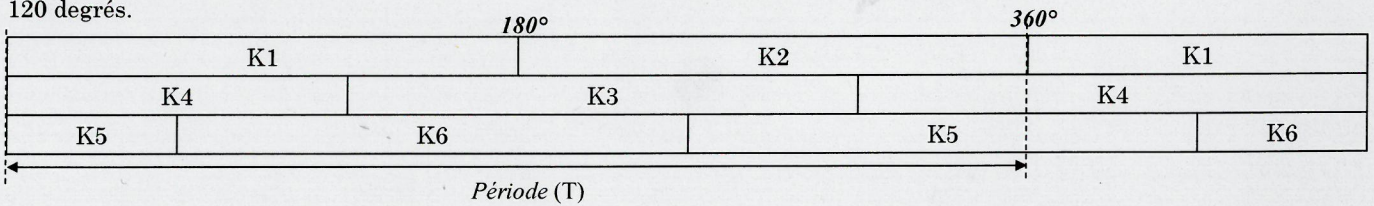
Question 3 : démontrez à partir des équations précédentes que $v_{1n} = \frac{2}{3} v_{10} - \frac{1}{3} v_{20} - \frac{1}{3} v_{30}$? En déduire aussi v_{2n} et v_{3n}

<p>On a : $v_{1n} = \frac{1}{3} (u_{12} - u_{31}) \Rightarrow \begin{cases} u_{12} = v_{10} - v_{20} \\ u_{31} = v_{30} - v_{10} \end{cases}$</p> <p>$\Rightarrow v_{1n} = \frac{1}{3} (v_{10} - v_{20} - v_{30} + v_{10})$</p> <p>d'où : $v_{1n} = \frac{2}{3} v_{10} - \frac{1}{3} v_{20} - \frac{1}{3} v_{30}$</p>	<p>v_{1n}</p> <p>v_{2n}</p> <p>v_{3n}</p>	<p>$v_{1n} = \frac{2}{3} v_{10} - \frac{1}{3} v_{20} - \frac{1}{3} v_{30}$</p> <p>$v_{2n} = -\frac{1}{3} v_{10} + \frac{2}{3} v_{20} - \frac{1}{3} v_{30}$</p> <p>$v_{3n} = -\frac{1}{3} v_{10} - \frac{1}{3} v_{20} + \frac{2}{3} v_{30}$</p>
--	--	---

Questions 4 : présenter les graphiques illustrant les formes d'onde de v_{1n} , v_{2n} et v_{3n} .

3. Etude de qualité de l'onduleur : commande 180°

Chaque interrupteur est activé pendant une période de 180 degrés. Les commandes des interrupteurs au sein d'une même branche (bras) sont successives, tandis que les commandes des interrupteurs de deux branches différentes sont décalées de 120 degrés.

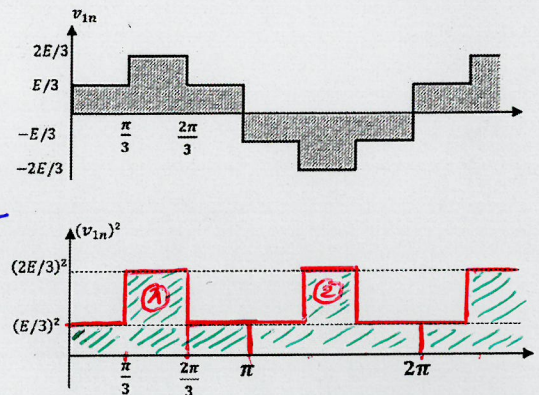


3.1. Valeur efficace de la tension de la phase 1

La relation suivante permet de calculer la valeur efficace de la tension de sortie : $V_{1n} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_{1n}(t)^2 dt} \Rightarrow U_s = \sqrt{\langle v_{1n}(t)^2 \rangle}$

On a : $\langle v_{1n}^2 \rangle = 2 \times \left[2 \times \frac{\pi}{3} \times \frac{E^2}{9} + \frac{\pi}{3} \times \frac{4E^2}{9} \right] = \frac{2}{9} E^2$

Comme $v_{1n} = \sqrt{\langle v_{1n}^2 \rangle} \Rightarrow v_{1n} = \frac{\sqrt{2}}{3} E$

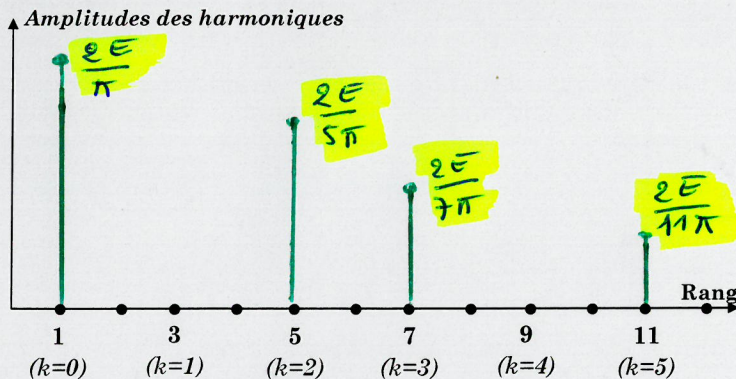


3.2. Spectre de la tension de la phase 1

La tension $v_{1n}(t)$ possède une caractéristique impaire et une symétrie glissante. Son expansion en série de Fourier est exprimée comme suit :

$$v_{1n}(t) = \frac{4E}{3\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{2k+1} \left(1 + \cos\left((2k+1)\frac{\pi}{3}\right) \right) \sin((2k+1)\omega t)$$

Le diagramme ci-dessous représente le spectre correspondant :



Expression du fondamental $v_{1n1}(t)$
$v_{m1}(t) = \frac{2E}{\pi} \sin(\omega t)$ <i>(Handwritten note: $\frac{2E}{\pi} \rightarrow V_{m1max}$)</i>
La valeur efficace du fondamental V_{1n1}
$V_{1n1} = \frac{V_{m1max}}{\sqrt{2}} \Rightarrow V_{1n1} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} E$

A partir de spectre, on constate que l'harmonique le plus gênant est :

l'harmonique 5

Leur expression est : $v_{m5}(t) = \frac{2E}{5\pi} \sin(\omega t)$ de valeur efficace :

$V_{m5} = \frac{\sqrt{2}}{5\pi} E$

3.3. Taux de distorsion harmonique THD

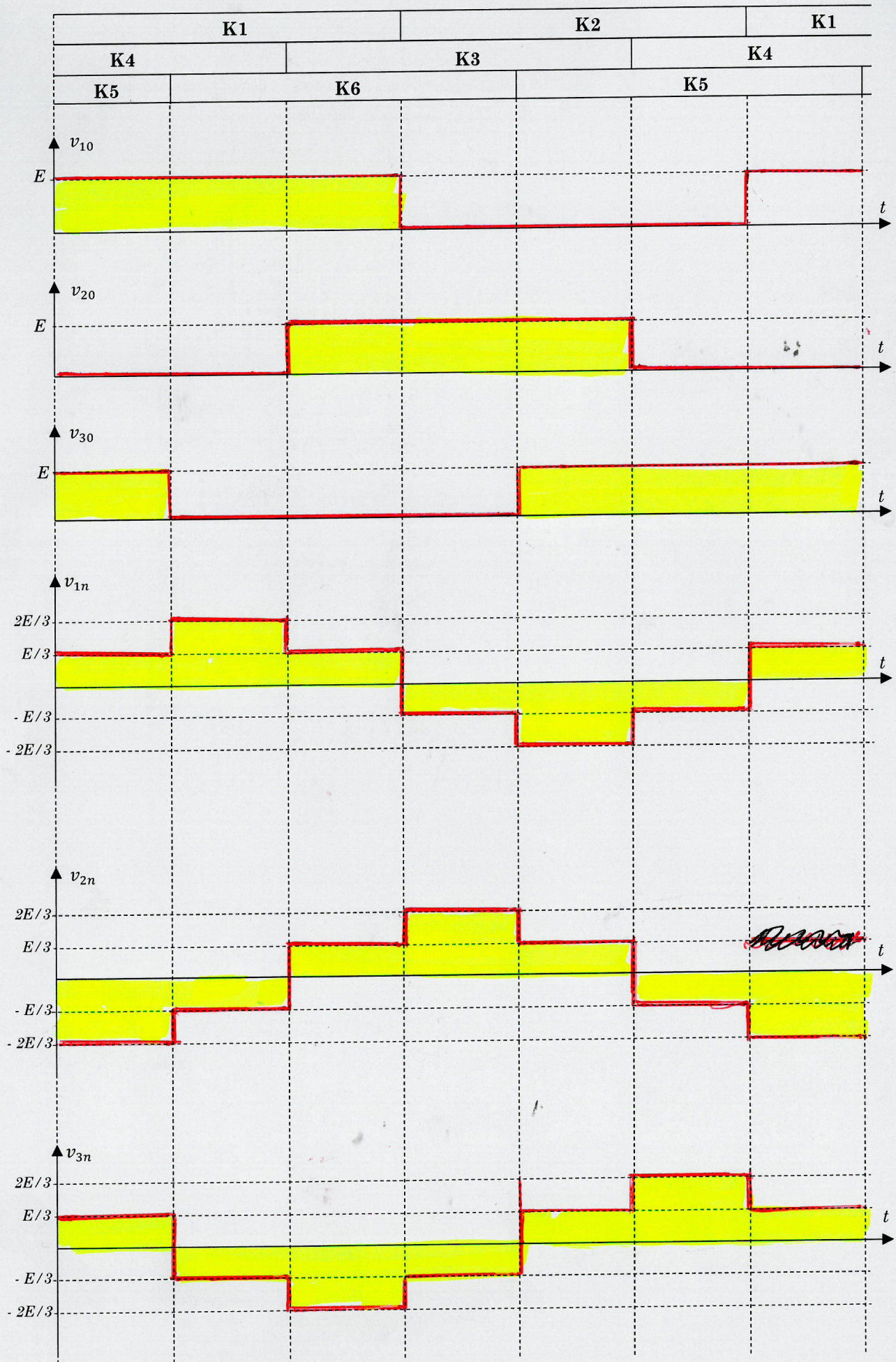
Par définition : $THD = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^{+\infty} (U_{s_i})^2}{I_1^2}} = \sqrt{\frac{U_s^2 - U_{s_1}^2}{U_{s_1}^2}}$

$THD = \sqrt{\frac{(\frac{\sqrt{2}}{3} E)^2 - (\frac{\sqrt{2}}{\pi} E)^2}{(\frac{\sqrt{2}}{\pi} E)^2}} \Rightarrow THD = \sqrt{\frac{\pi^2}{9} - 1} \Rightarrow THD = 31\%$

Conclusion :

La commande 180° offre une efficace suppression de l'harmonique 3 et de ses multiples, ce qui réduit significativement le THD. Cependant, elle présente un inconvénient majeur : les harmoniques 5 et 7 demeurent problématiques et s'avèrent plus complexes le filtrage. Ces harmoniques indésirables peuvent entraîner des vibrations et une fatigue mécanique des machines tournantes, ce qui réduit le rendement et peut les amener à se déclasser. Comme solution est la commande MLI avec porteuse.

Allures de la commande 180°

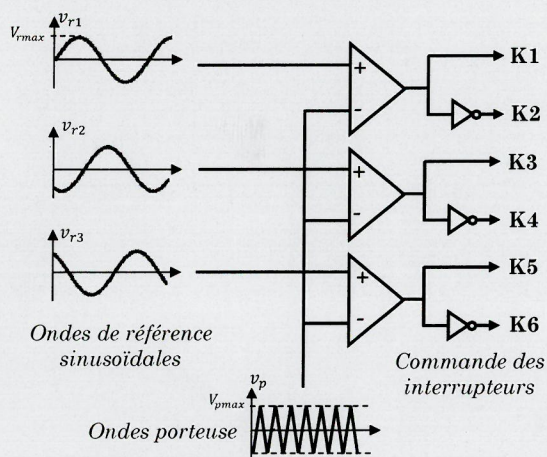


4. Etude de la commande MLI avec porteuse ou MLI en temps réel

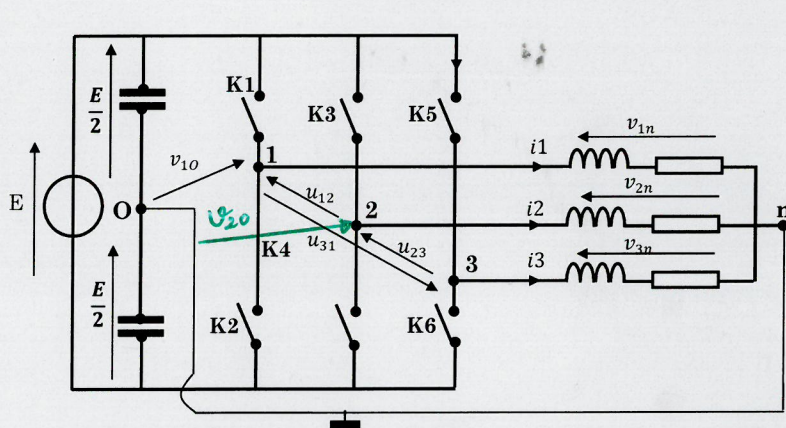
La commande MLI avec porteuse implique la comparaison de trois ondes sinusoïdales de référence, $v_{r1}(t)$, $v_{r2}(t)$, et $v_{r3}(t)$, ayant la même amplitude V_{rmax} , la même fréquence f , mais déphasées de $\frac{2\pi}{3}$ les unes par rapport aux autres. Cette comparaison est effectuée avec une onde triangulaire (la porteuse) $Vp(t)$, qui a une fréquence $fp \gg f$ et une amplitude $V_{pmax} \geq V_{rmax}$. Pour régler cette commande, on se base sur les deux commandes suivantes :

- L'indice de modulation $m : m = \frac{f_p}{f}$
- Le coefficient de réglage : $r = \frac{V_{rmax}}{V_{pmax}}$ (varie entre 0 et 1)

Remarque importante : Pour obtenir des tensions de sortie équivalentes, avec une précision d'environ un tiers de leur période, dans un schéma de modulation synchrone entre les phases u_{12} , u_{23} et u_{31} , nous optons pour un indice de modulation m qui est un multiple de 3. Ainsi, les trois tensions seront synchronisées de manière efficace et harmonieuse.



Unité de commande pour élaborer la commande MLI



Unité de puissance : structure point au milieu fictif O

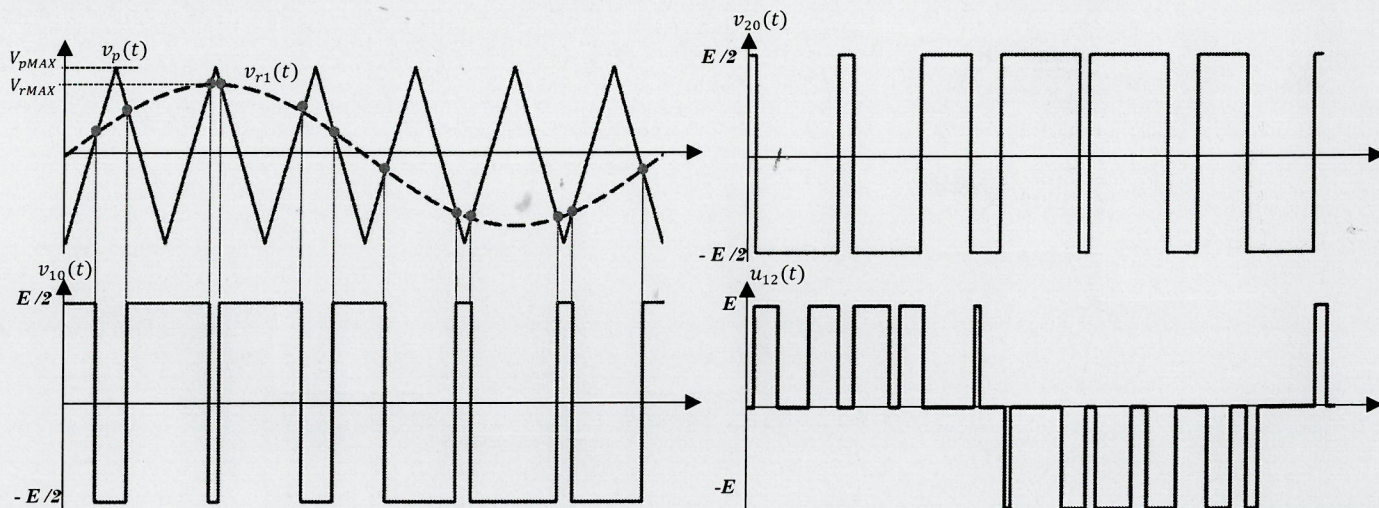
4.1. Les allures des tensions

Voici le tableau présentant les différents états possibles de la tension de sortie entre phases u_{12} :

Sachant que : $u_{12} = v_{1n} - v_{2n} = v_{10} - v_{20}$ donc pour ce cas on commande K1 et K3

K1	K3	v_{10}	v_{20}	u_{12}
0	0	$-E/2$	$-E/2$	0
0	1	$-E/2$	$E/2$	$-E$
1	0	$E/2$	$-E/2$	E
1	1	$E/2$	$E/2$	0

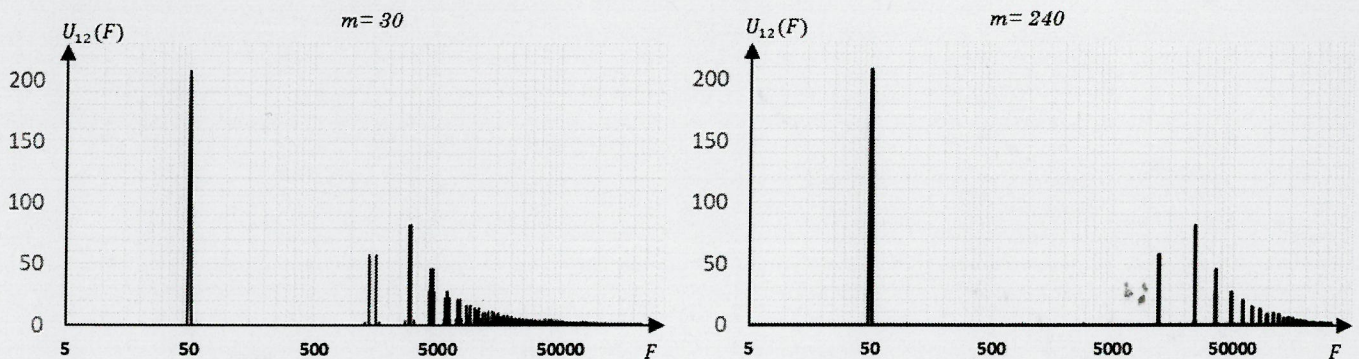
Commande MLI pour $m=6$ et $r=0.8$



4.2. Spectre de la tension $u_{12}(t)$

La tension $u_{12}(t)$ possède une caractéristique impaire et une symétrie glissante. Son expansion en série de Fourier est exprimée comme suit : $u_{12}(t) = E \frac{r\sqrt{3}}{2} \sin\left(2\pi ft + \frac{\pi}{6}\right) + \sum_{n=2}^{\infty} K_n \cos(n 2\pi f_d t)$

Les données ci-dessous ont été obtenues à l'aide d'un logiciel numérique. L'objectif est de comprendre l'influence de l'indice de modulation sur les harmoniques pour les valeurs spécifiées : $E = 300V$, $r = 0.8$ et $f = 50$ Hz.



Remarque :

- * tous les harmoniques sont rejetés vers les hautes fréquences
- * les harmoniques sont tous situés au voisinage de la fréquence de la porteuse F_d
- * à mesure que la fréquence de la porteuse augmente, la simplicité du filtrage devient de plus en plus efficace.