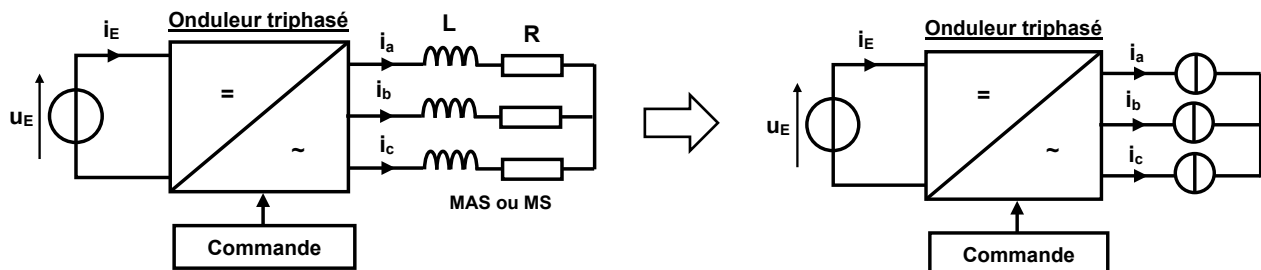


Chapitre 9 : Onduleurs triphasés

I. Introduction

Les onduleurs triphasés transforment une source de courant continu (DC) en courant alternatif (AC) triphasé, indispensable pour l'alimentation des moteurs, l'intégration des énergies renouvelables, les systèmes UPS, le transport ferroviaire et les véhicules électriques. Ils jouent un rôle clé dans la conversion et la gestion efficaces de l'énergie, assurant performance, fiabilité et adaptabilité dans de multiples applications industrielles et résidentielles.



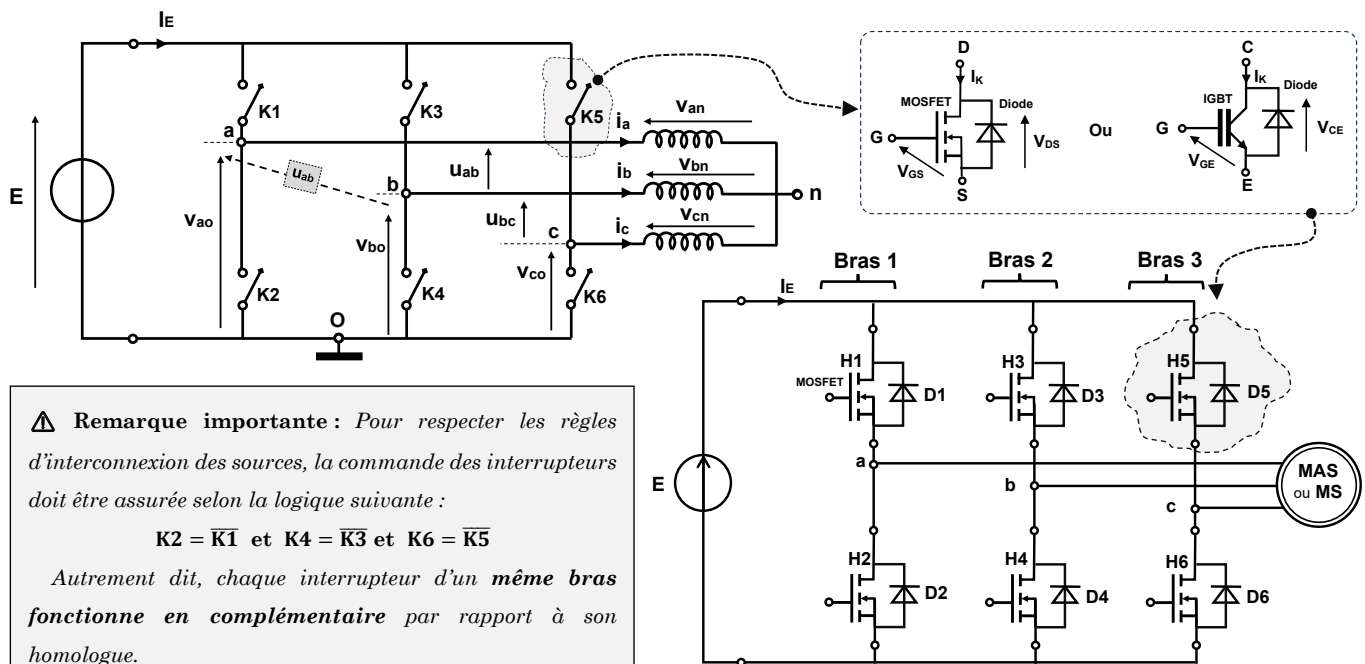
Hypothèses retenues :

- La source d'entrée délivre une tension continue idéale et constante : $u_e(t) = E$
- La charge est assimilée à une source de courant triphasé (une MAS ou une MS) de nature principalement inductive.
- Les courants de charge sont des courants alternatifs triphasés sinusoïdaux équilibrés.
- Les interrupteurs de puissance sont supposés idéaux, garantissant un fonctionnement parfait de l'onduleur, sans pertes.

II. Etude de l'onduleur de tension triphasé

1- Structure de l'onduleur triphasé

Un onduleur triphasé est habituellement constitué de **six** interrupteurs **unidirectionnels** en tension et **bidirectionnels** en courant. Avant de choisir les interrupteurs électroniques de puissance à utiliser, il est nécessaire de réaliser au préalable une étude **statique** et **dynamique** (hors programme) pour le couple « v_{k1} ; i_{k1} ». Sa structure se compose ainsi :



Les onduleurs triphasés peuvent être pilotés par différentes stratégies de commande permettant de réguler leurs trois bras. Parmi les plus courantes :

- Commande 180° (ou commande pleine onde)
- Commande 120° (ou commande disjointe)
- Commande MLI (ou PWM en Anglais)

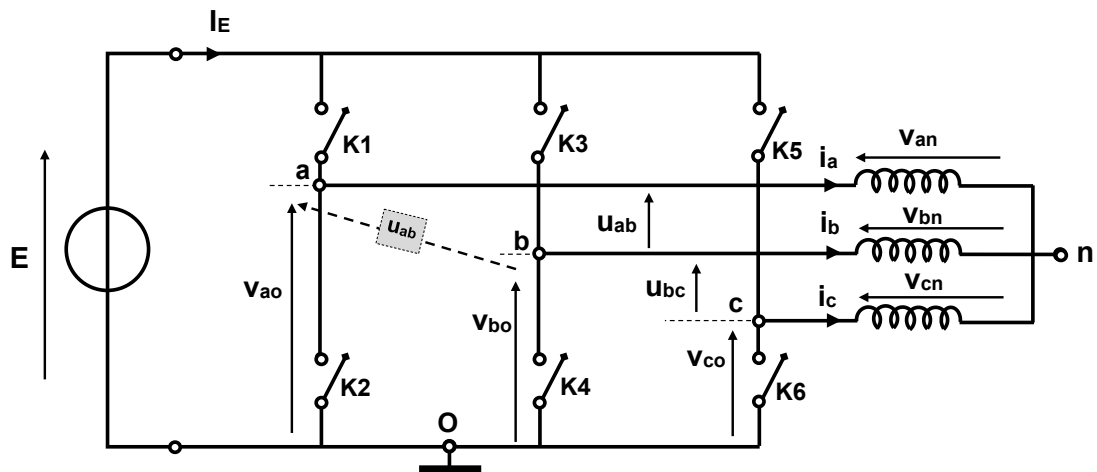
Dans ce cours, l'analyse portera uniquement sur deux méthodes : la **commande 180°** et la **commande MLI**.

2- Commande 1 : Commande pleine onde (commande 180°).

Dans cette stratégie, les interrupteurs sont commandés par paires complémentaires : (K1, K2), (K3, K4) et (K5, K6). Chaque interrupteur est activé pendant 180° (une demi-période) puis désactivé durant l'autre moitié. Les deux interrupteurs d'un même bras commutent successivement, et les commandes des bras sont décalées de 120° ($T/3$) les unes par rapport aux autres.

K1			K2			K1	
K4		K3			K4		
K5	K6			K5			
0	T/6	T/3	T/2	2T/3	5T/3	T	7T/6

Pour mettre en œuvre cette commande, notre étude s'appuiera sur la structure d'un onduleur triphasé à pont complet (Full-Bridge à six interrupteurs), représentée dans la figure ci-après.



2.1-Les formes des tensions

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

La tension v_{i0} dépend de l'état de conduction ou de blocage des interrupteurs. Les différentes configurations possibles sont résumées dans le tableau ci-dessous.

	K1 fermé	K1 ouvert		K3 fermé	K3 ouvert		K5 fermé	K5 ouvert
Tension v_{a0}	E	0	Tension v_{b0}	E	0	Tension v_{c0}	E	0

Questions 1 : Représenter les formes d'onde des tensions v_{a0} , v_{b0} et v_{c0} à l'aide de graphiques.

⚡ Les tensions simples en fonction des tensions composées : $[v_{an}, v_{bn}, v_{cn}] = f(u_{ab}, u_{bc}, u_{ca})$

Hypothèse : la charge est équilibrée, les tensions simples forment un système triphasé équilibré : $v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0$

Question 2 : démontrer que $v_{an} = \frac{1}{3} (u_{ab} - u_{ca})$? En déduire aussi v_{bn} et v_{cn} .

On a : $V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$ $\Leftrightarrow V_{an} = -V_{bn} - V_{cn}$ $\Leftrightarrow 2V_{an} + V_{an} = 2V_{an} - V_{bn} - V_{cn}$ $\Leftrightarrow 3V_{an} = V_{an} - V_{bn} + V_{an} - V_{cn}$ $\Leftrightarrow 3V_{an} = (V_{an} - V_{bn}) - (V_{cn} - V_{an})$ $\Leftrightarrow 3V_{an} = U_{ab} - U_{ca}$ d'où : $V_{an} = \frac{1}{3} (U_{ab} - U_{ca})$	V_{an}	$V_{an} = \frac{1}{3} (u_{ab} - u_{ca})$
	V_{bn}	$V_{bn} = \frac{1}{3} (u_{bc} - u_{ab})$
	V_{cn}	$V_{cn} = \frac{1}{3} (u_{ca} - u_{bc})$



Les tensions simples : $[V_{an}, V_{bn}, V_{cn}] = f(V_{a0}, V_{b0}, V_{c0})$

Question 3 : Démontrer à partir des équations précédentes que, $V_{an} = \frac{2}{3} V_{a0} - \frac{1}{3} V_{b0} - \frac{1}{3} V_{c0}$? ensuite déduire aussi V_{bn} et V_{cn}

d'après le schéma : $U_{ab} = V_{a0} - V_{b0}$ et $U_{ca} = V_{c0} - V_{a0}$ On a : $V_{an} = \frac{1}{3} (U_{ab} - U_{ca})$ $\Leftrightarrow V_{an} = \frac{1}{3} (V_{a0} - V_{b0} - V_{c0} + V_{a0})$ $\Leftrightarrow V_{an} = \frac{1}{3} (2V_{a0} - V_{b0} - V_{c0})$ d'où : $V_{an} = \frac{2}{3} V_{a0} - \frac{1}{3} V_{b0} - \frac{1}{3} V_{c0}$	V_{an}	$V_{an} = \frac{2}{3} V_{a0} - \frac{1}{3} V_{b0} - \frac{1}{3} V_{c0}$
	V_{bn}	$V_{bn} = -\frac{1}{3} V_{a0} + \frac{2}{3} V_{b0} - \frac{1}{3} V_{c0}$
	V_{cn}	$V_{cn} = -\frac{1}{3} V_{a0} - \frac{1}{3} V_{b0} + \frac{2}{3} V_{c0}$

Questions 4 : présenter les graphiques illustrant les formes d'onde de V_{an} , V_{bn} et V_{cn} .

$$\begin{cases} a & 2 & -1 & -1 \\ b & -1 & 2 & -1 \\ c & -1 & -1 & 2 \end{cases}$$

2.2-Etude de qualité de l'onduleur : commande 180°

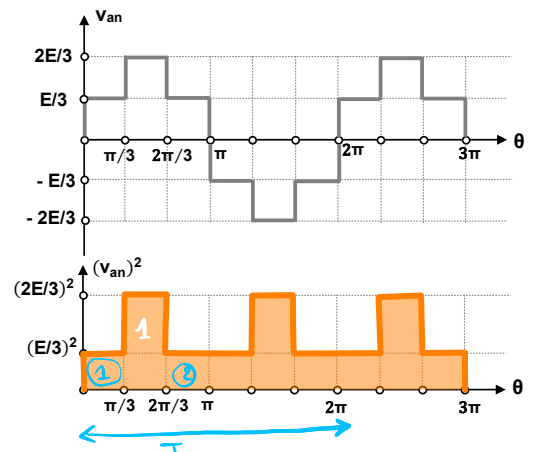
Valeur efficace de la tension de la phase 1

Nous cherchons ensuite à évaluer la qualité de l'énergie délivrée par l'onduleur en déterminant le THD. Pour cela, il est nécessaire de connaître la valeur efficace de la tension de sortie, calculée à partir de

la relation suivante : $V_{an} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_{an}(t)^2 dt} \Rightarrow V_{an} = \sqrt{\langle v_{an}(t)^2 \rangle}$

On calcule : $\langle V_{an}^2 \rangle = \frac{(2 \times \frac{\pi}{3} \times \frac{E^2}{9}) + (4 \times \frac{E^2}{9} \times \frac{\pi}{3})}{2\pi} \times 2$
 $\Leftrightarrow \langle V_{an}^2 \rangle = \frac{2}{9} E^2$
d'où : $V_{an} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot E$

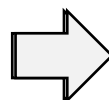
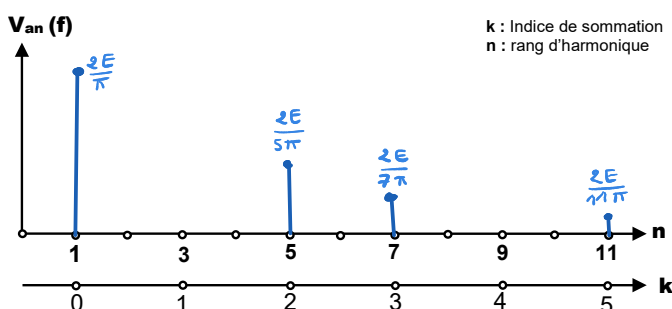
→ deux surface par période



Spectre de la tension de la phase 1

La tension $v_{an}(t)$ possède une caractéristique impaire et une symétrie glissante. Son expansion en série de Fourier est exprimée comme suit : $v_{an}(t) = \frac{4E}{3\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{2k+1} \left(1 + \cos\left((2k+1)\frac{\pi}{3}\right)\right) \sin((2k+1)\omega t)$

La figure ci-dessous représente le spectre correspondant de $v_{an}(t)$:



Expression du fondamental $v_{an1}(t)$
$v_{an1}(t) = \frac{2E}{\pi} \sin(\omega t)$ $\rightarrow V_{max}$
La valeur efficace du fondamental V_{an1}
$V_{an1} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}} \Rightarrow V_{an1} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot E$

À l'analyse du spectre, on observe que l'harmonique le plus gênant est : *l'harmonique de rang 5 (h₅)*

Son expression est donnée par : $v_{an5}^{(1)} = \frac{2E}{5\pi} \cdot \sin(5\omega t)$, et sa valeur efficace est : $V_{ans} = \frac{\sqrt{2}}{5\pi} \cdot E$

⚡ Taux de distorsion harmonique THD

Par définition : $THD = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^{+\infty} (V_{ani})^2}{V_{an1}^2}} \Rightarrow THD = \sqrt{\frac{V_{an}^2 - V_{an1}^2}{V_{an1}^2}}$

$$THD = \sqrt{\frac{\left(\frac{\sqrt{2}}{3}E\right)^2 - \left(\frac{\sqrt{2}}{\pi}E\right)^2}{\left(\frac{\sqrt{2}}{\pi}E\right)^2}} \Rightarrow THD = \sqrt{\frac{\pi^2}{9} - 1} \Rightarrow THD = 0,31 \Rightarrow THD = 31\%$$

⚠ Remarque importante : La commande 180° permet de supprimer efficacement l'harmonique 3 ainsi que ses multiples, réduisant ainsi de manière notable le THD. Toutefois, elle présente un inconvénient majeur : les harmoniques 5 et 7 persistent et restent difficiles à filtrer. Ces composantes indésirables peuvent engendrer des vibrations, une fatigue mécanique par exemple pour les machines tournantes, une baisse de rendement et, à terme, leur déclassement. Une alternative solution consiste à utiliser la **commande MLI à porteuse**.

3- Commande 2 : Commande MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) – PWM

Grâce aux progrès réalisés dans les semi-conducteurs de puissance et leurs techniques de commande, la modulation de largeur d'impulsion (MLI ou PWM en anglais) s'est imposée comme la méthode privilégiée et est désormais utilisée dans la quasi-totalité des variateurs de vitesse, qu'ils soient monophasés ou triphasés.

Le principe de la commande MLI consiste à découper les tensions de la sortie en une succession de créneaux de largeur variable à chaque période, en agissant sur la commande des interrupteurs.

Les objectifs principaux de la commande MLI sont les suivants :

- **Rejeter les harmoniques** des tensions (ou des courants) vers les **hautes fréquences**, afin de **faciliter** leur élimination par **filtrage**.
- **Régler la valeur efficace de la composante fondamentale**, propriété essentielle pour faire fonctionner les machines tournantes à vitesse variable à flux constant.

Parmi les méthodes de commande MLI, deux sont particulièrement utilisées : la **MLI pré-calculée** (déjà abordée en **onduleurs monophasés** !), avec rapports cycliques définis à l'avance, et la **MLI à modulation par porteuse**.

3.1-Etude de la commande MLI avec porteuse (sinus - triangle) ou MLI en temps réel

La **commande MLI à porteuse** repose sur la comparaison de trois signaux sinusoïdaux de référence $v_{r1}(t)$, $v_{r2}(t)$ et $v_{r3}(t)$ de même amplitude V_{rmax} , de même fréquence f , mais déphasés de $2\pi/3$ ($T/3$) entre eux. Ces signaux sont comparés à une onde triangulaire porteuse $V_p(t)$ de fréquence $f_p \gg f_o$ et d'amplitude $V_{pmax} \geq V_{rmax}$.

Le **réglage** de cette commande s'effectue à partir de deux paramètres :

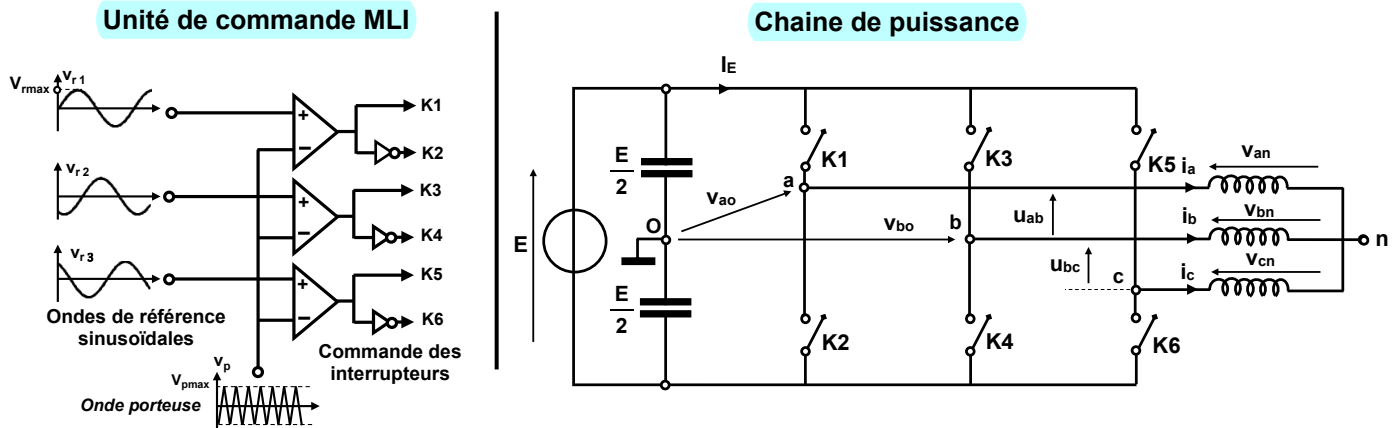
- ✓ L'indice de modulation m : $m = \frac{f_p}{f_o}$
- ✓ Le coefficient de réglage : $r = \frac{V_{rmax}}{V_{pmax}}$ (varie entre 0 et 1)

⚠ Remarque importante : Pour que les trois tensions de sortie entre phases $u_{ab}(t)$, $u_{bc}(t)$ et $u_{ca}(t)$ soient identiques, à un tiers de leur période près, dans le cas d'une modulation synchrone, on **choisit un indice de modulation m multiple de 3**.

Ce choix permet d'aligner les instants de commutation des trois bras de l'onduleur de manière parfaitement symétrique sur une période, assurant ainsi une synchronisation harmonieuse des formes d'onde. En conséquence :

- Les tensions de phase et de ligne sont équilibrées.
- Les distorsions harmoniques sont réduites.
- Les couples pulsatoires dans les machines tournantes sont limités, ce qui améliore leur rendement et leur durée de vie.

Pour mettre en œuvre cette commande, notre étude s'appuiera sur la structure d'un onduleur triphasé à neutre commun (ou à point milieu de chaque bras), représentée dans la figure ci-après.

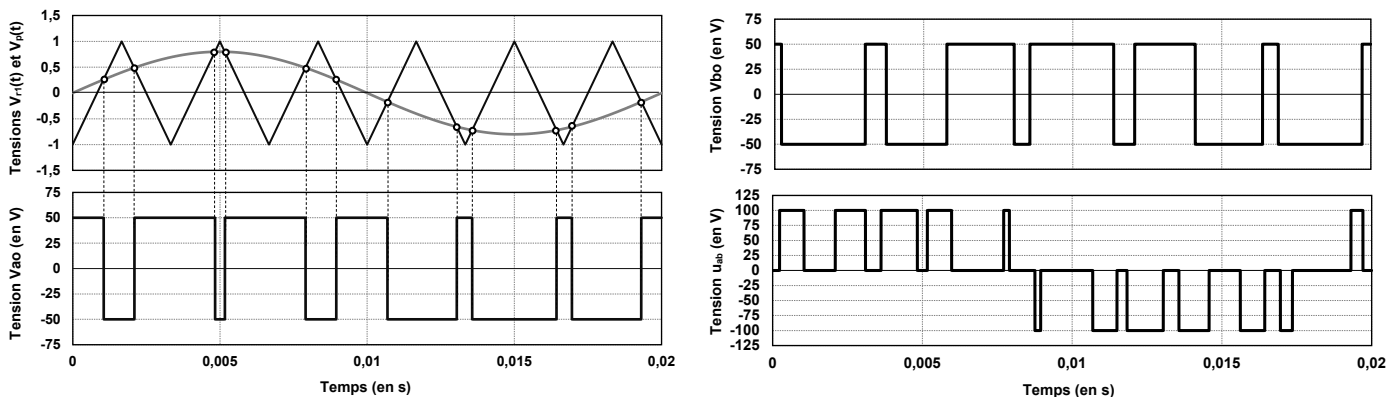


3.2-Allures des tensions entre phase.

Le tableau ci-dessous présente les différents états possibles de la tension de sortie entre phases u_{ab} . Sachant que, d'après le schéma : $u_{ab} = v_{an} - v_{bn} = v_{a0} - v_{b0}$. Dans ce cas, la commande est appliquée aux interrupteurs K1 et K3.

K1	K3	v_{a0}	v_{b0}	u_{ab}
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

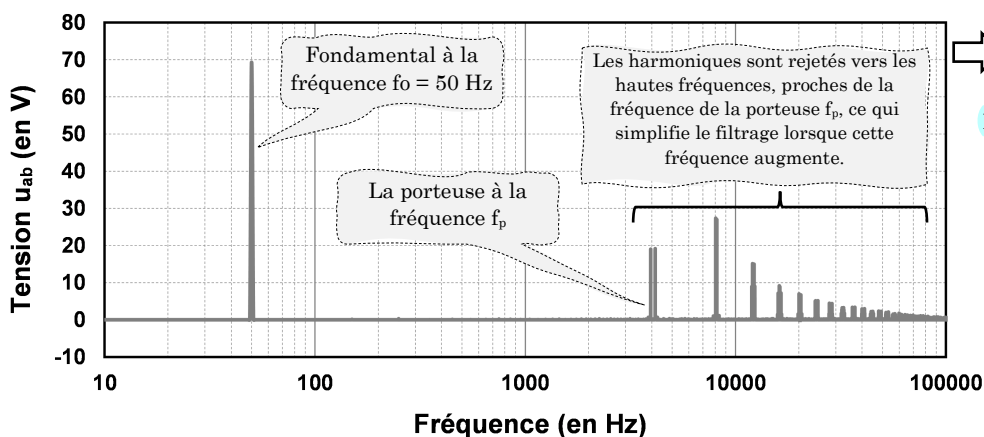
Commande MLI pour $m = 6$ et $r = 0.8$, $f_o = 50\text{Hz}$, $E = 100\text{ V}$:



3.3- Spectre de la tension $u_{12}(t)$

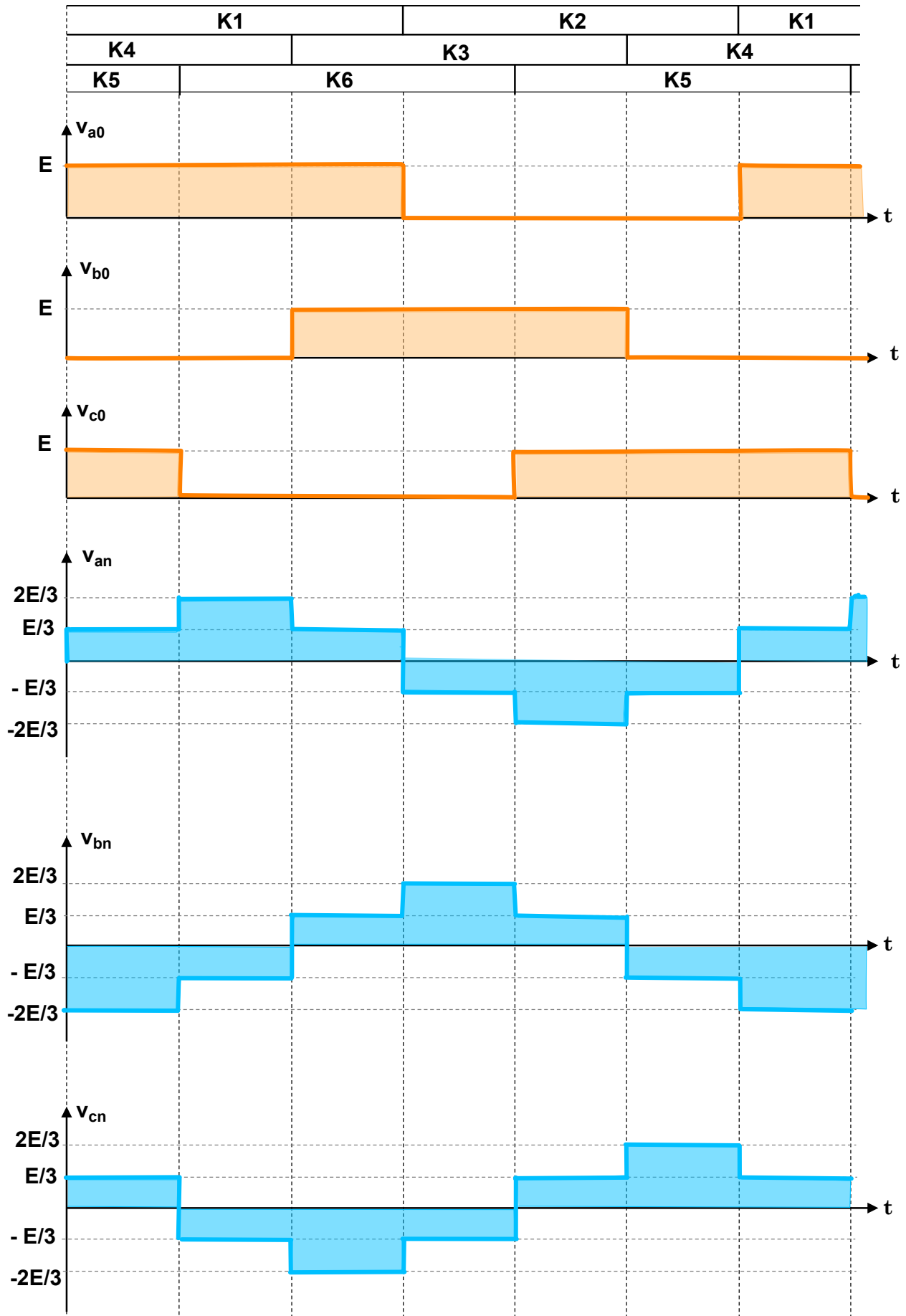
La tension $u_{ab}(t)$ possède une caractéristique impaire et une symétrie glissante. Son expansion en série de Fourier est exprimée comme suit : $u_{ab}(t) = E \frac{r\sqrt{3}}{2} \sin\left(2\pi f_o t + \frac{\pi}{6}\right) + \sum_{n=2}^{\infty} A_n \cos(n 2\pi f_p t)$ avec A_n est l'amplitude des harmoniques.

La figure suivante représente le spectre de la tension $u_{ab}(t)$ avec : $E = 100\text{V}$, $r = 0.8$, $m = 81$ et $f_o = 50\text{ Hz}$.



La fréquence de porteuse :
 $f_p = 4050\text{ Hz}$

Allures de la commande pleine onde (180°)



Références bibliographiques :

- 🔗 **Claude CHEVASSU.** Électronique de puissance (Principes) : cours et problèmes [PDF]. Version 5 décembre 2013. Licence Libre. Disponible sur : <http://mach.elec.free.fr>
- 📖 **Christophe FRANÇOIS,** Les grandes fonctions de la chaîne d'énergie - IUT, BTS, CPGE, FRANCE : Ellipses, 2016
- 📖 **Azan, J.-L., Gyzelinck, J.-C., Le Gall, F., Meunier, J., & Torrus, A. (2015).** Sciences appliquées – BTS électrotechnique
- 🔗 **Piou Michel.** Electronique de puissance (PowerElecPro : Ch3 – Conversion DC-AC(Onduleurs)) [PDF]. France, 2010.