

Chapitre II : Les onduleurs monophasés et triphasés

I. Introduction

Les onduleurs sont des convertisseurs statiques destinés à transformer une tension continue en une tension alternative. Le principe fondamental repose sur la commutation rapide de composants électroniques de puissance tels que les transistors bipolaires (IGBT), MOSFET ou thyristors, afin de synthétiser une tension alternative à partir d'une source continue.

Il existe deux structures duales d'onduleur :

- ***l'onduleur de tension*** relie un générateur de tension continue et un récepteur de courant alternatif ;
- ***l'onduleur de courant*** relie un générateur de courant continu et un récepteur de tension alternative.

Le signal de sortie peut être carré, trapézoïdal ou sinusoïdal selon la technique de modulation utilisée. La forme d'onde idéale est sinusoïdale afin de réduire les harmoniques et d'assurer une compatibilité optimale avec les charges industrielles.

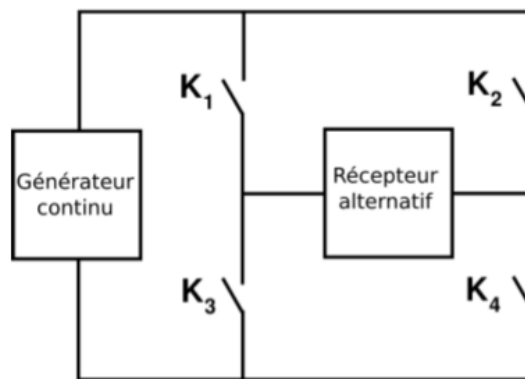


Figure 1 : Structure d'un onduleur en pont

II. Onduleur monophasé

Les onduleurs monophasés sont destinés à alimenter des charges monophasées à partir d'une source de tension continue. Ils peuvent être réalisés en **demi-pont** ou en **pont complet (full bridge)**.

II.1 Onduleur en demi-pont

L'onduleur en demi-pont est réalisé à l'aide de deux interrupteurs K_1 et K_2 et d'un diviseur capacitif. Il permet une commande simple étant donné qu'il n'y a qu'un bras à commander cependant on a seulement accès à la commande bipolaire et on ne peut donc pas faire de commandes plus élaborées.

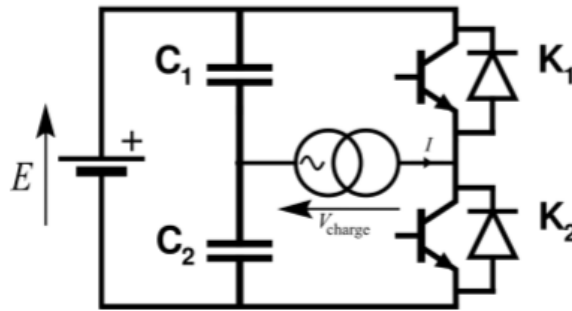


Figure 2 : Schéma de l'onduleur en demi-pont

Chaque commutateur conduit pendant une demi-période et d'une manière complémentaire :

$$K_1 = \overline{K_2}$$

La tension V_{charge} est à valeur moyenne nulle et il n'y a pas de possibilité de réglage de la valeur efficace de V_{eff} .

Dans le cas d'une charge R-L, les signaux sont représentés à la figure suivante :

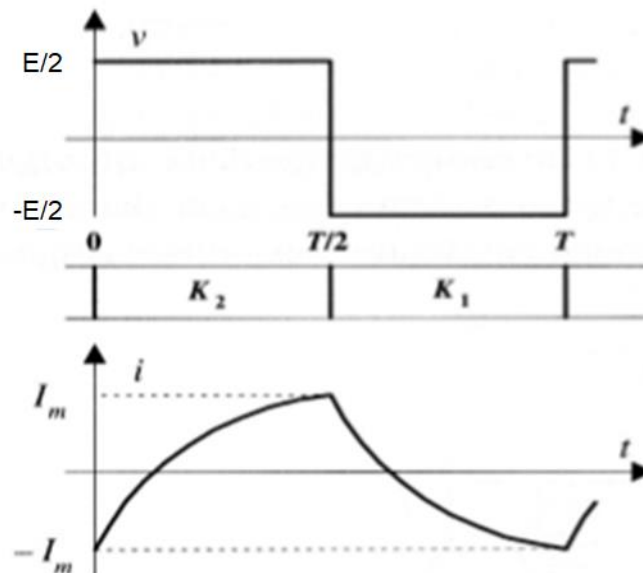


Figure 3 : Tension et courant de l'onduleur en demi-pont.

II.2 Onduleur en pont complet

L'onduleur en pont complet se compose de quatre interrupteurs électroniques (IGBT ou MOSFET) disposés en pont de Graetz. Les diagonales opposées sont commandées simultanément pour inverser la polarité de la tension appliquée à la charge.

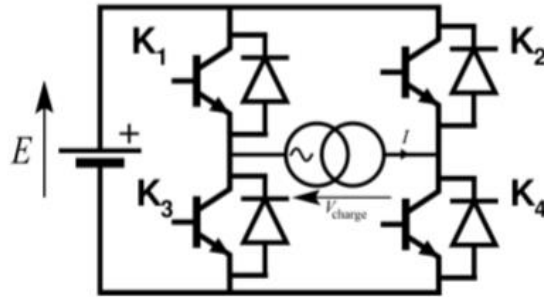


Figure 4 : Schéma de l'onduleur en pont complet

Dans ce cas il y a plusieurs manières de commandées les quatre interrupteurs comme :

- la commande symétrique ou pleine onde
- La commande décalée
- La commande MLI

II.2.1 Commande symétrique

Les deux interrupteurs K_1 et K_4 sont commandés simultanément pendant la première demi-période, puis les deux interrupteurs K_2 et K_3 pendant la deuxième demi-période,

Lorsque les interrupteurs K_1 et K_4 sont fermés, la tension de sortie est $+E$.

Lorsque K_2 et K_3 sont fermés, la tension de sortie est $-E$.

- Ondulation du courant

- Quand K1 et K4 sont fermés, K2 et K3 sont ouverts, pour $t = \left[0, \frac{T}{2}\right]$:

$$U_{ch} = +E$$

$$R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} = E,$$

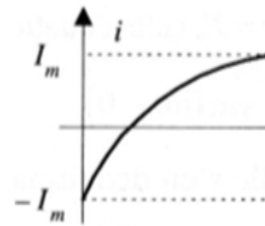
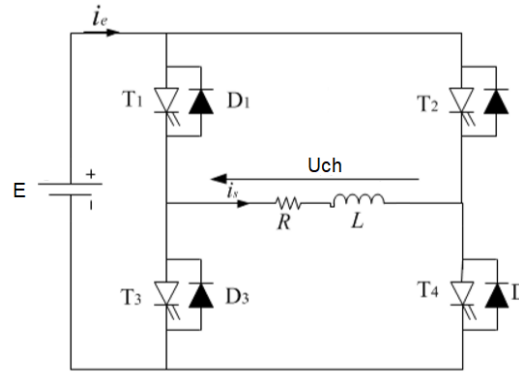
$$i_{ch}(t) = (I_0 - I_\infty)e^{-t/\tau} + I_\infty = \left(I_{min} - \frac{E}{R}\right)e^{-t/\tau} + \frac{E}{R}$$

Où I_0 : Le courant initial,

I_∞ : Le courant final.

Si $i(t)$ positif passe par T₁ et T₄,

Si $i(t)$ négatif passe par D₁ et D₄,



- Quand K2 et K3 sont fermés, K1 et K4 sont ouverts, pour $t = \left[\frac{T}{2}, T\right]$:

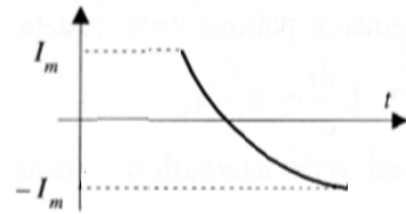
$$U_{ch} = -E,$$

$$R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} = -E,$$

$$i_{ch}(t) = \left(I_{max} + \frac{E}{R}\right)e^{-(t-\frac{T}{2})/\tau} - \frac{E}{R}$$

Si $i(t)$ positif passe par D₂ et D₃,

Si $i(t)$ négatif passe par T₂ et T₃,



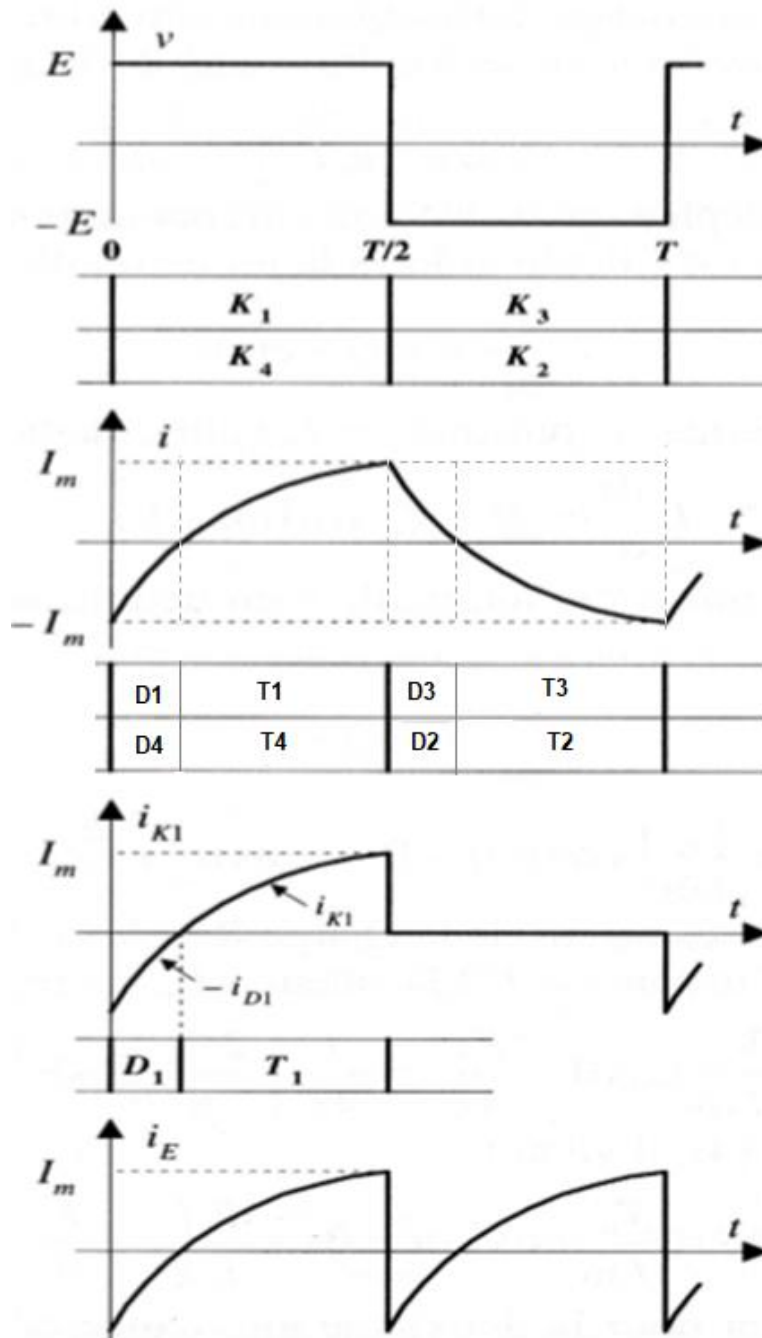
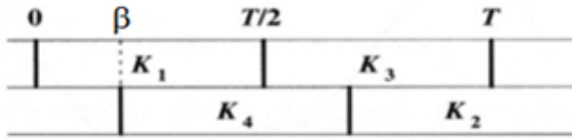


Figure 5 : Tension et courant avec la commande symétrique.

II.2.2 Commande décalée

La commande décalée consiste à commander les 2 bras par des créniaux complémentaires mais cette fois-ci décalés d'une durée β comprise entre 0 et $T/2$ (ou d'un angle β entre 0 et π).

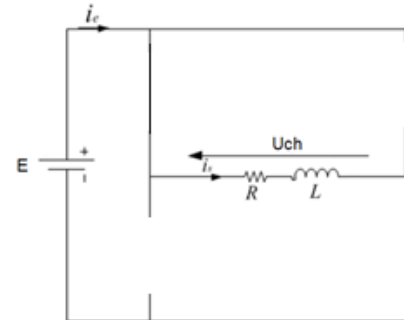


➤ Pour $0 < t < \beta$

K1 et K2 sont ON,

K3 et K4 sont OFF

$$U_{ch} = 0$$

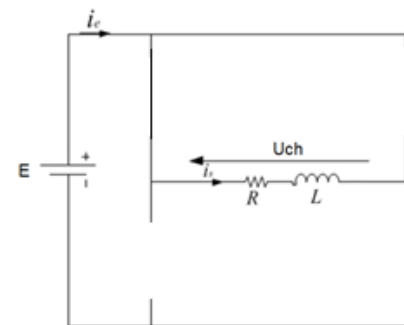


➤ Pour $\beta < t < T/2$

K1 et K4 sont ON,

K2 et K3 sont OFF

$$U_{ch} = +E$$

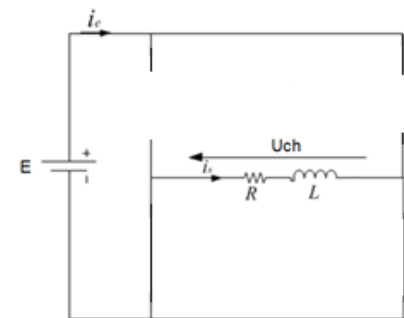


➤ Pour $T/2 < t < T/2 + \beta$

K3 et K4 sont ON,

K1 et K2 sont OFF

$$U_{ch} = 0$$

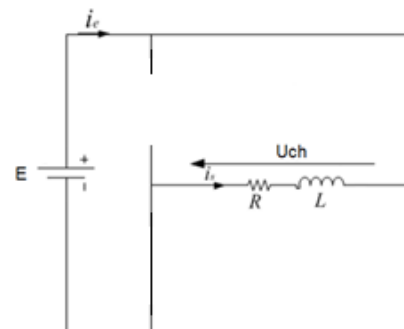


➤ Pour $T/2 + \beta < t < T$

K2 et K3 sont ON,

K1 et K4 sont OFF

$$U_{ch} = -E$$



Ondulation du courant

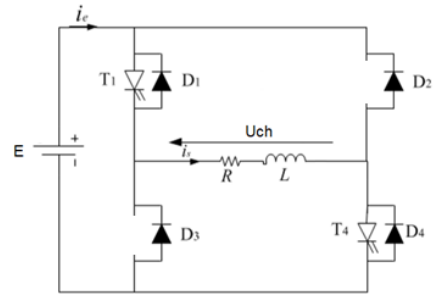
➤ Pour $\beta < t < T/2$

K1 et K4 = ON, K2 et K3 = OFF

$$R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} = +E, \quad i_{ch}(t) = \left(I_0 - \frac{E}{R}\right) e^{-(t-\beta)/\tau} + \frac{E}{R}$$

Si $i_{ch}(t)$ positif passe par T1 et T4,

Si $i_{ch}(t)$ négatif passe par D1 et D4,



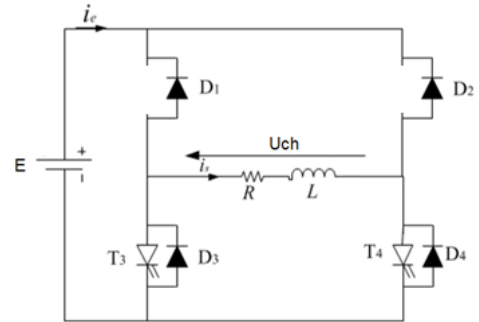
➤ Pour $T/2 < t < T/2 + \beta$

K3 et K4 = ON, K1 et K2 = OFF

$$R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} = 0, \quad i_{ch}(t) = I_0 e^{-(t-T/2)/\tau}$$

Si $i_{ch}(t)$ positif passe par D3 et T4,

Si $i_{ch}(t)$ négatif passe par T3 et D4.



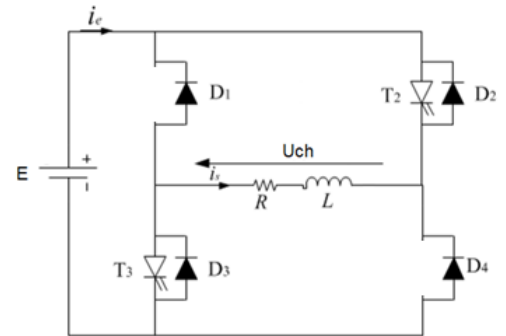
➤ Pour $T/2 + \beta < t < T$

K2 et K3 = ON, K1 et K4 = OFF

$$R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} = -E, \quad i_{ch}(t) = \left(I_0 + \frac{E}{R}\right) e^{-(t-(T/2+\beta))/\tau} - \frac{E}{R}$$

Si $i_{ch}(t)$ positif passe par D2 et D3,

Si $i_{ch}(t)$ négatif passe par T2 et T3.



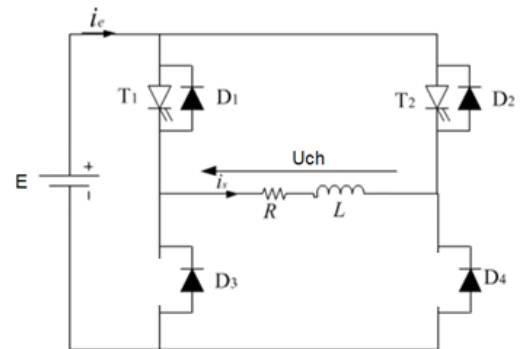
➤ Pour $0 < t < \beta$

K1 et K2 = ON, K3 et K4 = OFF

$$R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} = 0, \quad i_{ch}(t) = I_0 e^{-t/\tau}$$

Si $i_{ch}(t)$ négatif, il passe par T2 et D1,

Si $i_{ch}(t)$ positif passe par T1 et D2.



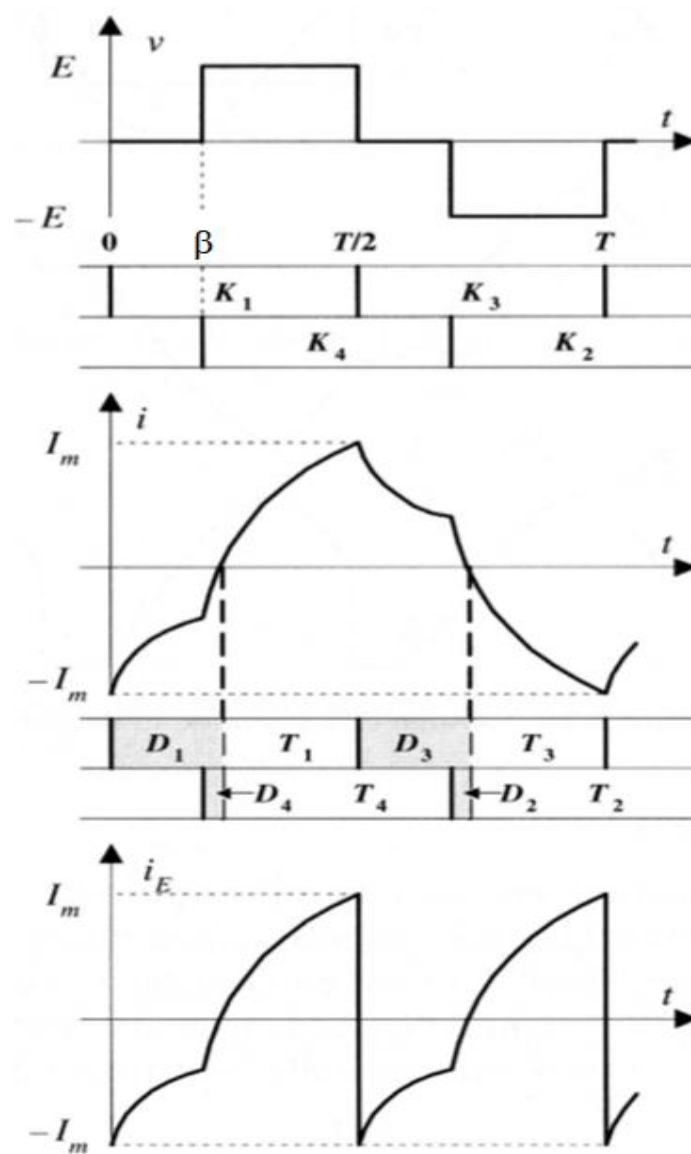


Figure 6 : Tension et courant avec la commande décalée.

Rappel sur les séries de Fourier

Soit $f : [0, 2\pi]$ (périodique). f est continue ou continue par morceaux.

1) Coefficient de Fourier exponentielle :

La suite $(C_n(f))_{n \in \mathbb{Z}}$,

$$C_n(f) = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \cdot e^{-jnt} dt$$

2) Coefficients trigonométriques :

Les suites $(a_n(f))_{n \geq 0}$ et $(b_n(f))_{n \geq 1}$ sont définies par :

$$a_0(f) = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$$

$$a_n(f) = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \cos(nt) dt$$

$$b_n(f) = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \sin(nt) dt$$

Remarques :

- Si f est paire $\rightarrow b_n(f) = 0$
- Si f est impaire $\rightarrow a(f) = 0$ et $a_0(f) = 0$

3) Série de Fourier de f :

$$S(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_n(f) e^{j n t}$$

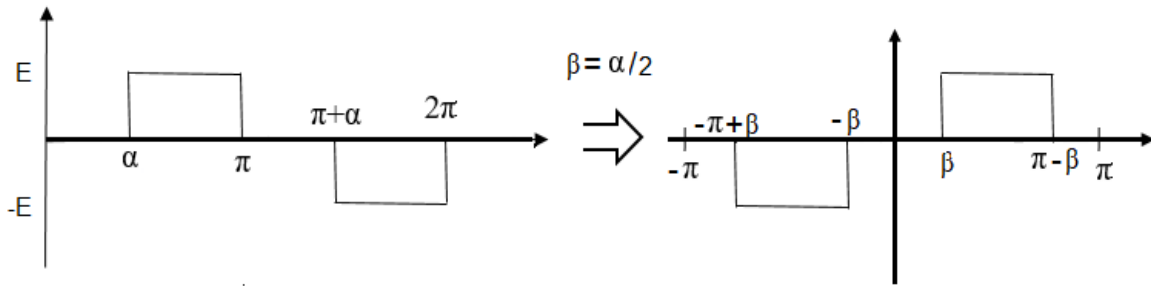
$$S_f(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_n(f) \cdot e^{jnt}$$

Où

$$S_f(t) = a_0(f) + \sum_{n \geq 1} a_n(f) \cdot \cos(nt) + b_n(f) \cdot \sin(nt)$$

Développement en série de Fourier d'un signal périodique impair

Le signal représenté est une fonction périodique $f(\theta)$ de période 2π , de valeurs $+E$ et $-E$ sur des intervalles définis. On pose $\beta = \alpha / 2$.



$$f(\theta) = \begin{cases} 0 & \text{pour } -\pi < \theta < -\pi + \beta \\ -E & \text{pour } -\pi + \beta < \theta < -\beta \\ 0 & \text{pour } -\beta < \theta < \beta \\ E & \text{pour } \beta < \theta < \pi - \beta \\ 0 & \text{pour } \pi - \beta < \theta < \pi \end{cases}$$

Série de Fourier : Comme f est impaire, seuls les coefficients sinusoidaux existent :

$$S_f(\theta) = \sum_{n \geq 1} b_n(f) \cdot \sin(n\theta)$$

Calcul du coefficient b_n :

$$\begin{aligned} b_n &= \frac{2}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\theta) \cdot \sin(n\theta) d\theta \\ &= \frac{2}{2\pi} \int_{-\pi+\beta}^{-\beta} -E \cdot \sin(n\theta) d\theta + \frac{2}{2\pi} \int_{\beta}^{\pi-\beta} E \cdot \sin(n\theta) d\theta \\ &= -\frac{E}{\pi} \int_{-\pi+\beta}^{-\beta} \sin(n\theta) d\theta + \frac{E}{2\pi} \int_{\beta}^{\pi-\beta} \sin(n\theta) d\theta \\ &= \frac{E}{n\pi} [\cos(n(-\beta)) - \cos(n(-\pi + \beta)) + \cos(n(\beta)) - \cos(n(\pi - \beta))] \\ &= \frac{E}{n\pi} [\cos(n(\beta)) + \cos(n(\beta)) - \cos(n(\pi - \beta)) - \cos(n(\pi - \beta))] \\ &= \frac{E}{n\pi} [2 \cdot \cos(n(\beta)) - 2 \cdot \cos(n(\pi - \beta))] \end{aligned}$$

Pour les valeurs paires de n : $b_n = 0$

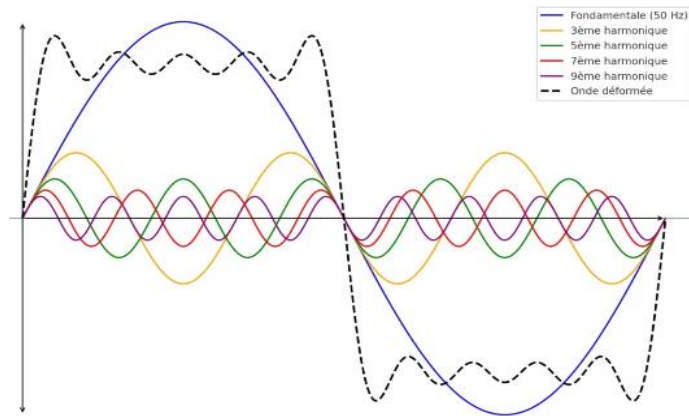
Pour les valeurs impaires : $b_n = \frac{4E}{n\pi} [\cos(n\beta)] = \frac{4E}{(2k+1)\pi} [\cos((2k+1)\beta)]$, $k \geq 0$

Finalement on obtient :

$$S_f(\theta) = \sum_{k \geq 0} \frac{4E}{(2k+1)\pi} \cdot \cos(2k+1) \frac{\alpha}{2} \cdot \sin((2k+1)\theta)$$

Le signal de sortie est égal à la somme de plusieurs sinusoïdes, que l'on appelle *les harmoniques*.

Pour alimenter une machine, seul le fondamental est utilisé, tandis que les autres harmoniques constituent des pertes potentielles.



Si $\alpha = 60^\circ = \frac{\pi}{3}$:

- Pour $k=0$ ($n=1$) (le fondamental)

$$Amp = \frac{4E}{\pi} \cdot \cos \frac{\alpha}{2} = \frac{4E}{\pi} \cdot \cos \frac{60}{2} = \frac{4E}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$$

- Pour $k=1$ ($n=3$)

$$Amp = \frac{4E}{3\pi} \cdot \cos \frac{3\alpha}{2} = \frac{4E}{3\pi} \cdot \cos \frac{3 \cdot 60}{2} = 0$$

- Pour $k=2$ ($n=5$)

$$Amp = \frac{4E}{5\pi} \cdot \cos \frac{5\alpha}{2} = \frac{4E}{5\pi} \cdot \cos \frac{5 \cdot 60}{2} = \frac{4E}{5\pi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$$

- Pour $k=3$ ($n=7$)

$$Amp = \frac{4E}{7\pi} \cdot \cos \frac{7\alpha}{2} = \frac{4E}{7\pi} \cdot \cos \frac{7.60}{2} = \frac{4E}{7\pi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$$

- Pour k=4 (n=9)

$$Amp = \frac{4E}{9\pi} \cdot \cos \frac{9\alpha}{2} = \frac{4E}{9\pi} \cdot \cos \frac{9.60}{2} = 0$$

- Pour k=5 (n=11)

$$Amp = \frac{4E}{11\pi} \cdot \cos \frac{11\alpha}{2} = \frac{4E}{11\pi} \cdot \cos \frac{11.60}{2} = \frac{4E}{11\pi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$$

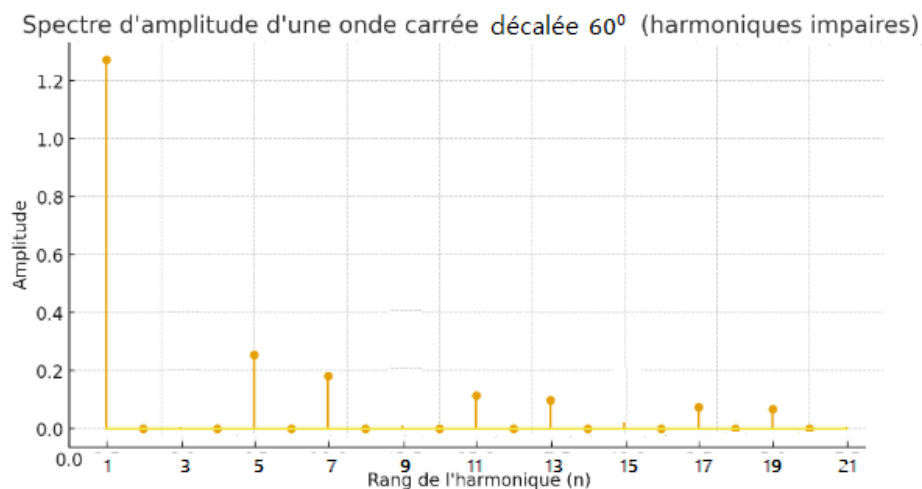
Spectre des amplitudes de la tension u(t):

Le spectre présente uniquement les harmoniques impaires : 1, 5, 7, 11, 13, 17...

Amplitude des harmoniques :

$$Amp = \frac{4E}{n\pi} \cdot \cos \frac{n\alpha}{2}$$

Ce spectre permet de quantifier les pertes de la valeur efficace dues aux harmoniques.



Taux de Distorsion Harmonique (Total Harmonic Distortion THD) :

Le **taux de distorsion** est le rapport entre l'énergie des **harmoniques** et l'énergie de la **composante fondamentale** du signal.

Il indique donc la proportion de « déformation » ajoutée au signal initial.

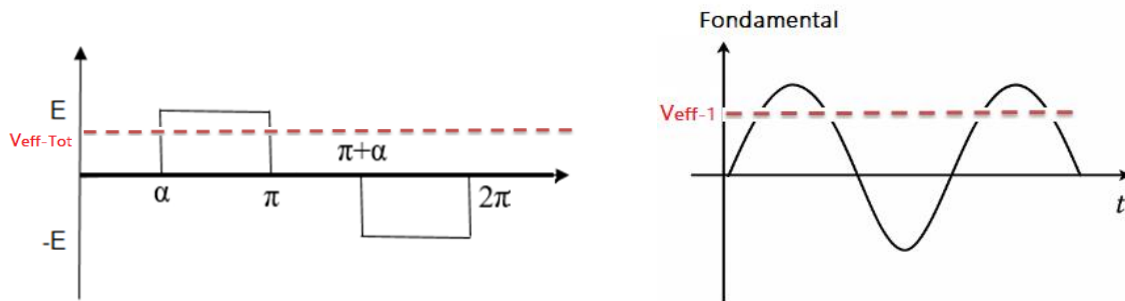
- THD = 0 % → signal parfait (pure sinusoïde)
- THD élevé → signal très déformé

$$THD = \frac{V_{\text{eff de toutes les harmoniques}}}{V_{\text{eff du fondamental}}}$$

Soit :

$$THD = \frac{\sqrt{V_{eff-2}^2 + V_{eff-3}^2 + V_{eff-4}^2 \dots \dots \dots}}{\sqrt{V_{eff-1}^2}} = \frac{\sqrt{V_{eff-Totale}^2 - V_{eff-1}^2}}{\sqrt{V_{eff-1}^2}}$$

Tension efficace totale est la tension efficace de signal étudié :



$$V_{eff-Totale}^2 = \frac{1}{2\pi} \left(\int_0^\alpha 0 + \int_\alpha^\pi E^2 + \int_\pi^{\pi+\alpha} 0 + \int_{\pi+\alpha}^{2\pi} (-E)^2 \right)$$

Ce qui nous donne :

$$V_{eff-Totale}^2 = \frac{E^2(\pi - \alpha)}{2\pi}$$

Et la tension efficace du fondamental est donnée par :

$$V_{eff-1}^2 = \frac{V_{max}^2}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{4E}{\pi} \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \right)^2 = \frac{8E^2}{\pi^2} \left(\cos \frac{\alpha}{2} \right)^2$$

$$THD = \sqrt{\frac{\pi(\pi - \alpha) - 8 \left(\cos \frac{\alpha}{2} \right)^2}{8 \left(\cos \frac{\alpha}{2} \right)^2}}$$

Pour $\alpha = \frac{\pi}{3}$, le TDH est minimal car l'harmonique de rang 3 est nul.

