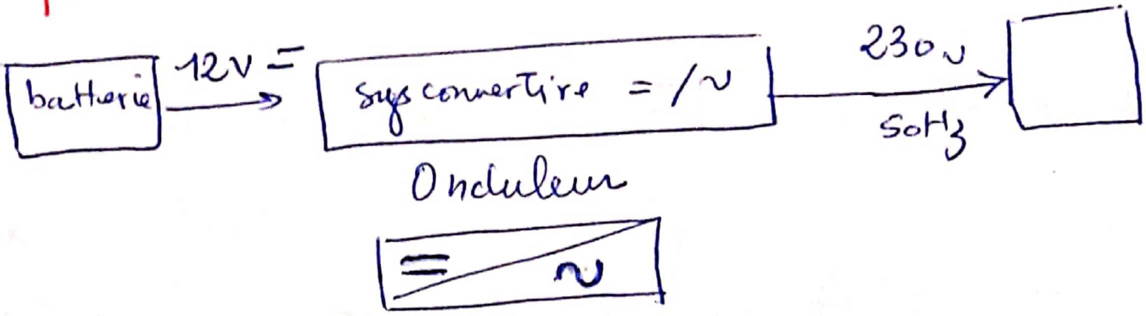
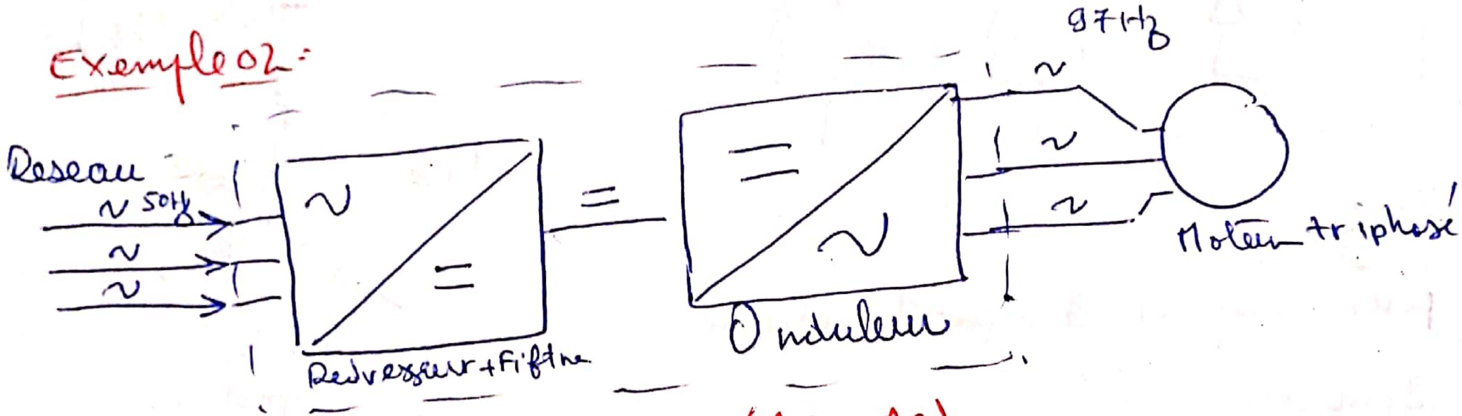
Les onduleurs :

Exemple 01 :



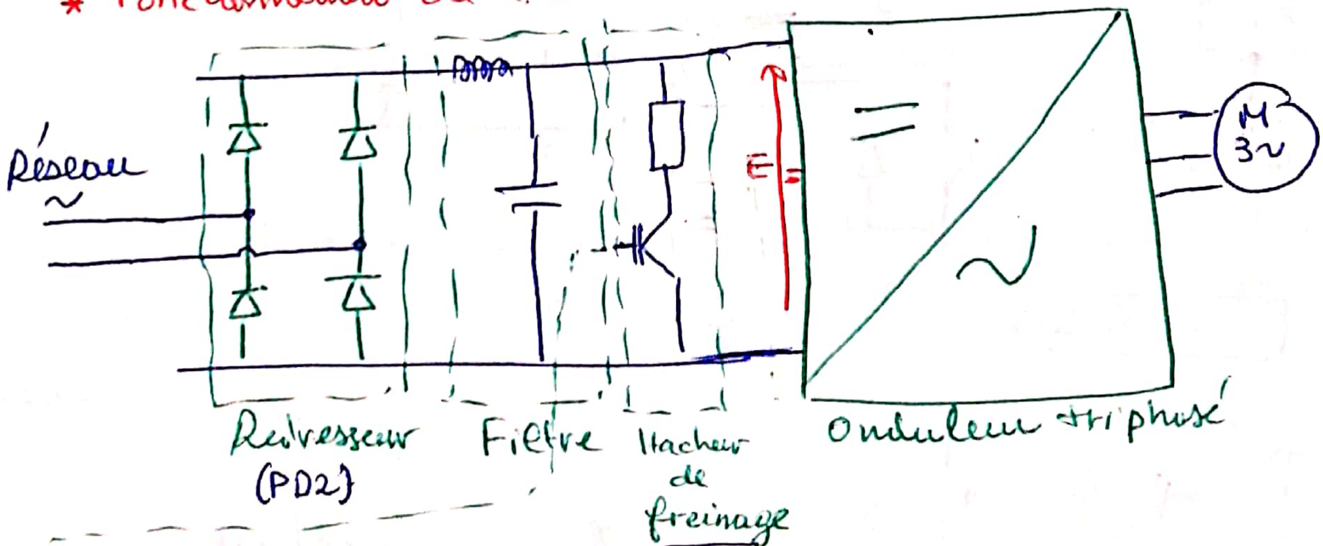
Onduleur est un convertisseur DC → AC.

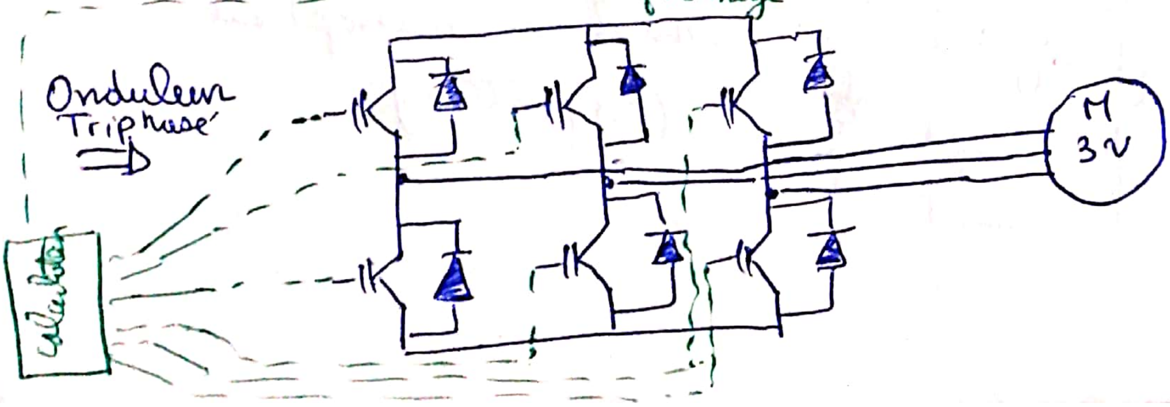
Exemple 02 :



Sys ~ → ~. (AC – AC)

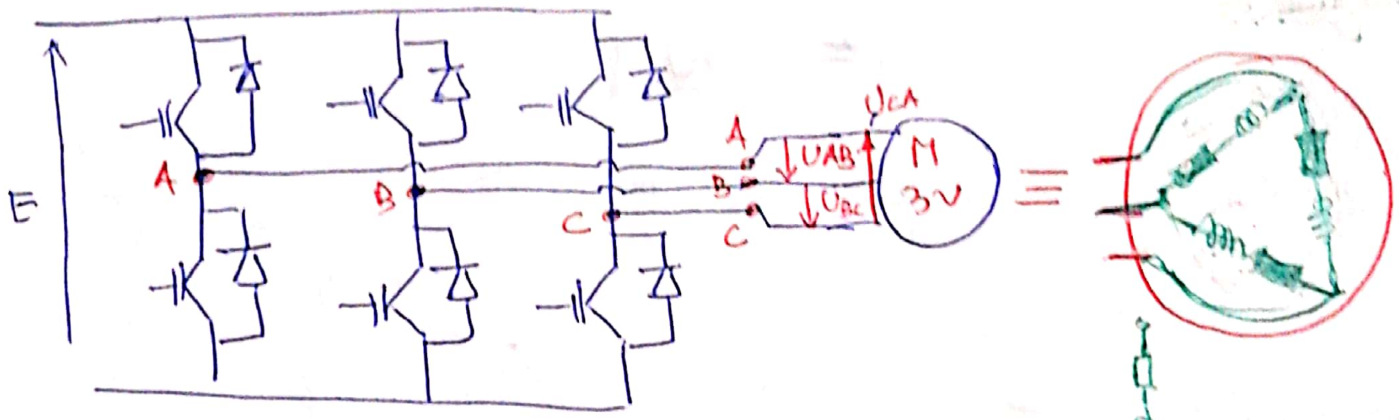
* Fonctionnement de l'onduleur :

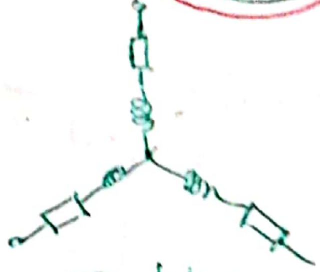




Donc la structure de l'onduleur est composé de trois bras, chacun comporte deux interrupteurs commandés par le calculateur.

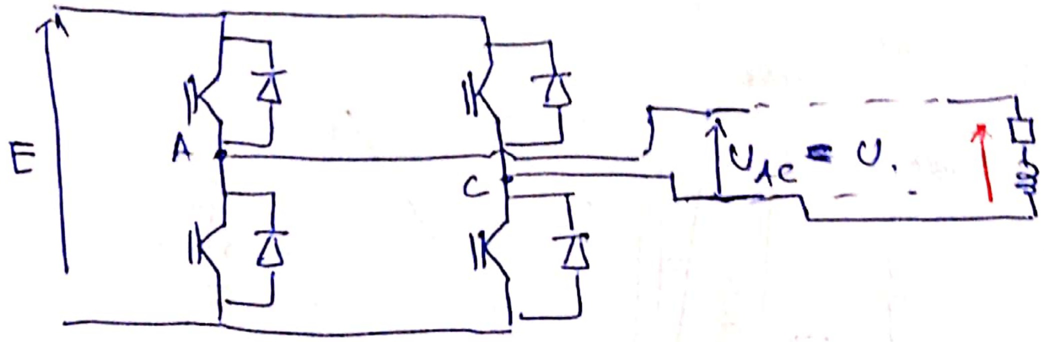
Etude de fonctionnement :

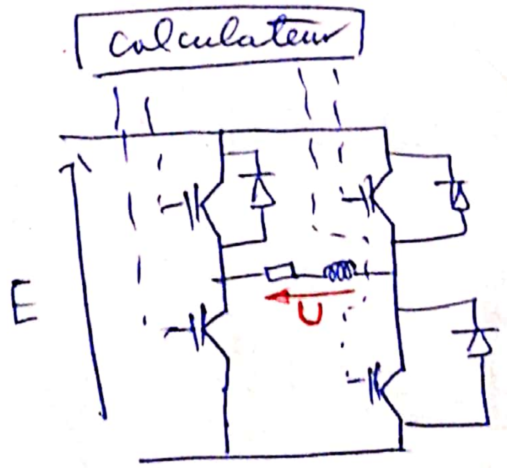




machine asynchrone

pour simplifier, on peut étudier 2 par 2 :





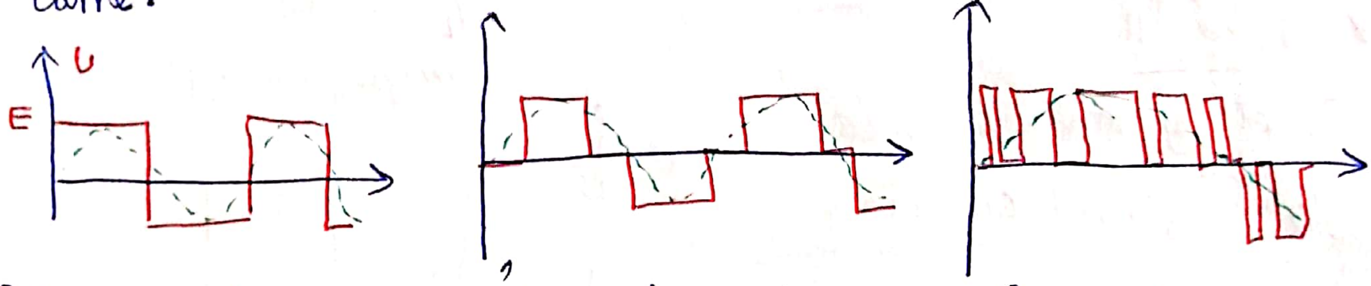
onduleur monophasé (en pont H).

ses 4 interrupteurs sont composés d'une transistor et d'une diode en anti parallèle et ils sont commandés par un calculateur.

il y'a plusieurs manière de commandés des interrupteur comme :

- La commande symétrique
- La commande décalée
- La commande MLI.

Chacune de ces lois de commande va donné des tensions de sortie différente mais que'il auront tout un signal carré.

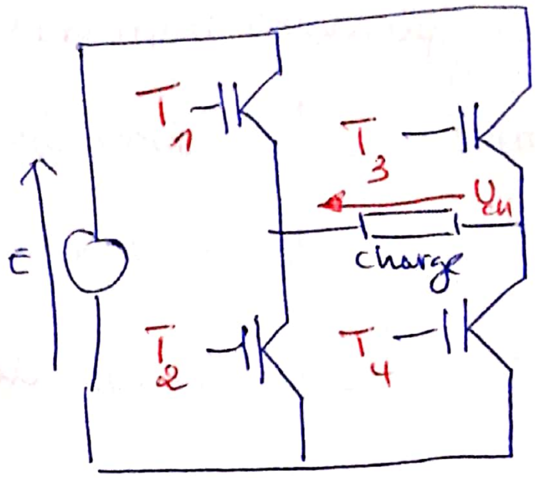


ils sont rélativement éloigné de sinus parfait dont nous aurions besion pour pour alimenter notre machine.

elles vont donc tout présenté des harmoniques de plus ou mois grande en amplitude et a de plus ou mois grande en fréquence....

1- La commande symétrique :

Les interrupteurs sont commandés en même temps deux par deux, c.à.d, T_1 et T_4 en même temps sur une demi-période, puis on commande T_2 et T_3 sur la deuxième demi-période.

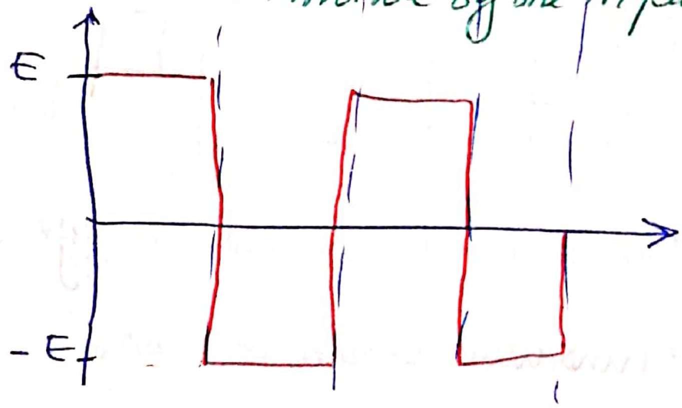


→ Quel est la tension de sortie : U_{ch}

T_1	T_2	T_1	T_2
T_4	T_3	T_4	T_3

$T/2$ T

- Commande symétrique -



* $0 < t < T/2$:

T_1 et T_4 sont fermés et T_2 et T_3 sont ouverts.

$U = E$

* $0 < t < T/2$:

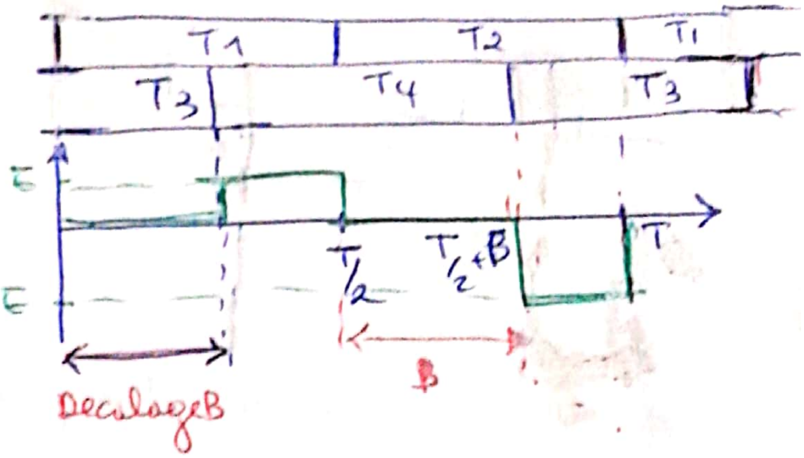
T_1 et T_4 sont ouverts
T_2 et T_3 sont fermés :

$U = -E$

- La commande décalée :

Les interrupteurs T_4 et T_3 sont décalés par rapport à celle du T_1 et T_2.

$T_1 = \overline{T_2}$ et $T_3 = \overline{T_4}$

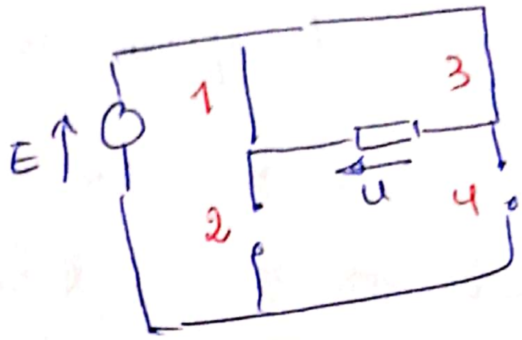


* $0 < t < B$

$T_1 = ON$ $T_3 = ON$

$T_2 = OFF$ $T_4 = OFF$

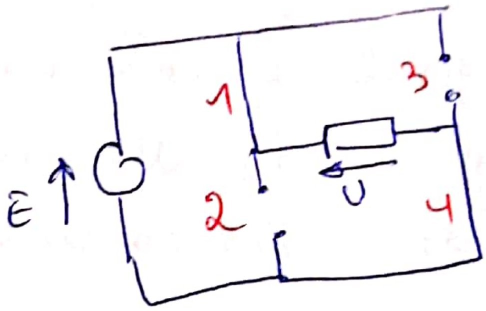
$\boxed{U = 0}$



* $B < t < T/2$:

$T_1 = ON$, $T_3 = OFF$

$T_2 = OFF$, $T_4 = ON$

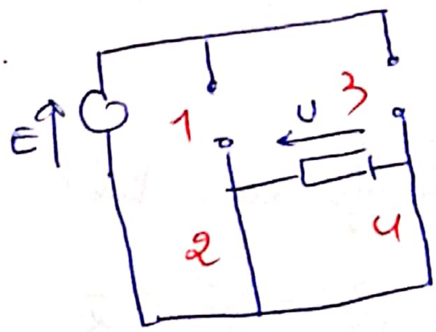


$U = E$

* $T/2 < t < T/2 + B$

$T_1 = OFF$, $T_3 = OFF$

$T_2 = ON$, $T_4 = ON$



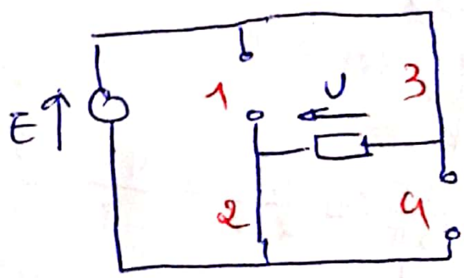
$U = 0$

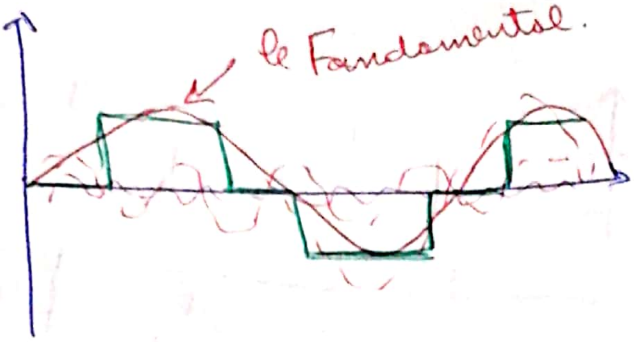
* $T/2 + B < t < T$:

$T_1 = OFF$ $T_3 = ON$.

$T_2 = ON$ $T_4 = OFF$

$U = -E$





$\Rightarrow \sum \sin.$

* Se singul de sortie st equal a la somme de plusieurs sinus, que'il sont appelés les harmoniques.

pour alimenté une machime triphasé seul le fondamental st utilsé, et les autre harmoniques consituent des pertes potentielles.

donc le signal de sortie peut être décomposé en une série de fourier; cette série de fourier représente la somme de chaque harmonique:

$$\Rightarrow U(t) = \sum_{k \geq 1} \underbrace{\frac{4.E}{k\pi} \cos\left(\frac{k.\beta}{2}\right)}_{\text{l'Amplitude}} . \sin(k\omega t)$$

" k est impair

ondulation

Si $\beta = 60° = \frac{\pi}{3}$.

* pour $k=1$ (le fondamental).

$$Amp = \frac{4E}{\pi} \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) = \frac{4E}{\pi} \cos\frac{60}{2} = \frac{4E}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$$

* pour $k=3$:

$$Amp = \frac{4E}{3\pi} \cos \frac{3.\pi}{2.3} = 0.$$

* pour $k=5$:

$$Amp = \frac{4E}{5\pi} \cos \frac{5\pi}{2.3} = \frac{4E}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$$

* pour $k=7$:

$$Amp = \frac{4E}{7\pi} . \cos \frac{7\pi}{2.3} = \frac{4E}{7\pi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$$

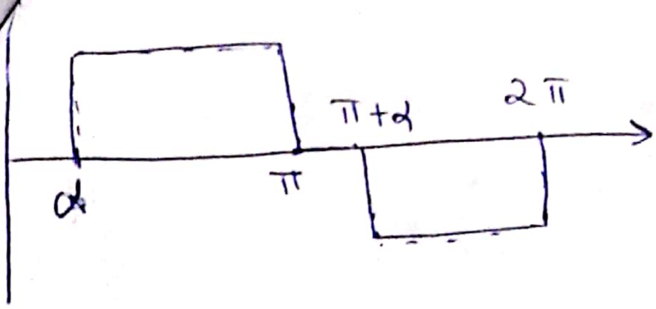
* pour $k=9$:

$$Amp = \frac{4E}{9\pi} . \cos\left(\frac{9\pi}{2.3}\right) = 0$$

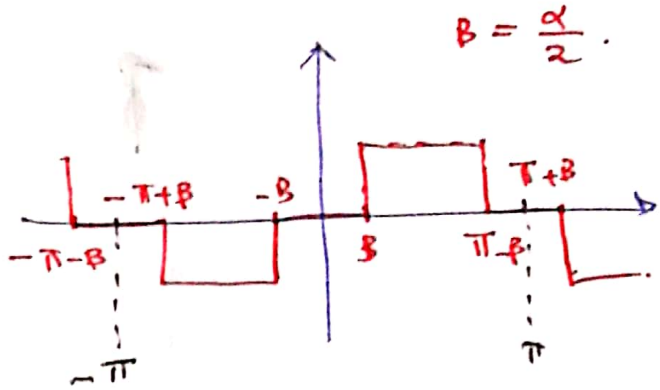
* pour $k=11$:

$$Amp = \frac{4E}{11\pi} . \cos \frac{11.\pi}{2.3} = \frac{4E}{11\pi} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}$$

⋮
etc



$\Rightarrow$



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

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

puisque f est impaire.

$$b_n = \frac{2}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(\theta) \cdot \sin(n\theta) \cdot d\theta = \frac{2}{2\pi}\int_{-\pi+\beta}^{-\beta} -E \sin(n\theta)\, d\theta + \int_{\beta}^{\pi-\beta} E \sin(n\theta)\, d\theta$$

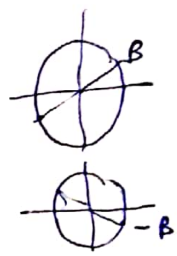
$$= \frac{E}{\pi}\left[\int_{-\pi+\beta}^{-\beta} -\sin n\theta \cdot d\theta + \int_{\beta}^{\pi-\beta} \sin n\theta \cdot d\theta\right] = \frac{E}{\pi}\left(\left[\frac{\cos n\theta}{n}\right]_{-\pi+\beta}^{-\beta} + \left[-\frac{\cos n\theta}{n}\right]_{\beta}^{\pi-\beta}\right)$$

$$= \frac{E}{n\pi}\left[\cos n(-\beta) - \cos n(-\pi+\beta) + \cos(n\beta) - \cos n(\pi-\beta)\right]$$

$$= \frac{E}{n\pi}\left[\cos n\beta - (\mp\cos n\beta) + \cos n\beta - (\mp \cos n\beta)\right]$$

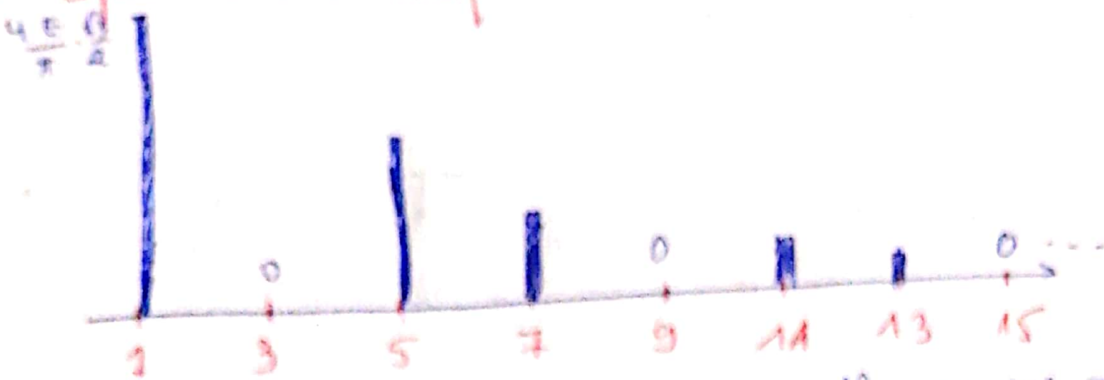
$\begin{cases} + \text{ paire} \\ - \text{ impaire} \end{cases}$ $$= \frac{E}{(2k+1)\pi}\left[4\cos(2k+1)\beta\right]$$

les paires $= 0$.



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

Spectre des amplitude de la tension U :



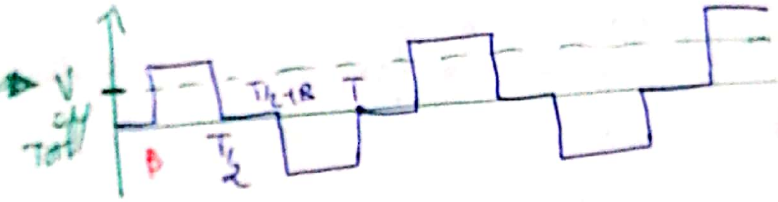
Afin de quantifier les pertes de la valeur efficace due aux harmoniques on utilise un critère appelé le Taux de distorsion harmonique

Le Taux de Distorsion Harmonique "TDH" :

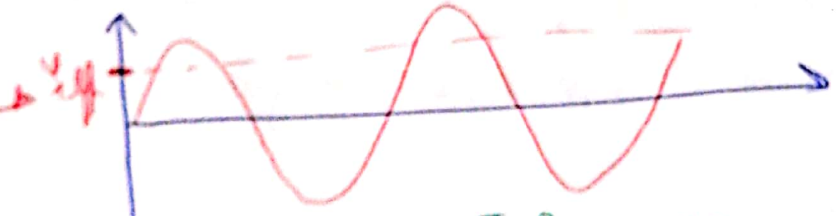
$$TDH = \frac{V_{eff} \text{ de toutes les harmoniques}}{V_{eff} \text{ du fondamental}}$$

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

$V_{eff\,tot} \rightsquigarrow V_{eff\,TOT}$



$V_{eff_1} \rightsquigarrow V_{1eff}$



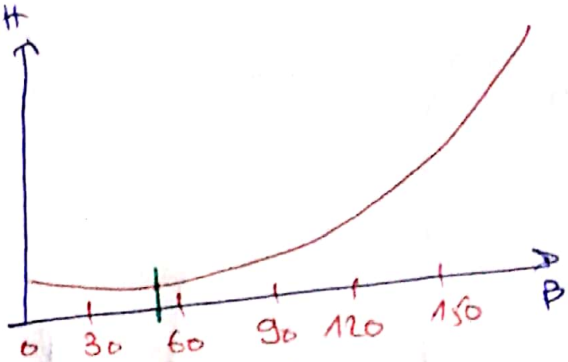
$$V_{eff\,TOT}^2 = \frac{1}{2\pi}\int_0^{\beta} 0^2\, d\theta + \int_{\beta}^{\pi} E^2\, d\theta + \int_{\pi}^{\pi+\beta} 0\, d\theta + \int_{\pi+\beta}^{2\pi} (-E)^2\, d\theta$$

$$= \frac{1}{2\pi}\cdot\left[E^2\cdot\theta\right]_{\beta}^{\pi} + \left[E^2\cdot\theta\right]_{\pi+\beta}^{2\pi} = \frac{1}{2\pi}\left[E^2(\pi-\beta) + E^2(2\pi-\pi-\beta)\right]$$

$$= \frac{E^2}{2\pi}(\pi-\beta+\pi-\beta) = \frac{E^2(2\pi-2\beta)}{2\pi} = \frac{E^2\cdot(\pi-\beta)}{2\pi}$$

$$V_{1\,eff}^2 = \frac{V_m^2}{2} = \left(\frac{4E}{\pi}\cdot\cos\frac{\beta}{2}\right)^2\cdot\frac{1}{2} = \frac{8E^2\cdot\cos^2\frac{\beta}{2}}{\pi}$$

$$TDH = \sqrt{\frac{\pi(\pi-\beta) - 8\cos^2\frac{\beta}{2}}{8\cos^2 \beta/2}}$$



TDH est au minimum si $\beta \simeq 60°$

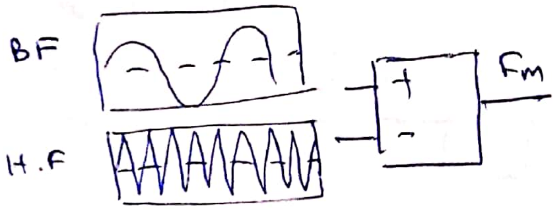
donc $\beta° = 60°$ → annuler l'harmonique de rang 3
→ obtenir TDH minimal.

3 - La Commande MLI (Modulation de Largeur d'Impulsions)

→ La Commande Analogique :

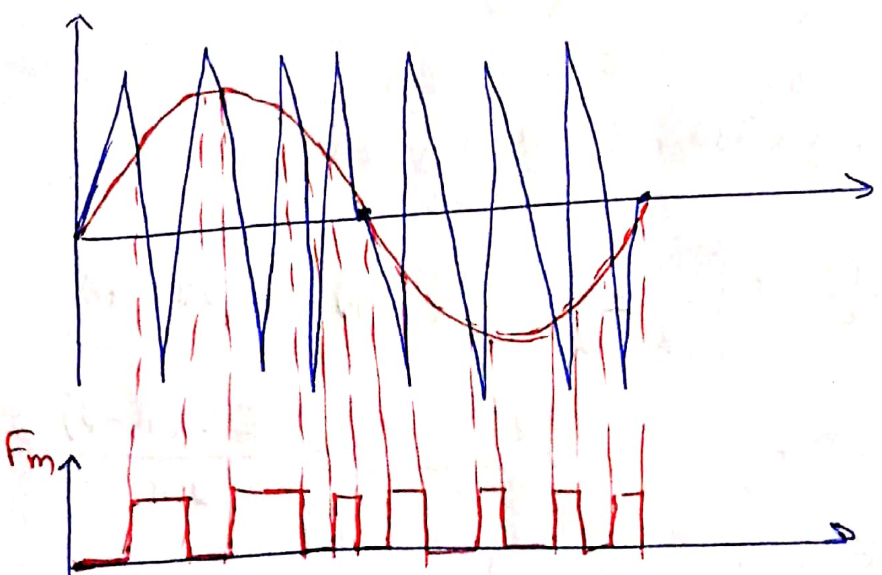
On a deux signal pour générer la commande des interrupteur :

- une tension modulante sinusoïdale à basse fréquence
- " " triangulaire à haute fréquence : la porteuse.



la fonction de modulation → 1 / → 0

afin de déterminer la forme de Fm, on va superposé la tension modulante sinus à la porteuse triangulaire :

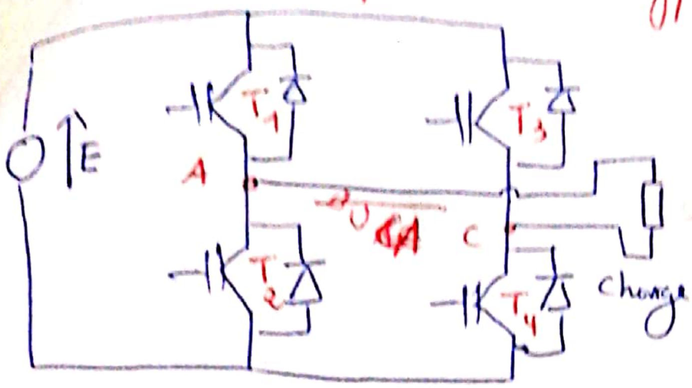


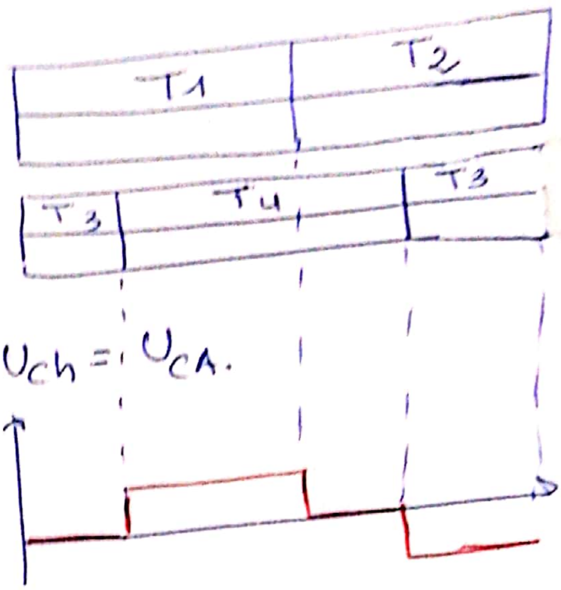
et on va commandé les transistor :

$F_m = T_1$ et T_4

$\overline{F_m} = T_2$ et T_3

ommonde Complementaire type 180°:

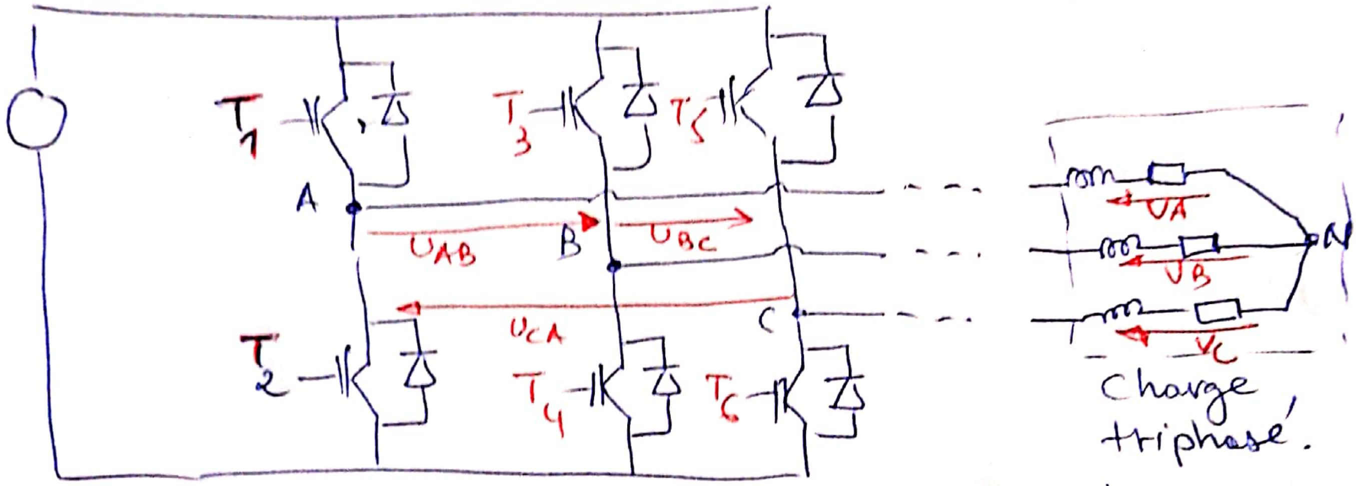


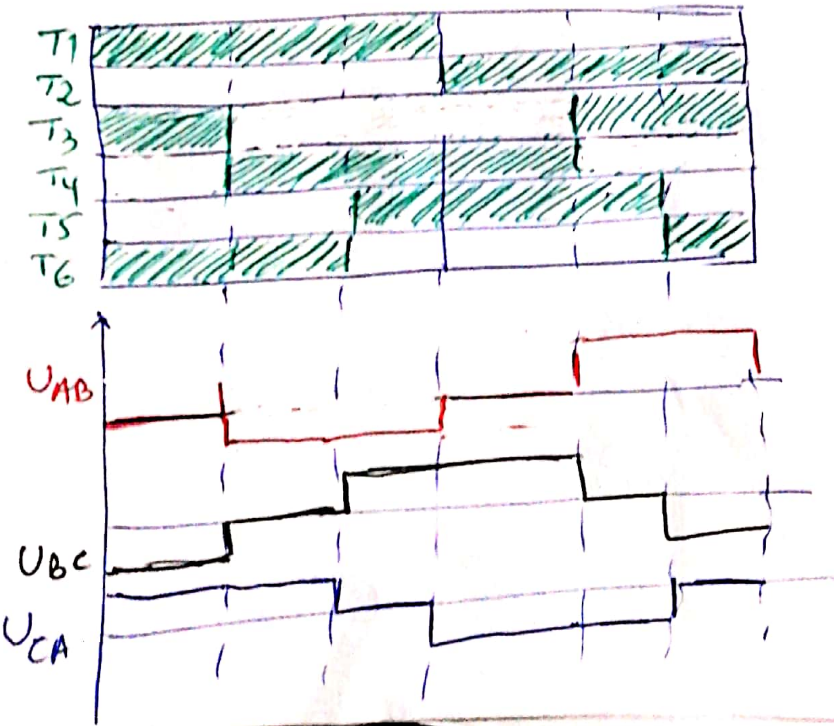


$U_{ch} = U_{CA}$.

On reprend l'exemple de la Commonde décalé:

- pour etudier l'onduleur triphasé il suffit de rajouter la troisième branche:





$$V_A = \frac{U_{AB} - U_{CA}}{3}$$

$$V_B = \frac{U_{BC} - U_{AB}}{3}$$

$$V_C = \frac{U_{CA} - U_{BC}}{3}$$

Séries de Fourier

r : $[0, 2\pi]$ (periodique). f est continue / ou continue par morceau.

1) Coefficient de Fourier exponentielle:

la suite : $(C_n(f))_{n\in\mathbb{Z}}$.

$$C_n(f) = \frac{1}{T}\int_0^T f(t)\, e^{-jnt}\, dt \qquad (T = 2\pi).$$

2) Coefficient trigonometriques:

La Suite $(a_n(f))_{n\geq 0}$ et la suite $(b_n(f))_{n\geq 1}$

$$a_0(f) = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} f(t).dt$$

$$a_n(f) = \frac{2}{2\pi}\int_0^{2\pi} f(t).\cos(nt)\, dt$$

$$b_n(f) = \frac{2}{2\pi}\int_0^{2\pi} f(t).\sin(nt)\, dt$$

Rq:
- Si f est paire $b_n(f) = 0$
- Si f est impaire $a_n(f) = 0$, $a_0(f) = 0$

3) La serie de Fourier de f:

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

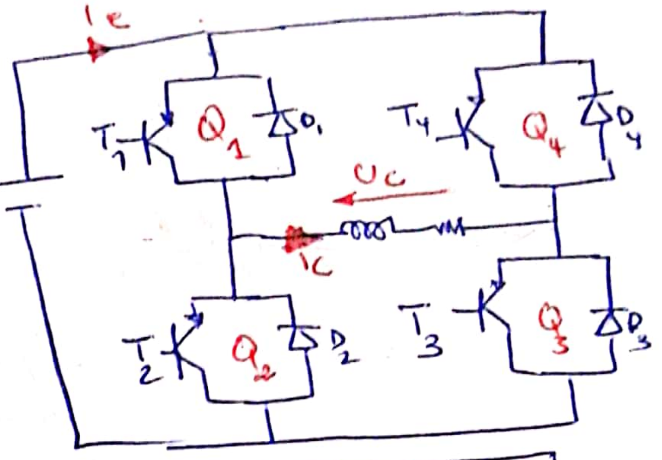
ou

$$S(t) = a_0(f) + \sum_{n\geq 1}\left[a_n(f)\cdot\cos(nt) + b_n(f)\cdot\sin(nt)\right]$$

Ondulation du courant :

1) Commande symétrique (Pleine Onde) :

* $Q_1 = Q_3 = ON$, $Q_2 = Q_4 = OFF$. $[0, T/2]$



T1	T2
T3	T4

$i_{min} = -i_{Max}$.

$U_{ch} = E$.

$Ri + L\frac{di}{dt} = E$. $\quad i(t) = (I_{min} - \frac{E}{R})e^{-t/\tau} + \frac{E}{R}$

→ Si $i > 0$: $i_e = i_c = i_{T_1} = i_{T_2}$

T_1 et T_3 qui conduits

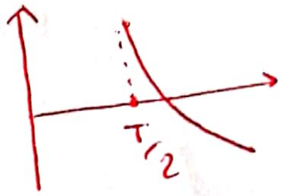
→ Si $i < 0$: $i_e = i_c = i_{D_1} = i_{D_3}$

D_1 et D_3 qui conduites.

* $Q_1 = Q_3 = OFF$, $Q_2 = Q_4 = ON$. $[T/2, T]$

$U_{ch} = -E$.

$Ri + L\frac{di}{dt} = -E$. $\quad i(t) = (I_{max} + \frac{E}{R})e^{-\frac{t-T/2}{\tau}} - \frac{E}{R}$.

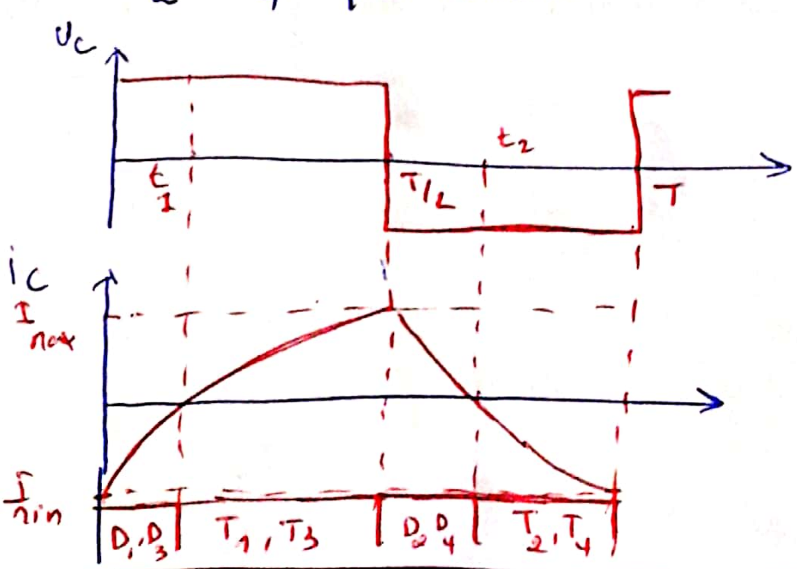


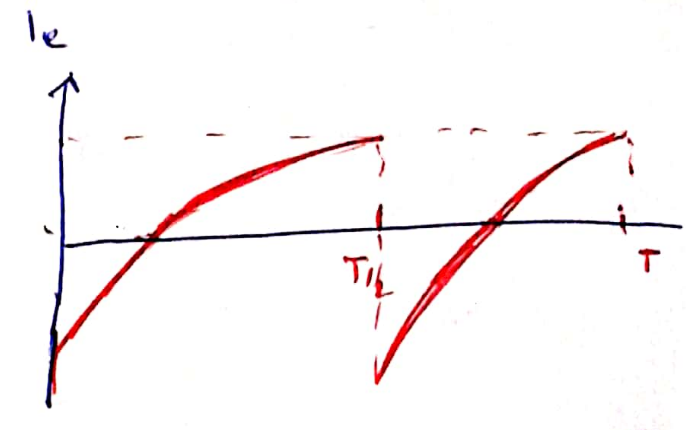
→ Si $i > 0$. $i_e = -i_c = i_{D_2} = i_{D_4}$.

D_2 et D_4 qui conduites

→ Si $i < 0$: $i_e = -i_c = i_{T_2} = i_{T_4}$

T_2 et T_4 qui conduits





→ Spectre de la tension ondulée : (commande symétrique)

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

$$f(\theta) = S(\theta) = a_0 + \sum_{n \geq 1} a_n \cos n\theta + b_n \sin n\theta.$$

puisque f est impaire donc : $a_0 = 0$. $a_n = 0$.

$$b_n = \frac{2}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\theta) . \sin n\theta . d\theta = \frac{2}{2\pi} \int_{-\pi}^{0} -E . \sin n\theta \, d\theta + \int_{0}^{\pi} E . \sin n\theta . d\theta$$

$$= \frac{E}{\pi} \left[\int -\sin n\theta + \int \sin n\theta \right] = \frac{E}{\pi} \left[\frac{\cos n\theta}{n} \Big|_{-\pi}^{0} + \left[\frac{-\cos n}{n} \right]_0^{\pi} \right]$$

$$= \frac{E}{n\pi} \left(\underset{1}{\cos 0} - \cos n(-\pi) - \cos n\pi + \underset{1}{\cos 0} \right)$$

$$= \frac{E}{n\pi} \left(1 - \cos n\pi - \cos n\pi + 1 \right) = \frac{E}{n\pi} \left(2 - 2 \cos n\pi \right).$$

$$= \frac{2E}{n\pi} \left(1 - (-1)^n \right).$$

$$f(\theta) = \sum_{n \geq 1} \frac{2E}{n\pi} (1 - (-1)^n) . \sin n\theta . = \frac{2E}{\pi} \sum_{n \geq 1} \frac{1 - (-1)^n}{n} \sin n\theta$$

Simplification :

Si : n = paire $= n = 2k$.

$$f(\theta) = \frac{2E}{\pi} \sum_{n \geq 1} \frac{\overbrace{1 - (-1)^{2k}}^{0}}{2k} \sin 2k\theta = 0$$

si n = impaire $= 2k+1$.

$$f(\theta) = \frac{2E}{\pi} \sum_{k \geq 0} \frac{(1+1)}{2k+1} \sin (2k+1)\theta$$

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

$k = 0$: $f(\theta) = \frac{4E}{\pi} . \sin \theta$

$k = 1$: $f(\theta)_1 = \frac{4E}{3\pi} \sin 3\theta$.

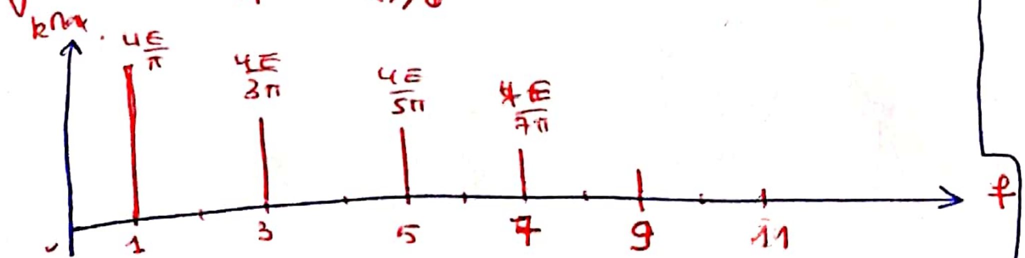
$k = 2$: $f(\theta)_2 = \frac{4E}{5\pi} \sin 5\theta$.

⋮

$V_{eff_{TOT}} = ?$

$V_{1eff} = ?$

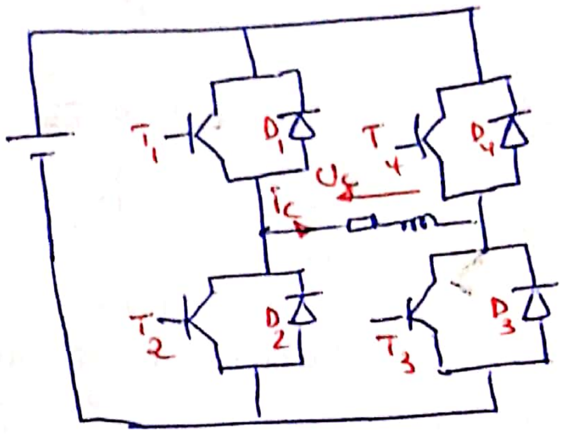
$$THD = \frac{\sqrt{V_{eff_{TOT}}^2 - V_{1eff}^2}}{V_{eff_1}}$$



②

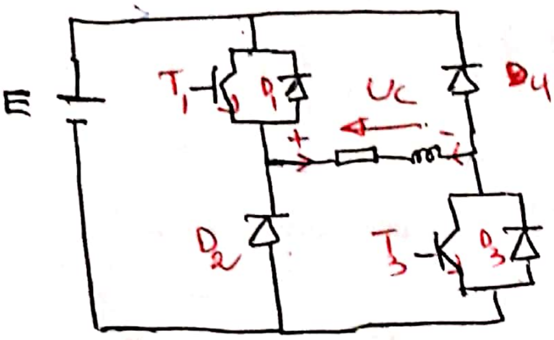
Commande décalée:

$\alpha = \frac{\beta}{2}$.



* $\beta < \theta < T/2$:

$T_1 = ON$, $T_3 = ON$., $T_2 = T_4 = OFF$.



D_2 et D_3 = Toujours OFF.

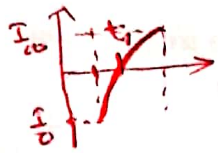
$U_c = E \Rightarrow L\frac{di}{dt} + Ri = E$.

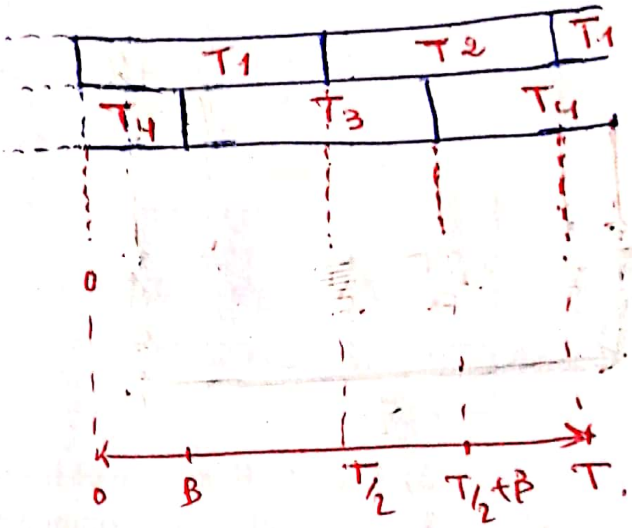
$i(t) = \left(I_0 - \frac{E}{R}\right) e^{-t/\tau + \beta/\tau} + \frac{E}{R}$.

$i_e = i_c$.

→ Si $i < 0$: D_1 et $D_3 = ON$.

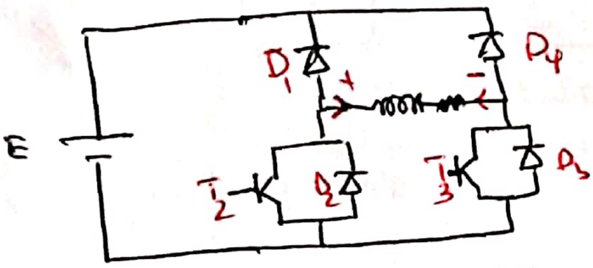
→ Si $i > 0$: T_1 et $T_3 = ON$.





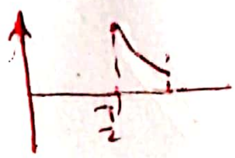
* $\frac{T}{2} < \theta < T/2 + \beta$.

T_2 et $T_3 = ON$: $T_1 = T_4 = OFF$.



$i_e = 0$.

$U_c = 0 \Rightarrow Ri + L\frac{di}{dt} = 0$.



$i(t) = I_0\, e^{-t/\tau + T/2/\tau}$

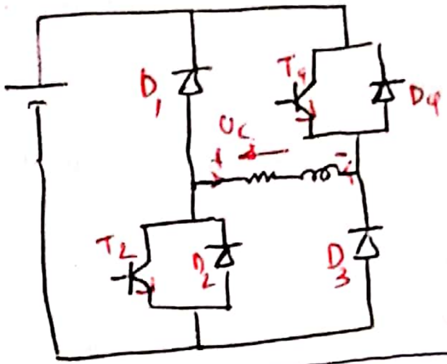
→ $i > 0$: D_2 et $T_3 = ON$

le courant est positif suivant le courant de la phase précédente.

$\frac{T}{2}+\beta < \theta < T$:

$T_2 = T_4 = ON$.

$T_3 = T_1 = OFF$

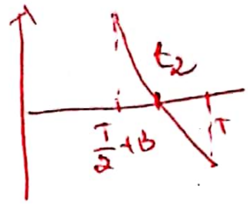


$U_C = -E \Rightarrow L\frac{di}{dt} + Ri = -E$

$i(t) = \left(I_0 + \frac{E}{R}\right)e^{-\frac{t}{\tau} + \left(\frac{T}{2}+\beta\right)/\tau} + \frac{E}{R}$

→ si $i > 0$: $i_e = -i_c$.

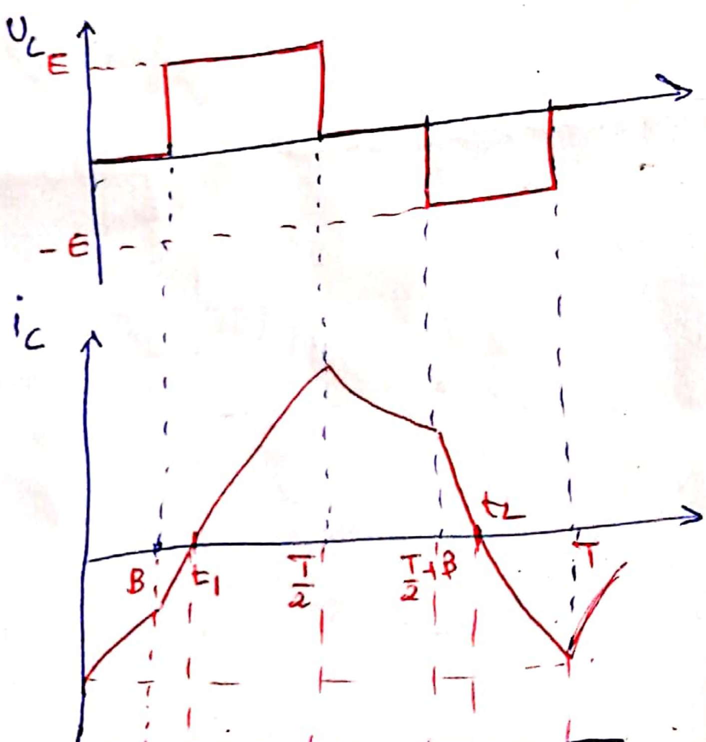
T_2 et $T_4 = ON$.



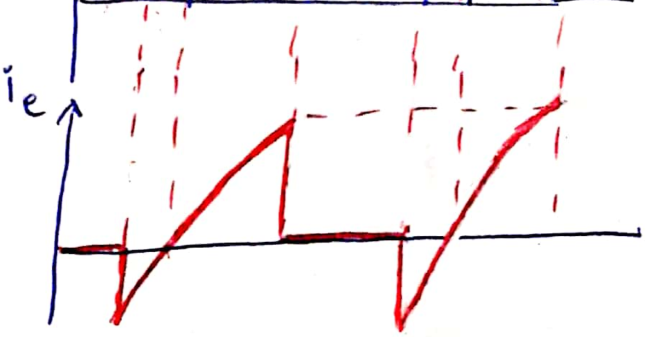
→ si $i < 0$:

D_2 et $D_4 = ON$.

Courbe du courant :

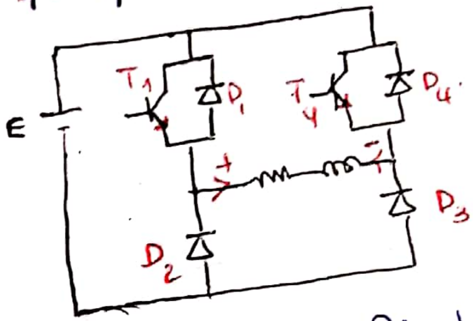


D_1	D_1	T_1	D_2	T_2	D_2	D_1
T_4	D_3	T_3	T_3	T_4	D_4	T_4



* $0 < \theta < \beta$

$T_1, T_4 = ON$

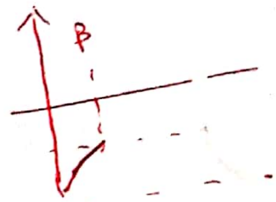


$U_C = 0 \Rightarrow Ri + L\frac{di}{dt} = 0$

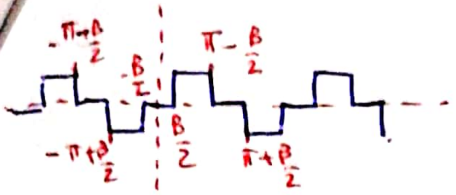
$i(t) = I_0 e^{-t/\tau}$ $i_e = 0$

→ $i < 0$, D_1 et $T_4 = ON$

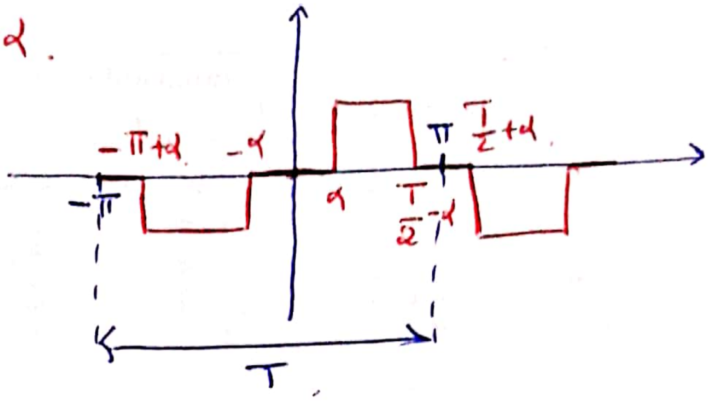
le courant est négatif suivant le courant de la phase précédente.



Spectre de la tension ondulée (commande décalée).



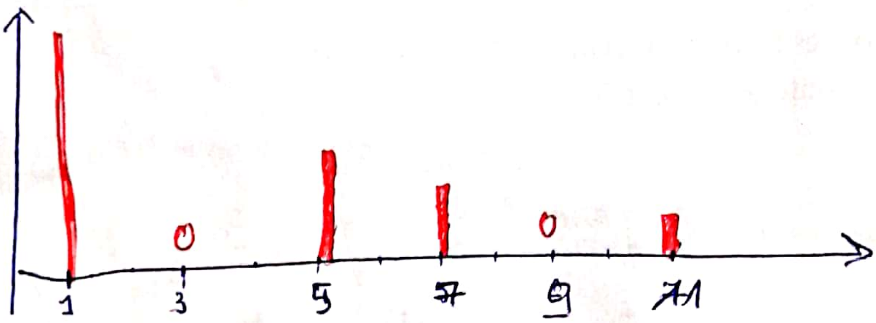
$\frac{B}{2} = \alpha$.



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

→ Voir page (7). $\alpha = \frac{B}{2}$.

$$S_f = \sum_{n \geq 1} \frac{4E}{(2k+1)\pi} \cos(2k+1)\frac{B}{2} \sin(2k+1)\theta.$$



$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_{n\,eff}^2}}{U_{1eff}} = \frac{\sqrt{U_{eff\,TOT}^2 - U_{eff\,1}^2}}{U_{1eff}}.$$

$V_{eff\,TOT} = ?$

$V_{eff_1} = E.$