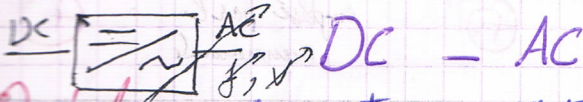


Chapitre 4: Onduleurs autonomes (inverters)

Conversion: Continu-Alternatif



Onduleur: Convertisseur statique qui permet d'obtenir une tension alternative de fréquence et valeur efficace fixes ou réglables à partir d'une source de tension continue.

Autonomes: Signifie que l'onduleur impose la fréquence et la forme d'onde de la tension aux bornes de la charge.

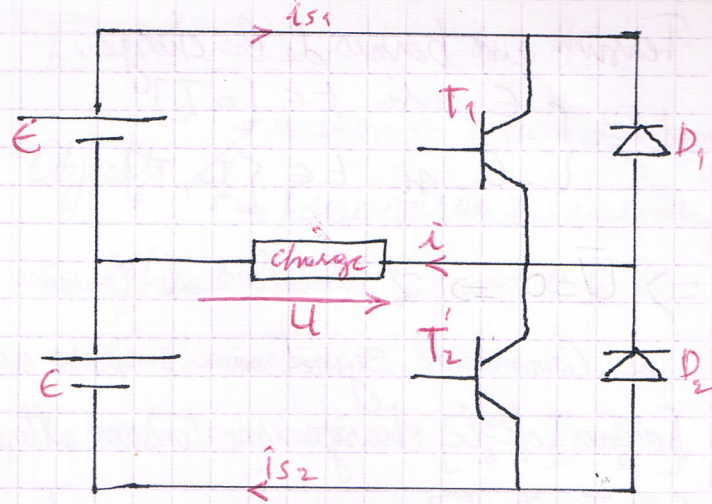
Domaine d'application:

1. Les alimentations de secours
2. La variation de la vitesse des moteurs à CC alternatif
3. Le chauffage par induction

1. Onduleur de tension:

a. Onduleur monophasé en demi-pont: (single phase half-bridge inverter)

Montage de principe



Ce montage nécessite une source continue à point milieu.

Fonctionnement:

A fin d'avoir une tension Alternative aux bornes de la charge, il faut que la commande de T_1 et T_2 soit symétrique.

Commande symétrique:

T_1 est fermé sur $[0, \frac{T}{2}]$

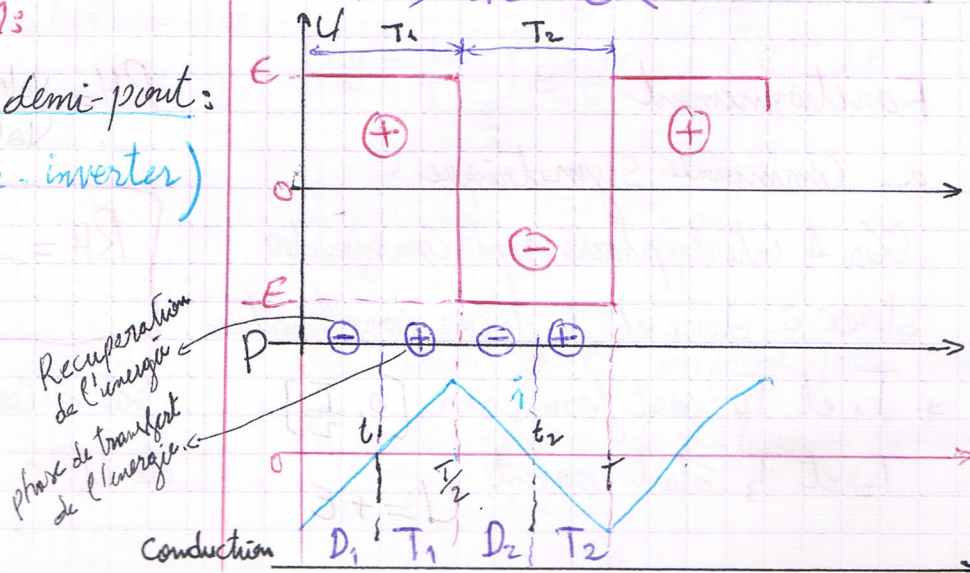
T_2 est fermé de façon complémentaire sur $[\frac{T}{2}, T]$

* $t \in [0, \frac{T}{2}]$ $\left. \begin{array}{l} T_1 \text{ fermé} \\ T_2 \text{ ouvert} \end{array} \right\}$

$$\Rightarrow U = E > 0$$

* $t \in [\frac{T}{2}, T]$ $\left. \begin{array}{l} T_1 \text{ ouvert} \\ T_2 \text{ fermé} \end{array} \right\}$

$$\Rightarrow U = -E < 0$$



Tension aux bornes de la charge.

$$U = \begin{cases} E & \text{si } t \in [0, \frac{T}{2}] \\ -E & \text{si } t \in [\frac{T}{2}, T] \end{cases}$$

$\Rightarrow \bar{U} = 0 \Rightarrow$ L'onduleur de tension à commande symétrique impose aux bornes de la charge une tension alternative

- La valeur efficace :

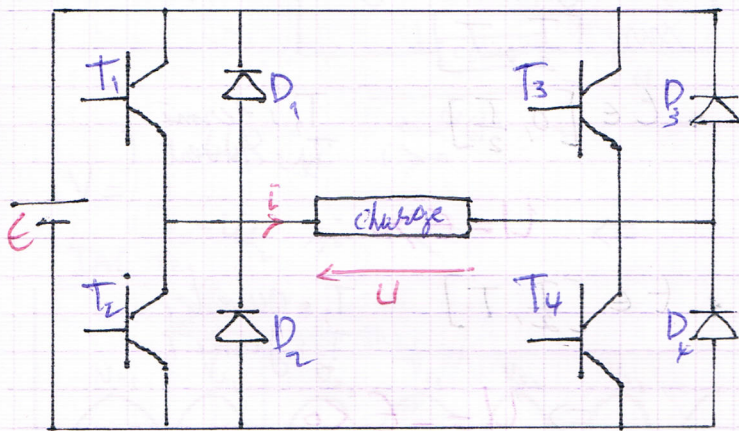
$$U_{eff} = E = C^{ste}$$

$\leadsto$ Ce montage permet la régulation ou la variation de la fréquence mais il n'offre la possibilité d'agir sur la valeur efficace

b. Onduleur monophasé en pont :

(single-phase - bridge inverter)

Schema de principe :



Fonctionnement

a. Commande Symétrique :

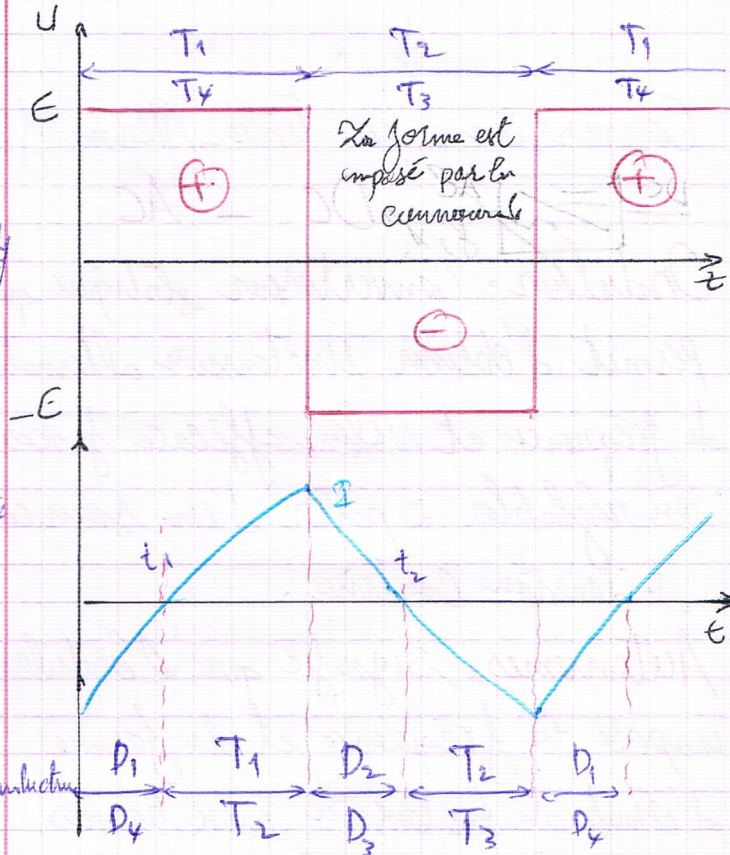
Les 4 interrupteurs sont commandés deux à deux et de façon complémentaire

* T_1 et T_4 sont fermés sur $[0, \frac{T}{2}]$

T_2 et T_3 étant ouvert $U = +E$

* T_2 et T_3 sont fermés sur $[\frac{T}{2}, T]$
 T_1 et T_4 étant ouvert

$$U = -E$$



La commande symétrique ~~ou~~ de ~~chacune~~ de l'onduleur impose aux bornes de charge une tension alternative de valeur efficace constante

Résidu d'harmonique

Représente la quantité d'harmoniques contenues dans la tension U.

$RH = \frac{\text{Valeur efficace des harmoniques de } U}{\text{Valeur efficace de la tension } U}$

$$RH = \frac{U_{neff}}{U_{eff}}$$

La décomposition en série de Fourier de U :

$$U = U_m \sin \omega t + \sum_{n \geq 2} U_{nhm} \sin\left(\frac{2\pi}{T} n t\right)$$

$$U = U_1 + U_h$$

$$U^2 = U_1^2 + U_h^2 + 2U_1 U_h$$

$$\frac{1}{T} \int U^2 dt = \frac{1}{T} \int U_1^2 dt + \frac{1}{T} \int U_h^2 dt + \frac{2}{T} \int U_1 U_h dt$$

$$U_{eff}^2 = U_{1eff}^2 + U_{heff}^2$$

$$\Rightarrow U_{heff} = \sqrt{U_{eff}^2 - U_{1eff}^2}$$

$$\Rightarrow RH = \frac{\sqrt{U_{eff}^2 - U_{1eff}^2}}{U_{eff}} = \sqrt{1 - \left(\frac{U_{1eff}}{U_{eff}}\right)^2}$$

$$U_{eff} = E$$

$$U_{1eff} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{2}{T\sqrt{2}} \int_0^T U \sin \frac{2\pi}{T} t dt$$

$$= \frac{4}{T\sqrt{2}} \int_0^{T/2} E \sin \frac{2\pi}{T} t dt = \frac{4E}{\pi\sqrt{2}}$$

$$RH = \sqrt{1 - \left(\frac{4E}{\pi\sqrt{2}E}\right)^2}$$

$$= \sqrt{1 - \frac{8}{\pi^2}} = 0,4343 = 43,43\%$$

En conclusion dans un onduleur monophasé à commande symétrique, les harmoniques représentent 43% de la tension délivrée par le convertisseur.

b. La commande décalée.

Objectifs $\begin{cases} \text{réduire le résidu d'harmonique} \\ \text{faire varier la valeur efficace de la tension de sortie} \end{cases}$

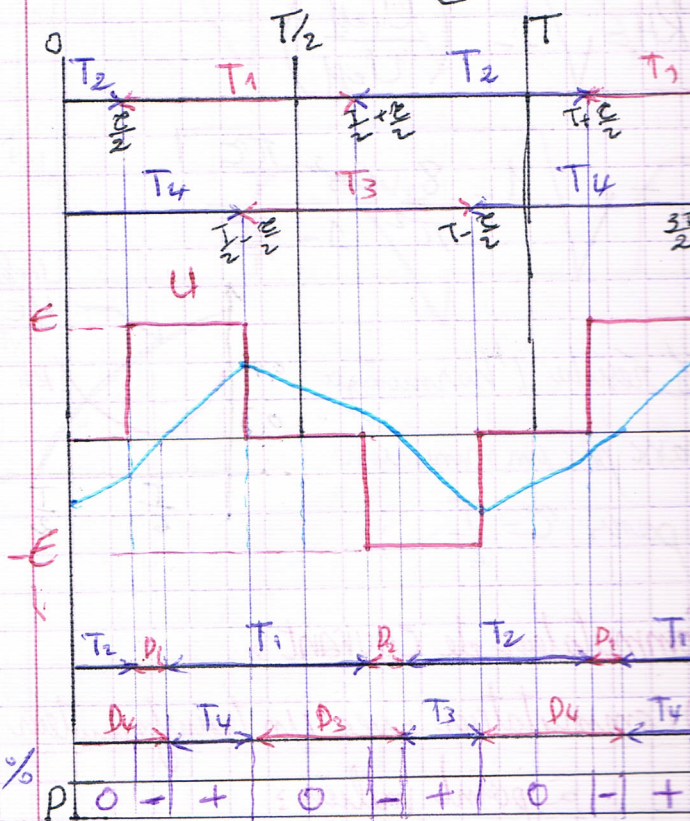
La Commande:

T_1 est commandé sur $\left[\frac{\varphi}{2}, \frac{T}{2} + \frac{\varphi}{2}\right]$

T_2 " " " $\left[\frac{T}{2} + \frac{\varphi}{2}, T + \frac{\varphi}{2}\right]$

T_3 " " " $\left[T + \frac{\varphi}{2}, T - \frac{\varphi}{2}\right]$

T_4 " " " $\left[T - \frac{\varphi}{2}, \frac{3T}{2} - \frac{\varphi}{2}\right]$



La valeur efficace:

$$U_{eff}^2 = \frac{1}{T} \left[\int_{\frac{\varphi}{2}}^{T - \frac{\varphi}{2}} E^2 dt + \int_{\frac{T}{2} + \frac{\varphi}{2}}^{T + \frac{\varphi}{2}} (-E)^2 dt \right]$$

$$U_{eff} = E \sqrt{1 - \frac{2\varphi}{T}}$$

par action sur φ , on peut faire varier la valeur efficace de la tension fournie par l'onduleur

La valeur efficace du fondamental :

$$U_{eff} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2}{T} \int_0^T U \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) dt$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{4}{T} \int_{\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2} + \frac{T}{2}} E \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) dt$$

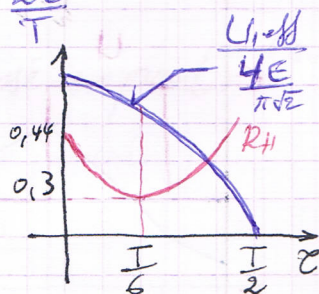
$$U_{eff} = \frac{4E}{\pi\sqrt{2}} \cos \frac{\pi\tau}{T}$$

Résidu d'harmonique.

$$R_H = \sqrt{1 - \left(\frac{U_{eff}}{U_{eff}}\right)^2}$$

$$= \sqrt{1 - \frac{8}{\pi^2} \frac{\cos^2 \frac{\pi\tau}{T}}{1 - \frac{2\tau}{T}}}$$

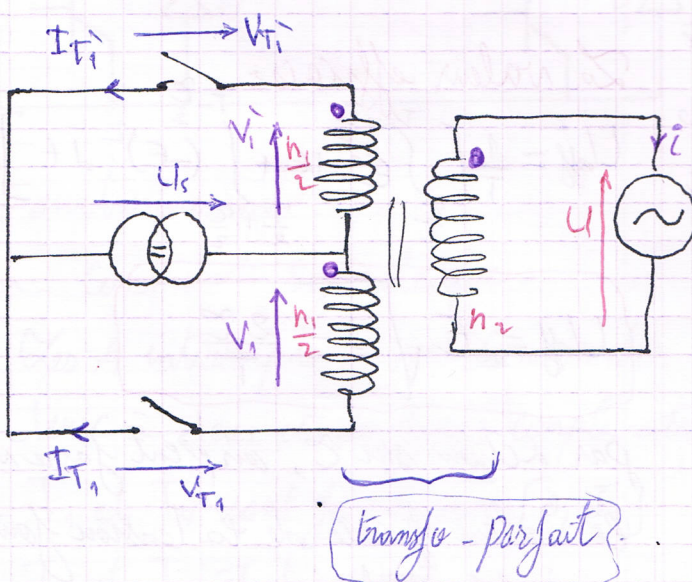
Le résidu d'harmonique passe par un minimum pour $\tau = \frac{T}{6}$.



Commutateur de courant :

a) Commutateur avec un transformateur

à point milieu :



Ne supposant que la charge impose une tension de la forme

$$U = U_m \sin(\omega t + \varphi)$$

$$V_1 = \frac{n_1}{2n_2} U = V_1' = \frac{n_1}{2n_2} U_m \sin(\omega t + \varphi)$$

L'équation des A.t :

$$\frac{n_1}{2} i_T - \frac{n_1}{2} i_{T1} - n_2 i = 0$$

$$\Rightarrow \frac{n_1}{2} (i_T - i_{T1}) = n_2 i$$

Fonctionnement avec une commande Symétrique :

$$+ t \in [0, \frac{T}{2}]$$

T_1 = fermé

T_2 = ouvert

$$I_{T1} = I_S$$

$$I_{T2} = 0$$

$$i = \frac{n_1}{2n_2} I_S$$

$$U_s = V_1 = \frac{n_1}{2n_2} U_m \sin(\omega t + \varphi)$$

$$V_{T1} = U_s + V_1' = 2V_1 = \frac{n_1}{n_2} U_m \sin(\omega t + \varphi)$$

$$t \in [\frac{T}{2}, T]$$

T_1 = ouvert

T_2 = fermé

$$I_{T1} = 0$$

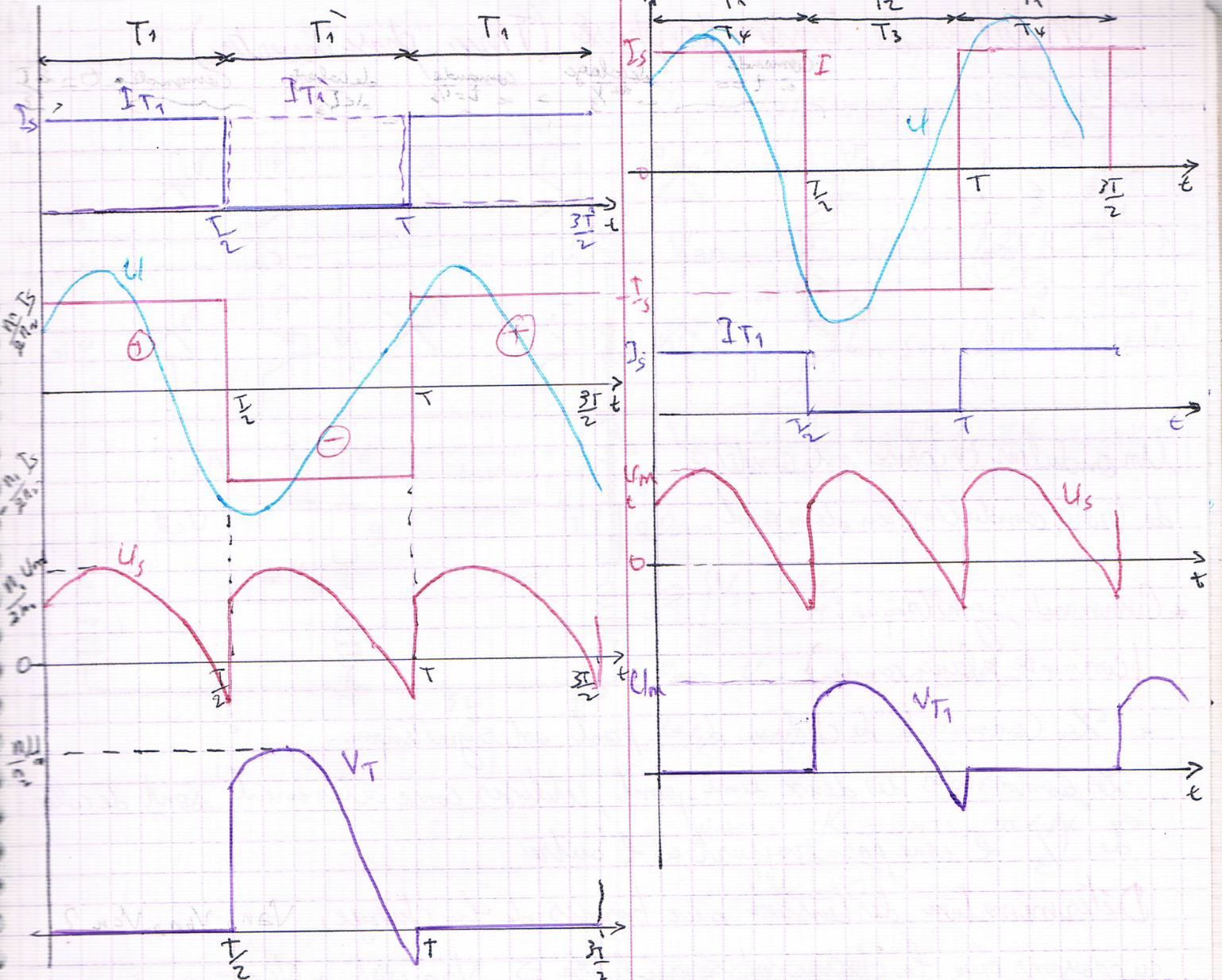
$$I_{T2} = I_S$$

$$i = -\frac{n_1}{2n_2} I_S$$

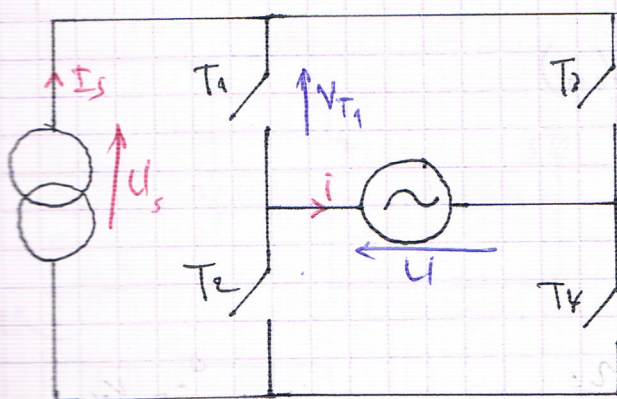
$$U_s = -V_1' = -\frac{n_1}{2n_2} U_m \sin(\omega t + \varphi)$$

$$V_{T1} = U_s - V_1 = -2V_1$$

$$= -\frac{n_1}{2n_2} U_m \sin(\omega t + \varphi)$$

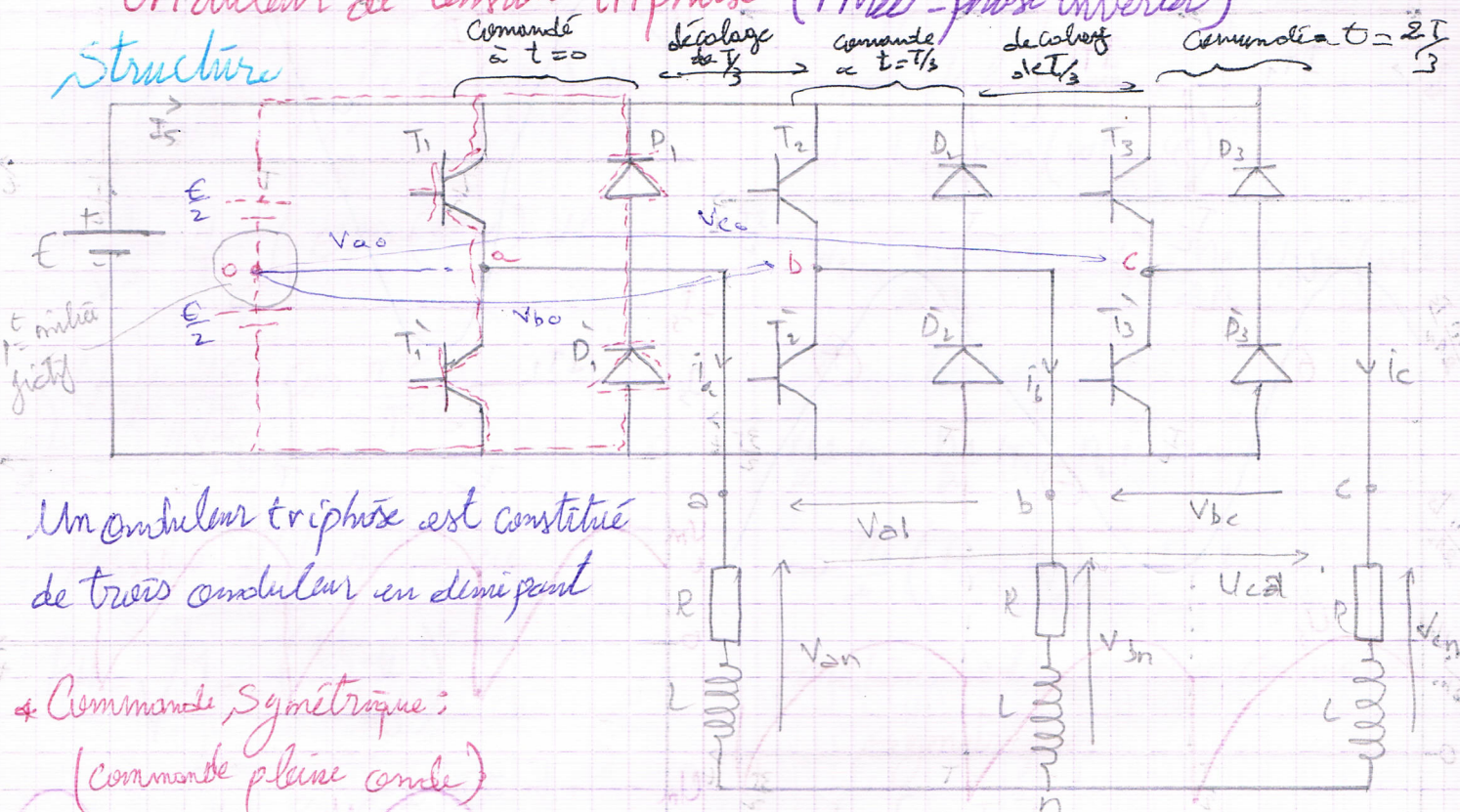


b. Commutateur en pont



On-duleur de tension triphasé (Three-phase inverter)

Structure



Un onduleur triphasé est constitué de trois onduleur en demi-pont

* Commande Symétrique :
(commande pleine onde)

* La commande de chaque demi-pont est symétrique.

* Les commandes des deux demi-pont, utilisés consécutivement sont décalées de $T/3$ l'une par rapport à l'autre

Détermination des tensions aux bornes de la charge : V_{an}, V_{bn}, V_{cn} ?

supposons que la charge est équilibrée $\Rightarrow V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$

or : $U_{ab} = V_{an} - V_{bn}$

$U_{ac} = V_{an} - V_{cn}$

$U_{ab} + U_{ac} = 2V_{an} - (V_{bn} + V_{cn})$

$$\Rightarrow \begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3} (U_{ab} + U_{ac}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3} (U_{bc} + U_{ba}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3} (U_{ca} + U_{cb}) \end{cases}$$

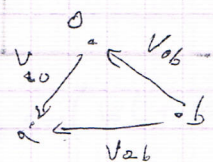
Les tensions composées sont exprimées par :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{ao} - V_{bo} \\ U_{bc} = V_{bo} - V_{co} \\ U_{ca} = V_{co} - V_{ao} \end{cases}$$

avec : $V_{ao} = \begin{cases} \frac{E}{2} & \text{si } T_1 = \text{fermé} \\ -\frac{E}{2} & \text{si } T_1' = \text{fermé} \end{cases}$

$V_{bo} = \begin{cases} \frac{E}{2} & \text{si } T_2 = \text{fermé} \\ -\frac{E}{2} & \text{si } T_2' = \text{fermé} \end{cases}$

$V_{co} = \begin{cases} \frac{E}{2} & \text{si } T_3 = \text{fermé} \\ -\frac{E}{2} & \text{si } T_3' = \text{fermé} \end{cases}$



Analyse harmonique :

Le développement en série de Fourier de la tension V_{an}

$$V_{an} = \sum_{K \geq 1} V_K \sin\left(\frac{2\pi K}{T} t\right)$$

$$V_K = \frac{A}{T} \int_0^{T/2} V_{an} \sin\left(\frac{2\pi K}{T} t\right) dt$$

$$V_K = \frac{2E}{3\pi K} \left[2 \sin \frac{\pi K}{2} \sin \frac{\pi K}{6} - \cos \pi K + 1 \right]$$

* pour $K=1$:

$$\Rightarrow V_1 = \frac{2E}{\pi}$$

* pour $K=2m, m \in \mathbb{N}^* \Rightarrow$

$$V_K = 0$$

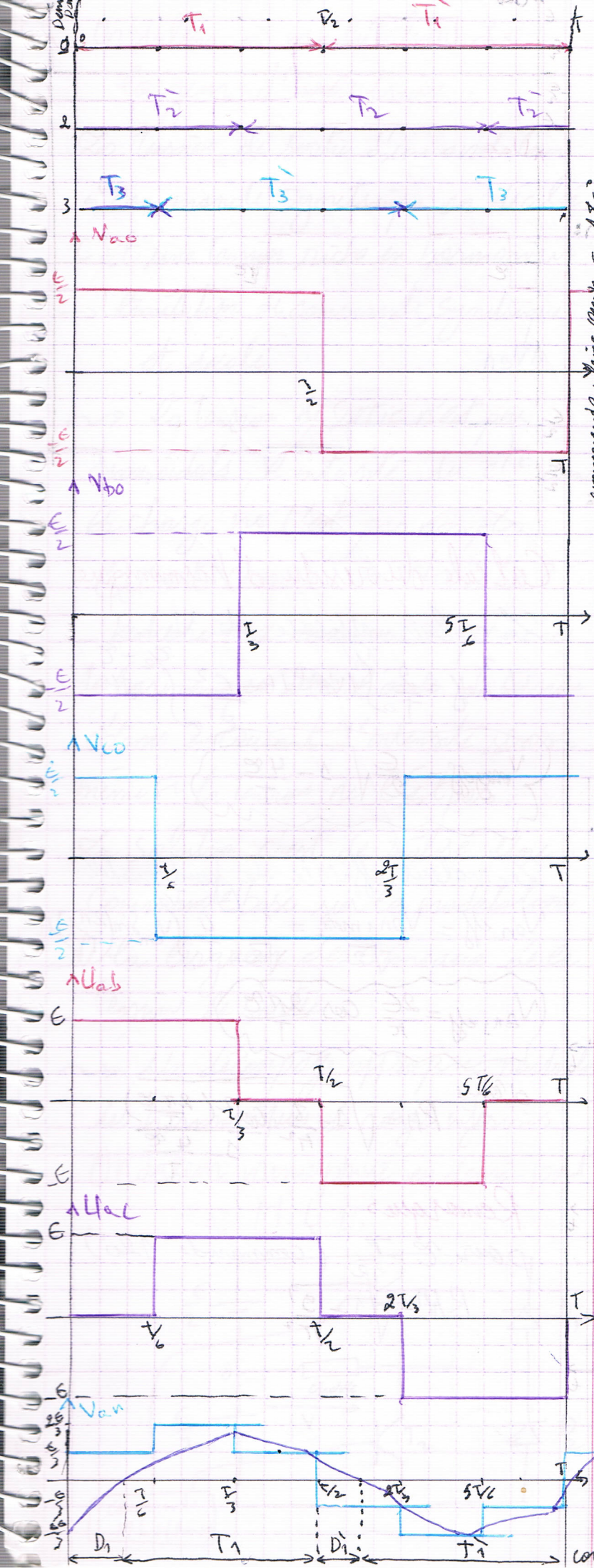
* pour $K=3m, m \in \mathbb{N}^* \Rightarrow$

$$V_K = 0$$

~~$$V_K = \frac{2E}{\pi K} \left[\frac{1}{5} \right]$$~~

$$V_{an} = \frac{2E}{\pi} \left[\sin \omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \frac{1}{11} \sin 11\omega t + \dots \right] \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$$

Les harmoniques 5 et 7 sont très négligées pour le bon fonctionnement de la charge



Le résidu d'harmonique:

$$RH = \sqrt{1 - \left(\frac{V_{an\text{eff}}}{V_{an\text{eff}}} \right)^2}$$

* Calcul de la valeur efficace de V_{an} :

$$V_{an\text{eff}}^2 = \frac{2E^2}{T} \left\{ \int_0^{T/6} \frac{1}{9} dt + \int_{T/6}^{T/3} \frac{4}{9} dt + \int_{T/3}^{T/2} \frac{1}{9} dt \right\}$$

$$\Rightarrow V_{an\text{eff}} = \frac{\sqrt{2}}{3} E$$

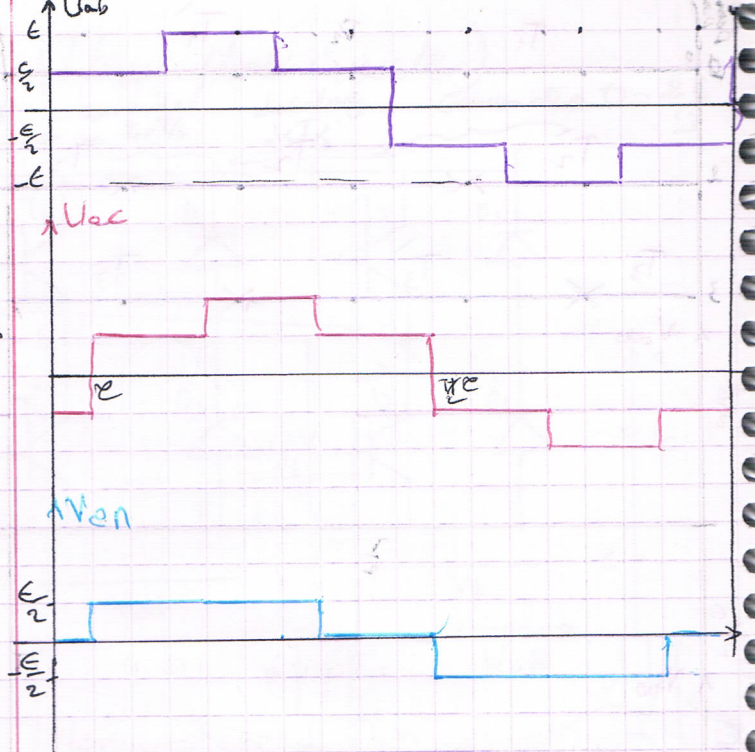
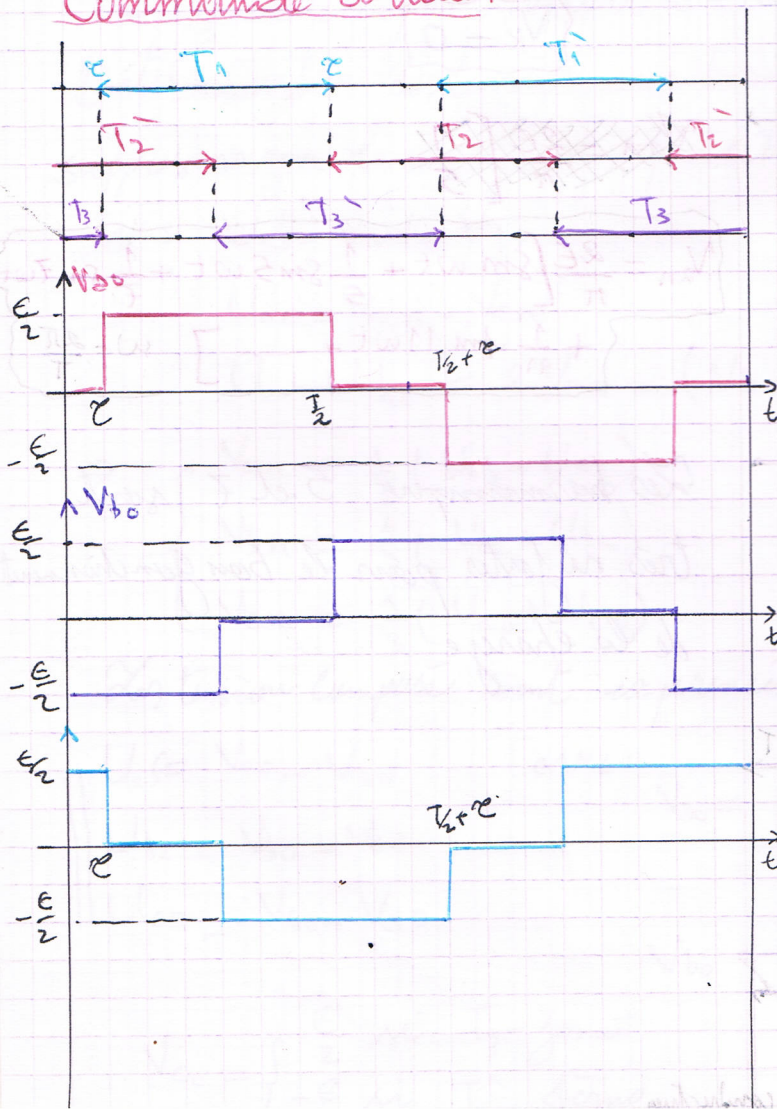
* La valeur efficace du fondamental:

$$V_{1\text{eff}} = \frac{V_1}{\sqrt{2}} = \frac{2E}{\pi\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}E}{\pi}$$

d'où

$$RH = \sqrt{1 - \frac{9}{\pi^2}} = 29,68\%$$

Commande décalée:



Calcul du résidu d'harmonique

La valeur efficace de V_{an} :

$$V_{an\text{eff}}^2 = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} (V_o)^2 dt = \frac{E^2}{T} \int_0^{T/2} dt$$

$$V_{an\text{eff}} = \frac{E}{2} \sqrt{1 - \frac{4\alpha}{T}}$$

La valeur efficace de fondamental:

$$V_{1\text{eff}} = \frac{V_{an\text{max}}}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{4}{T} \int_0^{T/2} V_m \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) dt$$

$$V_{1\text{eff}} = \frac{2E}{\pi} \cos \frac{2\pi\alpha}{T}$$

d'où

$$RH = \sqrt{1 - \frac{8}{\pi^2} \frac{\cos^2\left(\frac{2\pi\alpha}{T}\right)}{1 - \frac{4\alpha}{T}}}$$

Remarque

pour $\alpha = \frac{T}{12}$ (commande 120°)

$$RH = \sqrt{1 - \frac{9}{\pi^2}}$$

On parle de modulation de largeur d'impulsion :

Les tensions de sortie d'un onduleur à commande symétrique en décalé c'est une tension riche en harmonique
→ Emulation de commande symétrique et décalé

→ La tension de sortie n'est pas sinusoïdale, l'intensité du C^t dans la charge ne l'est pas non plus

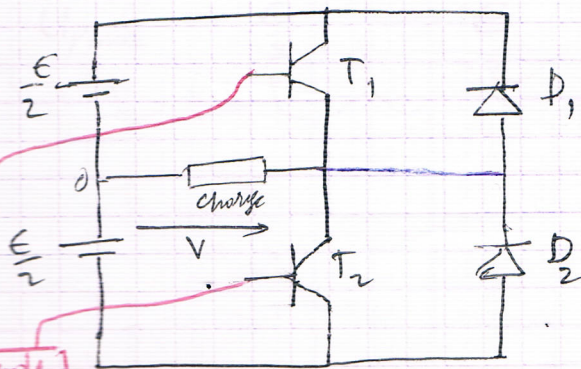
Qu'est ce que l'on cherche ?

- Réduire au maximum la présence des harmoniques dans l'onde de tension
- Obtenir un courant d'intensité sinusoïdal même si la tension ne l'est pas.

La solution c'est de réaliser une commande basé sur la modulation de la largeur des créneaux de la tension de sortie.

→ Un découpage approprié neutralise les harmoniques de rangs inférieurs

Onduleur mono phase en demi-pont à M.L.I.



Commande MLI (PWM)

La structure de l'onduleur est inchangée, seule, la commande des interrupteurs qui est modifiée

principe.

Le principe de la modulation de largeur d'impulsion MLI (PWM pulse width modulation)

consiste à hacher la tension délivrée aux bornes de la charge en créant des largeurs variables

avec une puissance supérieure à celle de l'onduleur

La fréquence de commutation } La fréquence de la tension de sortie

Objectif du découpage :

- * Repousser vers les fréquences élevées, les harmoniques de tension de sortie — facilité du filtrage
- * faire varier la valeur efficace du fondamental de la tension de sortie.

Procédé de la commande :

La MLI est réalisée par comparaison entre deux ondes :

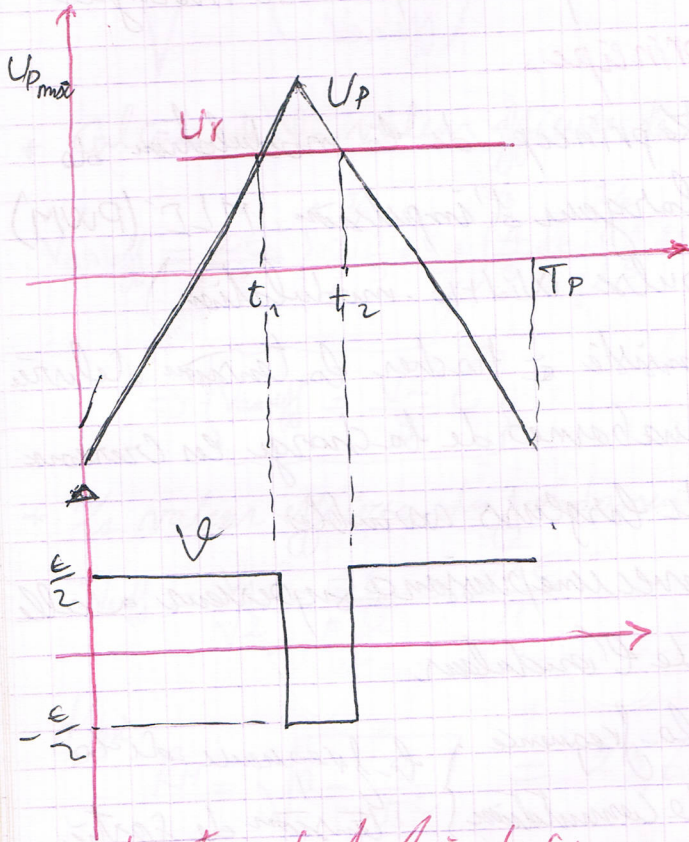
Onde porteuse U_p

U_p de fréquence f_p très élevée

* de forme triangulaire

Onde de référence: U_r

U_r s'onde base fréquence



Définition de la loi de commande

si $U_r > U_p$ alors $T_1 = 1$; $T_2 = 0$

si $U_r < U_p$ " $T_2 = 1$; $T_1 = 0$

Calcul des instants de commutation

Ses intérêts sont :

• $t \in [0, \frac{T_P}{2}]$

l'équation de la portée :

$$U_p(t) = \frac{4U_{pmax}}{T_P} t + U_{pmin} - U_{pmax}$$

$$= U_{pmax} \left(\frac{4t}{T_P} - 1 \right)$$

l'instant t_1 est défini par

$$U_p(t_1) = U_r$$

$$U_{pmax} \left(\frac{4t_1}{T_P} - 1 \right) = U_r$$

$$\Rightarrow t_1 = \frac{T_P}{4} \left(\frac{U_r}{U_{pmax}} + 1 \right)$$

• $t \in [\frac{T_P}{2}, T_P]$

l'éq de la portée

$$U_p(t) = -\frac{4U_{pmax}}{T_P} t + 3U_{pmax} = U_{pmax} \left(3 - \frac{4t}{T_P} \right)$$

l'instant t_2 est défini par $U_p(t_2) = U_r$

$$U_{pmax} \left[3 - \frac{4t_2}{T_P} \right] = U_r$$

$$t_2 = \left(3 - \frac{U_r}{U_{pmax}} \right) \frac{T_P}{4}$$

La valeur moyenne de la tension de sortie pour T_P :

$$\bar{v} = \frac{1}{T_P} \int_0^{T_P} v dt = \frac{1}{T_P} \left[\int_0^{t_1} \frac{E}{2} dt + \int_{t_1}^{t_2} -\frac{E}{2} dt + \int_{t_2}^{T_P} \frac{E}{2} dt \right]$$

$$\bar{v} = \frac{E}{2} \left[1 + \frac{2(t_1 - t_2)}{T_P} \right]$$

donc $\bar{v} = \frac{E}{2} \frac{U_r}{U_{pmax}}$

prenons $U_{pmax} = \frac{E}{2}$

$$\Rightarrow \bar{v} = U_r$$

La valeur moyenne de v varie proportionnellement à la loi de modulation choisie

Commande triangulo-sinusoidal : PWM sinusoidal
Pour avoir une variation sinusoidal de $\bar{v}$, il faut choisir une référence sinusoidal

→ Cette commande est dite : la commande triangulo sinusoïdale
Elle est réalisée en comparant un signal triangulaire U_p
de fréquence élevée et d'amplitude $\frac{E}{2}$ à un signal sinusoïdal
d'amplitude U_{max} $\leq \frac{E}{2}$.

Stratégie de la Commande

Si $U_1 > U_2$ alors $T_1 = 1$

for $U_r < V_p$ others $T_z = 1$

$$\Rightarrow V = \int \frac{E}{2} \quad \text{si } T_1 = 1$$

Paramètres caractérisant la commande MLT

g) l'indice de modulation $= m$

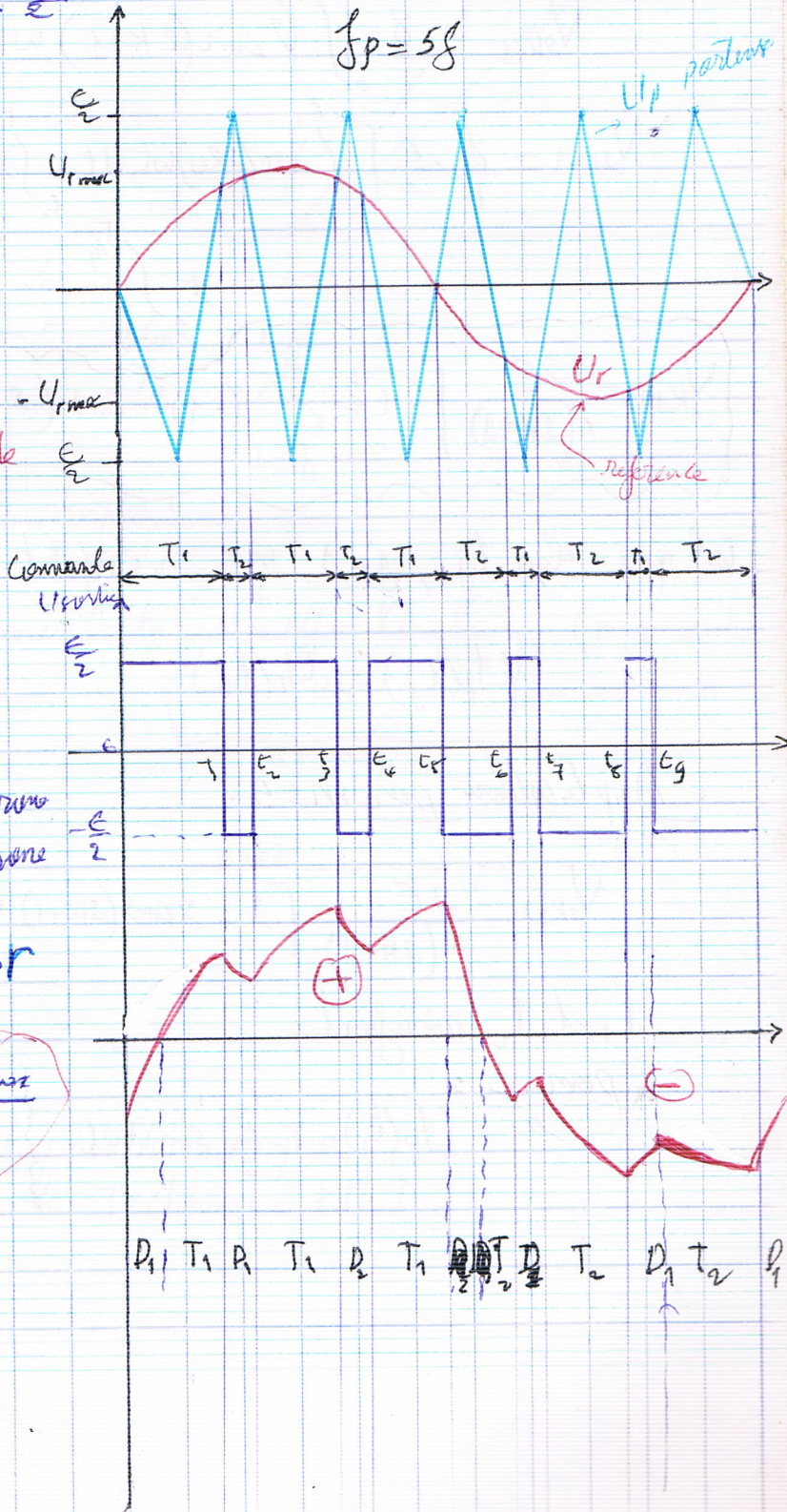
$$m = \frac{f_p}{f} = \frac{\text{Frequência da L-parteuse}}{\text{Frequência de referência}}$$

$m = \text{entier} \rightarrow$ h. modulation synchrone

$m = \text{noel} \rightarrow$ " " asynchrone

2) le coefficient de réglage : en tension : r

$$r = \frac{U_{rmax}}{U_{pmax}} = \frac{U_{rmax}}{\frac{E}{g}} = \frac{2 U_{rmax}}{E}$$



Analyse harmonique :

Coss m = impaire

La tension v est symétrique par rapport à $0, \frac{T}{2}, \frac{T}{4} \Rightarrow$ la décomposition en série de Fourier ne contient que des sinus impaires

$$v = \sum_{k \geq 0} V_{2k+1} \sin(2k+1) \omega t, \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$V_{2k+1} = \frac{8}{T} \int_0^{T/4} v \sin(2k+1) \omega t \, dt$$

$$V_{2k+1} = \frac{8}{T} \cdot \frac{E}{2} \left[\int_0^{t_1} \sin(2k+1) \omega t \, dt - \int_{t_1}^{t_2} \sin(2k+1) \omega t \, dt + \int_{t_2}^{t_3} \sin(2k+1) \omega t \, dt \right. \\ \left. \dots + \int_{t_{m-1}}^{T/4} \sin(2k+1) \omega t \, dt \right]$$

$$V_{2k+1} = \frac{2E}{\pi(2k+1)} \left[1 + 2 \sum_{j=1}^{\frac{m-1}{2}} (-1)^j \cos(2k+1) \omega t_j \right]$$

tel que les $t_j, j=1, \frac{m-1}{2}$ vérifient la relation

$$\{U_p(t_j) = U_r(t_j)\}$$

Application pour $m=5$:

$$V_{2k+1} = \frac{2E}{\pi(2k+1)} \left[1 - 2 \cos(2k+1) \omega t_1 + 2 \cos(2k+1) \omega t_2 \right]$$

t_1 et t_2 vérifient :

* pour t_1 :

$$U_p(t_1) = r \cdot \frac{E}{2} \sin \omega t_1$$

* pour t_2 :

$$U_p(t_2) = r \cdot \frac{E}{2} \sin \omega t_2$$

Reflexions sur le choix de m et r

m est choisie de telle manière que l'amplitude de fondamental de v se rapproche de celui de la référence.

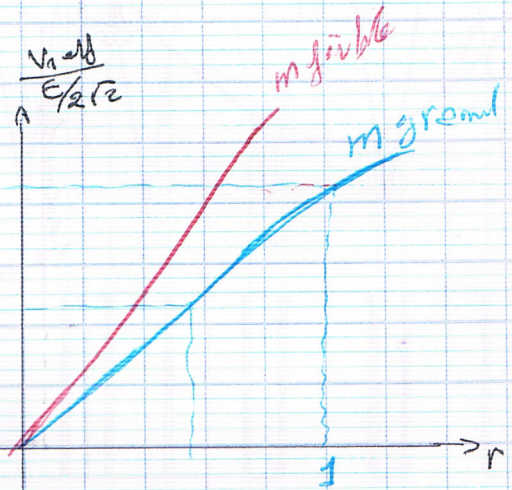
$$m = ? \Rightarrow V_{eff} \approx V_{ref}$$

$$V_{eff} = \frac{V_1}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}E}{\pi} \left[1 + 2 \sum_{j=1}^{\frac{m-1}{2}} (-1)^j \cos \omega t_j \right]$$

$$U_{ref} = r \cdot \frac{E}{2\sqrt{2}}$$

$$\frac{V_{eff}}{U_{ref}} \approx 1 \Rightarrow \frac{V_{eff}}{E/2\sqrt{2}} \approx r$$

Dès que m est suffisant, de fondamental de la tension de sortie est pratiquement égal à la tension de référence.



Calcul des résidu d'harmonique:

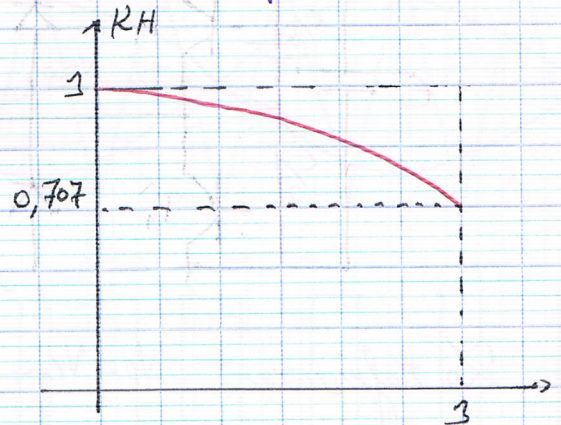
* La valeur efficace de v : $V_{eff} = \frac{E}{2}$

* La valeur efficace de fondamental: $V_{eff} = r_1 \frac{E}{2\sqrt{2}}$ (m grand)

* résidu d'harmonique:

$$R_H = \sqrt{1 - \frac{r^2}{2}}$$

$$R_H \in [70\%, 100\%]$$



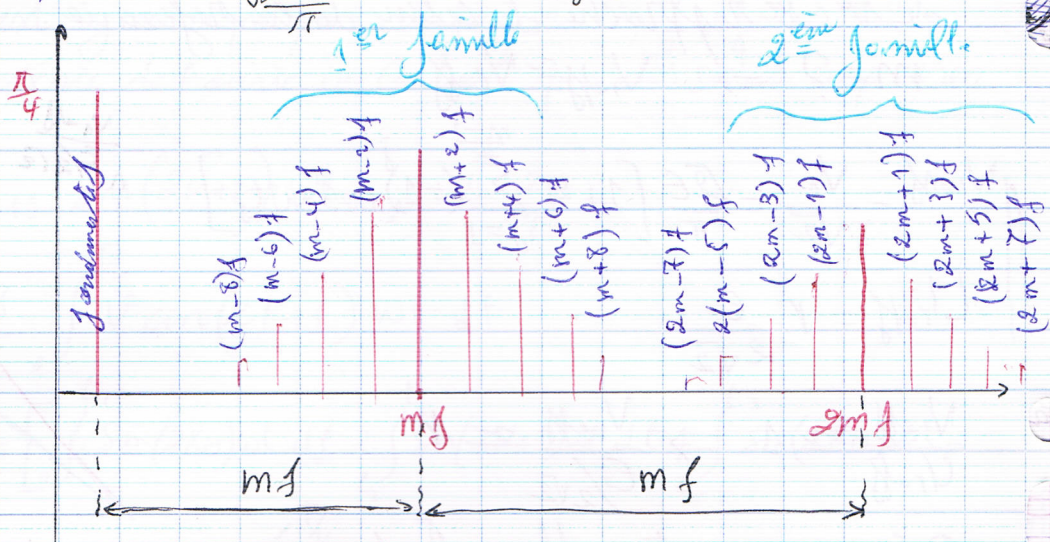
→ le résidu m dépend pas de m
il toujours très important

→ La MLI ne réduit pas le taux d'harmonique.

* Quel est l'intérêt de la Technique MLI?

Analyse Spectrale :

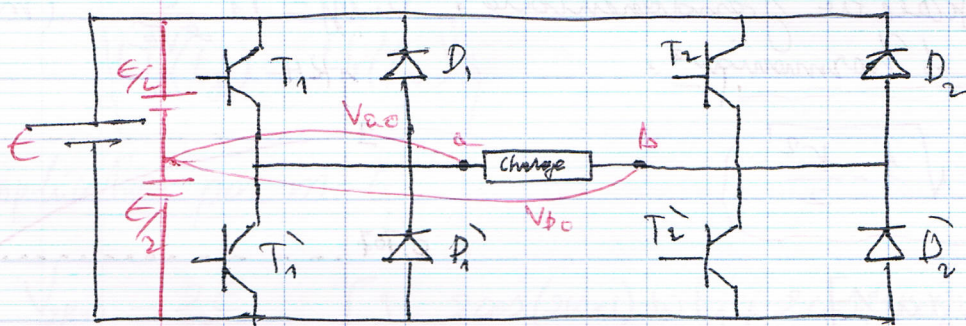
trouvons le rapport : $\frac{V_{2K+1} \text{ eff}}{\frac{\sqrt{2} \cdot E}{\pi}} = 1 + 2 \sum_{j=1}^{\frac{m-1}{2}} (-1)^j \cos(2K+1) \omega t_j$



Remarque : L'augmentation de m régit les 1^{er} harmoniques non nulle vers les fréquences élevées et facilite donc le filtrage

Onduleur monophasé en pont à MLI

Montage :



La référence : $V_r = V_{r1} = V_{r2} = \frac{E}{2} \sin \omega t$, $\omega = \frac{2\pi}{T}$

Stratégie de la commande :

Dem pont (T_1, T_1') : si $V_r > V_p \Rightarrow T_1 = 1$
si $V_r < V_p \Rightarrow T_1' = 1$

$$V_{bo} = \begin{cases} \frac{E}{2} & \text{si } T_1 = 1 \\ -\frac{E}{2} & \text{si } T_1' = 1 \end{cases}$$

Demi-pont (T_2, T_2')

si $V_r > V_p \Rightarrow T_2 = 1$

si $V_r < V_p \Rightarrow T_2 = 1$

$$V_{d0} = \begin{cases} \frac{E}{2} & \text{si } T_2 = 1 \\ -\frac{E}{2} & \text{si } T_2' = 1 \end{cases}$$

La tension aux bornes de la charge

$$V = U_{ab} = V_{d0} - V_{b0}$$

Les signaux de référence,

$$V_{r1} = r \cdot \frac{E}{2} \sin \omega t$$

$$V_{r2} = -r \cdot \frac{E}{2} \sin \omega t$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

Stratégie de la commande

Demi-pont (T_1, T_1')

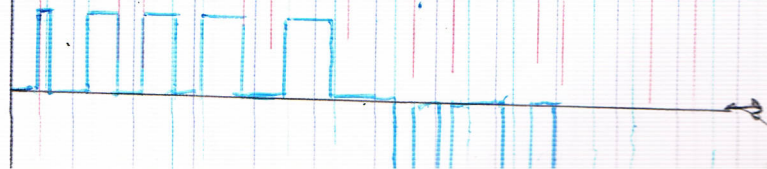
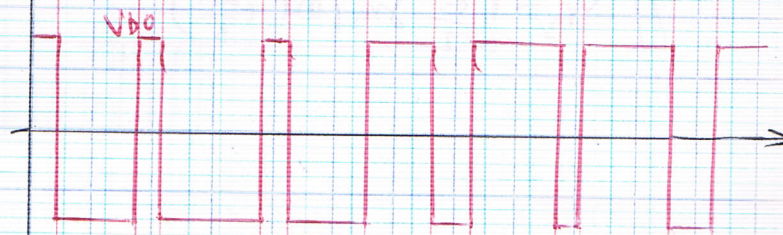
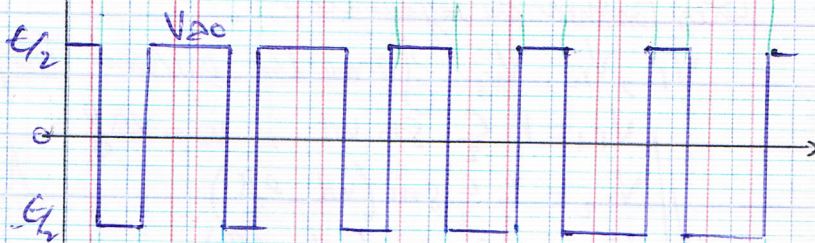
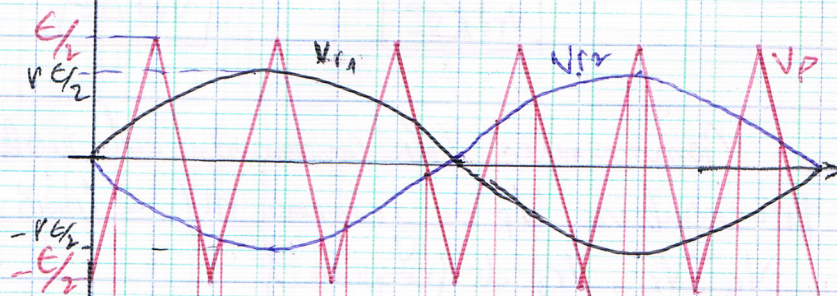
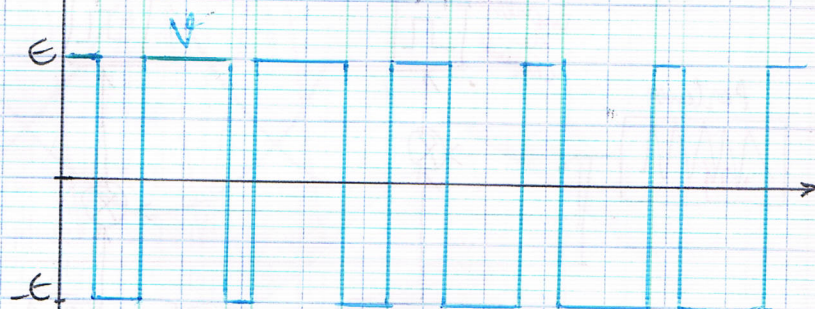
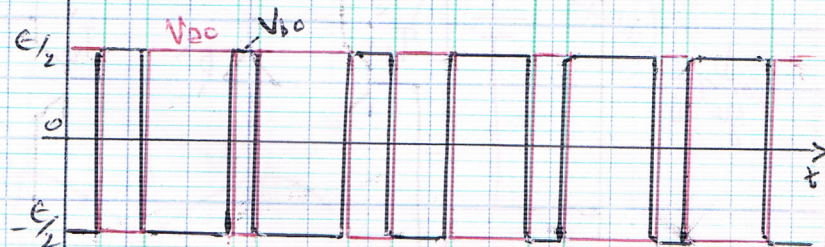
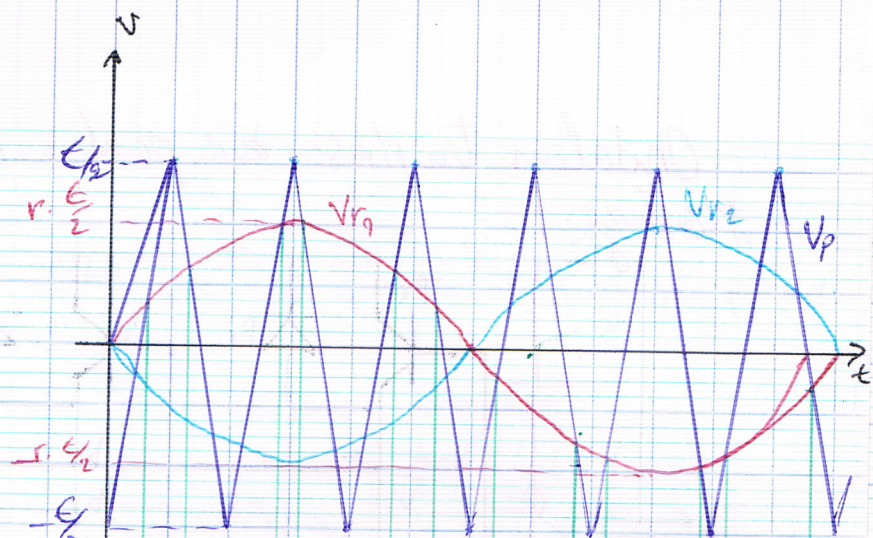
si $V_{r1} > V_p \Rightarrow T_1 = 1$

si $V_{r1} < V_p \Rightarrow T_1' = 1$

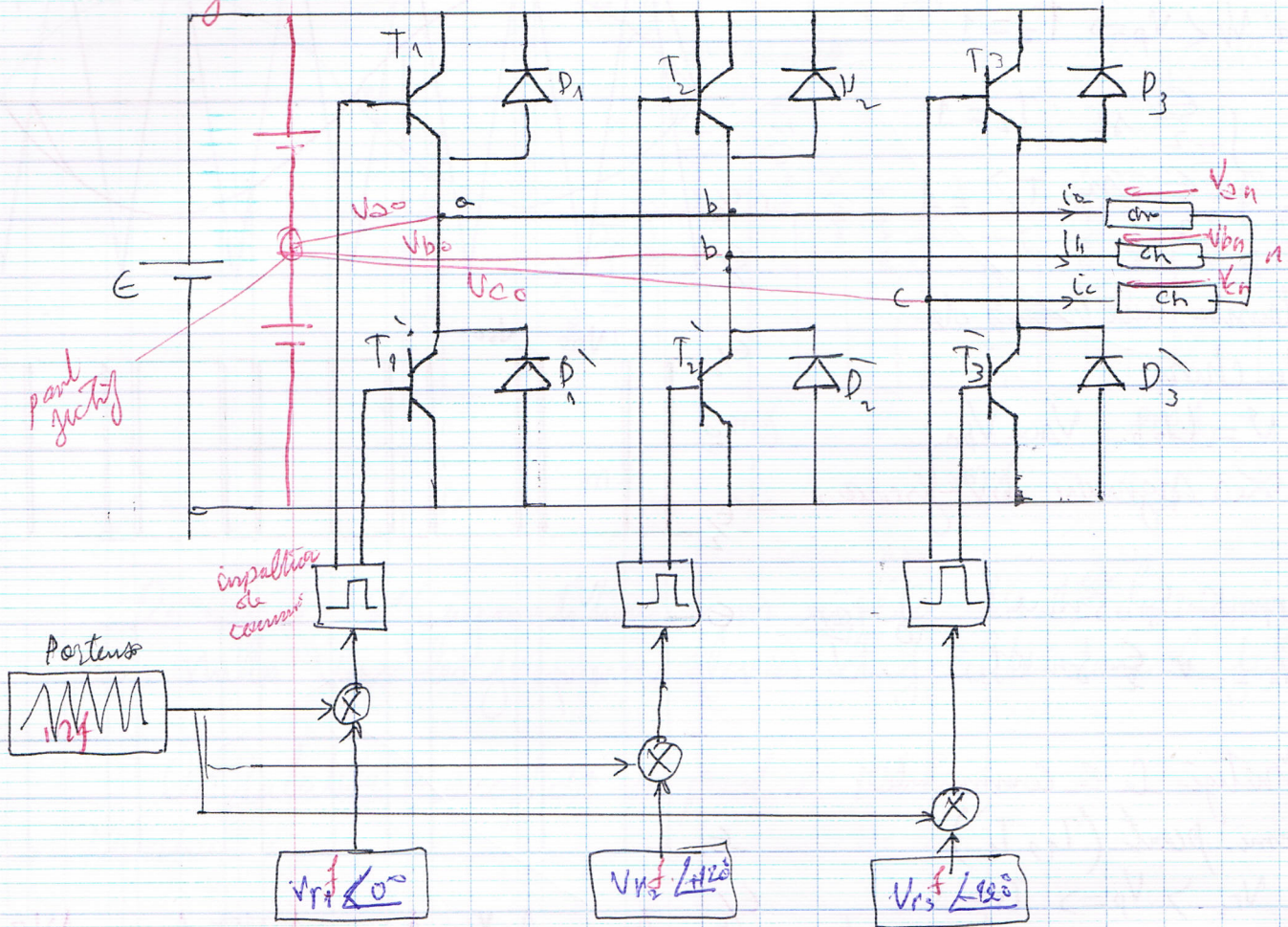
Demi-pont (T_2, T_2')

si $V_{r2} > V_p \Rightarrow T_2 = 1$

si $V_{r2} < V_p \Rightarrow T_2' = 1$



Onduleur triphasé en pont à MLI Montages



Commande: La commande est réalisée en comparant un signal triangulaire V_p de fréquence m_f à trois signaux sinusoïdaux de référence V_{r1}, V_{r2}, V_{r3} de fréquence f

Des tensions de référence

V_{r1}, V_{r2}, V_{r3} forme un système triphasé équilibré

$$V_{r1} = r \cdot \frac{E}{2} \sin \omega t, \quad \omega = 2\pi f$$

$$V_{r2} = r \cdot \frac{E}{2} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$V_{r3} = r \cdot \frac{E}{2} \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right)$$

Algorithme de commande

si $V_{r1} > V_p$ alors $T_1 = 1$ et $T_1' = 0$
 si $V_{r2} > V_p$ " $T_2 = 1$ et $T_2' = 0$
 si $V_{r3} > V_p$ " $T_3 = 1$ et $T_3' = 0$

Les tension fournies pas le demi-pont

$$V_{a0} = \begin{cases} \frac{E}{2} \text{ si } T_1=1 \\ -\frac{E}{2} \text{ si } T_1'=1 \end{cases}$$

$$V_{b0} = \begin{cases} \frac{E}{2} \text{ si } T_2=1 \\ -\frac{E}{2} \text{ si } T_2'=1 \end{cases}$$

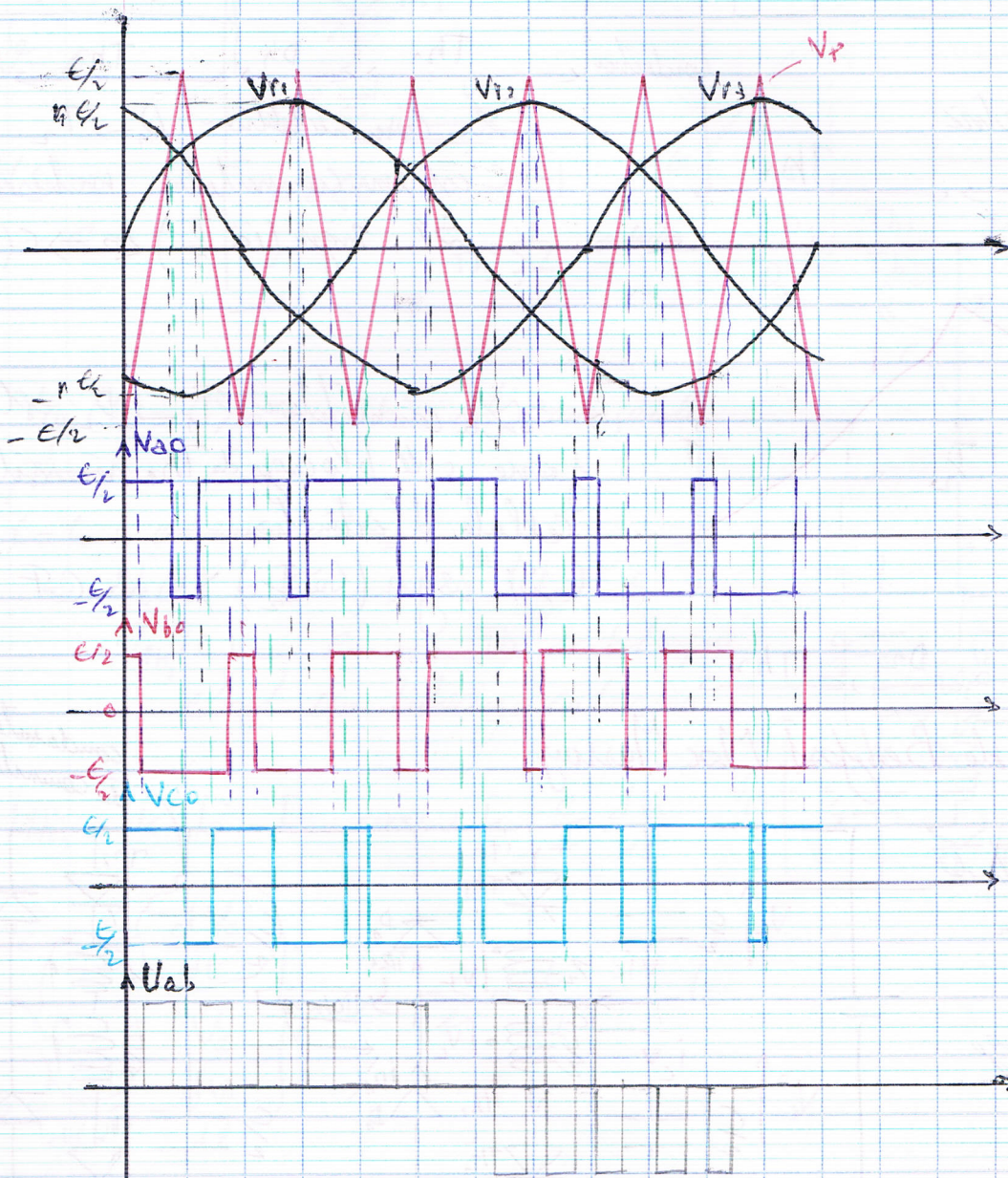
$$V_{c0} = \begin{cases} \frac{E}{2} \text{ si } T_3=1 \\ -\frac{E}{2} \text{ si } T_3'=1 \end{cases}$$

Tension Composées

$$\begin{aligned} U_{ab} &= V_{a0} - V_{b0} = -U_{ba} \\ U_{bc} &= V_{b0} - V_{c0} = -U_{cb} \\ U_{ca} &= V_{c0} - V_{a0} = -U_{ac} \end{aligned}$$

Tension simple

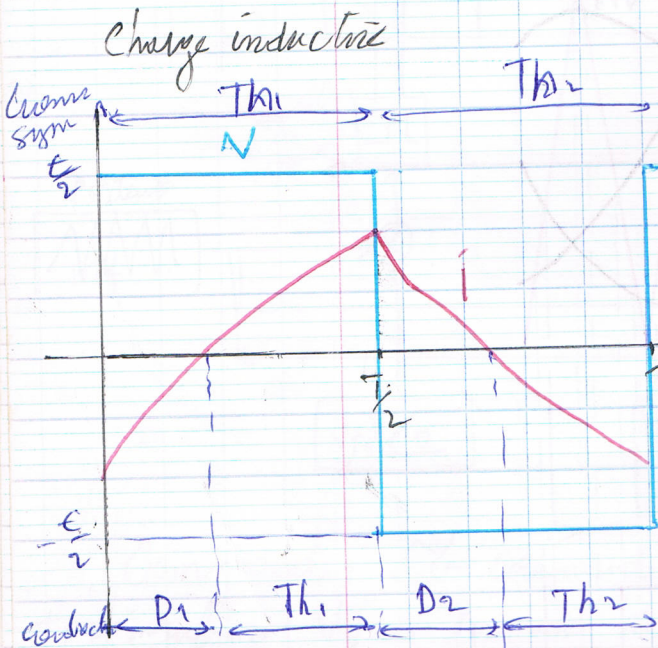
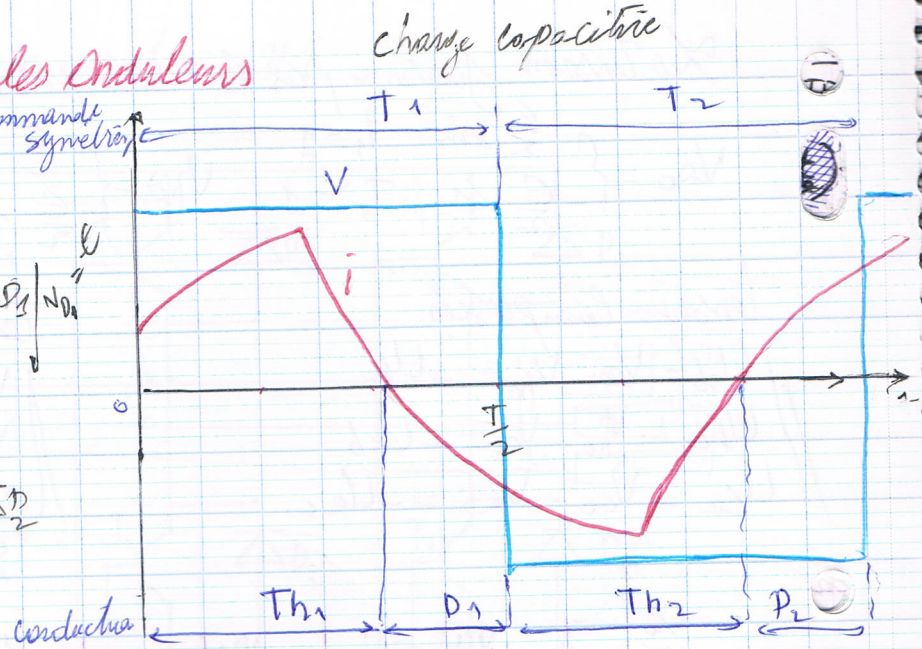
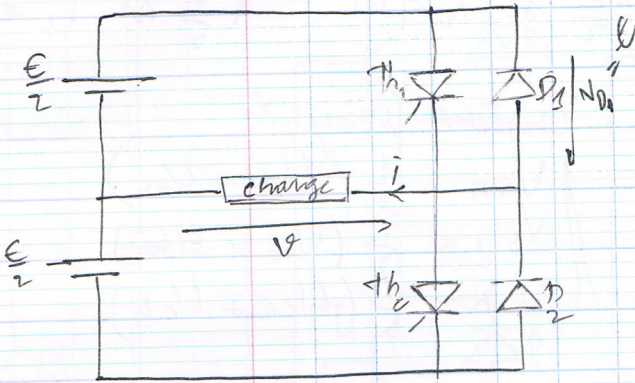
$$\begin{aligned} V_{an} &= \frac{1}{3} (U_{ab} + U_{ac}) \\ V_{bn} &= \frac{1}{3} (U_{bc} + U_{ba}) \\ V_{cn} &= \frac{1}{3} (U_{ca} + U_{cb}) \end{aligned}$$



17-05-2004

La commutation dans les Onduleurs

Position du Problème:



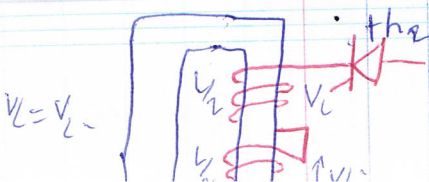
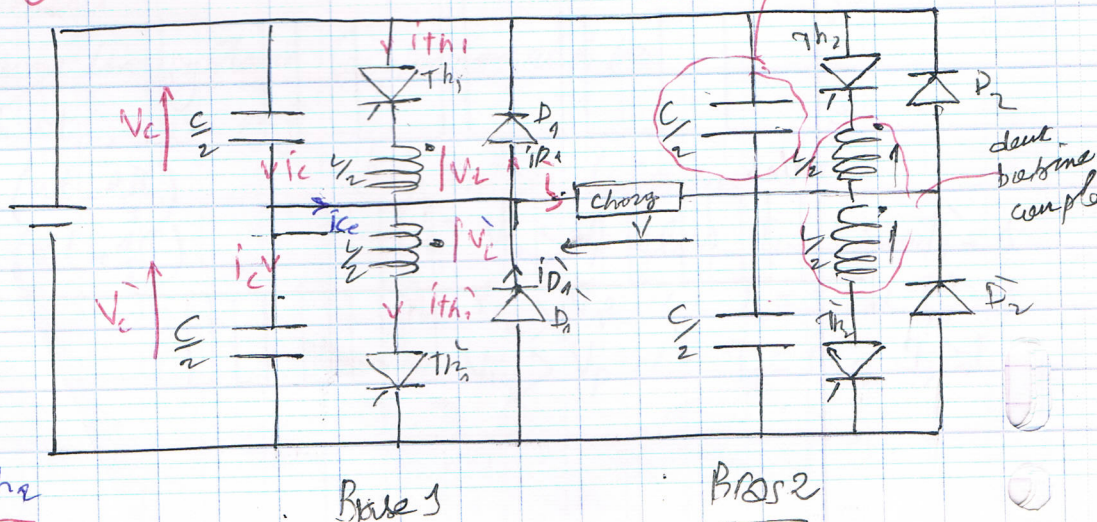
La commutation $D_1 \rightarrow T_2$
C'est une commutation naturelle
Si $\text{sign}(i \cos \frac{T}{2}) < 0 \Rightarrow C.N$

La commutation $T_1 \rightarrow D_2$ est
forcée, le blocage de Th_1 nécessite une
cellule d'extinction
Si $\text{sign}(i \cos \frac{T}{2}) > 0 \rightarrow C.F$

Onduleur de Bedford, Max Murray

Montage

Il s'agit de l'étude
de la commutation
forcée dans un
onduleur à blocage
en tension.



On suppose que les C^r dans la charge n'a pas le temps de varier durant la commutation passons $i = I = \text{constant}$

Étudions la commutation à $\frac{T}{2}$

$$(Th_1, Th_2) \xrightarrow[\text{forcée}]{\text{commutation}} (D_1, D_2)$$

$$\text{At } t = t_0 - \varepsilon, (t_0 = \frac{T}{2})$$

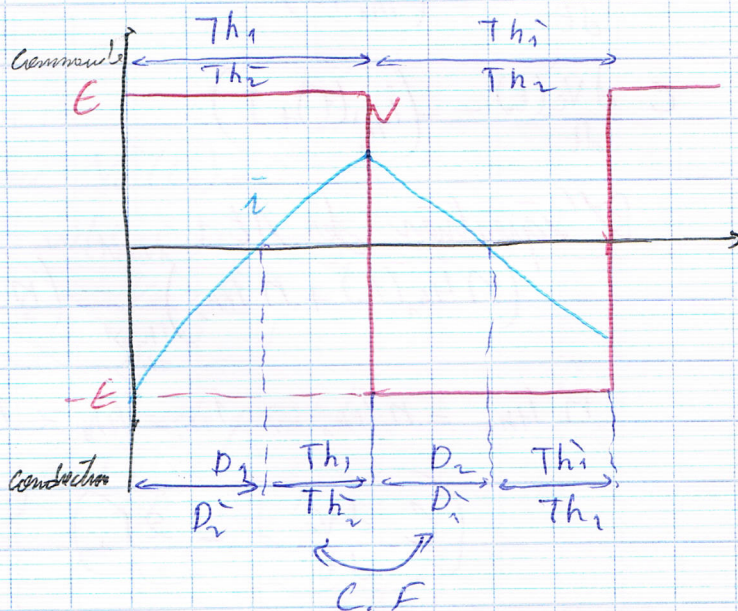
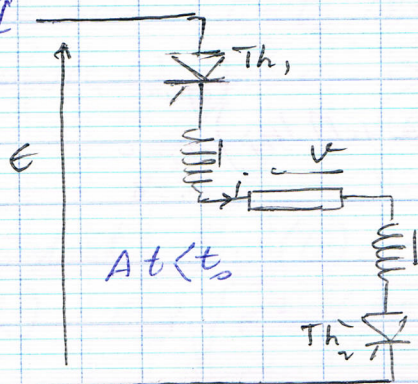
$$Th_1 = 1 \text{ et } Th_2 = 1$$

$$i_{Th_1}(t) = i_{Th_2}(t) = I$$

$$V_c = E$$

$$V_c(t_0) = 0$$

$$V_c'(t_0) = E$$



$$V_{Th_1}(t_0) = E > 0 \rightarrow Th_1 \text{ est amorçable}$$

1^{re} phase

$$\text{At } t = t_0, \text{ on amorce } Th_2$$

$$\Rightarrow V_c(t_0) = E \Rightarrow V_L'(t_0) = E$$

$$V_{Th_1}(t_0) = -E \Rightarrow Th_1 \text{ n'est pas bloquée}$$

c'est un blocage extension

$$i_{Th_1} = i_c - i_c' - I \text{ avec } i_c = \frac{C}{2} \frac{dV_c}{dt}$$

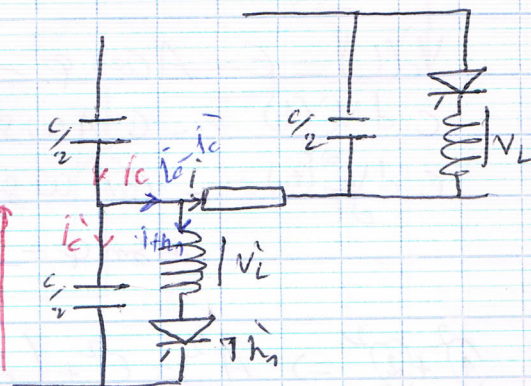
$$i_c = \frac{C}{2} \frac{dV_c}{dt}$$

$$V_c = E - V_L$$

$$\Rightarrow \frac{dV_c}{dt} = -\frac{dV_L}{dt}$$

$$i_c = -\frac{C}{2} \frac{dV_c'}{dt} = -i_c'$$

$$\Rightarrow i_{Th_1} = -\frac{C}{2} \frac{dV_c}{dt} - \frac{C}{2} \frac{dV_c}{dt} - I, \quad i_{Th_2} = -C \frac{dV_c}{dt} - I$$



$$\text{or: } V_c' = V_L' = \frac{L}{2} \frac{d i_{th_1}}{dt} = -\frac{LC}{2} \frac{d^2 V_c'}{dt^2}$$

$$V_c' + \frac{LC}{2} \frac{d^2 V_c'}{dt^2} = 0, \quad V_c'(t_0) = E$$

$$C \frac{dV_c'}{dt} = -(i_{th_1}' + I)$$

$$C \frac{dV_c'(t)}{dt} = -(i_{th_1}'(t) + I)$$

2' équation des At:

$$\left(n i_{th_1}(t_0) + n i_{th_1}' \right)_{\substack{\text{avant} \\ i_{th_1} \geq 1 \\ i_{th_1}' > 0}} = \left(n i_{th_1} + n i_{th_1}' \right)_{\substack{\text{après} \\ i_{th_1} = 0 \\ i_{th_1}' = I}}$$

$$n i_{th_1} = n i_{th_1}' \Rightarrow i_{th_1} = i_{th_1}' = I$$

$$\left(C \frac{dV_c'}{dt} = -2I \right)$$

La solution est de la forme:

$$V_c'(t) = A \cos[\omega(t-t_0) + \varphi], \quad \omega = \frac{1}{\sqrt{\frac{LC}{2}}}$$

$$V_c'(t_0) = E = A \cos \varphi \quad \text{--- (1)}$$

$$C \frac{dV_c'(t)}{dt} = -C A \omega \sin(\omega(t-t_0) + \varphi)$$

$$C \frac{dV_c'(t_0)}{dt} = -C A \omega \sin \varphi = -2I$$

$$A \sin \varphi = \frac{2I}{C\omega} \quad \text{--- (2)}$$

$$\text{(1)}^2 + \text{(2)}^2 \Rightarrow A^2 = E^2 + \left(\frac{2I}{C\omega} \right)^2 \Rightarrow A = \sqrt{E^2 + \left(\frac{2I}{C\omega} \right)^2}$$

$$\frac{\text{(2)}}{\text{(1)}} = \tan \varphi = \frac{2I}{C\omega E} \Rightarrow \varphi = \arctan \left(\frac{2I}{C\omega E} \right)$$

$$\text{d'où: } V_c'(t) = \sqrt{E^2 + \left(\frac{2I}{C\omega} \right)^2} \cos \left(\omega(t-t_0) + \arctan \left(\frac{2I}{C\omega E} \right) \right)$$

$$i_{th_1}' = -C \frac{dV_c'}{dt} - I = C\omega \sqrt{E^2 + \left(\frac{2I}{C\omega} \right)^2} \sin \left(\omega(t-t_0) + \varphi \right) - I$$

* $\vec{I}_c$? $\vec{I}_c = \vec{i}_c - \vec{i}_\phi = -C \frac{dV_c}{dt}$
 $= CW \sqrt{\epsilon^2 + \left(\frac{2I}{CW}\right)^2} \sin(\omega(t-t_0) + \varphi)$

* V_{th_1} ?
 $V_{th_1} = E - 2V_L(t)$
 $= E - \frac{L di_{th_1}}{dt}$

cette phase cesse à $t = t_2$ tel que $V_c(t_2) = 0$
 $\cos(\omega(t_2 - t_0) + \varphi) = 0 \Rightarrow \omega(t_2 - t_0) + \varphi = \frac{\pi}{2}$
 $\Rightarrow t_2 - t_0 = \frac{\pi/2 - \varphi}{\omega}$

À cet instant, $V_{D_1}(t_2) = 0 \Rightarrow D_1$ est passante
 $i_{th_1}(t_2) = CW \sqrt{\epsilon^2 + \left(\frac{2I}{CW}\right)^2} - I$

2^{ème} phase

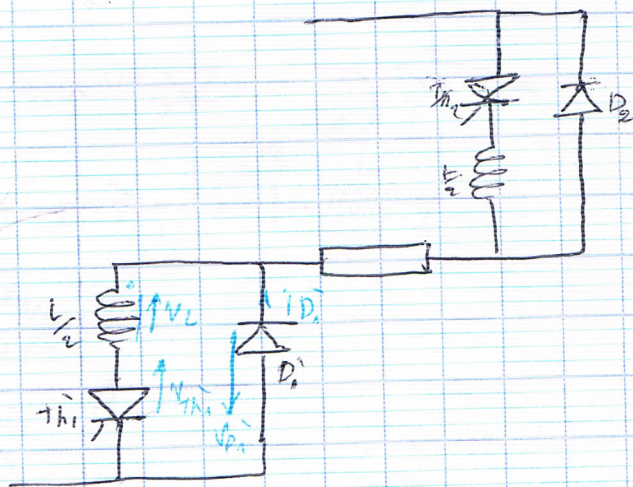
On va tenir compte des chutes de tension aux bornes des Sc

$V_L = \frac{1}{2} \frac{d i_{th_1}}{dt} = -(V_{th_1} + V_{D_1})$
 $= -\Delta V \neq 2V$

$\Rightarrow \dot{i}_{th_1} = -\frac{2\Delta V}{L}(t - t_2)$
 $+ CW \sqrt{\epsilon^2 + \left(\frac{2I}{CW}\right)^2} - I$

$t_3 - t_2 = \frac{L}{2\Delta V} \left(CW \sqrt{\epsilon^2 + \left(\frac{2I}{CW}\right)^2} - I \right)$

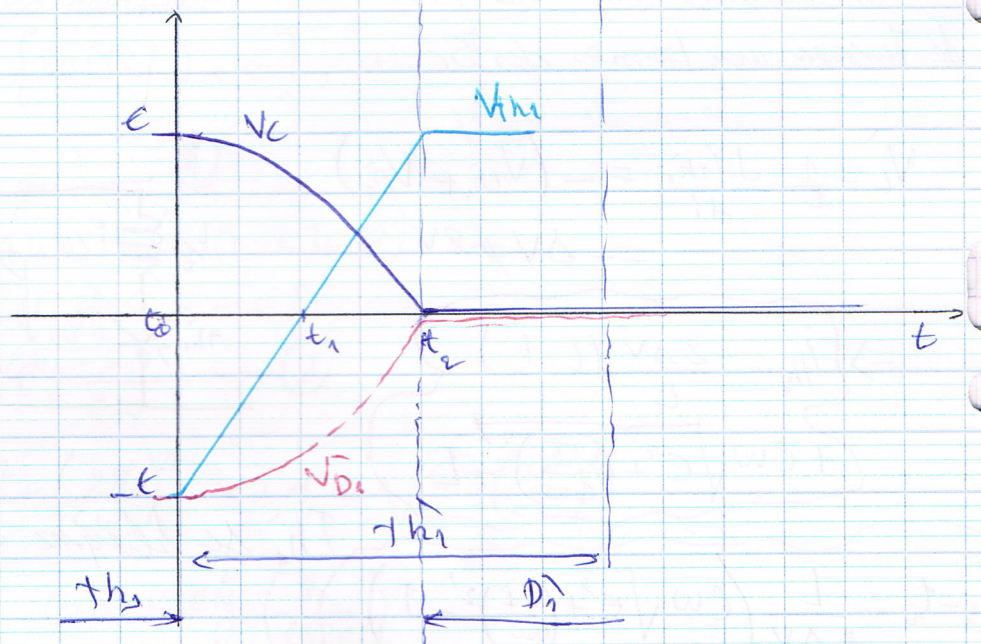
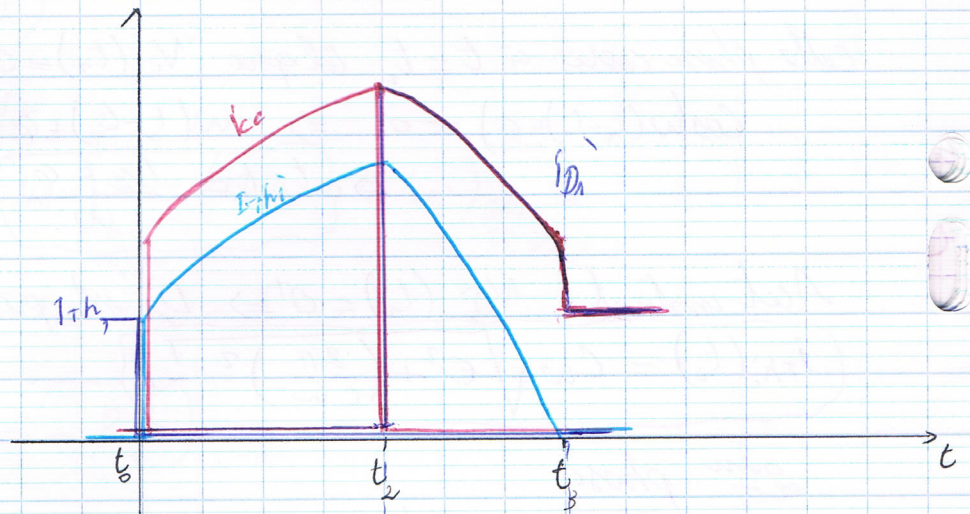
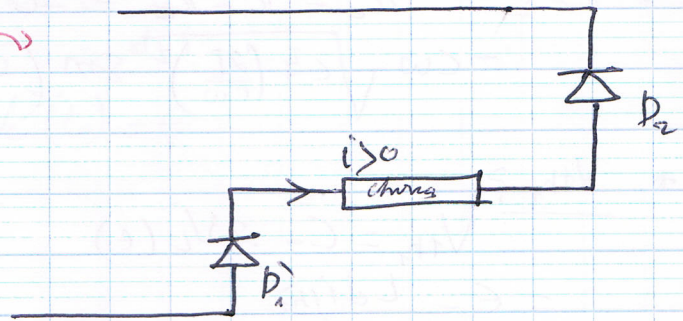
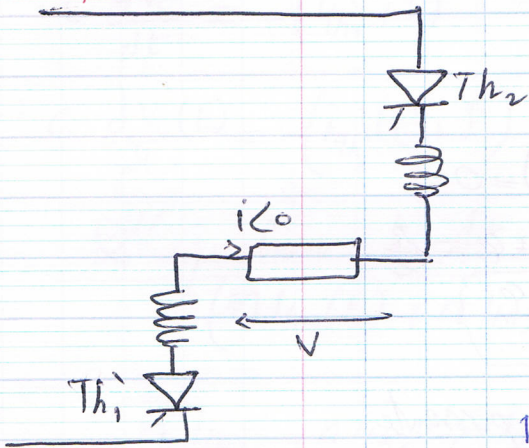
$i_{D_1}(t_3) = I$ — Fin commutation



Th_1 se bloque lorsque $i_{th_1}(t_3) = 0$

3rd phase

4th phase



Onduleur de Mœc Murry

Montage de principe

S'appliquent que

$i = I = \text{constant}$
durant la commutation

~~Comme~~

$$At < t_0 = \frac{T}{2}$$

Th conduit le courant i de la charge

$$V_c = \frac{E}{2}$$

$$V_c(t_0) = V_0 > 0$$

$$\Rightarrow V_{thc}(t_0) = V_c(t_0) = V_0 > 0$$

$\Rightarrow Tha$ est amorçable

1^{er} phase:

A $t = t_0$, amorçer Tha

$$V_c - V_L = 0$$

$$V_L = L \frac{di_L}{dt}$$

$$I_L = -i_c = -C \frac{dV_c}{dt}$$

$$V_L = -Lc \frac{d^2 V_c}{dt^2} \Rightarrow \begin{cases} V_c + Lc \frac{d^2 V_c}{dt^2} = 0 \\ V_c(t_0) = V_0 \end{cases}$$

La solution de cette équation est de la forme:

$$V_c(t) = V_0 \cos \omega(t - t_0) \quad \omega = \frac{1}{\sqrt{Lc}}$$

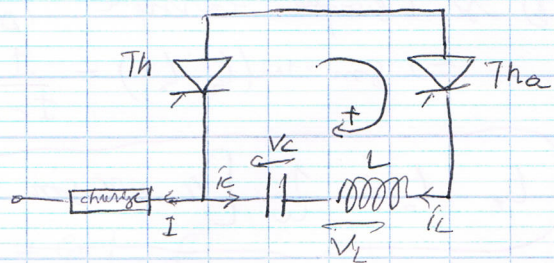
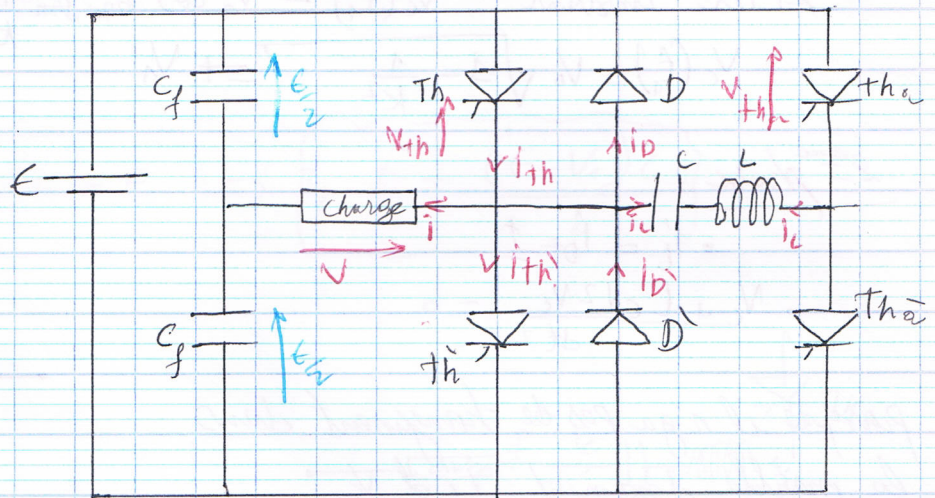
$$i_c = -I_c - C \frac{dV_c}{dt} = C\omega V_0 \sin \omega(t - t_0) = I_{cm} \sin \omega(t - t_0), \quad I_{cm} = C\omega V_0$$

$$i_{th} = I - i_c$$

$$= I - I_{cm} \sin \omega(t - t_0)$$

Th se bloque lorsque $i_{th}(t_1) = 0$

$$\Rightarrow \sin \omega(t_1 - t_0) = \frac{I}{I_{cm}} = \frac{1}{K}$$



$$t_1 - t_0 = \frac{1}{\omega} \arcsin \frac{1}{K}$$

A cet instant $V_c(t_1) = V_0 \cos \arcsin \frac{1}{K}$

$$V_c(t_1) = V_0 \sqrt{1 - \frac{1}{K^2}} = V_1$$

2^{ème} phase :

- $i_L = I_D + I$
- $V_c + L \frac{d^2 V_c}{dt^2} = 0$

puisque il n'y a pas de changement dans la maille contenant i_L et V_c

$$\Rightarrow V_c = V_0 \cos \omega(t - t_0)$$

$$i_L = I_{CM} \sin \omega(t - t_0)$$

$$I_D = I_{CM} \sin \omega(t - t_0) - I_L$$

D se bloque lorsque $i_D(t_2) = 0$

$$\Rightarrow \sin \omega(t_2 - t_0) = \frac{I}{I_{CM}} = \frac{1}{K}$$

$$t_2 - t_0 = \frac{1}{\omega} \left[\pi - \arcsin \frac{1}{K} \right]$$

A cet instant $V_c(t_2) = -V_0 \cos \arcsin \frac{1}{K}$

$$V_c(t_2) = -V_0 \sqrt{1 - \frac{1}{K^2}} = -V_1$$

3^{ème} phase :

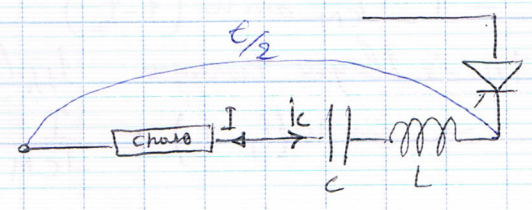
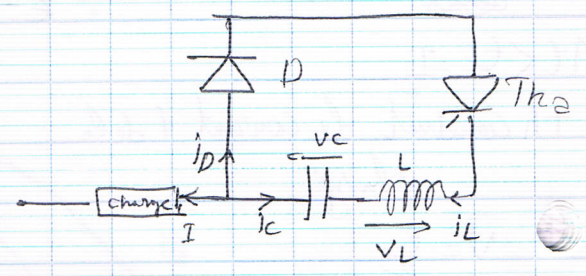
$$V_D(t_2) = V_L - V_c - E \neq V_1 - E$$

① Si $V_1 < E \Rightarrow V_D(t_2) < 0 \Rightarrow D$ reste bloquée

$$i_C = -I$$

$$\begin{cases} C \frac{dV_c}{dt} = -I \\ V_c(t_2) = -V_1 \end{cases}$$

$$V_c(t) = -\frac{I}{C}(t - t_2) - V_1$$



$$V = \frac{E}{2} + V_c = \frac{E}{2} - \frac{I}{C}(t - t_2) - V_1$$

D' entre en conduction à $t = t_3$
tel que $V_D(t_3) \geq 0$

$$-V_c(t_3) - E \geq 0$$

$$V_c(t_3) < -E$$

$$-\frac{I}{C}(t_3 - t_2) - V_1 = -E \Rightarrow t_3 - t_2 = \frac{(E - V_1)C}{I}$$

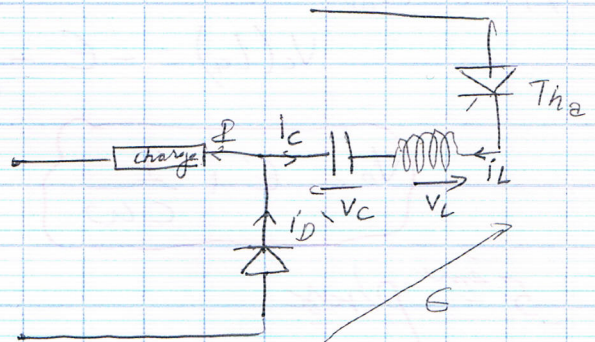
$$V(t_3) = -\frac{E}{2}$$

4^{ème} phase

$$E = V_L - V_c$$

$$I = I_L + I_D$$

$$V_L = L \frac{di_L}{dt}, \quad i_L = -I = -C \frac{dV_c}{dt}$$



$$V_c + L C \frac{d^2 V_c}{dt^2} = -E$$

$$V_c(t_3) = -E$$

$$i_c(t_3) = -I$$

$$V_c(t) = A \cos[\omega(t - t_3) + \varphi] - E$$

calcul de φ

$$V_c(t_3) = -E \Rightarrow A \cos \varphi - E = -E$$

$$\varphi = \frac{\pi}{2}$$

calcul de A

$$\Rightarrow V_c(t) = -A \sin \omega(t - t_3) - E$$

$$i_c = C \frac{dV_c}{dt} = -A \omega C \cos \omega(t - t_3)$$

$$i_c(t_3) = -I = -A \omega C \Rightarrow A = \frac{I}{C \omega}$$

d'où :

$$V_L(t) = -\frac{I}{C \omega} \sin \omega(t - t_3) - E$$

$$i_L = -C \frac{dV_C}{dt} = I \cos \omega(t - t_3)$$

Tha se bloagne larysne $i_{th}(t_4) = 0 = i_L(t_4)$

$$\Rightarrow \cos \omega(t_4 - t_3) = 0$$

$$t_4 - t_3 = \frac{\pi}{2\omega}$$

At instant:

$$V_C(t_4) = -E - \frac{I}{\omega C} = -V_0$$

$$V_0 = E + \frac{I}{\omega C}$$

5^{ème} phase

6^{ème} phase

