

# **TD ELECTRONIQUE DE PUISSANCE**

## **Fascicule de Travaux Dirigés**

**Elaboré par: SOYED Abdessamī  
Agréé en Génie Electrique  
Maître Technologue à l'ISET de Nabeul**

**Session: 2013**

## Avant propos

Ce manuel de Travaux Dirigés d'Electronique **de puissance** est un complément du manuel de cours, c'est un outil qui permet aux étudiants du réseau des Instituts Supérieurs des Etudes Technologiques de suivre les cours cités avec un maximum de profit. Il s'adresse également aux étudiant de la section B.T.S et ingénieurs préparant des concours d'agrégation ou technologique, Il est recommandé aux étudiants préparant leurs mastère.

Par ailleurs, il est utile pour les enseignants qui désirent améliorer, progresser et posséder un fondement en cette matière.

## Sommaire

---

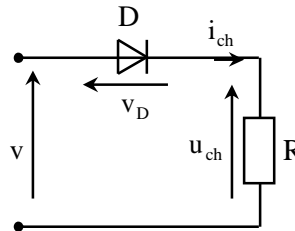
TD1: LES REDRESSEURS NON COMMANDES .....	2
CORRECTION DU TD1 .....	6
TD2: LES REDRESSEURS COMMANDES .....	14
CORRECTION DU TD2 .....	22
TD3: LES HACHEURS .....	34
CORRECTION DU TD3 .....	40
TD4: LES GRADATEURS .....	43
CORRECTION DU TD4 .....	47
TD 5: LES ONDULEURS .....	50
CORRECTION DU TD5 .....	58
ANNEXE .....	60
ANNEXE 1 : ABAQUE POUR LES MONTAGES REDRESSEURS MONOPHASES .....	61
ANNEXE 2 : ABAQUE POUR LES MONTAGES REDRESSEURS TRI PHASES .....	62
ANNEXE 3: ABAQUE POUR LES MONTAGES GRADATEURS TRI PHASES .....	63

TD1: Les redresseurs non commandés

**Exercice 1 :**

Soit le circuit de la figure suivante, il est alimenté par une tension sinusoïdale dont la valeur est donnée par :  $v(t)=220\sqrt{2}\sin(100\pi t)$ . On donne la valeur de la résistance de charge  $R = 50\Omega$ .

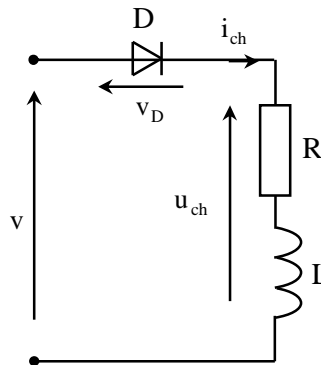
1. Représenter  $v(\theta)$ ,  $i_{ch}(\theta)$ ,  $u_{ch}(\theta)$  et  $v_D(\theta)$ ,
2. Calculer la valeur moyenne de la tension de charge,
3. Calculer la tension inverse aux bornes de la diode D,
4. Comment peut-on choisir l'interrupteur (D),
5. Calculer la puissance moyenne délivrée à la charge,
6. Calculer la puissance apparente,
7. En déduire la valeur du facteur de puissance ( $f_p$ ),
8. Calculer le facteur d'ondulation (k)



**Exercice 2:**

On alimente une charge de type (RL) à travers une diode de redressement, par une tension sinusoïdale instantanée:  $v(t)=220\sqrt{2}\sin(100\pi t)$ , comme l'indique la figure ci-dessous.

On donne  $R=50\Omega$  et  $L=0.5H$ .



1. Tracer l'allure des grandeurs:  $v(\theta)$ ,  $u_{ch}(\theta)$  et  $i_{ch}$ ,
2. Etablir l'expression du courant de charge :  $i_{ch}(t)$ ,
3. Calculer la valeur moyenne de la tension de charge,

On rajoute aux bornes du circuit de charge du montage précédent une diode de roue libre.

4. Dessiner le schéma de montage correspondant,
5. Tracer de nouveau l'allure des grandeurs:  $v(\theta)$ ,  $u_{ch}(\theta)$  et  $i_{ch}$
6. En déduire la valeur moyenne de la tension de charge,
7. Quelle est l'utilité d'utiliser cette diode de roue libre.

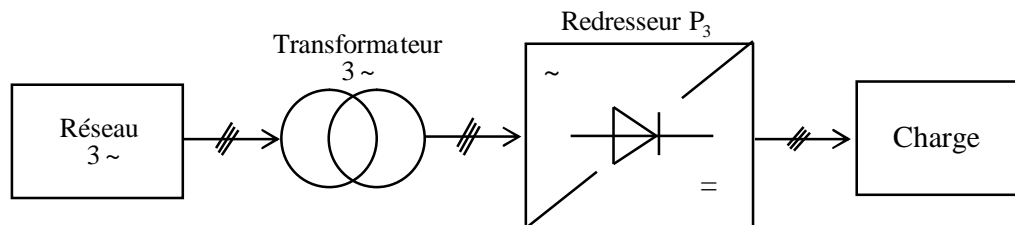
**Exercice 3:**

On alimente à travers un montage redresseur de type  $PD_2$  à diodes, une charge fortement inductive qui réclame un courant de charge moyen  $(i_{ch})_{moy} = I = 100A$  et une puissance moyenne  $(p_{ch})_{moy} = 30kW$

1. Dessiner ce montage redresseur,
2. Calculer les contraintes en courants sur une diode,
3. Calculer la tension inverse maximale  $(V_{inD})_{max}$  aux bornes d'une diode,
4. Calculer les valeurs du courant et de la tension efficaces du primaire, pour un rapport de transformation  $m = 0.5$ ,
5. En déduire le facteur de puissance primaire ( $f_p$ ).

**Exercices 4:**

Un redresseur  $P_3$  à diodes à cathodes communes, alimente successivement une charge de type inductive, une autre de type résistive, à travers un transformateur triphasé, dont le schéma synoptique est donnée par la figure suivante.



On donne les caractéristiques :

- Transformateur triphasé:  $Y_{Y1}$ , 30/10kV-50Hz, Rapport de transformation  $m=0.75$ ,
- Charge résistive :  $R = 20\Omega$ ,
- Charge fortement inductive.

**Partie 1:**

On suppose dans cette partie, que la charge est à cratère inductive, ( $i_{ch}=I$ ), on néglige les imperfections du transformateur et de interrupteurs.

1. Dessiner le montage redresseur de type  $P_3$ , (en précisant les différentes grandeurs),
2. Calculer la valeur moyenne de la tension de charge,
3. Tracer la loi d'évolution de grandeurs :
  - ❖ Tension de charge  $u_{ch}$  ;
  - ❖ Tension aux bornes de la diode  $D_2$ , en déduire sa valeur maximale,
  - ❖ Courant ( $i_1$ ) qui circule dans la phase primaire du transformateur.

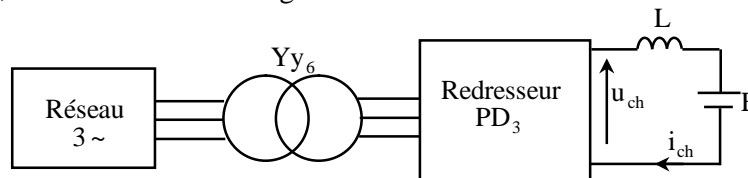
**Partie 2:**

La charge est un résistance et que son courant non plus constant ( $i_{ch} \neq I$ ).

1. Tracer l'allure du courant Dans la diode  $D_1$  :  $i_{D1}$ ,
2. Tracer l'allure dans la première phase du transformateur ( $i_1$ ).

**Exercice 5 :**

Un transformateur triphasé ( $Yy_6$ ) supposé parfait est alimenté par le secteur 400V/230V-50Hz. Le secondaire est relié à un redresseur à diodes de type  $PD_3$ . Le secondaire alimente une charge de type (L, E), comme le montre la figure contre:



On admet que la tension  $E$  est constante et égale à 250V. Tous les éléments considérés sont parfaits. Le courant dans la charge vaut ( $i_{ch}=I=15A$ ).

La tension simple secondaire est notée par  $V$ .

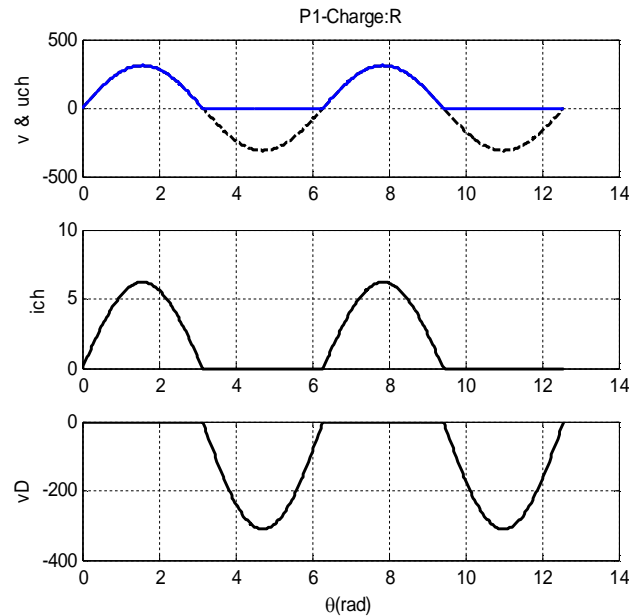
1. Dessiner le transformateur et le montage  $PD_3$  conformément aux données de l'énoncée,
2. Tracer l'allure de la tension de charge ( $u_{ch}$ ), ainsi que la tension ( $v_{D3}$ ) aux bornes de la diode  $D_3$ , en déduire la valeur moyenne de ( $u_{ch}$ ) en fonction de la tension  $V$ ,
3. justifier l'égalité  $\langle u_{ch} \rangle = E$ ,
4. Tracer l'allure du courant dans la première phase, en déduire sa valeur efficace,
5. Déterminer alors la puissance apparente  $S_n$  du transformateur.

Correction du TD1



**Exercice 1:**

1. Allure des grandeurs :  $v(\theta)$ ,  $i_{ch}(\theta)$ ,  $u_{ch}(\theta)$  et  $v_D(\theta)$  :



2. Valeur moyenne de la tension de charge :  $(u_{ch})_{moy} = \frac{V_m}{\pi} = \frac{220 \cdot \sqrt{2}}{\pi} = 99V$

3. Valeur maximale aux bornes de la diode inverse diode :  $(v_D)_{inv\_max} = V_m = 220 \cdot \sqrt{2} = 311V$

4. L'interrupteur doit avoir une tension inverse supérieure à  $V_m = 220 \cdot \sqrt{2} = 311V$  et courant

supérieure à  $I_m = \frac{V_m}{R} = \frac{220 \cdot \sqrt{2}}{50} = 6.22A$

5. La puissance moyenne (active) de la charge:  $(P_{ch})_{moy} = P = (u_{ch} i_{ch})_{moy} = \frac{V_m^2}{2R} = 968W$

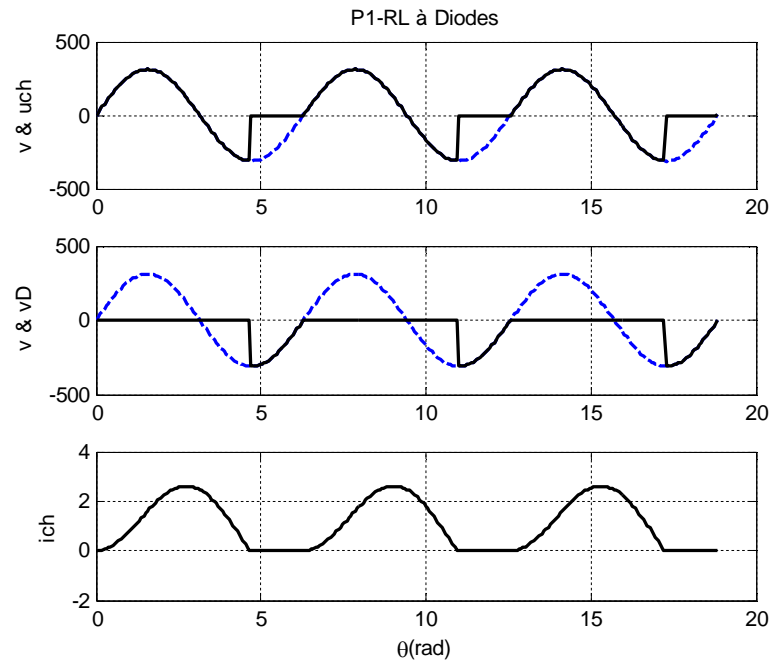
6. La puissance apparente de la charge:  $S = (u_{ch})_{eff} \cdot (i_{ch})_{eff} = \frac{V_m^2}{\sqrt{2}R} = 1368.96VA$

7. Facteur de puissance :  $\frac{P}{S} = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0.707$

8. Le facteur d'ondulation est définit par :  $k = \frac{(u_{ch})_{max} - (u_{ch})_{min}}{2(u_{ch})_{moy}} = \frac{\pi}{2}$

**Exercice 2:**

1. Allure des grandeurs:  $v(\theta)$ ,  $u_{ch}(\theta)$  et  $i_{ch}$



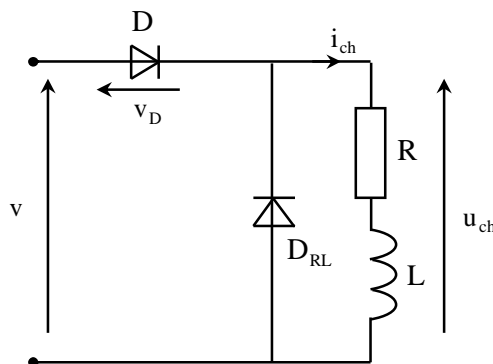
2. Expression du courant de charge :

$$i_{ch}(t) = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + (L\omega)^2}} \left( \sin(\omega t - \varphi) + \sin(\varphi) e^{-\frac{\omega t}{\tan(\varphi)}} \right) = i_{ch}(t) = 1.887 \left( \sin(\omega t - 1.26) + 0.95 e^{-\frac{\omega t}{3.14}} \right)$$

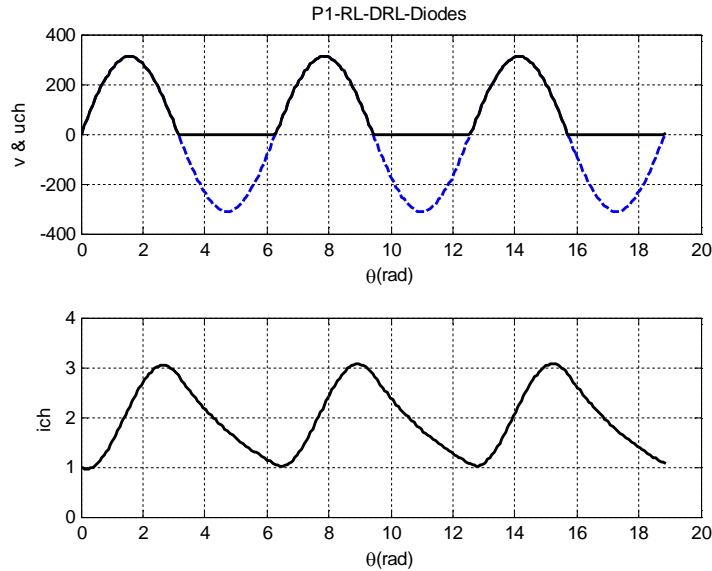
Avec :  $\tan(\varphi) = \frac{L\omega}{R} = \tau \cdot \omega$ .

3. Valeur moyenne de la tension de charge :  $(u_{ch})_{moy} = \frac{V_m}{2\pi} [1 - \cos(\theta_c)] = \frac{V_m}{2\pi} [1 + \cos(\varphi)] = 64.7V$

4. Schéma de montage avec diode de roue libre :



5. Allure des grandeurs:  $v(\theta)$ ,  $u_{ch}(\theta)$  et  $i_{ch}$

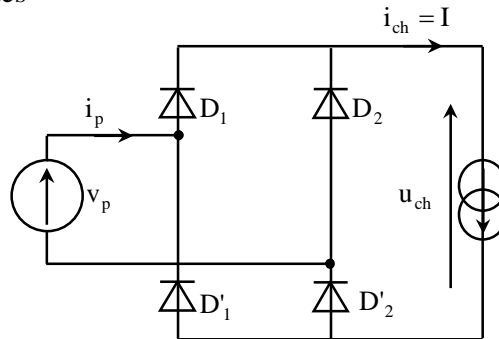


6. Valeur moyenne de la tension de charge :  $(u_{ch})_{moy} = \frac{V_m}{\pi} = 99V$

7. Ce dispositif permet de réduire l'ondulation du courant dans le récepteur et permet un régime de conduction continu si la charge est fortement inductive.

**Exercice 3:**

1. Montage PD<sub>2</sub> à diodes



2. Contraintes en courant:  $i_{chmax} = I = 100A$  ;  $i_{cheff} = \frac{I}{\sqrt{2}} = 70.71A$  et  $i_{chmoy} = \frac{I}{2} = 50A$  .

3. Tension inverse d'une diode:  $V_m = \frac{\pi}{2} \times \frac{P_{ch}}{I} = 471.24V$  ; D'où  $(v_{in})_{max} = V_m = 471.24V$

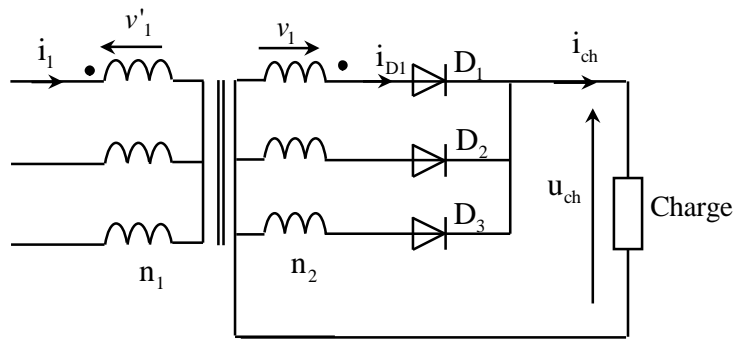
4. Valeurs efficaces du courant et de la tension:  $I_p = m \cdot I = 50A$  ;  $V_p = \frac{V_s}{m} = \frac{V_m}{m\sqrt{2}} = 666.43V$

5. Le facteur de puissance :  $f_p = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\pi} = 0.9$

**Exercice 4:**

**Partie 1:**

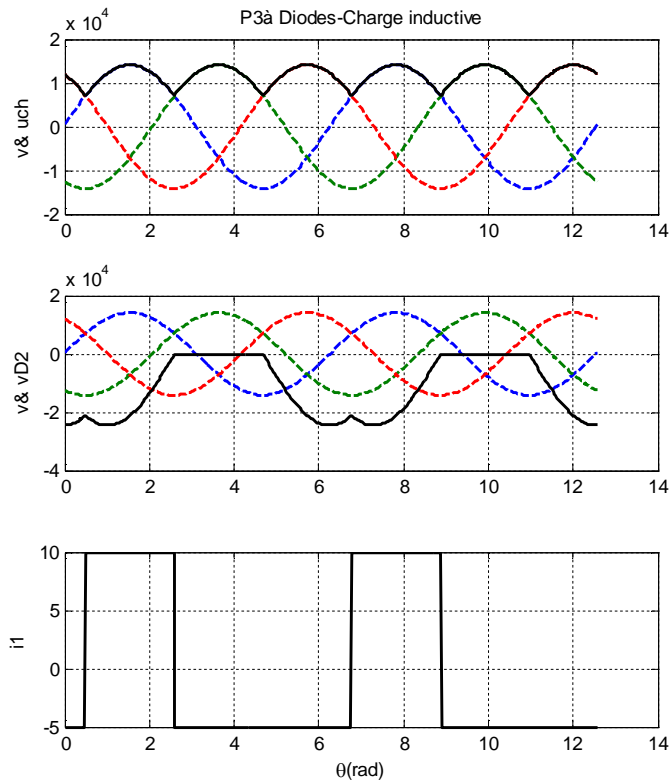
1. Montage  $P_3$  à diodes à cathodes communes



2. Valeur de la tension moyenne :  $(u_{ch})_{moy} = U_{ch0} = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} V_s = 11.695 \text{ kV}$

3. Allures des grandeurs:  $u_{ch}$ ,  $v_{D2}$  et  $i_1$

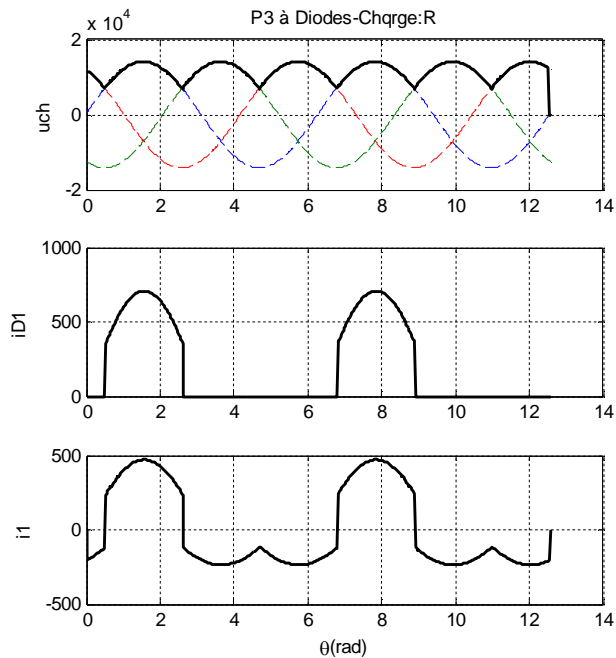
- Tension de charge :  $u_{ch} = \sup(v_1, v_2, v_3)$  ;
- Tension de la diode D2:  $v_{D2} = v_2 - \Delta u_{ch}$  ;
- Courant primaire (phase1) :  $i_1 = m(i_{D1} - \frac{I}{3}) = m(i_{D1} - \frac{U_{ch0}}{3R}) = 0.75(i_1 - 0.39)$  .



Courbes:  $u_{ch}$  ;  $v_{D2}$  et  $i_l$

## Partie 2:

### 1. Loi de variation des grandeurs : $u_{ch}$ ; $i_{D1}$ et $i_l$



Courbes:  $u_{ch}$  ;  $i_{D1}$  et  $i_l$

## 2. Loi de variation de $i_1$

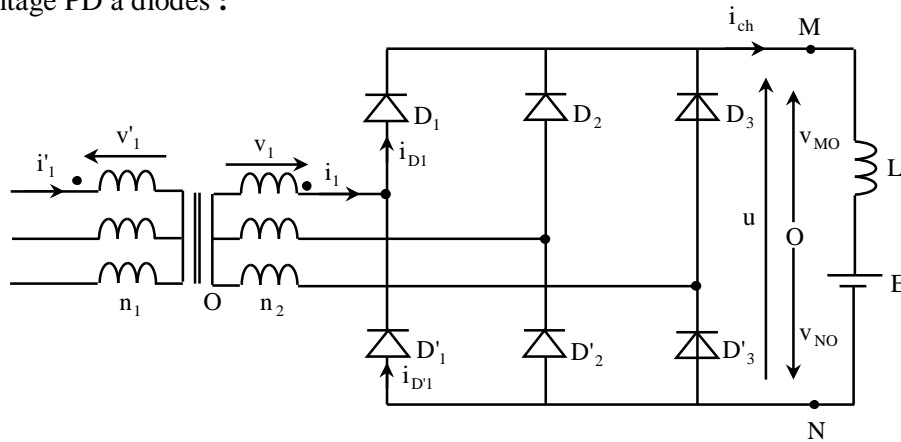
- $(i_{ch})_{moy} = \frac{(u_{ch})_{moy}}{R} = 585A$  ;  $(i_{ch})_{max} = \frac{(u_{ch})_{max}}{R} = 707A$

- $(i_{D1})_{moy} = \frac{(i_{ch})_{moy}}{3} = 195A$

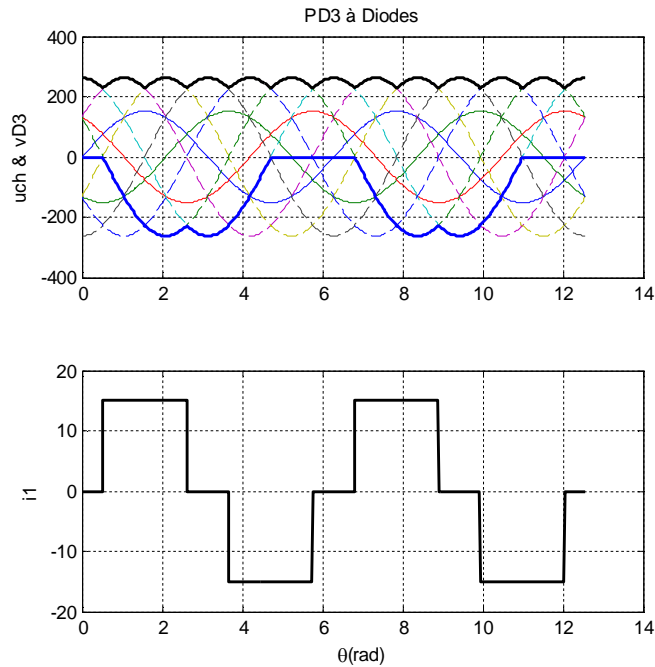
- $i_1 = m(i_{D1} - \frac{(i_{D1})_{moy}}{3}) = 0.75(i_{D1} - 195)$ .

### Exercice 5:

#### 1. Montage PD à diodes :



#### 2. Allures: $u_{ch}$ , $v_{D3}$ et $i_1$



❖ La tension moyenne de charge:  $\langle u_{ch} \rangle = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V$

3. Le courant de charge est constant par conséquent on peut écrire que :  $\langle u_{ch} \rangle = E$

4. Courant efficace:  $(i_1)_{eff} = I_1 = I \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} = 12.25 A$

5. Puissance apparente:

On calcule la tension efficace:  $(v_1)_{eff} = V = \frac{\pi}{3\sqrt{6}} \cdot (u_{ch})_{moy} = 106.9 V$  ; par suite la puissance apparente

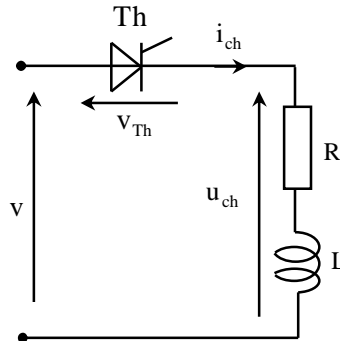
est donnée par :  $S_n = 3VI_1 \approx 3.93 KVA$

TD2: Les redresseurs commandés



**Exercice1:**

On considère le circuit de figure ci-dessous, qui comporte un thyristor (Th) en série avec une charge inductive.



La source émet un courant de tension sinusoïdale de la forme:  $v(t)=300\sin(800\pi t)$

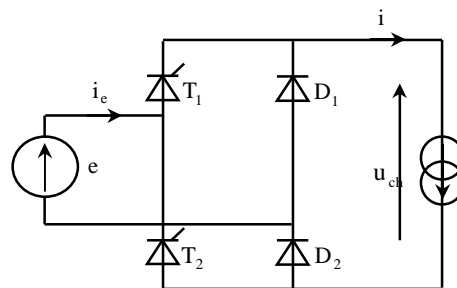
La charge est formée par des éléments ( $R=15\Omega$  et  $L=3.45\text{mH}$ ). On amorce le thyristor à l'instant

$t_0$  tel que  $\omega t_0 = \alpha = \frac{\pi}{4}$ .

1. Etablir l'équation différentielle qui régit l'évolution ( $i$ ) en fonction du temps,
2. On pose  $i_1 = \frac{Ri}{V_m}$ ,  $\theta = \omega t$  et  $v_1 = \frac{v}{V_m}$ , transformer l'équation différentielle précédente en utilisant ces variables réduites,
3. Résoudre l'équation différentielle,
4. Représenter l'expression du courant  $i$  ( $\theta$ ) dans l'intervalle  $[\alpha, \beta]$ ,
5. Calculer la valeur moyenne de la tension de charge.

**Exercice 2:**

Soit le montage PD<sub>2</sub> asymétrique, qui est alimenté par une tension sinusoïdale, comme le montre la figure suivante:



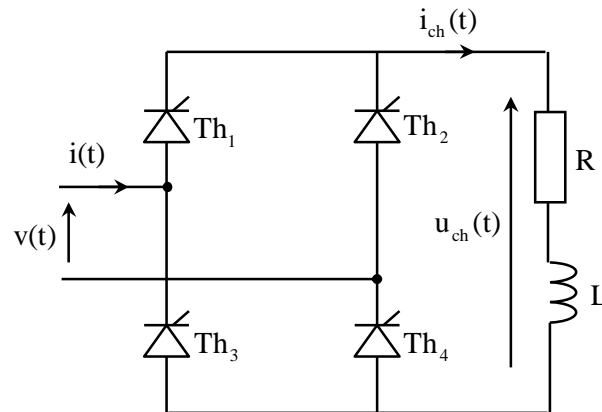
La valeur maximale de ( $e$ ) est ( $V_m=230\sqrt{2}$  V), alors que la courant dans la charge est supposé constant ( $i=I=10\text{A}$ ).

**Pour un angle d'amorçage :** ( $\alpha=30^\circ$ )

1. Représenter l'allure de la tension ( $u$ ), en déduire sa valeur moyenne,
2. Représenter l'allure de la tension ( $v_{T1}$ ),
3. Représenter l'allure des courants dans les redresseurs du premier bras,
4. Représenter l'allure du courant ( $i_e$ ),
5. En déduire le déphasage  $\varphi=(\vec{E}, \vec{I}_e)$  ;

**Exercice 3 :**

Le pont représenté (figure ci-dessous) alimente une charge appelant un courant pouvant être considéré parfaitement lissé. On néglige les régimes transitoires. On note  $\alpha$  l'angle de retard à l'amorçage des thyristors.



1. Pour les angles  $(\frac{\pi}{3})$  et  $(\frac{2\pi}{3})$ , préciser les intervalles de conduction des thyristors et tracer l'allure de la tension  $u_{ch}(t)$ .
2. Calculer la valeur de la tension moyenne en sortie du pont en fonction de ( $V$ ) et de ( $\alpha$ ).
3. Calculer la puissance moyenne  $P$  fournie par le pont à la charge en fonction de ( $\alpha$ ) et de ( $I$ ) valeur moyenne de  $i_{ch}(t)$  sachant que  $(v)_{eff}=V=220V$ .
4. En déduire, en fonction de ( $\alpha$ ), la nature de la charge alimentée par le pont.

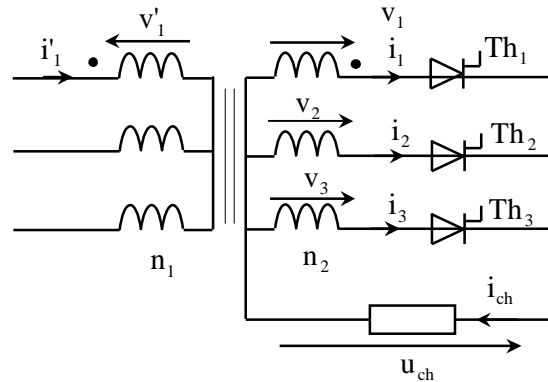
**Exercice 4:**

On considère un convertisseur statique comportant comme l'indique la figure ci-dessous :

Un transformateur ( $Yy_1$ ) de puissance apparente  $S_n$ ;

Une charge fortement inductive dont le courant de charge est  $i_{ch} = I = 360A$ .

Le réseau d'alimentation est alternatif de fréquence 50Hz de tensions efficace primaire entre fils de ligne est  $U_1= 20\text{kV}$  et de tensions efficace secondaire entre fils de ligne de valeur  $U_{20}=700\text{V}$ .



**Pour un angle de retard ( $\alpha=30^\circ$ ) à l'amorçage des thyristors par rapport à l'amorçage naturel :**

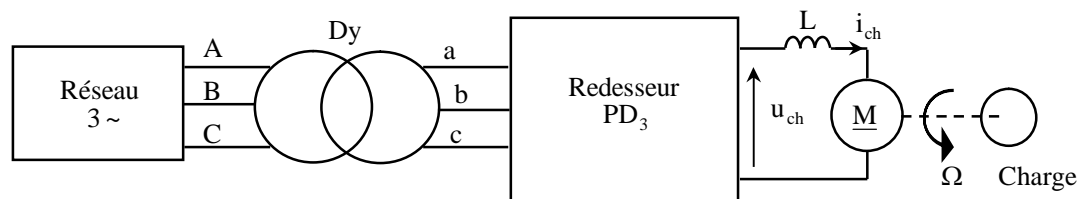
1. Tracer la loi d'évolution de la tension  $u_{ch}(\theta)$ , en déduire sa valeur moyenne.
2. Tracer la loi d'évolution de la tension  $v_{Th1}$ .
3. Tracer la loi d'évolution du courant  $i_1$ , en déduire sa valeur efficace  $I_s$ .
4. Tracer la loi d'évolution du courant  $i_{11}$ , en déduire sa valeur efficace  $I_p$ .

**Pour un angle d'amorçage retard ( $\alpha=120^\circ$ ):**

5. Tracer la loi d'évolution de la tension  $u_{ch}(\theta)$ , en déduire sa valeur moyenne.
6. Tracer la loi d'évolution de la tension  $v_{Th1}$
7. Tracer la loi d'évolution du courant  $i_1$ , en déduire sa valeur efficace  $I_s$ .
8. Tracer la loi d'évolution du courant  $i_{11}$ , en déduire sa valeur efficace  $I_p$ .

**Exercice 5:**

Un transformateur triphasé (Dy) est relié à un commutateur  $PD_3$  « tout thyristor » pour échanger de la puissance avec une machine à courant continu. Le moteur à courant entraîne une charge variable, comme l'indique la ci-contre.



**I. Etude du transformateur:**

Le transformateur convertit la moyenne tension en basse tension, il alimente le redresseur et divers appareillage. Sa puissance nominale est de 100kVA.

Les essais de ce transformateur ont données les résultats suivants :

- **Avide:** La tension primaire nominale entre phases  $U_{AB}=20\text{kV}$  et la tension secondaire entre phases :  $U_{ab}=388\text{V}$ ,
- **En court-circuit:** Le facteur de puissance primaire vaut  $\cos(\varphi_{cc})=0.557$  et les pertes par effet joule valent alors  $p_{jcc}=4.5\text{kW}$  lorsque le courant de court-circuit au secondaire est le courant nominal.

1. Quel est le rapport de transformation ( $m$ ) par colonne et le courant nominal secondaire,
2. Déterminez les éléments  $R_s$  et  $X_s$  du schéma équivalent ramené au secondaire par phase.

**II. Etude du convertisseur:**

Dans cette étude, nous supposons que :

La tension de sortie du transformateur est sinusoïdale de valeur efficace ( $U_{ab}=382\text{V}$ ),

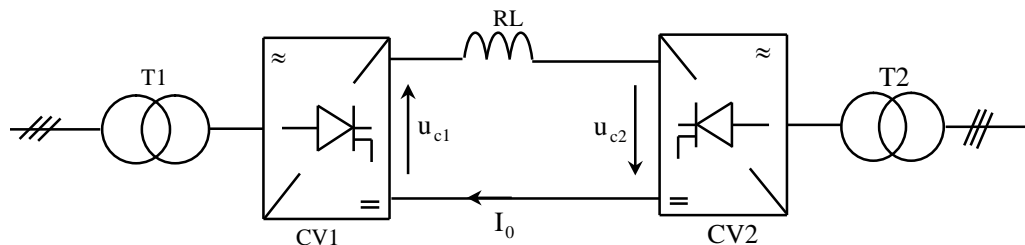
Le courant absorbé par le moteur est parfaitement lissé et vaut ( $i_{ch}=100\text{A}$ ).

L'angle de retard à l'amorçage ( $\alpha$ ) des thyristors, définit par rapport à la commutation naturelle est maintenu égal à  $45^\circ$ .

3. Tracer l'allure de la tension de charge, en déduire sa valeur moyenne en fonction  $U_{ab}$ ,
4. Tracer l'allure du courant dans la phase1, en déduire sa valeur efficace.

**Exercice 6 :**

Une ligne de transport d'énergie à courant continu est modélisable suivant le schéma de la figure ci-contre. On utilise une ligne à courant continu pour interconnecter deux réseaux à courant alternatif éloignés ou de comportement différents.



**❖ Etude du convertisseur statique:**

On considère un convertisseur statique comportant :

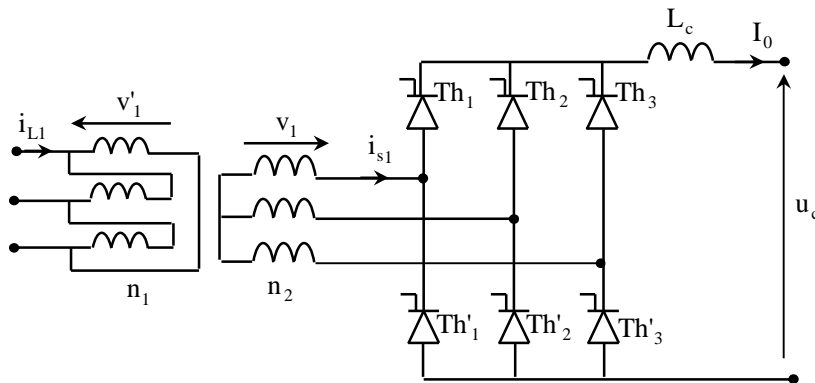
- Un transformateur  $Dy_n$  de puissance apparente  $S_n$ ,
- Un pont complet à thyristors, triphasé (pont de Graëtz),
- Une inductance de lissage coté continu et une charge en série, l'ensemble est assimilable pour ce qui suit, à un générateur de courant  $I_0 = 360A$ .

Le réseau d'alimentation primaire est alternatif de tension  $U_1 = 20kV$ , 50Hz entre fils de ligne et la tension secondaire à vide a pour valeur  $U_{20} = 700V$  entre fils de ligne.

**❖ Première approche et contraintes sur les composants:**

Dans un premier temps, on néglige les impédances de la ligne ainsi que celles du transformateur.

On fixe  $\alpha = 30^\circ$  le retard d'amorçage des thyristors par rapport à l'amorçage naturel.



1. Tracer la loi d'évolution de la tension  $u_c(t)$ , et exprimer sa valeur moyenne en fonction de  $U_{20}$  et de  $(\alpha)$ ,
2. Tracer la loi de variation du courant  $i_{Th1}$ ,
3. Tracer la loi d'évolution de la tension  $v_{Th1}$  pour  $\alpha = 30^\circ$ ,
4. Tracer la loi d'évolution du courant  $i_{s1}$ , en déduire sa valeur efficace  $I_s$ ,
5. Tracer la loi d'évolution du courant  $i_{L1}$ , en déduire sa valeur efficace  $I_L$ .

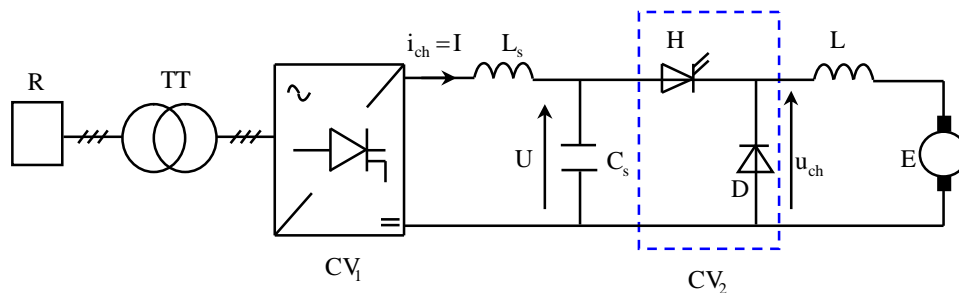
**❖ Influence des fuites, modélisation et chute de tension:**

On tient compte à présent des inductances de fuites du transformateur. On désigne par  $\lambda$  l'inductance de fuites par phase ramenée au secondaire du transformateur et dont la valeur numérique est de  $350\mu H$ . On se propose de retrouver dans ce qui, les grandes lignes de l'influence de cette imperfection sur le comportement du convertisseur.

6. On se place à l'instant  $t_0$  tel que  $\theta = \omega t_0 = \frac{5\pi}{6} + \alpha$ . Pour  $t = t_0^-$  quels sont les thyristors en conduction ; pour  $t_0$  quel est le nouveau thyristor qui est sollicité, pour  $t = t_0^+$ , quels sont les thyristors en conduction,
7. Justifier brièvement l'expression de la chute moyenne de tension:  $(\delta u_c)_{\text{moy}} = \frac{3\lambda w}{\pi} I_0$  et calculer la chute de tension avec les valeurs numériques précédentes.
8. En déduire le tracé de la caractéristique de sortie du convertisseur  $(u_c)_{\text{moy}} = f(I_0)$  pour  $\alpha = 30^\circ$ .

**Exercice 7:**

On considère la chaîne de conversion d'énergie dont le synoptique est donné par la figure suivante:



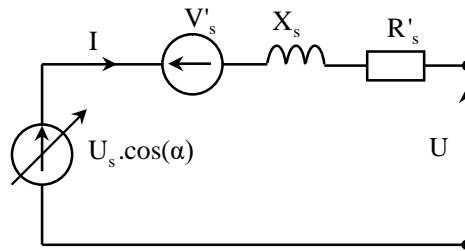
On désire étudier et modéliser le convertisseur ( $CV_1$ ), de type alternatif-continu, formé par un montage redresseur commandé:  $PD_3$ . Il est alimenté par un réseau triphasé de  $R=380V/220V-50Hz$ , à travers un transformateur couplé en (Yy) de rapport de transformation par colonne ( $m=0,8$ ).

On donne les caractéristiques suivantes:

- Résistance d'une phase primaire du transfo est  $r_p = 0,2\Omega$ ,
- Résistance d'une phase secondaire du transfo est  $r_s = 0,1\Omega$ ,
- Réactance ramenée au secondaire du transfo par phase vaut  $\lambda w = 1\Omega$ ,
- La caractéristique d'un thyristor :  $v_T = 0,75 + 0,05i_T$ ,
- Le courant de charge est supposé constant ( $i_{ch} = I = 15A$ ).

1. Calculer les différentes chutes moyennes du convertisseur, à savoir  $(\Delta_1 u_{ch}, \Delta_2 u_{ch}, \Delta_3 u_{ch})$ ,

2. Compléter le modèle suivant du convertisseur ( $CV_1$ ).



3. Calculer l'angle d'amorçage ( $\alpha$ ), pour avoir une tension en charge  $(u_{ch})_{\text{moy}} = U = 265V$

4. En déduire l'angle d'empiètement ( $\mu$ ).

Correction du TD2



**Exercice1:**

1. L'équation différentielle:  $u_{ch}=v=L \frac{di}{dt} + Ri = V_m \sin(\omega t)$

2. L'équation différentielle réduite :  $v_i = \tau \frac{di_l}{dt} + i_l = \sin(\omega t)$  ; avec :  $\tau = \frac{L}{R}$

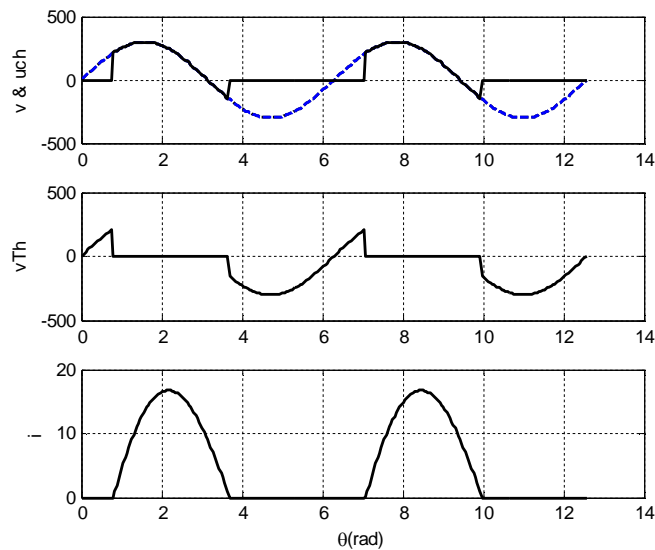
3. Résolution de l'équation différentielle :

• Pour  $0 < \theta < \alpha$ , on a:  $i = 0$ ,  $u_{ch} = 0$ ,

• Pour  $\alpha < \theta < \pi$ , on a:  $i_l(\omega t) = \frac{1}{\sqrt{R^2 + (L\omega)^2}} \left( \sin(\omega t - \varphi) + \sin(\varphi - \alpha) \cdot e^{-\left(\frac{\omega t - \alpha}{\tan(\varphi)}\right)} \right)$  et  $\tan(\varphi) = \frac{L\omega}{R}$

D'où alors:  $i(\omega t) = \frac{V_m}{R} \cos(\varphi) \left( \sin(\omega t - \varphi) + \sin(\varphi - \alpha) \cdot e^{-\left(\frac{\omega t - \alpha}{\tan(\varphi)}\right)} \right)$

4. Allure courant  $i(\theta)$  dans l'intervalle  $[\alpha, \beta]$

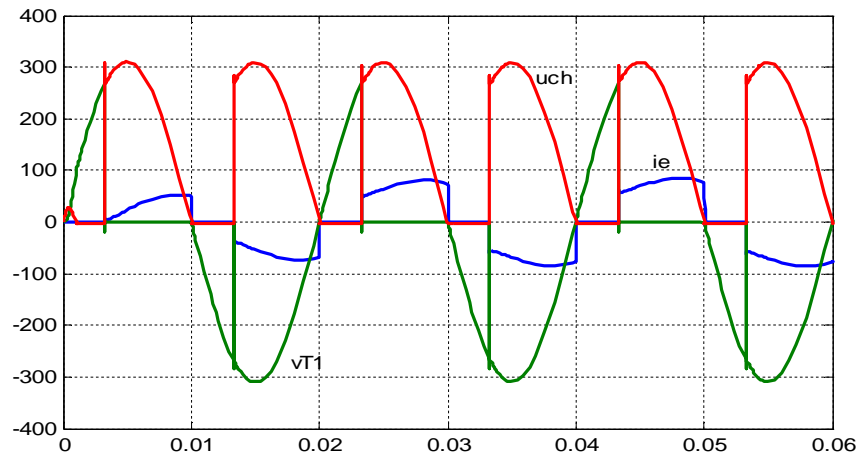


Valeur de l'angle :  $\beta = 3.69(\text{rad})$

5. Tension moyenne de la charge :  $(u_{ch})_{moy} = \frac{V_m}{2\pi} [\cos(\alpha) - \cos(\beta)] = 74.5V$

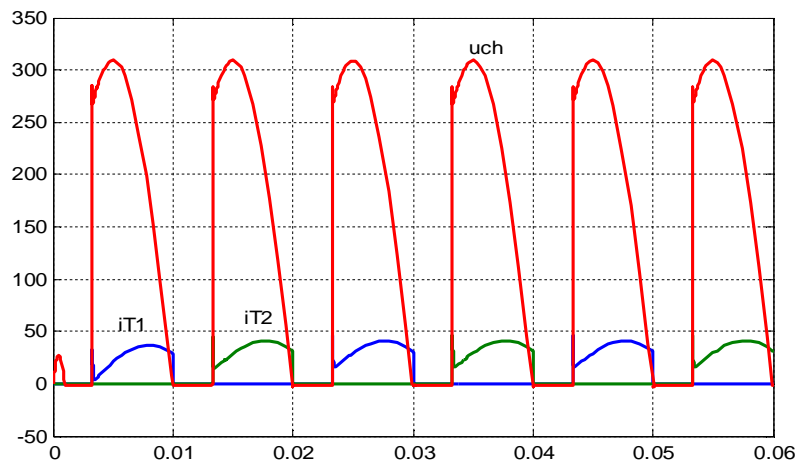
**Exercice 2:**

1. Allure des grandeurs :  $u_{ch}$ ,  $v_{T1}$  et  $i_e$ :



Tension moyenne :  $\langle u_{ch} \rangle = \frac{2E}{\pi} [1 + \cos(\alpha)] = 136.61 \text{ V}.$

2. Voir figure ci-dessous
3. Voir figure ci-dessous
4. Allure de  $i_1$

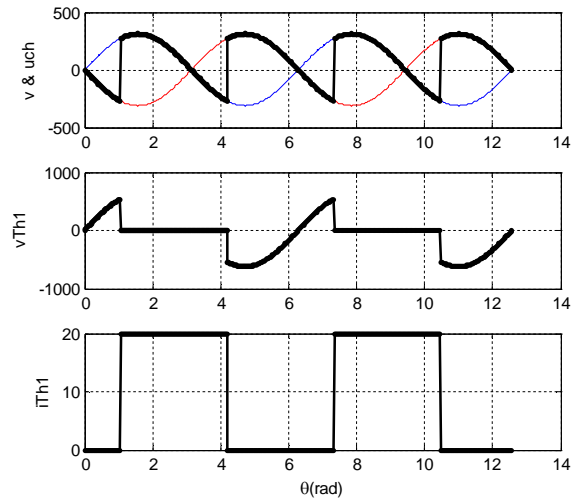


5. Le déphasage vaut ( $\varphi = \frac{\alpha}{2} = 15^\circ$ ).

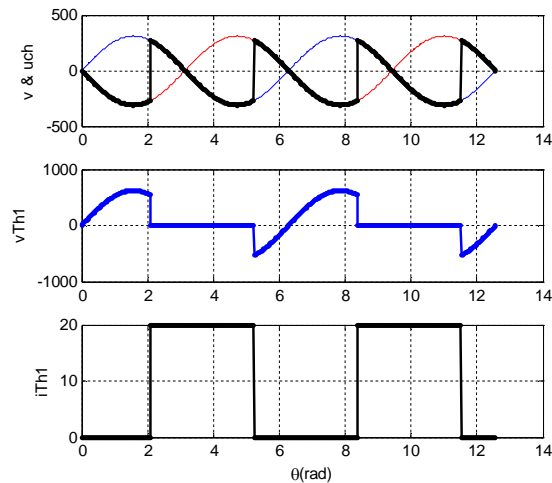
**Exercice 3:**

1. Allure de la tension de charge :

• **Angle d'amorçage** :  $(\alpha = \frac{\pi}{3})$



• **Angle d'amorçage** :  $(\alpha = \frac{2\pi}{3})$



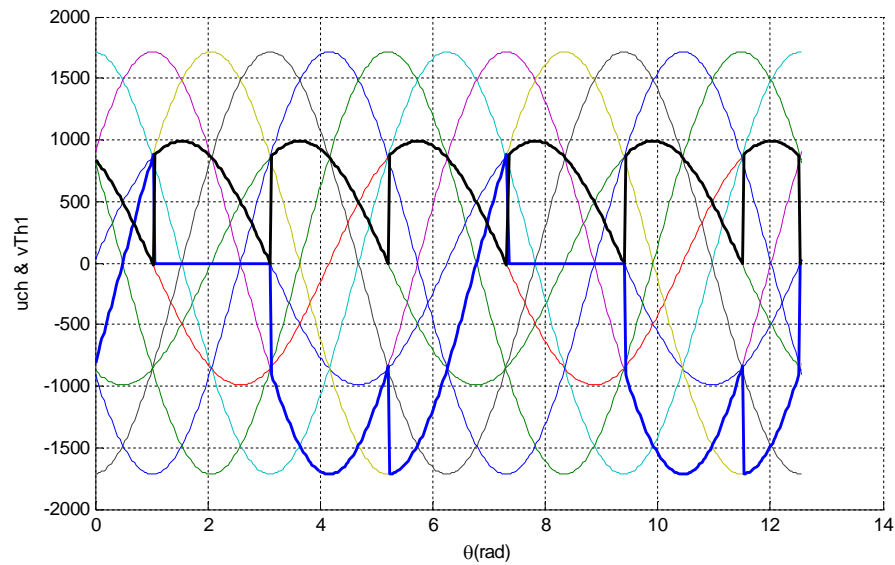
2. La valeur de la tension moyenne:  $(u_{ch})_{moy} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V \cdot \cos(\alpha)$

3. La puissance moyenne :  $P = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V \cdot I \cdot \cos(\alpha)$

**Exercice 4:**

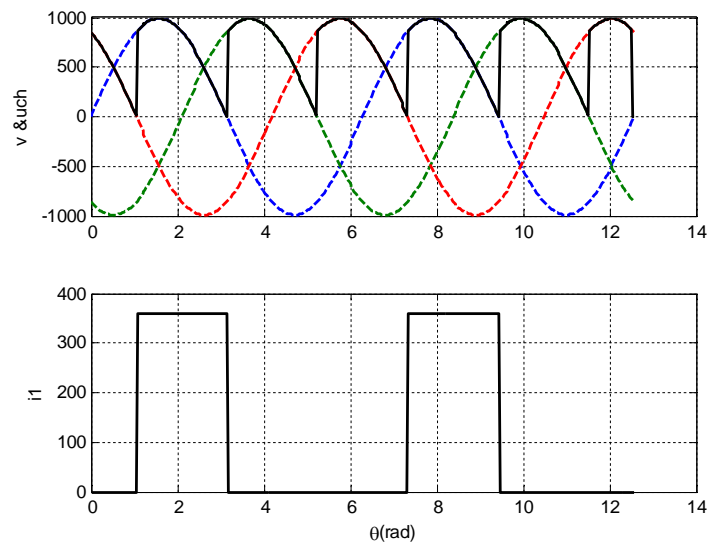
❖ **Pour  $\alpha=30^\circ$  :**

1. Loi d'évolution de la tension  $u_{ch}(\theta)$ ,  $v_{Th1}$  :



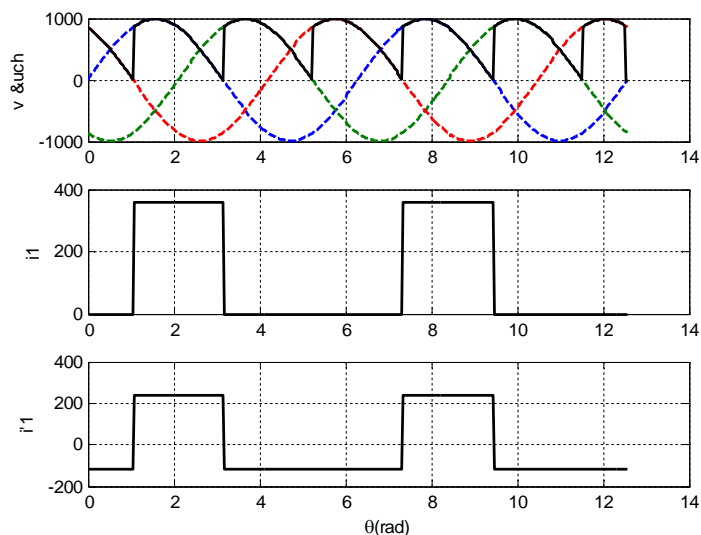
- Tension moyenne de charge :  $\langle u_{ch} \rangle = \frac{3\sqrt{2}U_{20}}{2\pi} \cos(\alpha) = 409.34 \text{ V}$ .

2. Loi d'évolution du courant  $i_1$



- La valeur efficace du courant  $i_1$ :  $I_s = \frac{I}{\sqrt{3}} = 207.846A$

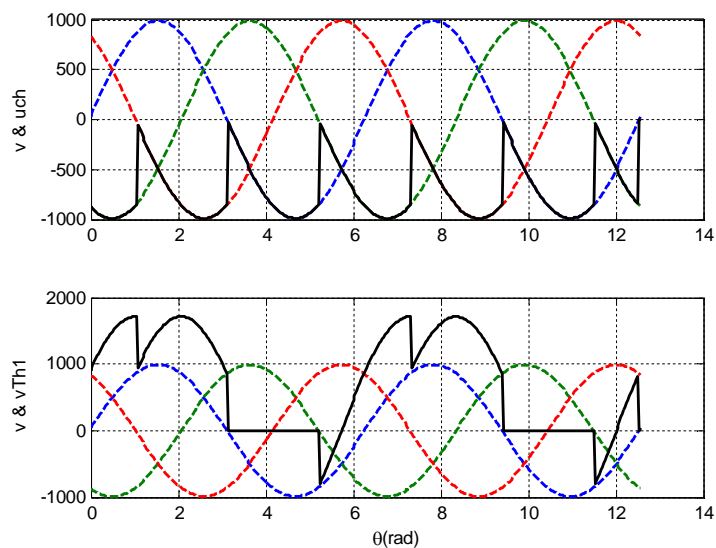
**3. Loi d'évolution du courant  $i'_1$  :**



- Le courant primaire de phase1 est donné par :  $i'_1 = m.(i_1 - \frac{I}{3}) = 0.035.(i_1 - \frac{I}{3})$
- La valeur efficace :  $I_p = \sqrt{\frac{2}{3}}I = 293.94A$

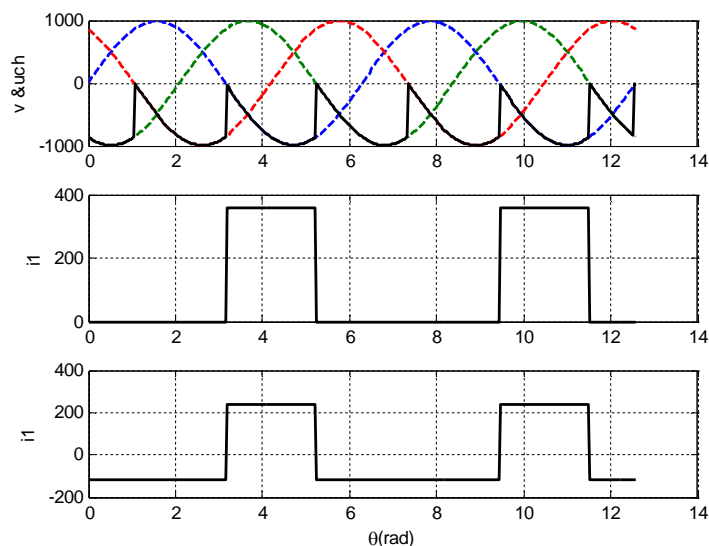
❖ **Pour  $\alpha=120^\circ$  :**

**4. Loi d'évolution de la tension:  $u_{ch}(\theta)$**



- Tension moyenne :  $\langle u_{ch} \rangle = \frac{3\sqrt{2}U_{20}}{2\pi} \cos(\alpha) = -236.34V$ .

5. Loi d'évolution des courants :  $i_1$ , et  $i_1$  :



6. Valeur efficaces des courants:  $i_1$  et  $i_1$

$$I_s = \frac{I}{\sqrt{3}} = 207.846A \quad I_p = \sqrt{\frac{2}{3}} I = 293.94A$$

### **Exercice 5:**

#### **I. Etude de transformateur :**

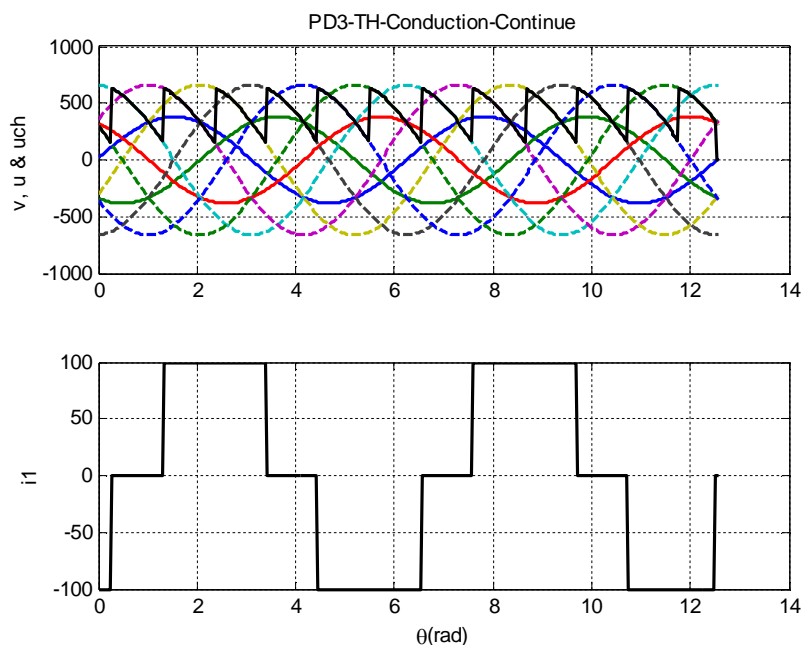
1. Rapport de transformation par colonne (m) et courant nominal ( $I_{2n}$ )

$$m = \frac{V_{20}}{V_1} = \frac{U_{ab}}{U_{AB}\sqrt{3}} = 0.0112 ; I_{2n} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{ab}} = 148.8A$$

2. Les éléments:  $R_s = 67.7m\Omega$  ;  $X_s = 121.6m\Omega$ .

#### **II. Etude du convertisseur :**

1. Allure de la tension de charge :



• Tension moyenne :  $\langle u_{ch} \rangle = \frac{3\sqrt{2}U_{ab}}{\pi} \cos(\alpha) = 370.51 \text{ V}.$

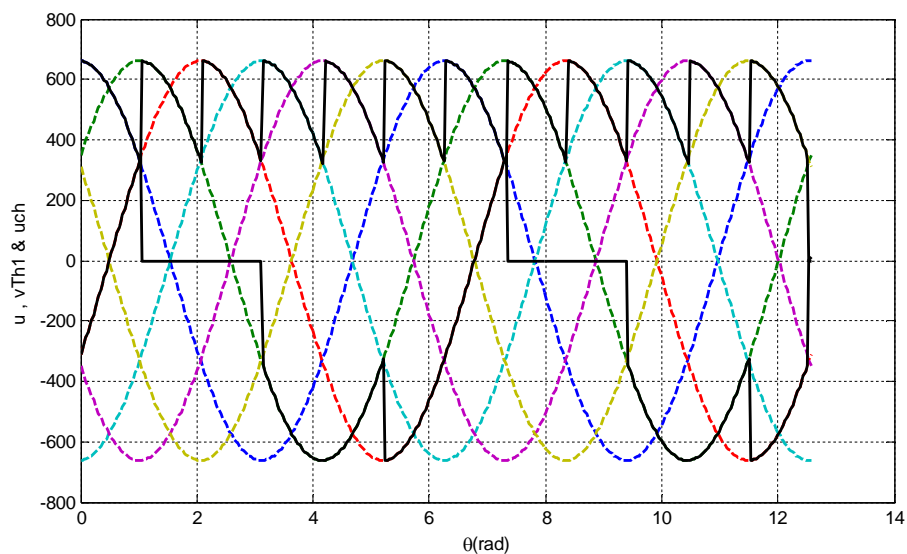
2. Courant efficace :  $(i_1)_{\text{eff}} = I_1 = I \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} = 81.65 \text{ A}$

### Exercice 6:

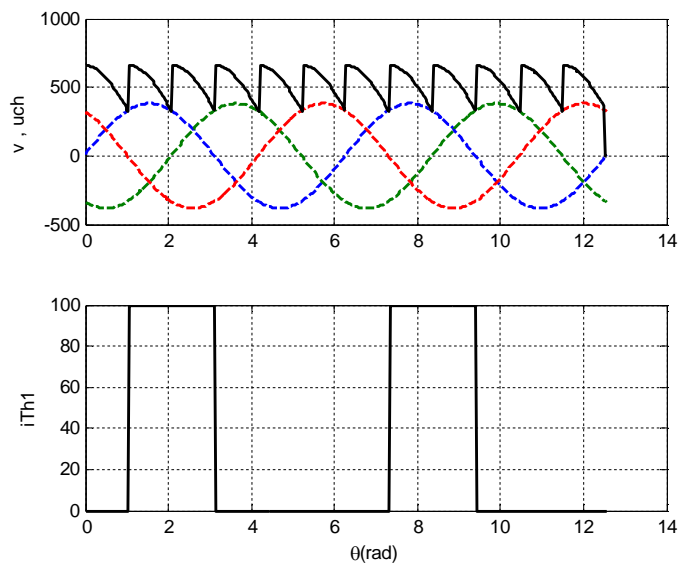
#### ❖ Première approche et contraintes sur les composants :

1. Loi d'évolution de la tension  $u_c(t)$ , et sa valeur moyenne:  $U_{c0} = \frac{3\sqrt{2} \cdot U_{20}}{\pi} \cos(\alpha) = 818.68 \text{ V}$

2. Loi d'évolution de la tension  $v_{Th1}$  **pour  $\alpha = 30^\circ$** .

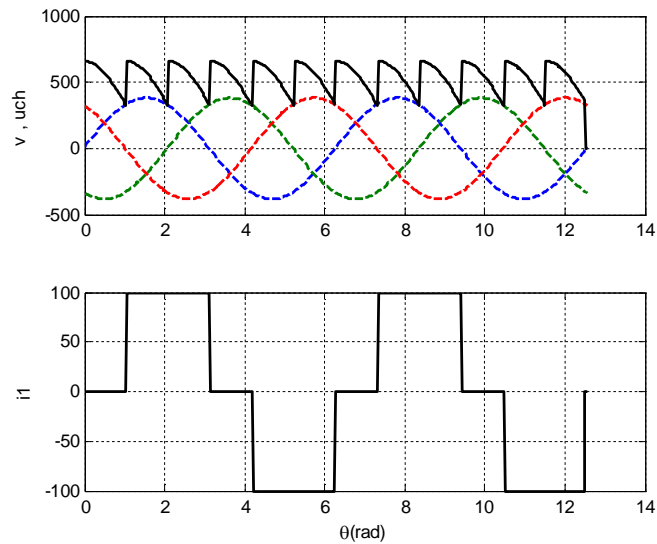


3. Loi de variation du courant  $i_{Th1}$  qui traverse  $Th_1$ .



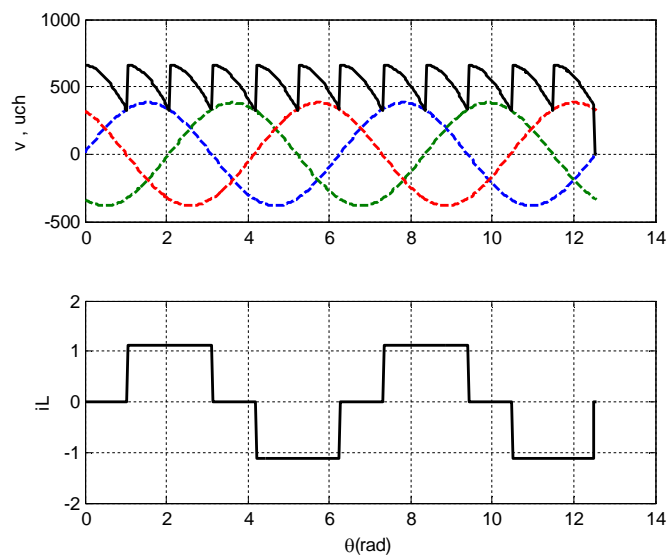


4. Loi d'évolution du courant  $i_{s1}$ ,



• Valeur efficace :  $I_s = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I = 293.94 \text{ A}$

5. Loi d'évolution du courant  $i_{L1}$ ,



• Valeur efficace :  $I_L = m \cdot \sqrt{2} \cdot I = 11.236 \text{ A}$

❖ **Influence des fuites, modélisation et chute de tension:**

6. A l'instant  $t_0$ :  $\theta = \omega t_0 = \frac{5\pi}{6} + \alpha$  :

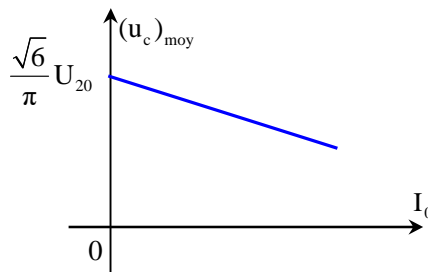
- Pour  $t = t_0$ , le thyristor qui conduit est  $Th_1$ .
- Pour  $t = t_0$ , le nouveau thyristor qui est sollicité est  $Th_2$ .
- Pour  $t = t_0^+$ , les thyristors qui sont en conduction sont  $Th_1$  et  $Th_2$ .

7. Chute moyenne de tension :  $(\delta u_c)_{\text{moy}} = \frac{3\lambda\omega}{\pi} I_0 = 37.8V$ .

9. Allure de  $(u_c)_{\text{moy}} = f(I_0)$  pour  $\alpha = 30^\circ$  :

On a  $(u_c)_{\text{moy}} = U_{c0} - (\delta u_c)_{\text{moy}} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{20} \cos(\alpha) - \frac{3\lambda\omega}{\pi} I_0$ ,

Pour  $\alpha = 30^\circ$ , on a  $(u_c)_{\text{moy}} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} U_{20} - \frac{3\lambda\omega}{\pi} I_0$



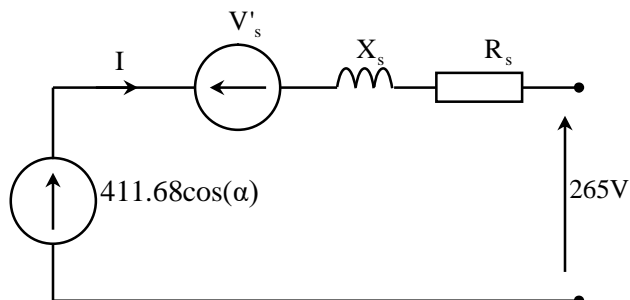
**Exercice 7:**

1. Les chutes de tensions moyennes du  $CV_1$ :

- $\Delta_1 U_{ch} = \frac{3\lambda\omega}{\pi} I = X_s I = 14.32V$ ,
- $\Delta_2 U_{ch} = 2(r_s + m^2 r_p) I = R_s I = 6.84V$ ,
- $\Delta_3 U_{ch} = 2(V_s + R_d I) = 3V$ ,
- $\Delta U_{ch} = \Delta_1 U_{ch} + \Delta_2 U_{ch} + \Delta_3 U_{ch} = X_s I + (R_s + 2R_d) I + 2V_s = 24.16V$ .

**2. Modèle du CV<sub>1</sub> :**

- Modèle du convertisseur (CV1)



- $X_s = \frac{3\lambda w}{\pi} = 0.955\Omega$ ,
- $R'_s = R_s + 2R_d = 0.556\Omega$ ,
- $V'_s = 2V_s = 1.5V$ ,
- $U_s = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V = 411.68V$ , avec  $V_m = m.220 = 176V$ .

**3. Angle d'amorçage**

$$411.68\cos(\alpha) = U + \Delta u_{ch} = 256 + (3 + 6.84 + 14.32) = 289.16V, \text{ d'où } \alpha = 45.38^\circ.$$

**4. Angle d'empîement:**

$$\cos(\alpha) - \cos(\alpha + \mu) = \frac{\lambda w I}{V_m \sin(\frac{\pi}{6})} = 6.9610^{-2}, \text{ d'où } \mu = 5.77^\circ$$

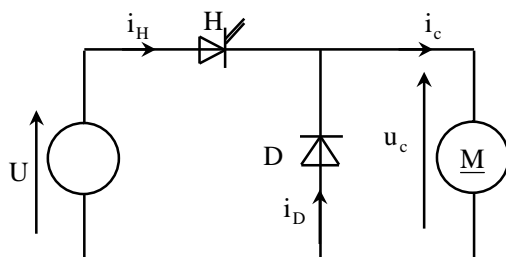
TD3: Les Hacheurs

**Exercice 1:**

Le hacheur dévolteur de la figure ci-dessous, alimente une charge formée par moteur à courant continu à excitation constante, il est assimilable à une charge (RLE), dont la f.é.m.  $E=100V$  pour un rapport cyclique  $\alpha=0.8$ , la résistance  $R$  est supposée négligeable, et l'inductance  $L=50mH$ . Sachant que la fréquence de hachage est de  $2.5kHz$  est le courant moyen est de  $5A$ .

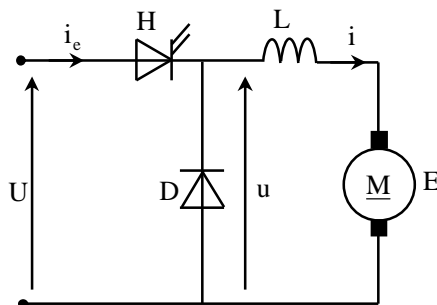
Pour un régime de fonctionnement continu :

1. Expliquer son principe de fonctionnement, et tracer l'allure de la tension  $u_c(t)$  sur une période,
2. Tracer l'allure de la variation du courant  $i_c(t)$  dans l'induit,
3. Donner l'expression de l'ondulation  $\Delta i_c$ , en déduire la valeur  $\alpha$  pour que cette ondulation soit maximale.



**Exercice 2 : Étude d'un hacheur série**

On désire étudier un convertisseur de type continu-continu formé par un hacheur dévolteur, qui alimente une charge active (l'induit d'une machine à courant continu) d'inductance  $L=2mH$ , de f.c.e.m ( $E$ ) et de vitesse de rotation angulaire  $\Omega(\text{rad/s})$ , donné par la figure ci-contre :



On suppose que :

- La machine est à flux constant, de résistance négligeable et parfaitement compensée,
- Les éléments (H, D) sont parfaits.

Le convertisseur est alimenté par une source de tension continue de valeur  $U=265V$ .

Pour une fréquence de hachage  $f=18kHz$ , on a relevé :

$E=K\Omega=212V$ , pour une fréquence de rotation nominale de  $N=1500tr/min$ , et un courant moyen nominale  $(i)_{\text{moy}} = I_n=15A$ .

**Questions :**

1. Déterminer les expressions du courant de charge sur les intervalles de temps  $[0, \alpha T]$  et  $[\alpha T, T]$  en régime permanent, on dénote par  $I_m$  et  $I_M$  les valeurs minimale et maximale du courant de charge,
2. Tracer l'allure du courant ( $i$ ) et la tension ( $u$ ),
3. Déterminer l'expression de l'ondulation du courant de charge  $\Delta i = I_M - I_m$  en fonction de  $U$ ,  $L$ ,  $T$  et  $\alpha$ ; en déduire l'expression de l'ondulation maximale,
4. Déterminer les expressions des courants  $I_m$  et  $I_M$  en fonction de courant de charge moyen  $(i)_{\text{moy}}$  et son ondulation  $\Delta i$ , en déduire leurs valeurs numériques.

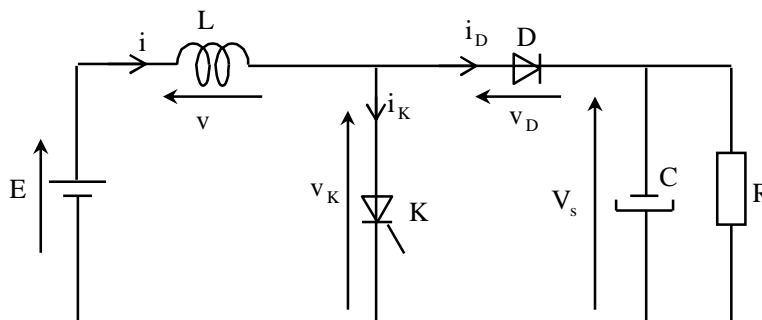
**Exercice 3 : Hacheur élévateur**

Soit l'hacheur parallèle dont la structure est donnée par la figure suivante. Avec  $K$  est commandé à la fermeture pour  $0 \leq t \leq \alpha T$ , et à l'ouverture pour  $\alpha T \leq t \leq T$ .

$T$  est la période de fonctionnement ( $f=500Hz$ ). La tension  $E=1500V$ .  $L=0.5H$ .

Le courant ( $i$ ) ininterrompu, variant entre les valeurs extrêmes  $I_{\min}$  et  $I_{\max}$ .

La tension  $V_s$  est sensiblement constante.



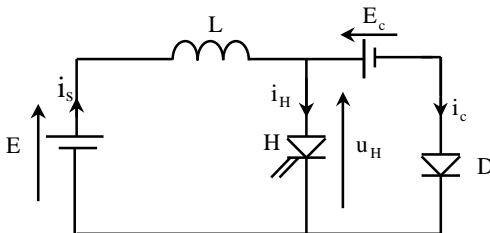
**Pour  $\alpha = 0.75$**

1. Etablir sur une période « T » les expressions du courant et de la tension de l'inductance,
2. Tracer sur une période « T » les allures du courant et de la tension de l'inductance,
3. Etablir l'expression de «  $V_s$  » en fonction de ( $\alpha$  ; E) ; calculer la valeur de «  $V_s$  » ,
4. Calculer alors l'ondulation du courant «  $\Delta i$  »,
5. Calculer  $I_{\max}$  et  $I_{\min}$  sachant que  $(i)_{\text{moy}} = 50\text{A}$ .

**Exercice 4:**

Soit le montage ci-dessous, où (H) désigne un interrupteur est commandé à l'ouverture.

On se place en régime permanent de fonctionnement :



- Pour  $0 < t < \frac{T}{2}$  H est fermé et pour  $\frac{2}{3}T < t < T$  H est ouvert,

On donne les valeurs de  $E = 48\text{V}$ ;  $L = 25\text{mH}$  et  $T = 0.5\text{ms}$ .

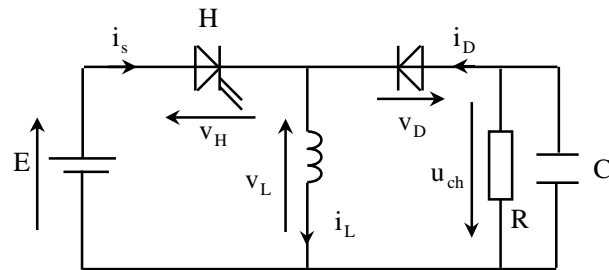
1. Quel est l'état de la diode lorsque H est fermé, comment évolue le courant  $i_s$  durant la période T, on donne ( $i_s(0) = I_m = 12\text{A}$ ),
2. Lorsque l'interrupteur (H) est ouvert, que vaut la tension  $u_H$ , représenter les allures de  $u_H$  et  $i_s$  sur une période, et préciser l'expression de  $i_s(t)$  sur  $[2T/3, T]$ ,
3. Exprimer la valeur moyenne de la tension aux bornes de H et en déduire la valeur de ( $E_c$ ) ,
4. Calculer l'ondulation du courant  $i_s$  et en déduire sa valeur maximale.

**Exercice 5:**

On considère le montage de la figure ci-dessus, fonctionne en régime permanent par l'intermédiaire (H), unidirectionnel en courant, est commandé à l'ouverture et à la fermeture de façon séquentielle:

- Pour  $0 < t < \frac{T}{2}$  H est fermé et pour  $\alpha T < t < T$  H est ouvert,

On donne  $L=25\text{mH}$  et  $E'=48\text{V}$ ; la charge est formée par la mise en parallèle d'une résistance  $R=100\Omega$  et d'un condensateur  $C=100\mu\text{F}$ . La période de hachage est  $T=50\mu\text{s}$ .



1. Quel est l'état de la diode lorsque H est fermé, comment évolue le courant  $i_s$  durant la période T, on donne ( $i_s(0) = I_0$ ),
2. Lorsque l'interrupteur (H) est ouvert, que vaut le courant  $i_L$ , représenter les allures de  $u_H$ ,  $u_L$  et  $i_L$  sur une période,
3. Calculer l'ondulation de courant  $i_L$  sur une période pour  $\alpha=1/3$  et  $\alpha=2/3$ ,
4. Exprimer la valeur moyenne de la tension  $u_{ch}$  en fonction de E et rapport cyclique  $\alpha$ ,
5. Calculer la valeur moyenne de  $u_{ch}$  pour  $\alpha=1/3$  et  $\alpha=2/3$ , évaluer le courant de charge et la puissance délivrée par celle-ci.

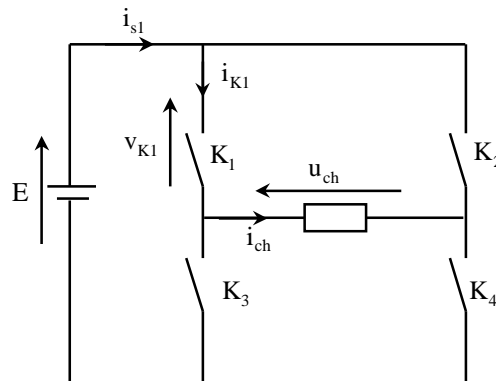
**Exercice 6:**

On étudie le convertisseur dont la structure est celle de la figure suivante.

Les interrupteurs  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  et  $K_4$  sont parfaits.

La source E est type de tension continue; la charge est de type courant continu.

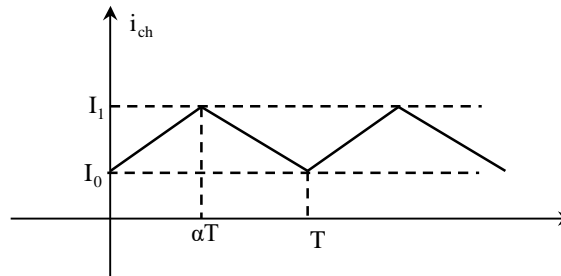
- Pour  $0 < t < \alpha T$  : ( $K_1$ ,  $K_4$ ) sont fermés; ( $K_2$ ,  $K_3$ ) sont ouverts,
- Pour  $\alpha T < t < T$  : ( $K_2$ ,  $K_3$ ) sont fermés; ( $K_1$ ,  $K_4$ ) sont ouverts.





On suppose que la conduction du courant de charge est continue,  $i_{ch}(0) = I_0$  et  $i_{ch}(\alpha T) = I_1$ .

1. Donner la loi de variation de la tension de charge sur une période, en déduire sa valeur moyenne,
2. On donne l'allure du courant de la charge pour une fréquence élevée, on demande de tracer les variations correspondantes de grandeurs suivantes:  $u_{ch}$ ;  $v_{K1}$ ;  $i_{k1}$ ;  $v_{K4}$  et  $i_{K4}$ ,

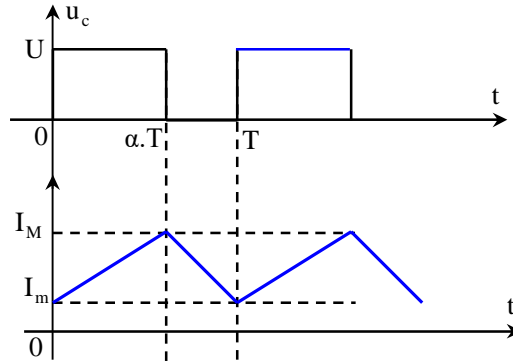


3. Exprimer la valeur moyenne du courant dans la charge en fonction de  $E$ ,  $R$  et  $\alpha$ .

Correction du TD3

**Exercice 1:**

1. Allures de  $u_c$  et  $i_c$



2. Expressions:  $\Delta i_c = \frac{U}{L.f} \alpha(1-\alpha)$  et  $(\Delta i_c)_{\max} = \frac{U}{4.L.f}$ , pour  $\alpha = \frac{1}{2}$ .

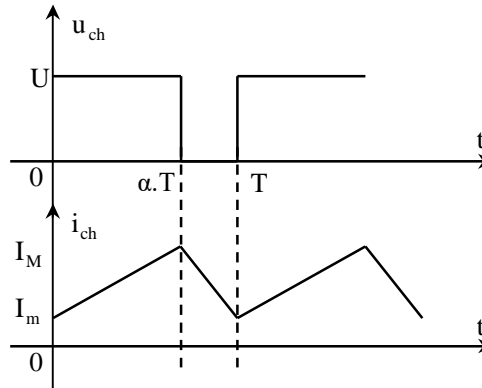
**Exercice 2:**

1. Expressions du courant de charge

♦ Sur  $[0, \alpha T]$ , on a  $u_{ch}=U$  et le courant de charge:  $i_{ch} = \frac{U-E}{L}t + I_m$ ,

♦ Sur  $[\alpha T, T]$ , on a  $u_{ch}=0$  et le courant de charge:  $i_{ch} = -\frac{E}{L}(t-\alpha T) + I_M$ .

2. Allure de  $u_{ch}$ ,  $i_{ch}$  et  $i_H$



3. Expression de l'ondulation du courant de charge :  $\Delta i = I_M - I_m = \frac{U}{L.f} (1-\alpha)\alpha$  ;

$$(\Delta i)_{\max} = \frac{U}{4.L.f} ; \text{ pour } \alpha = \frac{1}{2}$$

4. Expressions des courants ( $I_M$  et  $I_m$ ) :  $(i)_{\text{moy}} = \frac{I_M + I_m}{2} = I_m + \frac{\Delta i}{2} = I_M - \frac{\Delta i}{2},$

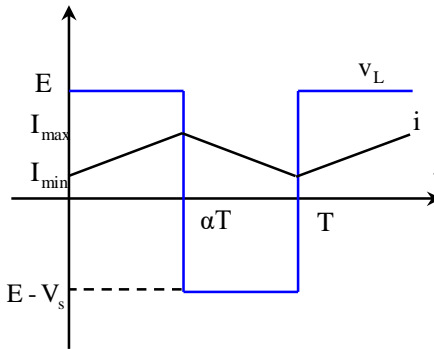
Avec  $\alpha = \frac{E}{U} = 0.8$  ;  $\Delta i = 1.18\text{A}$  et  $I_M = 15.59\text{A}$  ;  $I_m = 14.41\text{A}$

**Exercice 3:**

1. Expressions sur une période de fonctionnement du courant et de la tension

$$i = \begin{cases} \frac{E}{L} t + I_{\min} \\ \frac{E - V_s}{L} (t - \alpha T) + I_{\max} \end{cases} \quad \text{et} \quad v_L = \begin{cases} E \\ E - V_s \end{cases}$$

2. Courbes



3. Tension de sortie  $V_s = \frac{E}{1-\alpha} = 6\text{kV}$

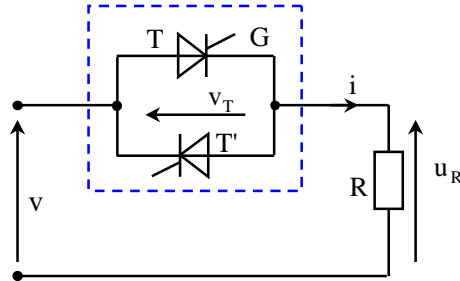
4. Ondulation du courant:  $\Delta i = \frac{V_s}{4.L.f} = 6\text{A}$

5. Courants :  $I_{\max} = 53\text{A}$  ;  $I_{\min} = 47\text{A}$

TD4: Les gradateurs

**Exercice 1: gradateur monophasé (charge monophasé)**

On considère le montage représenté par la figure suivante où  $v$  est une tension sinusoïdale de valeur efficace  $V=400V$  et de fréquence  $f=50\text{ Hz}$ .



La tension d'aimantation est donnée par :  $v(\theta)=V\sqrt{2}.\sin(\theta)$ , avec  $\theta = \omega t$ .

Le gradateur G est formé de deux thyristors que l'on suppose parfaits :

La charge est constituée par une résistance  $R = 10\Omega$ .

On désigne par  $u_R$  la tension à ses bornes, par  $i$  le courant qui la traverse et par  $v_T$  la tension aux bornes des thyristors. On amorce le thyristor (T) à  $(\omega t = \alpha)$ .

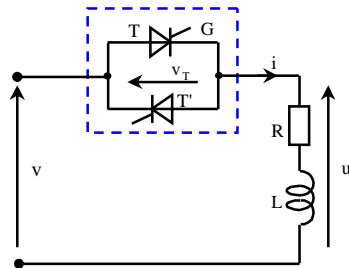
1. Représenter la tension  $u_R$  dans l'intervalle  $[0, 2\pi]$ , pour  $\alpha = \frac{\pi}{6}$ ,
2. Exprimer la valeur efficace  $U_R$  de  $u_R$  en fonction de  $\alpha$  et  $V$  et montrer que l'on a

$$U_R = V \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}},$$

3. Calculer la puissance dissipée dans  $R$  pour  $\alpha = \frac{\pi}{6}$ .

**Exercice 2 : Gradateur monophasé (charge inductive)**

Le gradateur de la figure suivante, est alimenté par la même tension  $v$ , la charge est maintenant inductive.



On donne  $R = 100\Omega$ ,  $L = 50\text{mH}$ ,  $u$ : tension aux bornes de la charge et  $i$ : courant de charge.

On amorce le thyristor (T) à  $\omega t = \alpha$  et le thyristor (T') à  $\omega t = \alpha + \pi$ .

1. Etablir l'équation différentielle prouvant du ce circuit,
2. Déterminer l'expression du courant  $i(t)$ ,
3. Tracer l'allure de  $i(t)$  et  $u(t)$ .

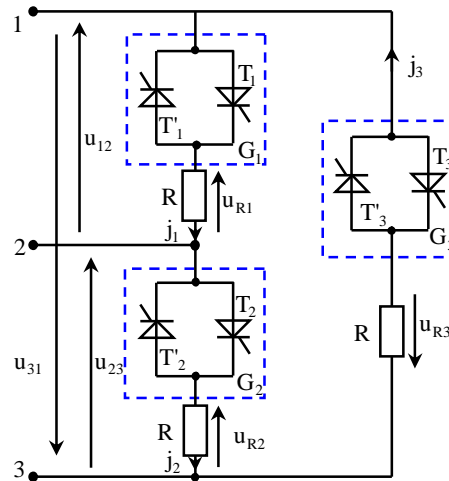
### Exercice 3 : Gradateur triphasé

Le montage représenté par la figure ci-dessous, est alimenté par un réseau triphasé direct dont les tensions entre phases ont pour expressions :

$$\begin{cases} u_{12} = 400\sqrt{2} \cdot \sin(100\pi t) \\ u_{23} = 400\sqrt{2} \cdot \sin(100\pi t - \frac{2\pi}{3}) \\ u_{31} = 400\sqrt{2} \cdot \sin(100\pi t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases}$$

$G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$  sont trois gradateurs identiques à celui des études précédentes, ils ont pour charge trois résistances  $R$  identiques. On prend  $R = 100\Omega$ .

La séquence d'amorçage des thyristors est représentée sur le document réponse correspondant à cette partie, le retard à l'amorçage des thyristors par rapport à la commutation naturelle est repéré par l'angle ( $\alpha$ ).



1. Utiliser les résultats de l'exercice 1, pour représenter les tensions  $u_{12}$  et  $u_{31}$ , pour  $\alpha = \frac{\pi}{6}$  rad, de même que les courants  $j_1$  et  $j_3$  en indiquant leurs valeurs maximales,

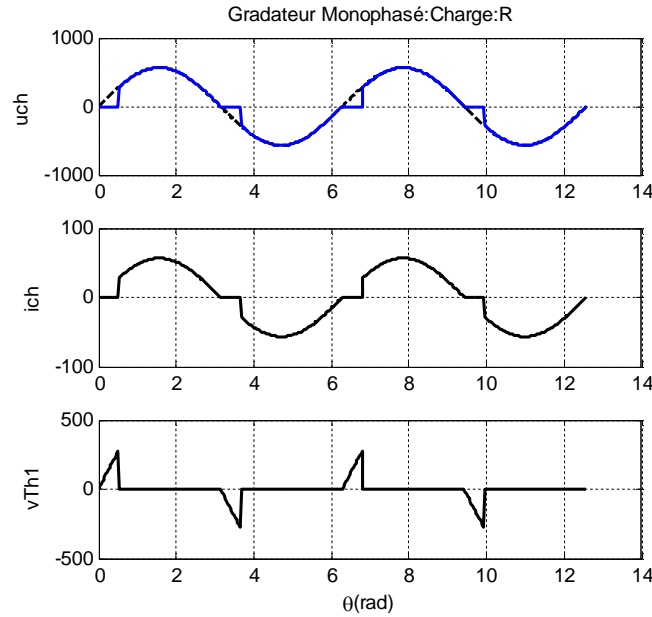
2. Calculer la valeur efficace  $J$  des courants  $j_1, j_2, j_3$ ,
3. En déduire l'expression puis calculer la puissance  $P$  absorbée par l'ensemble des trois résistances,
4. Représenter le courant  $i_2$  dans la ligne2.



Correction du TD4

**Exercice 1: (Charge R)**

1. Allure de la tension  $u_R$  dans l'intervalle  $[0, 2\pi]$ , pour  $\alpha = \frac{\pi}{6}$  :



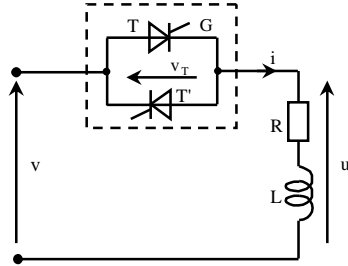
2. Tension efficace :  $U_R = V_m \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}} = 400 \sqrt{1 - \frac{1}{6} + \frac{\sqrt{3}}{4\pi}} = 394 \text{ V}$

3. Puissance dissipée dans R pour  $\alpha = \frac{\pi}{6}$  :

$$P = \frac{U_R^2}{R} = 16 \cdot 10^3 \cdot \left(1 - \frac{1}{6} + \frac{\sqrt{3}}{4\pi}\right) = 15.54 \text{ kW}$$

**Exercice 2: (RL)**

Le gradateur de la figure suivante, est alimenté par la même tension  $v$ , la charge est maintenant inductive.



On donne  $R = 100\Omega$ ,  $L = 50\text{mH}$ ,  $u$ : tension aux bornes de la charge et  $i$ : courant de charge.

On amorce le thyristor (T) à  $\omega t = \alpha$  et le thyristor (T') à  $\omega t = \alpha + \pi$ .

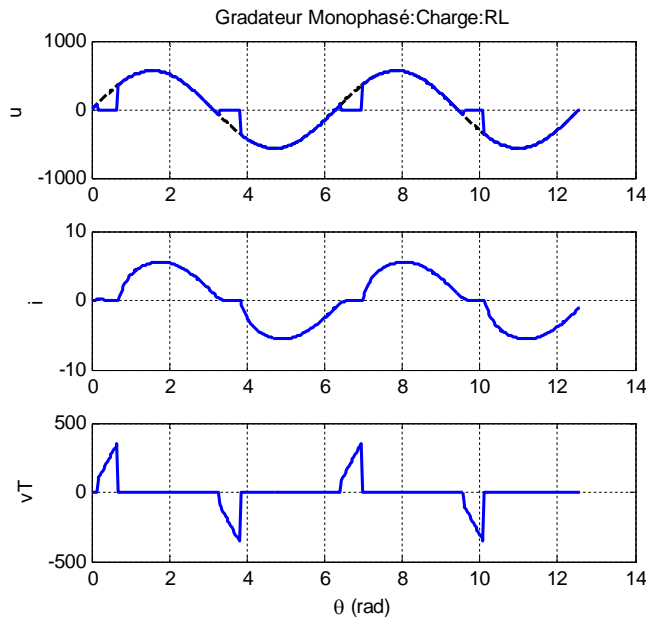
1. Equation différentielle du ce circuit :  $u = Ri + L \frac{di}{dt}$

2. Expression du courant  $i(t)$  :

$$i = i_f + i_L = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \varphi) + k.e^{\frac{-(\omega t)}{\tan(\varphi)}}, \text{ donc } i(t) = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \varphi) - \frac{V_m}{Z} \sin(\alpha - \varphi).e^{\frac{-(\omega t - \alpha)}{\tan(\varphi)}}. \text{ Avec :}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (L\omega)^2} = 101\Omega \text{ et } V_m = 400\sqrt{2} = 565.7\text{V} \text{ et } \varphi = \arctan\left(\frac{L\omega}{R}\right) =$$

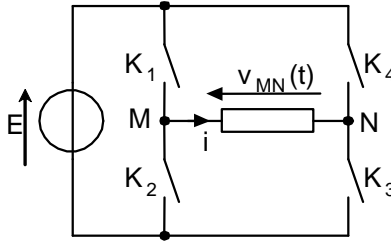
3. Allure de  $i(t)$  et  $u(t)$  :



**TD 5: Les Onduleurs**

**Exercice 1: Etude de l'onduleur monophasé de secours**

Le schéma de principe de l'onduleur est celui de la figure ci-dessous :



Cahier des charges de l'onduleur de secours :

Valeur efficace du fondamental de la tension de sortie: $V_1$	115 V
Fréquence de sortie : f	400 Hz
Puissance apparente nominale de sortie :	1kVA
Facteur de puissance	$0,70 < \cos \varphi \leq 1$
Distorsion globale de la tension de sortie : D	$< 5 \%$

On envisage le cas d'une commande (pleine onde).

1. Tracer le graphe de la tension  $v_{MN}(t)$ ,
2. Exprimer la valeur efficace de  $v_{MN}(t)$  en fonction de E,
3. La décomposition en série de Fourier de  $v_{MN}(t)$  est la suivante :

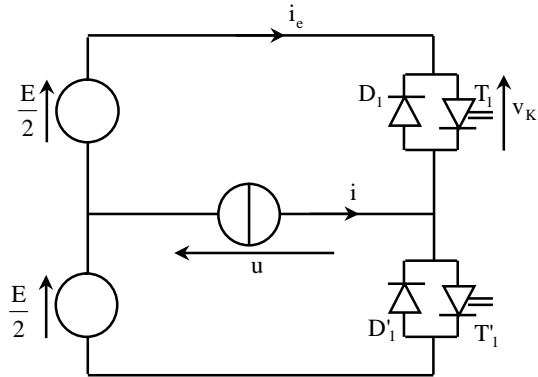
$$v_{MN}(t) = \frac{4E}{\pi} \left( \sin(\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \dots \right)$$

4. Donner l'expression de  $v_1(t)$ , fondamental de  $v_{MN}(t)$ .
5. En déduire l'expression de sa valeur efficace  $V_1$  en fonction de E.

**Exercice 2 :**

La structure d'un onduleur monophasé est donnée par la figure suivante.

La charge est une source de courant sinusoïdal parfaite d'intensité  $i$ .



1. Représenter l'allure de  $u(t)$  et de sa composante fondamentale  $u_1(t)$ ,
2. Dans le cas où  $\alpha = -60^\circ$ , tracer  $i(t)$ ,  $i_e(t)$  et  $v_{K1}(t)$ ,
3. Discuter le signe de la puissance instantanée  $p(t) = u(t) \cdot i(t)$  sur une période de fonctionnement,
4. Préciser les éléments ( $T_1, D_1$ ) ou ( $T'_1, D'_1$ ) qui sont effectivement conducteurs.

**Exercice 3 : Onduleur monophasé en demi-pont**

1. Tracer  $u(t)$  et exprimer sa valeur efficace  $U$  en fonction de  $E$ ,
2. Exprimer la puissance moyenne  $P$  vue du côté de la charge en fonction de  $U_1$ ,  $I$  et  $\alpha$ ,
3. Exprimer la puissance moyenne  $P$  vue du côté de la source de tension en fonction de  $E$ ,  $I$  et  $(\varphi)$ ,
4. En déduire l'expression de la valeur efficace  $U_1$  de la composante fondamentale  $u_1$  de  $u(t)$ , Montrer que  $U_1 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} E$ ,

**Exercice 4 : Onduleur monophasé en pont à commande décalée**

1. Tracer  $u(t)$  pour  $\beta = 60^\circ$  et exprimer sa valeur efficace  $U$  en fonction de  $\beta$  et de  $E$ .  
Application numérique:  $\beta = 60^\circ$ ,
2. Exprimer la puissance moyenne  $P$  vue du côté de la charge en fonction de  $U_1$ ,  $I$  et  $\varphi$ .
3. Exprimer la puissance moyenne  $P$  vue du côté de la source de tension en fonction de  $E$ ,  $I$ ,  $\beta$  et  $\varphi$ .

4. En déduire l'expression de la valeur efficace  $U_1$  de la composante fondamentale  $u_1(t)$  de  $u(t)$ .

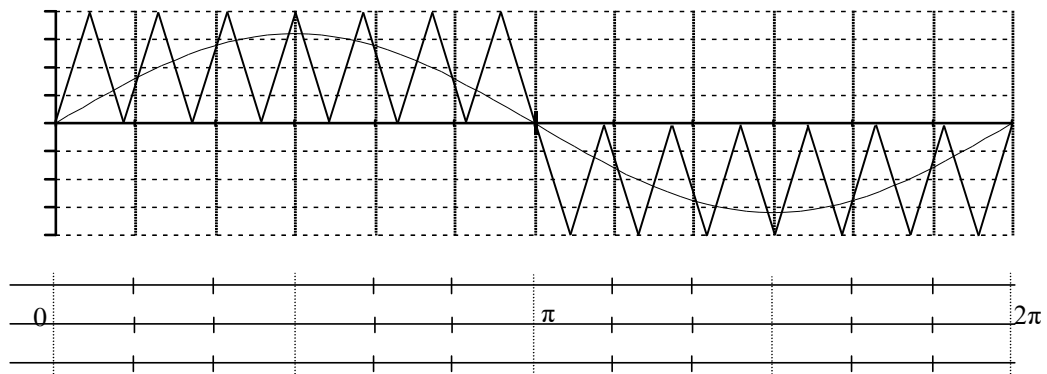
5. Montrer que  $U_1 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E \cos(\beta)$ . Application numérique:  $\beta=0^\circ$  puis  $60^\circ$ .

**Exercice 5 : MLI demi-onde**

Dans le cas de l'onduleur monophasé en pont (voir cours 'les onduleurs'):

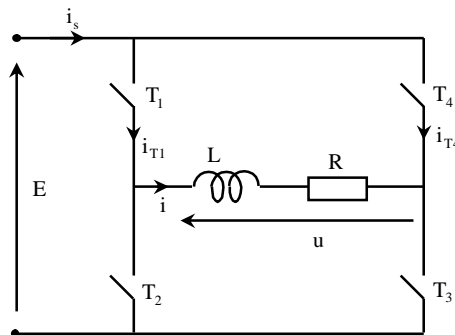
Indiquer sur le graphe donné en annexe, le diagramme des commutations des interrupteurs  $K_1, K'_1, K_2, K'_2$  qui permet d'obtenir une tension MLI bipolaire et représenter la tension  $u(t)$ .

**Abaque permettant de générer une MLI unipolaire :**



**Exercice 6 : Etude d'un onduleur autonome**

On considère un onduleur autonome monophasé comprenant 4 interrupteurs électroniques  $T_1, T_2, T_3$  et  $T_4$ . Ces interrupteurs peuvent être commandés selon deux modes.



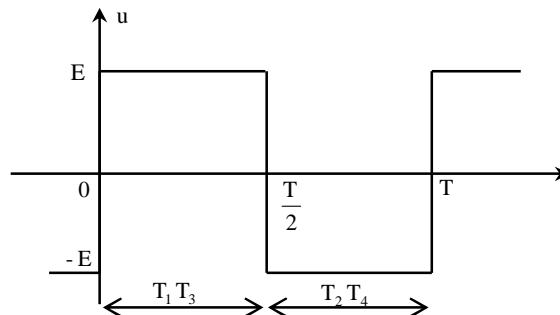
❖ **Commande symétrique:**

Les interrupteurs sont commandés selon la séquence suivante:

De  $t = 0$  à  $t = \frac{T}{2}$  :  $T_1$  et  $T_3$  sont fermés et  $T_2$  et  $T_4$  ouverts,

De  $t = \frac{T}{2}$  à  $t = T$  :  $T_2$  et  $T_4$  sont fermés et  $T_1$  et  $T_3$  ouverts.

La tension  $u$  aux bornes de la charge est donnée par la figure ci-dessous:



La charge est constituée d'une résistance  $R$  en série avec une inductance  $L$ .

1. Ecrire l'équation différentielle donnant  $i$  de 0 à  $T/2$ .
2. Résoudre cette équation différentielle en posant  $i(0)=I_0$ .
3. En déduire l'expression de  $i(T/2)$ .
4. En écrivant qu'en régime permanent établi on doit avoir  $i(T/2)=-i(0)=I_0$ , déterminer l'expression de  $I_0$ .
5. Application numérique:  $E = 200V$  ;  $L = 50mH$  ;  $R = 50\Omega$  et  $T = 20ms$ . Calculer  $I_0$ ,
6. Calculer l'instant  $t_0$  pour lequel le courant dans la charge passe par 0,

On donne la décomposition en série de Fourier de la tension  $u(t)$ :

$$u(t) = \frac{4E}{\pi} (\sin(\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \dots)$$

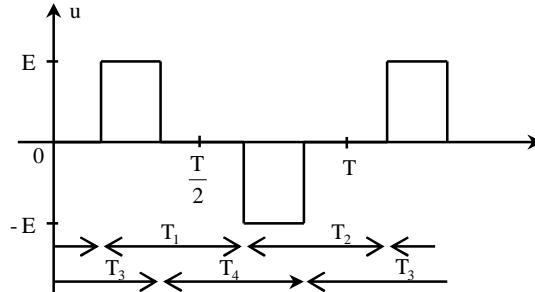
La charge de l'onduleur est toujours constituée de la résistance  $R$  en série avec une inductance  $L$ .

7. Exprimer l'impédance présentée par la charge pour le fondamental de la tension,
8. Calculer la puissance absorbée par la charge qui correspond au fondamental.



❖ **Commande décalée :**

On modifie la commande des interrupteurs : chaque interrupteur est fermé pendant  $T/2$  et ouvert pendant  $T/2$ , mais les commandes de  $T_1$  et  $T_2$  sont décalées par rapport à celles de  $T_3$  et  $T_4$ .



Les deux interrupteurs  $T_1$  et  $T_4$  ou  $T_2$  et  $T_3$  sont donc fermés simultanément pendant un intervalle de temps:  $(1-\alpha)\frac{T}{2}$ , durant lequel  $u$  est nulle.

Les interrupteurs  $T_1$  et  $T_3$  ou  $T_2$  et  $T_4$ , sont fermés simultanément pendant:  $\alpha\frac{T}{2}$ , ( $0 < \alpha < 1$ ),

$u$  valant  $+E$  ou  $-E$ ,

- 9.** Exprimer la valeur efficace de  $u$  en fonction de  $E$  et  $\alpha$ . Et calculer  $U$  pour  $E=200V$  et  $\alpha = 2/3$ ,

On donne l'expression du terme de rang  $n$  de la décomposition en série de Fourier de la

tension  $u$  :  $A_n = -\frac{4E}{n\pi} \times (-1)^n \sin\left(\frac{n\pi\alpha}{2}\right) \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right)$ .

Avec  $u(t) = A_1 \sin(wt) + A_3 \sin(3wt) + A_5 \sin(5wt) + \dots$

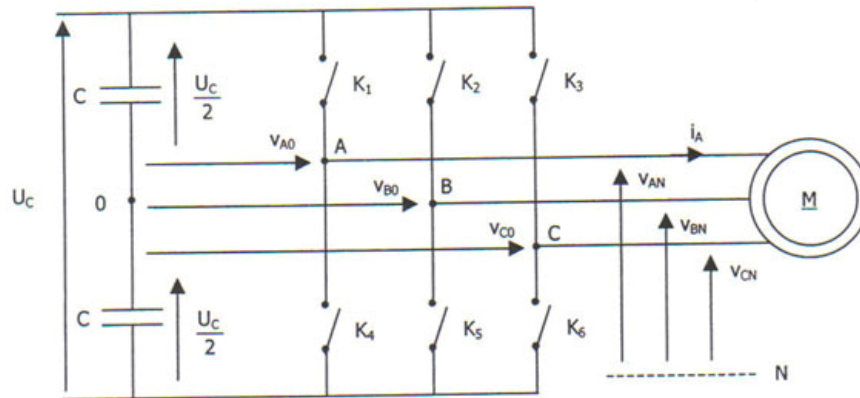
On choisit:  $\alpha = \frac{2}{3}$ .

- 10.** Exprimer l'impédance présentée par la charge pour le fondamental de la tension,

- 11.** Calculer la puissance absorbée par la charge qui correspond au fondamental.

**Exercice 7 : Etude d'un onduleur triphasé**

On alimente un moteur asynchrone triphasé à cage utilisé pour la traction, par un onduleur de tension à partir de réseau 750 V continu.



La tension continue est:  $U_c = 750V$ .

Deux condensateurs identiques forment un diviseur capacitif permettant de créer un point milieu O.

Ce moteur de traction se comporte comme un récepteur équilibré. Les interrupteurs  $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$ , réversibles en courant, sont commandables à l'ouverture et à la fermeture et sont supposés idéaux.

❖ **Onduleur à commande pleine onde:**

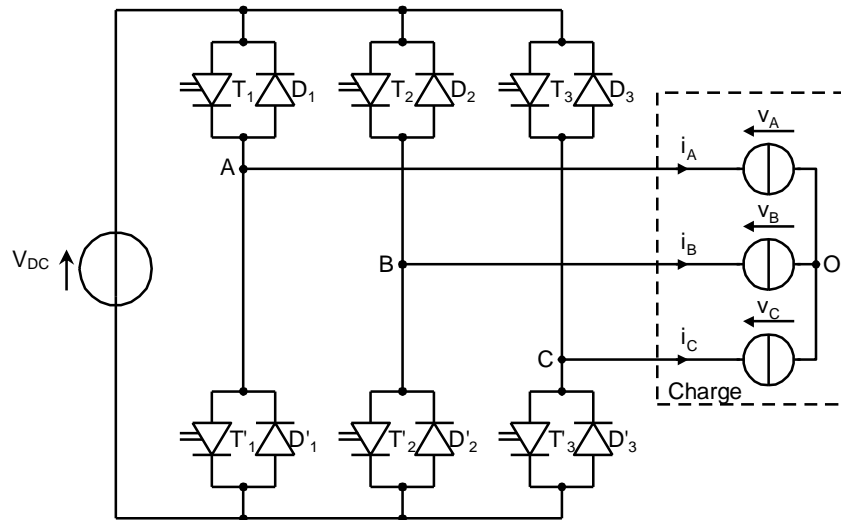
Les commandes des interrupteurs  $(K_1, K_4), (K_2, K_5)$  et  $(K_3, K_6)$  sont deux à deux complémentaires. Chaque interrupteur est commandé à la fermeture durant une demi-période et à l'ouverture sur l'autre demi-période. La commande d'un bras d'onduleur est décalée d'un tiers de période sur celle du bras précédent.

1. Préciser la valeur de la tension  $v_{AO}$  lorsque  $K_1$  est fermé puis lorsque  $K_4$  est fermé. traçant de la tension.
2. Tracer le chronogramme des tensions  $v_{AO}$ ,  $v_{BO}$  et  $v_{CO}$ ,
3. Tracer le chronogramme de la tensions  $v_{AN}$ ,
4. Calculer la valeur efficace  $V_{AN}$  de la tension  $v_{AN}$  en fonction de  $U_c$ .
5. Prouver que la décomposition en série de Fourier de la tension  $v_{AN}$  est la suivante:

$$\text{est donnée par : } v_{AN}(t) = \frac{2 \cdot U_c}{\pi} \left[ \sin(wt) + \frac{1}{5} \sin(5wt) + \frac{1}{7} \sin(7wt) + \frac{1}{11} \sin(11wt) + \dots \right]$$

**Exercice 8 : Etude d'un onduleur triphasé**

L'onduleur comprend six cellules constituées d'un TGBT et d'une diode. Les TGBT sont considérés comme des interrupteurs parfaits unidirectionnels commandés à l'ouverture et à la fermeture. Les diodes sont supposées parfaites (tension nulle à leurs bornes quand elles sont passantes). On assimile la batterie à une source idéale de tension de f.é.m. EB.



On rappelle que les tensions simples aux bornes de la charge ont pour expressions

$$\text{respectives : } v_A = \frac{u_{AB} - u_{CA}}{3} ; v_B = \frac{u_{BC} - u_{AB}}{3} ; v_C = \frac{u_{CA} - u_{BC}}{3} .$$

1. Tracer les chronogrammes des tensions composées  $u_{AB}$ ,  $u_{BC}$  et  $u_{CA}$ .
2. Tracer les chronogrammes des tensions simples  $v_A$ ,  $v_B$  et  $v_C$ .

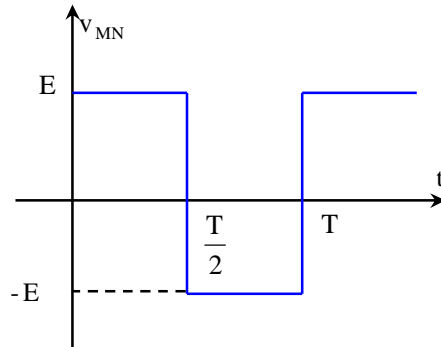
La valeur efficace du fondamental des tensions simples a pour expression :  $(V_{\text{eff}})_f = \frac{\sqrt{2}}{\pi} V_{DC}$

3. En déduire la valeur la tension  $V_{DC}$  que doit délivrer la batterie pour que le fondamental des tensions simples ait pour valeur efficace 230V.

Correction du TD5

**Exercice 1 :**

1. Tension  $v_{MN}$



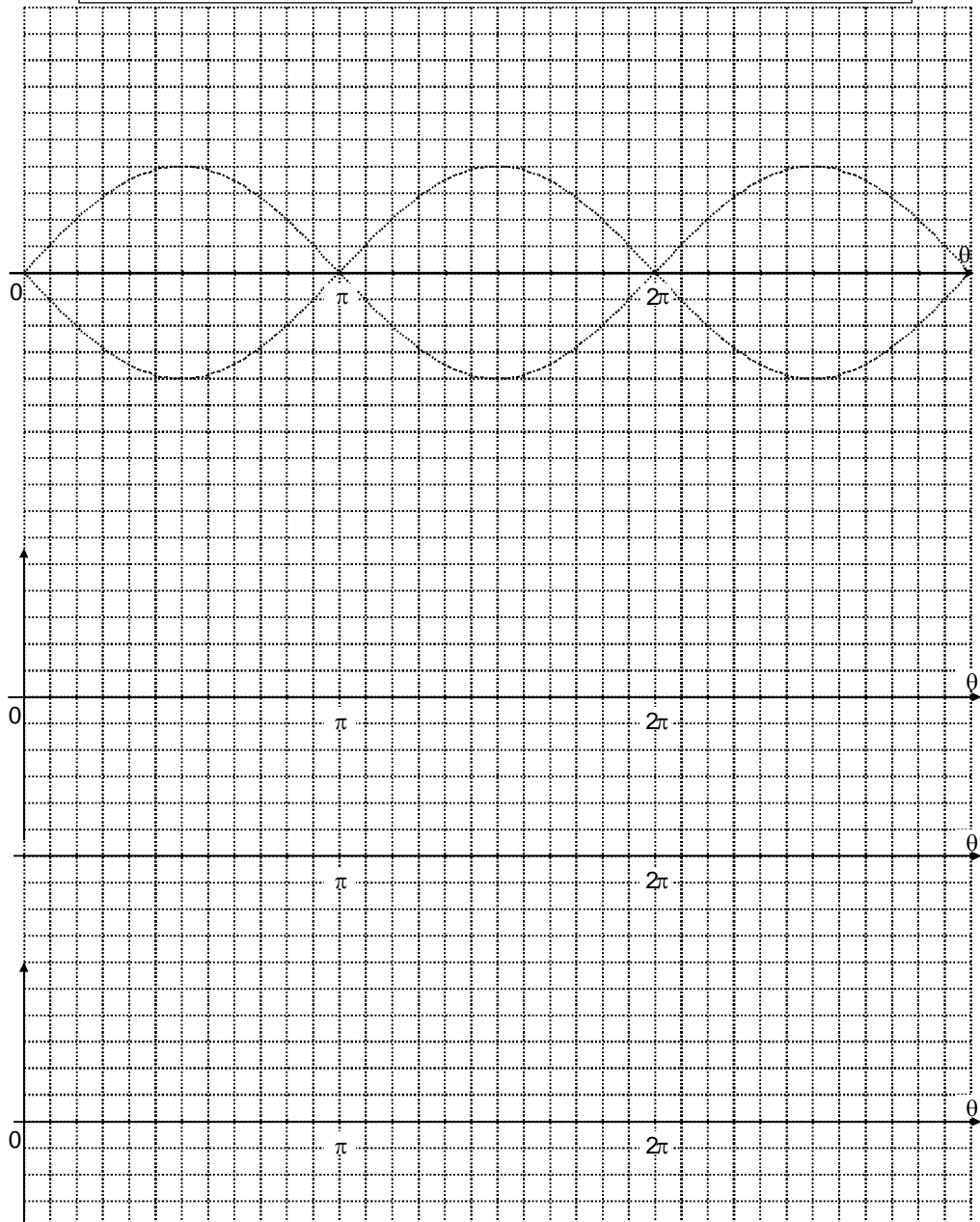
2. Tension efficace  $(v_{MN})_{\text{eff}} = E = 127.33\text{V}$

3. Tension fondamentale  $v_1(t) = \frac{4E}{4\pi} \sin(\omega t)$

Annexe

## Annexe 1: Abaque Pour les montages redresseurs monophasés

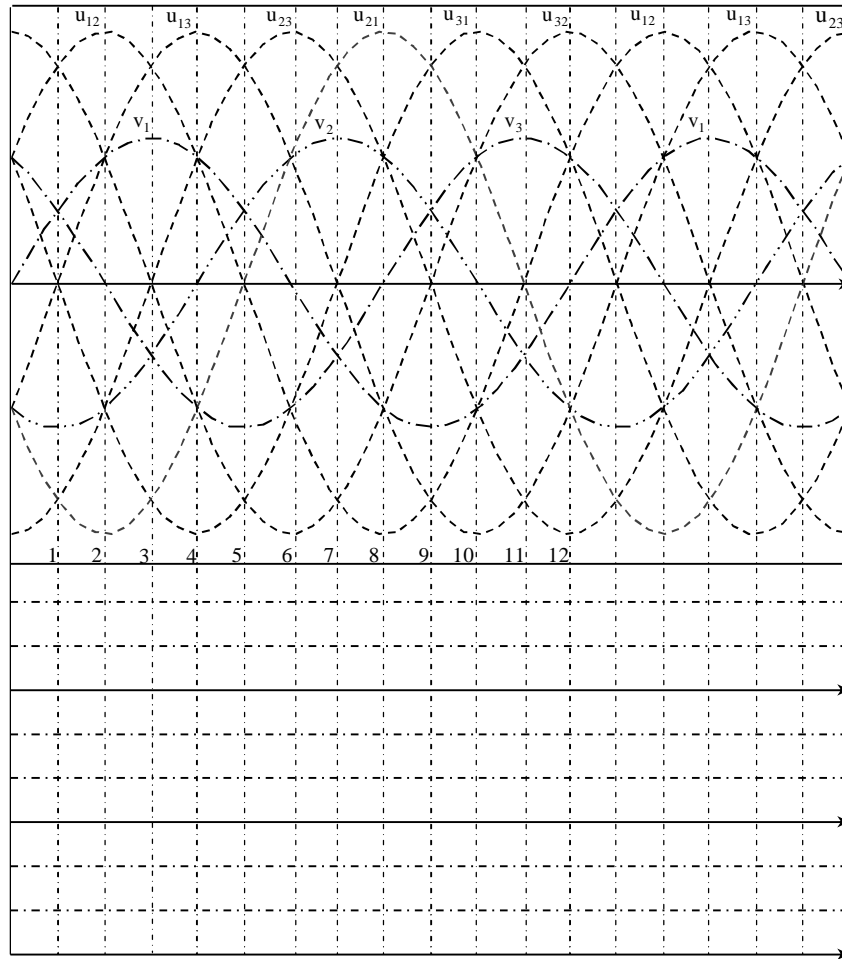
Nom : ..... Prénom : ..... Classe : .....  
Feuille N° : ..... Titre : .....



## Annexe 2: Abaque Pour les montages redresseurs triphasés

Nom : .....Prénom : .....Classe : .....

Feuille N° : ..... Titre : .....





### Annexe 3: Abaque Pour les montages gradateurs triphasés

