

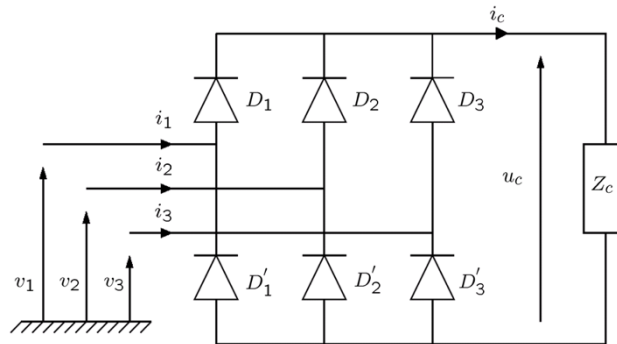
Enseignant : G. DIDIER.

- Sujet 1 : Redresseur AC-DC triphasé non commandé et commandé
- Sujet 2 : Modélisation d'un hacheur série et hacheur 4Q avec Matlab/Simulink
- Sujet 3 : Etude du hacheur série (partie commande)
- Sujet 4 : Etude du hacheur série (partie puissance) : commande en vitesse d'une MCC
- Sujet 5 : Compensation de puissance réactive, pollution harmonique au réseau
- Sujet 6 : Étude d'un panneau photovoltaïque
- Sujet 7 : Modélisation et étude d'un onduleur monophasé avec Matlab/Simulink
- Sujet 8 : Étude fréquentielle des différents modes de commande d'un onduleur monophasé de tension

# REDRESSEMENT AC – DC TRIPHASÉ NON COMMANDE ET COMMANDE

## I. Préparation :

Soit le montage ci-dessous.



Les tensions simples  $v_i(t)$  ( $i = 1, 2$  ou  $3$ ), sont issues d'un transformateur triphasé abaisseur 220/24 Volts couplé en YY.

**Le pont est composé de diodes parfaites :**

- Déterminer les intervalles de conduction des diodes  $D_1$  à  $D_6$  à partir d'une tension simple d'entrée sinusoïdale.
- Tracer les formes d'ondes de  $u_c(t)$ ,  $i_c(t)$ ,  $v_{D1}(t)$ ,  $i_{D1}(t)$  et  $i_1(t)$  pour une charge  $Z_c$  purement résistive.
- Calculer les expressions de  $U_{cmoy}$ ,  $I_{cmoy}$ ,  $I_{ceff}$ ,  $I_{D1eff}$ ,  $V_{D1eff}$  pour la même charge.
- Proposer un schéma de montage, en y incluant les différents appareils de mesure nécessaire à la visualisation de ces signaux.

**Le pont est composé de thyristors :**

- Déterminer les intervalles de conduction des diodes  $T_1$  à  $T_6$  à partir d'une tension simple d'entrée sinusoïdale pour un angle de retard à l'amorçage  $\alpha$  de  $30^\circ$ .
- Tracer les formes d'ondes de  $u_c(t)$ ,  $i_c(t)$ ,  $v_{T1}(t)$ ,  $i_{T1}(t)$  et  $i_1(t)$  pour une charge  $Z_c$  purement résistive.

Calculer les expressions de  $U_{cmoy}$ ,  $I_{cmoy}$ ,  $I_{ceff}$ ,  $I_{T1eff}$ ,  $V_{T1eff}$  pour la même charge en fonction de  $\alpha$ .

## II. Manipulations :

- Visualiser la tension simple de sortie du transformateur, mesurer la valeur max de cette tension ainsi que sa valeur efficace.

**Le pont est composé de diodes :**

- Visualiser tous les courants et toutes les tensions demandées lorsque la charge  $Z_c$  est une résistance  $R$ .

Les tensions sont visualisées en utilisant **une sonde différentielle de tension**.

Les courants sont visualisés par l'intermédiaire **d'une pince différentielle de courant**.

- Vérifiez la séquence de conduction des diodes établie en préparation.
- Calculer la valeur de  $\overline{U_c}$ , mesurer cette grandeur et comparer par rapport à l'expression théorique.
- Mesurer la valeur de  $\overline{I_c}$ , en déduire la valeur de la résistance totale de la charge.
- Visualiser le phénomène d'empiétement de  $D_1$  sur  $D_2$ .

**On remplace les diodes par des thyristors commandables à la fermeture.**

Visualiser tous les courants et toutes les tensions pour un angle de retard  $\alpha$  de  $30^\circ$ .

- Vérifiez la séquence de conduction des thyristors établie en préparation.
- Calculer la valeur de  $\overline{U_C}$ , mesurer cette grandeur et comparer par rapport à l'expression théorique.
- Mesurer la valeur de  $\overline{I_C}$ , en déduire la valeur de la résistance totale de la charge.
- Mesurer la valeur moyenne  $\overline{U_C}$  pour différentes valeurs de l'angle d'amorçage. Comparer avec la courbe théorique.

La charge est maintenant composée d'une résistance en série avec une inductance de valeur  $L$ .

- Répondez aux mêmes questions que précédemment. Concluez sur les différences obtenues avec une charge purement résistive.

### **Conclusion générale sur le TP**

# MODELISATION D'UN HACHEUR SERIE ET D'UN HACHEUR 4Q SUR MATLAB/SIMULINK

Dans ce TP, nous allons étudier le fonctionnement du hacheur série et du hacheur quatre quadrants lorsque ce dernier alimente un moteur à courant continu (charge R-L-E).

## Étude du hacheur série :

Le schéma général du dispositif à étudier est donné Figure 1. L'interrupteur  $K$  est un MOSFET dont la durée de fermeture est réglée par un angle d'amorçage  $\alpha$  compris entre 0 et 100%. Ce dispositif permet de faire varier la valeur de la tension moyenne  $U_c$  aux bornes de la charge en fonction de  $\alpha$  pour une tension  $E$  donnée.

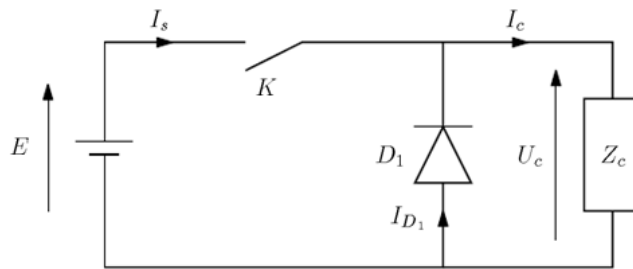


Fig 1 : Schéma général du hacheur série (hacheur dévolteur)

La première partie consiste à étudier de façon simulatoire la partie puissance du hacheur série. Plusieurs charges seront étudiées avec en finalité la commande en vitesse d'un moteur à courant continu.

L'étude du hacheur série sera effectuée à partir du montage présenté Figure 2. Ce montage comprend une source de tension continue de 24 Volts, un MOSFET avec son organe de commande, une diode de roue libre et un moteur à courant continu avec sa charge commandable.

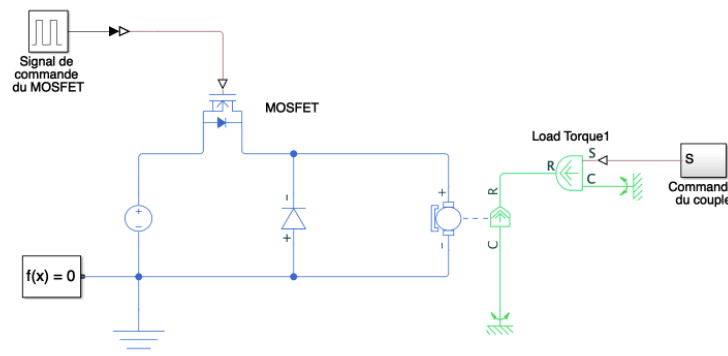


Figure 2 : Circuit utilisé pour l'étude du hacheur série

A partir du fichier Simulink proposé, reconstituer le schéma de la figure 2. On fixera le rapport cyclique (bloc Signal de commande du MOSFET) de sorte à obtenir une fréquence de découpage ( $F_{dec}$ ) de l'interrupteur de 500Hz et un rapport cyclique  $\alpha$  de 70%. Le couple résistant sera considéré constant et égale à 0.5 mN.m.

Pour ce point de fonctionnement :

1. Relever les oscillogrammes  $i_K(t)$ ,  $i_{D1}(t)$ ,  $i_c(t)$  pour une durée de fonctionnement de 0,1 seconde. Préciser sur une période égale à 2 fois la période de découpage quels sont les éléments passants et bloqués.

2. Relever l'oscillogramme de  $u_c(t)$ . Vérifier la valeur du rapport cyclique  $\alpha$  à l'aide des curseurs.
3. Tracer les courbes  $U_{cmoy} = f(\alpha)$ ,  $\Delta I_c = f(\alpha)$  et  $N = f(\alpha)$ .  $\Delta I_c$  étant l'ondulation du courant dans le moteur. Conclure quant à l'utilisation de ce dispositif dans la commande en vitesse d'une MCC.
4. A  $L$  constante (uniquement celle du moteur) observer l'influence de  $F_{dec}$  sur  $\Delta I_c$ . Tracer  $F_{dec} = f(\Delta I_c)$  pour  $f$  variant de 500Hz à 5kHz.
5. A  $F_{dec}$  constante et égale à 500Hz observer l'influence de  $L$  sur  $\Delta I_c$  (pour cela, nous ajoutera une inductance en série avec le moteur). Tracer  $L = f(\Delta I_c)$  pour  $L$  variant de 100mH à 500mH.
6. A partir des relevés obtenus, donner les caractéristiques nécessaires au choix des composants (MOSFET et diode de roue libre).

#### **Étude du hacheur 4 quadrants :**

L'étude du hacheur 4 quadrants sera effectuée en modifiant le montage présenté Figure 2. Ce montage comprendra une source de tension continue de 24 Volts, quatre MOSFET avec leur organe de commande et un moteur à courant continu avec sa charge commandable.

7. Modifier le schéma de puissance de la figure 2 pour faire apparaître un onduleur 4 quadrants. Les paramètres du moteur et de sa charge resteront inchangés.
8. Calculer l'angle de retard à imposer aux interrupteurs pour obtenir une tension moyenne aux bornes du moteur de 14 Volts. Même question pour une tension moyenne de -14V.
9. A partir du bloc commande du hacheur série, trouver une solution permettant de créer les 4 commandes permettant d'avoir une tension moyenne de 14 volts aux bornes du moteur.
10. Relever  $u_c(t)$  et vérifier que l'angle imposé est correct.
11. Relever les courbes  $U_{cmoy} = f(\alpha)$  et  $\Delta I_c = f(\alpha)$ .  $\Delta I_c$  étant l'ondulation du courant dans le moteur pour  $\alpha$  compris entre 0 et 100%. Conclure.

# ÉTUDE DU HACHEUR SERIE – PARTIE COMMANDE

Dans ce TP, nous allons étudier le fonctionnement du hacheur série lorsque ce dernier débite sur une charge R-L et R-L-E (moteur à courant continu). Le schéma général de ce dispositif est donné Figure 1. L'interrupteur K est un IGBT dont la durée de fermeture est réglée par un angle d'amorçage  $\alpha$  compris entre 0 et 1. Ce dispositif permet de faire varier la tension moyenne  $U_c$  aux bornes de la charge en fonction de  $\alpha$  et de  $E$ .

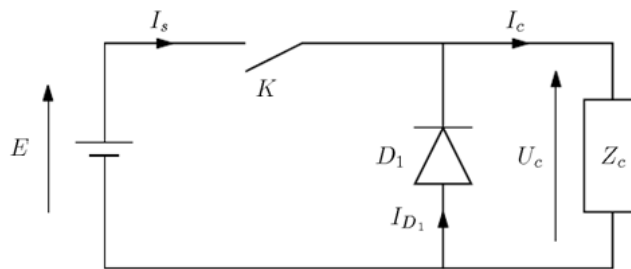


Fig 1 : Schéma général du hacheur série (hacheur dévolteur)

La première partie de ce TP consiste à étudier le dispositif présenté de façon théorique. Le support de cours et les TD fait dans le module Energie Electrique vous permettront de trouver les solutions aux questions posées afin de préparer au mieux la partie pratique de ce TP. Vos documents de cours et TD relatifs aux AOP vous serviront dans la partie étude de la commande de l'IGBT.

## 1. Etude du fonctionnement du hacheur série :

- Déterminer la relation entre la valeur moyenne  $U_c$ , l'angle d'amorçage  $\alpha$  et la tension d'alimentation  $E$  ;
- Tracer la courbe théorique  $U_c$  en fonction de  $\alpha$  pour  $E = 400$  Volts ;

On considère que le courant  $I_c$  est constant :

- Pour  $\alpha = 0.4$ , représenter  $U_c(t)$ ,  $I_s(t)$  et  $I_{D1}(t)$  ;

## 2. Etude de la partie commande du hacheur série :

L'IGBT est commandé par un signal 0 V/ +15 V de rapport cyclique variable  $\alpha$ . L'électronique de commande est représentée Figure 2 par 3 parties distinctes. La première partie permet de générer un signal triangulaire de fréquence variable  $F_{dec}$ . La seconde partie permet de générer une tension continue variable  $V_{cont}$ . La troisième partie construit une tension rectangulaire  $V_{IGBT}$  de rapport cyclique variable qui sera envoyé au driver de l'IGBT.

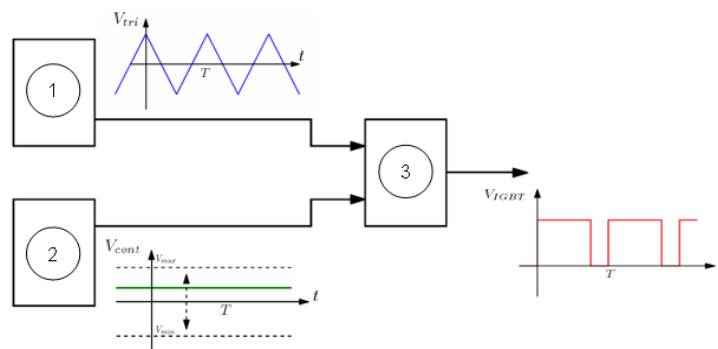


Figure 2 : Génération du signal de commande de l'IGBT

On donne les parties 1 et 2 du schéma général de la commande de l'IGBT à la Figure 3 (les AOP sont alimentés en +/- 15 Volts).

- Donner la fonction de chaque AOP utilisé et rappeler la relation entre leur tension d'entrée et leur tension de sortie en fonction des dipôles présents ;

Les AOP  $A_1$  et  $A_2$  permettent de générer un signal triangulaire de fréquence variable grâce au potentiomètre  $P_1$ .

On donne la relation suivante pour la période du triangle :

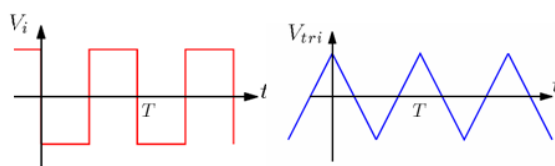
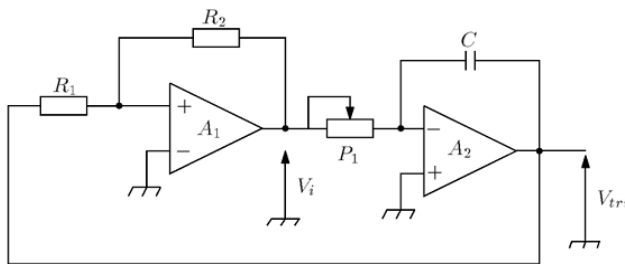
$$T = \frac{4R_1 P_1 C}{R_2}$$

Si nous choisissons  $R_1=R_2=10\text{k}\Omega$  et  $C = 4,7 \text{ nF}$  :

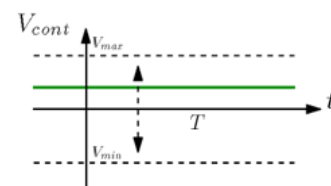
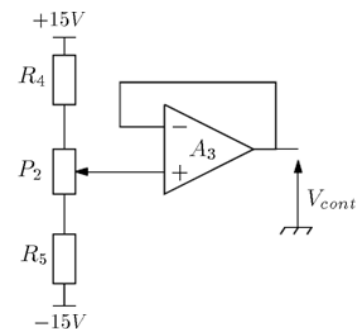
- Calculer la plage de variation que doit prendre le potentiomètre  $P_1$  pour faire varier la fréquence du triangle entre [6 kHz et 20 kHz].
- On désire utiliser toute la plage de variation de  $P_1$ . Quelle valeur de résistance  $R_1$  doit-on mettre en série avec  $P_1$  pour assurer une fréquence maximum de 20 kHz ?
- Donner la nouvelle plage de variation de  $P_1$ .

L'AOP  $A_3$  permet de générer une tension continue réglable  $V_{cont}$  dans la plage  $[V_{MIN} - V_{MAX}]$  grâce au potentiomètre  $P_2$  dont la valeur est de  $10 \text{ k}\Omega$ .

- Calculer les valeurs de  $R_4$ ,  $R_5$  pour que les bornes de la tension  $V_{cont}$  se situent entre -10V et +10V ;
- Quelle composant sera placé en partie 3 de la carte électronique pour créer à partir des deux signaux précédents un signal rectangulaire  $V_{IGBT}$  de rapport cyclique variable  $\alpha$  ?
- Faire un schéma complet du dispositif de commande de l'IGBT.
- Quelle sera l'influence de la plage de tension de  $V_{cont}$  sur le rapport cyclique variable ?



Partie 1 : Générateur de triangle



Partie 2 : Tension continue réglable

Figure 3 : Electronique de commande du hacheur série (Partie 1 et 2)

### Manipulation :

L'étude du hacheur série sera effectuée à partir du montage présenté Figure 4. Ce montage comprend un étage redressement grâce à un pont PD3, un étage filtrage grâce à deux capacités mises en séries, un étage hachage grâce à un bras constitué de deux IGBT avec diode montée en antiparallèle.

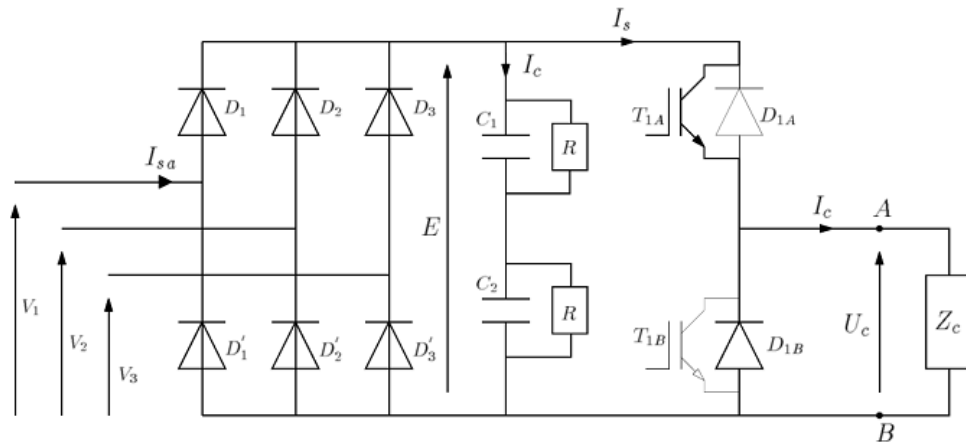


Figure 4 : Circuit utilisé pour l'étude du hacheur série

Pour obtenir le mode de fonctionnement Hacheur Série, ce sera l'IGBT  $T_{1A}$  qui sera commandé avec un signal carré de rapport cyclique variable  $\alpha$  (réglé par potentiomètre P2) et une fréquence de découpage  $F_{dec}$  (réglée par le potentiomètre P1). Le transistor  $T_{1B}$  sera maintenu à l'état bloqué. La fonction de diode de roue libre sera assurée par la diode  $D_{1B}$ .

### Etude de la partie commande :

1. Réaliser les parties 1 et 2 de la commande de l'IGBT sur un simulateur fourni par l'enseignant.
2. Régler les potentiomètres de sorte à obtenir pour le signal triangle une fréquence de 10 kHz et pour le signal continu  $v_{cont}(t)$  une valeur de 9 Volts. Relever les oscillogrammes pour ce point de fonctionnement.
3. Réaliser la partie 3 du circuit de commande (on vous donnera la datasheet d'un composant pouvant être utilisé pour réaliser cette partie). Le courant absorbé par le driver de l'IGBT est de 150 mA.
4. Vérifier que la variation de la tension  $V_{cont}$  permet de régler le rapport cyclique  $\alpha$  du signal créneau  $V_{IGBT}$ . Donner la valeur MIN et MAX de  $\alpha$ . Faire un relevé pour un rapport cyclique de 0.5.
5. Relever les oscillogrammes  $v_{cont}(t)$ ,  $v_{tri}(t)$  et  $v_{IGBT}(t)$  pour une même valeur de  $\alpha$ .



# ETUDE DU HACHEUR SERIE – PARTIE PUISSANCE

L'étude du hacheur série sera effectuée à partir du montage présenté Figure 4. Ce montage comprend un étage redressement grâce à un pont PD3, un étage filtrage grâce à deux capacités mises en séries, un étage hachage grâce à un bras constitué de deux IGBT avec diode montée en antiparallèle.

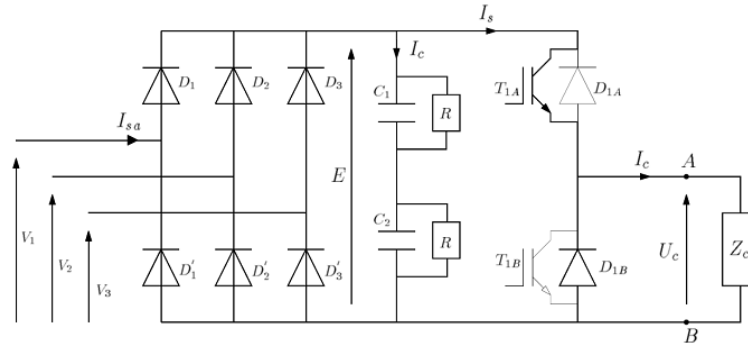


Figure 4 : Circuit utilisé pour l'étude du hacheur série

## Etude sur charge R-L :

L'alimentation de l'étage redresseur sera effectuée via un **autotransformateur triphasé**. La charge sera placée entre les bornes A et B du montage (Figure 4). Nous réglerons l'autotransformateur de sorte à obtenir 400 Volts pour la tension E et nous réglerons le potentiomètre  $P_1$  pour obtenir une fréquence  $F_{dec}$  de 10 kHz.

12. Expliquer la raison pour laquelle on ne peut pas alimenter directement le montage de la figure 4 par le réseau triphasé habituel ;
13. Câbler la partie puissance du hacheur série en y incluant tous les appareils de mesures nécessaires à répondre aux questions suivantes ;
14. Relever les oscillogrammes  $u_c(t)$ ,  $u_{T1A}(t)$ ,  $u_c(t)$ ,  $u_{T1A}(t)$ ,  $u_{D1B}(t)$  ;
15. Relever les courbes  $U_{cmoy}=f(\alpha)$  et  $\Delta I_c = f(\alpha)$ .  $\Delta I_c$  étant l'ondulation du courant dans la charge ;
16. A T constante observer l'influence de L sur  $\Delta I_c$  ;
17. A L constante observer l'influence de T sur  $\Delta I_c$ .

**Attention : Lorsque le montage n'est plus alimenté, la tension E du bus continu reste importante. Attendre que cette tension soit égale à 0 pour effectuer une quelconque modification du montage.**

## Etude sur charge R-L-E (Moteur à courant continu) :

La charge  $Z_c$  est un moteur à courant continu 1500W. Les bornes A et B du montage seront reliées à l'induit de la MCC, l'inducteur étant alimenté par une source de tension externe.

1. Relever la plaque signalétique de la MCC. Pour avoir la vitesse maximale, quelle doit être la valeur de la tension E sur le bus continu ?
2. Réaliser le montage demandé en y incluant les appareils de mesure ;
3. Relever les oscillogrammes  $u_c(t)$ ,  $u_{T1A}(t)$ ,  $i_c(t)$ ,  $i_{T1A}(t)$ ,  $i_{D1B}(t)$  ;
4. Relever les courbes  $U_{cmoy}=f(\alpha)$ ,  $\Omega=f(\alpha)$  et  $\Delta I_c=f(\alpha)$ .  $\Delta I_c$  étant l'ondulation du courant dans la charge.
5. A T constante observer l'influence de L sur  $\Delta I_c$ .
6. Régler la fréquence d'échantillonnage de l'IGBT à 6 kHz. Mesurer l'influence de  $F_{dec}$  sur  $\Delta I_c$ .
7. D'une valeur de  $\alpha$  de 0.8, passer rapidement à une valeur de 0.3 approximativement, relever la tension  $u_c(t)$  ainsi que le courant  $i_c(t)$  à cet instant. Expliquer la courbe obtenue.

## Conclusion générale :

Vous terminerez votre rapport par une conclusion sur l'utilisation du hacheur série. Vous citerez des exemples industriels pouvant utiliser ce type de convertisseur.

# COMPENSATION D'ENERGIE REACTIVE, ETUDE DE LA POLLUTION HARMONIQUE AU RESEAU

Le but de cette étude est de découvrir les problèmes de pollution harmonique rencontrés sur les réseaux de distribution d'énergie et d'appréhender les solutions les plus courantes permettant, soit de vivre avec, soit de combattre cette pollution.

Les récepteurs électriques utilisés par l'industrie ont été pendant très longtemps essentiellement des récepteurs résistifs ou résistifs et inductifs. Depuis l'avènement de l'électronique de puissance, les formes d'onde des courants absorbés ne sont plus (et de loin) des sinusoïdes. Ces courants non sinusoïdaux perturbent grandement l'ensemble des récepteurs liés à eux par le réseau. Ce problème est ressenti avec acuité dans l'industrie car il peut entraîner des destructions de machines ou d'appareillages mais aussi une augmentation significative de la facture énergétique.

La maquette qui vous est proposée à l'étude, peut correspondre à une installation d'une P.M.I. Il suffit pour cela de multiplier les puissances par 100 par exemple tout en étant bien conscient que les effets que nous allons constater sur la maquette existeront tout à fait dans la réalité, mais qu'en plus de nombreux effets secondaires négligeables pour cette maquette ne le seront plus avec les grandeurs réelles (effets thermiques, résonance mécanique, efforts électromagnétiques...). Se référer au schéma donné à la figure ci-dessous.

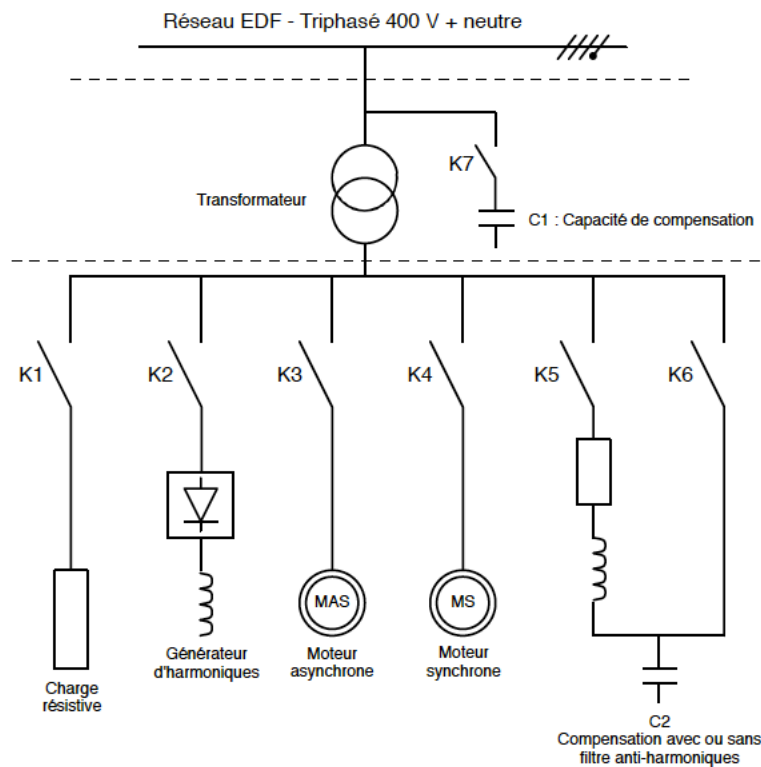


Schéma unifilaire de l'installation électrique étudiée

## 1. Préparation

- Rechercher les possibilités existantes permettant de compenser la puissance réactive d'une installation.
- Donner la relation qui lie la tension  $V$ , le courant  $I$  et l'impédance  $Z$  d'un dipôle  $Z$  au fondamental et à l'harmonique de rang  $n$ .
- Rechercher les origines et les effets de la pollution harmonique.

## 2. Manipulation

### 2.1 Étude de la compensation du réactif

On se propose de faire un bilan des puissances de l'installation dite "classique" (transformateur + résistance + moteur asynchrone) de sorte à trouver la solution adéquate pour compenser tout ou partie de la puissance réactive consommée.

#### 2.1.1 Analyse de l'installation sans compensation

- Remplir le tableau 1 (la mesure sera effectuée en amont du transformateur et en aval du transformateur).
- Analyser les résultats obtenus. Le facteur de puissance de l'installation classique est-il acceptable ? Justifiez.

	V(V)	I(A)	P(W)	Q(Var)	S(VA)	Fp	Nature
Amont							
Aval							

Tableau 1 : Analyse de l'installation sans compensation

#### 2.1.2 Analyse de l'installation avec compensation

On se propose d'étudier l'emplacement de la capacité de compensation

- Remplir le tableau 2 et déterminer l'efficacité des deux dispositifs de compensation (on réalisera la mesure en amont du transformateur).
- Conclure quant à l'efficacité des deux dispositifs

Éléments	Interrupteurs	I(A)	V(V)	P(W)	Q(Var)	S(VA)	Fp	Nature
Transfo + Résistance + MAS + C1	K <sub>1</sub> -K <sub>3</sub> -K <sub>7</sub>							
Transfo + Résistance + MAS + C2	K <sub>1</sub> -K <sub>3</sub> -K <sub>6</sub>							

Tableau 2 : Analyse de la compensation

Pour des questions pratiques, on gardera la capacité C<sub>2</sub> pour assurer une partie de la compensation de la puissance réactive de l'installation dite "classique" : effectuer une analyse harmonique de la tension et du courant au niveau de la capacité C<sub>2</sub>.

## **2.2 Étude de la pollution harmonique dans un réseau**

On insère dans l'installation dite "classique" compensée un dispositif non linéaire (générateur d'harmoniques avec la fermeture de l'interrupteur  $K_2$ ).

On se propose d'étudier l'influence de cette charge non linéaire sur le comportement global du réseau. Une attention particulière sera portée sur le condensateur assurant la compensation de la puissance réactive générée par le moteur asynchrone.

On intègre  $C_2$  en fermant l'interrupteur  $K_6$  (étude sans filtre) :

- Mesurer l'intensité efficace absorbée par la résistance, le moteur asynchrone, le condensateur  $C_2$  avec et sans générateur d'harmonique (vous présenterez les résultats dans un tableau). Que peut-on conclure ?
- Reprendre la même démarche avec l'allure de la tension et des courants.
- Reprendre la même démarche avec l'analyse harmonique des courants et de la tension.

Expliquer pourquoi dans cette situation il est très courant de voir la destruction de la batterie de condensateurs au bout d'un temps assez bref (souvent très inférieur à 6 mois).

## **2.3 Signification physique des résultats précédents**

Faire le schéma équivalent de l'installation pour 1 phase à 50Hz puis pour l'harmonique de rang «  $n$  » (Le générateur d'harmoniques sera considéré comme étant un générateur de courant dont on donnera une modélisation).

Expliquer de façon qualitative le phénomène observé au paragraphe 2.2.

## **3. Conclusions**

Vous conclurez sur les résultats obtenus

# ÉTUDE D'UN PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE

Ce TP vous permettra d'étudier le fonctionnement d'un panneau photovoltaïque. Il vous donnera les bases nécessaires au dimensionnement d'une installation photovoltaïque pour particulier.

## 1. Pré-étude et choix des éléments

- Étude des caractéristiques d'un panneau photovoltaïque
  - Tension à vide

La tension à vide  $U_{oc}$  est la plus grande tension pouvant apparaître aux bornes d'un panneau photovoltaïque. Il est nécessaire de la connaître pour assurer un dimensionnement correct des éléments du circuit électrique montés en aval (convertisseur, appareils de protection, ...). On se propose donc de déterminer la courbe  $U_{oc} = f(\text{Irradiation})$ . Réglez l'intensité de rayonnement à l'aide du potentiomètre, mesurez la tension à vide aux bornes du panneau. Tracer la courbe  $U_{oc} = f(\text{Irradiation})$ . Conclure.

- Courant de court-circuit

Le courant de court-circuit est le courant le plus important que peut fournir le panneau. Il est mesuré avec un ampèremètre directement à la sortie du panneau. Le courant de court-circuit dépend principalement :

- de l'éclairement
- de la température
- de l'angle de rayonnement

Réglez l'intensité de rayonnement à l'aide du potentiomètre, pour plusieurs valeurs de cette intensité, mesurez le courant de court-circuit en sortie du panneau. Tracer la courbe  $I_{cc} = f(\text{Irradiation})$ . Déterminer sa valeur maximale. Conclure.

- Courbe  $I=f(U)$  et  $P=f(U)$  sous différentes irradiations

Le panneau étant a-habituellement connecté à une charge, il est nécessaire de déterminer les points intermédiaires entre le point « vide » et le point « court-circuit » pour une irradiation donnée. Pour obtenir les points intermédiaires, on connecte une charge résistive variable à la sortie du panneau.

- Relever la tension  $U$  et le courant  $I$  pour 5 intensités de rayonnement différentes.
- Tracer les relevés  $I=f(U)$  et  $P=f(U)$ . Tracer sur chaque courbe le point de fonctionnement optimal. Conclure.

- Étude des phénomènes d'ombrages

Dans cette partie, vous allez étudier le comportement d'un module photovoltaïque en cas d'ombrage plus ou moins partiel.

- Donner un schéma électrique de connexion des cellules PV du panneau.
- En considérant une irradiation de  $600\text{W}/\text{m}^2$  et en faisant varier la résistance de charge, tracer la courbe  $I=f(U)$  et  $P=f(U)$  sans ombrage, avec un ombrage partiel ( $1/2$  cellule) et un ombrage total (une cellule PV du panneau).

**Proposer une méthode de recherche du point de fonctionnement optimal pour un panneau photovoltaïque.**

## 2. Dimensionnement d'une installation

L'objectif est de dimensionner une installation photovoltaïque pour une revente totale de l'électricité produite au fournisseur d'énergie électrique. L'habitation se situe à Lyon. Les panneaux photovoltaïques seront placés sur le pan d'une toiture d'une maison dont les données sont indiquées à la figure 1.

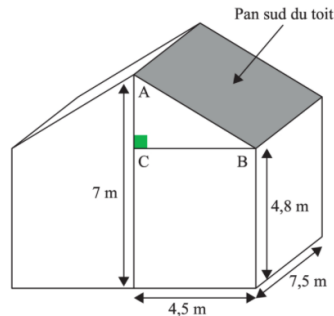


Figure 1 : Données de l'habitation dont l'orientation du pan est orientée plein sud

- Déterminer le nombre de module pouvant être placé sur la toiture. Nous prendrons des modules Bosch - 260Wp dont les caractéristiques techniques sont données dans la documentation fournie (disponible sur Arche).
- Calculer la puissance maximale pouvant être fournie par l'installation. Vous préciserez les conditions à réunir pour obtenir cette valeur.
- A partir de la documentation technique du panneau, relever :
  - la tension au point de fonctionnement optimal ( $V_{mpp}$ )
  - la puissance au point de fonctionnement optimal ( $I_{mpp}$ )
  - la tension circuit ouvert ( $V_{oc}$ )
  - le courant de court-circuit ( $I_{oc}$ )

Pour la suite du dimensionnement, il est nécessaire de déterminer avec précision les limites de tension, donc les tensions minimales et maximales que le panneau sélectionné peut fournir. Les tensions maximales apparaissent lorsque le panneau est froid, la tension minimale lorsque le panneau est chaud. Dans notre exemple, la température minimale s'établit à  $-10^{\circ}\text{C}$  et la température maximale à  $70^{\circ}\text{C}$ . En générale, les données techniques n'indiquent pas la valeur des tensions à ces températures, mais il est facile de les calculer.

- Donner la température correspondant aux données de la fiche technique
- Calculer les tensions  $V_{mpp}$  et  $V_{oc}$  à  $-10^{\circ}\text{C}$  et à  $+70^{\circ}\text{C}$
- A partir des documents techniques fournis, donner le type et la référence précise du convertisseur qui doit nécessairement être placé entre les panneaux et le réseau électrique.

Dans la pratique, les panneaux photovoltaïques sont montés en série ou en parallèle pour être ensuite câblé au convertisseur de tension. La tension du montage final doit se situer dans la plage de tension d'entrée MPP du convertisseur.

- A partir de la documentation technique du convertisseur, déterminer la plage de tension MPP
- Déterminer le nombre minimal et maximal de panneau pouvant être connecté sur une entrée MPP du convertisseur

La tension à vide à  $-10^{\circ}\text{C}$  est la tension maximale pouvant apparaître dans le circuit.

- Recalculer le nombre de panneaux maximal pouvant être connecté sur le convertisseur
3. Calcul du productible

Pour connaître le temps de retour sur investissement de l'installation, il est nécessaire de calculer l'énergie que l'installation peut produire par an. Il existe divers logiciels en ligne pour effectuer ce calcul mais un résultat assez fidèle peut être obtenu à partir de la relation suivante :

$$E = \frac{P_c}{P_i} E_i P_r T_g$$

$E$  : productible de l'installation en kWh/an

$P_c$  : puissance crête de l'installation en kWc

$P_i$  : puissance d'éclairement aux conditions STC (1kW/m<sup>2</sup>)

$E_i$  : Irradiation solaire annuelle de la zone géographique considérée en kW/m<sup>2</sup>/an (cf figure 2)

$P_r$  : le coefficient de performance qui dépend essentiellement des panneaux utilisés

$T_g$  : le coefficient trigonométrique issu du tableau 1

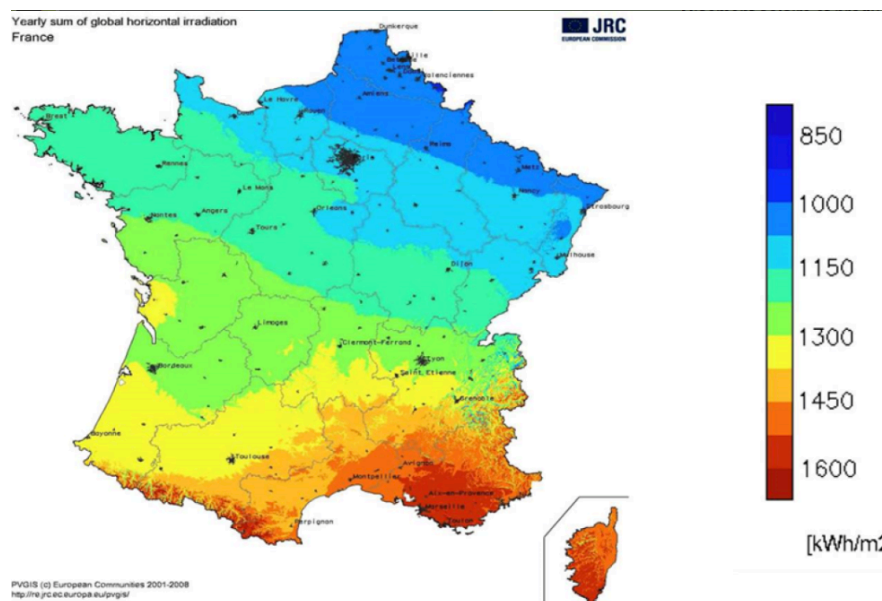


Figure 2 : Irradiation solaire annuelle en France

Inclinaison (°)		Orientation									
		<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>									
		-180	-135	-90	-45	0	45	90	135	180	
0		0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	
10		0,792	0,814	0,866	0,917	0,938	0,917	0,866	0,814	0,792	
20		0,693	0,739	0,843	0,94	0,98	0,94	0,843	0,739	0,693	
30		0,595	0,661	0,812	0,943	0,998	0,943	0,812	0,661	0,595	
35		0,548	0,622	0,794	0,945	1	0,945	0,794	0,622	0,548	
40		0,503	0,586	0,775	0,933	0,995	0,933	0,775	0,586	0,503	
50		0,417	0,519	0,731	0,903	0,968	0,903	0,731	0,519	0,417	
60		0,343	0,463	0,682	0,857	0,919	0,857	0,682	0,463	0,343	
70		0,291	0,415	0,628	0,794	0,85	0,794	0,628	0,415	0,291	
80		0,259	0,374	0,57	0,719	0,764	0,719	0,57	0,374	0,259	
90		0,242	0,337	0,511	0,635	0,662	0,635	0,511	0,337	0,242	

Tableau 1 : Coefficient trigonométrique  $T_g$  (en %)

- Calculer le productible en kWh/an en considérant un coefficient de performance  $P_r$  de 0,9.

Comparer le résultat obtenu avec le logiciel de calcul en ligne PVgis. Conclure.

# Modélisation et étude d'un onduleur monophasé avec Matlab/Simulink

Dans ce TP, nous allons étudier le fonctionnement de l'onduleur de tension monophasé et plus particulièrement ses différents modes de commande.

Le schéma général du dispositif à étudier est donné Figure 1. Les interrupteur notés T avec une diode D montée tête bêche sont des IGBT dont la durée de fermeture est réglée par un angle d'amorçage  $\alpha$  compris entre 0 et 100%. Ce dispositif permet, pour un certain type de commande, de faire varier la valeur efficace de la tension  $u_c(t)$  aux bornes de la charge.

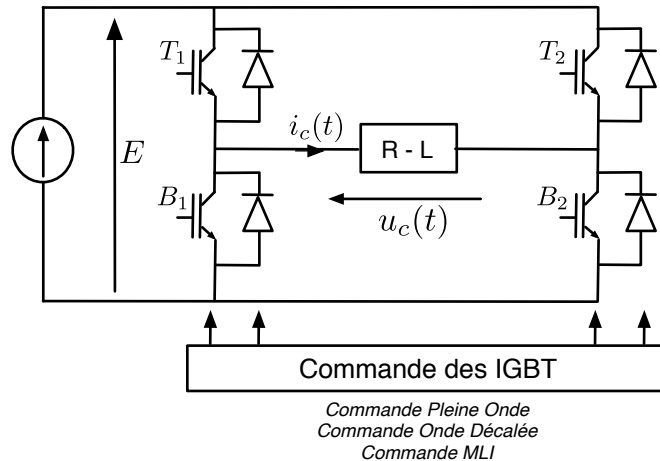


Fig 1 : Schéma général de l'onduleur de tension monophasé

La première partie consiste à étudier de façon simulateur les différents types de commande de l'onduleur de tension monophasé. La charge sera représentée par une résistance R de 50 Ohms. La source de tension DC sera réglée à 150 Volts.

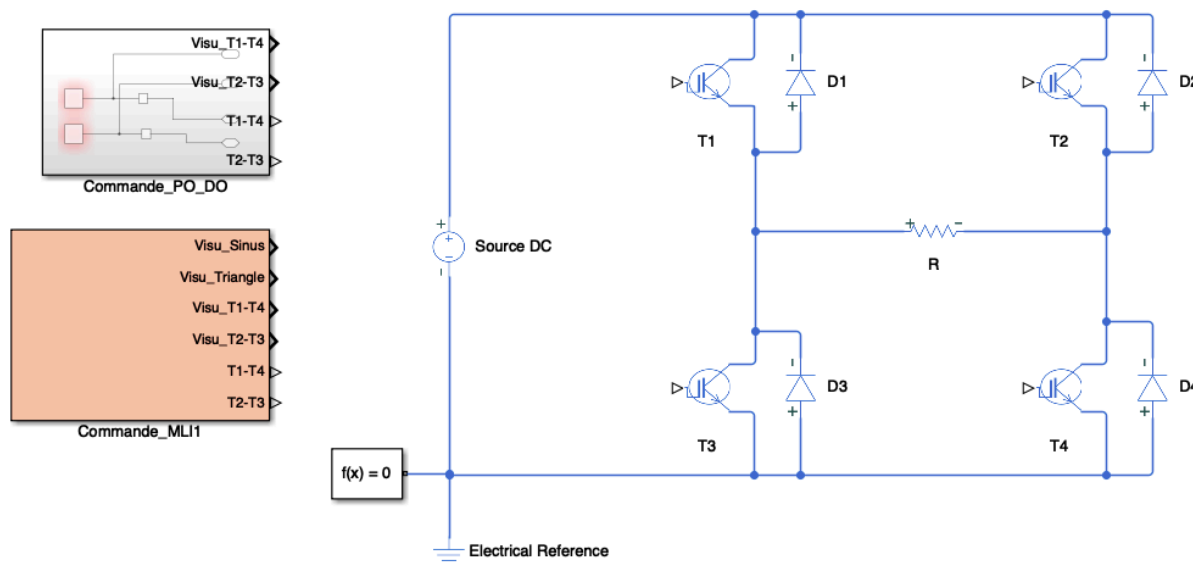


Figure 2 : Circuit utilisé pour l'étude des commandes de l'onduleur monophasé de tension.

A partir du fichier Simulink proposé, reconstituer le schéma de la figure 2.



### **Étude d'une commande de type Plein Onde :**

On fixera les paramètres de simulation suivants :

- U<sub>alim</sub> : 150 Volts
- Rapport cyclique de 50%
- Décalage  $\beta$  de 0% (Pleine Onde)
- Fréquence de 50 Hz

Pour ce point de fonctionnement :

1. Relever les oscillogrammes  $u_c(t)$ ,  $i_{T1}(t)$ ,  $i_c(t)$  pour une durée de fonctionnement de 0,1 seconde. Préciser sur une période égale à 2 fois la période de découpage quels sont les éléments passants et bloqués. Vérifier la valeur du rapport cyclique  $\alpha$  à l'aide des curseurs.
2. Relever la FFT de la tension  $u_c(t)$  et du courant  $i_c(t)$  (on régler la période de simulation à 3 secondes) et remplir l'annexe 2 (partie PO). A partir de la FFT, calculer la valeur efficace du courant dans la résistance. Vérifier cette valeur avec le bloc Simulink approprié. Conclusion.

### **Étude d'une commande de type Onde Décalée :**

Pour l'étude de ce type de commande, la variable  $\beta$  dans le fichier .m sera modifié. On fixera les paramètres de simulation suivants :

- U<sub>alim</sub> : 150 Volts
  - Rapport cyclique de 50%
  - Décalage de  $\beta\%$  (Onde Décalée)
  - Fréquence de 50 Hz
3. Remplissez le tableau donné dans l'annexe 2. Relever les oscillogrammes de  $u_c(t)$ ,  $i_{T1}(t)$  pour un angle  $\beta$  égal à  $\pi/3$ . Conclusion

### **Étude d'une commande de type MLI :**

La commande des interrupteurs est basée sur une comparaison sinus triangle (commande comparative). Un signal triangulaire de fréquence  $F_{tri}$  et d'amplitude  $A_{tri}$  est comparé à un signal sinusoïdal de fréquence  $F_{sin}$  et d'amplitude  $A_{sin}$  ( $F_{tri} \gg F_{sin}$ ).

4. Rappeler le mode de fonctionnement de ce type de commande.

Pour l'étude de ce type de commande, on fixera les paramètres de simulation suivant :

- U<sub>alim</sub> : 150 Volts
  - A<sub>sin</sub> : 10 Volts
  - F<sub>sin</sub> : 50 Hz
  - A<sub>tri</sub> : 10 Volts
  - F<sub>tri</sub> : 500 Hz
5. Remplissez le tableau donné dans l'annexe 2 pour les différentes valeurs de A<sub>sin</sub> proposées. Relever les oscillogrammes de  $u_c(t)$ ,  $i_{T1}(t)$  pour une amplitude A<sub>sin</sub> égale à 10 Volts.
  6. Quelle solution proposeriez-vous pour éloigner les harmoniques autres que celui à 50 Hz au-delà des 1000 Hz ? Mettez en application votre raisonnement. Conclusion.
  7. Quelle méthode proposeriez-vous pour obtenir un courant sinusoïdal aux bornes de la résistance ? Mettez en application votre raisonnement. Conclusion.

### **Synthèse :**

Réaliser, à l'aide d'Excel, un graphique de type « Histogramme » représentant l'amplitude des harmoniques (de H1 à H13) pour les différentes commandes étudiées. Conclusion.

## ETUDE FREQUENTIELLE DES DIFFERENTS MODES DE COMMANDE D'UN ONDULEUR MONOPHASE DE TENSION

Dans ce TP, on se propose d'étudier la conversion continu-alternatif à l'aide d'un onduleur de tension monophasé. Nous nous attarderons plus particulièrement sur l'étude fréquentielle des modes de commandes pleine onde, onde décalée et MLI (Modulation de la Largeur d'Impulsion).

Schéma de principe du montage onduleur en pont.

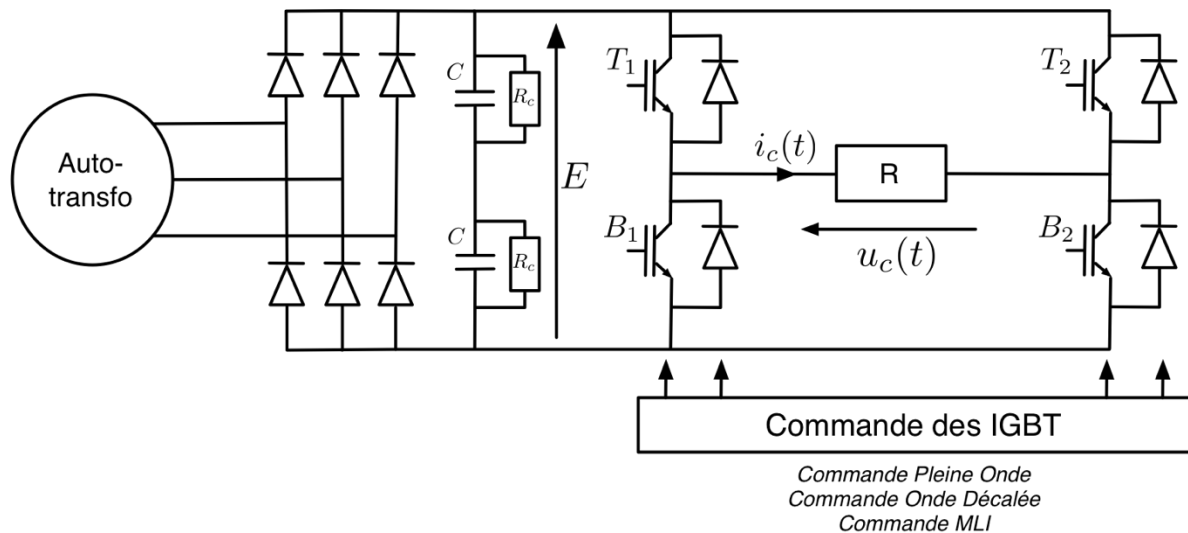


Fig 1 : Convertisseur AC-DC-AC

Les tensions d'entrées variables, délivrées par l'autotransformateur, peuvent s'exprimer :

$$v_{s1}(t) = V\sqrt{2} \sin(\omega.t), \quad v_{s2}(t) = V\sqrt{2} \sin(\omega.t - \frac{2.\pi}{3}) \quad \text{et} \quad v_{s3}(t) = V\sqrt{2} \sin(\omega.t - \frac{4.\pi}{3})$$

La charge est une résistance R (caisse de charge résistive).

- Expliquer le fonctionnement des différents étages du montage présenté ci-dessus.
- Donner une allure des courbes de tension obtenue à chaque étage de conversion.

### Étude du boîtier de commande en mode Pleine Onde (PO) et Onde Décalée (OD) :

*Nb : L'étude du boîtier de commande s'effectuera sans avoir connecté la puissance.*

- Visualiser la forme du signal triangulaire nommé « Triangle 50 Hz ». Mesurer sa fréquence  $F_{Tri}$  et son amplitude  $V_{Tri}$ .
- Visualiser les signaux « T1-B2-PO-BO » et « T2-B1-PO-BO ».
- Expliquer la méthode utilisée pour générer ces deux signaux.

### Commande plein onde :

- Faire le schéma de câblage permettant de :
  - mesurer la valeur efficace  $U_c$  ;
  - mesurer la valeur efficace du courant dans la charge  $I_c$ .
  - mesurer la valeur de la tension du bus continu E ;
  - visualiser la forme de la tension  $u_c(t)$  ;
  - visualiser les signaux de commande des IGBT ;
  - mesurer les harmoniques de la tension  $u_c(t)$  (wattmètre FLUKE).

- Régler l'autotransformateur de sorte à obtenir une valeur efficace  $U_c$  (mesurée à l'aide d'un voltmètre RMS) de 150 Volts aux bornes de la charge.
- Pour cette valeur efficace, compléter le tableau donné en **Annexe 1**.

#### Commande onde décalée :

En adoptant le même schéma de câblage que précédemment et pour des valeurs de l'angle de décalage  $\beta$  de  $\pi/7$ ,  $\pi/5$  et  $\pi/3$  :

- Régler l'autotransformateur de sorte à obtenir une valeur efficace  $U_c$  (mesurée à l'aide d'un voltmètre RMS) de 150 Volts aux bornes de la charge.
- Pour cette valeur efficace, compléter le tableau donné en **Annexe 1**.

#### Commande MLI :

*Nb : L'étude du boîtier de commande s'effectuera sans avoir connecté la puissance.*

Pour permettre de générer les signaux de commande des IGBT, il est nécessaire d'envoyer au boîtier de commande une sinusoïde de référence  $V_{sin}$  d'amplitude comprise entre 0 et 10 Volts et de fréquence égale à 50 Hz.

- Visualiser la forme du signal triangulaire nommé « Triangle MLI ». Mesurer sa fréquence  $F_{MLI}$  et son amplitude  $V_{MLI}$ .

Appliquer sur l'entrée appelée « Entrée sinus » du boîtier de commande une tension  $V_{sin}$  d'amplitude 10 Volts et de fréquence 50 Hz issue d'un GBF.

- Visualiser les signaux « T1-B2-MLI » et « T2-B1-MLI ».
- Expliquer la méthode utilisée pour générer ces deux signaux.
- Réaliser le schéma de câblage permettant de faire fonctionner l'onduleur en mode MLI.

Pour une tension de référence  $V_{sin}$  égale à 10 Volts, régler la valeur de la tension du bus continu de sorte à obtenir une valeur efficace de  $U_c$  égale à 150 Volts.

- Pour cette valeur efficace, compléter le tableau donné en **Annexe 1**.
- Faire les mêmes relevés pour une tension  $V_{sin}$  de 5 Volts puis de 2 Volts.

On désire atténuer les harmoniques présents en haute fréquence à l'aide d'un filtre passe bas du 1<sup>er</sup> ordre :

- Calculer la valeur de la capacité  $C_f$  à mettre en place pour obtenir une fréquence de coupure  $f_c$  de 1kHz (on donne  $L_f = 30$  mH).
- Présenter à l'enseignant le nouveau schéma de câblage permettant de prendre en compte ce filtre passe-bas.
- Visualiser la tension présente aux bornes de la charge R et comparer avec la tension obtenue sans filtrage (évolution temporelle, étude harmonique, ...).

#### Synthèse :

- Réaliser, à l'aide d'Excel, un graphique de type « Histogramme » présentant l'amplitude des harmoniques (de H1 à H13) en fonction de ces mêmes harmoniques pour les différentes commandes étudiées.

#### CONCLUSION

Vous comparerez les différents modes de commande étudiés précédemment en présentant respectivement leur(s) avantage(s) et leur(s) inconvénient(s).