



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITE MUSTAPHA STAMBOULI DE MASCARA
FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Polycopié de Travaux Pratiques

Electronique de Puissance

Présenté par :

Dr. BEKKARA Mohammed Fethi

Ce cours est destiné aux étudiants de 3eme année
Licence/Electromécanique

Algérie
2021

Avant Propos

Ce polycopié est destiné aux étudiants en troisième année licence Electromécanique afin d'être utilisé comme un support de travaux pratiques dans le domaine de l'électronique de puissance. Le manuscrit est constitué de plusieurs fiches de TP avec des solutions et des illustrations ; le contenu est conforme aux programmes agréé par le ministère. Sa présentation didactique est le fruit de plusieurs années d'expérience pédagogique par l'auteur. L'objectif est de faire découvrir la finalité de l'électronique de puissance, l'ensemble des conversions de l'énergie électrique et les moyens mises en œuvre pour les réaliser. Grâce à ce polycopié et en s'aidant de l'outil de simulation de circuit électronique Power-Sim PSIM, l'étudiant découvrira les bases et les principes de fonctionnement des convertisseurs de l'électronique de puissance qui sont devenu partie intégrante du domaine industriel. Ce polycopié est à mettre entre les mains de tous ceux qui désirent avoir un large panorama de l'électronique de puissance. Bien que l'élaboration de ce manuscrit ait été faite avec le plus grand soin, le contrôle que nous avons pu faire de notre travail n'est pas absolu, et il serait étonnant qu'il ne subsiste pas d'erreurs.

Mascara le 24 Février 2021

Table des matières

Avant propos	iii
Introduction	05
<u>Travaux Pratique n°1</u> Redresseur non commandé monophasé et triphasé (charge R, L, E)...	06
1.1 Redresseur monophasé	06
1.1.1. Redressement monophasé avec une charge R	07
1.1.2. Redressement monophasé avec une charge RL	07
1.1.3. Redressement monophasé avec une charge RLE	08
1.2. Redresseur parallèle P3	09
<u>Solution TP n°1</u> Redresseur non commandé monophasé et triphasé (charge R, L, E).....	10
<u>Travaux Pratique n°2</u> Redresseur commandé monophasé et triphasé (charge R, L, E).....	17
2.1. Redresseur monophasé	17
2.1.1. Redressement monophasé commandé avec une charge R	17
2.1.2. Redressement monophasé commandé avec une charge RL	18
2.1.3. Redressement monophasé commandé avec une charge RLE	18
2.2. Redresseur triphasé	19
2.2.1. Redresseur parallèle P3 commandé (tout thyristor)	19
2.2.2. Redresseur parallèle P3 commandé (charge RL).....	20
2.2.3. Redresseur parallèle P3 commandé (charge RLE)	21
<u>Solution TP n°2</u> Redresseur commandé monophasé et triphasé (charge R, L, E)	22
<u>Travaux Pratiques n°03</u> Composant en commutation (IGBT, MOSFET...)	29
3.1. Le transistor bipolaire	30
3.2. Le transistor à effet de champ MOSFET	30
3.3. Transistor bipolaire à grille isolée	30
<u>Solution TP n°03</u> Composant en commutation (IGBT, MOSFET...)	33
<u>Travaux Pratiques n°04</u> Hacheur à thyristor	37
4.1. Les thyristors	37
4.2. Hacheur série	38
4.3. Hacheur parallèle.....	39
<u>Solution TP n°04</u> Hacheur à thyristor.....	41
<u>Travaux Pratiques n°05</u> Onduleur monophasé (à résonance, à source de courant)	47
5.1. Onduleur en pont	47
5.2. Onduleur en pont à résonance	48
5.3. Onduleur à source de courant	48
<u>Solution TP n°05</u> Onduleur monophasé (à résonance, à source de courant).....	50
<u>Travaux Pratiques n°06</u> Gradateur monophasé (Charge R, L).....	55
6.1. Gradateur sur charge résistive	55
6.2. Gradateur sur charge RL	56
<u>Solution TP n°06</u> Gradateur monophasé (Charge R, L)	57
<u>Travaux Pratiques n°07</u> Gradateur Triphasé	60
7.1. Gradateur sur charge résistive	60
<u>Solution TP n°07</u> Gradateur Triphasé	62
<u>Références</u>	65

Introduction

Contrairement à l'électronique analogique, l'électronique de puissance - basée sur le principe de la commutation des interrupteurs - est née du besoin de redresser des courants forts et de la nécessité de commander des moteurs et des machines électriques. Ces activités été majoritairement industrielles et les puissances converties dépassaient largement les dizaines de Méga Watts. Des lors, et au fil du temps se sont développés d'autres appareils portatifs, l'électroménager, les dispositifs industriels, les chargeurs de batteries, les actionneurs, les ascenseurs...etc. par conséquent les convertisseurs de l'électronique de puissance se sont popularisés. Ainsi, l'emploi des convertisseurs de l'électronique de puissance est devenu l'épine dorsale de la discipline de l'électromécanique. C'est dans cette optique que le programme d'enseignement agréé par le ministère a été élaboré.

Dans ce polycopié, la fonction et l'emploi des convertisseurs est illustré par des simulations et consolidé par des questions bien déterminées. Afin de faciliter l'assimilation du programme de TP, les redresseurs sont étudiés par rapport à plusieurs types de charge (Résistive R, Inductive L et à Fem E) ; les hacheurs sont étudiés vis-à-vis des machines à courant continu afin d'introduire la fonction de la variation de vitesse ; le rôle des onduleurs et des gradateurs est démystifier par des exemples et des modèles simplifiés. Un esprit curieux en puisera aisément grâce aux solutions et corrigés type des fiches de travaux pratiques.

But du TP: Simuler le fonctionnement du redresseur non commandé en monophasé et en triphasé sur différents types de charges.

1.1 Redresseur monophasé :

1.1.1 Redressement monophasé avec une charge R:

Psim permet de simuler le comportement de nombreux convertisseurs de l'électronique de puissance en ayant recours à des composants électroniques classiques. (R, L, C, Diodes, Thyristors, Mos, ponts redresseurs etc...).

Pour illustrer le fonctionnement du simulateur, nous allons simuler un montage redresseur simple alternance en monophasé et faire des mesures de tension et de courant. Pour cela il faudra suivre les étapes suivantes :

- ✓ Lancer le logiciel PSim.
- ✓ Placer les composants (disponibles dans **la barre de menu en bas de l'écran** ou dans le menu **éléments**).
- ✓ Placer la masse (**GND**) et les différents **appareils de mesure**. (Remarque : On peut visualiser le courant dans n'importe quel composant en positionnant **Current Flag** à 1)
- ✓ Tracer les fils de liaison à l'aide du **crayon** (barre de menu en haut).
- ✓ Paramétrez les composants du montage (**Double clic sur l'élément**) en précisant la valeur des tensions, résistances...etc.

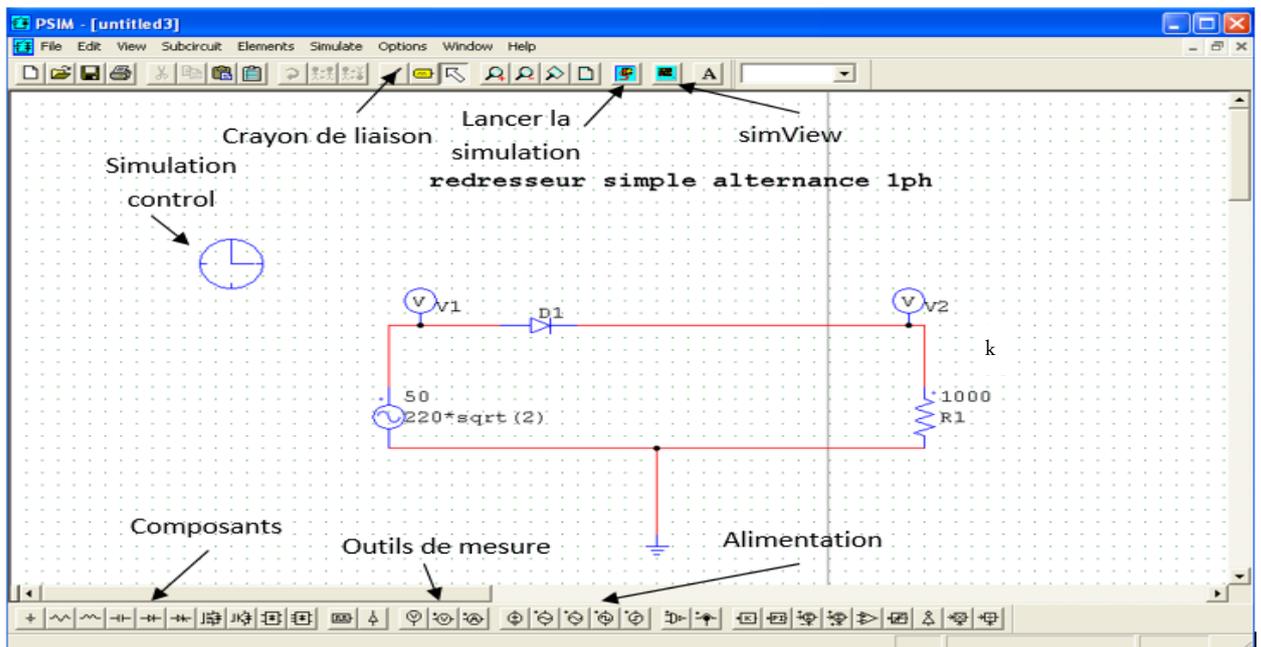


Figure 1.1 : Fenêtre de travail principale du logiciel Psim.

- ✓ Placer le « **Simulate control** » (Menu **Simulate**) et régler le **temps total** de simulation et le **pas** de calcul (Double clic puis **Total Time** et **Time Step**)

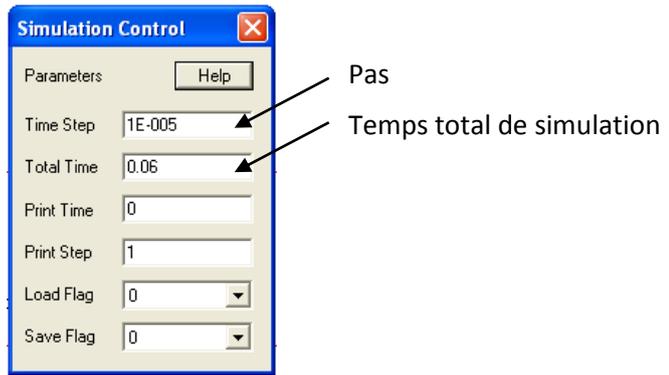


Figure 1.2 : Les Principaux paramètres de *simulation control*.

- ✓ Lancer le calcul **Psim** et corriger les erreurs signalées.
- ✓ Lancer **SimView** et visualiser les signaux. (on peut ajouter des signaux en utilisant **add screen** dans le menu **screen**. On peut aussi changer les axes (X et Y), mesurer des temps, mesurer des *valeurs moyennes et efficaces*).

Constater :

- ✓ La forme du signal de tension et de courant redressé.
- ✓ Mesurer les valeurs de tensions efficaces et moyennes en utilisant l’outil de mesure « **Measure** » et « **analysis** »

$U_{s\ moy} = \dots\dots\dots U_{s\ Eff} = \dots\dots\dots$

- ✓ Comparer les résultats avec les valeurs calculées, sachant que :

$U_{S\ Moy} = \frac{U_{S\ Max}}{\pi} = \dots\dots\dots U_{S\ Eff} = \frac{U_{S\ Max}}{2} = \dots\dots\dots$

- ✓ Calculer le facteur de forme F et le taux d’ondulation β .

$F = \frac{U_{S\ Eff}}{|U_{S\ Moy}|} = \dots\dots\dots \beta = \sqrt{F^2 - 1} = \dots\dots\dots$

Interpréter :

1.1.2. Redressement monophasé avec une charge RL :

Simuler le circuit du schéma suivant avec L = 500 mH et R=500 ohms.

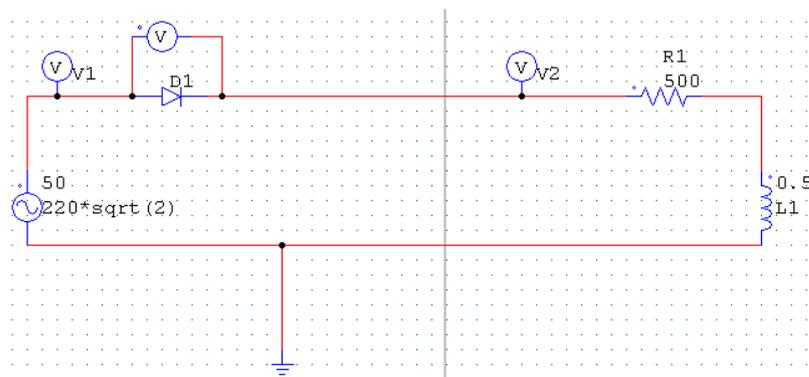


Figure 1.3 : Redressement sur une charge inductive.

- ✓ Tracez et visualisez l’allure de la tension V2 et celle du courant dans la charge IR.

$V2_{\ moy} = \dots\dots\dots IR_{\ moy} = \dots\dots\dots$

- ✓ Expliquer l'allure des courbes :

.....

.....

.....

.....

.....

- ✓ Insérez une diode en parallèle avec la charge de façon à ne pas court-circuiter la source de tension et exécutez la simulation.
- ✓ Visualisez maintenant l'allure de la tension V2. Que constater vous ?

.....

.....

.....

- ✓ Vérifier le tracé de la courbe du courant traversant la diode insérée puis commentez ?

.....

.....

.....

1.1.3. Redressement monophasé avec une charge R.L.E :

Simuler le circuit du schéma de la figure 4. La fem E = 100 V.

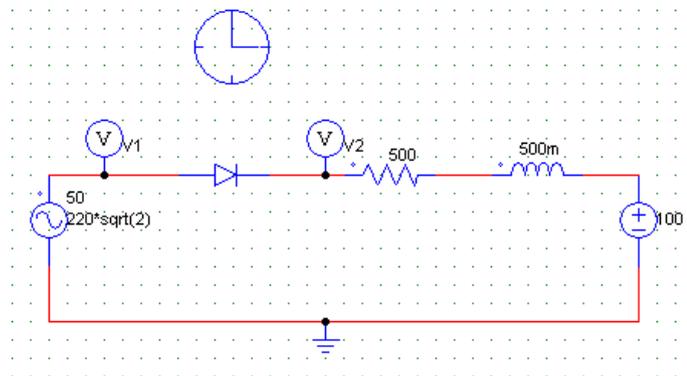


Figure 1.4 : Redressement sur une charge R.L.E.

- ✓ Tracez et visualisez l'allure de la tension V2 et celle du courant dans la charge IR.
 $V2_{moy} = \dots\dots\dots$ $IR_{moy} = \dots\dots\dots$

- ✓ Expliquer l'allure des courbes :

.....

.....

.....

.....

.....

Comparer le courant de la charge dans le cas avec et sans Fem E. Expliquer :

.....

.....

.....

1.2. Redresseur parallèle P3 :

Câbler le schéma suivant et faite la simulation de la tension redressée avec $R=100 \Omega$.

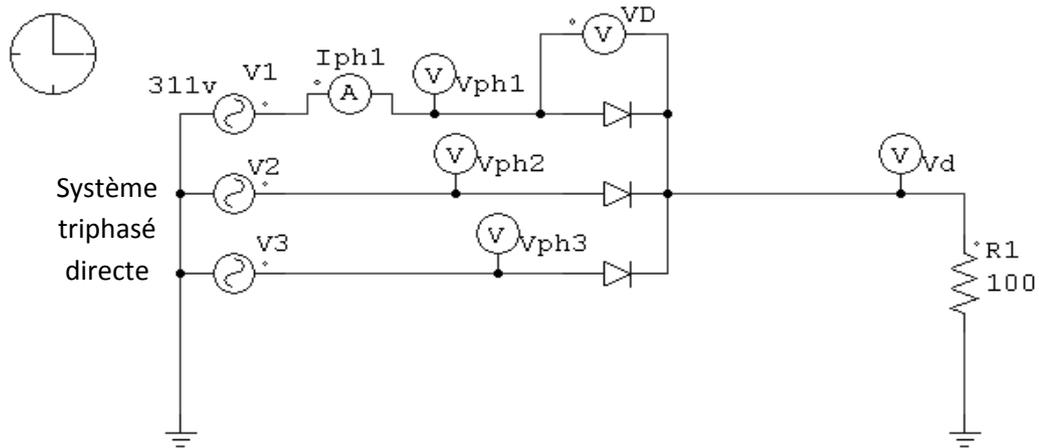


Figure 1.5 : Redressement Parallèle P3 sur charge résistif.

- ✓ Visualiser la forme du signal de **tension** et de **courant** redressé.
- ✓ Quelle est la **période** du signal redressé ?
- ✓ Visualiser le **courant** passant par une **diode** de redressement.
- ✓ Discuter l'allure des courbes obtenues et expliquez le fonctionnement du redresseur :

.....

- ✓ Mesurer les valeurs de **Vd** efficaces et moyennes :
- ✓ Calculer le facteur de **forme** et le taux **d'ondulation** :
- ✓ Interpréter et comparer avec le redressement monophasé :

.....

- ✓ Simuler le circuit du redresseur avec une charge RLE tel que $R = 100 \text{ ohm}$, $L = 100 \text{ mH}$ et $E = 100 \text{ V}$ puis comparer le courant de la charge dans le cas avec et sans Fem E. Expliquer :

.....

Solution TP n°1

Redresseur non commandé monophasé et triphasé (charge R, L, E).

But du TP: Simuler le fonctionnement du redresseur non commandé en monophasé et en triphasé sur différents types de charges.

1.1. Redresseur monophasé :

1.1.1. Redressement monophasé avec une charge R :

Psim permet de simuler le comportement de nombreux convertisseurs de l'électronique de puissance en ayant recours à des composants électroniques classiques. (R, L, C, Diodes, Thyristors, Mos, ponts redresseurs etc...).

Pour illustrer le fonctionnement du simulateur, nous allons simuler un montage redresseur simple alternance en monophasé et faire des mesures de tension et de courant. Pour cela il faudra suivre les étapes suivantes :

- ✓ Lancer le logiciel PSim.
- ✓ Placer les composants (disponibles dans **la barre de menu en bas de l'écran** ou dans le menu **éléments**).
- ✓ Placer la masse (**GND**) et les différents **appareils de mesure**. (*Remarque : On peut visualiser le courant dans n'importe quel composant en positionnant **Current Flag** à 1*)
- ✓ Tracer les fils de liaison à l'aide du **crayon (barre de menu en haut)**.
- ✓ Paramétrez les composants du montage (**Double clic sur l'élément**) en précisant la valeur des tensions, résistances...etc.

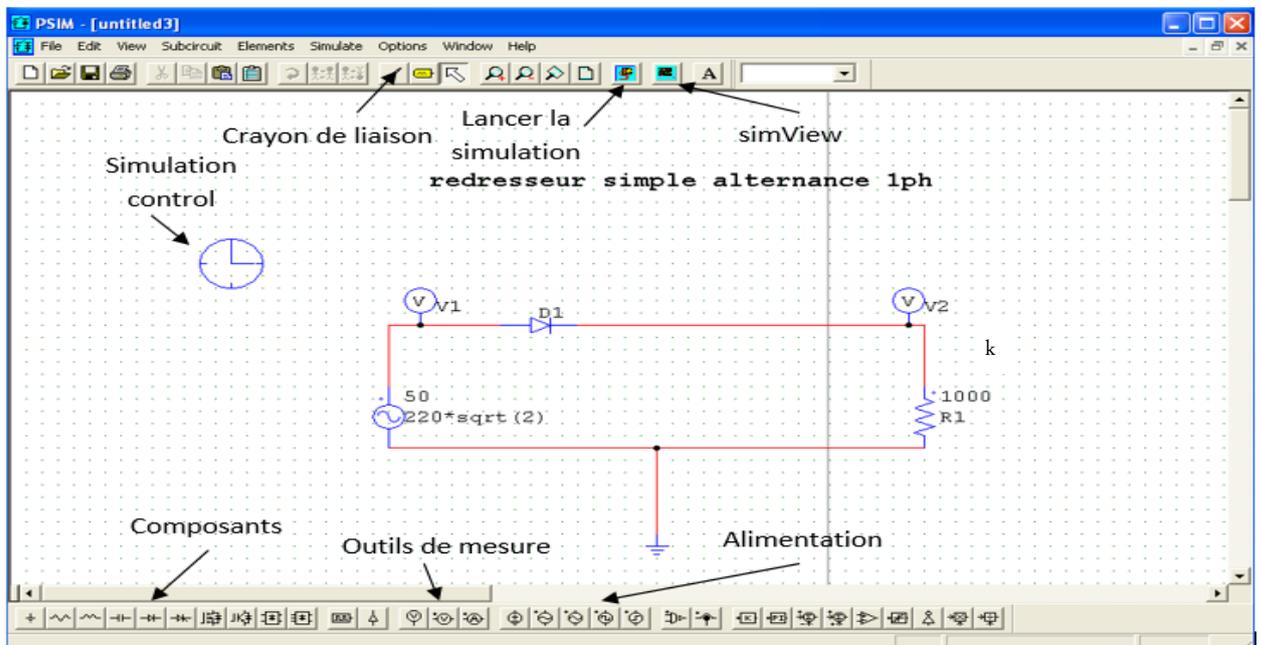


Figure 1.1 : Fenêtre de travail principale du logiciel Psim.

- ✓ Placer le « **Simulate control** » (Menu **Simulate**) et régler le **temps total** de simulation et le **pas** de calcul (Double clic puis **Total Time** et **Time Step**)

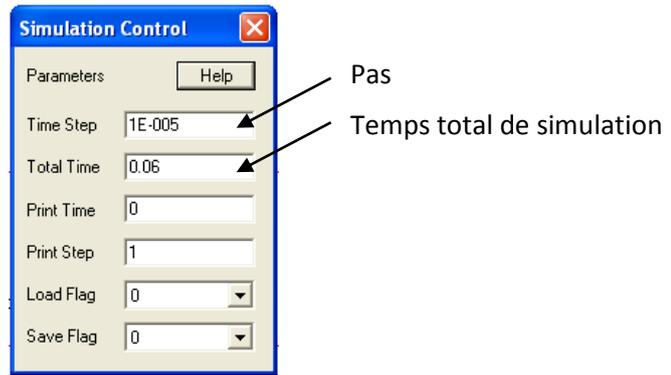


Figure 1.2 : Les Principaux paramètres de *simulation control*.

- ✓ Lancer le calcul **Psim** et corriger les erreurs signalées.
- ✓ Lancer **SimView** et visualiser les signaux. (on peut ajouter des signaux en utilisant **add screen** dans le menu **screen**. On peut aussi changer les axes (X et Y), mesurer des temps, mesurer des *valeurs moyennes et efficaces*).

Constater :

- ✓ La forme du signal de tension et de courant redressé.

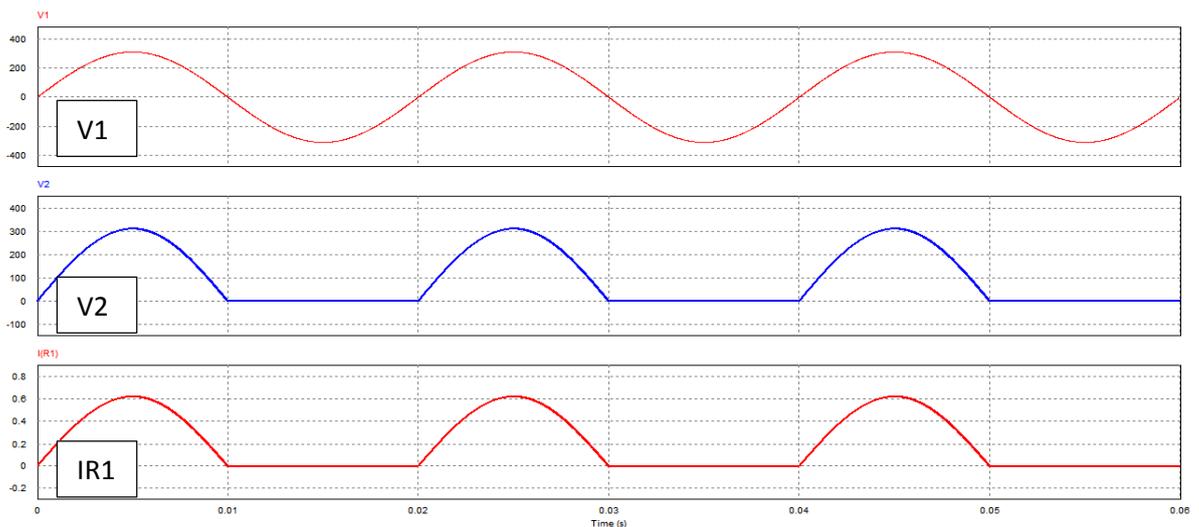


Figure réponse 1.1: Allure de la tension et du courant redressés.

- ✓ Mesurer les valeurs de tensions efficaces et moyennes en utilisant l’outil de mesure « **Measure** » et « **analysis** »

$$V2_{\text{moy}} = 99.02 \text{ V} \quad V2_{\text{Eff}} = 155.5 \text{ V}$$

- ✓ Comparer les résultats avec les valeurs calculées, sachant que :

$$U_{S \text{ Moy}} = \frac{U_{S \text{ Max}}}{\pi} = 99.04 \text{ V} \quad U_{S \text{ Eff}} = \frac{U_{S \text{ Max}}}{2} = 155.5 \text{ V}$$

- ✓ Calculer le facteur de forme F et le taux d’ondulation β .

$$F = \frac{U_{S \text{ Eff}}}{|U_{S \text{ Moy}}|} = 1.57 \quad \beta = \sqrt{F^2 - 1} = 1.21$$

Interpréter :

Quand le facteur de forme $F \rightarrow \infty$ le signal est alternatif.

Quand le taux d'ondulation $\beta \rightarrow 0$ le signal est continu.

D'après le F et le β on dit que le signal est continu, cependant il n'est pas parfait car le taux d'ondulation β n'est pas totalement nul $\beta = 1.21 > 0$; le signal redressé nécessite un filtrage.

1.1.2. Redressement monophasé avec une charge RL :

Simuler le circuit du schéma suivant avec $L = 500$ mH et $R=500$ ohms.

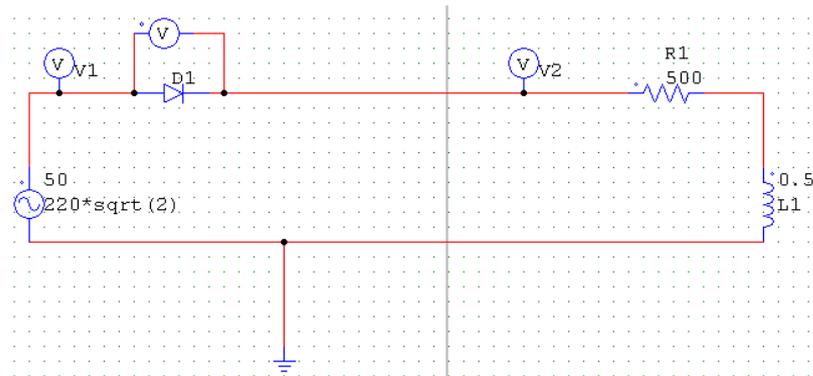


Figure 1.3 : Redressement sur une charge inductive.

✓ Tracez et visualisez l'allure de la tension $V2$ et celle du courant dans la charge IR .

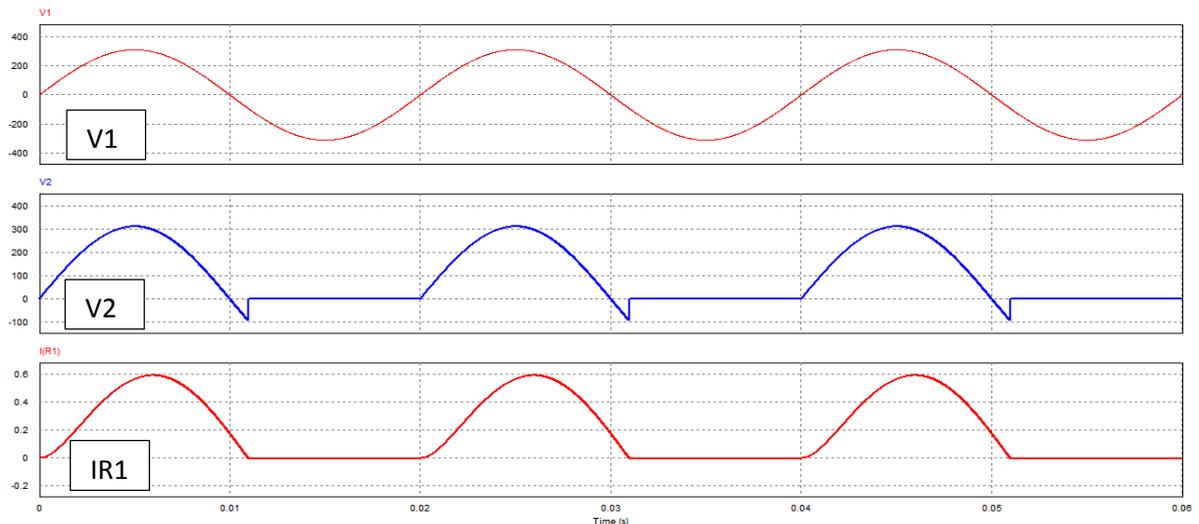


Figure réponse 1.2: Allure de la tension et du courant redressés pour une charge RL.

$$V2_{\text{moy}} = 96.29 \text{ V} \quad IR_{\text{moy}} = 0.19 \text{ A}$$

✓ Expliquer l'allure des courbes :

La tension redressé n'est plus continue et possède une composante alternative. Cela est dû au courant inductif en retard par rapport à la tension du réseau. Tant que le courant inductif n'est pas nul la diode reste toujours à l'état passant même si la tension du réseau est négative.

✓ Insérez une diode en parallèle avec la charge de façon à ne pas court-circuiter la source de tension et exécutez la simulation.

- ✓ Visualisez maintenant l'allure de la tension V2. Que constaterez-vous ?

La composante alternative du signal de tension redressée a été supprimée et la tension a été améliorée.

- ✓ Vérifier le tracé de la courbe du courant traversant la diode insérée puis commentez ?

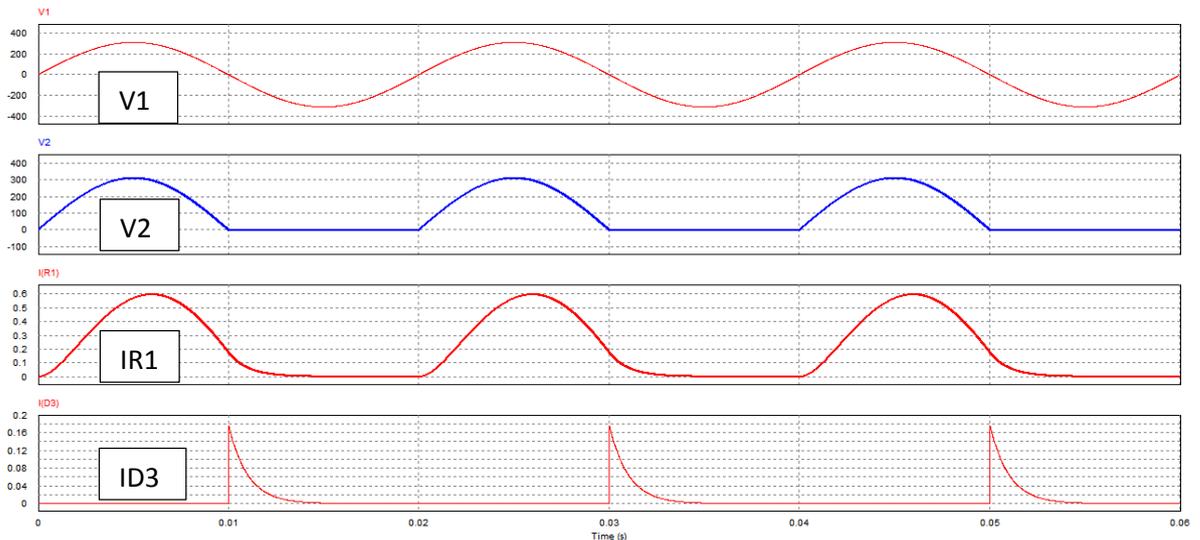


Figure réponse 1.3: Allure de la tension et du courant redressé ainsi que l'allure du courant passant par la diode de roue libre.

Le courant inductif qui est en retard par rapport à la tension est le responsable de la composante alternative de tension. En effet, tant que le courant est non nul la diode de redressement est toujours passante même si la tension du réseau est alternative. La diode de roue libre sert à canaliser ce courant au-delà de la diode de redressement. Cette dernière est donc bloquée lors du changement de signe de tension et la composante négative de la tension redressée est bloquée.

1.1.3. Redressement monophasé avec une charge RLE :

Simuler le circuit du schéma de la figure 4. La fem $E = 100$ V.

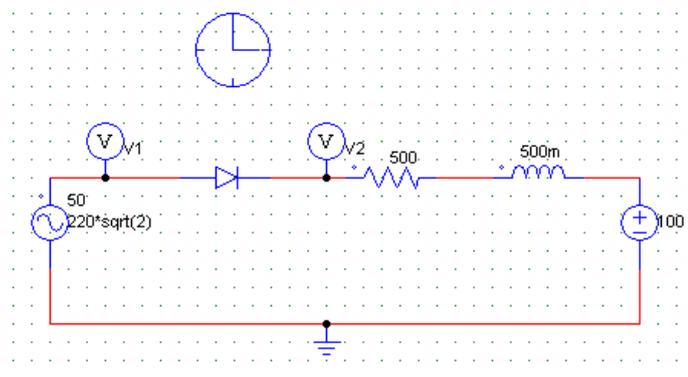


Figure 1.4 : Redressement sur une charge R.L.E.

- ✓ Tracez et visualisez l'allure de la tension V2 et celle du courant dans la charge IR.

$$V2_{\text{moy}} = 151.43 \text{ V} \quad IR_{\text{moy}} = 0.10 \text{ A}$$

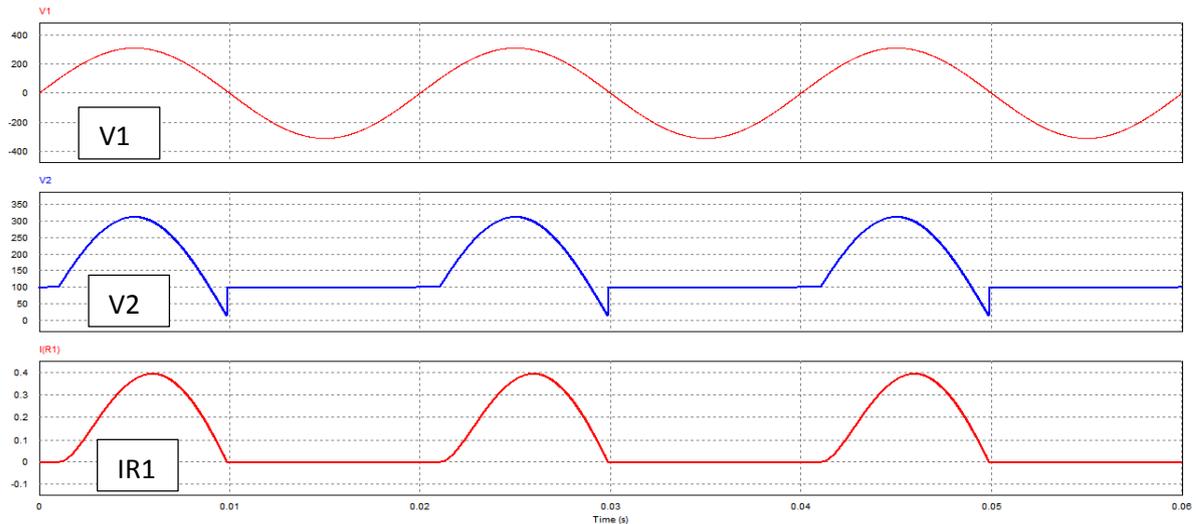


Figure réponse 1.4: Allure de la tension et du courant redressés pour une charge RLE.

✓ Expliquer l'allure des courbes :

On constate une augmentation de la tension moyenne redressée. Cette dernière n'est plus interrompue. En effet selon la loi des mailles on a :

$$V_{dmoy} = V_{Rmoy} + E.$$

À partir de cette formule on constate une augmentation dû principalement à la fem E.

Comparer le courant de la charge dans le cas avec et sans Fem E. Expliquer :

On remarque que le courant moyen est faible dans le cas avec Fem E. en utilisant la loi des maille précédente on retrouve la formule suivante :

$$I_{Rmoy} = (V_{dmoy} - E)/R$$

Donc le courant moyen a diminué de E/R.

1.2. Redresseur parallèle P3 :

Câbler le schéma suivant et faite la simulation de la tension redressée avec R=100 Ω.

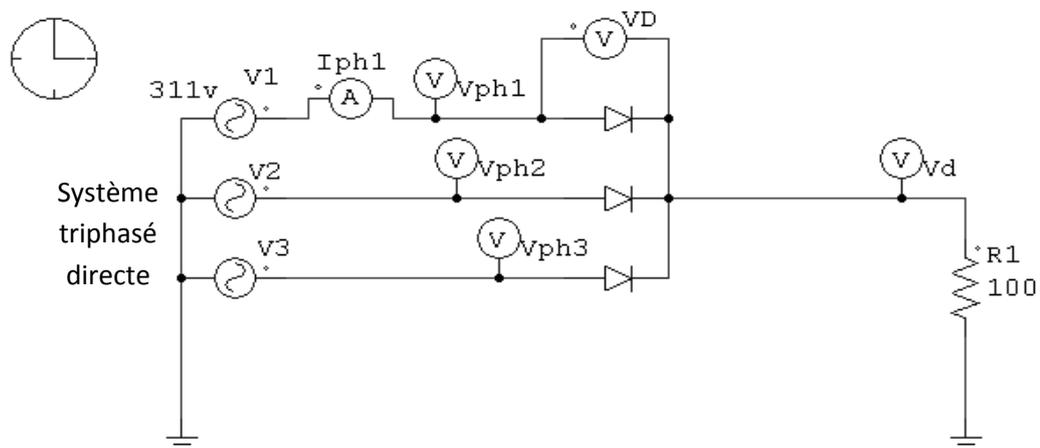


Figure 1.5 : Redressement Parallèle P3 sur charge résistif.

- ✓ Visualiser la forme du signal de **tension** et de **courant** redressé.

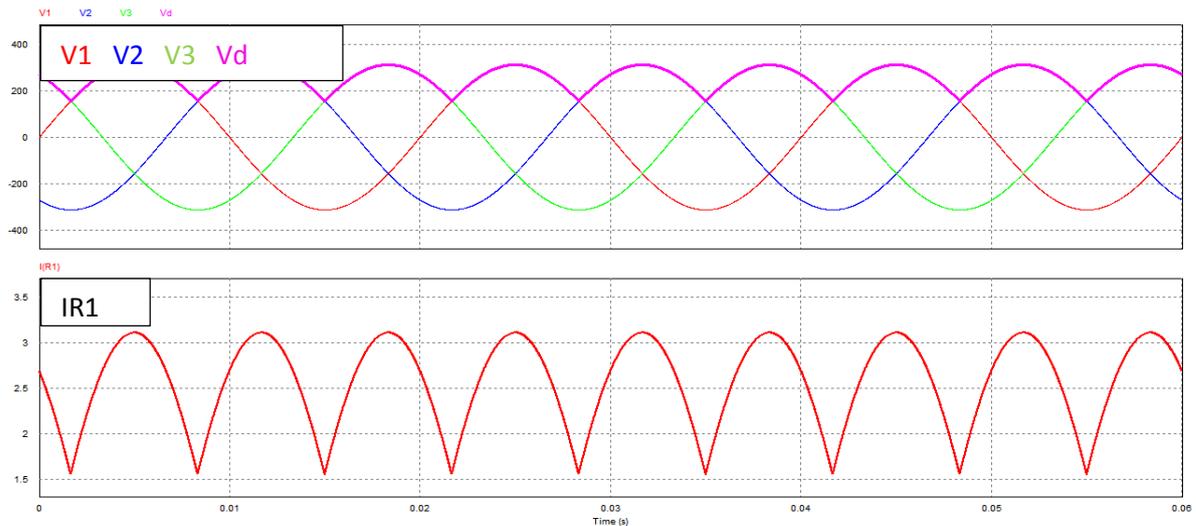


Figure réponse 1.5: Allure de la tension et du courant redressé.

- ✓ Quelle est la **période** du signal redressé ? D'après la courbe $T = 2\pi/3$
- ✓ Visualiser le courant passant par une diode de redressement.

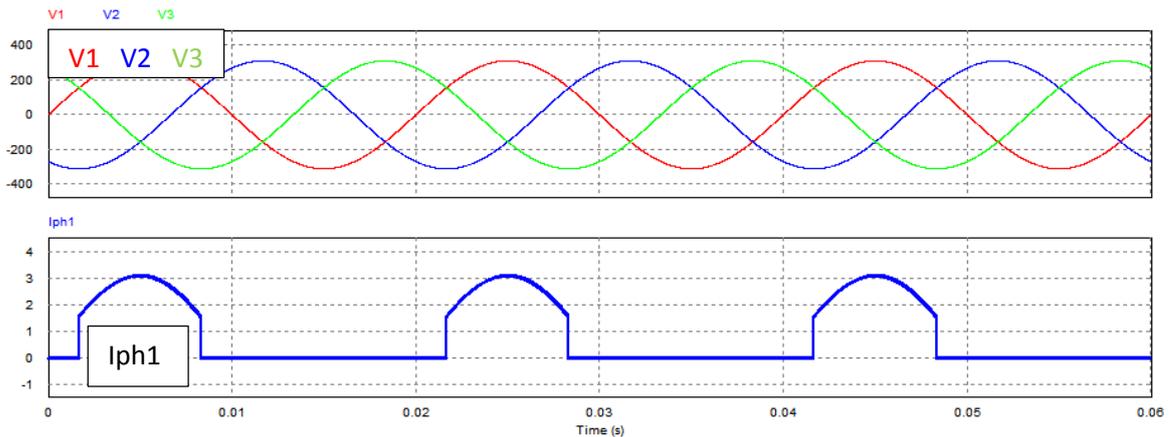


Figure reponse 1.6: Allure du courant dans la diode de redressement.

- ✓ Discuter l'allure des courbes obtenues et expliquez le fonctionnement du redresseur :
D'après l'état passant des diodes on remarque que la tension de sortie de ce montage correspond à la tension la plus élevés des trois phases. La diode correspondante devienne ainsi passante. Le montage s'appelle aussi redresseur parallèle plus positif.
- ✓ Mesurer les valeurs de **Vd** efficaces et moyennes : $Vd\text{ eff} = 261.45\text{ V}$ $Vd\text{ moy} = 257.19\text{ V}$
- ✓ Calculer le facteur de **forme** et le taux **d'ondulation** : $F = 1.016$ $\beta = 0.18$
- ✓ Interpréter et comparer avec le redressement monophasé :
Lors du redressement en monophasé nous avons trouvé : $\beta_{1ph} = 1.21 > \beta_{3ph} = 0.18$. On conclue donc que le signal de tension continue de sortie du redresseur triphasé est meilleur par rapport au monophasé. Aucune filtration n'est nécessaire, la tension redressée peut être exploité directement.

- ✓ Simuler le circuit du redresseur avec une charge RLE tel que $R = 100 \text{ ohm}$, $L = 100 \text{ mH}$ et $E = 100 \text{ V}$ puis comparer le courant de la charge dans le cas avec et sans Fem E.

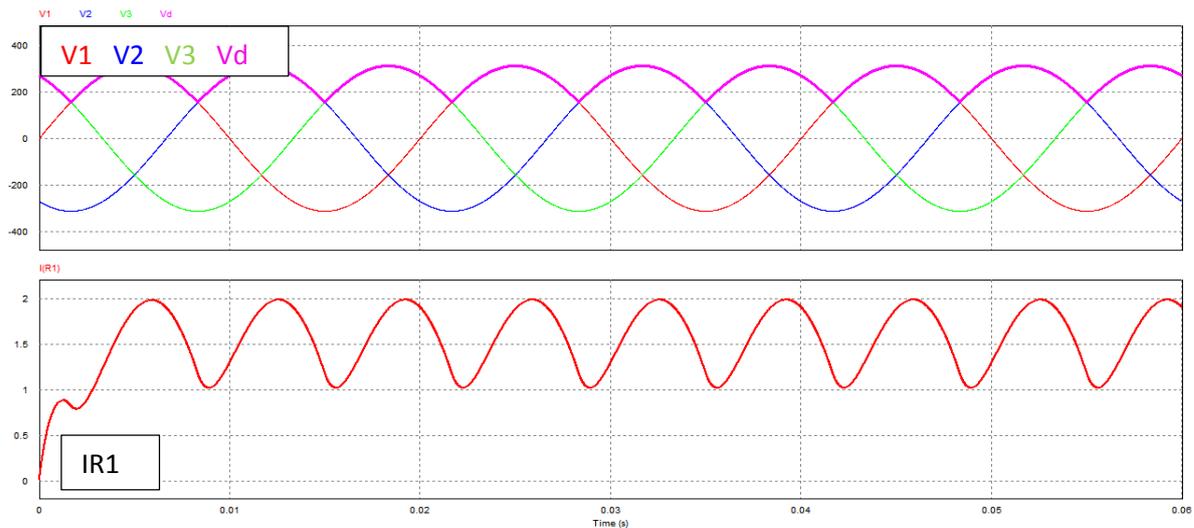


Figure réponse 1.7: Allure de la tension et du courant redressé en triphasé sur une charge RLE.

- ✓ Expliquer :

De même qu'en monophasé, on remarque que le courant moyen est faible dans le cas avec Fem E. En utilisant la loi des mailles on retrouve la formule suivante :

$$\checkmark \quad I_{R\text{moy}} = (V_{d\text{moy}} - E)/R$$

Donc le courant moyen à diminuer de E/R .

But du TP: Simuler le fonctionnement du redresseur commandé en monophasé et en triphasé .

2.1. Redresseur monophasé :

2.1.1. Redressement monophasé commandé avec une charge R :

Tracer le schéma suivant et faite la simulation de la tension redressée avec $R=100 \Omega$.

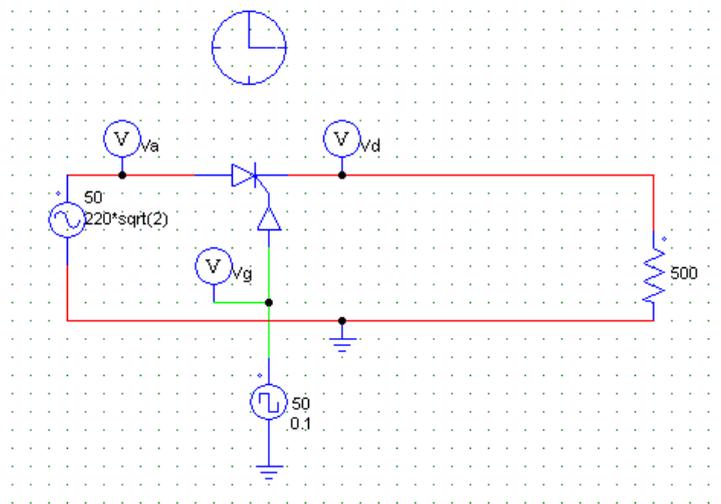


Figure 2.1. Redresseur commandé monophasé.

Pour commander le thyristor on utilise un générateur d’impulsion dont la fréquence est de $f = 50 \text{ Hz}$ et le rapport cyclique est **Duty cycle** = 0.1. On prend un angle de retard à l’amorçage **alpha** = 45° .

Constater :

- ✓ La forme du signal de commande du thyristor, la tension et le courant redressé.
- ✓ Mesurer les valeurs de tensions efficaces et moyennes en utilisant l’outil de mesure « **Measure** » et « **analysis** ».

$V_{d \text{ moy}} = \dots\dots\dots V_{d \text{ Eff}} = \dots\dots\dots$

- ✓ Calculer le facteur de forme F et le taux d’ondulation β .

$F = \dots\dots\dots \beta = \dots\dots\dots$

Interpréter :

2.1.2. Redressement monophasé commandé avec une charge RL :

Simuler le même schéma que celui de la figure 01 avec une charge inductive, ou la résistance R=500 ohms est mise en série avec l'inductance L = 500 mH.

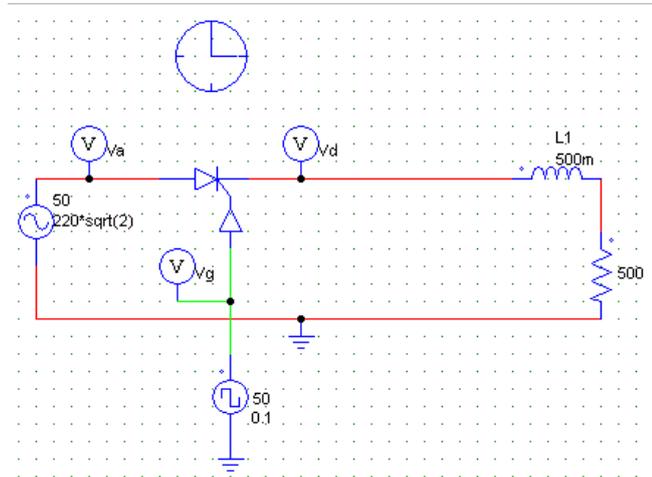


Figure 2.2. Redresseur commandé monophasé sur charge RL.

- ✓ Tracez et visualisez l'allure de la tension Vd et celle du courant dans la charge IR.

$V_{d\text{ moy}} = \dots\dots\dots$ $I_{R\text{ moy}} = \dots\dots\dots$

- ✓ Expliquer l'allure des courbes :

.....

.....

- ✓ Suggérer une solution pour améliorer le signal continue Vd.

.....

2.1.3. Redressement monophasé commandé avec une charge RLE :

Simuler le circuit du schéma de la figure 3. La fem E = 100 V.

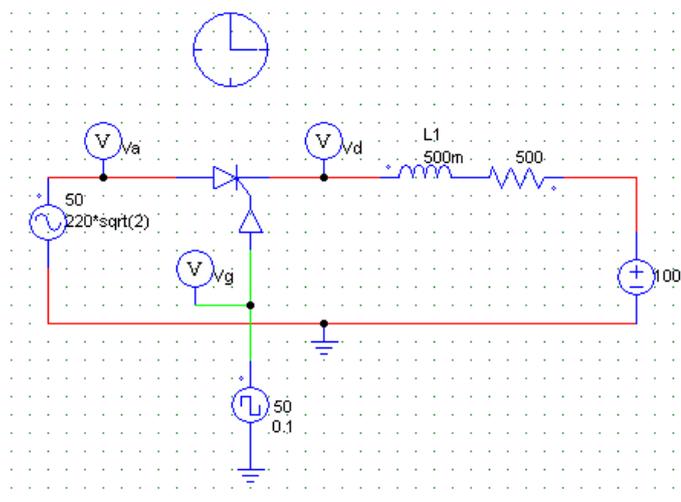


Figure 2.3 : Redressement sur une charge R.L.E.

- ✓ Tracez et visualisez l'allure de la tension Vd et celle du courant dans la charge IR.

$V_{2\text{ moy}} = \dots\dots\dots$ $I_{R\text{ moy}} = \dots\dots\dots$

- ✓ Expliquer l'allure des courbes :

.....

.....

.....

.....

.....

- ✓ Comparer le courant de la charge dans le cas avec et sans Fem E. Expliquer :

.....

.....

.....

2.2. Redresseur triphasé :

2.2.1. Redresseur parallèle P3 commandé (tout thyristor) :

Câbler le schéma suivant et faite la simulation de la tension redressée avec $R=100 \Omega$.

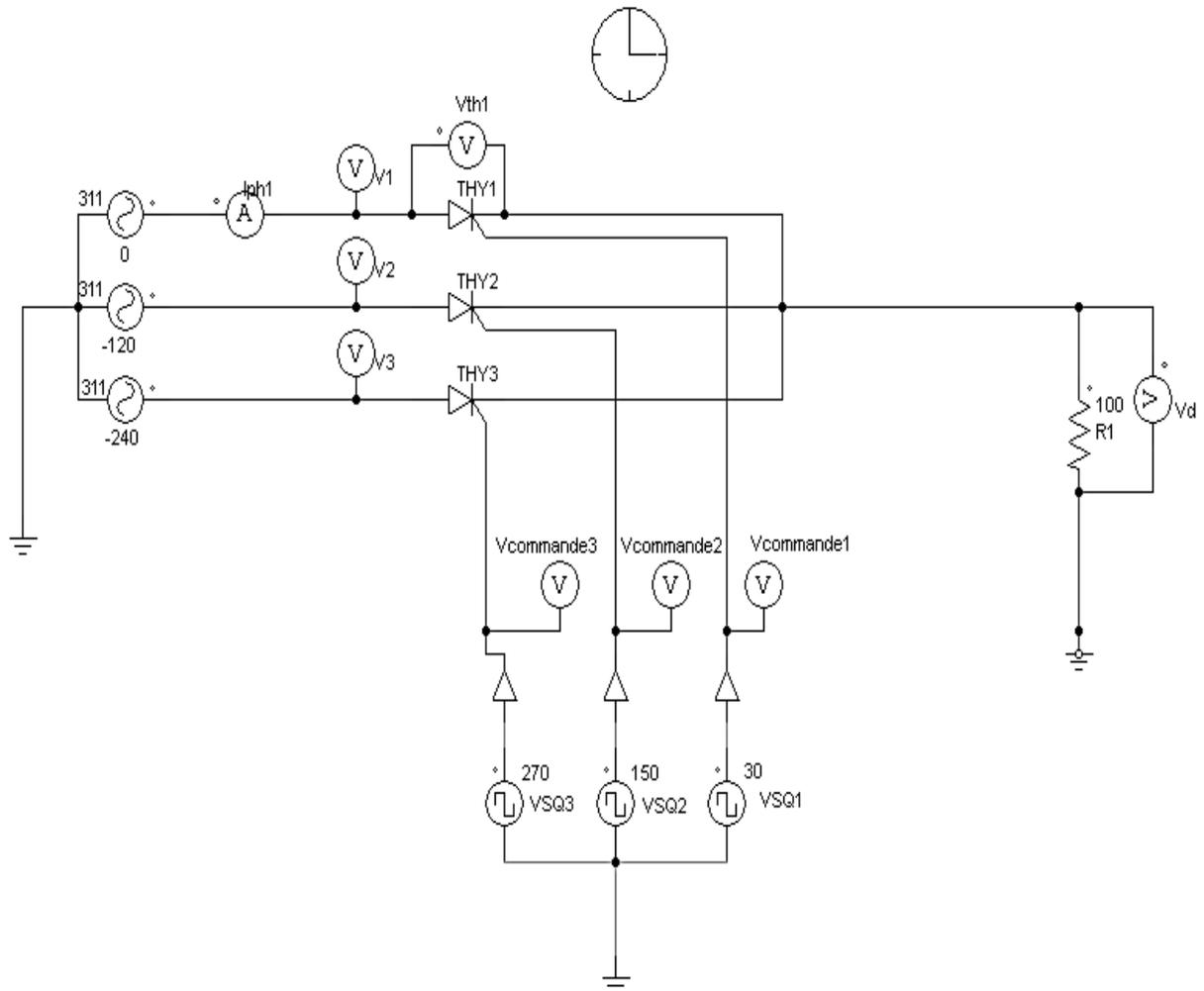


Figure 2.4 : Redressement commandé Parallèle P3 sur charge résistif.

- ✓ Trouver les **angles d'intervalle de conductions** des thyristors pour que le redresseur fournisse un signal similaire au redresseur précédent **P3**. (Se basé sur l'allure des courbes du système triphasé en respectant l'ordre de conduction de chaque phase).

- Phase delay 1 =
- Phase delay 2 =
- Phase delay 3 =
- ✓ Introduire les angles d'intervalle nécessaire et visualiser la forme du signal de **tension** et de **courant redressé**.

 - ✓ Mesurer la **valeur moyenne** de la **tension** et du **courant redressé** :
 - ✓ $V_d = \dots\dots\dots$ $I_R = \dots\dots\dots$

 - On prend l'angle d'amorçage **alpha = 45°**.
 - ✓ Visualiser et mesurer la **valeur moyenne** de la **tension** et du **courant redressé** dans ce cas :
 - ✓ $V_d = \dots\dots\dots$ $I_R = \dots\dots\dots$
 - ✓ Discuter l'allure des courbes obtenues.
 - ✓
 - ✓
 - ✓ En cas de substitution des générateurs par un transformateur triphasé étoile/étoile calculer la **puissance débitée** par le secondaire et le **facteur de puissance** du secondaire de ce transformateur. Que remarquez-vous ?
 - ✓
 - ✓
 - ✓
 - ✓
 - ✓
 - ✓

2.2.2. Redresseur parallèle P3 commandé (charge RL):

Câbler le schéma de la figure 5 ci-dessous et faite la simulation de la tension redressée avec une charge inductif RL tel que : $R=100 \Omega$ et $L = 100 \text{ mH}$. $\alpha = 45^\circ$

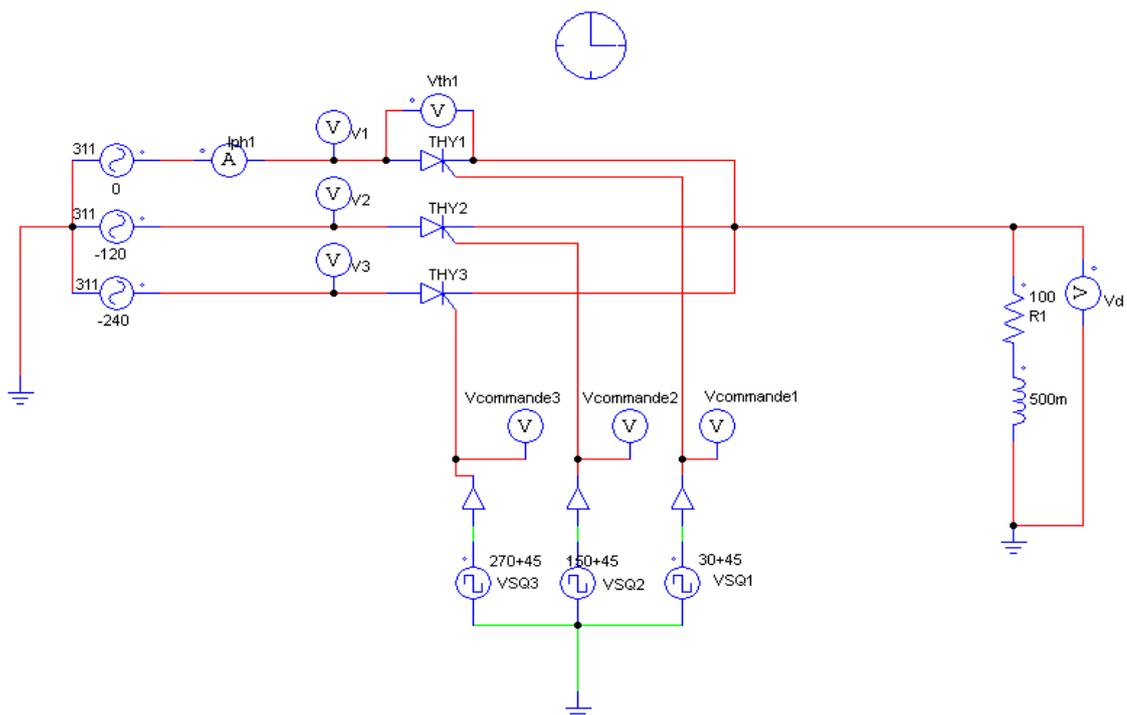


Figure 2.5 : Redressement commandé Parallèle P3 sur charge inductif RL.

- ✓ Discuter l'allure de la tension redressé obtenue:.....

.....

.....

.....

2.2.3. Redresseur parallèle P3 commandé (charge RLE):

- ✓ En utilisant le schéma du redresseur parallèle de la figure 5, Visualiser la tension **Vd** et le courant **id** pour une charge inductive composée de :
 - L=500 mH et R=100 ohm.
 - fém : E = +300V
 - Alpha= $45^\circ < 90^\circ$

Interpréter les résultats :

.....

.....

.....

.....

.....

- ✓ En utilisant toujours le même schéma de la figure 5, Visualiser la tension **Vd** et le courant **id** pour une charge inductive composée de :
 - L=500 mH et R=100 ohm.
 - fém : E = - 300V
 - Alpha= $115^\circ > 90^\circ$

Interpréter les résultats :

.....

.....

.....

.....

.....

Solution TP n°2

Redresseur commandé monophasé et triphasé (charge R, L, E).

But du TP: Simuler le fonctionnement du redresseur commandé en monophasé et en triphasé

2.1. Redresseur monophasé :

2.1.1. Redressement monophasé commandé avec une charge R :

Tracer le schéma suivant et faire la simulation de la tension redressée avec $R=100\ \Omega$.

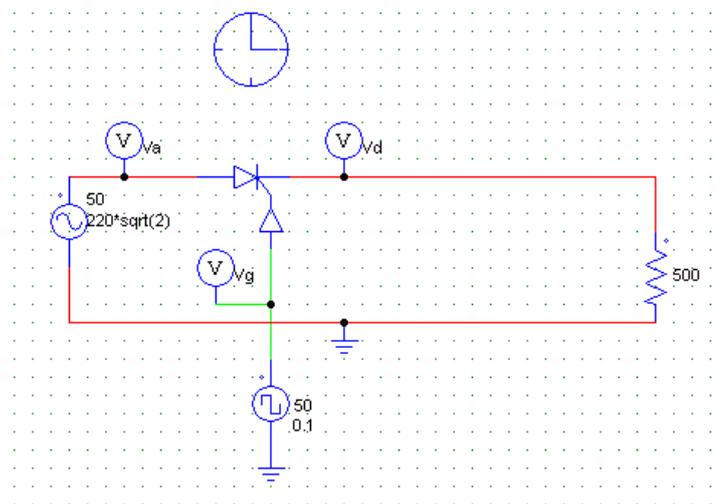


Figure 2.1. Redresseur commandé monophasé.

Pour commander le thyristor on utilise un générateur d'impulsion dont la fréquence est de $f = 50\ \text{Hz}$ et le rapport cyclique est **Duty cycle** = 0.1. On prend un angle de retard à l'amorçage **alpha** = 45° .

Constater :

- ✓ La forme du signal de commande du thyristor, la tension et le courant redressé.
- ✓ Mesurer les valeurs de tensions efficaces et moyennes en utilisant l'outil de mesure « **Measure** » et « **analysis** »

$$V_{d\ \text{moy}} = 84.47\ \text{V} \quad V_{d\ \text{Eff}} = 148.28\ \text{V}$$

- ✓ Calculer le facteur de forme F et le taux d'ondulation β .

$$F = 1.75 \quad \beta = 1.44$$

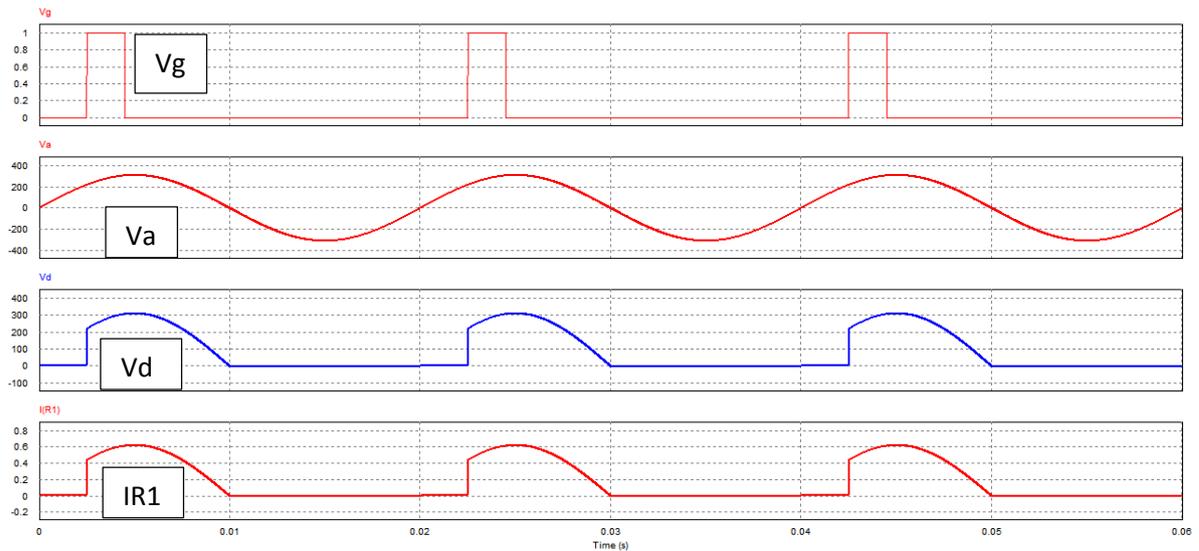


Figure réponse 2.1: Allure de la tension d'impulsion de gâchette V_g , la tension alternative V_a , le tension et le courant redressé V_d , I_R .

Interpréter : La faible valeur du facteur de forma indique que le signal n'est pas alternatif mais continue ; cependant le taux d'ondulation $\beta = 1.44 > 0$ indique que le signal de tension redressé n'est pas parfaitement continue et nécessite une amélioration.

2.1.2. Redressement monophasé commandé avec une charge RL :

Simuler le même schéma que celui de la figure 01 avec une charge inductive, ou la résistance $R=500$ ohms est mise en série avec l'inductance $L = 500$ mH.

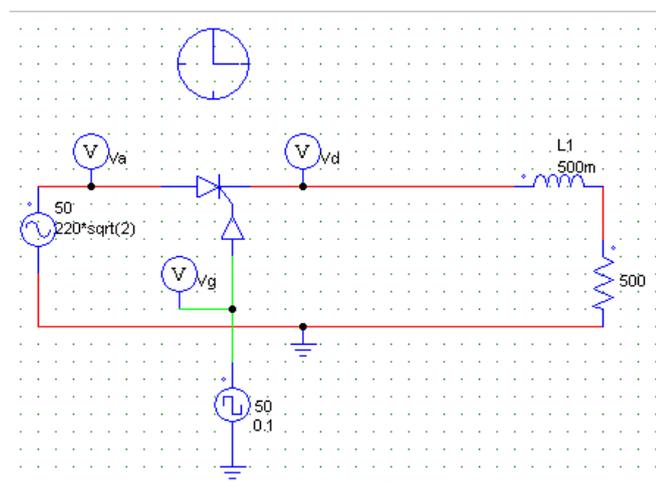


Figure 2.2. Redresseur commandé monophasé sur charge RL.

✓ Tracez et visualisez l'allure de la tension V_d et celle du courant dans la charge I_R .

✓

$$V_{d\text{ moy}} = 81.8 \text{ V} \quad I_{R\text{ moy}} = 0.164 \text{ A}$$

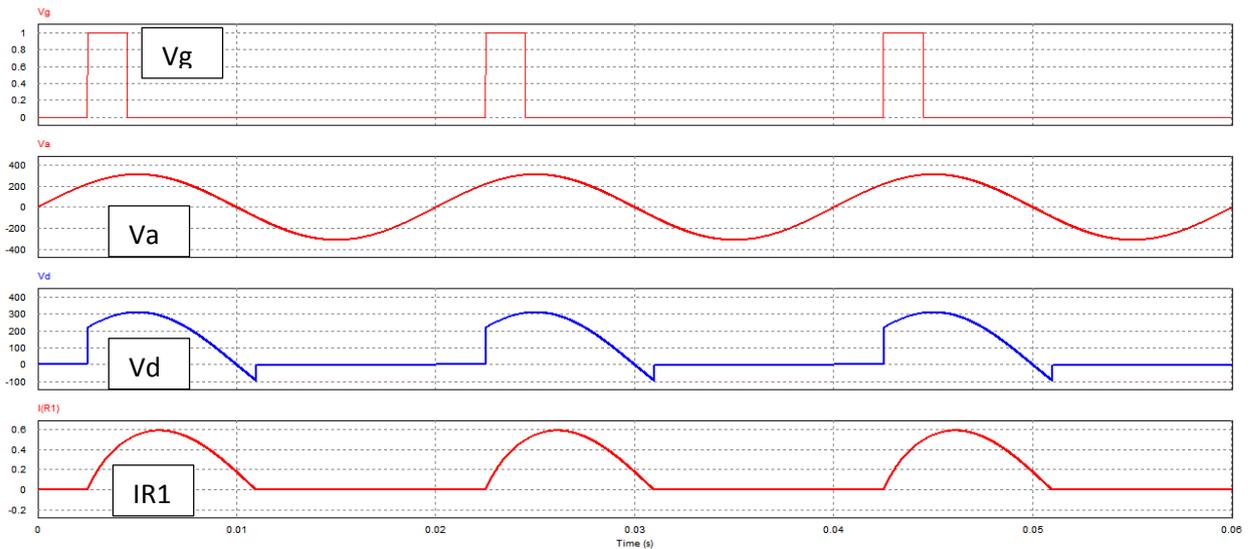


Figure réponse 2.2: Allure de la tension d'impulsion de gâchette V_g , la tension alternative V_a , le tension et le courant redressé V_d , I_R pour une charge RL

- ✓ Expliquer l'allure des courbes :

La tension redressé n'est plus continue et possède une composante alternative. Cela est dû au courant inductif en retard par rapport à la tension du réseau. Tant que le courant inductif n'est pas nul le thyristor reste toujours à l'état passant même si la tension du réseau est négative.

- ✓ Suggérer une solution pour améliorer le signal continue V_d .

La solution consiste à insérer une diode de roue libre en parallèle avec la charge inductive. Le courant inductif de décharge de l'inductance transitera par la diode au lieu du thyristor. Ce dernier se bloquera dès que la tension du réseau change de signe et la composante négative est éliminée du signal redressé.

2.1.3. Redressement monophasé commandé avec une charge RLE :

Simuler le circuit du schéma de la figure 3. La fem $E = 100$ V.

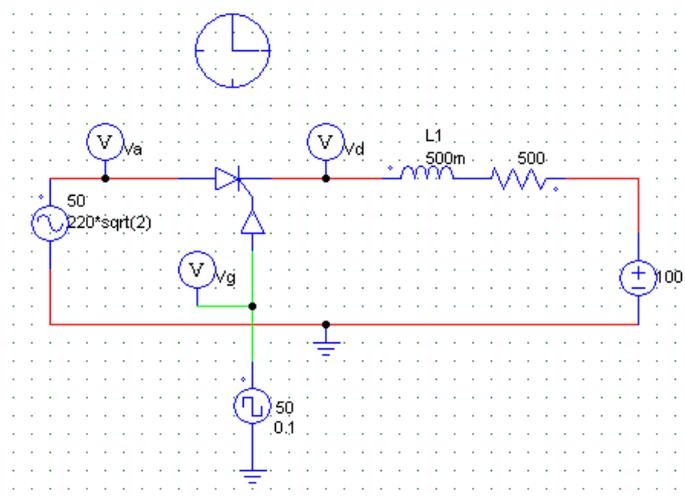


Figure 2.3 : Redressement sur une charge R.L.E.

- ✓ Tracez et visualisez l'allure de la tension V_d et celle du courant dans la charge I_R .
- ✓ $V_{d\text{ moy}} = 147$ V $I_{R\text{ moy}} = 0.095$ A

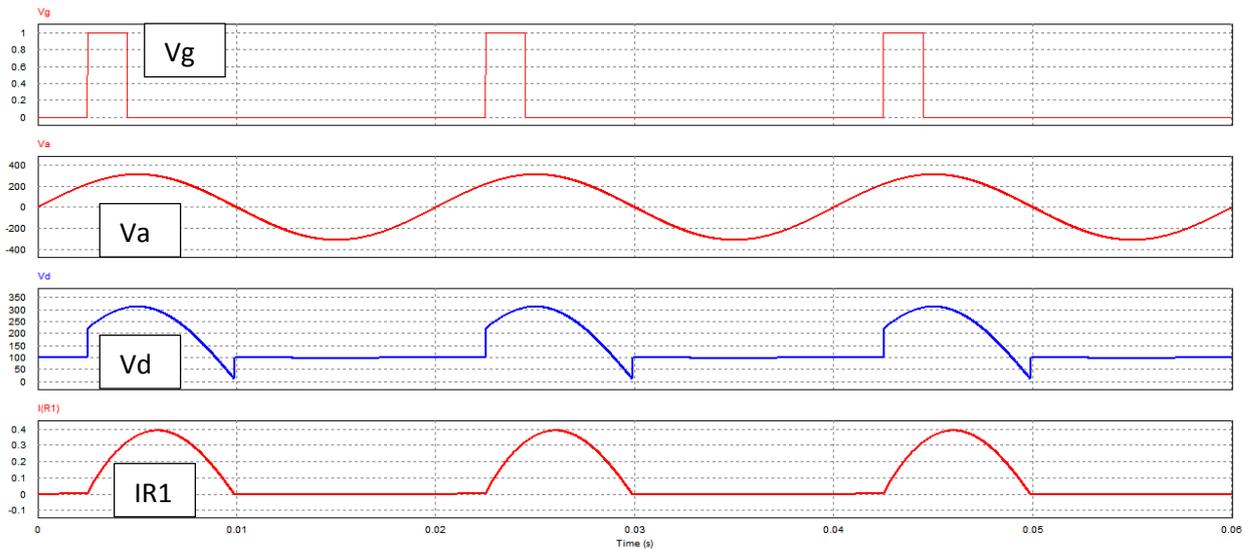


Figure réponse 2.3: Allure de la tension d'impulsion de gâchette V_g , la tension alternative V_a , le tension et le courant redressé V_d , I_R pour une charge RLE.

- ✓ Expliquer l'allure des courbes :

On constate une augmentation de la tension moyenne redressée. Cette dernière n'est plus interrompue. En effet selon la loi des mailles on a :

$$V_{dmoy} = V_{Rmoy} + E.$$

À partir de cette formule on constate une augmentation dû principalement à la fem E .

- ✓ Comparer le courant de la charge dans le cas avec et sans Fem E . Expliquer :

On remarque que le courant moyen est faible dans le cas avec Fem E . en utilisant la loi des maille précédent retrouve la formule suivante :

$$I_{Rmoy} = (V_{dmoy} - E)/R$$

Donc le courant moyen à diminuer de E/R .

2.2. Redresseur triphasé :

2.2.1. Redresseur parallèle P3 commandé (tout thyristor) :

Câbler le schéma suivant et faite la simulation de la tension redressée avec $R=100 \Omega$.

- ✓ Trouver les **angles d'intervalle de conductions** des thyristors pour que le redresseur fournisse un signal similaire au redresseur précédent **P3**. (Se basé sur l'allure des courbes du système triphasé en respectant l'ordre de conduction de chaque phase).

$$\text{Phase delay 1} = 30^\circ$$

$$\text{Phase delay 2} = 150^\circ$$

$$\text{Phase delay 3} = 270^\circ$$

- ✓ Introduire les angles d'intervalle nécessaire et visualiser la forme du signal de **tension** et de **courant redressé**.

- ✓ Mesurer la **valeur moyenne** de la **tension** et du **courant redressé** :

$$V_d = 251.18 \text{ V} \quad I_R = 2.51 \text{ A}$$

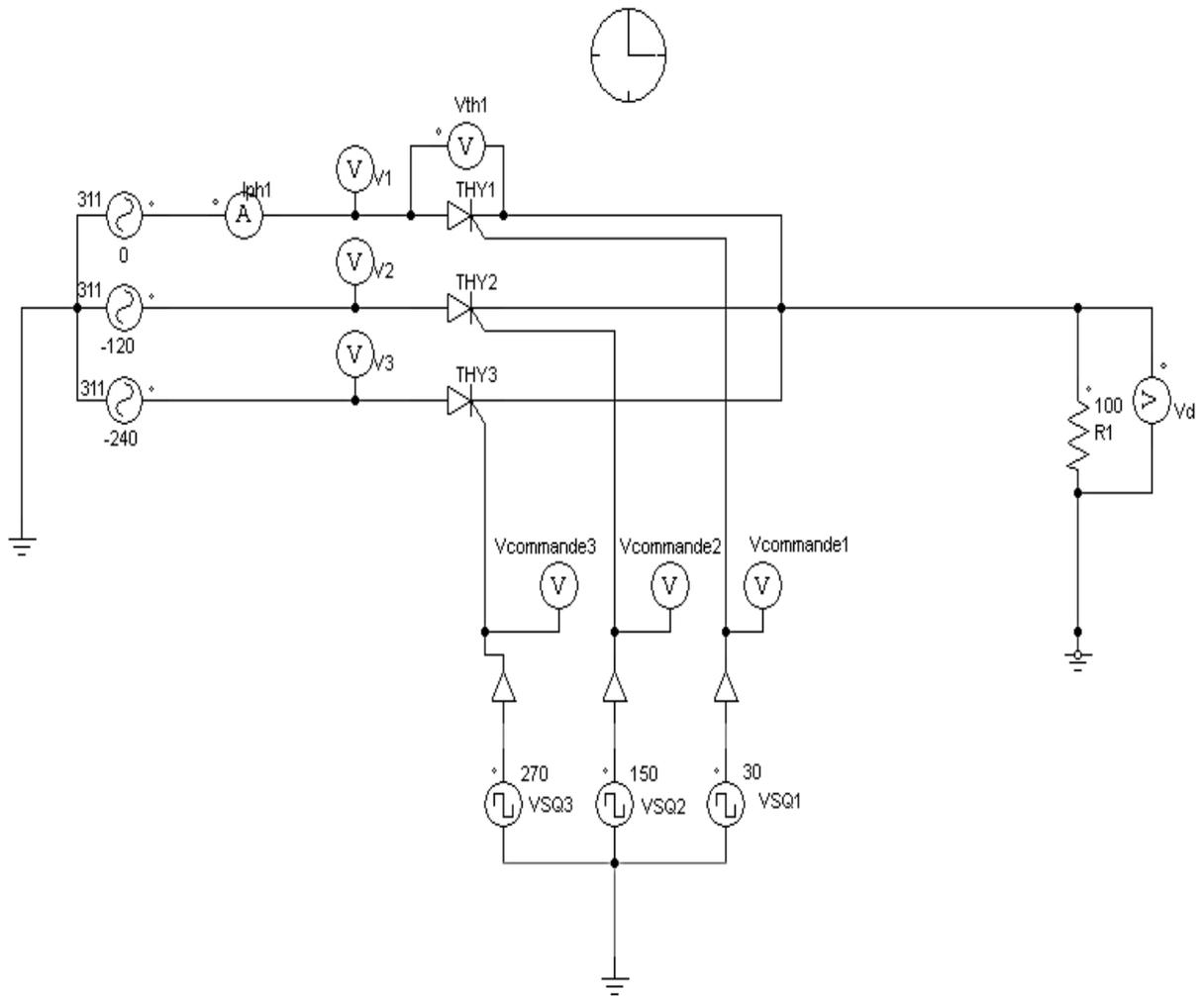


Figure 2.4 : Redressement commandé Parallèle P3 sur charge résistif.

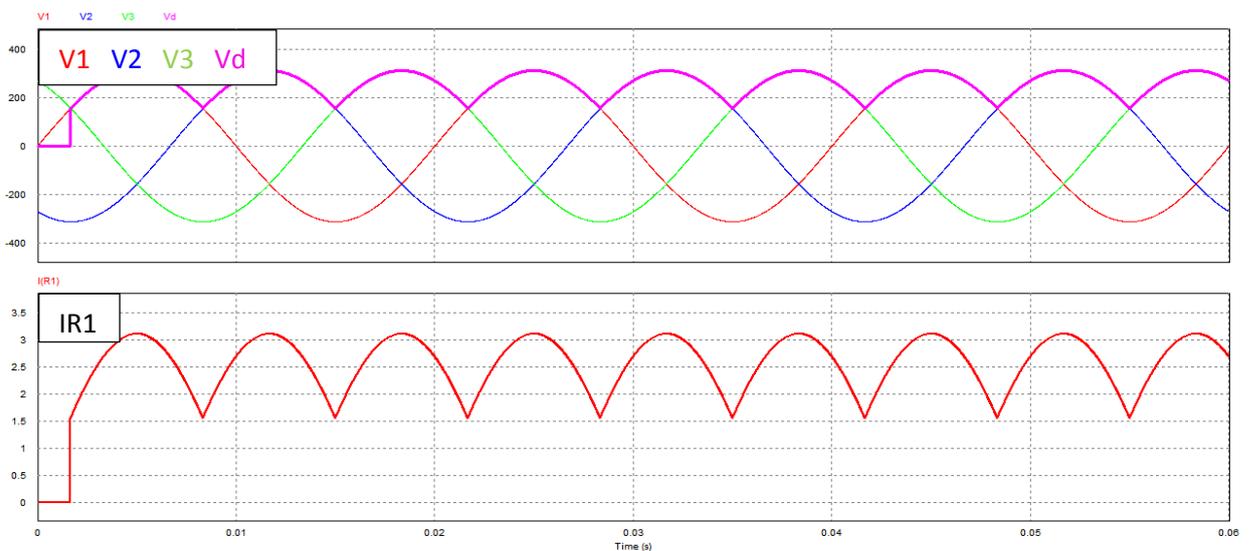


Figure réponse 2.4: Allure de la tension et du courant redressé.

On prend l'angle d'amorçage **alpha = 45°**.

- ✓ Visualiser et mesurer la **valeur moyenne** de la **tension** et du **courant redressé** dans ce cas :
- ✓ $V_d = 178.6 \text{ V}$ $I_R = 1.78 \text{ A}$

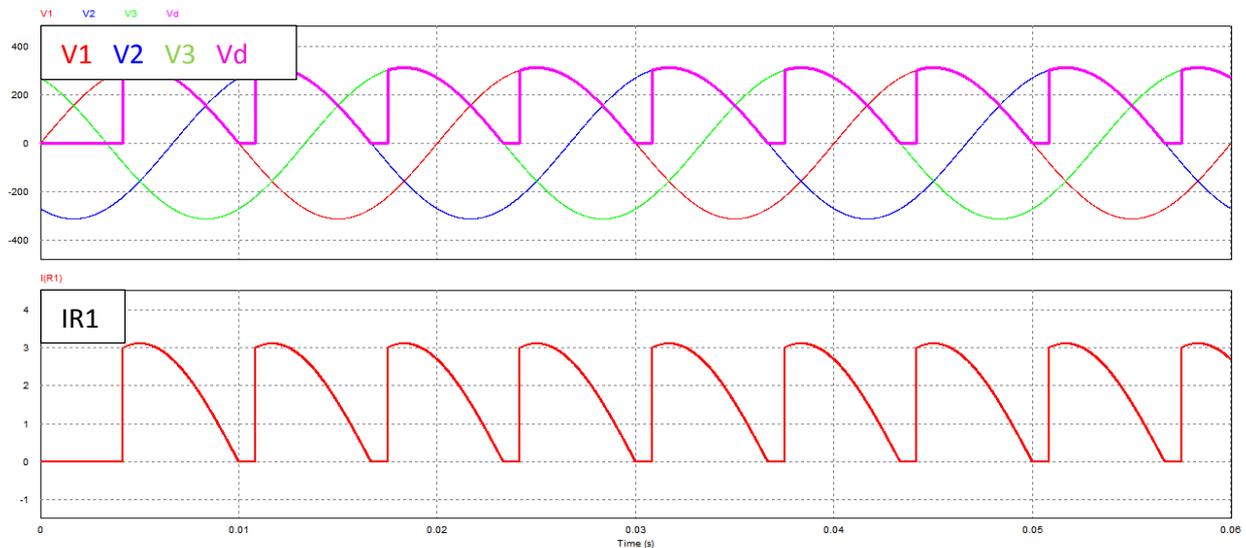


Figure réponse 2.5: Allure de la tension et du courant redressé avec un angle d'amorçage $\alpha = 45^\circ$.

- ✓ Discuter l'allure des courbes obtenues.

D'après les valeurs mesurées de la tension moyenne on constate que cette dernière peut être réglée en agissant sur l'angle d'amorçage. Ce système peut être utilisé comme variateur de vitesse des machines à courants continus.

- ✓ En cas de substitution des générateurs par un transformateur triphasé étoile/étoile calculer la **puissance débitée** par le secondaire et le **facteur de puissance** du secondaire de ce transformateur. Que remarquez-vous ?

Facteur de puissance = P/S

On utilisant l'outil mesure on peut calculer la puissance active et la puissance apparente comme suit :

$$P = V_d \cdot I_d = 178.6 \times 1.78 = 318 \text{ W}$$

$$S = 3 \cdot V_{\text{eff}} \cdot i_{\text{eff}} = 220 \times 1.26 = 831.5 \text{ VA}$$

$$\text{Facteur de puissance} = P/S = 318/831.5 = 0.38 \ll 1$$

Puisque la charge ne consomme que de l'énergie active à courant continu on dit que c'est le redresseur commandé qui consomme de l'énergie réactive du réseau triphasé.

2.2.2. Redresseur parallèle P3 commandé (charge RL):

Câbler le schéma de la figure 5 ci-dessous et faite la simulation de la tension redressée avec une charge inductif RL tel que : $R=100 \Omega$ et $L = 100 \text{ mH}$. $\alpha = 45^\circ$

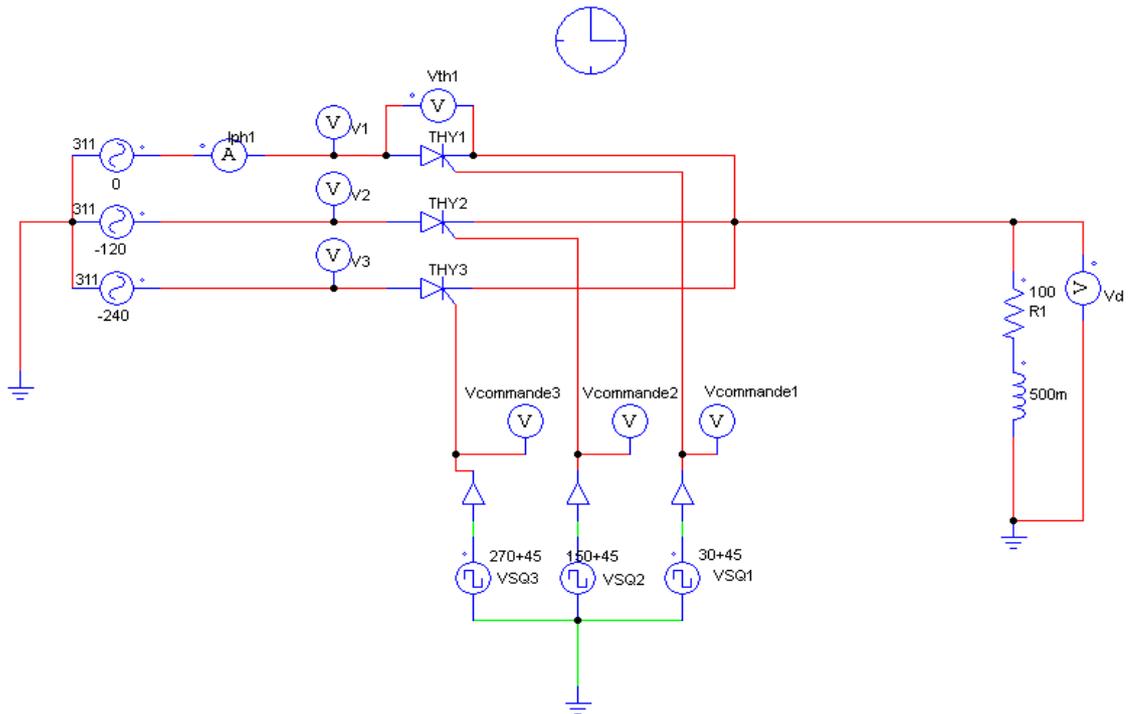


Figure.05 : Redressement commandé Parallèle P3 sur charge inductif RL.

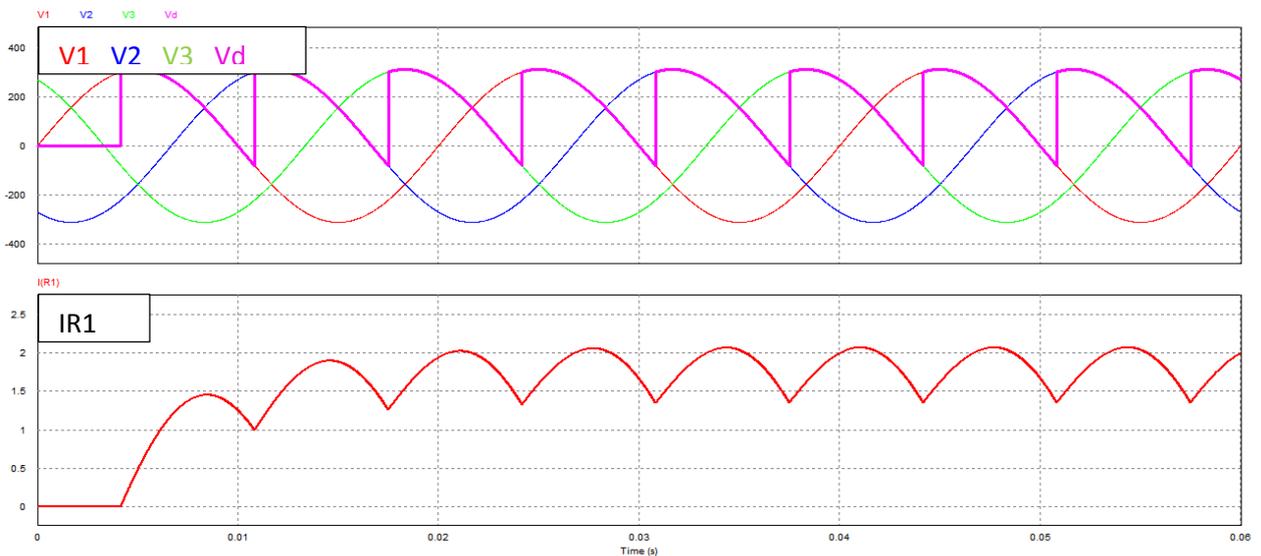


Figure réponse 2.6: Allure de la tension et du courant redressé pour une charge RL.

- ✓ Discuter l'allure de la tension redressée obtenue : On remarque que la tension redressée possède une composante alternative. Le même phénomène du courant inductif en retard par rapport à la tension est apparu. Néanmoins, le courant semble très bien lissé au régime permanent. Le courant est ininterrompu.

2.2.3. Redresseur parallèle P3 commandé (charge RLE):

- ✓ En utilisant le schéma du redresseur parallèle de la figure 5, Visualiser la tension Vd et le courant id pour une charge inductive composée de :
 - L=500 mH et R=100 ohm.
 - fém : E = +300V
 - Alpha= $45^\circ < 90^\circ$

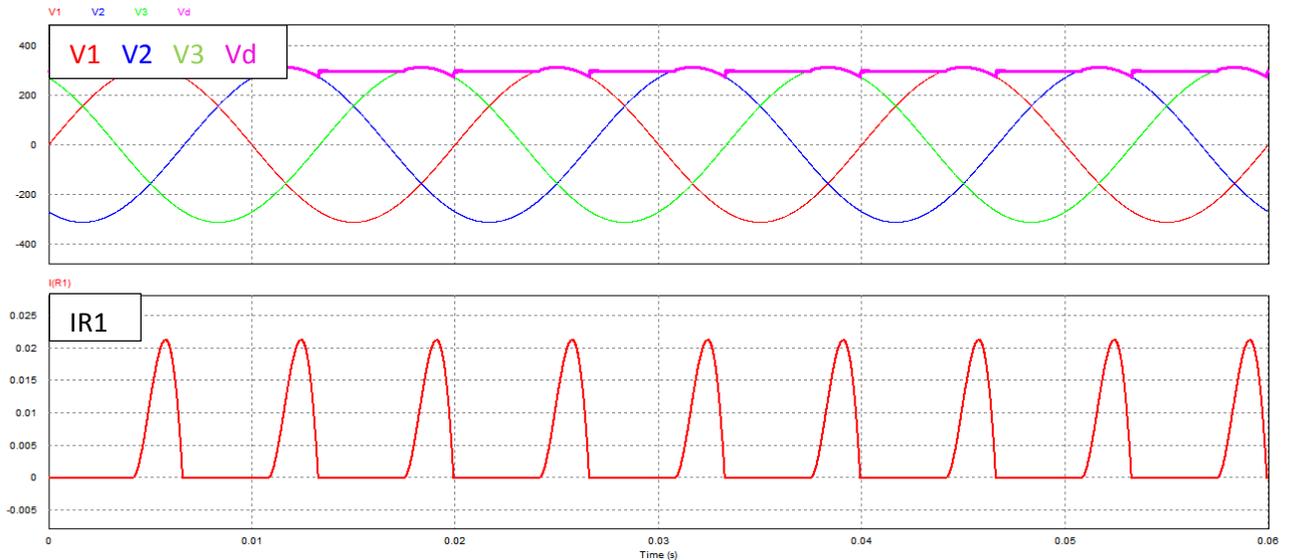


Figure réponse 2.7: Allure de la tension et du courant redressé pour une charge RLE.

Interpréter les résultats :

Les mêmes remarques que le redresseur monophasé sur charge RLE sont relevés. La tension moyenne redressé est augmenté par la quantité E et le courant est diminuer par E/R .

- ✓ En utilisant toujours le même schéma de la figure 5, Visualiser la tension V_d et le courant i_d pour une charge inductive composée de :
 - $L=500$ mH et $R=100$ ohm.
 - fém : $E = -300$ V
 - $\text{Alpha} = 115^\circ > 90^\circ$

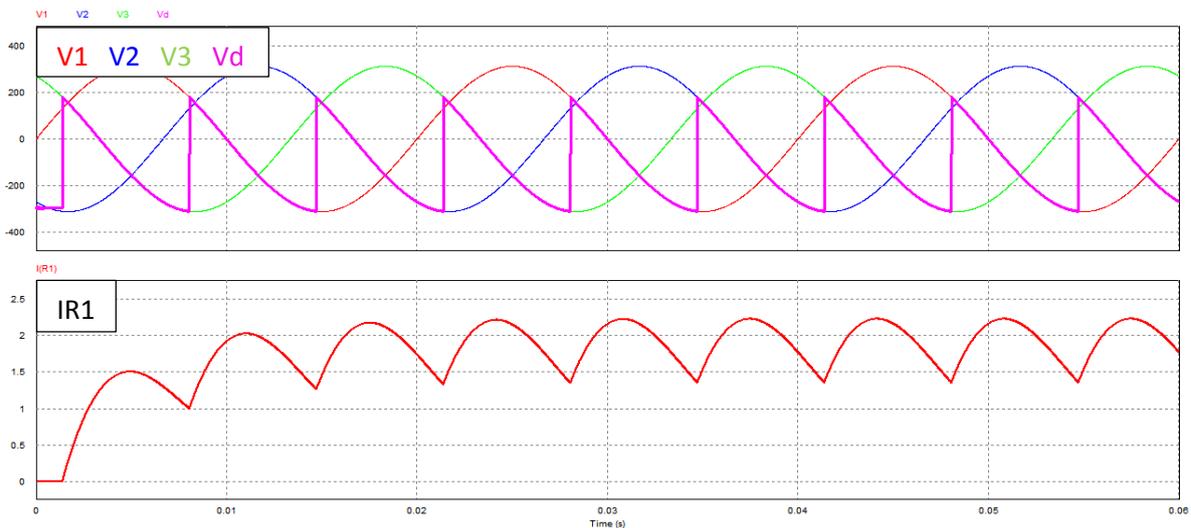


Figure réponse 2.8: Allure de la tension et du courant redressé pour une charge RLE avec $E < 0$ et $\text{Alpha} > 90^\circ$

Interpréter les résultats :

On constate que la tension redressée moyenne dans ce cas est de signe négatif $V_{d\text{moy}} = -108.6$ V alors que le courant reste de signe positif $I_{R\text{moy}} = 1.76$ A.

La puissance à courant continu $P = V_{d\text{moy}} \times I_{R\text{moy}} = -191.13$ W < 0 .

Le redresseur renvoi de l'énergie vers le réseau. On dit que le redresseur fonctionne en mode onduleur assisté par le réseau.

Travaux Pratiques n°03 : Composant en commutation (IGBT, MOSFET...).

But du TP: Simuler le fonctionnement de quelques composant de l'électronique de puissance en commutation.

3.1. Le transistor bipolaire :

Tracer le schéma de la figure 01 et simuler le fonctionnement du transistor bipolaire en commutation pour un temps total de $t = 0.06s$.

Le chemin du transistor bipolaire dans le menu PSIM est comme suit :

Menu element -> switch -> bipolar transistor (three state)

La base du transistor est connectée à un générateur de signal de commande carré dont la fréquence de commutation est $f = 50 \text{ Hz}$ et dont le rapport cyclique Duty cycle = 0.5.

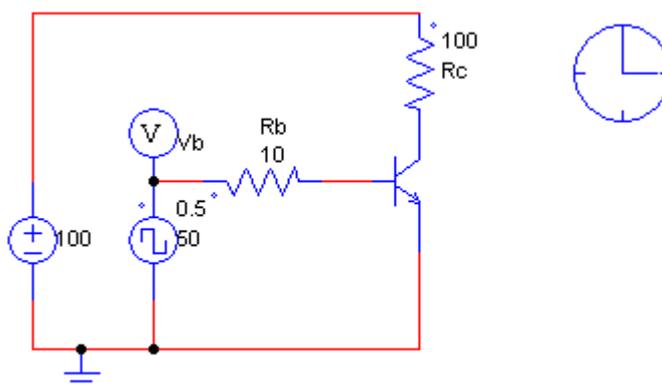


Figure 3.1. Transistor bipolaire en commutation.

Visualisez l'allure de la tension appliquée entre la base et l'émetteur V_b ainsi que le courant de base I_{Rb} et le courant de la charge I_{Rc} puis compléter le tableau suivant :

V_b (V)	0.2	0.7	0.71	1	2
I_{Rb} (mA)					
I_{Rc} (A)					

En se référant aux résultats du tableau indiquer le point d'amorçage du transistor :

.....

.....

Commenter les conditions de commutation du transistor:

.....

.....

.....

3.2. Le transistor à effet de champ MOSFET :

Tracer le schéma de la figure 02 et simuler le fonctionnement du transistor mosfet en commutation pour un temps total de $t = 0.06s$.

Le chemin du transistor MOSFET dans le menu PSIM est comme suit :

Menu element -> switch -> MOSFET (three state)

Le gate du transistor (équivalent de la base pour le transistor bipolaire) est connectée à un générateur de signal carré dont la fréquence de commutation est $f = 50 \text{ Hz}$ et dont le rapport cyclique Duty cycle = 0.5.

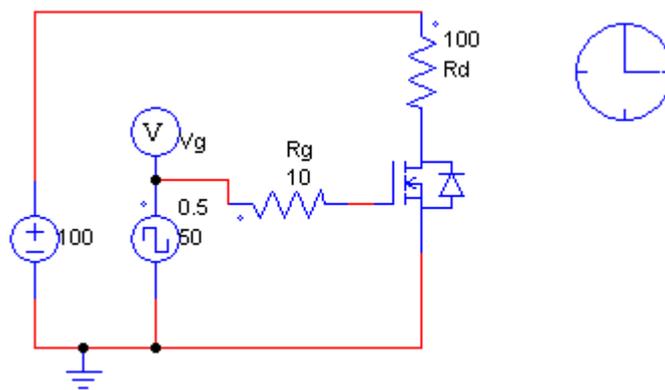


Figure 3.2. Transistor MOSFET en commutation.

Visualisez l’allure de la tension appliquée entre le gate et la source V_g ainsi que le courant du gate I_{Rg} et le courant de la charge I_{Rd} puis compléter le tableau suivant :

V_g (V)	0.2	0.7	1	1.1	2
I_{Rg} (mA)					
I_{Rd} (A)					

En se référant aux résultats du tableau indiquer le point d’amorçage du transistor :

.....

Commenter les conditions de commutation du transistor:

.....

3.3. Transistor bipolaire à grille isolée

L’IGBT est une combinaison entre un transistor MOSFET et un transistor bipolaire. L’IGBT n’étant pas disponible dans le menu de Psim nous allons-le réaliser à l’aide d’un transistor bipolaire PNP et un MOSFET.

Câbler le schéma de la figure ci-dessous et tester le circuit.

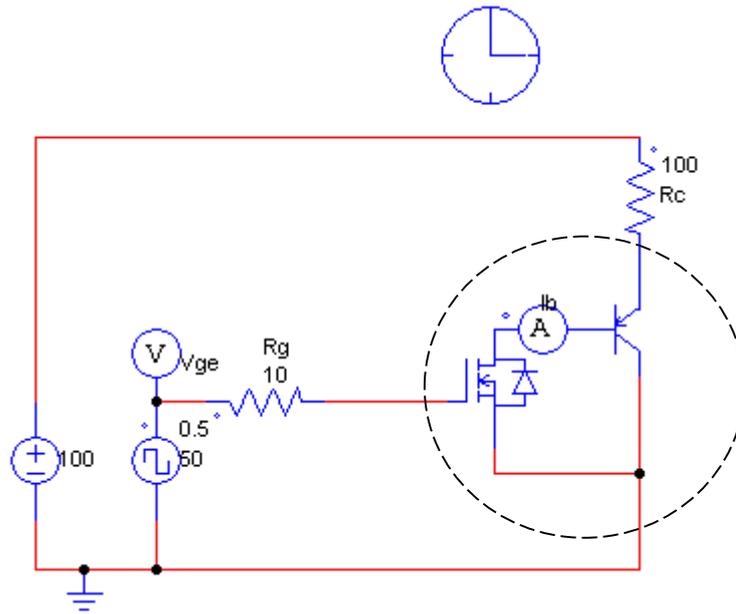


Figure 3.3. Realisation d'un transistor IGBT à l'aide d'un transistor bipolaire et d'un mosfet.

Visualisez l'allure de la tension appliquée entre le gate et l'émetteur V_{ge} ainsi que le courant du gate I_{Rg} , le courant I_b , le courant de la charge I_{Rc} puis compléter le tableau suivant :

V_{ge} (V)	0.2	0.7	1	1.1	2
I_{Rg} (mA)					
I_b (mA)					
I_{Rc} (A)					

En se référant aux résultats du tableau déduire le fonctionnement de L'IGBT et commenter :

.....

.....

.....

.....

Solution TP n°03 :

Composant en commutation (IGBT, MOSFET...).

But du TP: Simuler le fonctionnement de quelques composants de l'électronique de puissance en commutation.

3.1. Le transistor bipolaire :

Tracer le schéma de la figure 01 et simuler le fonctionnement du transistor bipolaire en commutation pour un temps total de $t = 0.06s$.

Le chemin du transistor bipolaire dans le menu PSIM est comme suit :

Menu element -> switch -> bipolar transistor (three state)

La base du transistor est connectée à un générateur de signal de commande carré dont la fréquence de commutation est $f = 50 \text{ Hz}$ et dont le rapport cyclique Duty cycle = 0.5.

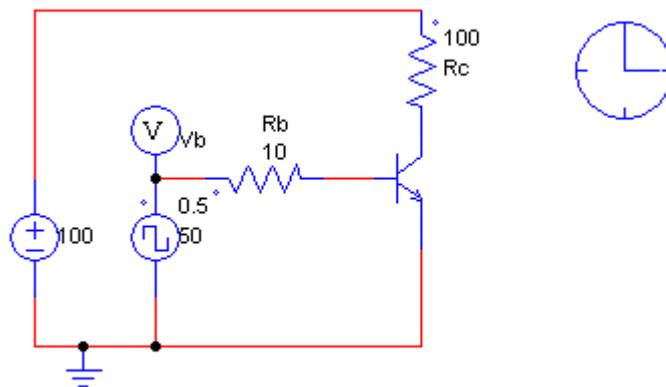


Figure 3.1. Transistor bipolaire en commutation.

✓ Visualisez l'allure de la tension appliquée entre la base et l'émetteur V_b ainsi que le courant de base I_{Rb} et le courant de la charge I_{Rc} puis compléter le tableau suivant :

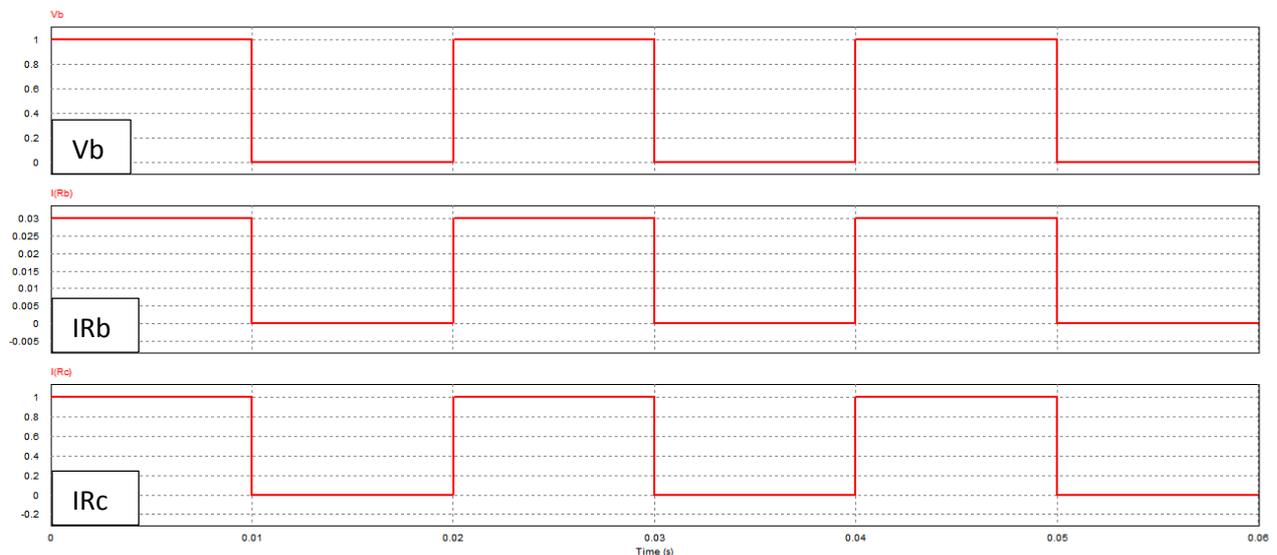


Figure réponse 3.1: Allure de la tension V_b , le courant I_b et I_c .

Vb (V)	0.2	0.7	0.71	1	2
IRb (mA)	0	0	1	30	130
IRc (A)	0	0	0.1	1	1

✓ En se référant aux résultats du tableau indiquer le point d'amorçage du transistor :
 Le point d'amorçage du transistor correspondant à $V_b = 0.71 \text{ V}$, $I_b = 1 \text{ mA}$ et $I_c = 0.1 \text{ A}$
 La tension $V_b = 0.71 \text{ V}$ correspond à la tension seuil de polarisation du transistor.

✓ Commenter les conditions de commutation du transistor :
 On constate que lorsque le transistor est amorcé il consomme un courant à la base ($I_b > 0$). C'est la particularité des transistors bipolaires.

3.2. Le transistor à effet de champ MOSFET :

Tracer le schéma de la figure 02 et simuler le fonctionnement du transistor mosfet en commutation pour un temps total de $t = 0.06 \text{ s}$.

Le chemin du transistor MOSFET dans le menu PSIM est comme suit :

Menu element -> switch -> MOSFET (three state)

Le gate du transistor (équivalent de la base pour le transistor bipolaire) est connectée à un générateur de signal carré dont la fréquence de commutation est $f = 50 \text{ Hz}$ et dont le rapport cyclique Duty cycle = 0.5.

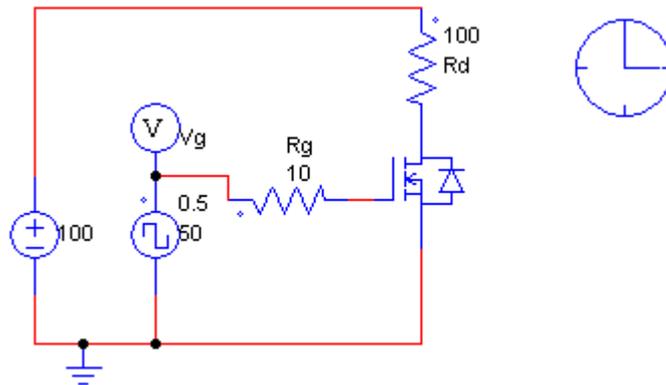


Figure 3.2. Transistor MOSFET en commutation.

✓ Visualisez l'allure de la tension appliquée entre le gate et la source V_g ainsi que le courant du gate I_{Rg} et le courant de la charge I_{Rd} puis compléter le tableau suivant :

V_g (V)	0.2	0.7	1	1.1	2
I_{Rg} (mA)	0	0	0	0	0
I_{Rd} (A)	0	0	0	1	1

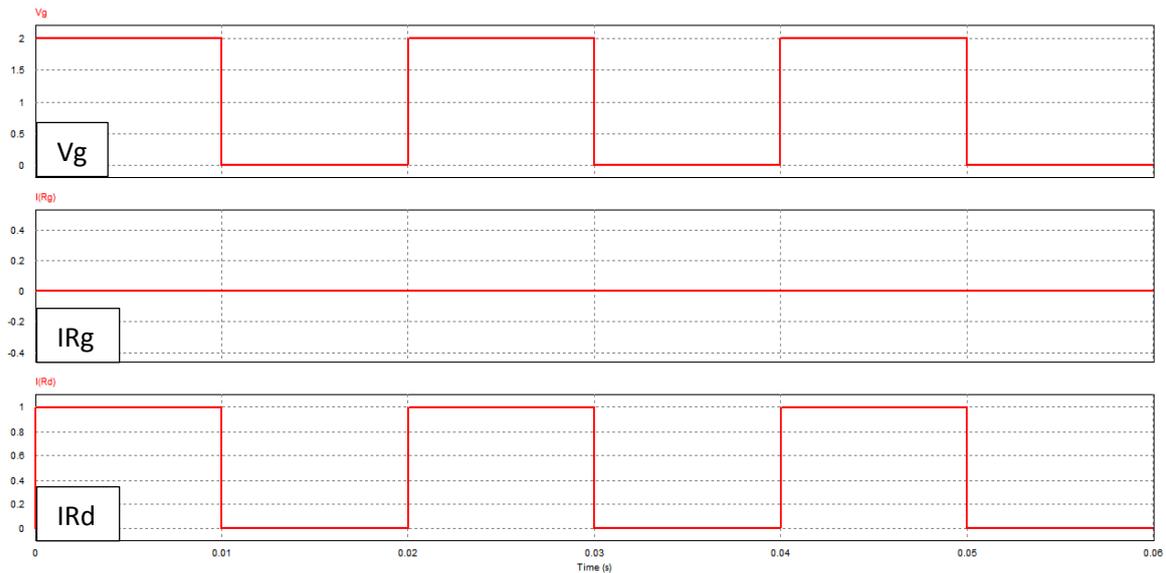


Figure réponse 3.2: Allure de la tension V_g , le courant I_{Rg} et I_{Rd} .

✓ En se référant aux résultats du tableau indiquer le point d'amorçage du transistor :

Le point d'amorçage du transistor correspondant à $V_b = 1.1 \text{ V}$, $I_c = 1 \text{ A}$

La tension $V_b = 1.1 \text{ V}$ correspond à la tension seuil de polarisation du transistor mosfet. En pratique elle est comprise entre 1 et 2 V.

✓ Commenter les conditions de commutation du transistor :

On constate que lorsque le transistor est amorcé il ne consomme un courant au gate ($I_{Rg}=0$). Le mosfet est amorcé seulement par l'application d'une tension au gate, c'est la particularité des transistors mosfet.

3.3. Transistor bipolaire à grille isolée

L'IGBT est une combinaison entre un transistor MOSFET et un transistor bipolaire. L'IGBT n'étant pas disponible dans le menu de Psim nous allons-le réaliser à l'aide d'un transistor bipolaire PNP et un MOSFET.

Câbler le schéma de la figure ci-dessous et tester le circuit.

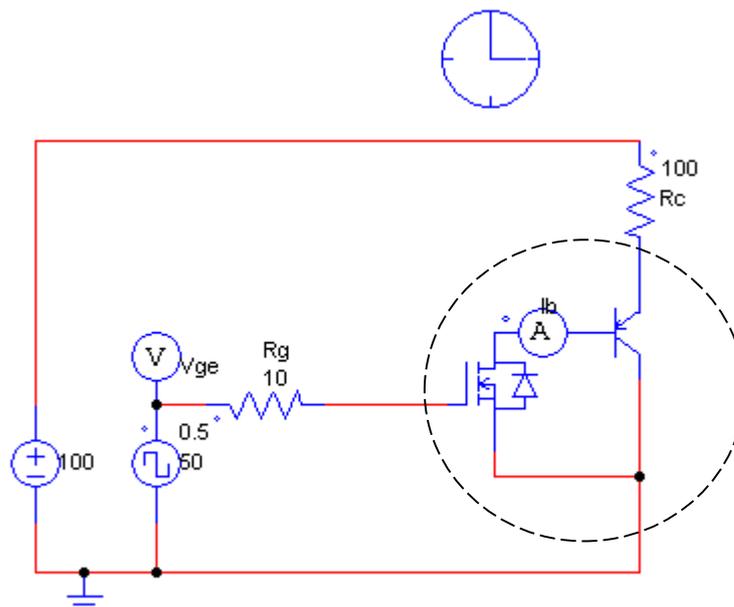


Figure 3.3. Realisation d'un transistor IGBT à l'aide d'un transistor bipolaire et d'un mosfet.

- ✓ Visualisez l'allure de la tension appliquée entre le gate et l'émetteur V_{ge} ainsi que le courant du gate I_{Rg} , le courant I_b , le courant de la charge I_{Rc} puis compléter le tableau suivant :

V_{ge} (V)	0.2	0.7	1	1.1	2
I_{Rg} (mA)	0	0	0	0	0
I_b (mA)	0	0	0	9.8	9.8
I_{Rc} (A)	0	0	0	1	1

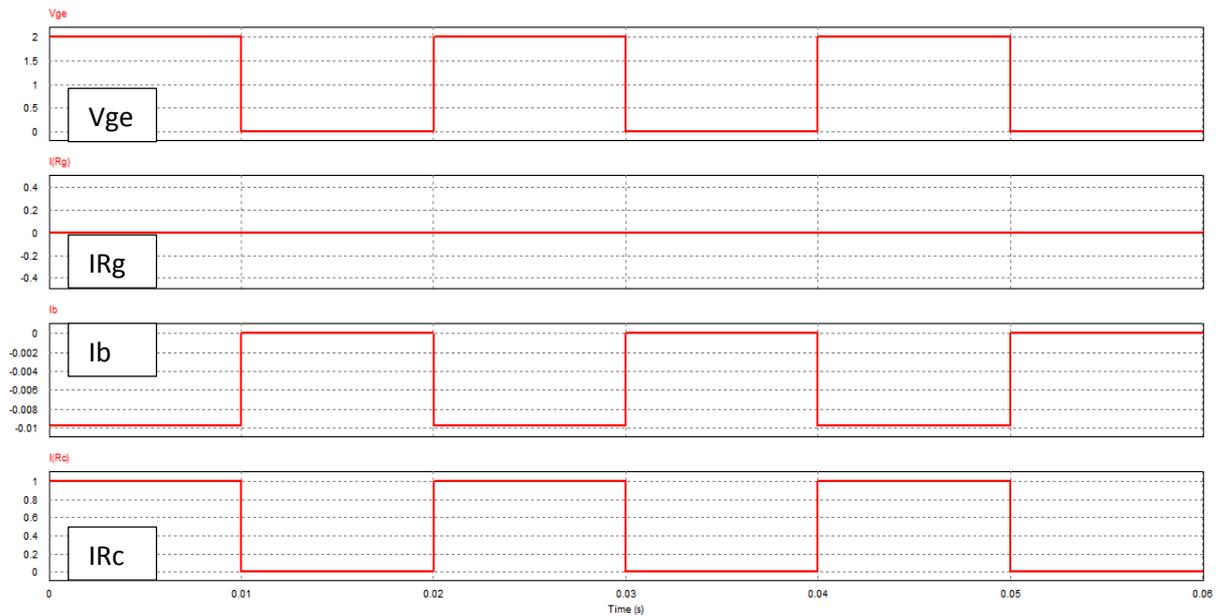


Figure réponse 3.3: Allure de la tension V_{ge} , le courant I_{Rg} , I_b et I_{Rc} .

- ✓ En se référant aux résultats du tableau déduire le fonctionnement de L'IGBT et commenter :
D'après les résultats on constate que le transistor IGBT est amorcé par l'application d'une tension entre le gate et l'émetteur. Cependant, c'est le transistor bipolaire pnp qui s'en charge du transit du courant I_{Rc} . On peut dire que l'IGBT réunit la simplicité d'amorçage des mosfet avec les caractéristiques de puissance du bipolaire.

Travaux Pratiques n°04 : Hacheur à thyristor

But du TP: Comprendre la commutation des thyristors et simuler le fonctionnement du hacheur série et parallèle à base de thyristor.

4.1. Les thyristors :

Tracer les schémas de la figure 01 et simuler le fonctionnement du thyristor et du thyristor GTO (Gate Turned Off) en commutation pour un temps total de $t = 0.05s$.

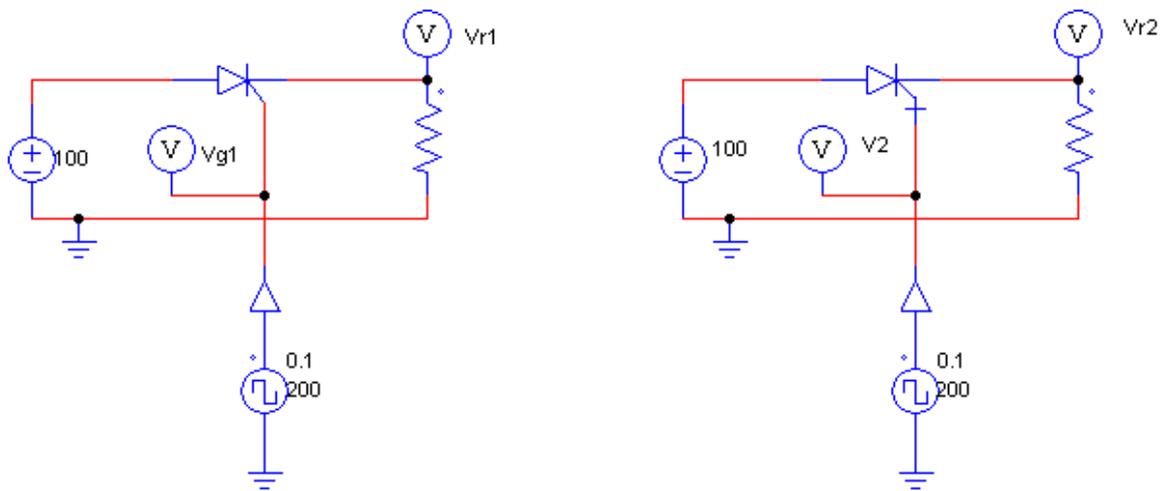


Figure 4.1. Simulation comparative du thyristor normale et du thyristor GTO

Le chemin des thyristors dans le menu PSIM est comme suit :

**Menu element -> switch -> Thyristor
-> GTO**

Pour obtenir les impulsions de commande, la Gâchette du thyristor est connectée à un générateur de signal de commande carré dont la fréquence de commutation est $f = 200 \text{ Hz}$ et dont le rapport cyclique Duty cycle = 0.1.

- ✓ Visualisez la tension aux bornes de la charge Résistive V_{r1} , V_{r2} ainsi que le signal d'amorçage la gâchette correspondant à chaque cas V_{g1} et V_{g2} , puis expliquer la différence entre les deux thyristors :

.....
.....
.....
.....
.....

4.2. Hacheur série

Câbler le schéma suivant et simuler son fonctionnement pour un temps $t_{\text{totale}} = 4\text{s}$:

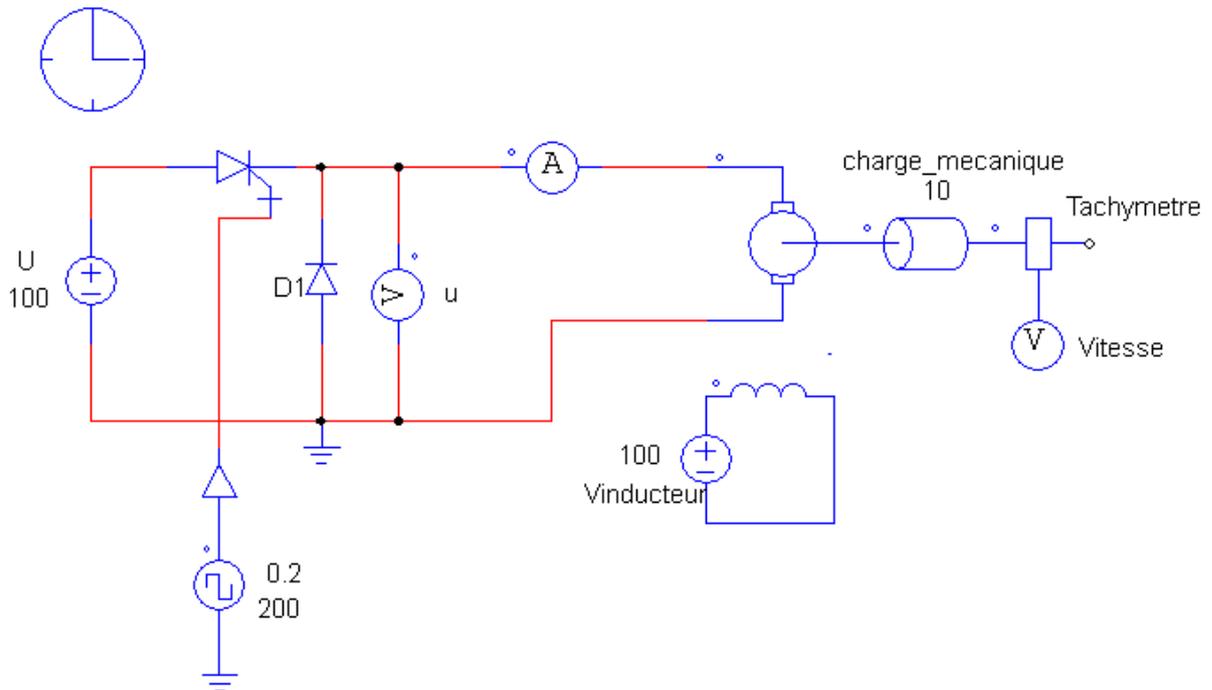


Figure 4.2 : Hacheur série alimentant une MCC.

Le hacheur série est interface entre une générateur de tension (Réseau DC) et un récepteur de courant (machine à courant continu MCC en mode moteur).

Les éléments de la MCC sont disponibles dans le menu :

Eléments → **Power** → **Motor drive module** → **DC machine**
 → **Mechanical loads and sensor** → **Mechanical loads**
 → **speed sensor**

La tension du réseau d'alimentation $U=100\text{V}$. L'interrupteur T est fermé et ouvert à une fréquence de $f=200\text{Hz}$. La charge mécanique possède un couple résistant constant de $T_c = 10 \text{ N.m}$

- ✓ Visualiser la forme du signal de la **tension u** et de **courant i** absorbé par la MCC ainsi que la **vitesse de rotation** de cette dernière pour un rapport cyclique (*Duty cycle*) $\alpha = 0.2$
- ✓ Faites un zoom sur la courbe du **courant i** absorbé en régime **permanent** et compléter le tableau ci-dessous :

Rapport cyclique (α)	$u_{\text{moy calc}} (\alpha U)$ [V]	$u_{\text{moy mes}}$ [V]	Vitesse de rotation [tr/min]	$i_{\text{moy mes}}$ [A]	Δi_{mes} [A]
0.2					
0.5					
0.8					

- ✓ Interpréter les résultats:

.....

.....

.....

.....

Visualiser le courant i_T et i_D passant par **T** et la **diode** respectivement puis commenter :

.....

.....

4.3. Hacheur parallèle

Câbler le schéma suivant et simuler son fonctionnement pour un temps $t_{totale} = 4s$:

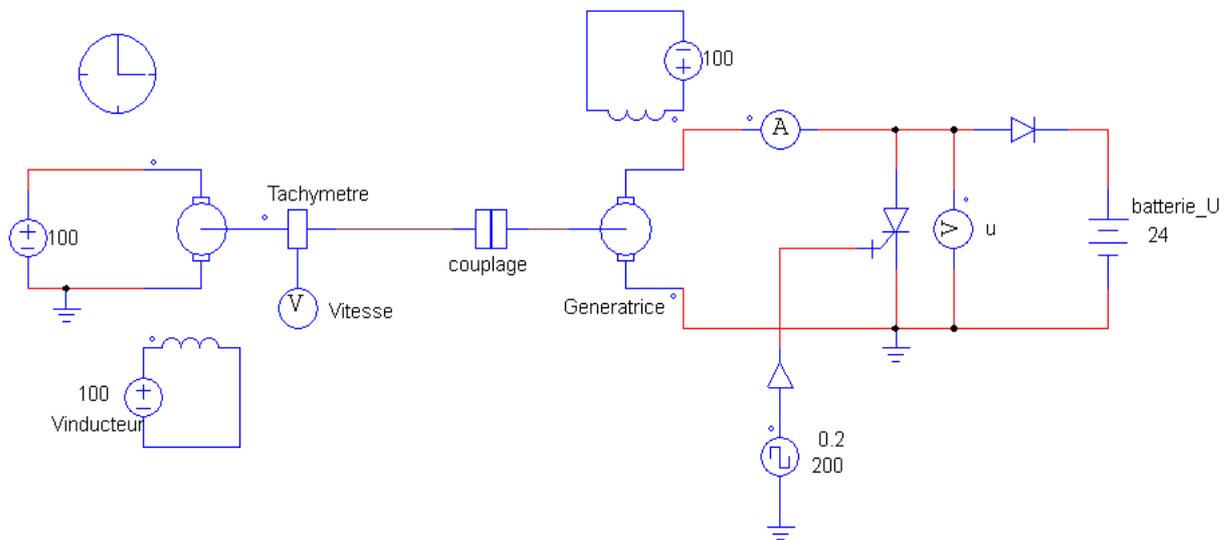


Figure 4.3 : *Chargement d'une batterie par un Hacheur parallèle et une MCC.*

Le hacher parallèle est interface entre une générateur de courant (machine à courant continu MCC en mode génératrice) et un récepteur de tension (batterie)).

Pour entrainer la **génératrice** on utilise un **moteur à courant continu** et un **bloc de couplage** disponible dans le menu :

Eléments → **Power** → **Mechanical loads and sensor** → **Mechanical coupling block**

- ✓ Visualiser la forme du signal de la **tension u** et de **courant i** absorbé par la MCC ainsi que la **vitesse de rotation** de cette dernière pour un rapport cyclique (**Duty cycle**) $\alpha = 0.2$
- ✓ Faite un zoom sur la courbe du **courant i** débité en régime **permanent** et compléter le tableau ci-dessous :

Rapport cyclique (α)	$u_{moy\ calc}$ ($1-\alpha$)U [V]	$u_{moy\ mes}$ [V]	Vitesse de rotation [tr/min]	$i_{moy\ mes}$ [A]	Δi_{mes} [A]
0.2					
0.5					
0.8					

- ✓ Interpréter les résultats:

.....
.....
.....
.....

- ✓ Compléter à l'aide d'une autre simulation le tableau ci-dessous :

Rapport cyclique (α) constant	U [V]	Vitesse de rotation [tr/min]
0.8	24	
0.8	48	
0.8	96	

- ✓ Interpréter les résultats:

.....
.....
.....

- ✓ Visualiser le courant i_T et i_D passant par **T** et la **diode** respectivement puis commenter :

.....
.....

Solution TP n°04 : Hacheur à thyristor

But du TP: Comprendre la commutation des thyristors et simuler le fonctionnement du hacheur série et parallèle à base de thyristor.

4.1. Les thyristors :

Tracer les schémas de la figure 01 et simuler le fonctionnement du thyristor et du thyristor GTO (Gate Turned Off) en commutation pour un temps total de $t = 0.05s$.

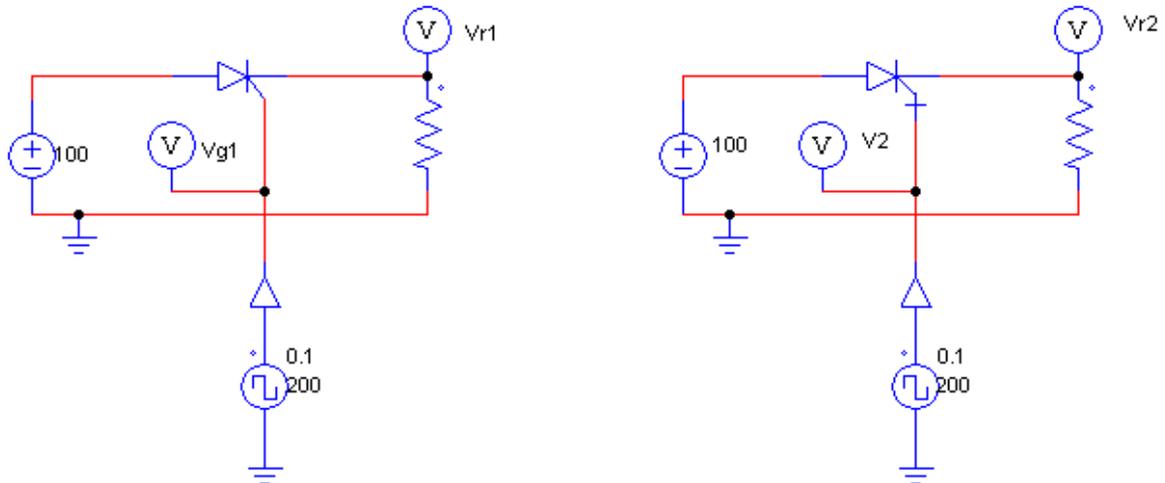


Figure 4.1. Simulation comparative du thyristor normale et du thyristor GTO

Le chemin du des thyristors dans le menu PSIM est comme suit :

Menu element -> switch -> Thyristor
-> GTO

Pour obtenir les impulsions de commande, la Gâchette du thyristor est connectée à un générateur de signal de commande carré dont la fréquence de commutation est $f = 200$ Hz et dont le rapport cyclique Duty cycle = 0.1.

- ✓ Visualisez la tension aux bornes de la charge Résistive Vr1, Vr2 ainsi que le signal d'amorçage la gâchette correspondant à chaque cas Vg1 et Vg2, puis expliquer la différence entre les deux thyristors :

On remarque que les thyristors n'ont pas le même comportement bien que les signaux de commande sont les mêmes. D'après les tensions Vs1 et Vs2 on conclut que :

- 1- Le thyristors normale est amorcé par une impulsion et reste dans cet état tant que le courant le traversant est non nul.
- 2- Le thyristor GTO est amorcer de la même manière que le thyristor normale cependant ce dernier peut être commandé à la fermeture. Cela convient très bien à nous application telle que la commande à l'ouverture et à la fermeture des interrupteurs d'un hacheur.

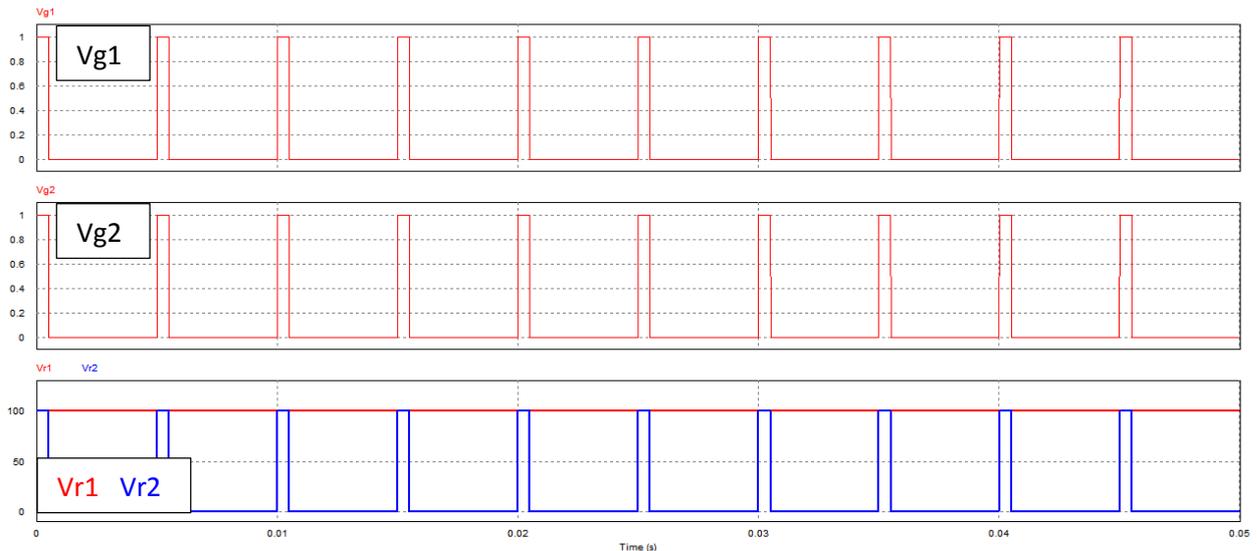


Figure réponse 4.1: Allure des signaux de commande à la gâchette et des signaux des tensions de sortie des thyristors.

4.2. Hacheur série

Câbler le schéma suivant et simuler son fonctionnement pour un temps $t_{\text{totale}} = 4\text{s}$:

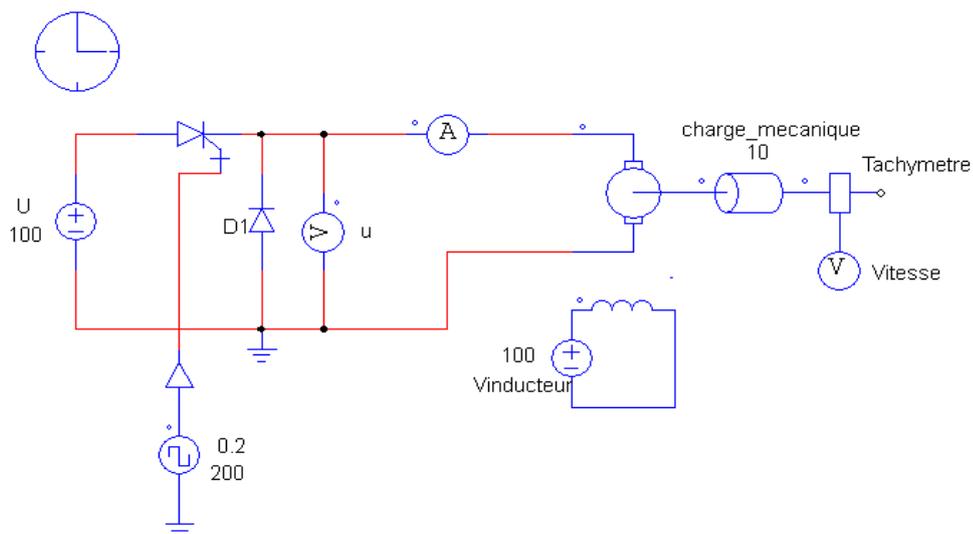


Figure 4.2 : Hacheur série alimentant une MCC.

Le hacheur série est interface entre une générateur de tension (Réseau DC) et un récepteur de courant (machine à courant continu MCC en mode moteur).

Les éléments de la MCC sont disponibles dans le menu :

Eléments → **Power** → **Motor drive module** → **DC machine**
 → **Mechanical loads and sensor** → **Mechanical loads**
 → **speed sensor**

La tension du réseau d'alimentation $U=100\text{V}$. L'interrupteur T est fermé et ouvert à une fréquence de $f=200\text{Hz}$. La charge mécanique possède un couple résistant constant de $T_c = 10\text{ N.m}$

- ✓ Visualiser la forme du signal de la **tension u** et de **courant i** absorbé par la MCC ainsi que la **vitesse de rotation** de cette dernière pour un rapport cyclique (**Duty cycle**) $\alpha = 0.2$

- ✓ Faites un zoom sur la courbe du **courant i** absorbé en régime **permanent** et compléter le tableau ci-dessous :

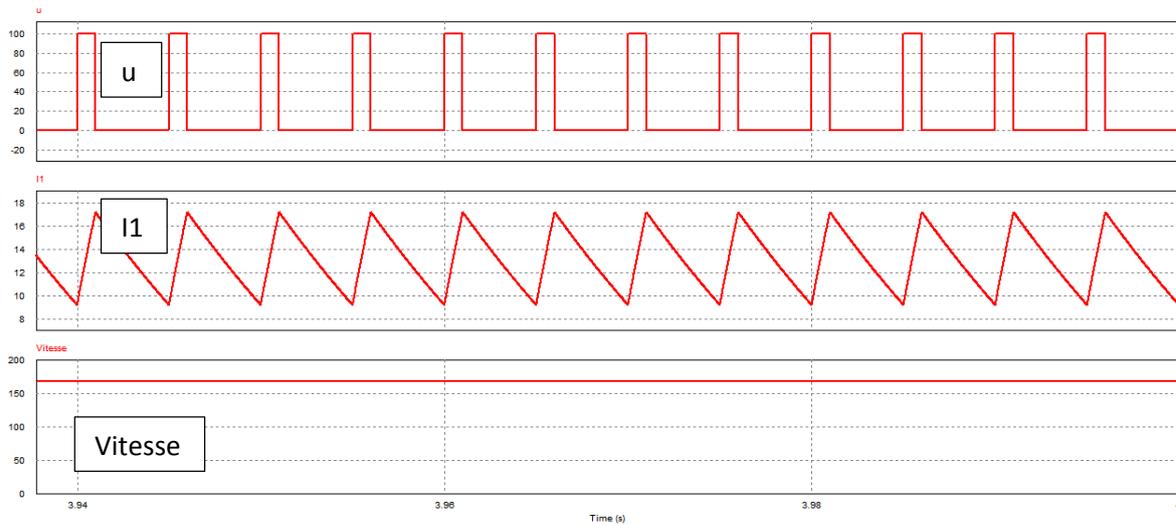


Figure réponse 4.2: Allure des signaux de tension de sortie du hacheur, du courant et de la vitesse de rotation de la MCC.

Rapport cyclique (α)	$u_{\text{moy calc}} (\alpha U)$ [V]	$u_{\text{moy mes}}$ [V]	Vitesse de rotation [tr/min]	$i_{\text{moy mes}}$ [A]	Δi_{mes} [A]
0.2	20	19.95	168.3	13.11	08
0.5	50	50.3	543.9	13.11	12.8
0.8	80	79.88	919.61	13.12	08

- ✓ Interpréter les résultats : d'après les résultats du tableau on remarque qu'on peut varier la vitesse de rotation de la machine en agissant seulement sur Rapport cyclique.

Un autre fait marquant est que cette variation de vitesse se fait se tout en absorbant un courant constant. Sachant que le couple de la machine dépend exclusivement du courant $Couple = cste * flux * courant$ on peut dire que la variation se fait avec un couple constant. Cela est intéressant pour les systèmes de levage (grus, ascenseur...etc) où on a besoin de varier la vitesse avec couple constant.

On remarque aussi que l'ondulation du courant est maximale pour $\alpha = 0.5$, on pratique ce point est à éviter.

Visualiser le courant i_T et i_D passant par le **GTO** et la **diode** respectivement puis commenter :

On constate que le courant passant par GTO est un courant de charge de la bobine de l'induit (transfert de puissance vers le moteur) et le courant de la diode est un courant de décharge (phase roue libre). Le courant total est la somme des courants du GTO et de la diode.

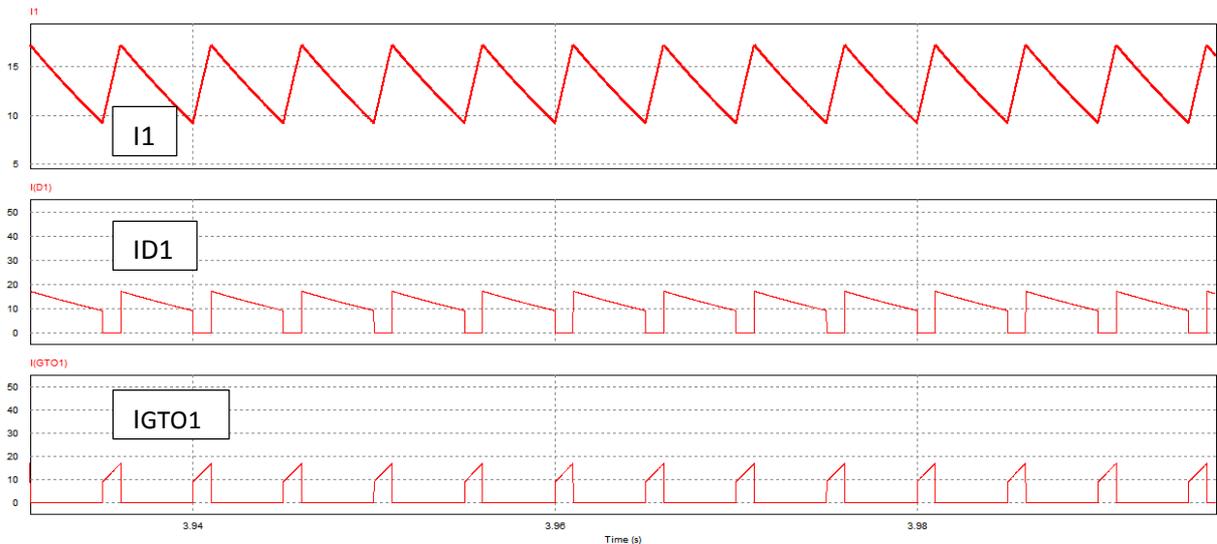


Figure réponse 4.3: Allure des signaux de courant totale de sortie du hacheur, du courant transitant par le GTO et la diode.

4.3. Hacheur parallèle

Câbler le schéma suivant et simuler son fonctionnement pour un temps $t_{\text{totale}} = 4\text{s}$:

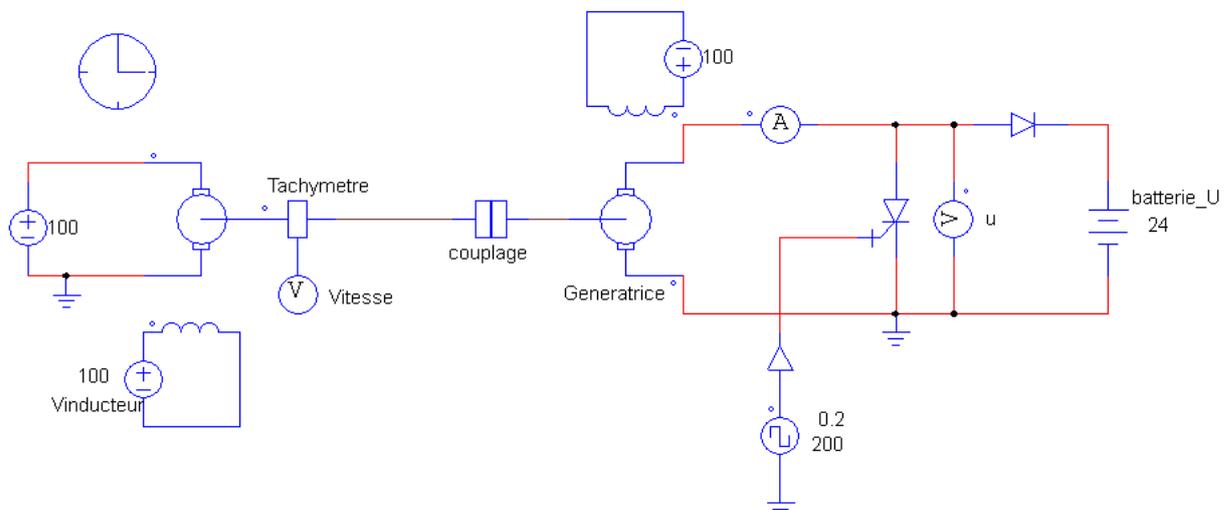


Figure 4.3 : Chargement d'une batterie par un Hacheur parallèle et une MCC.

Le hacheur parallèle est interface entre une générateur de courant (machine à courant continu MCC en mode génératrice) et un récepteur de tension (batterie).

Pour entrainer la **génératrice** on utilise un **moteur à courant continu** et un **bloc de couplage** disponible dans le menu :

Eléments → **Power** → **Mechanical loads and sensor** → **Mechanical coupling block**

- ✓ Visualiser la forme du signal de la **tension u** et de **courant i** absorbé par la MCC ainsi que la **vitesse de rotation** de cette dernière pour un rapport cyclique (**Duty cycle**) $\alpha = 0.2$
- ✓ Faite un zoom sur la courbe du **courant i** débité en régime **permanent** et compléter le tableau ci-dessous :

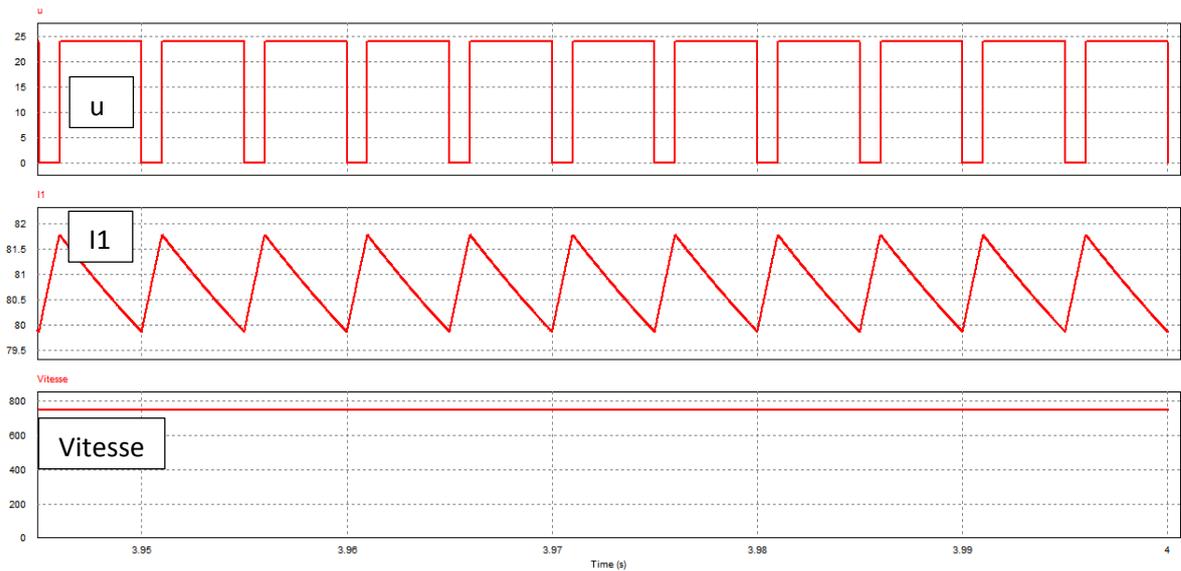


Figure réponse 4.4: Allure des signaux de tension de sortie du hacheur, du courant et de la vitesse de rotation de la MCC.

Rapport cyclique (α)	$u_{\text{moy calc}} (1-\alpha)U$ [V]	$u_{\text{moy mes}}$ [V]	Vitesse de rotation [tr/min]	$i_{\text{moy mes}}$ [A]	Δi_{mes} [A]
0.2	19	19.1	745.7	80.7	2
0.5	12	12.06	701.2	87	3
0.8	4.8	4.82	657.13	94	2

- ✓ Interpréter les résultats : On constate que bien que la génératrice est entraînée par un moteur avec des paramètres constants, la vitesse de rotation de la machine est imposée par le rapport cyclique. On distingue aussi les mêmes remarques pour le courant, son ondulation et le couple de la génératrice que celle du hacheur sérié. Ce mode peut être aussi utilisé pour le freinage des machines à couple constant.
- ✓ Compléter à l'aide d'une autre simulation le tableau ci-dessous :

Rapport cyclique (α) constant	U [V]	Vitesse de rotation [tr/min]
0.8	24	656.13
0.8	48	686
0.8	96	746.20

- ✓ Interpréter les résultats: On remarque que la vitesse de rotation de la MCC est non seulement imposé par le rapport cyclique mais aussi elle dépend de la tension du réseau alimenté en énergie à courant continu. Cela est très important lors du dimensionnement des machines.
- ✓ Visualiser le courant i_T et i_D passant par le **GTO** et la **diode** respectivement puis commenter :

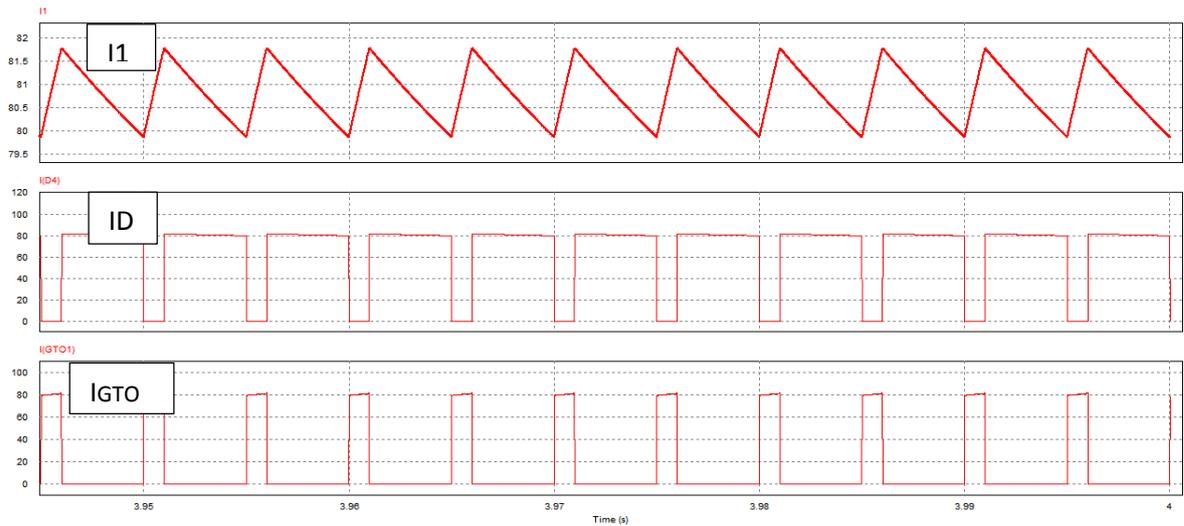


Figure réponse 4.5: Allure des signaux de courant totale de sortie du hacheur, du courant transitant par le GTO et la diode.

On constate que les courants ont la même allure que celle d'un hacheur sérié. Cependant le courant du GTO est un courant de charge de l'inductance de l'induit correspondant à la phase roue libre et le courant de la diode est un courant de décharge de l'induit correspondant au transfert de puissance de la génératrice vers le réseau.

Travaux Pratiques n°05 :

Onduleur monophasé (à résonance, à source de courant).

But du TP : Simuler et comprendre le fonctionnement de l'onduleur monophasé en pont à courant sinusoïdal résonnant et à source de courant.

5.1. Onduleur en pont :

Câbler le schéma suivant de l'onduleur en pont et lancer la simulation avec une charge inductif $R=100\ \Omega$ et $L = 100\ \text{mH}$. Pour les signaux de commande on utilise deux générateurs de signaux carré déphasés de 180° l'un de l'autre avec un rapport cyclique duty cycle = 0.5 et une fréquence de commutation $f = 500\ \text{Hz}$.

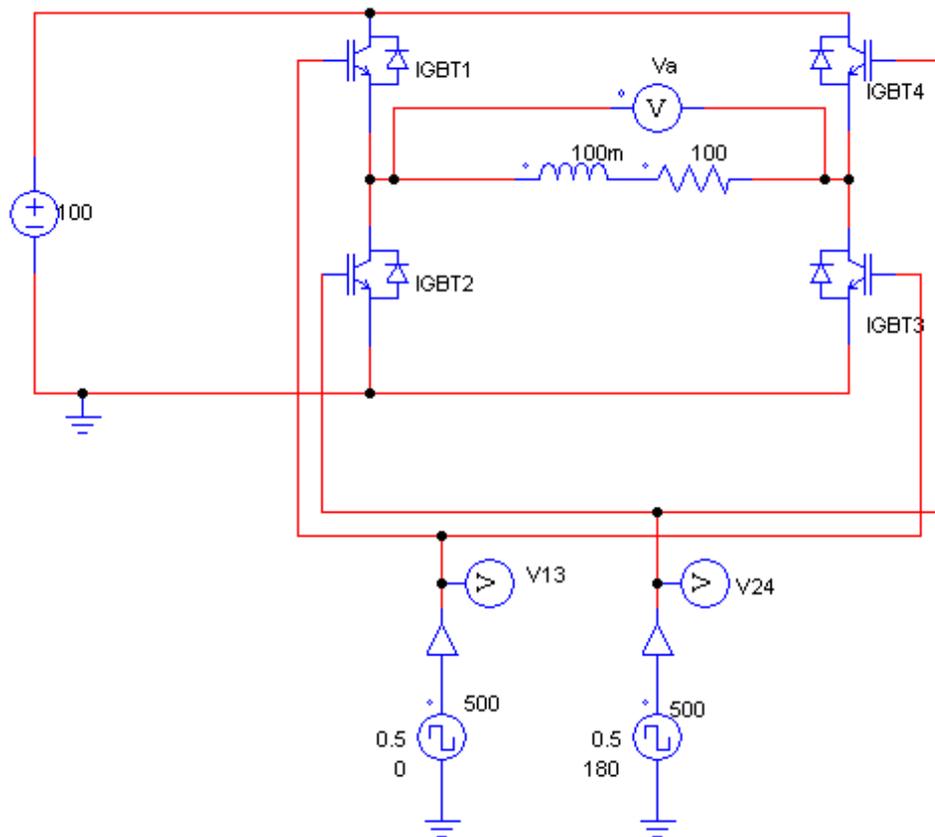


Figure 5.1 : Onduleur en demi-pont sur charge inductive.

- ✓ Lancer la simulation avec un temps total $t = 0.03\text{s}$.
- ✓ Visualiser la forme des signaux de commande **V13** et **V24**.
- ✓ Visualiser la forme du signal de **tension Va** et de **courant** de la charge **IR**.
- ✓ Discuter l'allure des courbes obtenues et expliquez le fonctionnement de l'onduleur :

.....

.....

.....

.....

.....

.....

5.2. Onduleur en pont à résonance :

L'onduleur en pont de la figure 01 précédente alimente maintenant une charge RLC. On désire faire fonctionner l'onduleur à l'état de résonance. Sachant que la fréquence de résonance est donnée par :

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

- ✓ Calculer la valeur de la capacité à insérer en série avec la charge de la figure 01 (R=100 Ω, L = 100 mH).

.....

- ✓ Lancer la simulation et visualiser la forme du signal de **tension Va** et de **courant de la charge IR** dans ce cas de résonance puis discuter l'allure des courbes obtenues :

.....

5.3. Onduleur à source de courant :

Réalisé le schéma de la figure 02.

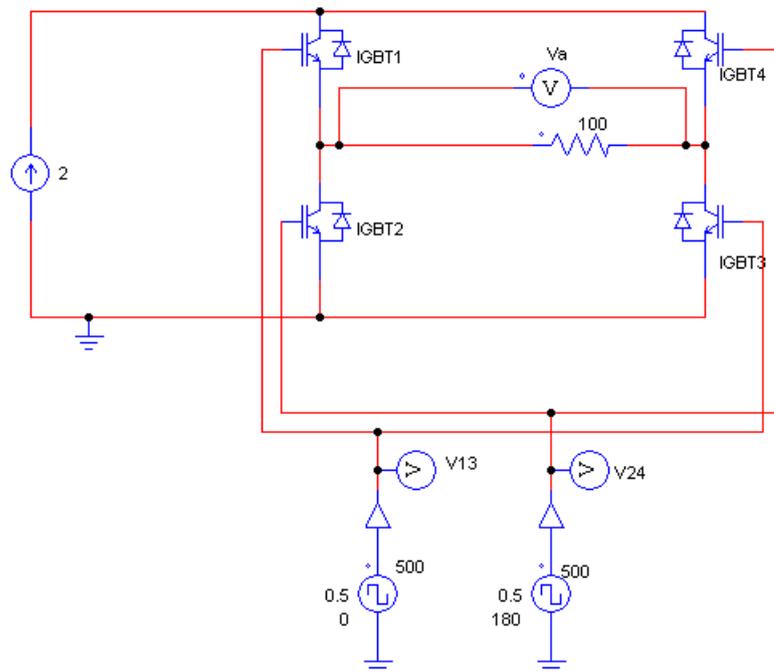


Figure 5.2 : Onduleur en demi-pont à source de courant.

L'onduleur est alimenté maintenant par une source de courant de 2 Ampères au lieu d'une source de tension. La source de courant présente la propriété de débiter un courant constant sans fluctuation. La source de courant est disponible dans le menu : **élément -> source -> current.**

- ✓ Lancer la simulation et visualiser la forme du signal de **tension Va** et de **courant de la charge IR** . Discuter l'amplitude de la tension et du courant alternatif obtenus :

.....
.....
.....
.....
.....
.....

- ✓ Refaite la simulation pour une charge capacitive RC tel que $R = 100 \text{ Ohm}$ et $C = 10 \mu\text{F}$ puis expliquez l'allure de la courbe de tension V_a :.....

.....
.....
.....
.....

Solution TP n°05 :

Onduleur monophasé (à résonance, à source de courant).

But du TP : Simuler et comprendre le fonctionnement de l'onduleur monophasé en pont à courant sinusoïdal résonnant et à source de courant.

5.1. Onduleur en pont :

Câbler le schéma suivant de l'onduleur en pont et lancer la simulation avec une charge inductif $R=100\ \Omega$ et $L = 100\ \text{mH}$. Pour les signaux de commande on utilise deux générateurs de signaux carré déphasés de 180° l'un de l'autre avec un rapport cyclique duty cycle = 0.5 et une fréquence de commutation $f = 500\ \text{Hz}$.

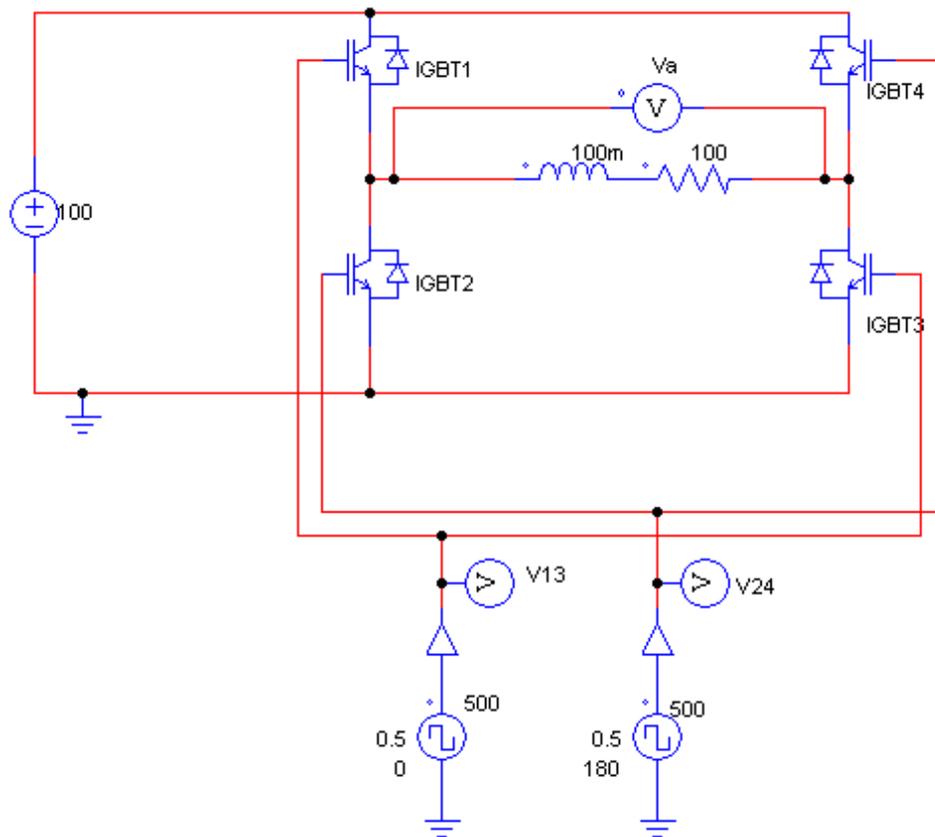


Figure 5.1 : Onduleur en demi-pont sur charge inductive.

- ✓ Lancer la simulation avec un temps total $t = 0.03\text{s}$.
- ✓ Visualiser la forme des signaux de commande **V13** et **V24**.
- ✓ Visualiser la forme du signal de **tension Va** et de **courant** de la charge **IR**.
- ✓ Discuter l'allure des courbes obtenues et expliquez le fonctionnement de l'onduleur :

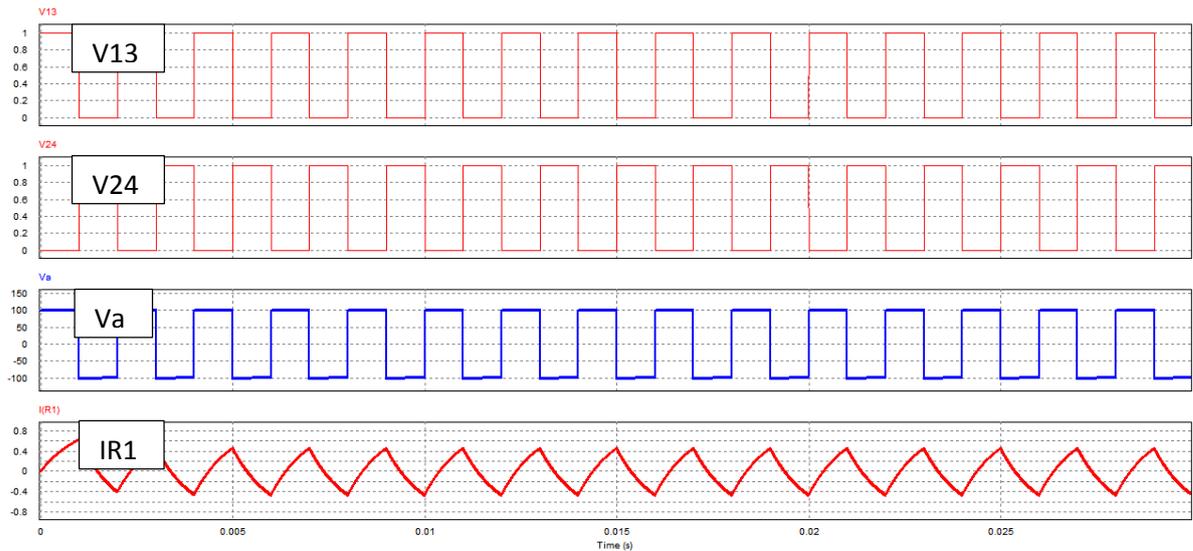


Figure réponse 5.1: Allure des signaux de commande V13 et V24 et formes du signal de tension Va et de courant de la charge IR.

Les signaux de commande de l'onduleur sont bien déphasés de 180°. Le signal de sortie de l'onduleur est alternatif de forme carré. On distingue deux intervalles de fonctionnement de l'onduleur :

De 0°- 180° : IGBT1 et IGBT3 sont passant, la tension de sortie est égale a $V_s = + V_e$.

De 180°- 360° : IGBT2 et IGBT4 sont passant, la tension de sortie est égale a $V_s = - V_e$.

Le courant de la charge est formé par des segments d'arc exponentiel de charge et de décharge de courant de l'inductance.

5.2. Onduleur en pont à résonance :

L'onduleur en pont de la figure 01 précédente alimente maintenant une charge RLC. On désire faire fonctionner l'onduleur à l'état de résonance. Sachant que la fréquence de résonance est donnée par :

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

- ✓ Calculer la valeur de la capacité à insérer en série avec la charge de la figure 01 ($R = 100 \Omega$, $L = 100 \text{ mH}$)

D'après la formule précédente la capacité du condensateur peut être calculée comme suit :

$$C = \frac{1}{(2\pi * 500)^2 * 0.1} = 1\mu F$$

- ✓ Lancer la simulation et visualiser la forme du signal de **tension Va** et de **courant de la charge IR** dans ce cas de résonance puis discuter l'allure des courbes obtenues :

On remarque que l'allure du signal de tension de sortie de l'onduleur reste inchangée. Par contre le courant de la charge passe par un régime transitoire puis devient quasi-sinusoïdale en régime permanent. L'onduleur à résonance présente donc l'avantage de fournir un courant non déformé. Cependant, cette résonance dépend de la charge, il faudra donc toujours la redimensionner par l'ajout d'inductance ou de condensateur.

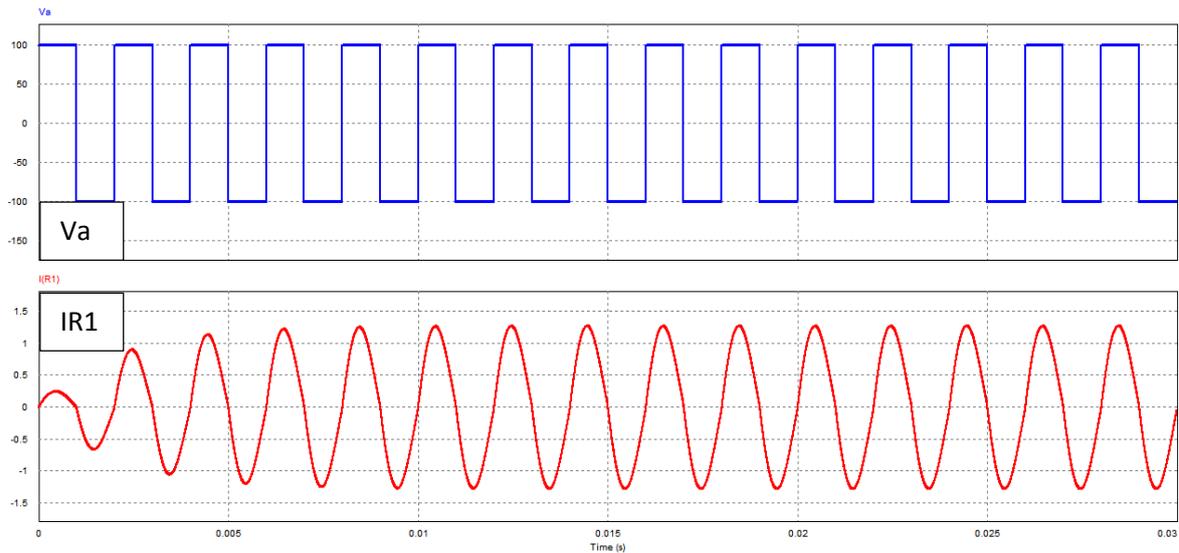


Figure réponse 5.2: Allure du signal de tension V_a et de courant de la charge IR .

5.3. Onduleur à source de courant :

Réalisé le schéma de la figure 02.

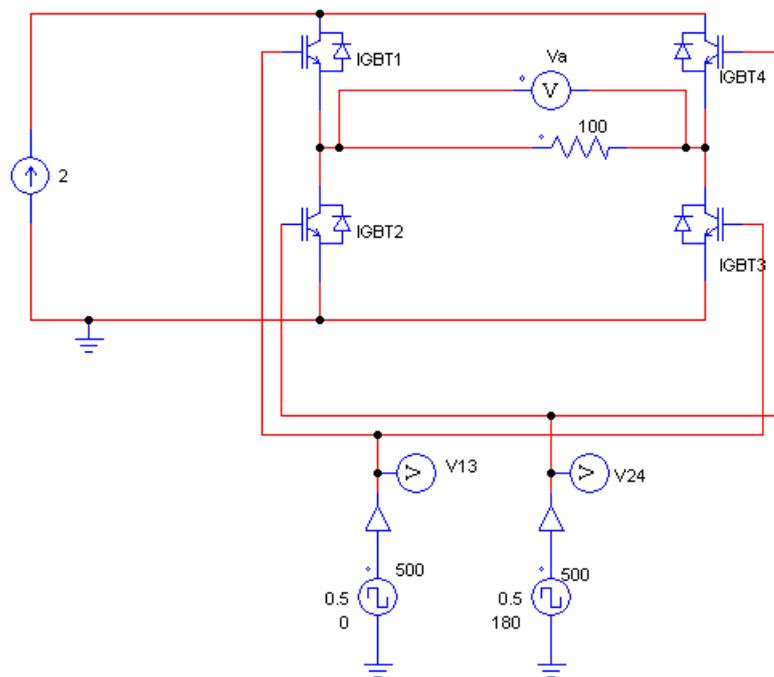


Figure 5.2 : Onduleur en demi-pont à source de courant.

L'onduleur est alimenté maintenant par une source de courant de 2 Ampères au lieu d'une source de tension. La source de courant présente la propriété de débiter un courant constant sans fluctuation. La source de courant est disponible dans le menu : **élément -> source -> current**.

- ✓ Lancer la simulation et visualiser la forme du signal de **tension V_a** et de **courant de la charge IR** . Discuter l'amplitude de la tension et du courant alternatif obtenus :

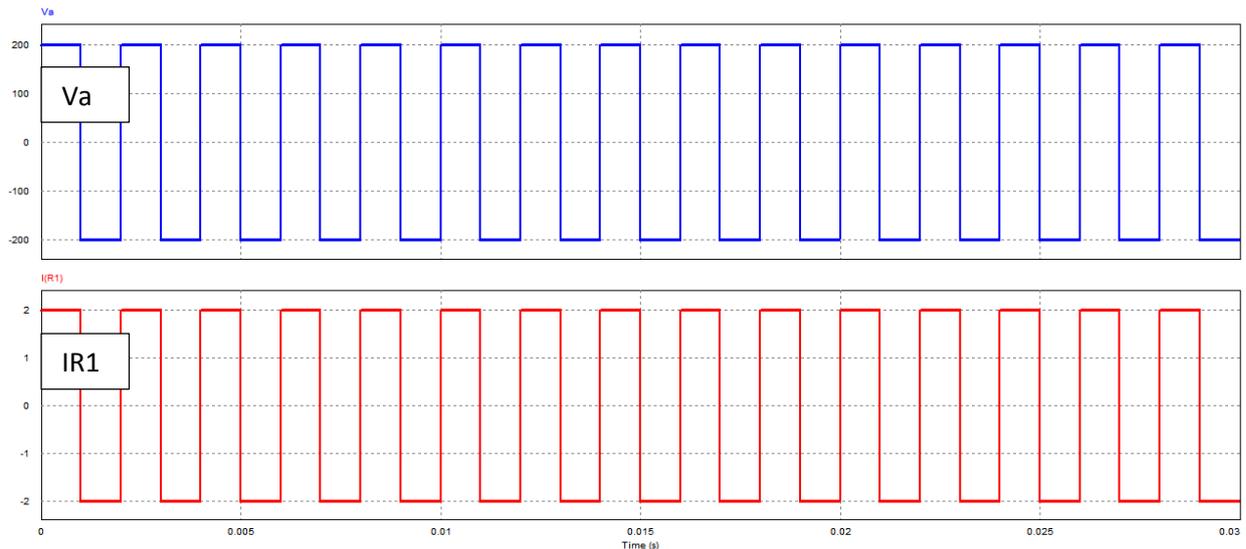


Figure réponse 5.3: Allure du signal de tension V_a et de courant de la charge IR .

On remarque que dans ce cas le courant est de forme alternatif carré, le courant ne peut subir de discontinuité avec une source de courant, nous avons donc :

De 0° - 180° : IGBT1 et IGBT3 sont passant, le courant de sortie est égale a $IR = + I$.

De 180° - 360° : IGBT2 et IGBT4 sont passant, la tension de sortie est égale a $IR = - I$.

Un autre fait important concerne la valeur de l'amplitude de la tension V_a . En effet la tension de sortie est très élevée $V_{max} = R \cdot I = 200 \text{ V}$. Cette dernière dépend donc de la charge alimentée par l'onduleur. Cela n'est pas le cas des onduleurs de tension (section 1 précédente) ou la tension de sortie est indépendante de la charge.

- ✓ Refaite la simulation pour une charge capacitive RC tel que $R = 100 \text{ Ohm}$ et $C = 10 \mu\text{F}$ puis expliquez l'allure de la courbe de tension V_a :

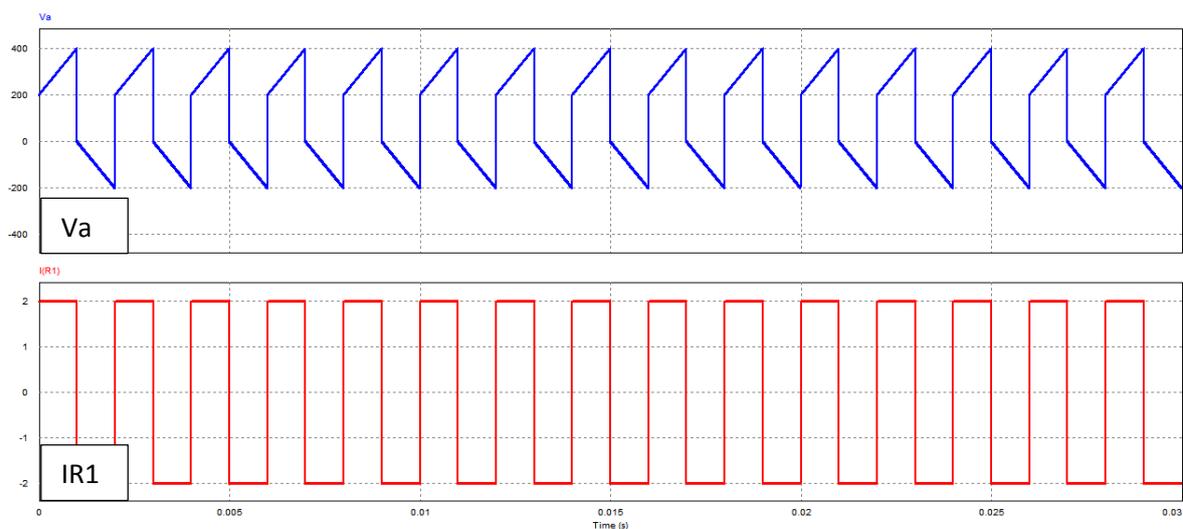


Figure réponse 5.4: Allure du signal de tension V_a et de courant de la charge IR pour une charge capacitive.

L'allure de la tension de sortie est formée par des segments de droites à pente positives et à pente négatives. Cela confirme que l'allure de la tension de sortie d'un onduleur à source de courant dépend exclusivement

de la nature de la charge. En effet, dans notre cas la charge est capacité. Ainsi la tension au borne d'une capacité est donnée par :

$$u_c = \frac{1}{C} \int i_c dt$$

Puisque la tension aux bornes de la capacité est une intégrale du courant constant (fournie par la source de courant), il en résulte que la tension est une droite de pente positive ou négative selon le signe du courant.

Travaux Pratiques n°06 : Gradateur monophasé (Charge R, L).

But du TP : Simuler et comprendre le fonctionnement du gradateur en monophasé sur charge purement résistive et sur charge inductif.

6.1. Gradateur sur charge résistive :

Le gradateur est constitué deux thyristors montés en tête bêche, Figure 01. Câbler le schéma suivant puis introduire les angles de commande des thyristors. Ces derniers sont commandés par le générateur de signaux **Gating block** disponible dans le menu :

Element -> power -> switch -> **Gating block**.

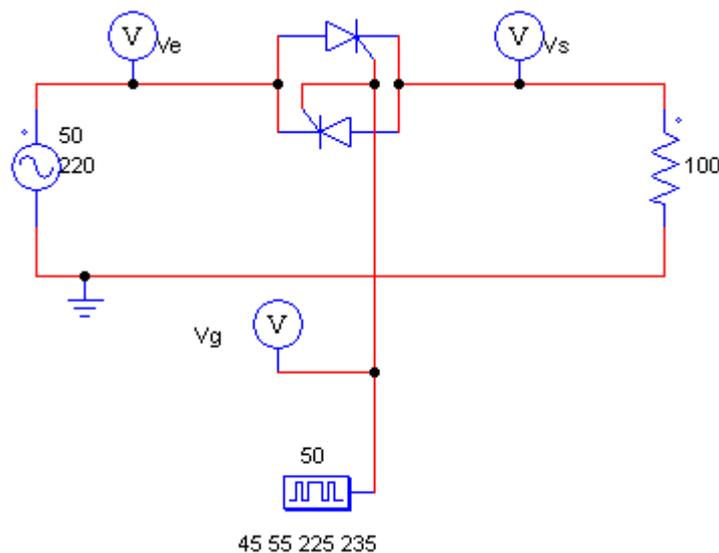


Figure 6.1 : Gradateur en monophasé sur charge résistive.

Le Gating block permet de générer plusieurs impulsions de commande. Il suffit d'introduire dans le Gating block les angles d'intervalle de commutations. Par exemple, si on désire générer des impulsions de commande avec une largeur d'impulsion de 10° et dont l'angle de retard à l'amorçage est de 45° pour chaque alternance, on doit introduire les points suivants :

45 55 225 235.

- ✓ Lancer la simulation avec un temps total $t = 0.06$.
- ✓ Visualiser la forme des signaux de commande V_g .
- ✓ Visualiser la forme du signal des tensions V_e , V_s et de courant de la charge IR puis remplir le tableau ci-dessous :

Angle de retard à l'amorçage	45°	90°	135°
V_s efficace (V)			
IR efficace (A)			
Puissance S_{charge} (VA)			

- ✓ Discuter l'allure et les amplitudes et expliquer l'utilité de ce montage :

.....

.....

.....

.....

6.2. Gradateur sur charge RL :

Refaites la simulation du montage de gradateur de la Figure 01 précédente avec une charge inductive RL, $R = 100 \text{ Ohm}$ et $L = 100 \text{ mH}$.

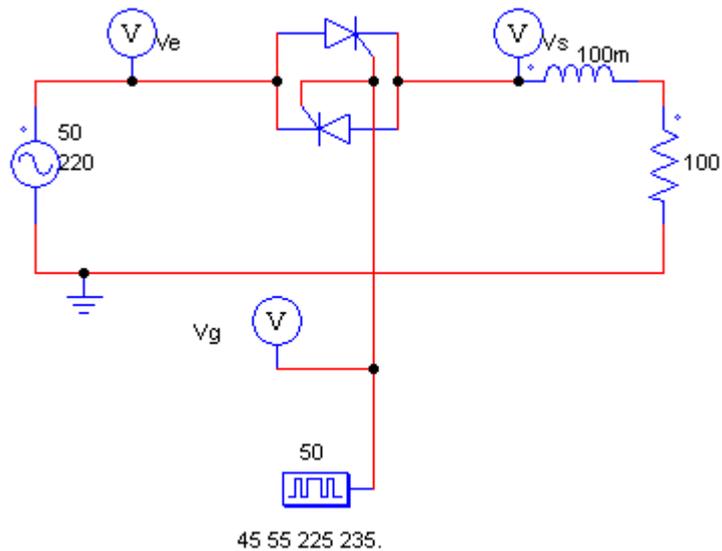


Figure 6.2 : Gradateur en monophasé sur charge RL.

- ✓ Visualiser la forme du signal des tensions V_e , V_s et de courant de la charge IR que constater vous ?

.....

.....

.....

.....

.....

Solution TP n°06 : Gradateur monophasé (Charge R, L).

But du TP : Simuler et comprendre le fonctionnement du gradateur en monophasé sur charge purement résistive et sur charge inductif.

6.1. Gradateur sur charge résistive :

Le gradateur est constitué deux thyristors montés en tête bêche, Figure 01. Câbler le schéma suivant puis introduire les angles de commande des thyristors. Ces derniers sont commandés par le générateur de signaux **Gating block** disponible dans le menu :

Element -> power -> switch -> **Gating block**.

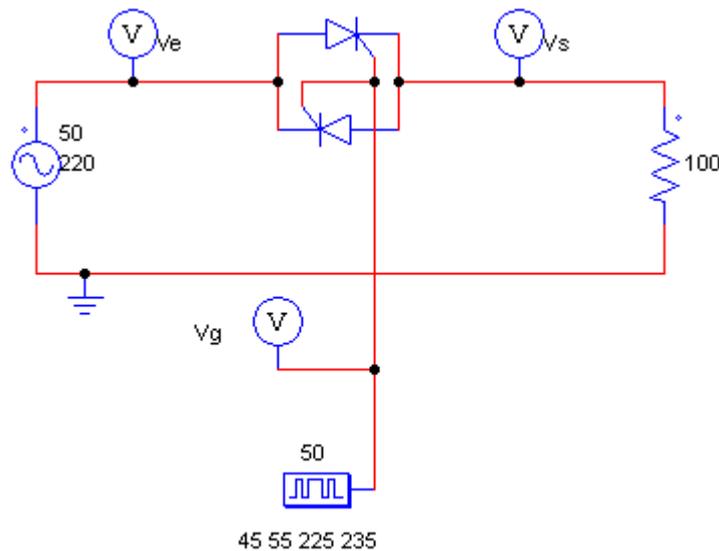


Figure 6.1 : Gradateur en monophasé sur charge résistive.

Le Gating block permet de générer plusieurs impulsions de commande. Il suffit d'introduire dans le Gating block les angles d'intervalle de commutations. Par exemple, si on désire générer des impulsions de commande avec une largeur d'impulsion de 10° et dont l'angle de retard à l'amorçage est de 45° pour chaque alternance, on doit introduire les points suivants :

- ✓ Lancer la simulation avec un temps total $t = 0.06$.
- ✓ Visualiser la forme des signaux de commande V_g .
- ✓ Visualiser la forme du signal des tensions V_e , V_s et de courant de la charge I_R puis remplir le tableau ci-dessous :

Angle de retard à l'amorçage	45°	90°	135°
V_s efficace (V)	148.2	109.8	46.7
I_R efficace (A)	1.48	1.09	0.46
Puissance S_{charge} (VA)	219	118	21

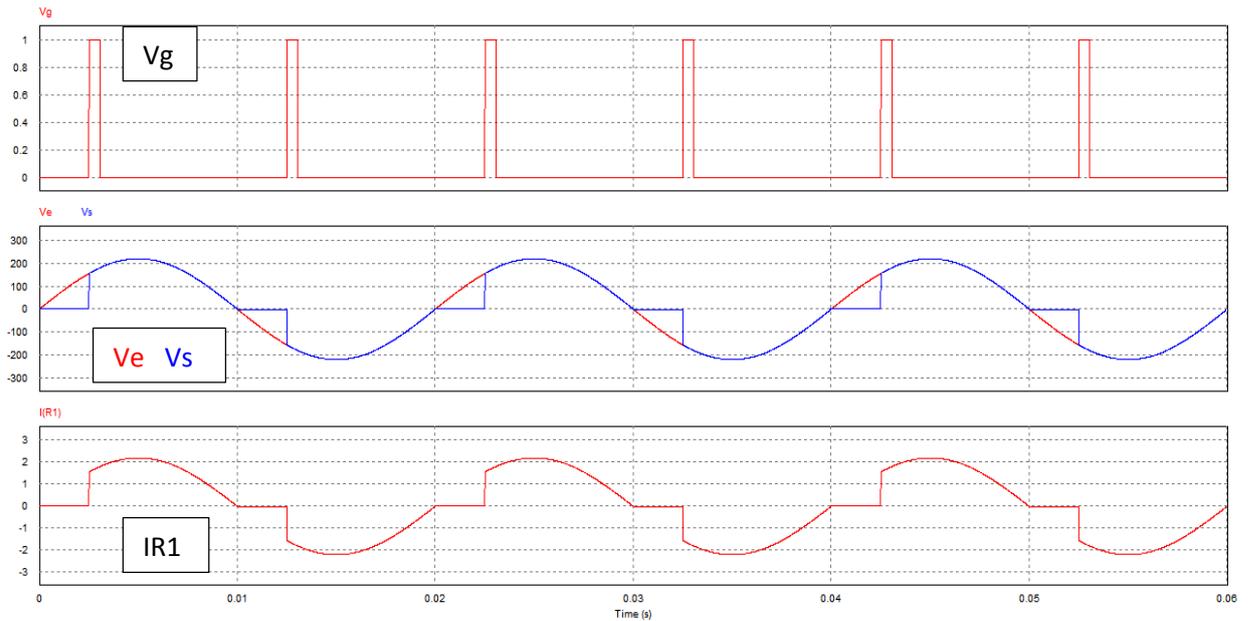


Figure réponse 6.1: Allure des signaux de commande V_g , du signal des tensions V_e , V_s et de courant de la charge I_R .

✓ Discuter l'allure et les amplitudes et expliquer l'utilité de ce montage :

On remarque que des que les thyristors reçoivent une impulsion à la gâchette, ils s'amorcent et ne se bloquent que lorsque la tension du réseau devient négative et le courant I_R devient nul. On remarque aussi les valeurs efficaces de courant et de la tension de sortie dépendent de la valeur de l'angle de retard à l'amorçage. Par conséquent la puissance S absorbée par la charge peut être ainsi modulée en agissant simplement sur la commande du gradateur.

6.2. Gradateur sur charge RL :

Refaites la simulation du montage de gradateur de la Figure 01 précédente avec une charge inductive RL, $R = 100 \text{ Ohm}$ et $L = 100 \text{ mH}$.

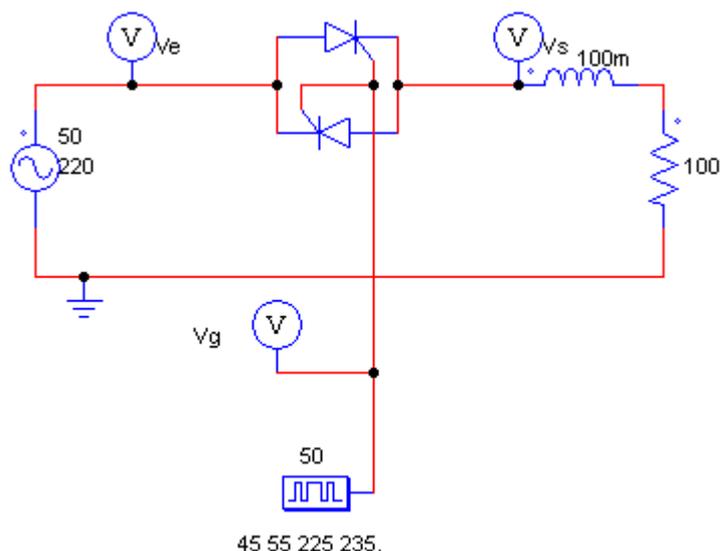


Figure 6.2 : Gradateur en monophasé sur charge RL.

- ✓ Visualiser la forme du signal des tensions V_e , V_s et de courant de la charge IR que constater vous ?

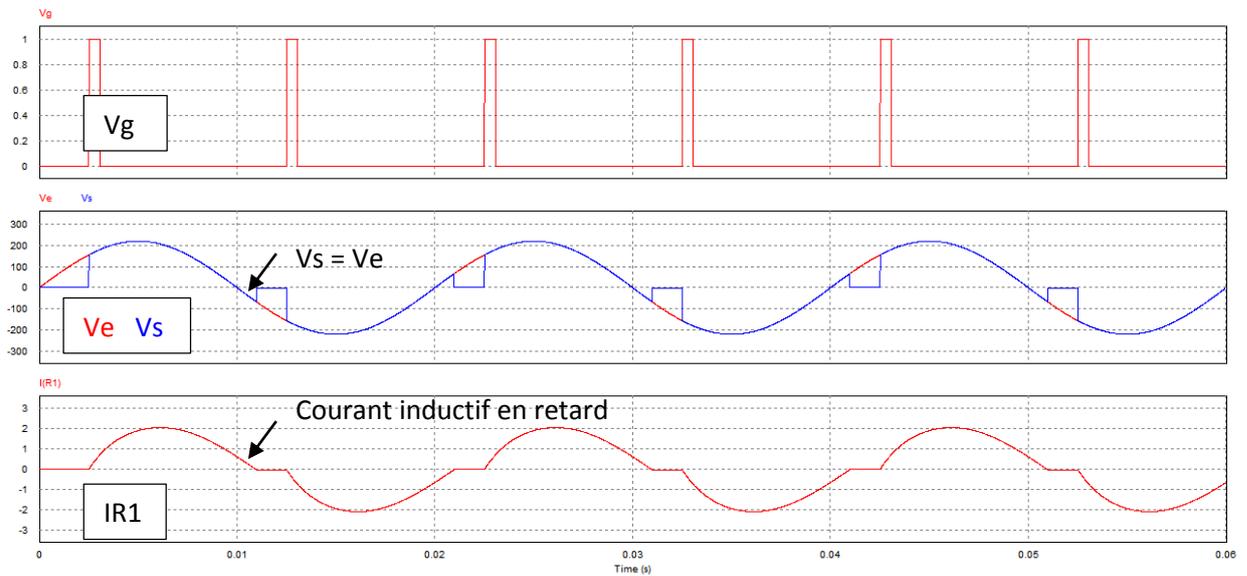


Figure réponse 6.2: Allure des signaux de commande V_g , du signal des tensions V_e , V_s et de courant de la charge IR pour le cas d'une charge RL.

On constate que le thyristor reste toujours à l'état « passant » lorsque la tension du réseau s'annule et change de signe. Cela est dû au courant inductif qui force le thyristor à conduire lorsque la tension du réseau V_s est négative, ainsi, la tension de sortie est égale à la tension V_s . En effet, le courant inductif est toujours en retard par rapport à la tension V_s . Le thyristor se bloque dès que ce courant devient nul. Quoique le signal de courant semble amélioré par l'inductance, le signal de tension est de plus en plus déformé. On peut dire que le gradateur convient très bien au transfert de puissance pour une charge résistive pure.

Travaux Pratiques n°07 : Gradateur Triphasé.

But du TP : Simuler et comprendre le fonctionnement du gradateur en triphasé et la commutation des thyristors.

7.1. Gradateur sur charge résistive :

Le gradateur en triphasé est constitué deux thyristors montés en tête bêche sur chaque segment de phase Figure 01.

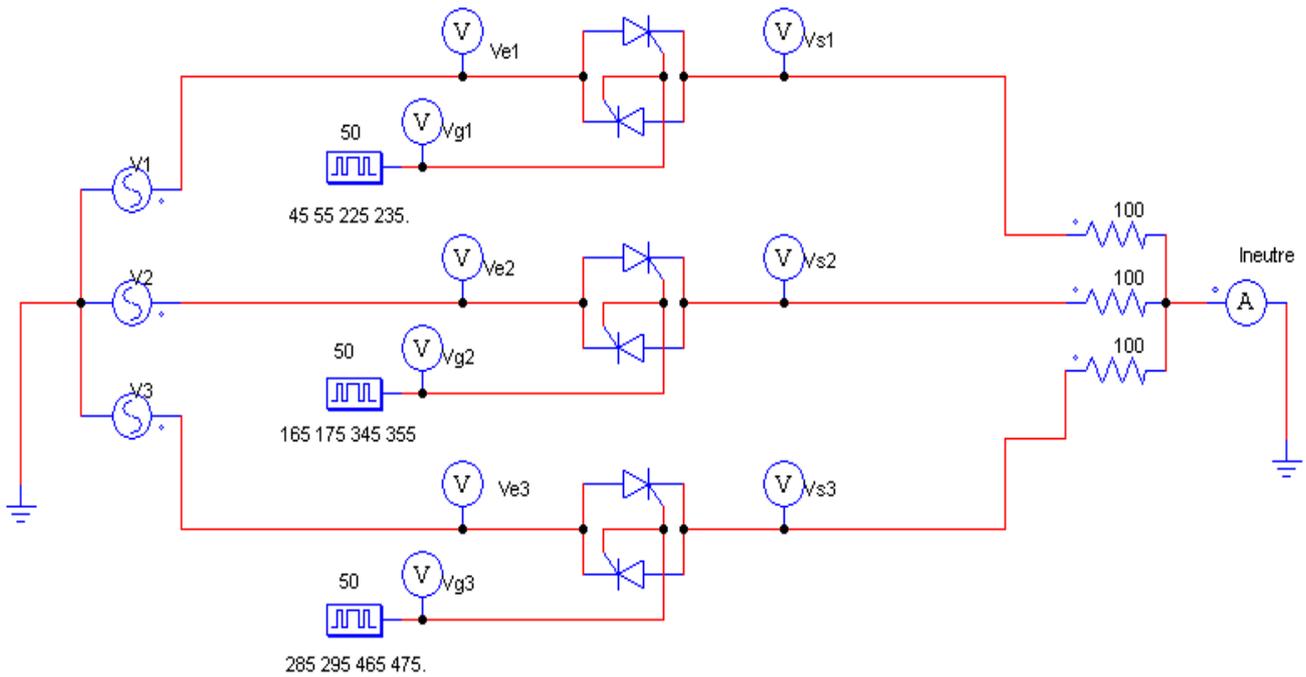


Figure 7.1 : Gradateur en triphasé sur charge résistive.

Tracer un système triphasé équilibré en directe et une charge résistive montées tous les deux en étoile.

- ✓ On désire des impulsions de commande avec une largeur d'impulsion de 10° et dont l'angle de retard à l'amorçage est de 45° pour chaque alternance et pour chaque phase. Calculer les angles d'intervalle de commutation et remplissez le tableau suivant :

Point de commutation	N°1	N°2	N°3	N°4
Phase 1				
Phase 2				
Phase 3				

- ✓ Lancer la simulation avec un temps total $t = 0.06$.
- ✓ Visualiser la forme des signaux de commande $Vg1, Vg2, Vg3$.
- ✓ Visualiser la forme du signal des tensions Ve, Vs et de courant de la charge IR pour chaque phase puis commenter :

.....

.....
.....
.....

- ✓ Visualiser le courant du neutre **Ineutre** du coté charge, que constater vous ?

.....
.....
.....
.....

- ✓ Sachant que les courants du neutre sont généralement négligeables dans les systèmes triphasé sinusoïdaux équilibrés, quel conséquence peut avoir l'utilisation d'un gradateur triphasé sur ce dernier.....

.....
.....
.....

- ✓ Que doivent on faire dans ce cas :

.....
.....
.....
.....

Solution TP n°07 :

Gradateur Triphasé.

But du TP : Simuler et comprendre le fonctionnement du gradateur en triphasé et la commutation des thyristors.

7.1. Gradateur sur charge résistive :

Le gradateur en triphasé est constitué deux thyristors montés en tête bêche sur chaque segment de phase Figure 01.

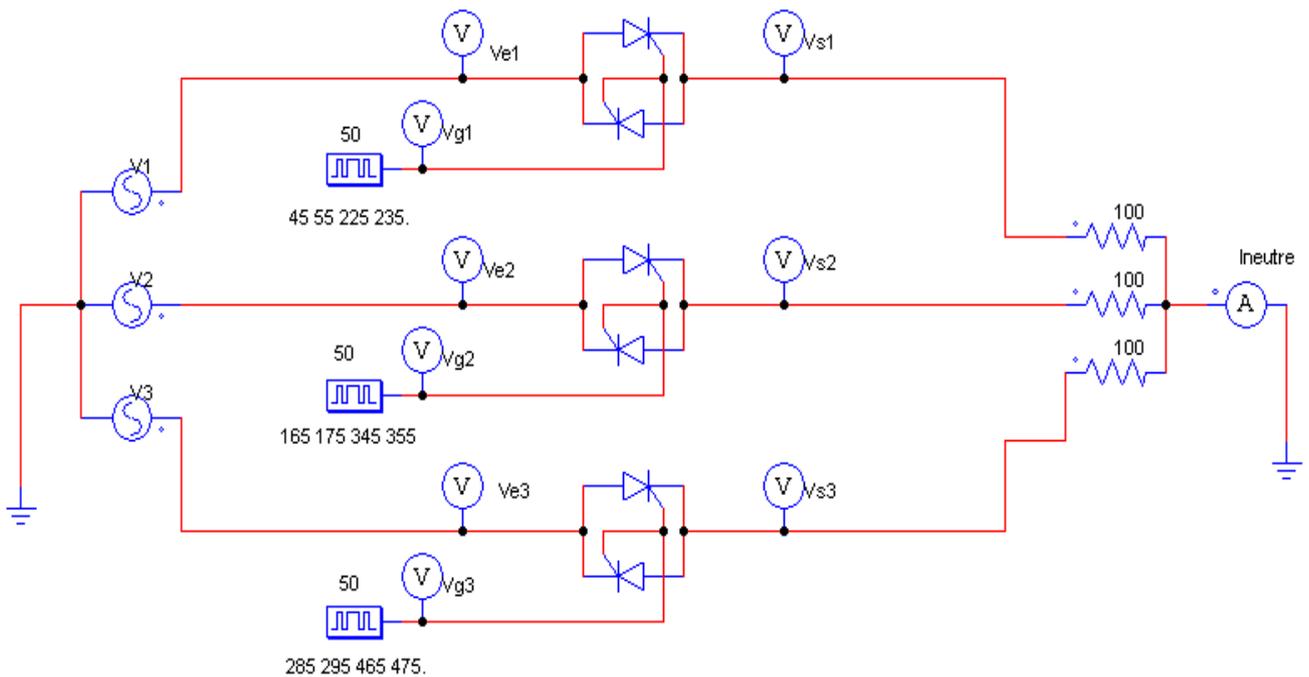


Figure 7.1 : Gradateur en triphasé sur charge résistive.

Tracer un système triphasé équilibré en directe et une charge résistive montées tous les deux en étoile.

- ✓ On désire des impulsions de commande avec une largeur d'impulsion de 10° et dont l'angle de retard à l'amorçage est de 45° pour chaque alternance et pour chaque phase. Calculer les angles d'intervalle de commutation et remplissez le tableau suivant :

Point de commutation	N°1	N°2	N°3	N°4
Phase 1	45°	55°	225°	235°
Phase 2	165°	175°	345°	355°
Phase 3	285°	295°	465°	475°

- ✓ Lancer la simulation avec un temps total $t = 0.06$.
- ✓ Visualiser la forme des signaux de commande $Vg1$, $Vg2$, $Vg3$.

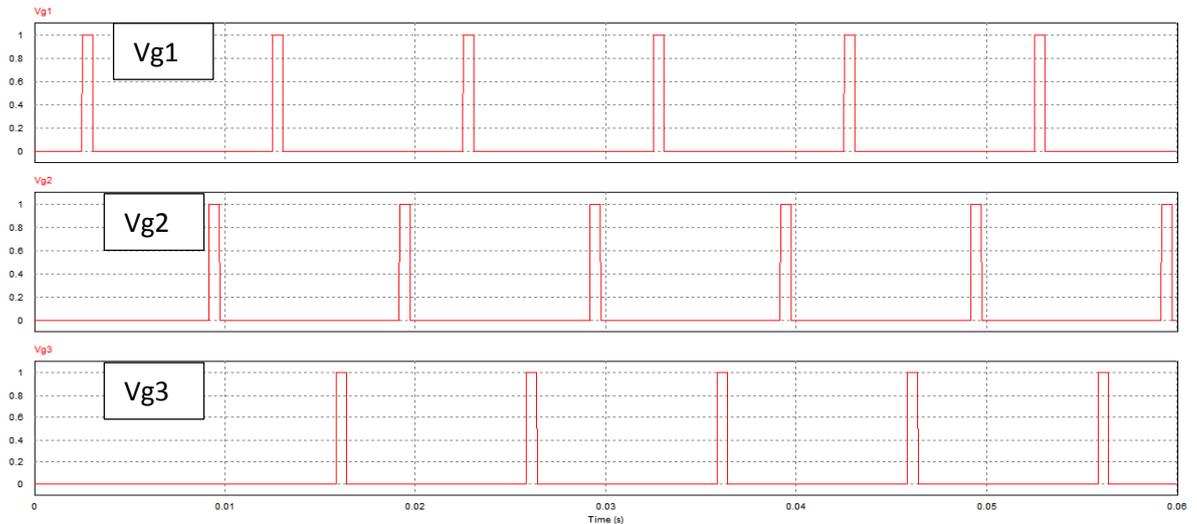


Figure réponse 7.1: Allure des signaux de commande.

- ✓ Visualiser la forme du signal des tensions V_e , V_s et de courant de la charge I_R pour chaque phase puis commenter :

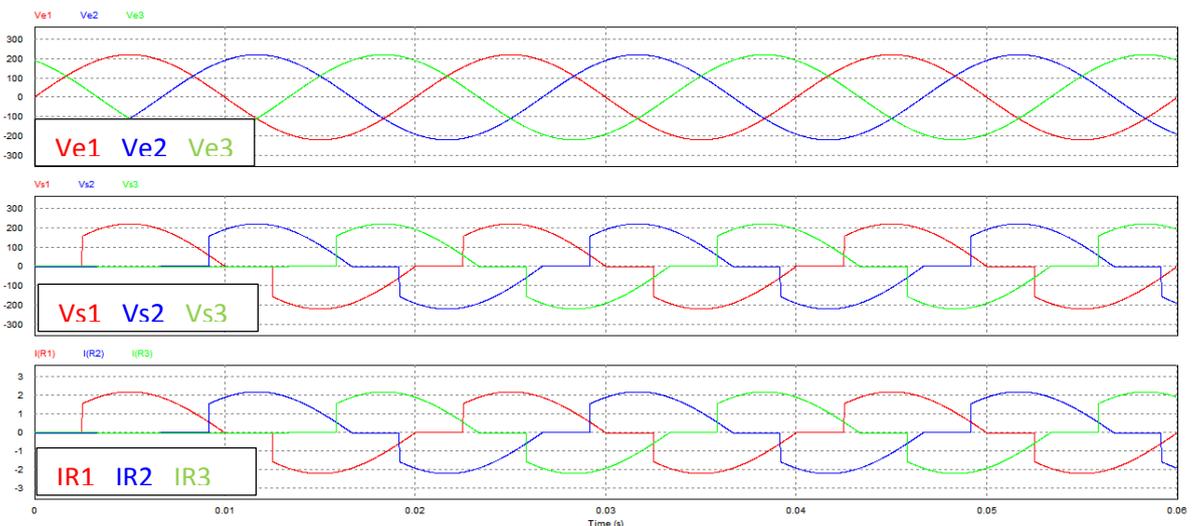


Figure réponse 7.2: Allure des signaux V_e , V_s et I_R .

On remarque que la tension de sortie du gradateur possède la même forme que celle obtenu avec le gradateur triphasé en monophasé du TP n°01 avec un déphasage de 120° entre phase comme seule différence. Les courants possèdent la même allure que les tensions car la charge est purement résistives. La puissance transmise à la charge triphasée peut être ainsi modulé par la commande.

- ✓ Visualiser le courant du neutre I_{neutre} du coté charge, que constater vous ?
On constate que ce courant qui est généralement négligeable n'est pas nul. En effet il possède même une amplitude très élevée de l'ordre des courants de phase. Cela est dû à la déformation des courants de phase, ces derniers n'étant plus sinusoïdaux ils s'ajoutent au neutre pour donner une composante non nulle à fréquence élevée.

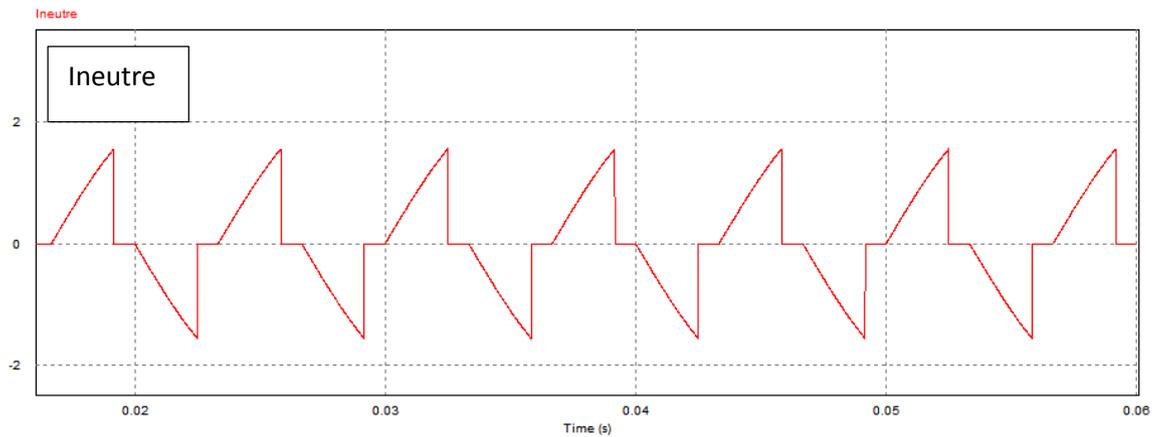


Figure réponse 7.3: Allure du courant du neutre Ineutre.

- ✓ Sachant que les courants du neutre sont généralement négligeables dans les systèmes triphasé sinusoïdaux équilibrés, quel conséquence peut avoir l'utilisation d'un gradateur triphasé sur ce dernier :
La conséquence que peut avoir le transit d'un courant élevé au neutre est la surchauffe du câble du neutre. Cela peut entraîner un défaut et l'interruption du bouclage du réseau.
- ✓ Que doit-on faire dans ce cas :
La solution consiste à redimensionner le câble du neutre dans les installations utilisant un gradateur triphasé en tenant en compte de l'amplitude du courant du neutre déformé

Remerciements

Ce modeste travail représente pour moi l'aboutissement d'un parcours – un parcours de plusieurs années d'enseignements et de recherches et qui aurait été bien plus difficile si je n'avais pas bénéficié de l'aide de nombreux guides efficaces et bienveillants que je tiens à remercier dans ces lignes.

Merci infiniment à ma famille, mes encadreurs, mes amis, mes collègues et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce cheminement. Merci !.

Références

- [1] L. LASNE, électronique de puissance Cours, études de cas et exercices corrigés, Paris: Dunod, 2015.
- [2] G SÉGUIER, P DELARUE, F LABRIQUE, Électronique de puissance structure fonction de base principales application, Paris: Dunod, 2011.
- [3] G SÉGUIER, P DELARUE, F LABRIQUE, Électronique de puissance - Structures, commandes, applications, Paris: Dunod, 2015
- [4] L. LASNE, électrotechnique cours et exercices corrigés, Paris: Dunod, 2008
- [5] L. LASNE, électrotechnique et énergie électrique, Paris: Dunod, 2014
- [6] T. WILDI, G. SYBILE, ÉLECTROTECHNIQUE, DEBOEK université 3e édition, 2000
- [7] SITE INTERNET PSIM: <https://powersimtech.com/products/psim/psim-pricing-and-licensing/download-demo/>