

République Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique**



CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL-OUED

INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences technique

Spécialité : génie électrique

Option : réseaux électriques

Thème

**Modélisation et simulation d'un
onduleur triphasé alimentant une
charge inductive**

Présenté par:

ALALEI HAMZA
BEHER YACIEN
AMOURI ZAKARIA

Encadreur:

Mr. CHENNOUFI HAKIM

Année universitaire:
2010/2011

Remerciements

*Je suis particulièrement sensible à l'honneur que m'a fait
Chennoufi Hakim au département d'Electrotechnique de
l'université d'El- Oued, d'accepter d'être rapporteur de ce
mémoire et pour la confiance et le suivi qu'il m'a témoigné tout au
long de la réalisation de ce travail.*

*A cette occasion, je témoigne ma reconnaissance à toute
personne m'ayant aidé de près ou de loin à l'élaboration de ce
travail.*

*Enfin, un remerciement particulier à mes parents et à mes
frères et sœurs.*

Dédicace

A mon cher père qui m'a appris que la vie est volonté est défi.

A ma chère mère, l'exemple de la bougie qui éclaire ma vie.

Je leur dédie ce modeste travail et j'espère que dieu les garde.

A mes chères amies intimes.

Je dédie cette démarche à mes oncles et mes tantes.

A mes grands-parents.

A mes frangins et mes frangines.

A toute la famille

A celui qui partage avec moi ce travail.

*Je dédie ce travail à ceux qui nous ont guidés pendant notre cursus à
mes enseignements; je les remercie pour leur aide*

*Encouragement et leur contribution efficace à la réalisation de ce
travail*

A tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à la réalisation

De ce modeste travail.

Sommaire

INTRODUCTION GENERAL

CHAPITRE I: Principe de fonctionnement

1. Introduction	4
1-1. Onduleur de courant	4
1-2. Onduleur de tension	4
2. Principe de fonctionnement	7
3. Onduleur monophasé	9
4. Montages pratiques: Deux types sont utilisés.....	9
5. Montage en pont	9
6. Onduleur triphasé en pont	10
7. Principe de fonctionnement (une phase)	10
8. Classification des onduleurs	11
Onduleur autonome	11
Onduleur non autonome	11
9. Les Avantages et Les inconvénients de l'onduleur triphasé	11
10. Conclusion	12

CHAPITRE II: Modélisation de l'onduleur triphasé

1. Modélisation de l'onduleur triphasé	14
2. Les tensions composées	15
3. Les tensions simples	15
4. Origine des harmoniques	15
Déformation d'un signal sinusoïdal	15
Mode de représentation: le spectre en fréquence	16
L'harmonique mesuré en pratique	16
Paramètre de performance de l'onduleur	17
Facteur de la niem harmonique HF_n	17
Distorsion d'harmonique total THD et le facteur DF	17
Le THD en tension caractérise la déformation de l'onde de tension	19
Le THD en courant caractérise la déformation de l'onde de courant	19
5. Conclusion	19

CHAPITRE III: Simulation de l'onduleur triphasé

1. Introduction	21
1.1. Modélisation de l'onduleur de tension triphasé.....	21
1.2. Valeur théoriques des tensions composées	21
1.3. Simulation de l'onduleur de tension triphasé	22
2. Simulation du système onduleur-charge	25
2.1 Modélisation de la charge	26
2.1.1 Création Bloc de simulation	26
3. Régulateur par hystérésis	28
3.1 Résultats de simulation	29
3.1.1 Les courants de consignes	29
3.1.2 Les courants réels	31
3. Conclusion	34

CONCLUSION GENERAL.

Liste de figures

Chapitre I : Principe de fonctionnement

Figure I-1 : source de tension	4
Figure I-2 : le réseau redressé	5
Figure I-3 : une batterie d'accumulateurs	5
Figure I-4 : récepteur triphasé	5
Figure I-5 : inductances série à ses bornes d'accès	6
Figure I-6a : interrupteurs semi-conducteur	6
Figure I-6b : interrupteurs semi-conducteur	6
Figure I-7 : Symbole et signal d'un onduleur	7
Figure I-8 : Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 1er demis cycle	7
Figure I-9 : Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 2ème demis cycle	8
Figure I-10 : Signal complet de l'onduleur	8
Figure I-11 : Montage d'un onduleur monophasé	9
Figure I-12 : Montage d'un onduleur en demi -pont	9
Figure I-13 : Montage d'un onduleur en pont complet	10
Figure I-14 : Montage d'un onduleur triphasé	10
Figure I-15 : Allure des tensions simples de l'onduleur triphasé	11

Chapitre II : Modélisation de l'onduleur triphasé

Figure II-1 : Circuit de fonctionnement de l'onduleur triphasé	14
Figure II-2 : Spectre d'un signal	16

Chapitre III : simulation de l'onduleur

Figure 1 : Bloc de simulation	22
Figure 2 : Tension simple U1	22
Figure 3 : Tension simple U2	23
Figure 4 : Tension simple U3	23
Figure 5 : Tension composée U12	24
Figure 6 : Tension composée U23	24
Figure 7 : Tensions composées U12 et U23	25
Figure 8 : Bloc de simulation	26
Figure 9 : Courant I1, I2 et I3	27
Figure 10 : Tension V1, V2 et V3	27

Figure 11 : Bloc de simulation	29
Figure 12 : Courant I_1 référence	30
Figure 13 : Courant I_2 référence	30
Figure 14 : Courant I_3 référence	31
Figure 15 : Courant réel I_{1mes}	32
Figure 16 : Courant réel I_{2mes}	32
Figure 17 : Courant réel I_{3mes}	33
Figure 18 : Courants I_1 , I_2 et I_3 mesure	33

Référence

- [01] Mr. BOUZID Allal El Moubarek ,Onduleur triphasé Commandé par la Stratégie d'Élimination d'Harmonique« SHE», Magister Analyse et commande de machines électrique, Département de Génie Electrique, École Normale Supérieurs d'Enseignement Technique ORAN.
- [02] DJENHANI Nour-eddine et BOUDJELKHA M. Laid, M.L.I Vectorielle Mémoire d'égérie d' état, Département de l'électrotechnique, Centre de université el oued.
- [03] ZELLOMA. Laid, Filtrage actif parallèle du courant généré par un pont redresseur triphasé non commandé, Mémoire de Magister, Département de l'électrotechnique, Université de Annaba 2006.
- [04] Application Note , An Introduction to Space Vector Modulation using NEC's 8-bit Motorcontrol Microcontrollers, Document No. U16699EE1V1AN00, Date Published ay 2004 .
- [05] GUERFI Youcef, ZAAMOUCHE Fares, Amélioration de l'alimentation du moteur asynchrone par l'utilisation de l'onduleur MLI, Département de l'électromécanique, Université é de Annaba, juin 2006.
- [06] BOUDACHE Addelkrim, GAGOUL Fayçal, Etude par simulation d'un filtre actif parallèles, Département électrotechnique, Université M'SILA, 2006.
- [07] DEHEB Abdelghani, RECHDANE Abdelkader, REHOUMA Messaoud, Amélioration de l'alimentation du moteur asynchrone par l'utilisation de l'onduleur MLI, département él ectrotechnique, Université d'EL-OUED, juin 2008.
- [08] cours Les onduleur: <http://sites-test.uclouvain.be/e-lee/FR/realisations/ElectroniquePuissance/Onduleurs/Onduleurs.htm#OnduleursCourant>

Résumé

En ce projet de fin d'étude, notre travail est réparti en trois chapitres.

Dans le premier chapitre, nous avons fait un tour d'horizon sur les différents types d'onduleurs, ainsi que le principe de fonctionnement des onduleurs monophasés et triphasés.

Le deuxième chapitre est consacré au modèle mathématique du l'onduleur triphasé où nous avons rappelé les paramètres ayant une influence directe sur la qualité de l'énergie fournie par l'onduleur.

Dans le troisième chapitre, nous avons rassemblé et commenté les résultats de simulation, réalisées dans l'environnement SIMULINK du logiciel MATLAB.

Nous terminons l'étude par une conclusion général.

ملخص

في مشرونا هذا لنهاية الدراسة، قسمنا عملنا إلى ثلاثة فصول .

في الفصل الأول، قمنا بعرض مختلف أنواع المموج "l'onduleur" ، من حيث مبدأ

العمل المموج أحادي الطور وثلاثي الطور.

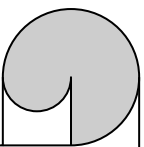
وخصصنا في الفصل الثاني النماذج الرياضية للمموج ثلاثي الطور وتطرقنا لخصائص

التي لديها تأثير مباشر بنوعية الطاقة المقدمة من قبل المموج.

في الفصل الثالث، قمنا بتجمعي والتحليل نتائج محاكاة المموج، التي أجريت بمجال

SIMULINK الموجد في برنامج MATLAB.

وقد انهينا الدراسة باستنتاج عام للمموج.



Introduction Général

Dans le cadre de notre projet de fin d'étude , nous allons effectué une étude d'un onduleur triphasé de tension.

Tout d'abord notre objectif vise à dégager les notions fondamentales des onduleur, puis on a essayé de développer une étude ayant accès directe sur l'onduleur de tension ce que à conduit à l'établissement du model mathématique.

Le model mathématique met en ouvre permet, par le moyen du logiciel Simulink de MATLAB de réaliser des simulations prévisionnelles en tension et courant.

1. Introduction

Types par sources d'alimentations:

Les onduleurs autonomes sont des convertisseurs destinés à alimenter des récepteurs à courant alternatif à partir d'une source continue.

Ils sont généralement monophasés ou triphasés.

Suivant les applications, ils peuvent :

soit fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixe : c'est le cas en particulier des alimentations de sécurité destinées à se substituer au réseau en cas de défaillance de celui-ci.

soit fournir des tensions ou courants alternatifs de fréquence et amplitude variables : c'est le cas des onduleurs servant à alimenter des moteurs à courant alternatif (synchrones ou asynchrones) devant tourner à vitesse variable.

On distingue deux grandes familles d'onduleurs autonomes :

1. les onduleurs de courant
2. les onduleurs de tension

1-1. Onduleur de courant

Ce type est utilisé pour les moteurs à faible puissance où la source de l'entrée possède une impédance assez grande pour que le courant ne soit pas affecté par la variation de la tension U .

1-2. Onduleurs de tension

Un onduleur de tension est alimenté par un générateur à courant continu du type source de tension.

Idéalement, la tension à son entrée a une valeur constante U qui est indépendante du courant i que l'onduleur absorbe (figure I-1).

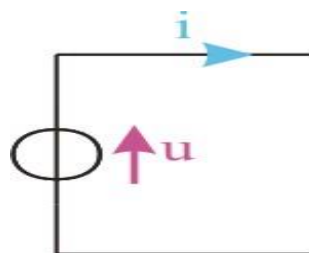


Figure I-1 : source de tension.

En pratique, le caractère de "source de tension" du générateur est obtenu en plaçant en parallèle avec ses bornes d'accès un condensateur C de forte valeur ou un filtre L-C.

Le générateur proprement dit est le plus souvent le réseau redressé (figure I-2) .

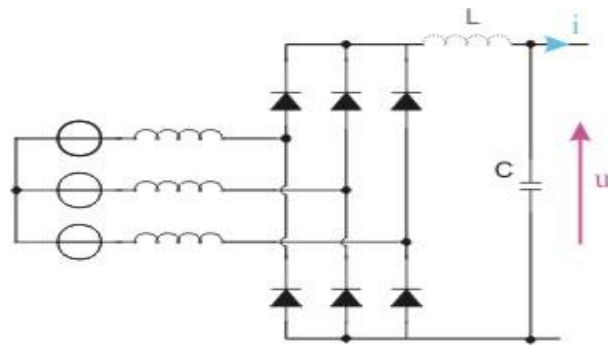


Figure I-2 : le réseau redressé.

ou une batterie d'accumulateurs (figure I-3).

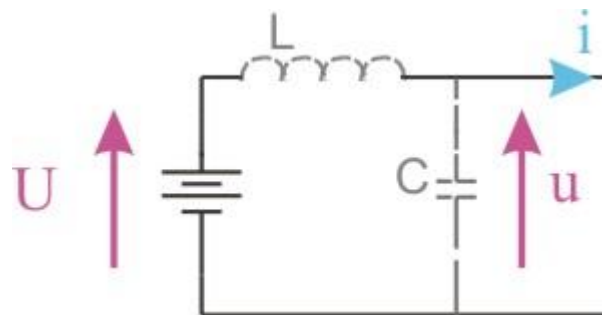


Figure I-3 une batterie d'accumulateurs.

Pour respecter la règle de l'alternance des sources, l'onduleur doit alimenter un récepteur à courant alternatif du type source de courant.

Idéalement, le courant absorbé par le récepteur est (figure I-4).
 un courant sinusoïdal (récepteur monophasé ou triphasé) .
 un système triphasé équilibré de courants sinusoïdaux si le récepteur est triphasé.

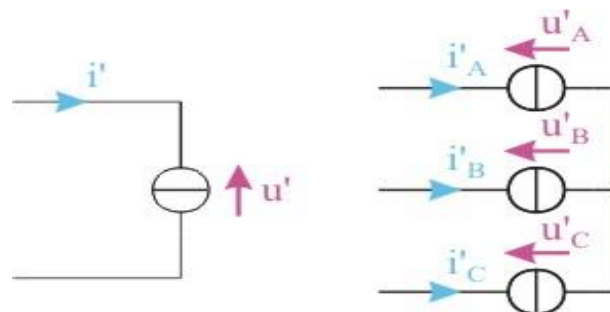


Figure I-4 : récepteur triphasé.

En pratique, le caractère de source de courant du récepteur découle de la présence d'inductances série à ses bornes d'accès (figure I-5).

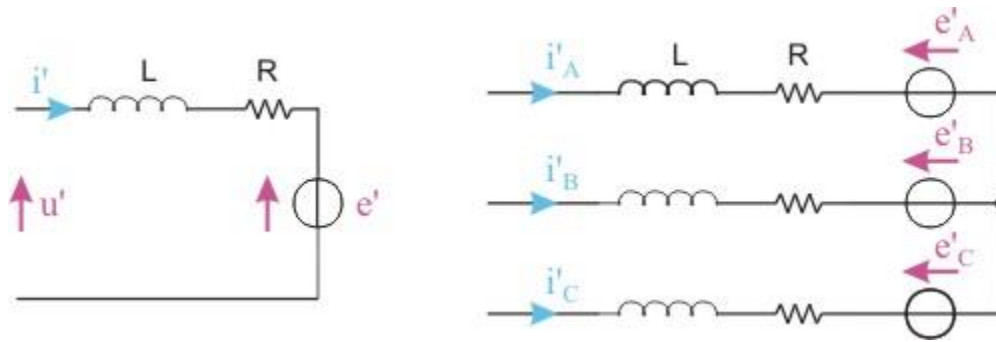


Figure I-5 : inductances série à ses bornes d'accès.

Dans les onduleurs en pont, chaque borne du récepteur est reliée au générateur par deux interrupteurs à semi-conducteurs : l'un permet de la relier à la borne + du générateur, l'autre à la borne.

Ces deux interrupteurs forment un bras d'onduleur (figure I-6).

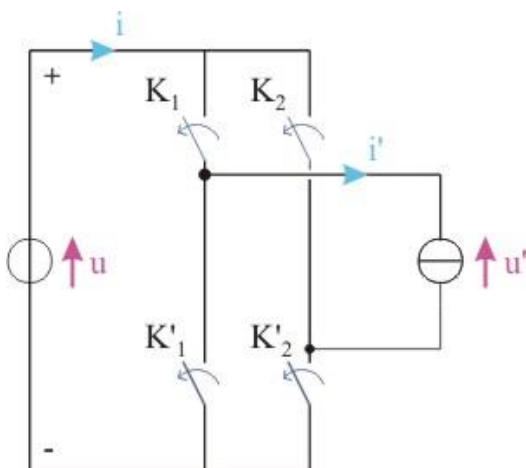


Figure I-6a : interrupteurs semi-conducteur.

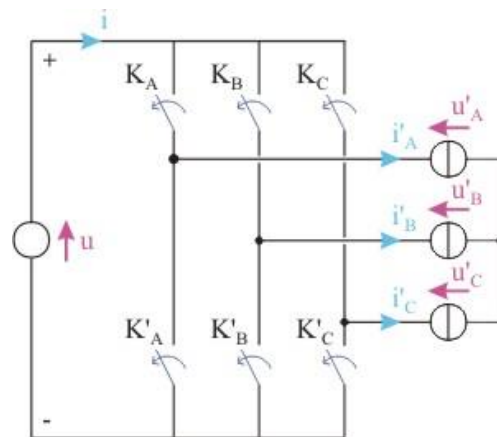


Figure I-6b : interrupteurs semi-conducteur.

En commandant l'état (ON-OFF, passant-bloquant) des interrupteurs, on peut imposer les tensions aux bornes du récepteur de manière à obtenir une ou des tensions alternatives. Le ou les courants absorbés par le récepteur découlent des tensions qui lui sont appliquées. Ces courants et la commande des interrupteurs fixent le courant absorbé au générateur.

Pour étudier les onduleurs de tension, il convient tout d'abord d'en préciser la structure en déterminant les caractéristiques exigées des interrupteurs à semi-conducteurs et la manière de les faire commuter d'un état à l'autre.

2. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un onduleur est basé sur l'électronique de commutation, on génère une onde de tension alternative à partir d'une tension continue comme le montre la figure (I-7), on peut dire qu'il existe deux moyens pour réaliser cette conversion :

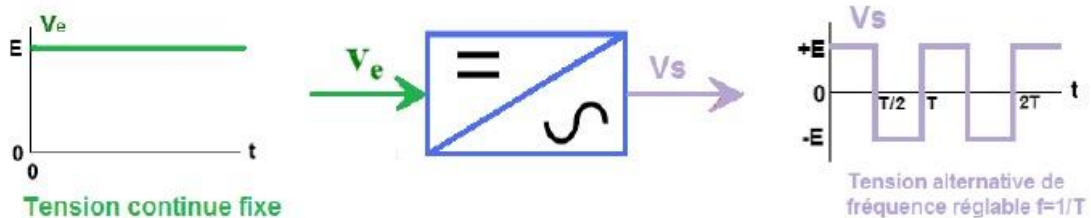


Figure (I-7) : Symbole et signal d'un onduleur.

1. L'utilisation directe d'une paire d'interrupteurs de base qui consiste à régler la fréquence et la durée des interconnexions de la source avec la sortie. Il est donc plutôt temporel et débouche sur les techniques de modulation de largeur d'impulsion.
2. Contrôler l'amplitude soit de façon continue en créant une source réglable (ce qui suppose l'existence d'un autre étage de conversion), soit de façon discrète en disposant d'un nombre suffisant de sources.

Quand $S_1 - S_2$ sont Fermé (On) et $S_3 - S_4$ sont Ouvert (Off) pour $t_1 < t < t_2$ on obtient une alternance positive $U(t) = V_{dc}$ comme la montre la figure (I-8) ci-dessous.

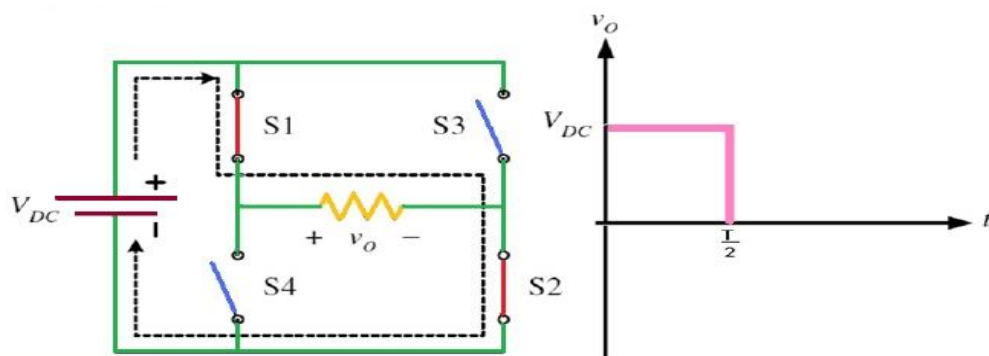


Figure (I-8) : Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 1^{er} demi cycle.

Quand $S_1 - S_2$ sont Ouvert (Off) et $S_3 - S_4$ sont Fermé (On) pour $t_2 < t < t_3$ on obtient une alternance négatif $U(t) = -V_{dc}$ comme la montre la figure (I-9):

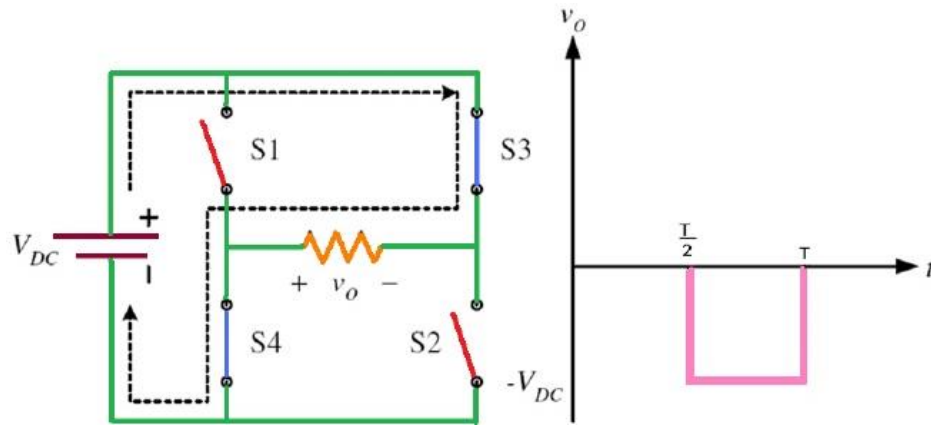


Figure (I-9) : Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 2^{ème} demis cycle.

Pour obtenir le signal résultant sur la période complète qui est présenté sur la figure (I-10).

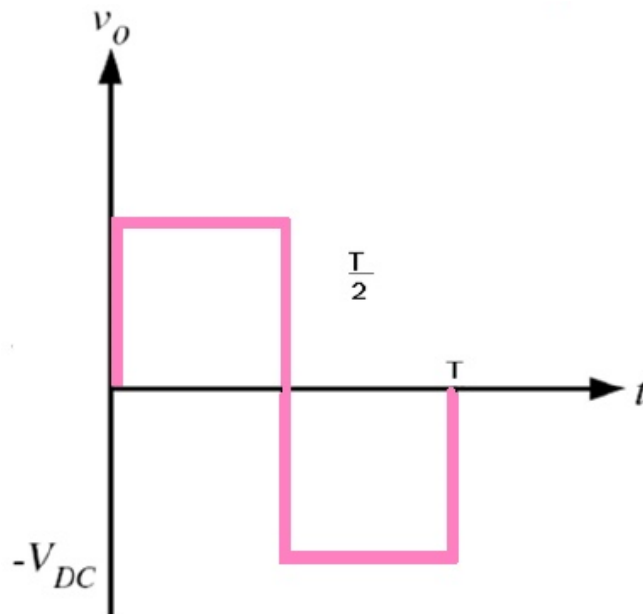


Figure (I-10) : Signal complet de l'onduleur.

3. Onduleur monophasé

Pour réaliser un onduleur monophasé il suffit de disposer d'un interrupteur inverseur K et d'une source de tension continue E comme le montre la figure (I-11).

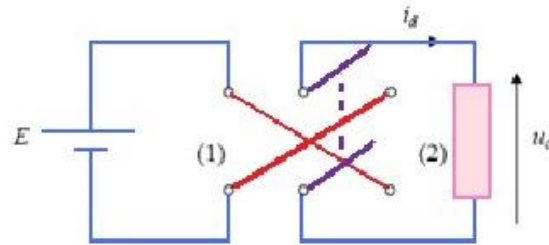


Figure (I-11) : Montage d'un onduleur monophasé.

4. Montages pratiques : Deux types de montages sont utilisés

Dans ce type de montage (figure I-12), on fait l'hypothèse que la capacité «C» des deux condensateurs est suffisamment grande pour que l'on puisse considérer qu'en régime permanent la tension à leur borne reste toujours égale à $E/2$.

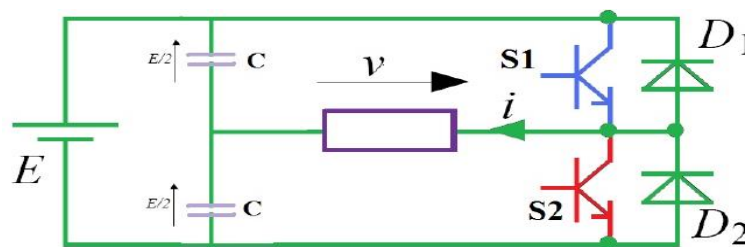


Figure (I-12) : Montage d'un onduleur en demi-pont.

5. Montage en pont

Il est constitué de deux cellules de commutation et la charge est connectée entre les sorties S_1 et S_2 de chacune des deux cellules (figure I-13). La tension de sortie est donc la différence entre les tensions élémentaires v_{s1} et v_{s2} de chaque cellule.

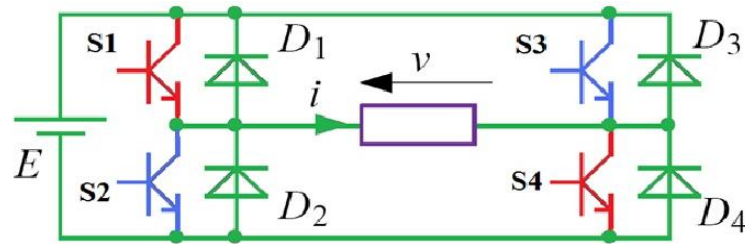


Figure (I-13) : Montage d'un onduleur en pont complet.

L'intérêt des montages en pont ou en demi -pont réside dans l'utilisation d'une seule source de tension E .

La diode parallèle est utilisée quand le courant dans le commutateur est négatif.

La diode inverse est décentrée quand le courant est positif dans le commutateur.

6. Onduleur triphasé en pont

L'onduleur triphasé en pont est constitué de trois cellules de commutation (figure I-14).

On retrouve évidemment une structure différentielle dans laquelle les tensions triphasées sont obtenues de façon composée sur les trois bornes de sortie.

L'onduleur triphasé doit évidemment, en régime normal, délivrer un système de tension dont les composantes fondamentales forment un système équilibré.

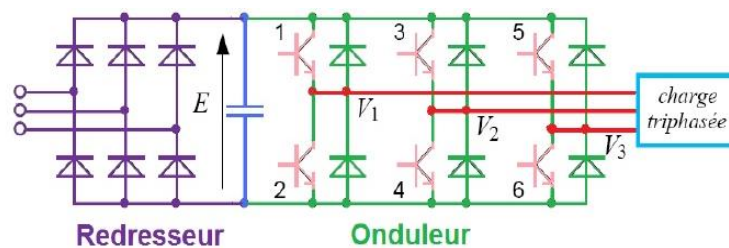


Figure (I-14) : Montage d'un onduleur triphasé.

7. Principe de fonctionnement (une phase)

Dans la configuration différentielle de l'onduleur triphasé, la cellule de commutation peut donc être considérée comme une phase de l'onduleur, la composante alternative de sa tension de sortie constituant une tension simple comme le montre la figure (I-15) ci-dessous pour chaque tension.

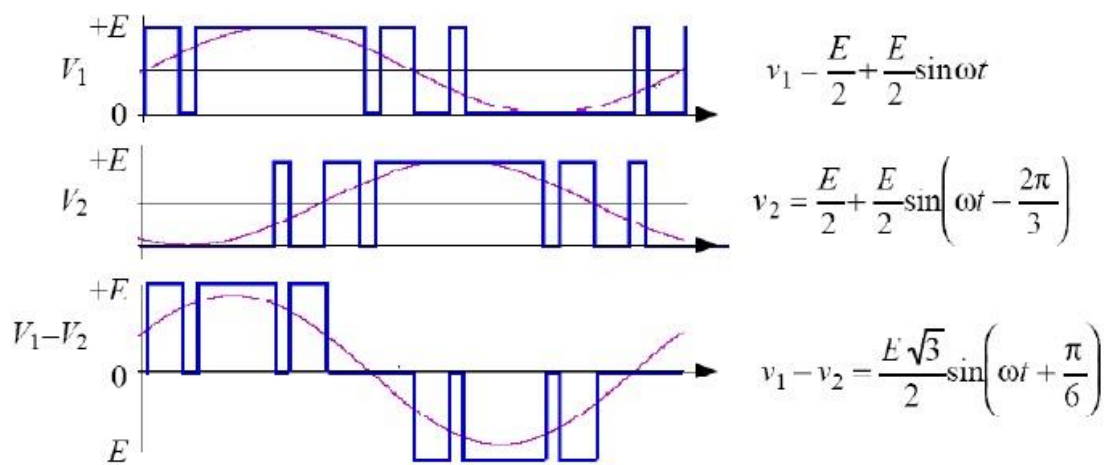


Figure (I-15) : Allure des tensions simples de l'onduleur triphasé.

8. Classification des onduleurs

Il existe plusieurs centaines de schémas d'onduleurs, chacun correspondant à un type d'application déterminé ou permettant des performances recherchées.

Les onduleurs sont en général classés selon les modes de commutation de leurs interrupteurs.

a. Onduleur autonome

C'est un système qui nécessite des composants commandés à la fois à la fermeture et à l'ouverture, de fréquence variable, dont les instants de commutations sont imposés par des circuits externes. La Charge est quelconque. Cet onduleur n'est pas réversible.

b. Onduleur non autonome

Dans ce cas, les composants utilisés peuvent être de simples thyristors commandés uniquement à la fermeture et la commutation est "naturelle" contrairement à l'onduleur autonome.

L'application principale de ce type d'onduleur se trouve dans les variateurs pour moteurs synchrones de très forte puissance où les thyristors sont souvent les seuls composants utilisables.

9. Les avantages et les inconvénients de l'onduleur triphasé

Pour alimenter un moteur triphasé, l'onduleur de tension est d'ordinaire un pont à six interrupteurs. Il est précédé d'un filtre qui corrige l'imperfection de la source qui l'alimente et qui réduit l'ondulation du courant pris à cette source.

Si on utilise des semi-conducteurs rapides, on peut fonctionner à une fréquence de commutation élevée.

L'onduleur de tension est réversible, c'est-à-dire permet le freinage par récupération du moteur. Mais cela suppose la réversibilité en courant de la source qui l'alimente. Or, un redresseur est réversible en tension et non en courant. La réversibilité amène à compliquer l'alimentation de l'onduleur dans les équipements alimentés par le réseau industriel.

L'inconvénient majeur de l'onduleur est l'obtention de la tension non sinusoïdale à sa sortie, cela provoque un échauffement excessif aux niveaux des enroulements des moteurs.

Ces tensions de sortie sont très riches en harmoniques, donc il est nécessaire de les réduire, cela est l'un des objectifs de notre travail.

10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons expliqué les notions de base des onduleurs tels que le principe de fonctionnement et les différents types des onduleurs.

Le chapitre suivant sera consacré à l'étude des différentes stratégies de commande d'un onduleur de tension triphasé.

1. Modélisation de l'onduleur triphasé

L'onduleur triphasé de deux niveaux est illustré par son circuit de puissance de la figure (II-1). On doit distinguer d'une part les tensions de branche V_{AN} , V_{BN} , V_{CN} mesurées par rapport à la borne négative de la tension continue V_{pv} , d'autre part, il y a les tension de phases V_{An} , V_{Bn} et V_{Cn} mesurées par rapport à un point neutre flottant n représentant une charge équilibrée montée en étoile. Des tensions simples on peut tirer facilement les tensions composées V_{AB} , V_{BC} et V_{CA} .

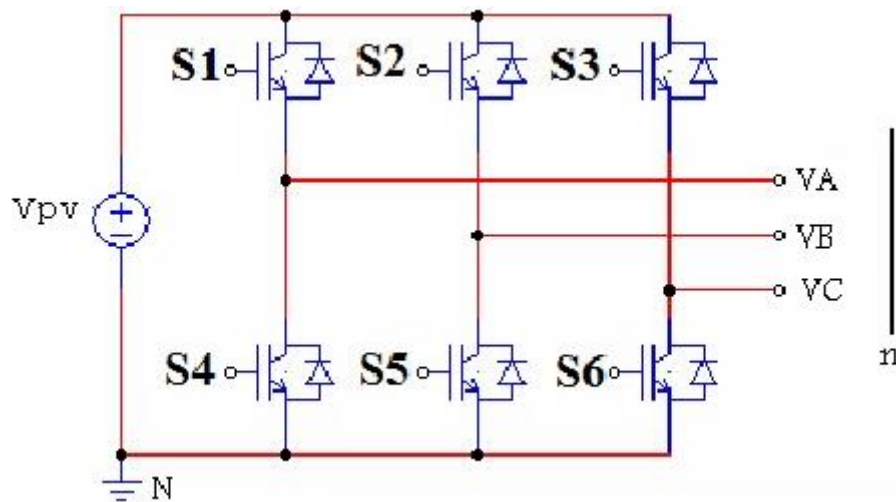


Figure (II-1) : Circuit de fonctionnement de l'onduleur triphasé.

Dans le circuit de puissance de l'onduleur triphasé de la figure (II-1), il est à noter que les états des interrupteurs d'un même bras sont complémentaires.

En utilisant ces états des interrupteurs, nous pouvons obtenir les tensions de branche de sortie de l'onduleur mesurées par rapport à la borne négative de la tension du côté continu comme suit :

$$\begin{aligned} V_{AN} &= S_1.V_{pv} \\ V_{BN} &= S_2.V_{pv} \\ V_{CN} &= S_3.V_{pv} \end{aligned} \quad (L.II.1)$$

Où S_1 , S_2 et S_3 désignent les états des interrupteurs des phases A, B et C respectivement.

2. Les tensions composées sont

$$\begin{aligned}
 V_{AB} &= V_{AN} + V_{NB} = V_{AN} - V_{BN} = (S_1 - S_2) V_{pv} \\
 V_{BC} &= V_{BN} + V_{NC} = V_{BN} - V_{CN} = (S_2 - S_3) V_{pv} \\
 V_{CA} &= V_{CN} + V_{NA} = V_{CN} - V_{AN} = (S_3 - S_1) V_{pv}
 \end{aligned} \quad (L.II.2)$$

On peut écrire l'équation (I.2) sous la forme matricielle.

$$\begin{pmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} \quad (L.II.3)$$

3. Les tensions simples sont

$$\begin{aligned}
 V_{AN} &= (2/3) V_{AN} - (1/3) (V_{BN} + V_{CN}) \\
 V_{BN} &= (2/3) V_{BN} - (1/3) (V_{AN} + V_{CN}) \quad L.II.4 \\
 V_{CN} &= (2/3) V_{CN} - (1/3) (V_{AN} + V_{BN})
 \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} V_{An} \\ V_{Bn} \\ V_{Cn} \end{pmatrix} = \frac{V_{PV}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \times \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} \quad (L.II.5)$$

4. Origine des harmoniques:

a. Déformation d'un signal sinusoïdal.

$$y(t) = Y_o + \sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n \sqrt{2} \sin(n\omega t - \varphi_n) \quad L.II.6$$

Avec :

Y_o : valeur de la composante continue généralement nulle et considérée comme telle

par la suite,

Y_n : valeur efficace de l'harmonique de rang n ,

ω : pulsation de la fréquence fondamentale,

φ_n : déphasage de la composante harmonique à $t = 0$.

Un signal déformé est la résultante de la superposition des différents rangs d'harmoniques

b. Mode de représentation : le spectre en fréquence

Le spectre est un histogramme fournissant l'amplitude de chaque harmonique en fonction de son rang.

L'examen du spectre permet d'apprécier à la fois quels sont les harmoniques en présence et leur importance respective comme le montre la figure (II-2).

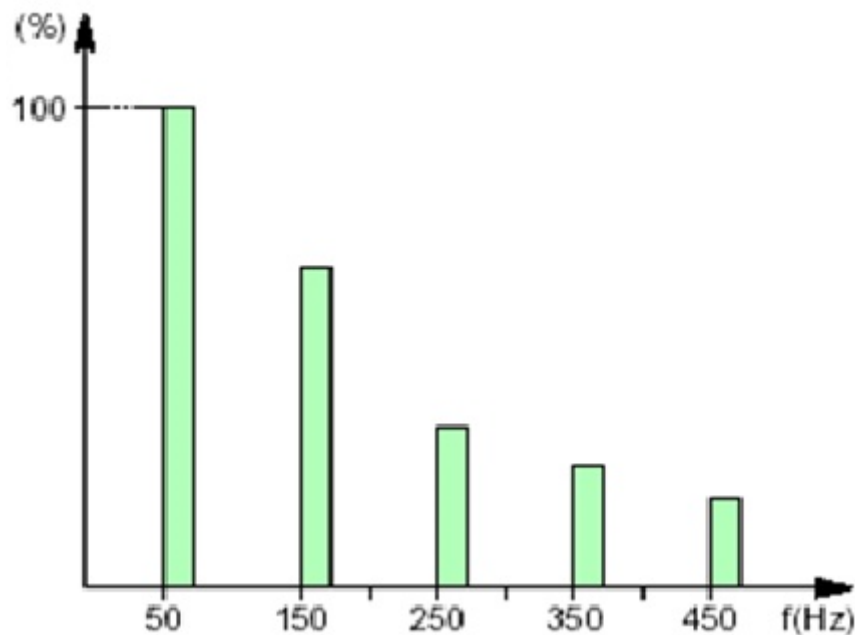


Figure II-2 Spectre d'un signal

Spectre d'un signal de composante fondamentale 50Hz, et comportant des harmoniques de rangs 3(150Hz), 5(250Hz), 7(350Hz) et 9(450 Hz). Comme le montre la figure (II-2) ci-dessus.

c. L'harmonique mesuré en pratique

Les harmoniques les plus fréquemment rencontrés dans le cas des réseaux triphasés, donc en pratique les plus gênants, sont les harmoniques de rangs impairs.

Au-delà du rang 50, les courants harmoniques sont négligeables et leur mesure n'est plus significative.

Ainsi, une bonne précision de mesure est obtenue en considérant les harmoniques jusqu'au rang 30.

Les distributeurs d'énergie surveillent les harmoniques de rang 3, 5, 7, 9, 11 et 13. Aussi, la compensation des harmoniques jusqu'au rang 13 est impérative, une bonne compensation prendra également en compte les harmoniques jusqu'au rang 25.

d. Paramètre de performance de l'onduleur

Les sorties d'un onduleur (tension, courant) contiennent certaines harmoniques, et la qualité de l'énergie fournit par un onduleur est évaluée suivant les paramètres de performance suivant :

e. Facteur de la n^{iem} harmonique HF_n :

C'est la mesure de la contribution individuelle des harmoniques définit comme suit :

$$HF_n = \frac{V_{effn}}{V_{eff1}} \quad L.II.7$$

V_{effn} : Valeur efficace de la n^{iem} harmonique.

V_{eff1} : Valeur efficace de la fondamentale.

f. Distorsion d'harmonique total THD et le facteur DF:

Le taux de distorsion, encore appelé distorsion harmonique totale est défini comme le rapport de la valeur efficace globale des harmoniques (c'est-à-dire leur somme quadratique) à la valeur efficace de la composante fondamentale.

Il peut s'appliquer soit au courant ou à la tension.

$$THD = \frac{\sqrt{H_2^2 + H_3^2 + \dots}}{F_1} \quad L.II.8$$

On va couramment jusqu'au 40ème ou 50ème rang d'harmoniques. Cette grandeur permet d'évaluer à l'aide d'un nombre unique la perturbation d'un courant ou d'une tension en

un point d'un réseau, voire de comparer deux réseaux sujets à des harmoniques de rangs différents.

Le THD représente sensiblement l'augmentation de l'effet Joule dans les lignes et les dispositifs.

Un appareil de mesure qui n'effectue pas une analyse spectrale ne mesure pas le THD mais une valeur approchée appelée le facteur de distorsion, ou DF.

Ce facteur, inférieur à 100 %, est défini par le rapport de la valeur efficace des harmoniques à la valeur efficace du signal total.

$$DF = \frac{\sqrt{H_2^2 + H_3^2 + \dots}}{\sqrt{F_1^2 + H_2^2 + H_3^2 + \dots}} \quad L.II.9$$

Lorsque la distorsion est faible, les deux valeurs THD et DF sont équivalentes.

Si DF dépasse les 15 %, il est possible de corriger la mesure pour obtenir le taux de distorsion harmonique total.

$$THD = \frac{DF}{\sqrt{1 - DF^2}} \quad L.II.10$$

Un bon appareil d'analyse de réseaux donne la valeur efficace du signal puis le compare à celle du signal sans son fondamental. Mais certains appareils ne mesurent que la valeur moyenne des signaux redressés et non pas les valeurs efficaces. La mesure peut être alors inférieure à DF, et aucune correction ne permet de retrouver THD.

La distorsion de l'onde de tension est proportionnelle à l'impédance du réseau et à l'amplitude des courants harmoniques. La précision de son calcul n'est limitée que par l'incertitude de l'impédance du réseau.

Le taux de distorsion du réseau électrique est presque partout inférieur à 2% en HTB, 5% en HTA et 7% en BT.

C'est la mesure de la similitude de la forme d'onde réelle avec sa composante fondamentale:

$$THD = \frac{1}{V_{eff1}} \left[\sum_{n=2,3}^{\infty} (V_{effn})^2 \right]^{1/2} \quad L.II.11$$

g. Le THD en tension caractérise la déformation de l'onde de tension:

Une valeur de THDu inférieure à 5 % est considérée comme normale. Aucun dysfonctionnement n'est à craindre.

Une valeur de THDu comprise entre 5 et 8 % révèle une pollution harmonique significative.

Quelques dysfonctionnements sont possibles.

Une valeur de THDu supérieure à 8 % révèle une pollution harmonique importante.

Des dysfonctionnements sont probables. Une analyse approfondie et la mise en place de dispositifs d'atténuation sont nécessaires.

h. Le THD en courant caractérise la déformation de l'onde de courant

Une valeur de THDi inférieure à 10 % est considérée comme normale. Aucun dysfonctionnement n'est à craindre.

Une valeur de THDi comprise entre 10 et 50 % révèle une pollution harmonique significative. Il y a risque d'échauffements, ce qui implique le surdimensionnement des câbles et des sources.

Une valeur de THDi supérieure à 50 % révèle une pollution harmonique importante. Des dysfonctionnements sont probables. Une analyse approfondie et la mise en place de dispositifs d'atténuation sont nécessaires.

5. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons expliqué le fonctionnement et les équations de l'onduleur triphasé à débit de un phase, et relisé les équations de l'onduleur triphasé, les fonctions des tensions simple et composée. Le chapitre suivant sera consacré la simulation de l'onduleur à partir de cette modélisation.

1. Introduction

Dans cette partie nous allons développer les blocs Simulink et les programmes permettant de retourner les résultats de sortie d'un onduleur triphasé alimentant une charge inductive.

L'onduleur et la charge constituent un système dont les caractéristiques électriques sont données ci-dessous :

- Tension de la Batterie : $U_{bat} = 36 \text{ V}$;
- Paramètre du la charge :
- Resistance $R = 467 \text{ m}\Omega$;
- Inductance cyclique : $L = 327 \mu\text{H}$.

1.1 Modélisation de l'onduleur de tension triphasé

Considérons un onduleur triphasé en pont Graëtz avec de interrupteurs parfaits alimentant une charge triphasé couplée en étoile. Nous admettons que les interrupteurs de chaque bras de pont du convertisseur sont commandés de façon complémentaire. Nous notons C_i le signal de commande de l'interrupteur T_i et C'_i le signal de commande de l'interrupteur T'_i et si nous supposons que les signaux de commande sont des signaux binaires valant 1 (si l'interrupteur est passant), alors : $C_i + C'_i = 1$.

L'onduleur de tension triphasé en pont impose donc en permanence les trois tensions composées u_{ij} qui s'expriment par : $u_{ij} = (C_i - C_j) \cdot U_{bat}$

L'onduleur peut alors être représenté sous Simulink par un bloc lié à un programme MATLAB dont les entrées sont des signaux de commande C_1 , C_2 et C_3 et dont les sorties sont les deux tensions composées u_{12} et u_{23} .

1.3 Valeur théoriques des tensions composées

Les valeurs des tensions composées sont regroupées dans le tableau ci-dessous

t	0	T/6	T/3	T/2	2T/3	5T/6	T
C_1	1	1	1	0	0	0	
C_2	0	0	1	1	1	0	
C_3	1	0	0	0	1	1	
u_{12}	U_{bat}	U_{bat}	0	$-U_{bat}$	$-U_{bat}$	0	
u_{23}	$-U_{bat}$	0	U_{bat}	U_{bat}	0	$-U_{bat}$	

Tableau 1

Le schéma de simulation est représenté par le bloc suivant où la fonction MATLAB correspondant au tableau 1.

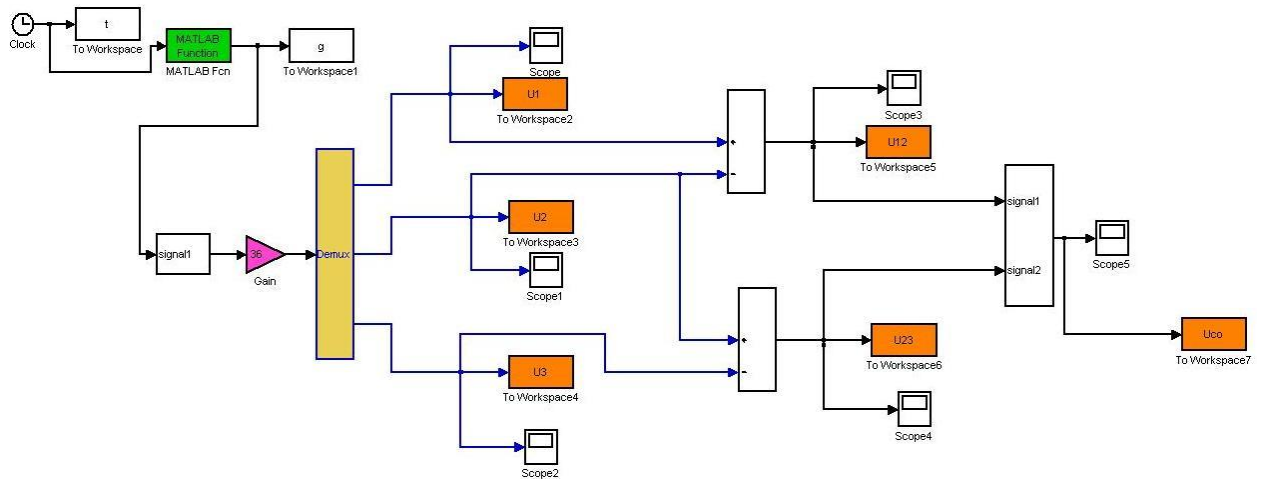
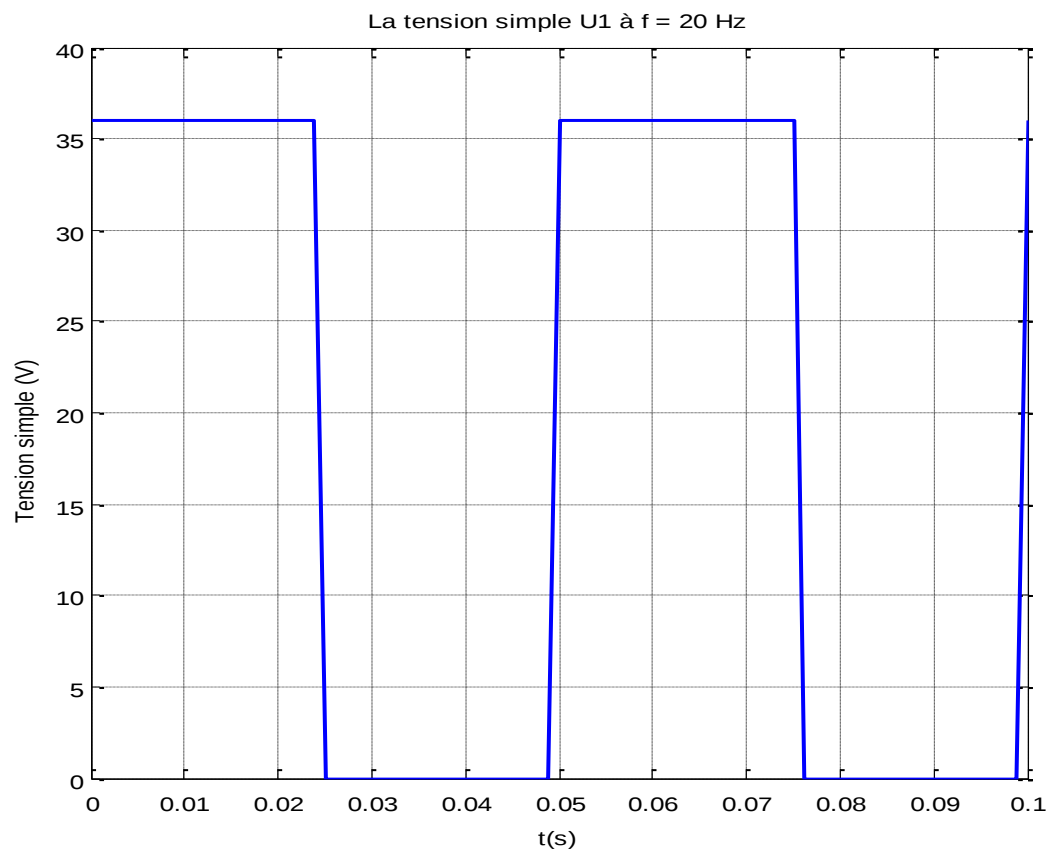


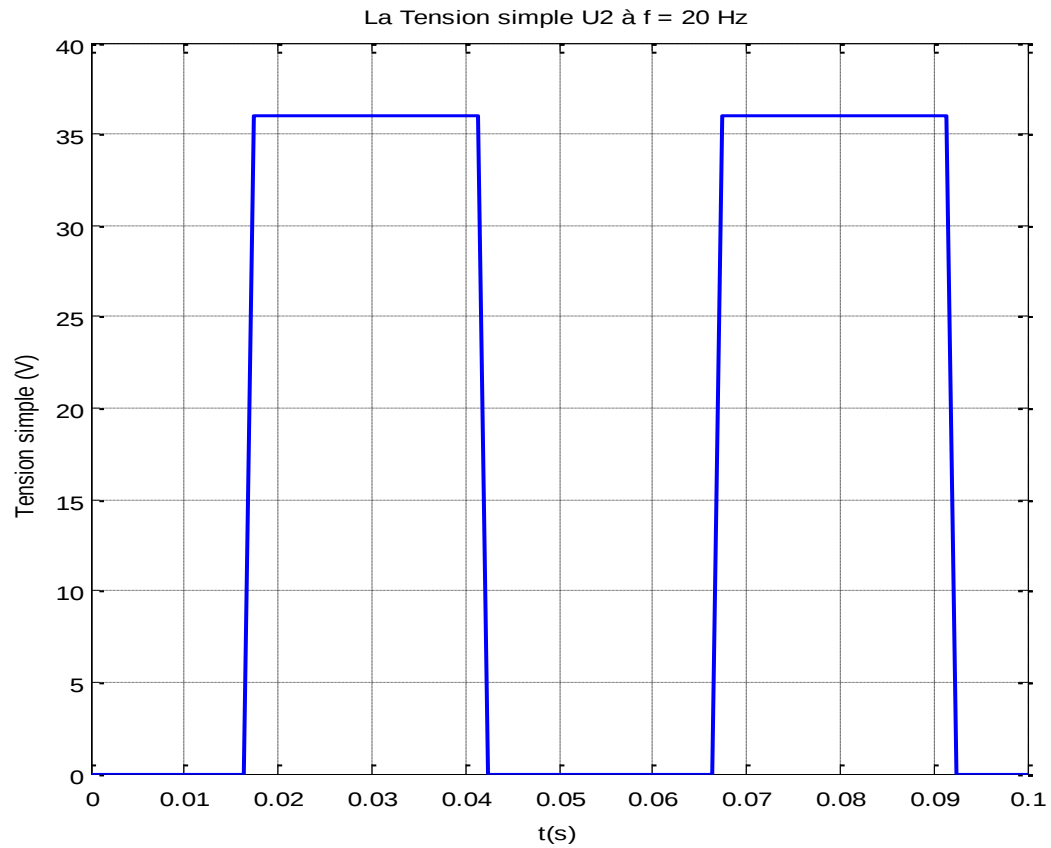
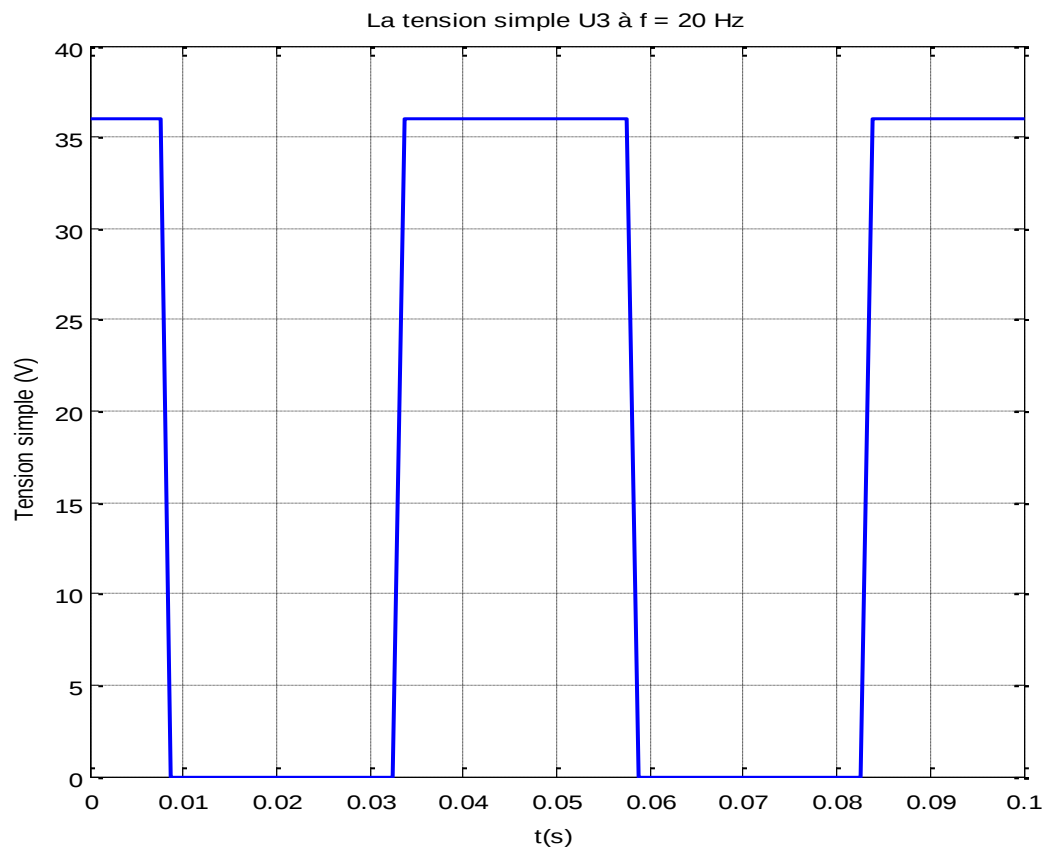
Figure 1 : Bloc de simulation.

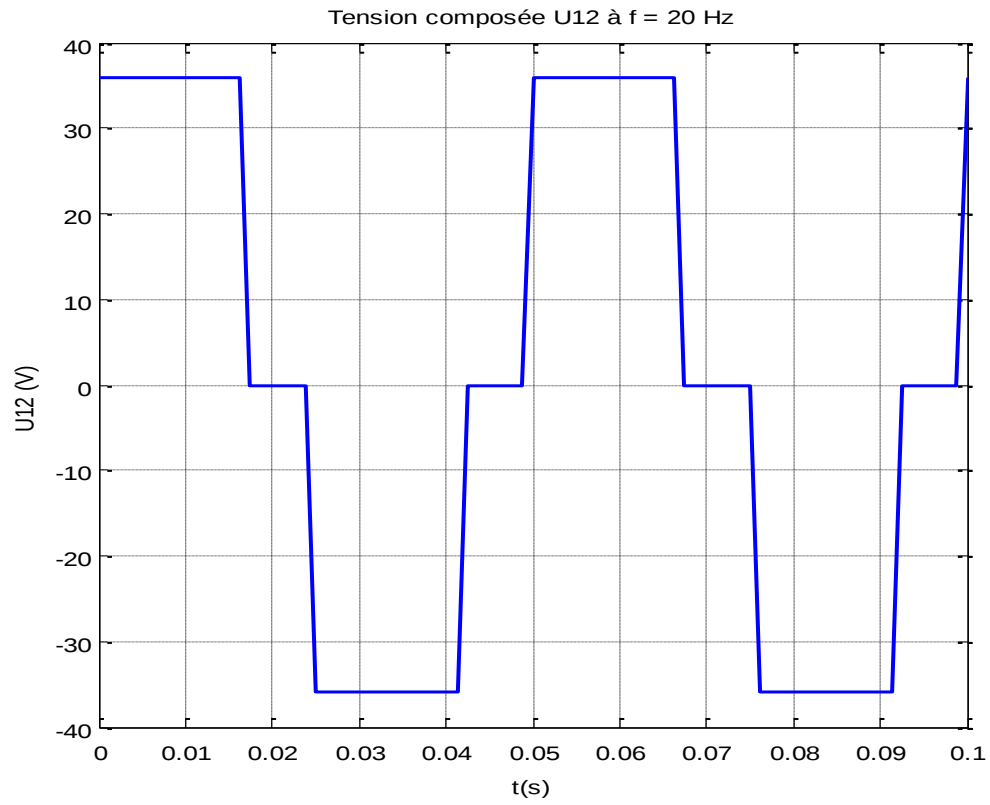
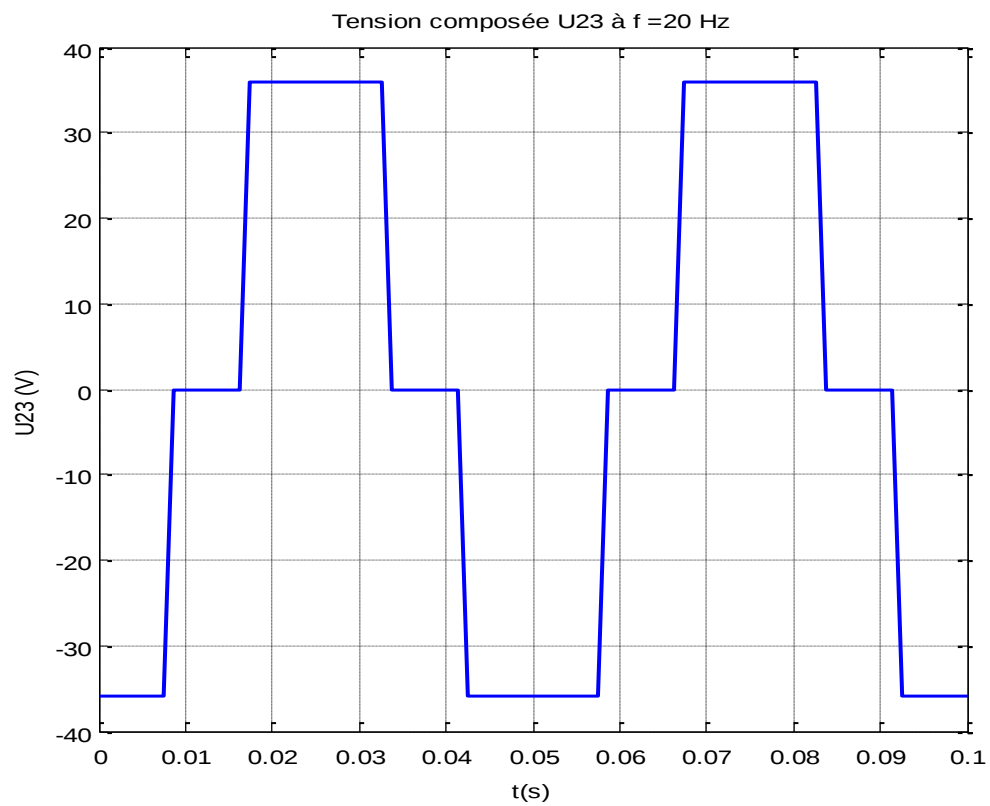
1.4 Simulation de l'onduleur de tension triphasé

Maintenant, nous simulons le fonctionnement en pleine onde de l'onduleur pour une fréquence de fonctionnement de 20 Hz.

Nb : dans cette partie et toute les autres, les résultats de simulation sont accomplis pour un temps égal à la double période.

Figure 2 : Tension simple U₁.

**Figure 3 : Tension simple U₂.****Figure 4: Tension simple U₃.**

**Figure 5: Tension composée U_{12} .****Figure 6: Tension composée U_{23} .**

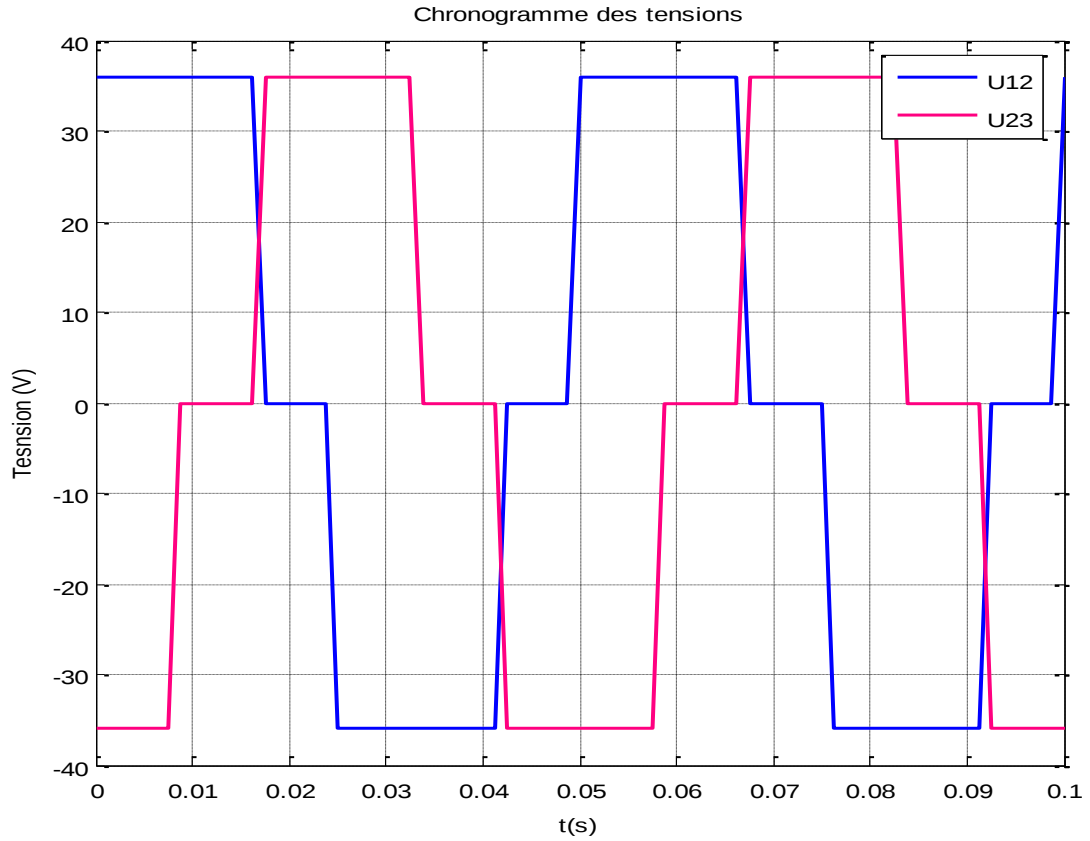


Figure 7: Tensions composées U_{12} et U_{23} .

L'exécution du bloc de la simulation permet de distinguer les tensions simples et composées à la sortie de l'onduleur.

Dans La figure 7 on a superposé les tensions U_{12} et U_{23} , dont les amplitudes sont égales à 36 V et toute les deux respectent un déphasage de 120° .

2. Simulation du système onduleur-charge

Dans cette partie, notre objectif est d'étudier le fonctionnement de l'onduleur de tension alimentant la charge inductive par des créneaux de courants de 120° grâce à une régulation des courants par hystérésis. On admet que la charge est équilibrée. Chaque phase est alors représentée par une résistance R_{ph} et une inductance L_{ph} . La tension V_k aux bornes de la $k^{\text{ième}}$ phase s'exprime donc par :

$$V_k = R_{ph} \cdot i_k + L_{ph} \cdot \frac{di_k}{dt}$$

En utilisant l'équation ci-dessus, nous pouvons exprimer les deux tensions imposées par l'onduleur de tension :

$$u_{12} = R_{ph} \cdot i_\alpha + L_{ph} \cdot \frac{di_\alpha}{dt} \text{ avec } i_\alpha = i_1 - i_2$$

$$u_{12} = R_{ph} \cdot i_\beta + L_{ph} \cdot \frac{di_\beta}{dt} \text{ avec } i_\beta = i_2 - i_3$$

Le comportement électrique de la charge inductive triphasé sera donc décrit dans Simulink par un bloc ayant pour entrées les deux tensions u_{12} et u_{23} imposées par l'onduleur.

Et pour sortie les deux courants fictifs i_α et i_β . Les courants réels sont déterminés à partir de ces deux courant fictifs par la relation matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \\ -2 & -2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{pmatrix} 2 \cdot i_\alpha & +i_\beta \\ -i_\alpha & +i_\beta \\ -i_\alpha & -2 \cdot i_\beta \end{pmatrix}$$

2.1 Modélisation de la charge

2.1.1. Création du bloc de simulation

Pour créer le bloc de simulation du comportement de la charge inductive triphasée alimentée par l'onduleur de tension, nous avons besoin de faire la transformation de Laplace des deux équations différentielles précédentes :

$$U_{12}(p) = R_{ph} \cdot I_\alpha(p) + p \cdot L_{ph} \cdot I_\alpha(p) \Rightarrow I_\alpha(p) = \frac{U_{12}(p)}{R_{ph} + p \cdot L_{ph}}$$

$$U_{23}(p) = R_{ph} \cdot I_\beta(p) + p \cdot L_{ph} \cdot I_\beta(p) \Rightarrow I_\beta(p) = \frac{U_{23}(p)}{R_{ph} + p \cdot L_{ph}}$$

Nous obtenons le schéma Simulink suivant :

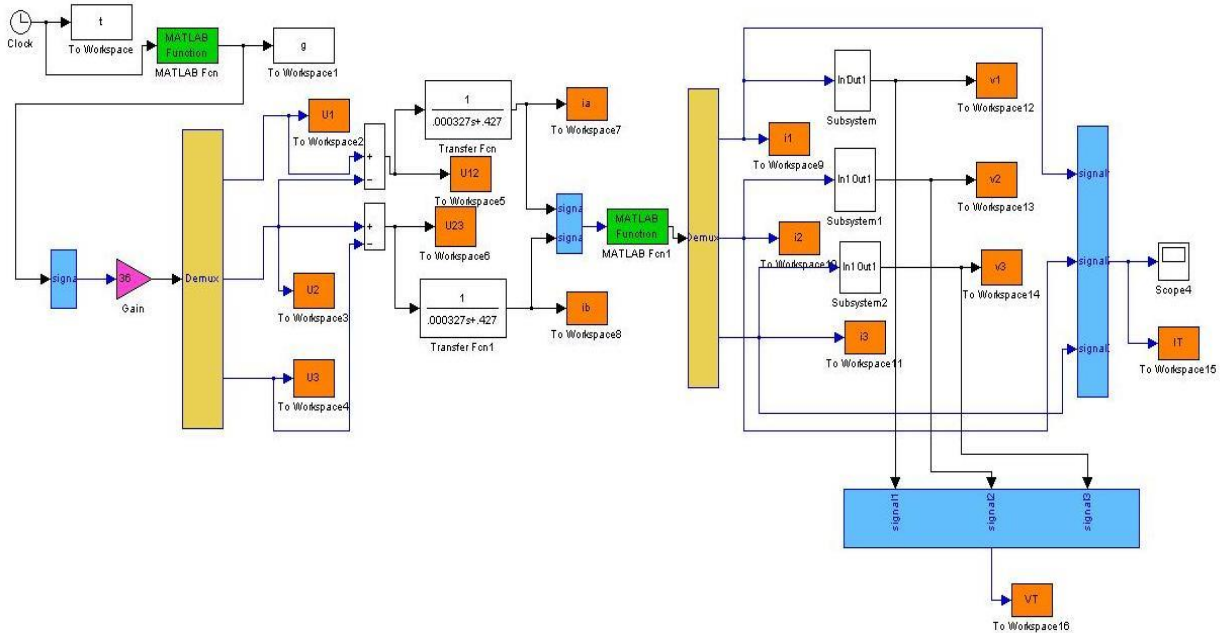


Figure 8 : Bloc de simulation.

Nous pouvons simuler le fonctionnement de notre onduleur et visualiser les différentes grandeurs.

La figure 9 représente le chronogramme des courants I_1 , I_2 et I_3 .

La figure 10 représente le chronogramme des tensions V_1 , V_2 et V_3 .

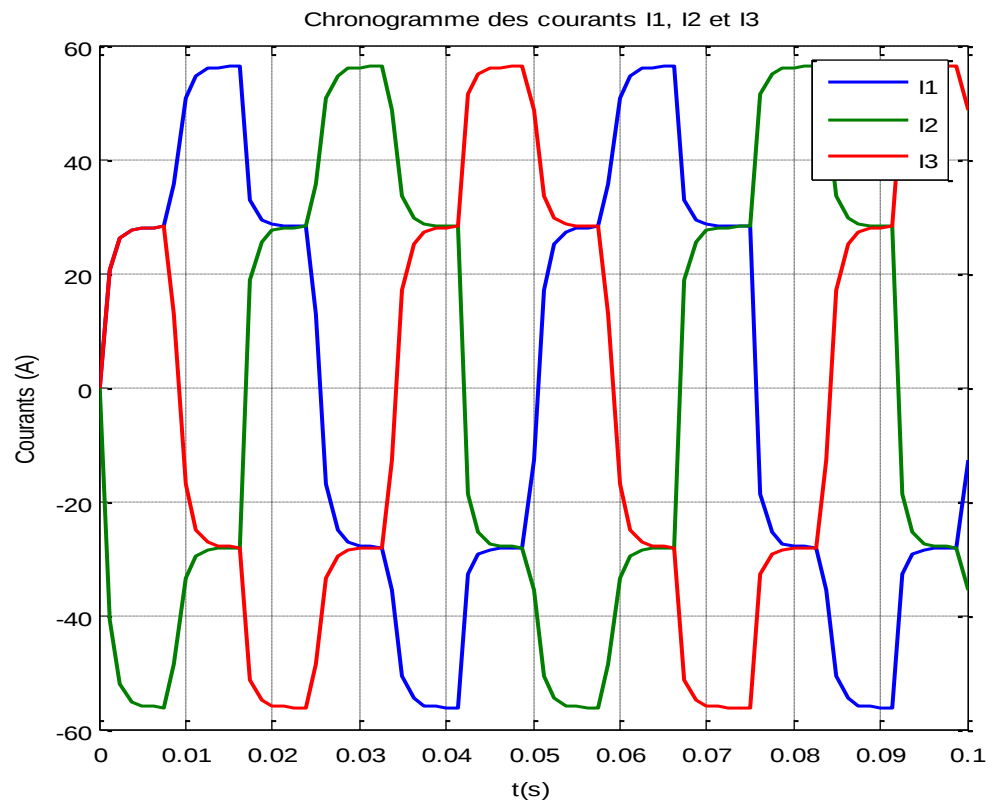


Figure 9: Courant I_1 , I_2 et I_3 .

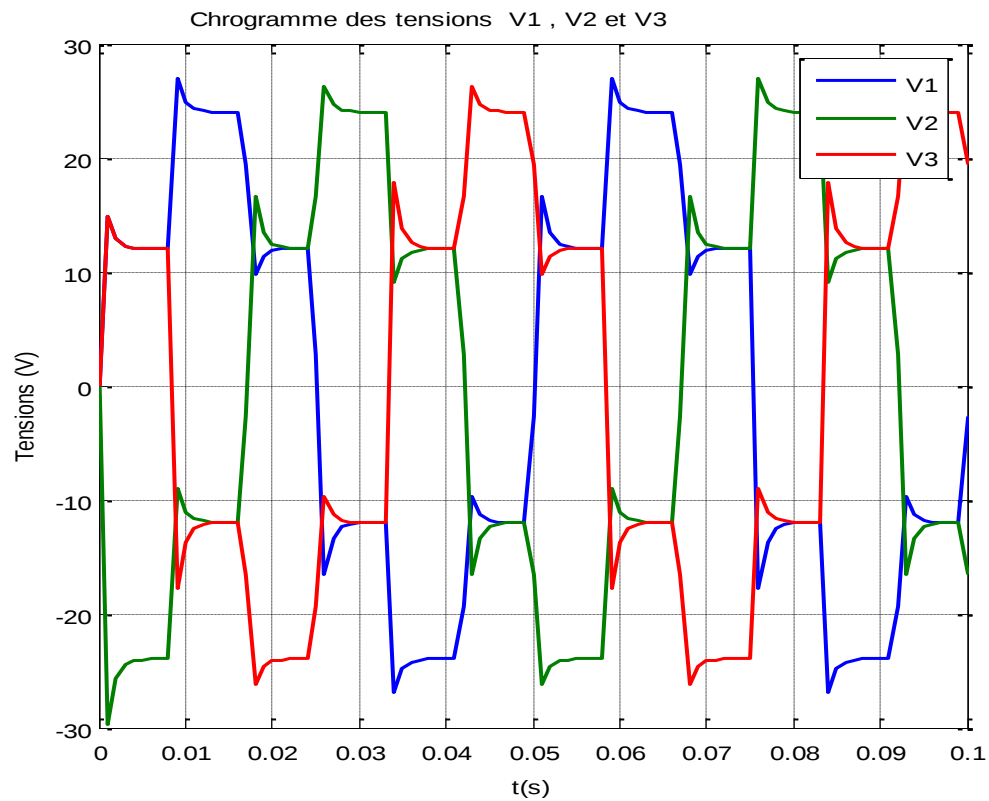


Figure 10: Tension V_1 , V_2 et V_3 .

3. Régulateur par hystérésis

Afin de simuler la régulation par hystérésis des trois courants en créneaux de 120° , commençons par créer les trois consignes de courants.

Les entrées de ce bloc sont l'amplitude du courant I (10A), ainsi que la fréquence f et la base de temps T .

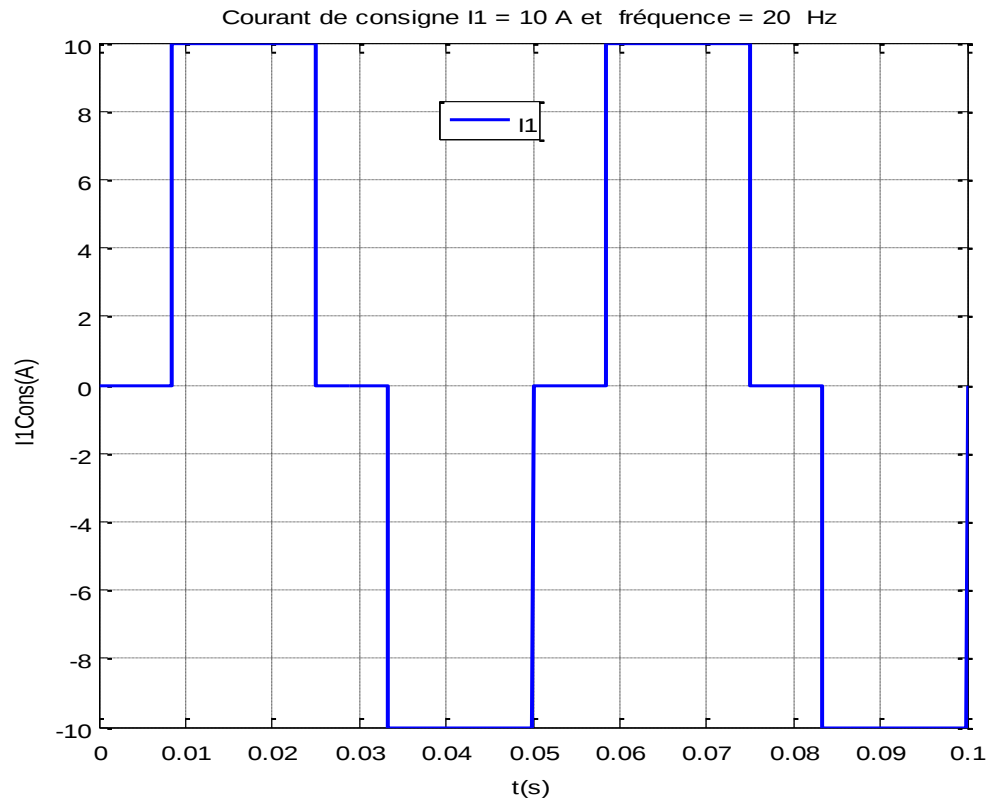
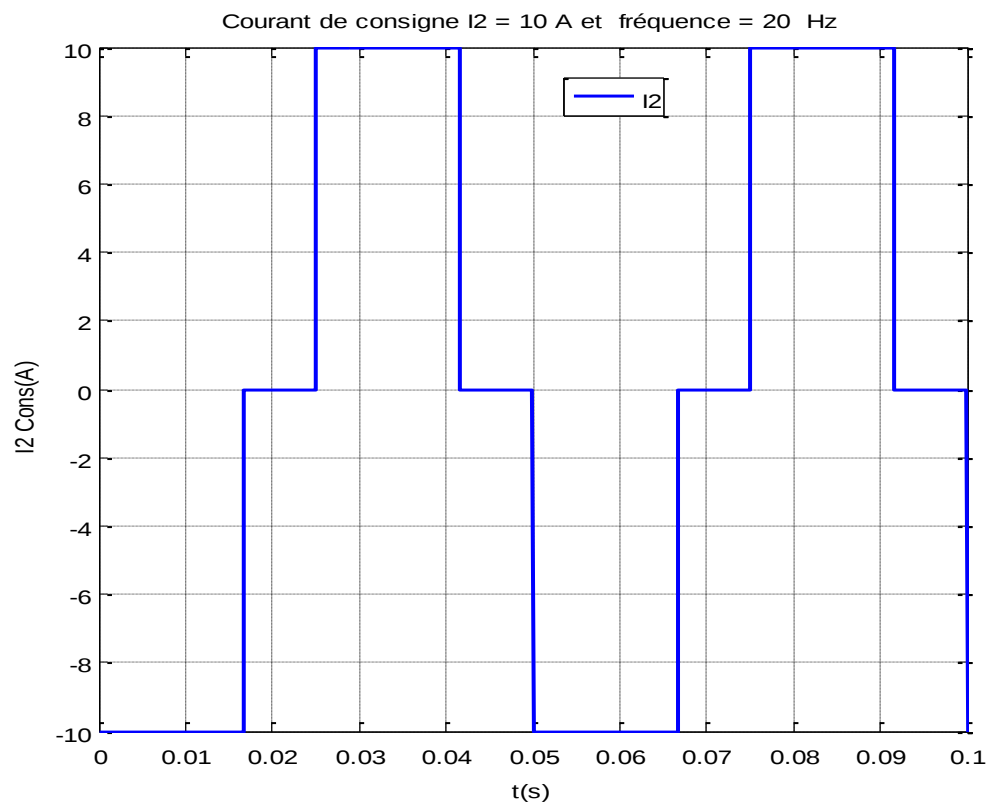
Création des créneaux de courant de 120° :

t	0	T/6	T/3	T/2	2T/3	5T/6	T
C_1	0	1	1	1	1	0	0
C_2	0	0	0	0	1	1	1
C_3	1	1	0	0	0	0	1
I_{12}	0	I	I	0	-I	-I	-I
I_{23}	-I	-I	0	I	I	0	0
I_{31}	I	0	-I	-I	0	I	I

Tableau 2

$$I_{ij} = (C_i - C_j)I$$

Voici le schéma bloc qui permet de réaliser la régulation par hystérésis des trois courants de créneaux de 120° .

Figure 12: Courant I_1 référence.Figure 13: Courant I_2 référence.

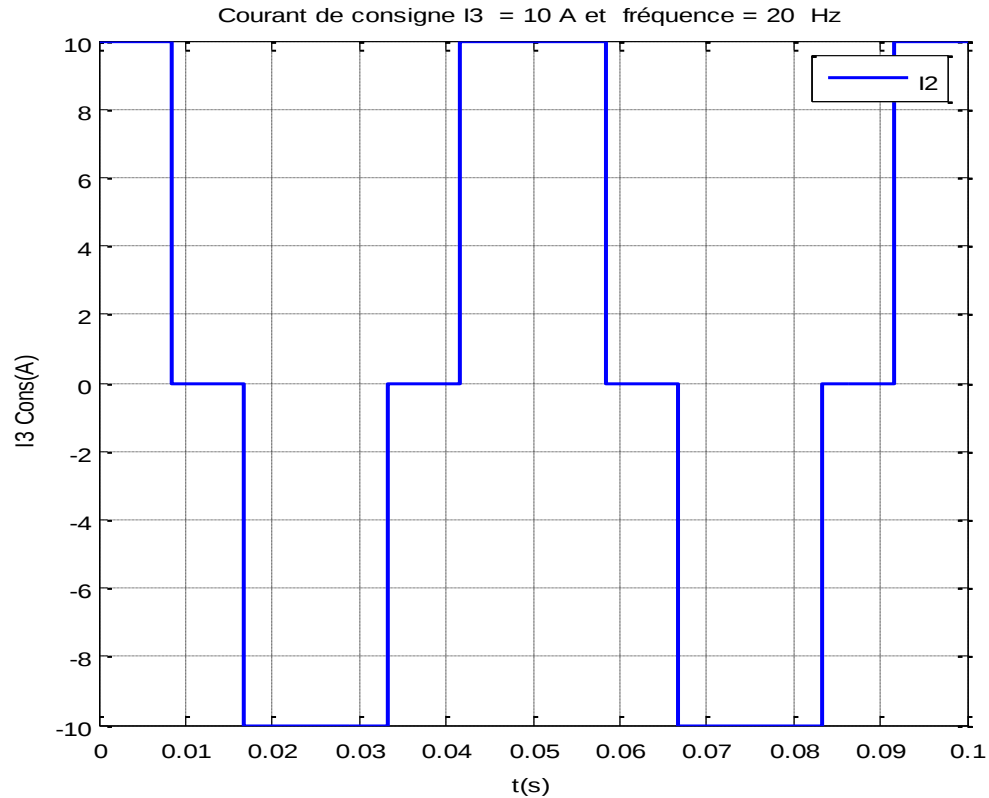


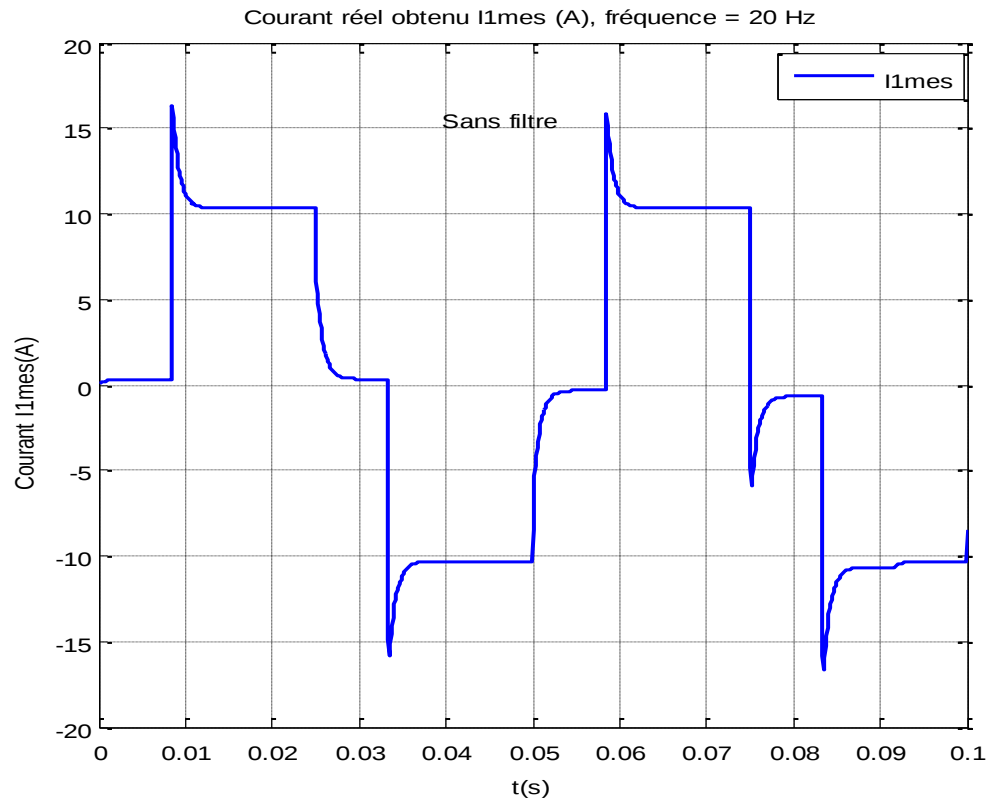
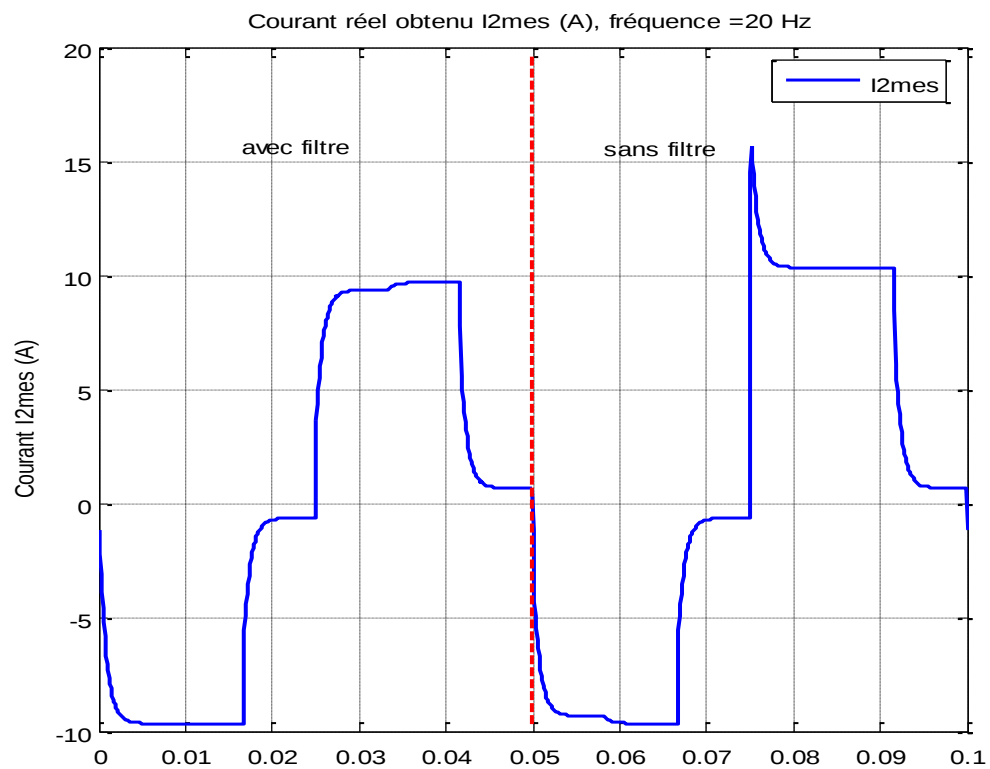
Figure 14: Courant I_3 référence.

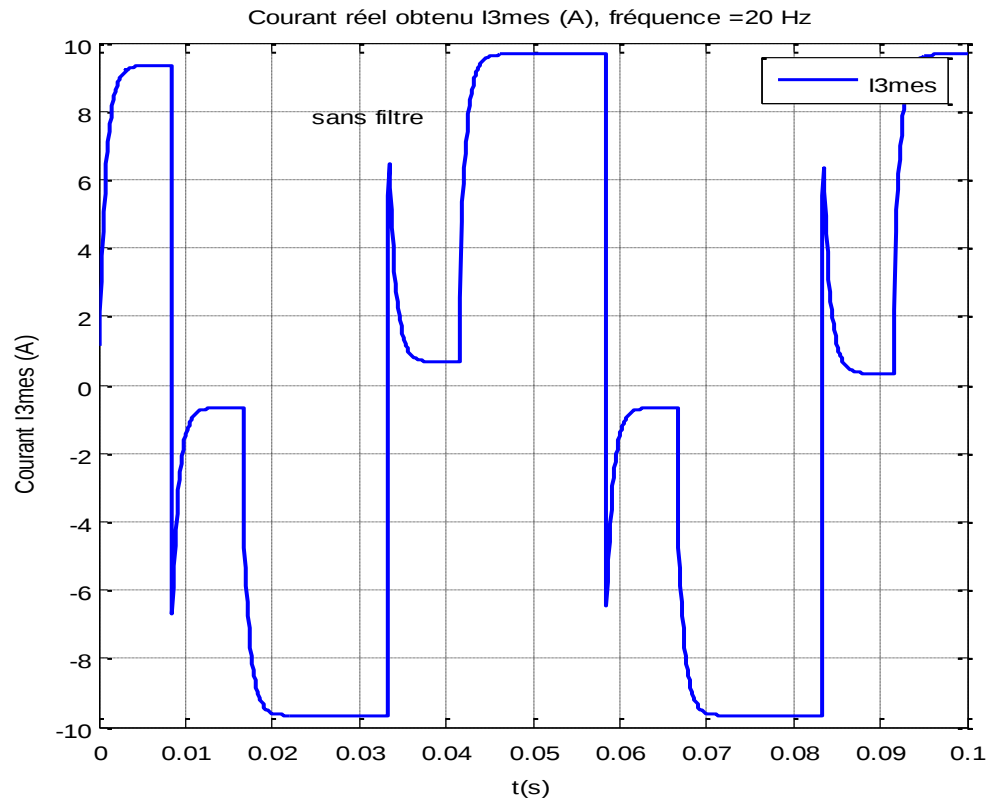
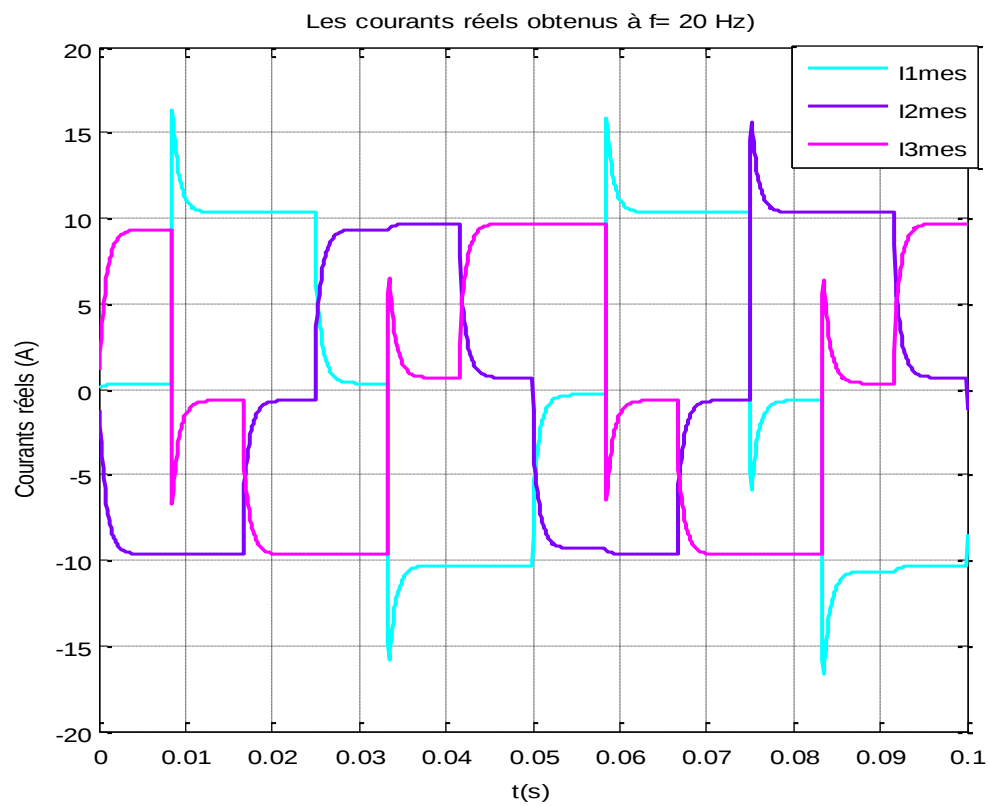
3.1.2 Les courants réels

Sur la figure 17, on s'aperçoit que les courants mesurés, respectent et coïncident avec la consigne, c'est-à-dire ils ressemblent aux courant de consigne, mise a part les amplitudes max et les changement d'état.

De plus on s'aperçoit que lorsque qu'on si change les fréquences, les courant de consigne changent mais aussi les courant mesurés, donc les courant mesurés correspond bien au courant demandés.

Avec l'introduction d'un filtre dans le bloc de simulation sur une période ($T=0,05$) à la sortie de courant mesuré I_2 on a obtenue, comme le montre la figure 17 une forme qui se concorde parfaitement au courant de consigne I_2 .

**Figure 15: Courant réel I_{1mes} .****Figure 16: Courant réel I_{2mes} .**

Figure 17 : Courant I_{1mes} .Figure 18: Courants I_1 , I_2 et I_3 mesure.

4. Conclusion:

Les courbes obtenues suite à la régulation coïncident bien avec les consignes introduites, mise à part les amplitudes max et les changements d'état.

À titre illustratif, l'introduction d'un filtre permet l'amélioration de la forme de signal de sortie en l'approchant de sa référence.

Conclusion Général:

Dans ce projet de fin d'étude notre objectif était la représentation et la simulation du système onduleur-charge, avec les hypothèses d'idéalité suivantes :

le convertisseur est composé d'interrupteurs parfaits :

- la chute de tension à l'état passant est nulle ;
- le courant de fuite à l'état bloqué est nul ;
- les temps de commutation à l'ouverture et à la fermeture sont nul.

Dans un premier temps on a représenté sous Simulink de bloc schématisant l'onduleur où nous avons obtenu les figures représentant les tensions de sortie simple et composées de l'onduleur.

La seule difficulté qu'on a rencontré était l'introduction dans le bloc de simulation une fonction programmable permettant de traduire les changement d'état des interrupteurs.

Dans un second lieu on a essayé de chercher une réponse en courant pour le système onduleur-charge plus voisine à consigne grâce à la technique de régulation par hystérésis.

En effet, le chronogramme obtenu pour les courants de sortie est type créneaux de 120° , il ressemble, à la référence à l'exception des amplitudes max et les changement d'état.

De plus, un filtre bien adapté au courant mesuré, permet de s'approcher de la forme du courant imposé par la consigne.