

République Algérienne Démocratique et Populaire

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



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Électromécanique

Thème

COMMANDE SVM A ONDULEUR TRIPHASE

Devant le jury composé de

Présenté par :

Babboukh Ali Assistant

- Belkacemi Moussa

- Zazia Akram

Mr. Djokhrab ala eddine Encadreur

- Abbas Mohammed Salah

- Tamma Abdeljalil

2023/2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Merci à Dieu pour la santé, la volonté, le courage et la détermination pour cette
Il nous a *accompagné* tout au long de la période de préparation et de développement
de ce Travail qui nous a permis d'achever cet humble travail.

Tout d'abord, nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à notre encadrant,
Djokarab Al – Din, et son adjoint, ***Bebboukha Ali*** pour l'aide et les connaissances qu'il a
fournies

Qui nous les a transmis pour leur patience, leur volonté, et surtout pour Lui

Les conseils avisés qui nous ont guidés dans notre travail

Merci beaucoup et nous vous souhaitons nos efforts et nos résultats

Soyez à la hauteur de leurs attentes.

A nos membres du jury pour le grand honneur qu'ils nous font

Acceptez de juger ce travail.

Nous tenons à adresser nos sincères remerciements à l'Autorité

Le corps professoral et les administrateurs de l'Université du Martyr **Hama Lakhdar** se
distinguent par la richesse et la qualité de leur enseignement, largement diffusé

Des efforts pour offrir à leurs élèves une éducation de

Dédicace

بسم الله الرحمن الرحيم

وصلاة والسلام على نبينا الكريم

إلى وطني العزيز : الجزائر الصامدة بأهلها

... إلى الانسان الذي علمني كيف يكون الصبر طريقا للنجاح.....السند والقدوة

والذي الحبيب اطال الله في عمره

...إلى من رضاها غايتي وطموحي.....فأعطتني الكثير ولم تنتظر الشكر

...إلى باعثة العزم والتصميم والإرادة.....صاحبة البصمة الصادقة في حياتي

والدتي الحبيبة اطال الله في عمرها

ورفقاء البيت الطاهر الانيق.....اشقائي وشقيقاتي

الي الاصدقاء وكل عائلة الرياضية وكل من قدم لي العون والمساعدة في انجاز هذه الاطروحة إلى كل

من الدكتور المشرف جغراب علاء الدين

ومساعده ببوخة علي

عباس محمد الصالح

Dédicace

أهدي ثمرة جهدي المتواضع

الى من وهبوني الحياة والأمل, والنشأة علي شغف

الاطلاع والمعرفة, ومن علموني ان ارتقي سلم الحياة بحكمة وصبر؛

برا وأحسانا؛ ووفاء لهما: والدي العزيز, ووالدي العزيزة

الى من وهبني الله نعمة وجودهم في حياتي الي العقد المتين

من كانوا عوننا لي في رحلة بحثي : اخوتي واخواتي

واخيرا إلى كل من ساعدني, وكان له دور من قريب او بعيد في اتمام هذه الدراسة سائلي المولي ان يجزي
الجميع خير الجزاء في الدنيا والاخرة

ثم إلى كل طالب علم سعي بعلمه , ليفيد الاسلام والمسلمين

بكل ما أعطاه الله من علم ومعرفة.

Dedicate

المحمد لله الذي وهبنا التوفيق والسداد ومنحنا الثبات واعاننا علي اتمام هذا العمل

بعد ان سافرنا لنضع النقاط علي الحروف ونكشف ما وراء ستار والعلم

والمعرفة فها هي ثمار علمنا قد اينعت وحن قطافها .

هذه كلماتنا المبعثرة نهمس بها في اذن كل من سيفتح هذه المذكرة

هي ايضا كلمات شكر إلى كل من حثنا وغرس فينا الامل والارادة

هي ذي ثمرة حمدي اجنيها اليوم هي هدية اهديها الي :

والذي الغالي حفظه الله

أمي العزيزة اطال الله في عمرها

وجميع اخوتي واخواتي واصدقائي

إلى كل من الاستاذ المشرف جغراب علاء الدين

ومساعده ببوخة علي

وإلى من ساندني في انجاز هذا العمل

زازية اكرم

Dédicace

أهدي ثمرة جهدي المتواضع إلى من وهبوني الحياة والأمل،

والنشأة على شغف الاطلاع والمعرفة، ومن علموني أن أرتقي سلم الحياة بحكمة وصبر؛

براء وإحسانا ووفاء لهما والدي العزيز، ووالدي العزيزة إلى من وهبني الله نعمة وجودهم في حياتي

إلى العقد المتين من كانوا عوناً لي في رحلة بحثي: إخواني وأخواتي

إلى من كاتفتني ونحن نشق الطريق معا نحو النجاح في مسيرتنا العلمية،

وأخيراً إلى كل من ساعدني، وكان له دور من قريب أو بعيد في إتمام هذه الدراسة،

سائلاً المولى أن يجزي الجميع خير الجزاء في الدنيا والآخرة

ثم إلى كل طالب علم سعى بعلمه، ليفيد الإسلام والمسلمين بكل ما أعطاه الله من علم ومعرفة

تامة عبد الجليل

ملخص:

يعد تعديل المتجه المكاني (svm) تقنية لتوليد إشارات جهد ثلاثي الطور عالية الجودة من مصدر جهد تيار مستمر. إنه نوع من تعديل عرض النبضة (pwm) شائع الاستخدام في محولات الطاقة ثلاثية الطور ، مثل المحولات ثلاثية الطور. يعتمد svm على مفهوم المتجهات المكانية ، والتي تمثل حجم واتجاه إشارات الجهد ثلاثية الطور. من خلال التحكم في النواقل المكانية لإشارات الجهد ثلاثية الطور ، يمكن أن يولد svm شكل موجة إخراج عالي الجودة مع تشوه متناسق منخفض وكفاءة عالية. يستخدم svm على نطاق واسع في تطبيقات مثل التحكم في المحرك ثلاثي الطور وأنظمة تحويل الطاقة ومراقبة جودة الطاقة. هذه تقنية فعالة للغاية لتوليد إشارات جهد ثلاثية الطور عالية الجودة من مصدر جهد تيار مستمر.

تتناول الأطروحة تصميم ومحاكاة وتنفيذ عاكس جهد ثلاثي الطور ثنائي المستوى مع تحكم يعتمد على تعديل المتجه المكاني (svm). سوف تصف الخطوات المختلفة المتضمنة في تصميم ups ، وتشرح كيفية عمل svm وكيف يتم استخدامه في التحكم في ups ، ومقارنة أداء ups مع تحكم svm بتقنيات التحكم الأخرى. ستناقش أيضًا مزايا وقيود svm والتحسينات المحتملة لتحسين أداء ups والتطبيقات المحتملة والتطورات المستقبلية في هذا المجال.

الكلمات الدالة :

عاكس جهد ثلاثي الأطوار ، عاكس ثنائي المستوى ، نظام تحكم بتعديل متجه مكاني (SVM)

Résumé:

La modulation vectorielle spatiale (SVM) est une technique permettant de générer des signaux de tension triphasés de haute qualité à partir d'une source de tension continue. Il s'agit d'un type de modulation de largeur d'impulsion (PWM) couramment utilisé dans les convertisseurs de puissance triphasés, tels que les onduleurs triphasés. SVM est basé sur le concept de vecteurs spatiaux, qui représentent l'amplitude et la direction des signaux de tension triphasés. En contrôlant les vecteurs spatiaux des signaux de tension triphasés, SVM peut générer une forme d'onde de sortie de haute qualité avec une faible distorsion harmonique et un rendement élevé. le SVM est largement utilisé dans des applications telles que la commande de moteurs triphasés, les systèmes de conversion de puissance et le contrôle de la qualité de l'alimentation. Il s'agit d'une technique très efficace pour générer des signaux de tension triphasés de haute qualité à partir d'une source de tension continue.

La thèse porte sur la conception, la simulation et la mise en œuvre d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux avec une commande basée sur la modulation vectorielle spatiale (SVM). Vous décrierez les différentes étapes impliquées dans la conception de l'onduleur, expliquerez le fonctionnement de SVM et comment il est utilisé dans le contrôle de l'onduleur, et comparerez les performances de l'onduleur avec contrôle SVM à d'autres techniques de contrôle. Vous discuterez également des avantages et des limites de SVM, des améliorations potentielles pour améliorer les performances de l'onduleur, ainsi que des applications possibles et des développements futurs dans ce domaine.

MOTS CLÉS

Onduleur de tension triphasé Onduleur à deux niveaux Modulation vectorielle spatiale
(SVM) Système de contrôle

Sommaire

sommaire

DEDICATE	5
II. LISTE DES FIGURES.....	I
INTRODUCTION GENERALE	5
INTRODUCTION GENERALE	1
I. CHAPITRE I : MODELISATION DE L'ONDULEUR DE TENSION TRIPHASE.....	3
I.1. INTRODUCTION:	3
I.2. DEFINITION DE L'ONDULEUR DE TENSION.....	3
I.3. CLASSIFICATION DES ONDULEURS	4
<i>I.3.1. Classification selon le nombre de phases</i>	<i>4</i>
I.2.4.5 ONDULEURS MONOPHASES	4
II.2.4.5 ONDULEURS TRIPHASES	5
<i>I.3.2. Classification selon la nature de la source d'entrée</i>	<i>6</i>
<i>I.3.3. Classification selon la nature des interrupteurs de puissance</i>	<i>6</i>
<i>I.3.4. Structure général d'un onduleur triphasé à deux niveaux</i>	<i>8</i>
I.4. MODELISATION DE L'ONDULEUR DE TENSION :	9
I.5. CONCLUSION :	12
III. CHAPITRE II : COMMANDE LINEAIRE D'UN ONDULEUR DE TENSION TRIPHASE A DEUX NIVEAUX.....	13
II.1. INTRODUCTION	12
II.2. TECHNIQUES DE COMMANDE ONDULEUR TRIPHASE	12
<i>II.2.1. Commande par hystérésis</i>	<i>12</i>
<i>II.2.2. Commande plein onde</i>	<i>13</i>
II.2.4.5 COMMANDE PLEIN ONDE 180°	13
II.2.4.5 COMMANDE PLEIN ONDE DECALEE 120	14
<i>II.2.3. Commande par la modulation de largeur d'impulsion</i>	<i>15</i>
<i>II.2.4. Commande par MLI vectorielle ou SVM (Space Vector Modulation).....</i>	<i>15</i>
II.2.4.5 REPRESENTATION VECTORIELLE DES VECTEURS DE TENSION D'UN ONDULEUR A DEUX NIVEAUX	16
II.2.4.5 PRINCIPE DE LA MODULATION VECTORIELLE (SVM).....	19
II.2.4.5 LOCALISATION DU VECTEUR DE REFERENCE	19
II.2.4.5 CALCUL DES TEMPS DE COMMUTATION.....	21
II.2.4.5 GENERATION DES IMPULSIONS DE COMMANDE.....	22
II.3. SIMULATION DES TECHNIQUES DE COMMANDE DES ONDULEURS TRIPHASES.....	24
<i>II.3.1. Commande symétrique d'un onduleur triphasé</i>	<i>24</i>
II.4. CONCLUSION	25
IV. CHAPITRE III : LA SVM APPLIQUEE AUX ONDULEURS DE TENSION A DEUX NIVEAUX	27
III.1. INTRODUCTION :	26
III.2. SIMULATION DE LA COMMANDE SVM	26

sommaire

III.3 .INTERPRETATION DES RESULTATS DE SIMULATION :	27
III.4. CONCLUSION	31
V. CONCLUSION GENERALE.....	54
CONCLUSION GENERALE	33
BIBLIOGRAPHIE	35
VI. 36	
BIBLIOGRAPHIE	36
ANNEXE.....	38
VII. ANNEXE.....	39

Liste des Figures

Liste des Figures

Figure (I.1): Schéma synoptique de l'onduleur de tension. Machines multipages de type 1	3
Figure (I.2): Onduleur monophasé avec diviseur capacitif	4
Figure (I.3): Onduleur monophasé avec transformateur de sortie à point milieu	5
Figure (I.4) : Onduleur monophasé en pont	5
Figure (I.5) : Structure d'un onduleur de tension triphasé	5
Figure (I.6): Onduleur de tension. (a) à base des Mosfet, (b) à base des IGBT	6
Figure (I.7) : Symbole du circuit IGBT	6
Figure (I.8) : Symbole du circuit MOSFET	7
Figure (I.9): domaine d'application IGBT et MOSFET	7
Figure (I.10) : Structure d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux.	8
Figure (I.11) : Onduleur de tension triphasé à deux niveaux	9
Figure (I.12) : Représentation d'un GTO	
Figure (II.1) : Principe de la modulation à hystérésis.	13
Figure (II.2) : Onduleur de tension triphasé.	13
Figure (II.3) : Formes des signaux de commande des interrupteurs K1, K2, K3	14
Figure (II.4): Formes des signaux de commande des interrupteurs K1, K2, K3	14
Figure (II.5) : Principe de la modulation de largeur d'impulsions.	15
Figure (II.6) : Structure d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux.	16
Figure (II.7) : Diagramme vectoriel de l'onduleur à deux niveaux (hexagone de commutation).	18
Figure (II.8) : Limitation du vecteur de référence $v^{\wedge} (\rightarrow^*)$	18
Figure (II.9) : Organigramme de calcul du secteur.	19
Figure (II.10) : Principe de génération des impulsions de commande par MLI vectorielle.	22
Figure (II.11): Logigramme de la modulation vectorielle à deux niveaux.	23
Figure (II-12) : Commande plein onde d'un onduleur triphasé	23
Figure (II-13) : La tension composée avec son spectre pour la commande pleine onde	24
Figure (II-14) : La tension simple avec son spectre pour la commande pleine onde	24
Figure (III-1) : Simulation de la MLI d'un Onduleur triphasé	27
Figure (III-2) : Tension de source 3 phases identiques et un déphasage de 120 degrés	27
Figure (III-3) : Transformation de Clarke (α, β)	28
Figure (III-4) : Secteur les interrupteurs d'un onduleur triphasé	29
Figure (III-5) : La tension composée d'un onduleur triphasé	29
Figure (III-6) : La tension simple d'un onduleur triphasé	30
Figure (III-7): Le courant d'UN onduleur triphasé	31

Liste des Tableau

Tableau (I.1) : Etablissement des expressions des tensions simples et composées	11
Tableau (II.1): Etats de l'onduleur et les coordonnées du vecteur v_i dans le plan (α, β)	17
Tableau (II.2) : Temps de commutation pour chaque secteur	21

Liste des Symboles

Liste des Symboles

Abréviations

MLI: Modulation de largeur d'impulsion.

THD : (Total Harmonic Distorsion) : taux de distorsion harmoniques.

IGBT: Insolated Gate Bipolare Transistor.

MOSFET: (Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor).

AC: Alternative Current.

DC: Direct Current.

GTO: Gate turn-Off Thyristor.

SVM : Space Vector Modulation : modulation vectorielle.

PWM: (Pulse Width Modulation) : Modulation de largeur d'impulsion.

Notations

S_{xi} : Fonction de connexion.

θ : Argument du vecteur de référence.

ω : Fréquence angulaire du fondamental.

m : Taux de modulation.

T_h : Période de commutation.

V_a, V_b, V_c : Tensions (a, b, c)

V_{max} : Tensions La valeur maximale

α : *alpha*

β : beta

.

Introduction générale

Introduction générale

Le développement récent dans convertisseur de puissance a permis d'importants progrès dans le secteur industriel notamment dans les systèmes de production d'énergie électrique. Parmi ces convertisseur, l'onduleur de tension jeu le rôle essentiel dans plusieurs application, telle que l'entraînement des machines électriques, les systèmes photovoltaïques, les systèmes éoliens, les *systèmes* (HVDC: High Voltage *Direct Current*)...etc. Ce dernier assure la conversion continue (DC) alternative (AC) avec la possibilité de varier certaines grandeurs telles que l'amplitude et la fréquence de la tension de sortie.

Néanmoins, la bonne performance de ce convertisseur liée principalement au bon dimensionnement de ses composants, le choix approprié du type de modulation utilisé, la synthèse et l'implémentation de sa structure de commande. Plusieurs stratégies de modulation ont été proposée et étudiées dans l'objectif d'améliorer la qualité de la tension à la sortie de l'onduleur, telles que la modulation de largeur d'impulsions MLI, (Pulse Width Modulation PWM) la modulation de largeur d'impulsions à troisième harmonique, modulation vectorielle (SVM : Space Vector Modulation)...etc

La modulation vectorielle présente des avantages importants par rapport aux autres techniques tels que meilleur indice de modulation, taux de distorsion d'harmonique (THD) réduit, et redondance dans les vecteurs zéros qui peuvent être exploités pour réaliser des fonctions supplémentaires.

Le but de ce travail est d'étudié par simulation et expérimentalement l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux. Dans le premier chapitre, nous allons présenter une brève description sur les différents types de l'onduleur de tension. Ensuite une étude détaillée sur l'onduleur de tension triphasé sera présenté. Enfin nous allons étudier en détail la modulation vectorielle en focalisant sur la méthode de trois vecteurs les plus proches.

Dans le deuxième chapitre, nous allons synthétiser une commande en boucle fermée d'un onduleur de tension débite charge RL via un filtre LC. La commande synthétisée à pour objectif de forcer l'onduleur de générer la tension désirée aux bornes de la charge.

La conception d'un onduleur de tension à deux niveaux présente le défi de générer une tension de sortie de qualité, similaire à une onde sinusoïdale. Pour résoudre ce défi, la technique de commande de la SVM (Space Vector Modulation) est utilisée. La SVM est une méthode avancée qui manipule les interrupteurs de puissance de l'onduleur pour obtenir une

tension de sortie sinusoïdale de haute qualité. Elle se base sur la manipulation des vecteurs d'espace pour ajuster la forme d'onde de sortie. En utilisant la SVM, les onduleurs à deux niveaux peuvent réduire la distorsion harmonique et améliorer la qualité de la tension. Cela contribue à améliorer les performances et la fiabilité des systèmes d'alimentation.

Chapitre I : Modélisation de l'onduleur de tension triphase

I.1. Introduction:

Les convertisseurs statiques jouent un rôle crucial dans l'adaptation de la source d'énergie électrique à un récepteur spécifique en effectuant une conversion. Initialement, les premiers convertisseurs de puissance électrique utilisaient des machines électriques mécaniquement couplées. Cependant, l'émergence des semi-conducteurs et de l'électronique de puissance, tels que les diodes, les transistors et les thyristors, a permis le développement de systèmes de conversion de plus en plus avancés, éliminant ainsi le besoin de machines rotatives. Nous sommes maintenant à une époque où les convertisseurs statiques sont prédominants.

On distingue plusieurs familles de convertisseurs statiques :

Continu -----> Continu (Hacheur)

Continu -----> Alternatif (Onduleur)

Alternatif -----> Alternatif (Gradateur)

Alternatif -----> Continu (Redresseur)

Ce premier chapitre se concentre sur la modélisation mathématique de l'onduleur triphasé de tension, qui joue un rôle essentiel dans la conversion continue-alternative. L'onduleur permet de générer une tension alternative à partir d'une source de tension continue. [1]

I.2. Définition de l'onduleur de tension

Les onduleurs, également connus sous le nom de convertisseurs statiques, jouent un rôle crucial dans la conversion d'une tension continue (DC) en une tension alternative (AC) ajustable en termes d'amplitude et de fréquence. Pour ce faire, ils utilisent des dispositifs de puissance tels que les IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor), les MOSFET (Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor) ou les thyristors. Dans le cadre de ce premier chapitre, nous abordons la modélisation mathématique spécifique à l'onduleur triphasé de tension. Pour faciliter la compréhension, la Figure (I.1) présente un schéma synoptique représentatif de l'onduleur de tension évoqué. [2]

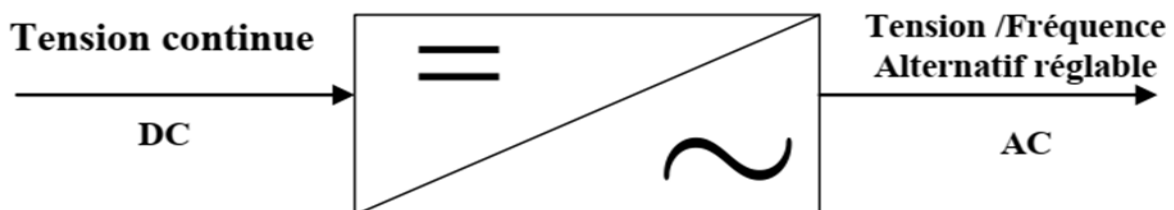


Figure (I.1): Schéma synoptique de l'onduleur de tension.

I.3. Classification des onduleurs

Les onduleurs de tension sont de nombreuses structures et cela est dû à leurs applications et contrôles. Les onduleurs de tension peuvent être classés selon les critères suivants:

- Nombre de phase;
- Nature de la source d'entrée;
- Nature des interrupteurs;
- Nombre des niveaux de tension de sortie.

I.3.1. Classification selon le nombre de phases

I.2.4.5 Onduleurs monophasés

Pour générer une tension alternative à partir d'une tension continue en utilisant deux interrupteurs, il existe plusieurs configurations possibles en fonction de l'emplacement du point milieu. Ces configurations comprennent :

- l'onduleur monophasé avec transformateur de sortie à point milieu appelé onduleur push-pull (figure (I.2)).
- l'onduleur monophasé avec diviseur capacitif à l'entrée appelé onduleur en demi pont. (figure (I.3)).
- Si on veut varier la largeur relative des créneaux formant les alternances de la tension de sortie, il faut quatre interrupteurs c'est l'onduleur monophasé en pont (figure (I.4)). [3]

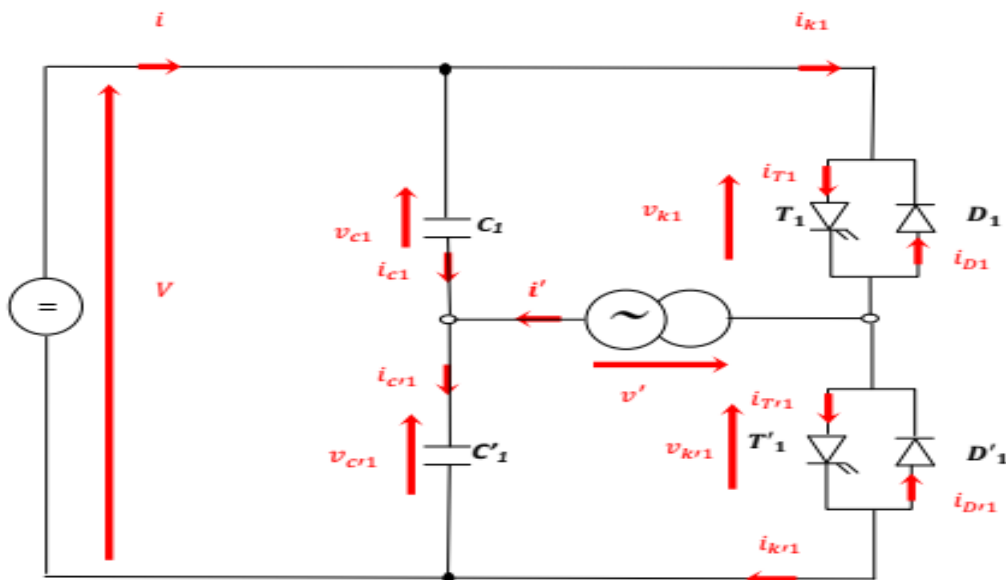


Figure (I.2) : Onduleur monophasé avec diviseur capacitif

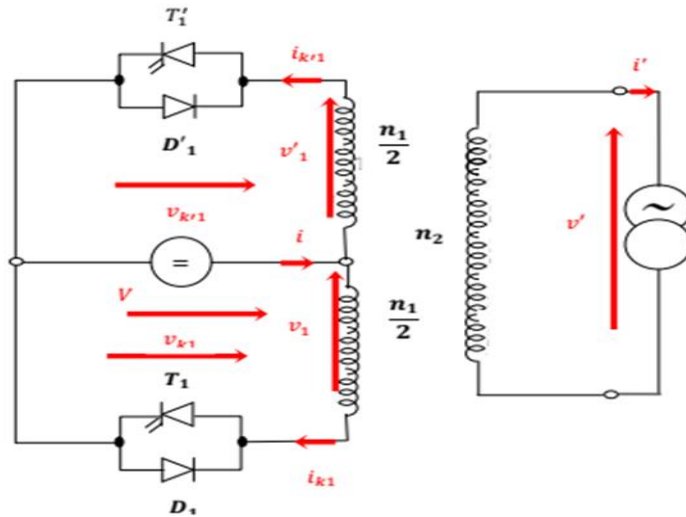


Figure (I.3) : Onduleur monophasé avec transformateur de sortie à point milieu

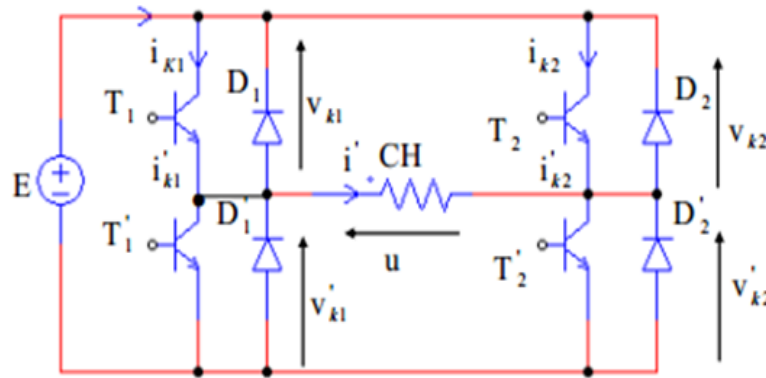


Figure (I.4) : Onduleur monophasé en pont

II.2.4.5 Onduleurs triphasés

Le schéma simplifié d'un onduleur triphasé à deux niveaux est montré dans la figure (I.5)

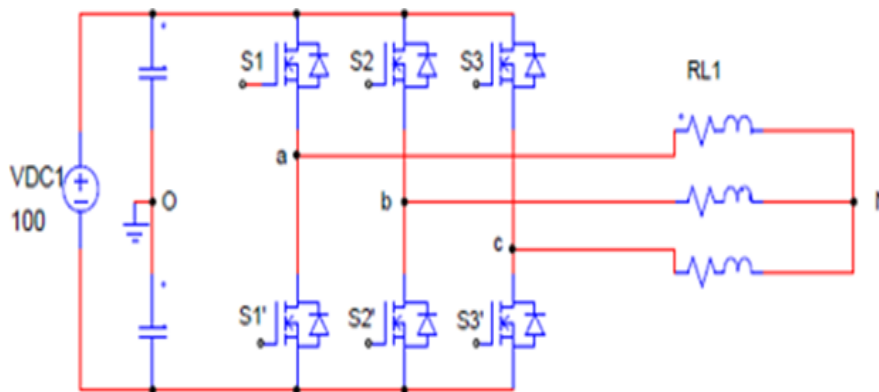


Figure (I.5) : Structure d'un onduleur de tension triphasé

I.3.2. Classification selon la nature de la source d'entrée

L'onduleur de tension est alimenté par une source de tension continue et régule la tension de sortie en fonction de sa commande, tandis que la charge détermine l'intensité du courant. En revanche, l'onduleur de courant est alimenté par une source de courant continu et régule le courant de sortie par sa commande, la tension de sortie étant déterminée par la charge.

I.3.3. Classification selon la nature des interrupteurs de puissance

On peut classer également les onduleurs selon le type des interrupteurs de puissance. Ces derniers peuvent être des interrupteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture (transistor Mosfet, figure I.6(a), IGBT figure I.6(b)), ou des interrupteurs commandés seulement à la fermeture (thyristors)[4]

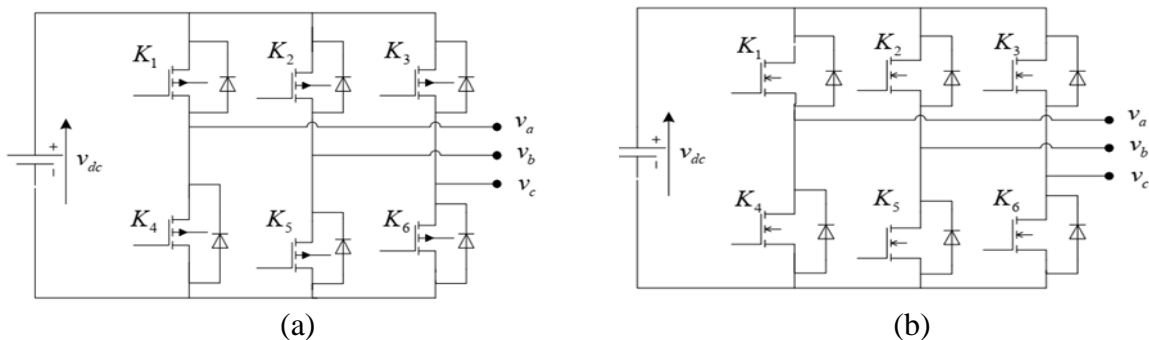


Figure (I.6) : Onduleur de tension. (a) à base des Mosfet, (b) à base des IGBT

- Description IGBT

Les IGBT sont utilisés dans des applications telles que les moteurs de traction à commutation pour les voitures et les trains, les alimentations haute tension et dans les applications aérospatiales telles que l'alimentation à découpage (SMPS) pour réguler la tension continue. Défaillance Ces clés peuvent réduire l'efficacité du système ou entraîner une défaillance du système. Les IGBT ont des propriétés de commutation similaires à MOSFET et ses capacités de courant et de haute tension Transistor à jonction bipolaire (BIT). Structure IGBT Ressemble à la force de diffusion verticale MOSFET [5]

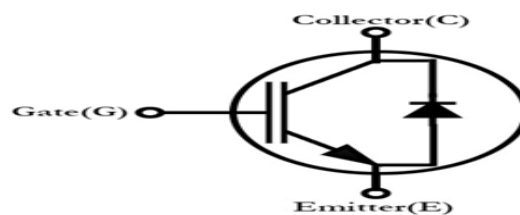


Figure (I.7) : Symbole du circuit IGBT

- **Description MOSFET**

Les MOSFET, également connus sous le nom de FET à grille isolée (IGFET), contiennent des semi-conducteurs de type P ou de type n. L'électrode de grille de ces dispositifs est constituée d'un oxyde métallique isolé électriquement du canal par une fine couche de matériau isolant, le matériau isolant étant généralement constitué de dioxyde de silicium. La tension appliquée à la grille dans les MOSFET contrôle le flux de courant à travers le canal généré entre la source et les stations de drainage, déterminant ainsi la conductivité systémique. Les MOSFET sont généralement exécutés en deux modes, y compris le mode d'optimisation et le mode d'épuisement. Le mode d'épuisement offre une connectivité maximale lorsqu'aucune tension n'est appliquée à la grille. [6]

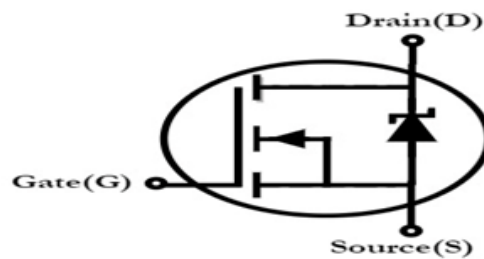


Figure (I.8): Symbole du circuit MOSFET

- **Domaine d'application IGBT et MOSFET**

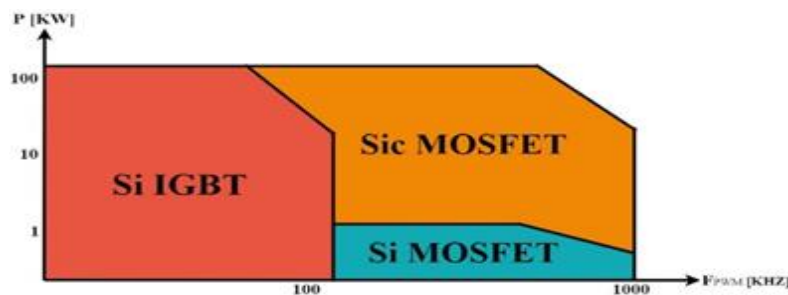


Figure (I.9): domaine d'application IGBT et MOSFET

Récemment, des MOSFET 10kV ont été développés lorsque le niveau de tension est élevé, il est recommandé d'utiliser des matrices IGBT pour une faible perte de conductivité par rapport aux MOSFET [7]

I.3.4. Structure général d'un onduleur triphasé à deux niveaux

La structure de l'onduleur comprend une source de tension continue et trois bras, chacun comprenant deux commutateurs bidirectionnels. Ces commutateurs peuvent être des transistors avec une diode en parallèle. Différents types de transistors sont utilisés en fonction des puissances et des fréquences requises : des MOSFET pour les basses puissances et les très hautes fréquences, des IGBT pour les grandes puissances et les hautes fréquences, et des GTO pour les très grandes puissances et les basses fréquences. Des diodes sont également utilisées pour permettre la circulation du courant dans les deux sens. La Figure (I.10) présente la structure d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux basé sur des IGBTs. [8]

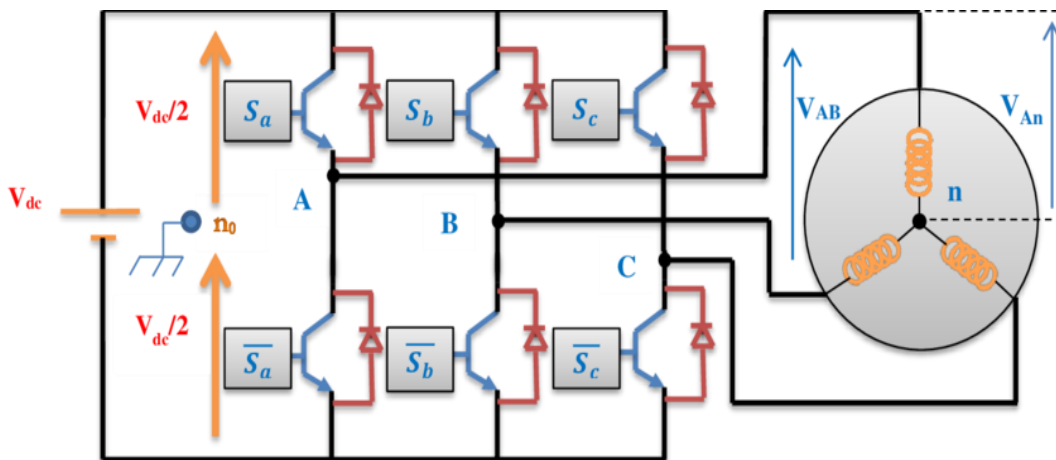
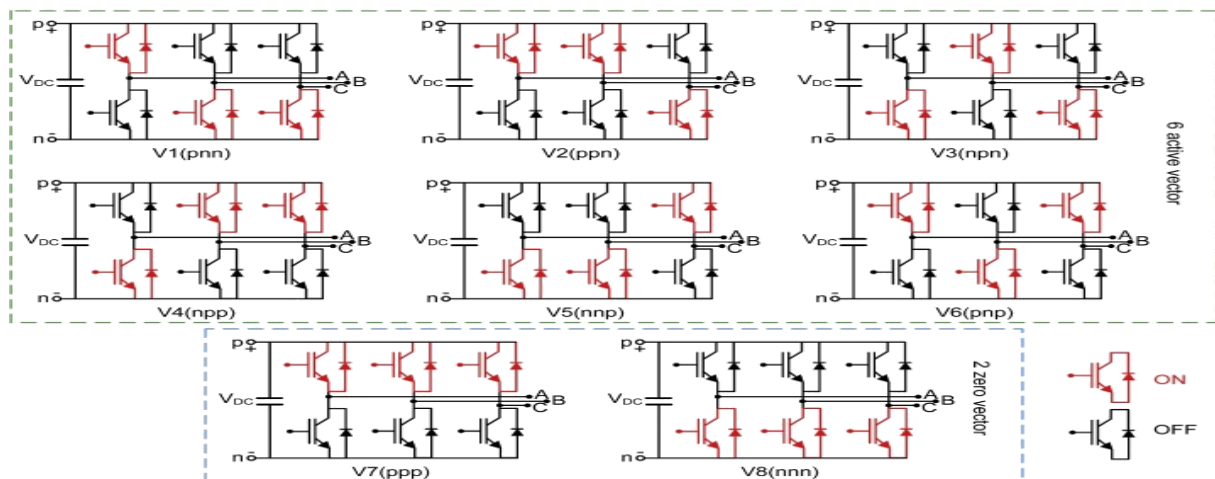


Figure (I.10) : Structure d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux.



Étapes du principe de fonctionnement de l'onduleur

I.4. Modélisation de L'onduleur de Tension :

L'onduleur de tension est un convertisseur statique qui permet de convertir la tension d'une source continue en une tension alternative. Il est composé de cellules de commutation utilisant généralement des transistors ou des thyristors GTO pour les applications de grandes puissances.

La configuration de l'onduleur comprend six interrupteurs bidirectionnels, où chaque interrupteur est composé d'un transistor (T) et d'une diode (D) montés en inverse (Figure (I.11)). Les paires d'interrupteurs (K11, K21), (K12, K22), (K13, K23) sont commandées de manière complémentaire pour assurer la continuité des courants dans les phases statoriques de la machine et éviter les courts-circuits avec la source. Les diodes D_{ij} ($ij=1, 2, 3$) sont des diodes de roue libre qui assurent la protection des thyristors.

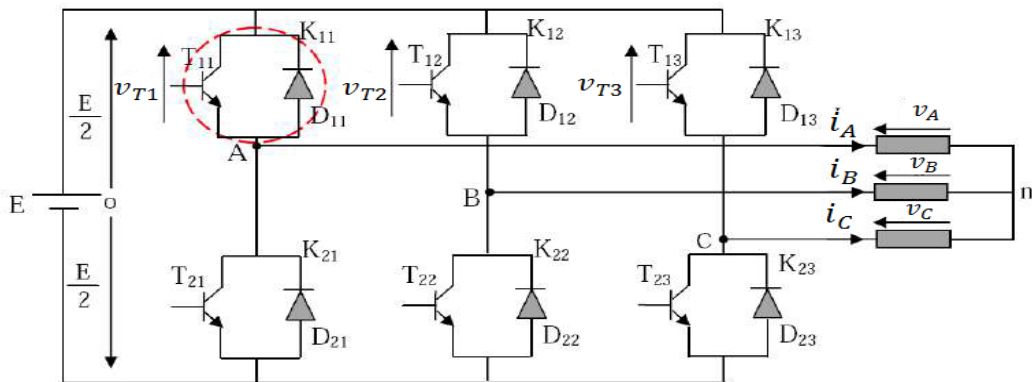


Figure (I.11) : Onduleur de tension triphasé à deux niveaux

En mode commandable, le bras est un commutateur à deux Formalisme qui permet d'obtenir à la Sortie deux niveaux de tension. Un bras de l'onduleur est représenté par la figure (I.12).

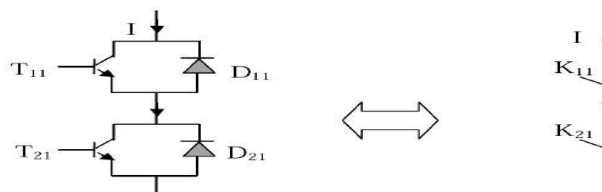


Figure (I.12): Représentation d'un GTO

Afin d'éviter un court-circuit de la source de tension continue, il est nécessaire que les commandes des interrupteurs appartenant au même bras soient complémentaires. Dans le but de simplifier l'étude, nous considérerons une configuration de couplage en étoile sans point neutre (bien que le couplage en triangle puisse également être envisagé). Cette configuration

permet d'éliminer les harmoniques de rang trois et leurs multiples, de sorte que le système triphasé obtenu en sortie de l'onduleur est un système triphasé équilibré en tension, ne contenant que les harmoniques impairs multiples de trois.

Afin de convertir une tension continue en une tension alternative, il est nécessaire de découper la tension d'entrée et de l'appliquer à la charge dans des directions alternatives. L'onduleur, alimenté par une source de tension idéale, utilise l'ouverture et la fermeture des interrupteurs pour générer une tension alternative sous la forme de créneaux rectangulaires successifs. La période de fonctionnement de ces interrupteurs est déterminée par leur commande.

Les équations de tension simples appliquées aux trois phases sont

$$\begin{cases} v_A = v_{AO} + v_{On} \\ v_B = v_{BO} + v_{On} \\ v_C = v_{CO} + v_{On} \end{cases} \quad (\text{I.1})$$

$$\text{Par addition on a : } v_A + v_B + v_C = v_{AO} + v_{BO} + v_{CO} + 3v_{On} \quad (\text{I.2})$$

Sachant que le système des tensions triphasées sinusoïdales est symétrique.

$$\text{Donc : } v_{AO} + v_{BO} + v_{CO} + 3v_{On} = 0 \quad (\text{I.3})$$

$$\text{D'où : } v_{On} = -\frac{1}{3}(v_{AO} + v_{BO} + v_{CO}) \quad (\text{I.4})$$

On remplace (I.3) dans (I.4), on aura le système suivant :

$$\begin{cases} v_A = \frac{2}{3}v_{AO} - \frac{1}{3}v_{BO} - \frac{1}{3}v_{CO} \\ v_B = -\frac{1}{3}v_{AO} + \frac{2}{3}v_{BO} - \frac{1}{3}v_{CO} \\ v_C = -\frac{1}{3}v_{AO} - \frac{1}{3}v_{BO} + \frac{2}{3}v_{CO} \end{cases} \quad (\text{I.5})$$

On peut écrire le système (I.5) sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{AO} \\ v_{BO} \\ v_{CO} \end{bmatrix} \quad (\text{I.6})$$

Avec

$$\begin{cases} v_{AO} = \frac{E}{2} F_1 \\ v_{BO} = \frac{E}{2} F_2 \\ v_{CO} = \frac{E}{2} F_3 \end{cases} \quad (I.7)$$

Tel que : $\begin{cases} F_1 = 1 \text{ si } K_{11} \text{ fermé} & \text{si non } F_1 = -1 \text{ donc } K_{11} \text{ ouvert.} \\ F_2 = 1 \text{ si } K_{12} \text{ fermé} & \text{si non } F_2 = -1 \text{ donc } K_{12} \text{ ouvert.} \\ F_3 = 1 \text{ si } K_{13} \text{ fermé} & \text{si non } F_3 = -1 \text{ donc } K_{13} \text{ ouvert.} \end{cases} \quad (I.8)$

On remplace (II.7) dans (II.8), on aura le système suivant :

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} = \frac{E}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (I.9)$$

Le système (II.9) représente le modèle mathématique de l'onduleur triphasé à MLI. Le tableau ci-dessous montre les expressions qui prennent les tensions simples et les tensions composées, en fonction de l'état ouvert ou fermé des interrupteurs K_1, K_2, K_3 (les états de K_4, K_5, K_6 sont respectivement complémentaires de ceux de K_1, K_2, K_3).

Tableau (I.1) : Etablissement des expressions des tensions simples et composées

K_{11}	K_{12}	K_{13}	v_{AO}	v_{BO}	v_{CO}	v_A	v_B	v_C	v_{AB}	v_{BC}	v_{CA}
F	F	F	E/2	E/2	E/2	0	0	0	0	0	0
F	0	F	E/2	-E/2	E/2	E/3	-2E/3	E/3	E	-E	0
F	F	0	E/2	E/2	-E/2	E/3	-E/3	-2E/3	0	E	-E
F	0	0	E/2	-E/2	-E/2	2E/3	-E/3	-E/3	E	0	-E
0	F	F	-E/2	E/2	E/2	-2E/3	E/3	E/3	-E	0	E
0	0	F	-E/2	-E/2	E/2	-E/3	-E/3	2E/3	0	-E	E
0	F	0	-E/2	E/2	-E/2	E/3	2E/3	-E/3	-E	E	0
0	0	0	-E/2	-E/2	-E/2	0	0	0	0	0	0

I.5. Conclusion :

En conclusion, les convertisseurs statiques, tels que l'onduleur triphasé de tension, jouent un rôle crucial dans la conversion de l'énergie électrique. Grâce aux avancées dans les semi-conducteurs et l'électronique de puissance, les convertisseurs de puissance ont évolué vers des systèmes plus avancés, éliminant le besoin de machines rotatives.

La modélisation mathématique de l'onduleur triphasé permet de décrire son comportement en utilisant des équations électriques, des équations de commutation et des méthodes de modulation de la largeur d'impulsion. Ce modèle est utilisé pour analyser et prédire le fonctionnement du système, concevoir des stratégies de contrôle, optimiser les performances et évaluer les pertes d'énergie

Chapitre II : Commande linéaire d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux

II.1. Introduction

Au cours de ce chapitre, nous allons aborder l'étude fréquentielle d'onduleurs fonctionnant en Modulation de Largeur d'Impulsion. L'onduleur sera considéré comme un amplificateur de puissance. Son rôle sera de restituer une tension de sortie la plus fidèle possible au signal modulant qu'on lui envoie en entrée. Pour l'étude fréquentielle, nous choisirons une modulante sinusoïdale à une fréquence donnée. Évaluation et optimisation de la bande passante des convertisseurs statique application aux nouvelles structures multicellulaires [9]

Plusieurs stratégies de modulations peuvent être utilisées pour piloter les onduleurs de tension, à savoir la modulation plein ondes, la modulation de la largeur d'impulsion sinusoïdale (MLI), la modulation à hystérésis et la modulation vectorielle (en anglais Space Vector Modulation (SVM)). Dans ce chapitre nous allons étudier la commande de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux. Dans la première partie de ce chapitre, nous allons présenter brièvement les techniques de modulation les plus reconnues dans la littérature. Ensuite nous allons détailler le principe de la modulation SVM.

Dans la deuxième partie de ce chapitre nous allons présenter une structure de commande. Enfin, nous allons valider par simulation l'algorithme en boucle ouverte de la modulation SVM. Et les performances de la structure de commande synthétisée en considérant plusieurs tests de robustesse tels que la variation de la tension de référence et la variation de la charge.

II.2. Techniques de commande onduleur triphasé

II.2.1. Commande par hystérésis

Pour les commandes à modulation à seuil de limite instantanée (M.S.L.I.), il est essentiel d'incorporer un régulateur de courant en amont du modulateur pour protéger l'onduleur contre les éventuelles surcharges. La commande par hystérésis permet à la fois la modulation et la protection contre les surcharges ou les court-circuits. De plus, le nombre de commutations par période varie automatiquement en fonction des variables de commande. On distingue généralement deux types de commandes par hystérésis.

- commande par hystérésis constant étude et réalisation des lois de commande par mode de glissement et par approche géométrique:

Application à un onduleur de tension monophasé [10]

Dans la commande par hystérésis, l'erreur est comparée à une bande de tolérance appelée bande d'hystérésis. Lorsque l'erreur atteint la limite inférieure ou supérieure de cette bande, un ordre de commande est généré afin de maintenir l'erreur à l'intérieur de la bande.

Le principe de cette modulation est montré par la figure (II.1).

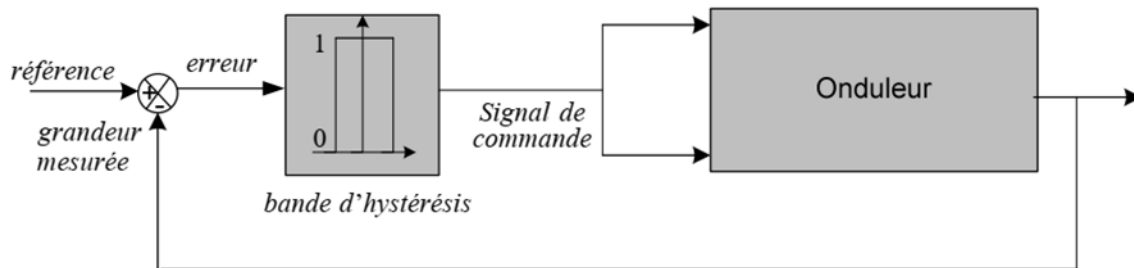


Figure (II.1) : Principe de la modulation à hystérésis.

II.2.2. Commande plein onde

La tension de sortie d'un onduleur est composée de créneaux rectangulaires, ce qui entraîne une présence significative d'harmoniques. Le filtrage de cette tension rectangulaire à la fréquence industrielle peut être complexe et coûteux. On distingue généralement deux types de commandes dans ce contexte:

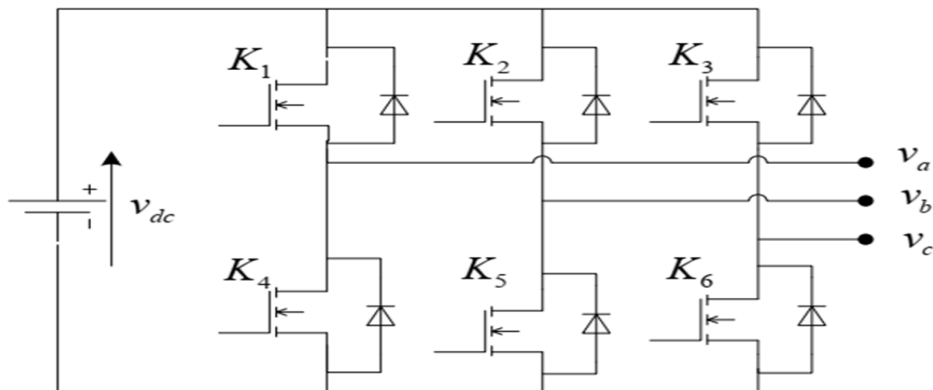


Figure (II.2) : Onduleur de tension triphasé.

II.2.4.5 Commande plein onde 180°

- La commande de chaque demi-point est symétrique.
- Les commandes des demis ponts sont décalées de $T/3$ l'une par rapport à l'autre.
- Les interrupteurs K_1 et K_4 , K_2 et K_5 , K_3 et K_6 doivent être complémentaires deux

à deux. L'ouverture et la fermeture des six interrupteurs déterminent six intervalles distincts. Durant chaque période des grandeurs de sortie. La figure II.3 montre l'état des interrupteurs K1, K2, K3 de l'onduleur triphasé [11]

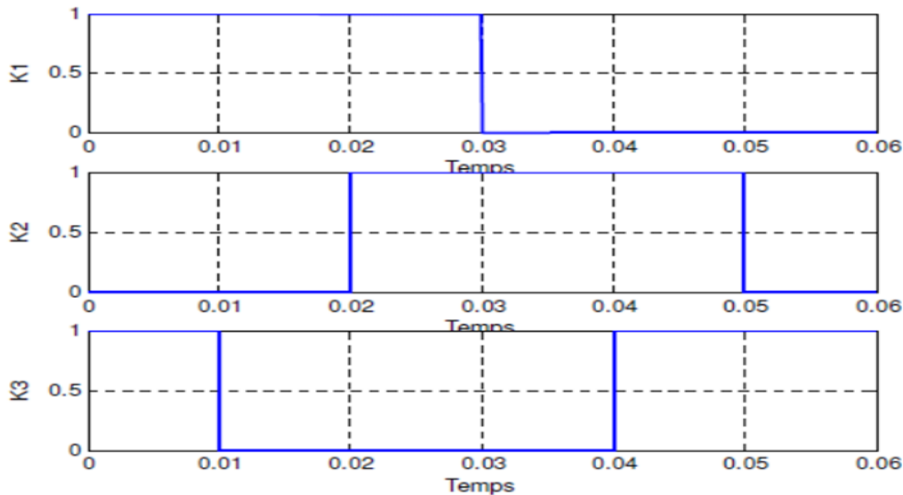


Figure (II.3) : Formes des signaux de commande des interrupteurs K1, K2, K3

II.2.4.5 Commande plein onde décalée 120

La commande 120 délivre une tension de sortie avec un spectre d'harmoniques similaire à celui obtenue dans la commande 180° avec l'avantage de réduction de la durée de conduction des transistors.

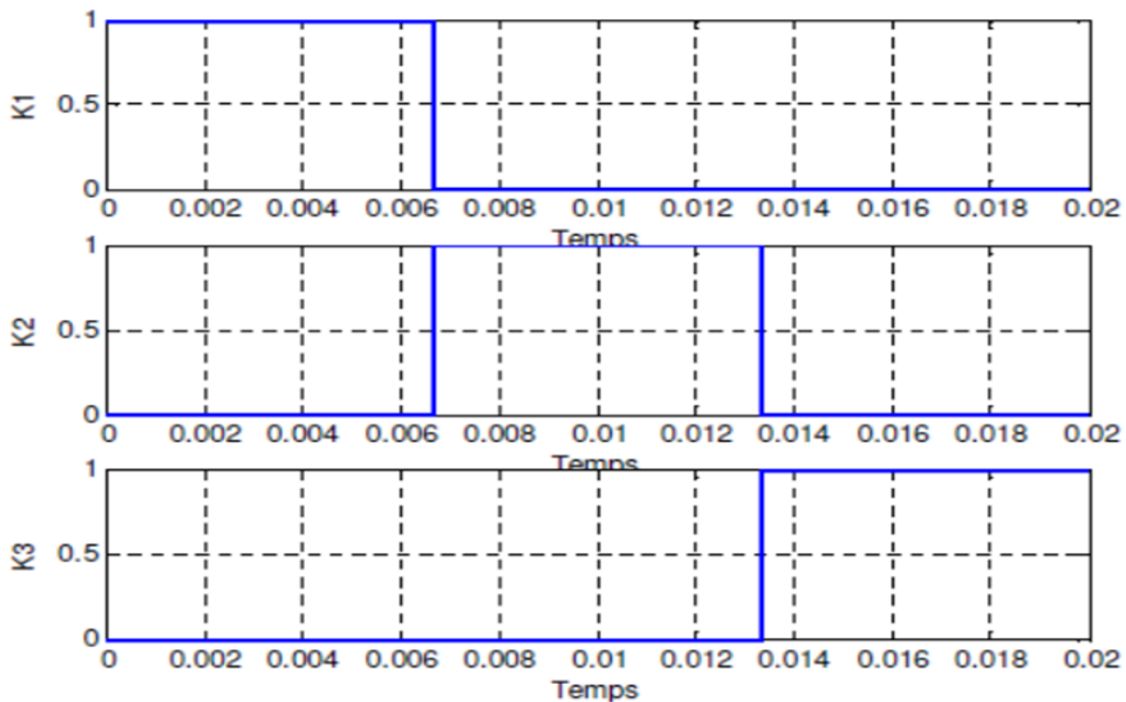


Figure (II.4): Formes des signaux de commande des interrupteurs K1, K2, K3

II.2.3. Commande par la modulation de largeur d'impulsion

La modulation de largeur d'impulsion (PWM, Pulse Width Modulation en anglais) est une technique qui consiste à adapter une fréquence de commutation plus élevée que la fréquence des grandeurs de sortie. Elle permet de former chaque alternance de la tension de sortie en utilisant une séquence de créneaux de largeurs appropriées. Cette approche peut être considérée comme une extension du principe de la commande par découpage, où la durée des impulsions n'est plus régulière, mais est choisie de manière à minimiser les harmoniques de faible rang qui sont difficiles à filtrer. La modélisation et la commande d'un onduleur à modulation de largeur d'impulsion sont des aspects importants à prendre en compte pour assurer un fonctionnement efficace et une réduction des harmoniques indésirables [12]

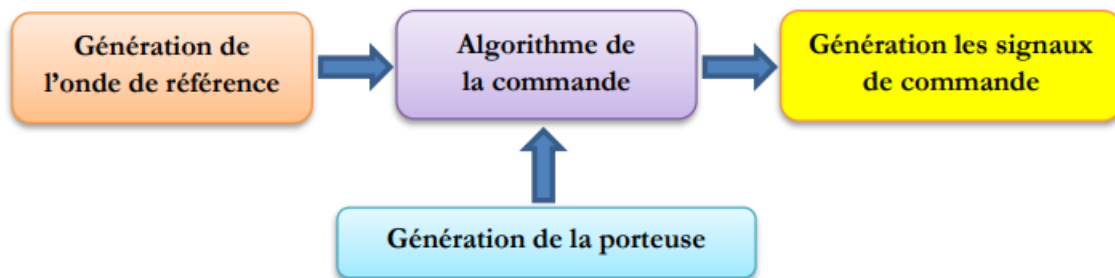


Figure (II.5): Principe de la modulation de largeur d'impulsions.

II.2.4. Commande par MLI vectorielle ou SVM (Space Vector Modulation)

La modulation vectorielle (SVM, Space Vector Modulation en anglais) est une technique largement utilisée dans de nombreuses applications en raison de ses nombreux avantages par rapport aux techniques précédentes, tels que la réduction du taux d'harmoniques (THD), de l'indice de modulation, etc. De plus, elle permet une mise en œuvre relativement simple avec des processeurs numériques.

La modulation vectorielle consiste à obtenir de manière analytique une tension de référence (en valeur moyenne) à partir des états de commutation de l'onduleur. Cela permet de générer des signaux de commande précis pour l'onduleur, en optimisant la qualité de la tension de sortie et en minimisant les distorsions harmoniques indésirables. Cette approche offre une meilleure efficacité et une meilleure précision de contrôle par rapport aux techniques traditionnelles.

La modulation vectorielle présente les avantages suivants par rapport au reste des techniques de modulation:

- Cette technique de modulation est valable pour tous les types de convertisseurs multi niveaux.
- Elle contrôle directement les trois phases de l'onduleur.
- Une bonne utilisation de la tension du bus continu est atteinte car le troisième harmonique est introduit implicitement.
- Le courant de sortie a une ondulation très réduite.
- Les vecteurs redondants fournissent un degré de liberté additionnel.

Ceci permet l'incorporation des fonctions complémentaires comme par exemple l'équilibrage de la tension du bus continu, la minimisation des pertes, la réduction d'harmoniques et la réduction de la tension en mode commun.

- L'implantation physique est relativement simple avec un processeur de signaux numériques. Il y a plusieurs algorithmes utilisant la MLI vectorielle pour commander l'onduleur.

Le but de toutes les stratégies de modulation est de réduire les pertes de commutation et les harmoniques, et d'assurer une commande précise.

II.2.4.5 Représentation vectorielle des vecteurs de tension d'un onduleur à deux niveaux

La structure de l'onduleur de tension à deux niveaux est montrée dans la figure (II.6)

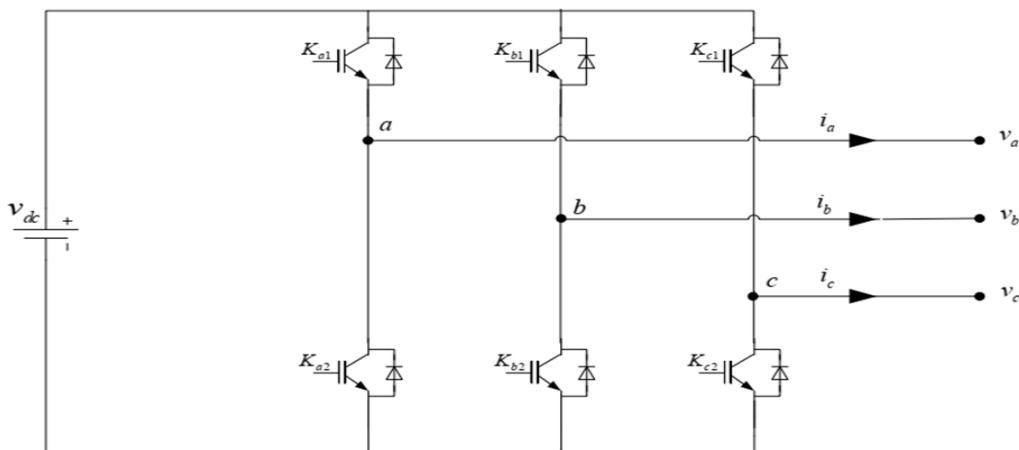


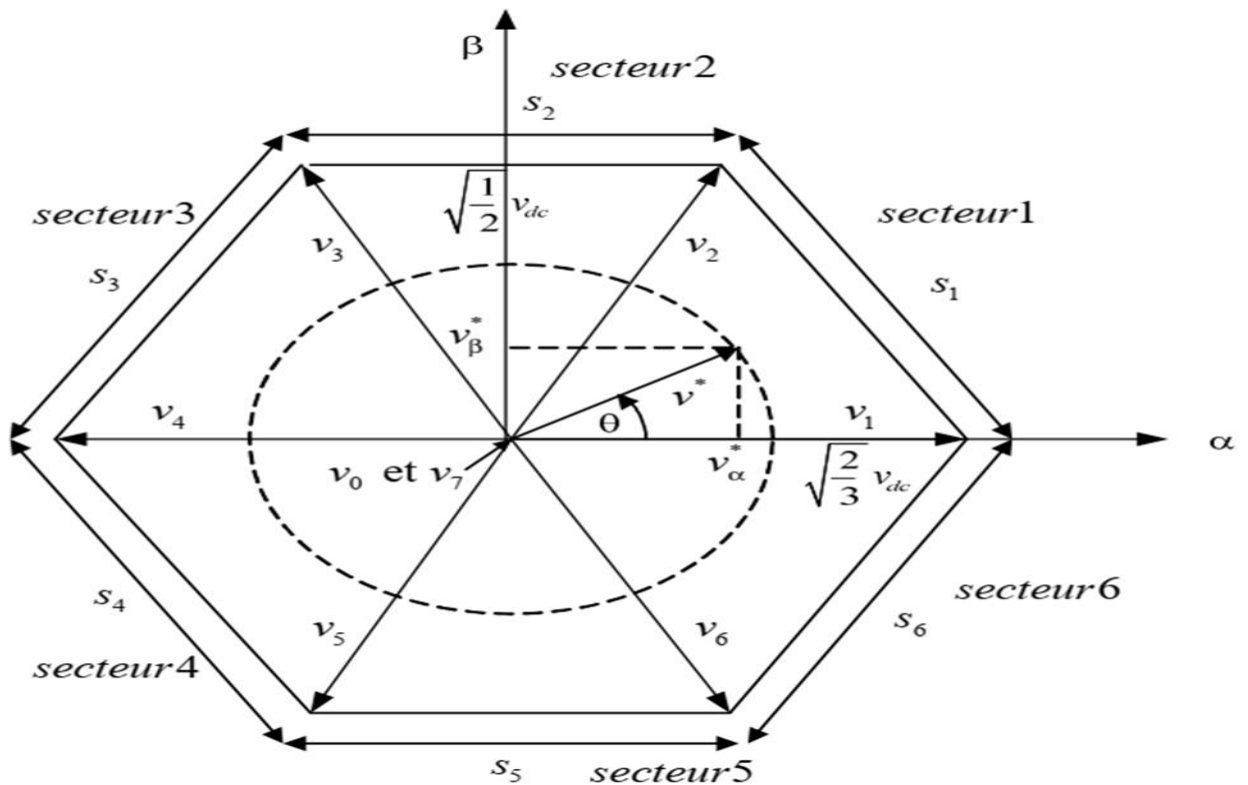
Figure (II.6) : Structure d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux.

Le tableau (II.1) représente les différents états de l'onduleur (000, 100,110, 010, 011, 001, 101,111) et les coordonnées du vecteur de tension de sortie v_i (v_α , v_β) correspondant à chaque état de commutation.

Tableau (II.1) : Etats de l'onduleur et les coordonnées du vecteur v_i dans le plan (α, β)

S_{a1}	S_{b1}	S_{c1}	v_α	v_β	v_i
0	0	0	0	0	v_0
1	0	0	$\sqrt{2/3}v_{dc}$	0	v_1
1	1	0	$\sqrt{1/6}v_{dc}$	$\sqrt{1/2}v_{dc}$	v_2
0	1	0	$-\sqrt{1/6}v_{dc}$	$\sqrt{1/2}v_{dc}$	v_3
0	1	1	$-\sqrt{2/3}v_{dc}$	0	v_4
0	0	1	$-\sqrt{1/6}v_{dc}$	$-\sqrt{1/2}v_{dc}$	v_5
1	0	1	$\sqrt{1/6}v_{dc}$	$-\sqrt{1/2}v_{dc}$	v_6
1	1	1	0	0	v_7

La représentation des vecteurs de tension de l'onduleur dans le plan complexe α, β est illustrée dans la figure (II.7). Ces vecteurs forment le diagramme vectoriel de l'onduleur à deux niveaux, également connu sous le nom d'hexagone de commutation.

**Figure (II.7)** : Diagramme vectoriel de l'onduleur à deux niveaux (hexagone de commutation).

L'objectif de la commande de l'onduleur est de rendre les tensions de sortie v_a , v_b et v_c aussi proches que possible des trois tensions de référence v_a^* , v_b^* et v_c^*

Ces vecteurs peuvent être représentés dans le plan (α, β) par un seul vecteur de référence \vec{v}^* d'amplitude v^* égale à l'amplitude souhaitée des tensions simples, et tournant autour du centre de l'hexagone avec une vitesse angulaire $\omega = d\theta/dt$ constante correspondante à la pulsation électrique souhaitée.

Ce vecteur est défini par :

$$\vec{v}^* = v^* e^{j\theta} \quad (\text{II.1})$$

Si on attribué au vecteur de référence \vec{v}^* uniquement les six positions discrètes de la figure (II.7), la tension de sortie sera riche en harmoniques. Afin de réduire le taux d'harmoniques de la tension de sortie résultante de la forme non circulaire de cet hexagone, on impose au vecteur \vec{v}^* de se positionner à l'intérieur du cercle délimité par l'hexagone. Ainsi, le module maximal admissible du vecteur \vec{v}^* est :

$$v_{max}^* = \sqrt{\frac{1}{2}} v_{dc} \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) = \sqrt{\frac{1}{2}} v_{dc} \quad (\text{II.2})$$

L'équation (II.1) devient:

$$\vec{v}^* = m v_{max}^* e^{j\theta} \quad (\text{II.3})$$

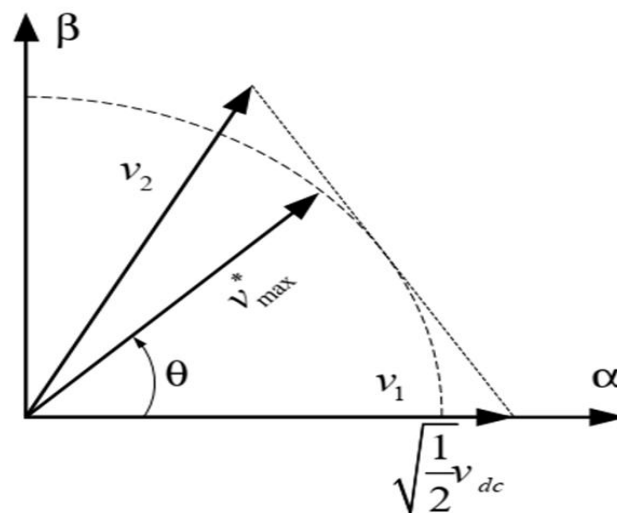


Figure (II.8) : Limitation du vecteur de référence \vec{v}^*

Avec m : le taux de modulation qui a une valeur entre 0 et 1 et défini par la relation suivante :

$$m = (\sqrt{2} v^*) / v_{dc} \quad (\text{II.4})$$

II.2.4.5 Principe de la modulation vectorielle (SVM)

Le principe de la modulation vectorielle spatiale (SVM) consiste à projeter le vecteur de tension de référence désiré v^* sur les deux axes du plan (α, β) . Ces projections sont utilisées pour calculer les temps de commutation souhaités pour les deux états non nuls de l'onduleur. Si nous désignons par t_i et t_{i+1} les deux temps de commutation en question, leur somme doit nécessairement être inférieure à la période de commutation de l'onduleur T_h . Afin de maintenir une fréquence de commutation constante, un état nul de l'onduleur est appliqué pendant le reste de la période T_h . [13]

II.2.4.5 Localisation du vecteur de référence

Afin de déterminer dans quel secteur se trouve le vecteur de tension v^* , deux stratégies sont généralement utilisées. La première consiste à effectuer une série de tests sur les valeurs de v_α^* et v_β^* afin de localiser le secteur qui contient le vecteur de référence, comme illustré dans la figure (II.5).

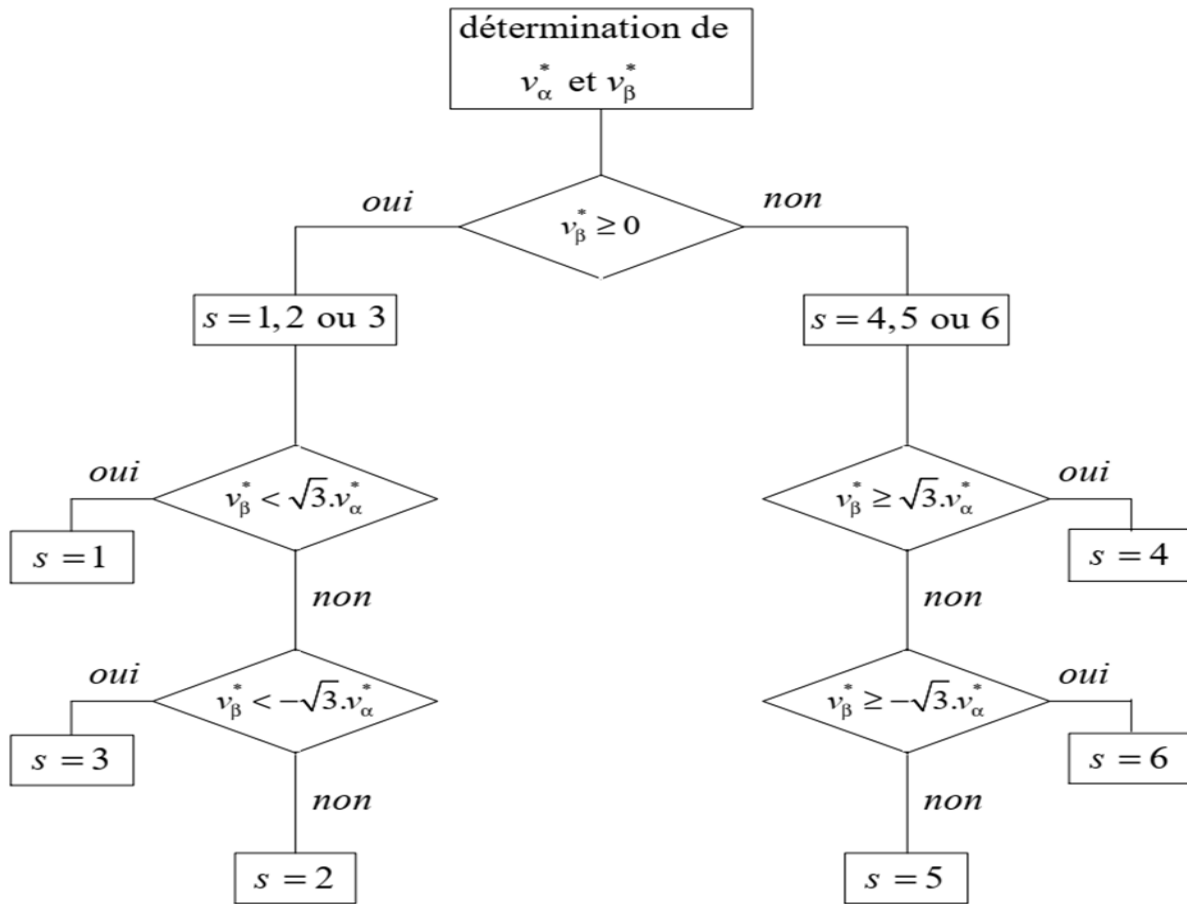


Figure (II.9) : Organigramme de calcul du secteur.

Tandis que la deuxième consiste de faire une série de tests sur l'argument du vecteur de référence θ selon la relation suivante:

$$s = \begin{cases} 1 & \text{si } \theta \in [0, \pi/3] \\ 2 & \text{si } \theta \in [\pi/3, 2\pi/3] \\ 3 & \text{si } \theta \in [2\pi/3, \pi] \\ 4 & \text{si } \theta \in [\pi, 4\pi/3] \\ 5 & \text{si } \theta \in [4\pi/3, 5\pi/3] \\ 6 & \text{si } \theta \in [5\pi/3, 2\pi] \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

À l'intérieur d'une période de commutation de l'onduleur, il existe différentes stratégies pour appliquer les vecteurs afin d'obtenir la tension désirée. Dans le but de réduire les harmoniques, il est préférable de générer des tensions centrées sur la période de commutation de l'onduleur.

Cependant, dans les cas où le système de commande nécessite des tensions supérieures à la valeur maximale de l'algorithme de modulation vectorielle, il sera nécessaire de mettre en place un mécanisme de limitation des tensions de sortie. Ce mécanisme permettra de garantir que les tensions générées restent dans les limites requises.

II.2.4.5 Calcul des temps de commutation

En général, l'onduleur n'est pas en mesure de générer directement le vecteur $v^{\wedge} (\rightarrow^*)$ souhaité, car il ne peut prendre que les huit états discrets illustrés précédemment. Par conséquent, il est nécessaire de construire $v^{\wedge} (\rightarrow^*)$ en utilisant une combinaison des vecteurs nuls (v_0 ou v_7) et des deux vecteurs adjacents v_0 et v_0 du secteur qui contient le vecteur de référence ($i=s$). Ces vecteurs sont appliqués individuellement pendant des durées spécifiques t_i, t_{i+1} et t_0 de manière à ce que $v^{\wedge} (\rightarrow^*)$ corresponde à la valeur moyenne de ces vecteurs pendant une période de découpage. Ainsi, en combinant judicieusement les vecteurs disponibles, on peut approximer le vecteur de tension désiré $v^{\wedge} (\rightarrow^*)$.

$$v^{-*} = v_i^- + v_{i+1}^- + v_0^- \quad (\text{II.6})$$

Avec:

$$v^{\rightarrow*} = \frac{1}{T_h} \int_t^{t+T_h} v^{\rightarrow*} dt \quad (\text{II.7})$$

Puisque le période de découpage T_h est très faible, la valeur moyenne de tension $v^{\rightarrow*}$ peut être considérée comme constante. Et puisque les vecteurs v_i et v_{i+1} sont des vecteurs fixes on a :

$$v_i^- = \frac{1}{T_h} \int_t^{t+t_i} v_i dt = \frac{1}{T_h} v_i t_i \quad (\text{II.8})$$

Et

$$v_{i+1}^- = \frac{1}{T_h} \int_t^{t+t_{i+1}} v_{i+1} dt = \frac{1}{T_h} v_{i+1} t_{i+1} \quad (\text{II.9})$$

L'équation (II.9) devient :

$$T_h v^* = t_{i+1} v_{i+1} + t_i v_i + t_0 v_0 \quad (\text{II.10})$$

Par comparaison des parties réelles et imaginaires des deux membres on obtient :

$$\begin{cases} T_h v_\alpha^* = t_{i+1} v_{i+1}^\alpha + t_i v_i^\alpha \\ T_h v_\beta^* = t_{i+1} v_{i+1}^\beta + t_i v_i^\beta \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

$$\begin{cases} T_h v_\alpha^* = t_{i+1} v_{i+1}^\alpha + t_i v_i^\alpha \\ T_h v_\beta^* = t_{i+1} v_{i+1}^\beta + t_i v_i^\beta \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

Connaissions les valeurs des cordonnées des vecteurs de sortie v_i^α et v_i^β (Tableau II.1). On peut calculer les temps de commutation t_i et t_{i+1} en fonction des cordonnées du vecteur de référence par la résolution du système d'équation (II.12).

Pendant le reste de la période de commutation on applique les vecteurs nuls chacun pendant la moitié de ce temps, donc :

$$t_0 = t_7 \frac{T_h - t_i - t_{i+1}}{2} \quad (\text{II.13})$$

Afin de simplifier l'analyse, on définit les trois variables e, l et k suivants : Les temps t_i et t_{i+1} pour chaque secteur sont exprimés en fonction des variables e, l et k suivant le tableau (II.2) :

Tableau (II.2) : Temps de commutation pour chaque secteur

secteur	1	2	3	4	5	6
t_i	e	l	k	$-e$	$-l$	$-k$
t_{i+1}	k	$-e$	$-l$	$-k$	e	l

$$\begin{cases} e = T_h \frac{\sqrt{3}v_\alpha^* + v_\beta^*}{\sqrt{2}v_{dc}} \\ l = T_h \frac{\sqrt{3}v_\alpha^* - v_\beta^*}{\sqrt{2}v_{dc}} \\ k = T_h \frac{\sqrt{2}v_\beta^*}{v_{dc}} \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

II.2.4.5 Génération des impulsions de commande

L'application des vecteurs d'états durant une période de découpage doit tenir en compte de deux critères:

- Minimisation des harmoniques, par la génération d'une tension de sortie la plus proche que possible de la tension de référence, par l'application du vecteur d'état v_i pendant une durée t_i , le vecteur v_{i+1} pendant une durée t_{i+1} et le vecteur nul pendant le reste de la période. On applique v_0 aux extrémités de la période de découpage et v_7 au centre de cette période.
- Minimisation des pertes dans les interrupteurs par la réduction du nombre de commutation de chaque interrupteur, par l'application du vecteur d'indice impair avant l'application du

vecteur d'indice pair pendant la demi période de découpage et inversement durant l'autre demi période.

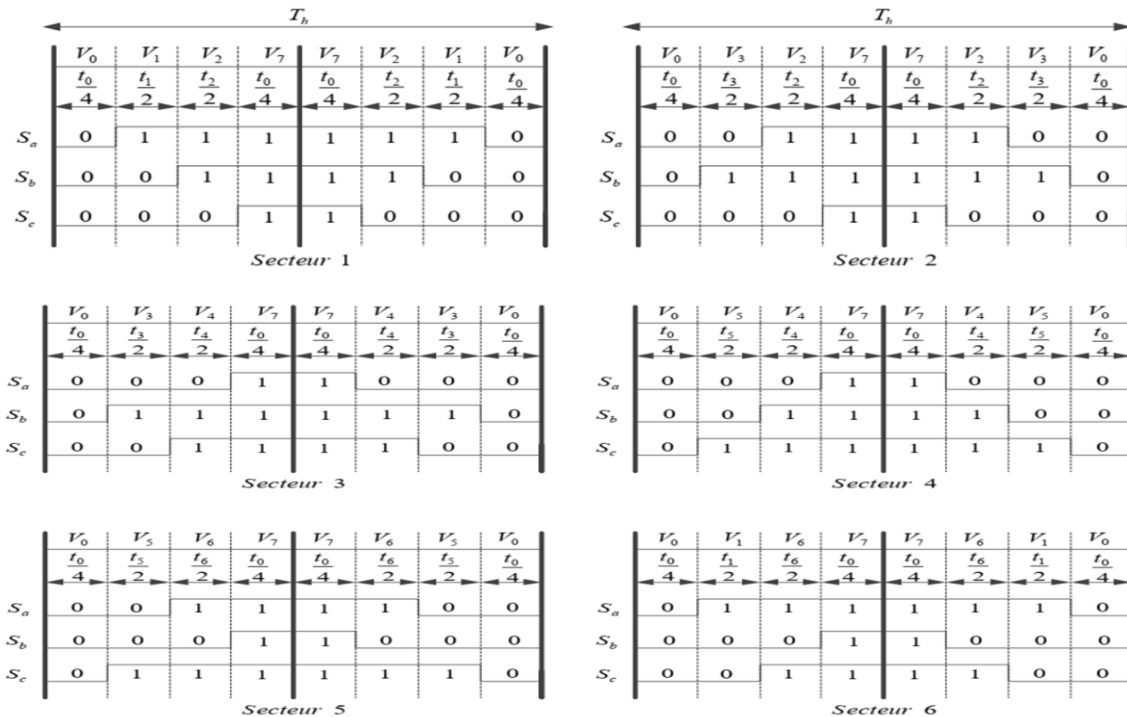


Figure (II.11) : Principe de génération des impulsions de commande par MLI vectorielle.

Si on veut résumer la méthode de calcul de l'algorithme de la modulation SVM, on peut énumérer les points suivants :

- 1- A partir des tensions de référence v_a^* , v_b^* et v_c^* on déduit les composantes du vecteur référence v_α^* et v_β^* dans le repère de (α, β) ;
- 2- Calcul du numéro du secteur s où se situe le vecteur de référence;
- 3- Calcul des temps (t_i , t_{i+1} et t_0) d'application des vecteurs (v_i , v_{i+1} et v_0)
- 4- Génération des impulsions de commandent des interrupteurs.

La figure (II.11), montre un schéma qui résume les étapes à suivre pour développer un algorithme de la modulation vectorielle.

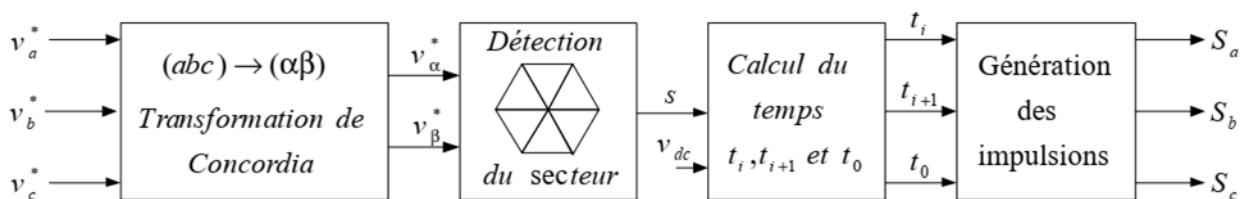


Figure (II.12) : Logigramme de la modulation vectorielle à deux niveaux.

II.3. Simulation des techniques de commande des onduleurs triphasés

II.3.1. Commande symétrique d'un onduleur triphasé

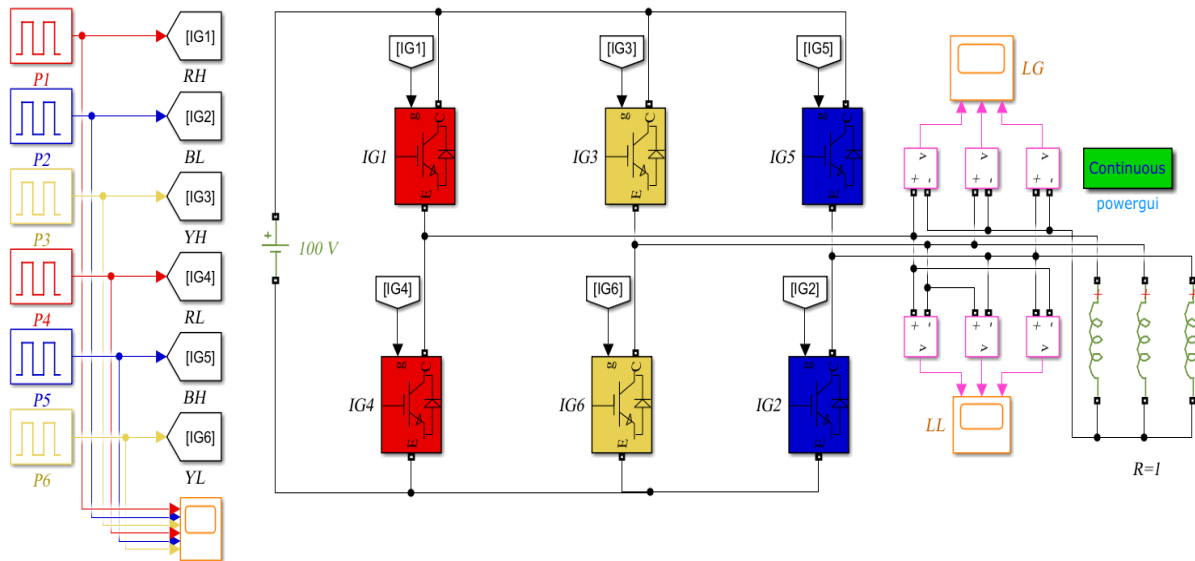


Figure (II-13) : Commande plein onde d'un onduleur triphasé

✓ Résultats et interprétations :

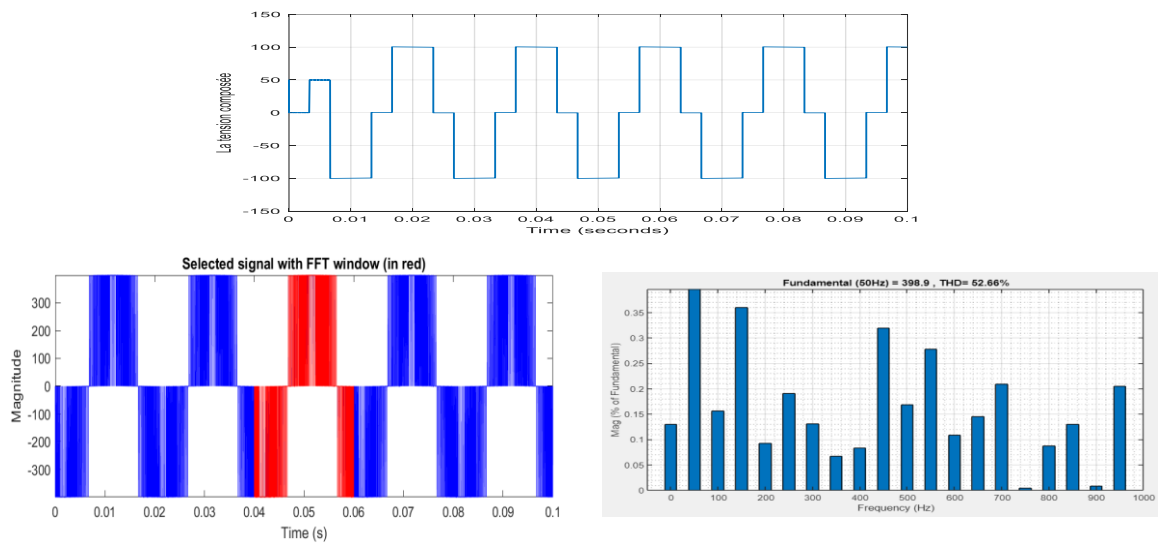


Figure (II-14) : La tension composée avec son spectre pour la commande plein onde

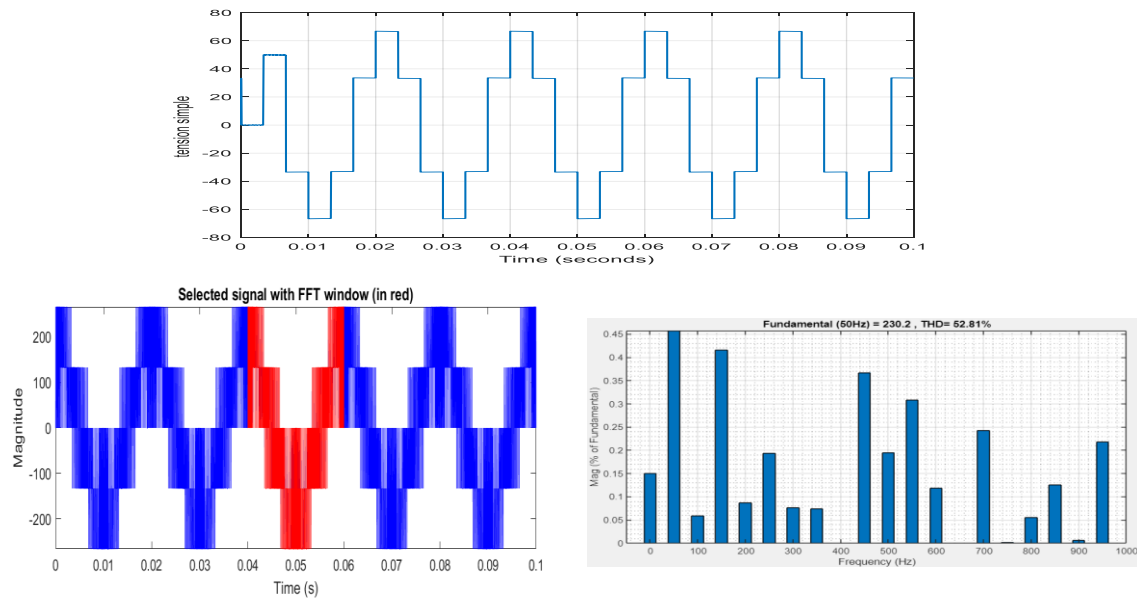


Figure (II-15) : La tension simple avec son spectre pour la commande plein onde

- ✓ **Interprétation des résultats :** La stratégie mentionnée de génération d'une forme d'onde quasi-rectangulaire pour la tension de sortie d'un onduleur conduit à des harmoniques d'ordre inférieur de grande amplitude, qui affectent négativement la distorsion de courant et entraînent un niveau élevé de distorsion harmonique. Il en résulte une mauvaise qualité énergétique. Cependant, une analyse du spectre harmonique révèle l'absence d'harmoniques multiples de 3 dans les tensions individuelles et composites. Cela indique que les harmoniques d'ordre 3, 6, 9, etc. sont effectivement éliminés. Cette élimination sélective d'harmoniques spécifiques est un avantage significatif de cette stratégie.

La tension simple a une valeur maximale de $+2/3 E = +68V$ et une valeur minimale de $-2/3 E = -68 V$. La composante fondamentale de la tension simple a une amplitude de $+46V$. La tension composée a une valeur maximale de $+E = +100 V$ et une valeur minimale de $-E = -100 V$. La composante fondamentale de la tension composée a une amplitude de $+110.27 V$.

II.4. Conclusion

Ce chapitre souligne l'importance d'optimiser la bande passante des convertisseurs statiques pour améliorer les performances de l'onduleur. Des études de simulation et des tests de robustesse valident l'efficacité de l'algorithme de contrôle SVM dans différentes conditions, y compris les variations de tension de référence et de charge.

Dans l'ensemble, l'analyse met en évidence les forces et les limites des différentes stratégies de modulation et jette les bases de recherches futures visant à améliorer l'efficacité et les performances des onduleurs PWM. Il met l'accent sur l'importance de la réduction de la distorsion harmonique, de l'amélioration de la qualité de l'énergie et de la mise en œuvre de mécanismes de contrôle robustes dans la conception des onduleurs PWM.

**Chapitre *III*: La SVM
appliquée aux onduleurs de
tension à deux niveaux**

III.1. Introduction :

Onduleurs de tension à deux niveaux met en évidence leur utilisation dans diverses applications telles que la conversion de l'énergie électrique, la commande de moteurs et l'alimentation de systèmes de distribution d'énergie. Un onduleur de tension à deux niveaux est un dispositif électronique qui convertit une tension continue en une tension alternative à deux niveaux distincts.

L'un des défis majeurs dans la conception d'un onduleur de tension à deux niveaux est de générer une tension de sortie de qualité, qui se rapproche autant que possible d'une onde sinusoïdale. C'est là que la technique de commande de la SVM (Space Vector Modulation) entre en jeu.

Dans cette discussion, nous nous concentrerons sur l'application de la SVM aux onduleurs de tension à deux niveaux. La SVM est une méthode de commande sophistiquée qui permet de manipuler les interrupteurs de puissance de l'onduleur de manière à obtenir une tension de sortie sinusoïdale de haute qualité.

III.2. Simulation de la commande SVM

Simulation de la commande SVM : Exécutez la simulation du modèle de l'onduleur avec la commande SVM générée. La simulation permet de visualiser la forme d'onde de la tension de sortie de l'onduleur et d'analyser les performances, notamment en termes de distorsion harmonique, de réponse transitoire, d'efficacité, etc.

En ajustant les paramètres du système et en modifiant la commande SVM, vous pouvez analyser et optimiser les performances de l'onduleur de tension à deux niveaux pour répondre à vos besoins spécifiques.

Il est important de noter que la simulation de la commande SVM offre une approche virtuelle pour évaluer les performances de l'onduleur. Une mise en œuvre pratique nécessitera une conception matérielle et des contraintes supplémentaires liées aux caractéristiques des composants réels, à la commutation des interrupteurs, aux pertes de conversion.

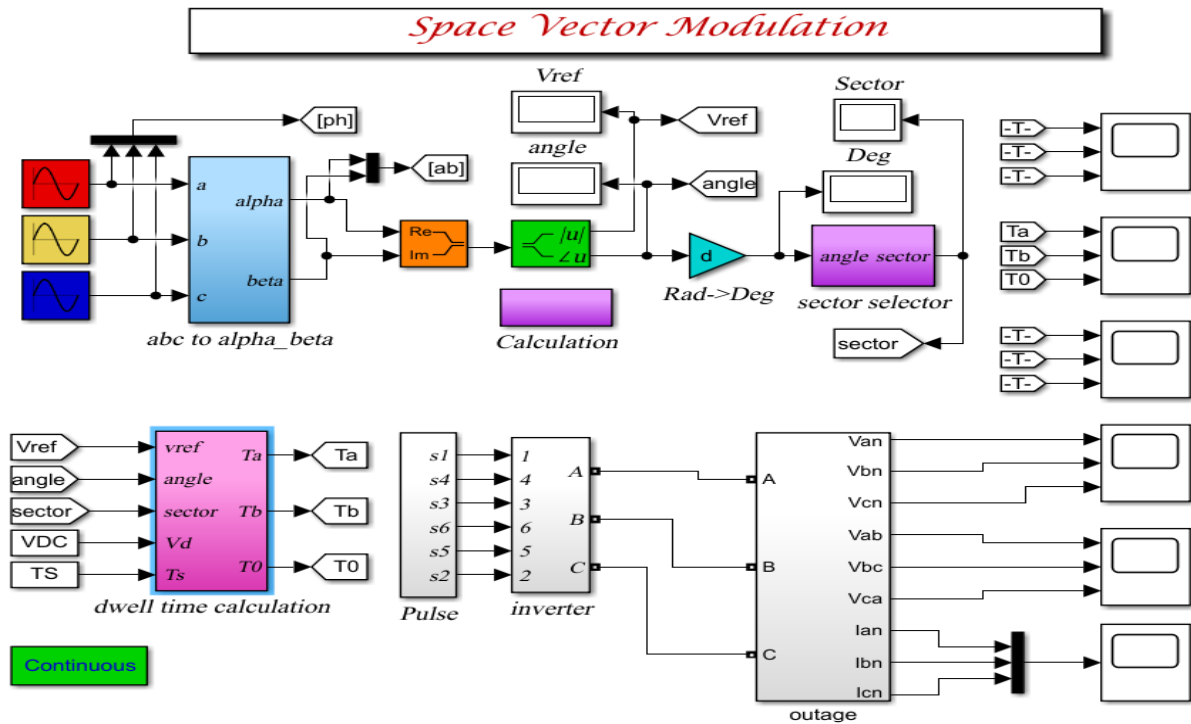


Figure (III-1) : Simulation de la MLI d'un Onduleur triphasé

Simulation de la commande SVM : Utilisez le modèle Simulink de l'onduleur avec les signaux de commande générés pour effectuer la simulation. Exécutez le modèle Simulink dans MATLAB et observez la forme d'onde de la tension de sortie de l'onduleur.

III.3. Interprétation des résultats de simulation :

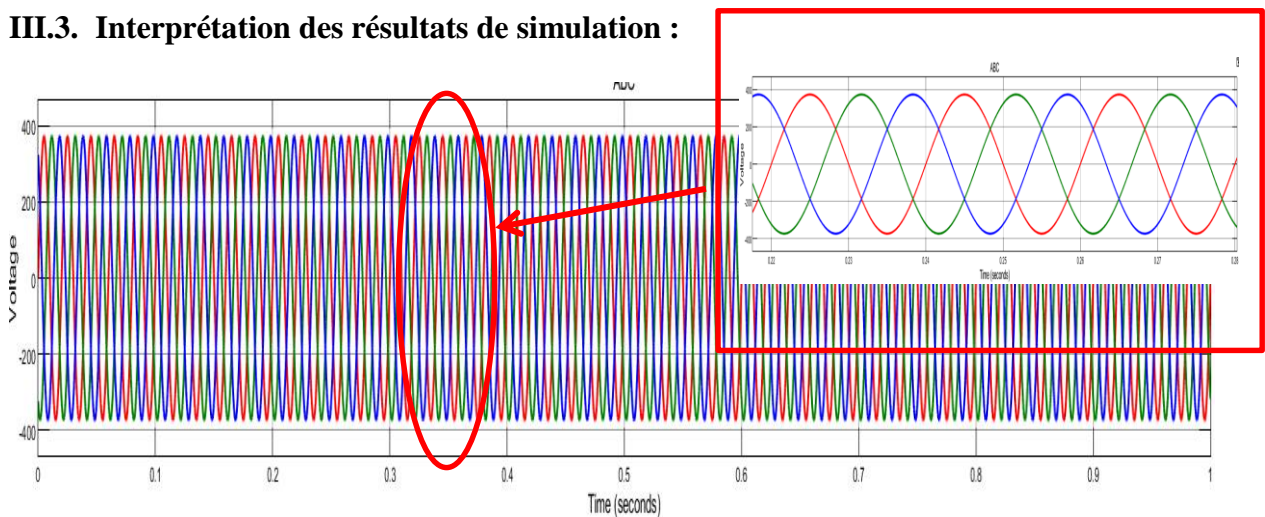


Figure (III-2) :Tension de source3 phases identiques et un déphasage de 120 degrés

Lors de la simulation des onduleurs de tension à deux niveaux, 3 phases identiques et un déphasage de 120 degrés, avec une tension maximale (V_{max}) de 380V, plusieurs résultats peuvent être obtenus et interprétés. Voici quelques points clés que vous pouvez considérer lors de l'analyse des résultats :

Forme d'onde de tension : L'un des aspects les plus importants d'un onduleur de tension est la qualité de la tension de sortie générée. Vous pouvez examiner la forme d'onde de tension générée par l'onduleur pour chaque phase. Dans le cas d'un onduleur à deux niveaux, la forme d'onde de tension est généralement une onde sinusoïdale avec des transitions abruptes entre les niveaux de tension

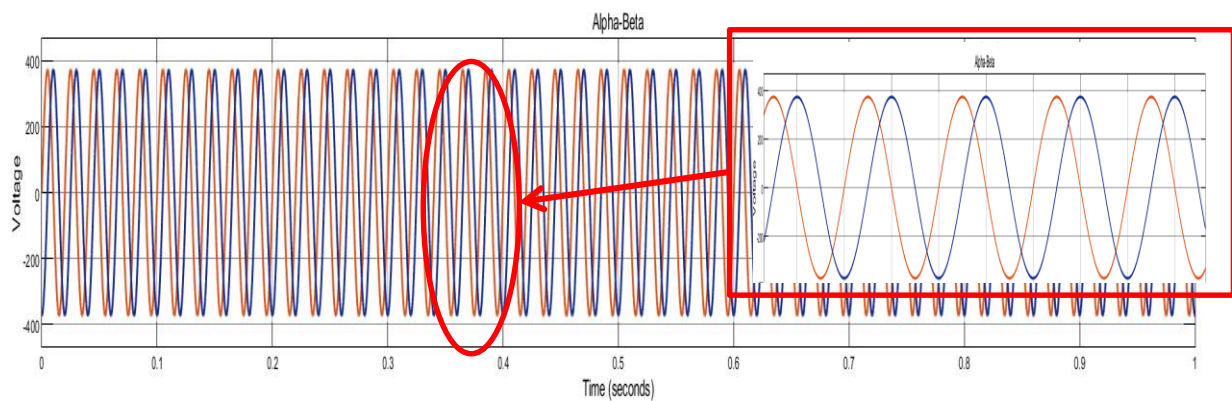


Figure (III-3) : Transformation de Clarke (α , β)

Une fois que la tension de référence est transformée en coordonnées (α , β), une comparaison est effectuée avec des signaux de porteuse (par exemple, une onde triangulaire) pour générer les signaux de commande appropriés pour les interrupteurs de l'onduleur.

Les résultats de la simulation impliquant les coordonneurs (α , β) dépendent des objectifs spécifiques de la simulation. Vous pouvez analyser les valeurs des coordonnées (α , β) pour comprendre les variations de tension de sortie, les niveaux de commutation des interrupteurs de l'onduleur, les pertes de commutation, etc. Ces informations peuvent être utilisées pour évaluer la performance de l'onduleur et optimiser les paramètres de la modulation de largeur d'impulsion.

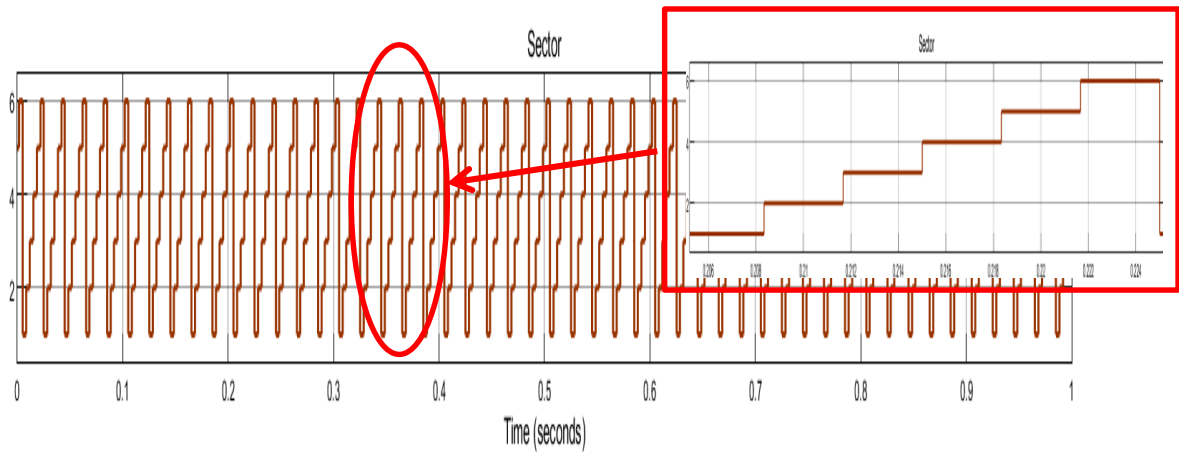


Figure (III-4) : Secteur les interrupteurs d'un onduleur triphasé

Chaque secteur définit les interrupteurs qui sont activés et ceux qui sont désactivés pour générer la tension de sortie souhaitée. La commutation entre les secteurs se produit à des moments précis de la période de modulation, généralement déterminés par la comparaison de la tension de référence avec la forme d'onde de porteuse.

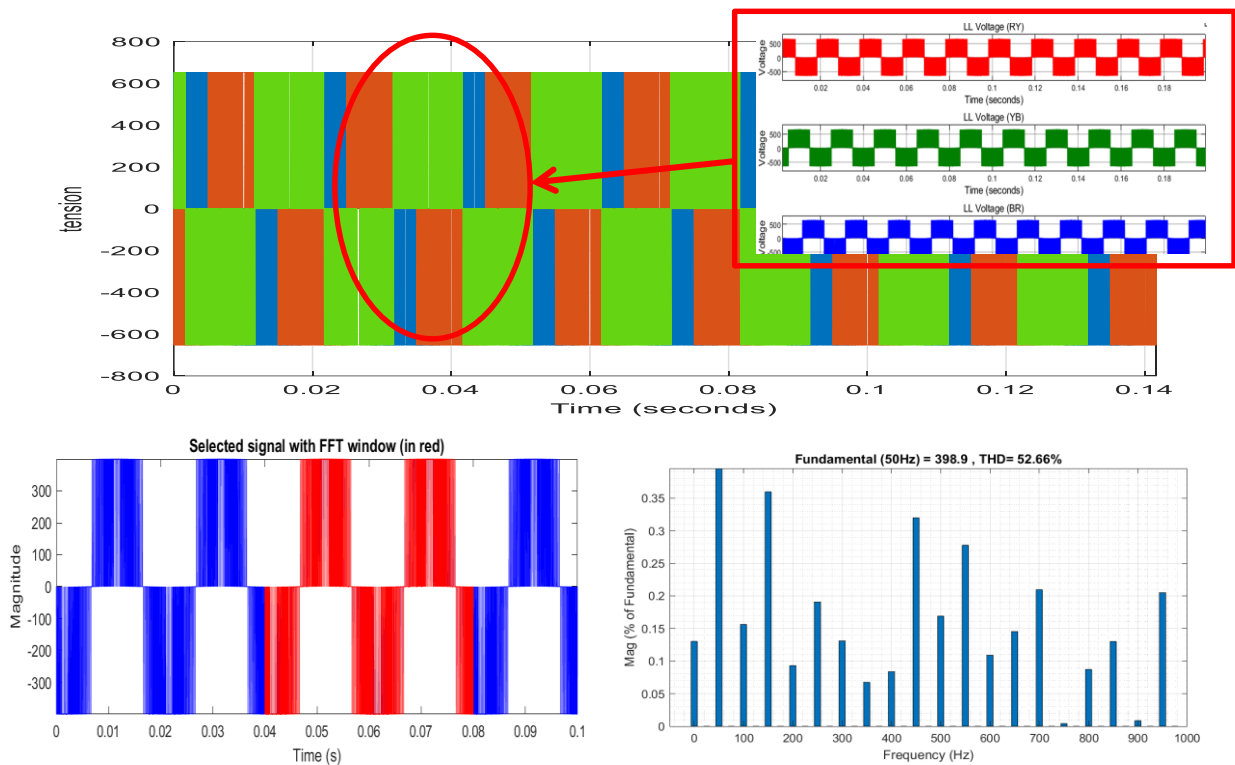


Figure (III-5) : La tension composée d'un onduleur triphasé

Un THD de 52,66 % dans la tension composée indique une distorsion harmonique élevée. Cela peut provoquer des perturbations, une surchauffe des équipements et une inefficacité énergétique. Il est crucial de maintenir un THD faible, notamment dans les systèmes électriques sensibles. Des techniques comme l'utilisation de filtres harmoniques ou

d'onduleurs de meilleure qualité peuvent être nécessaires pour réduire le THD et améliorer la qualité de la tension. La minimisation de la distorsion harmonique est essentielle pour assurer la stabilité et l'efficacité des systèmes électriques.

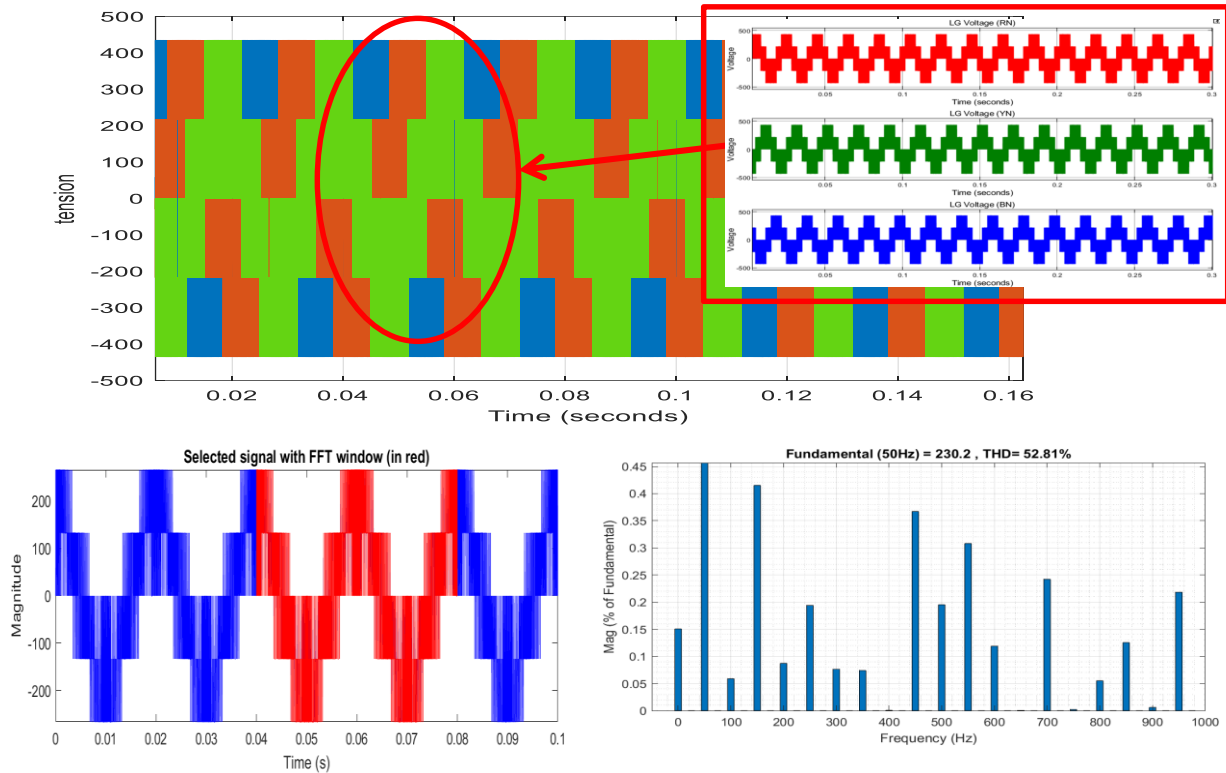


Figure (III-6) : La tension simple d'un onduleur triphasé

Un THD (Total Harmonic Distortion) de 52.81% dans la tension simple indique un niveau élevé de distorsion harmonique présente dans la forme d'onde de la tension. Cela signifie que la distorsion harmonique représente une proportion importante de la tension harmonique.

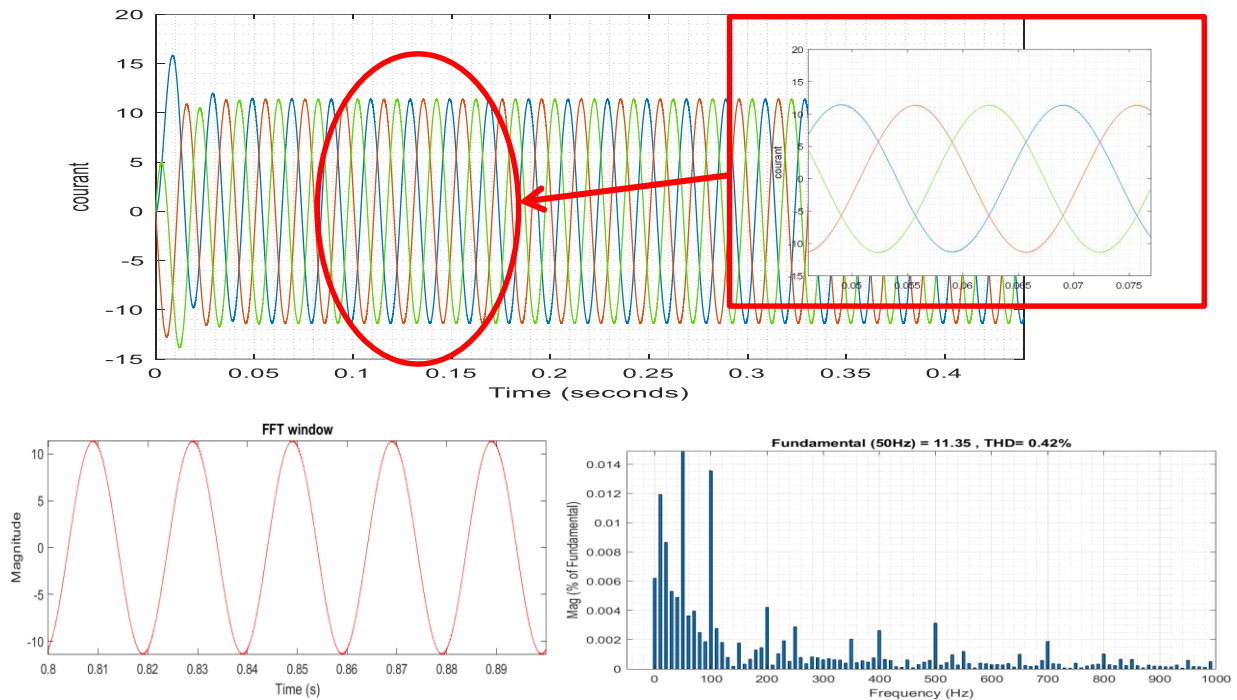


Figure (III-7): Le courant d'un onduleur triphasé

Courant THD de 0,42% : Un THD aussi bas indique une faible distorsion harmonique présente dans le courant mesuré. Cela est généralement considéré comme un bon résultat, car une faible distorsion harmonique indique une forme d'onde de courant proche d'une sinusoïde pure.

Valeur maximale du courant (I_{max}) de 12A : Cela indique le pic le plus élevé atteint par le courant au cours de la simulation.

Valeur minimale du courant (I_{min}) de -12A : Cela indique le pic le plus bas atteint par le courant pendant la simulation.

III.4. Conclusion

L'utilisation de la commande SVM dans les onduleurs de tension à deux niveaux permet d'obtenir une tension de sortie de haute qualité. La simulation de la commande SVM est une étape essentielle pour évaluer et optimiser les performances de l'onduleur avant sa mise en œuvre pratique.

La simulation permet de visualiser la forme d'onde de la tension de sortie, d'analyser la distorsion harmonique, la réponse transitoire, l'efficacité, et d'autres paramètres importants. En ajustant les paramètres du système et en modifiant la commande SVM, il est possible d'optimiser les performances pour répondre aux besoins spécifiques de l'application.

Il est important de noter que la simulation est une approche virtuelle et que la conception matérielle est nécessaire pour une mise en œuvre pratique. Cela implique de prendre en compte les contraintes réelles des composants, la commutation des interrupteurs et les pertes de conversion.

En combinant la simulation de la commande SVM avec une conception matérielle appropriée, il est possible de développer des onduleurs de tension à deux niveaux performants et fiables pour diverses applications telles que la conversion de l'énergie électrique, la commande de moteurs et l'alimentation de systèmes de distribution d'énergie.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'utilisation de l'électronique de puissance a considérablement amélioré les performances des procédés et réduit les coûts de fonctionnement des équipements au cours des dernières années. L'électronique de puissance permet de modifier la forme de l'énergie électrique pour l'adapter aux besoins spécifiques.

Grâce aux avancées technologiques réalisées dans les interrupteurs de l'électronique de puissance tels que les IGBT, les Mosfet et les GTO, les convertisseurs de puissance ont trouvé de plus en plus d'applications dans différents domaines tels que le filtrage actif et les systèmes de production d'énergies renouvelables. L'onduleur de tension triphasé à deux niveaux est l'un des convertisseurs les plus utilisés dans les secteurs industriels.

Le premier chapitre de ce travail présente la théorie des onduleurs de tension, suivi d'une étude détaillée de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux. La structure physique, le principe de fonctionnement et la modélisation dédiée à la commande de cet onduleur sont également présentés.

Le deuxième chapitre est consacré à la commande de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux. Les différentes stratégies de modulation les plus reconnues dans la littérature sont présentées, avec une attention particulière accordée à la modulation vectorielle SVM (Space Vector Modulation). Une structure de commande basée sur la modulation vectorielle SVM et des régulateurs PI est détaillée, permettant de contrôler l'onduleur de tension qui alimente une charge résistive via un filtre LC. L'objectif de cette commande est d'imposer la tension désirée aux bornes de la charge. Des tests de robustesse sont réalisés pour évaluer les performances de la commande, tels que la variation de la charge et la variation de la tension de référence. Les résultats démontrent de bonnes performances en termes de temps de réponse et de suivi de la tension de référence.

Dans le dernier chapitre, une validation expérimentale d'un onduleur de tension triphasé piloté par la modulation vectorielle est présentée. Les différentes cartes électroniques utilisées sont décrites, notamment la carte DSP utilisée pour la commande. Pour valider l'algorithme de modulation vectorielle, les formes d'onde des tensions de l'onduleur sont visualisées pour différentes tensions de référence. Les résultats expérimentaux obtenus sont conformes à la

Conclusion générale

théorie de l'onduleur de tension à deux niveaux et confirment les résultats obtenus par simulation dans le deuxième chapitre.

Les perspectives des futurs travaux sont les suivantes :

- ✓ Validation expérimentale de la commande en boucle fermée d'un onduleur de tension à deux niveaux : Cette étape permettra de vérifier et d'améliorer les performances de la commande en conditions réelles.
- ✓ Exploitation de commandes non linéaires telles que la commande à base de régulateurs en mode glissant et logique flou : Ces approches permettent d'améliorer les performances de la commande et d'adapter le système à des conditions variables.

L'utilisation de la commande SVM dans les onduleurs de tension à deux niveaux permet d'obtenir une tension de sortie de haute qualité. La simulation de la commande SVM est une étape essenti

Bibliographie

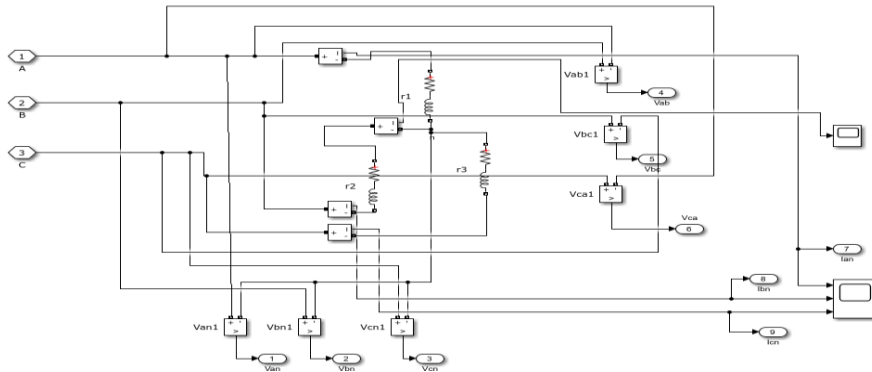
Bibliographie

- [1] S. OKBA , W. BEDDIAR ‘Etude et réalisation d’un onduleur de tension triphasé à MLI ‘ UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M’SILA .2019/ 2018 ‘
- [2] S. OUANANE , I. NECHE ‘Validation pratique d'une commande linéaire d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux ‘UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-MSILA ‘ .2020/2019
- [3] S.-A. HAMEURLAINE , H. ZELILEF ‘Commande d’un Onduleur Triphasé par les Techniques de Modulation de Largeurs d’Impulsions à Élimination Sélective d’Harmoniques ‘Université Mohammed Seddik Ben Yahia - JIJEL . 2018 / 2017 ‘
- [4] A. Saad ‘Commande et implémentation d'un Onduleur De tension triphasé ‘ UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M’SILA .2019/2018 ‘
- [5] N. P ,D. D ,K. a. G , M. P ‘Identification of Failure Precursor Parameters for Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBTs ‘,(INTERNATIONAL CONFERENCE ON PROGNOSTICS AND HEALTH MANAGEMENT ..2008 ‘
- [6] A. A ,S. K , K. O ‘Advances in HbA1c Biosensor Development Based on Field Effect Transistors: A Review ‘,IEEE Sensors ‘,2020 ‘pp. 8912.,8921–
- [7] S. M , e. a ‘Comparison study of 12kV n-type SiC IGBT with 10kV SiC MOSFET and 6.5kV Si IGBT based on 3L-NPC ‘,Energy Conversion Congress and Exposition ‘,2012 ‘ pp. 310-317.
- [8] S. OUANANE , I. NECHE ‘Validation pratique d'une commande linéaire d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux ‘UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-MSILA ‘ .2020/2019
- [9] P. H. J , M. E ‘Évaluation et optimisation de la bande passante des convertisseurs statiques Application aux nouvelles structures multicellulaires ‘Ingénieur de l’Ecole Centrale de Lille Agrégé de Physique Appliquée 14 ‘novembre 2003 .
- [10] M. FAÏÇAL ‘ÉTUDE ET RÉALISATION DES LOIS DE COMMANDE PAR MODE DE GLISSEMENT ET PAR APPROCHE GÉOMÉTRIQUE: APPLICATION À UN ONDULEUR DE TENSION MONOPHASÉ ‘L’UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES ‘MAI 1991 .

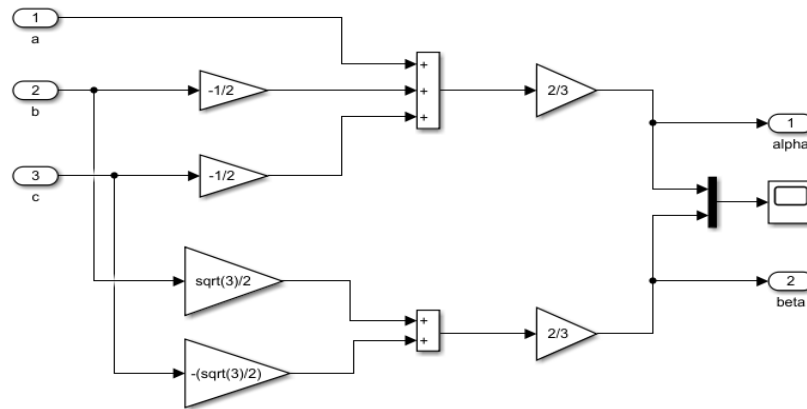
- [11] C. Cédric «Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque «l'Université Toulouse III – Paul Sabatie «Le 15 Décembre 2008 .
- [12] S. A , L. H «réalisation d'un onduleur monophasé et l'optimisation de sa commande MLI « université de M'sila ..2009 «
- [13] I. S. M «Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurones «Université ABDERAHMANE MIRA - Béjaia .2006 «

Annexe

Annexe



Simulation de la charge



abs en alpha beta

$$TS=1/4800$$

$$VDC=652$$

$$Ma=(230*\sqrt{2})*1.15$$

$$f=2*\pi*50$$

$$r=0$$

$$y=-2*\pi/3$$

$$b=2*\pi/3$$

$$d=180/\pi$$

$$Tm=26.50$$