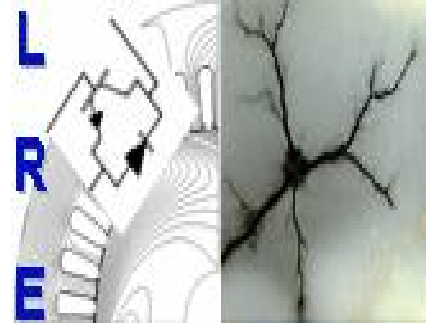


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'ELECTROTECHNIQUE
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique

Mémoire de

Master en Electrotechnique

Intitulé

Commande d'un onduleur Z-Source par la stratégie SVM modifiée à quatre court-circuits pour une application PV connectée au réseau.

Présenté par

Riache Younes

Sous la direction de **Pr. E.M.BERKOUK** et **Pr. M.O.MAHMOUDI**

Soutenu publiquement le 18 Juin 2017

Membres du Jury

Président :	A. Hellal, Professeur à l'ENP
Rapporteurs :	E.M.BERKOUK, Professeur à l'ENP M.O.MAHMOUDI, Professeur à l'ENP
Examineur :	M. Tegar, Professeur à l'ENP

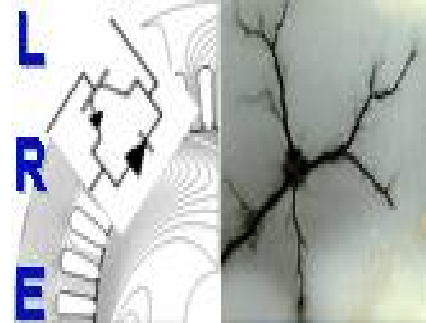
ENP 2017

Laboratoire de Recherche en Electrotechnique (LRE) - Ecole Nationale Polytechnique (ENP)
10, Avenue des Frères Oudek, Hassen Badi, BP. 182, 16200 El Harrach, Alger, Algérie

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'ELECTROTECHNIQUE
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique

Mémoire de

Master en Electrotechnique

Intitulé

Commande d'un onduleur Z-Source par la stratégie SVM modifiée à quatre court-circuits pour une application PV connectée au réseau.

Présenté par

Riache Younes

Sous la direction de **Pr. E.M.BERKOUK** et **Pr. M.O.MAHMOUDI**

Soutenu publiquement le 18 Juin 2017

Membres du Jury

Président :

A. Hellal, Professeur à l'ENP

Rapporteurs :

E.M.BERKOUK, Professeur à l'ENP

M.O.MAHMOUDI, Professeur à l'ENP

Examineur :

M. Tegar, Professeur à l'ENP

ENP 2017

Laboratoire de Recherche en Electrotechnique (LRE) - Ecole Nationale Polytechnique (ENP)
10, Avenue des Frères Oudek, Hassen Badi, BP. 182, 16200 El Harrach, Alger, Algérie

ملخص

يهدف هذا المشروع إلى استغلال الطاقات المتجددة، حيث يعتمد على دراسة المموج ثلاثي الأطوار من نوع منوب ذو مصدر ممانع (Z-source) الذي يؤمن أيضا وظيفة رفع مستوى التوتر الكهربائي، تمّ العمل بإستراتيجية "تعديل الشعاع الفضائي (SVM) مع إدماج 4 حالات استقصار" للتحكم في المنوب. تمّ القيام بدراسات حول النمذجة، التحكم و الإدماج ضمن نظام طاقي متألف من مولد كهروضوئي و مرتبط بالشبكة الكهربائية. تمّ أيضا إستخدام خوارزمية تتبع نقطة الطاقة العظمى (MPPT) لتحقيق المردود الأمثل للمولد كهروضوئي. تمّ أيضا الوصل بالشبكة بواسطة تقنية المزامنة (PLL). إن عمليات المحاكاة سمحت بالتحقق من صحة أداء وقوة التحكم. يمكن لهذا العمل أن يُطرح ك نموذج للاستغلال الطاقة الشمسية.

الكلمات المفتاحية: مموج ثلاثي الأطوار ذو مصدر ممانع (Z-source)، تعديل الشعاع الفضائي (SVM)، حالات استقصار، مولد كهروضوئي، خوارزمية تتبع نقطة الطاقة العظمى (MPPT)، تقنية المزامنة (PLL).

Abstract

This project aims to utilize solar energy. The study concerned the three-phase Z-source inverter (ZSI) which assures at the same time, the function of a boost converter and a single floor inverter. The modified SVM with four short-circuits was used to control this inverter. Studies were realized on the modeling, the control and the integration of this inverter in photovoltaic system. The MPPT technique is used to get an optimal functioning of the photovoltaic generator. A connection to the network is made by PLL synchronization technique. The simulations allowed to confirm the control loops and the response of the systems in terms of performance and robustness. This structure can replace perfectly the systems which integrating an association of a converter DC-DC and a classic inverter in order to connect the whole structure to the grid.

Key words: Z-source inverter, boost converter, modified SVM, short-circuit, impedance network, photovoltaic generator, MPPT technique, PLL synchronization, the grid.

Résumé

Ce projet vise à améliorer la fiabilité des convertisseurs statiques. L'étude a porté sur le cas de l'onduleur triphasé à structure Z-source (ZSI) qui assure à la fois la fonction d'un hacheur survolteur et d'un onduleur d'un seul étage. La stratégie « SVM modifiée à quatre court-circuits » a été utilisée. Cette technique, assurant le contrôle simultané du réseau d'impédance et du pont inverseur. Des études ont été réalisées sur la modélisation, le contrôle et l'intégration de ce convertisseur dans un système photovoltaïque. La technique MPPT est utilisée pour avoir un fonctionnement optimal en puissance du générateur photovoltaïque. Une connexion au réseau est faite à l'aide de la synchronisation PLL. Les simulations ont permis de valider les commandes en matière de performance et robustesse. Cette structure peut remplacer parfaitement les systèmes connectés intégrant une association d'un convertisseur DC-DC avec un onduleur classique.

Mots clés: Onduleur Z-source, hacheur survolteur, SVM modifiée, court-circuit, générateur photovoltaïque, technique du MPPT, synchronisation PLL.

*À ma chère Maman sans qui je n'aurais pas été là
aujourd'hui,*

À mon père, qui m'a donné tous les ingrédients de la réussite,

*À la mémoire de mes grands-parents, qui avaient tant voulu
être présents ce-jour,*

À ma sœur que j'adore,

*À mes frères pour leurs encouragements permanents, et leur
soutien moral,*

À ma famille,

À mes amis,

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués,
et le fruit de votre soutien infailible.*

Younes

Remerciements :

Louange à ALLAH, Seigneur de l'univers, le tout miséricordieux, pour m'avoir accordé le savoir, le courage, la patience, la volonté et la force nécessaire pour affronter toutes les difficultés et les obstacles, durant toutes mes années d'études.

Je profite à remercier du cœur mes professeurs qui m'ont transmis le tison de la connaissance.

*Je tiens à exprimer aussi mes vives gratitudes à mes promoteurs **Pr. EM. BERKOUK** et **Pr. Mohand Oualhadj MAHMOUDI** pour avoir proposé ce sujet, leurs précieux conseils et son aide tout au long de mon travail.*

*Je tiens également à remercier **Pr. A. Hellal**, professeur à l'École Nationale Polytechnique, de m'avoir fait l'honneur de présider ce jury.*

*Je remercie très chaleureusement **Pr. M. Tegar**, professeur à l'École Nationale Polytechnique, ainsi que tous les membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'examiner mon travail.*

*Je tiens à remercier l'ensemble des enseignants de l'École Nationale Polytechnique spécialement ceux du département d'Électrotechnique, et du groupement **E.E.A** pour leur encadrement tout au long de ma formation.*

Enfin, tous mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin pour l'accomplissement de ce travail.

Sommaire

LISTE DES FIGURES	
LISTE DES ABREVIATIONS	
LISTE DES NOMENCLATURES	
INTRODUCTION GENERALE	11
1. ETUDE DE L'ONDULEUR TRIPHASE A STRUCTURE Z-SOURCE.....	12
1.1 TOPOLOGIE D'UN ONDULEUR A STRUCTURE Z-SOURCE	12
1.2 ANALYSE DE FONCTIONNEMENT DE L'ONDULEUR Z-SOURCE	13
1.2.1 Etats Actifs :.....	13
1.2.2 Etat de Court-Circuit (Shoot-Through State):.....	13
1.2.3 Calcul du Facteur d'élévation β :.....	14
1.3 MODELE MOYEN DU RESEAU D'IMPEDANCE DE L'ONDULEUR Z-SOURCE:.....	15
1.4 MODELISATION DE L'ASSOCIATION ONDULEUR TRIPHASE – FILTRE PASSIF:	15
1.4.1 Modèle de connaissance de la partie DC-AC de l'onduleur Z-Source :.....	16
1.5 CONCLUSION :	17
2. COMMANDE DE L'ONDULEUR Z-SOURCE PAR LA STRATEGIE SVM MODIFIE A 4	
COURT-CIRCUITS :.....	18
2.1 PRINCIPE DE LA STRATEGIE MLI VECTORIELLE:.....	18
2.1.1 Etats de l'onduleur :.....	18
2.1.2 Principe du vecteur spatial (Space Vector).....	19
2.1.3 Vecteurs de tension de référence :.....	20
2.1.4 Période d'échantillonnage :.....	22
2.1.5 Séquences des interrupteurs de l'onduleur suivant la stratégie :.....	22
2.2 STRATEGIE SVM A QUATRE COURT-CIRCUITS :	23
2.2.1 Calcul du facteur d'élévation β :.....	24
2.3 RESULTATS ET SIMULATIONS :	24
Résultats de simulation de la stratégie SVM 4 C-C :	25
2.4 CONCLUSION :	27
3. SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE EN MODE CONNECTE AU RESEAU :	28

3.1	INTRODUCTION :	28
3.2	GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE :	28
3.3	CONFIGURATION DU SYSTEME :	28
3.4	STRATEGIE DE COMMANDE :	29
	3.4.1 Synchronisation avec le réseau :	29
	A- Structure d'une PLL :	30
	B- Principe de base d'une PLL :	31
	C- Dimensionnement du régulateur :	32
	3.4.2 Régulation en courant :	33
	3.4.3 Régulation de la tension du bus continu V_{Cz} :	35
3.5	RESULTATS DE SIMULATION :	37
	3.5.1 Synchronisation avec le réseau :	38
	3.5.2 Régulation des courants :	39
	3.5.3 Régulation du bus continu VCz :	40
3.6	CONCLUSION :	40
	CONCLUSION GENERALE	41
	BIBLIOGRAPHIE :	42

Liste des figures :

FIGURE 1- 1 : STRUCTURE D'UN ONDULEUR DE TENSION A STRUCTURE Z-SOURCE.	12
FIGURE 1- 2 : CIRCUIT EQUIVALENT DE L'ETAT ACTIF D'UN ONDULEUR Z-SOURCE.	13
FIGURE 1- 3 : CIRCUIT EQUIVALENT DE L'ETAT SHOOT-THROUGH DE L'ONDULEUR Z-SOURCE.	14
FIGURE 1- 4 : STRUCTURE D'UN ONDULEUR TRIPHASE Z-SOURCE ASSOCIEE A UN FILTRE TRIPHASE PASSIF LC, ET UNE CHARGE CONNECTEE EN ETOILE.	16
FIGURE 2- 1 : ETATS DE FONCTIONNEMENT D'UN BRAS DE L'ONDULEUR A DEUX NIVEAUX.	18
FIGURE 2- 2 : DIAGRAMME REPRESENTANT LES POSITIONS VECTORIELLES DE L'ONDULEUR A DEUX NIVEAUX, RELATIVES A LA STRATEGIE SVM.	20
FIGURE 2- 3 : SEQUENCE DE LA STRATEGIE SVM A QUATRE COURT-CIRCUITS.	23
FIGURE 2- 4 : RESULTATS DE SIMULATION DE LA STRATEGIE SVM A 4 COURT-CIRCUITS, ALLURE DES TENSIONS <i>v_i, v_{Cz}, v_e</i>	25
FIGURE 2- 5 : RESULTATS DE SIMULATION DE LA STRATEGIE SVM A 4 COURT-CIRCUITS, ALLURE DU COURANT <i>I_{Lz}</i>	26
FIGURE 2- 6: RESULTATS DE SIMULATION DE LA STRATEGIE SVM A 4 COURT-CIRCUITS, ALLURE DU COURANT <i>I_{Lz}</i> (ZOOM).....	26
FIGURE 2- 7: RESULTATS DE SIMULATION DE LA STRATEGIE SVM A 4 COURT-CIRCUITS, ALLURE DES TENSIONS <i>V_{AN}</i> ET <i>V_{cf}</i>	26
FIGURE 3- 1 : DIAGRAMME GENERAL D'UN SYSTEME PV CONNECTE AU RESEAU.	29
FIGURE 3- 2: STRUCTURE GENERALE D'UNE PLL.	30
FIGURE 3- 3: BOUCLE DE CONTROLE DE LA PLL.....	31
FIGURE 3- 4: REPRESENTATION DU VECTEUR DE TENSION MESUREE <i>V</i> DANS LE REPERE D-Q.	32
FIGURE 3- 5 : MODELE DE LA PLL.....	32
FIGURE 3- 6: REPRESENTATION DE LA CONNEXION ONDULEUR Z-SOURCE – RESEAU.	33
FIGURE 3- 7: SCHEMA SYNOPTIQUE DU MODELE DE CONNEXION AU RESEAU ELECTRIQUE-(COURANTS).	34
FIGURE 3-8: SCHEMA ILLUSTRANT LES BOUCLES DE REGULATION DES COURANTS SUR LES AXES D-Q.	35
FIGURE 3- 9: SCHEMA ILLUSTRANT LA BOUCLE DE REGULATION DE LA TENSION <i>V_{Cz}</i>	37
FIGURE 3- 10: SCHEMA ILLUSTRANT LE CONTROLE GLOBAL DU SYSTEME CONNECTE AU RESEAU.	37
FIGURE 3- 11: FREQUENCE <i>f</i> FOURNIE PAR LA STRATEGIE PLL (<i>$f_{ref} = 50 \text{ Hz}$</i>).	38
FIGURE 3- 12: ANGLE DE ROTATION <i>ωt</i> FOURNIE PAR LA STRATEGIE PLL (<i>$f_{ref} = 50 \text{ Hz}$</i>).	38
FIGURE 3- 13: SCHEMA ILLUSTRANT LES TENSIONS TRIPHASEES AU POINT DE RACCORDEMENT DE L'ONDULEUR Z- SOURCE AU RESEAU.	39
FIGURE 3- 14 : ALLURE DU COURANT DIRECT ID A LA SORTIE DE L'ONDULEUR.	39
FIGURE 3- 15 : ALLURE DU COURANT DIRECT IQ A LA SORTIE DE L'ONDULEUR.	39
FIGURE 3- 16: ALLURE DE LA TENSION DU BUS CONTINU <i>V_{Cz}</i> (V).....	40

Liste des Abréviations :

Acronyme	Signification
AC	Courant Alternatif
DC	Courant Continu
ZSI	Z-Source Inverter
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IP	Intégral-Proportionnel
MLI	Modulation à Largeur d'Impulsion
SVPWM	Space Vector pulse width modulation
C-C	Court-circuit.
PV	Photovoltaïque
GPV	Générateur Photovoltaïque
MPPT	Maximum Power Point Tracking.
P&O	Perturbe and Observe.
MPP	Maximum Power Point.
STC	Standard test conditions (1000 W/m ² , 25°C, A=1.5).
SCC	short-circuit Current.
OCV	open-circuit voltage.
THD	Taux de distorsion.
PLL	Phase Locked Loop

Liste des Nomenclatures

Symbole	Unité	Signification
V_e	[V]	Tension continue de l'entrée du ZSI
$C_{z1,2}$	[F]	Capacité du réseau d'impédance
$L_{z1,2}$	[H]	Inductance du réseau d'impédance
V_{Cz}	[V]	Tension aux bornes du C_z
i_{Cz}	[A]	Courant traversant C_z
I_{Lz}	[A]	Courant traversant L_z
V_{Lz}	[V]	Tension de L_z
V_i	[V]	Tension crête à l'entrée de l'onduleur
I_{eo}	[A]	Courant à l'entrée de l'onduleur
d		Rapport cyclique de l'état shout-through
m		La Profondeur de modulation
β		Facteur d'élevation de la partie DC-DC.
r		Taux de modulation
G		Gain totale de l'onduleur Z-source
V_s	[V]	Tension de la charge
$i_{ch1,2,3}$	[A]	Courants traversant la charge triphasée
$V_{cf1,2,3}$	[V]	Tensions aux bornes des condensateurs du filtre
$i_{cf1,2,3}$	[A]	Courants traversant les condensateurs du filtre
$V_{Lf1,2,3}$	[V]	Tensions des inductances du filtre
$i_{Lf1,2,3}$	[A]	Courants traversant les inductances du filtre
f_s	[Hz]	Fréquence d'échantillonnage de la SVM

T_s	[s]	Période d'échantillonnage de la SVM
f_m	[Hz]	Fréquence de commutation des IGBT
I_{ph}	[A]	Courant photo-électrique d'une cellule
G	[W/m ²]	Irradiation solaire
T	[K]	Température ambiante
P	[W]	Puissance transmise par le système
P_{pv}	[W]	Puissance du GPV
ω	[rd/s]	Pulsation de rotation du rotor synchrone
K_{ij}		Les interrupteurs de l'onduleur
C_1	[F]	Capacité du condensateur placée parallèlement au GPV
L	[H]	Inductance du hacheur survolteur
i_{bat}	[A]	Courant traversant L_{bat}
I_{gpv}	[A]	Courant de sortie du GPV
V_{gpv}	[V]	Tension générée par le GPV
θ_{ref}	[rd]	l'angle de la tension mesurée dans le repère fixe α - β

INTRODUCTION GENERALE :

Le potentiel solaire algérien figure parmi les plus importants du monde. Plus de 2.000.000 km² du pays reçoivent un ensoleillement de l'ordre de 2.500 KWh/m²/an.

L'exploitation de ce potentiel solaire nous permet de compléter les programmes d'électrification rurale. Le taux d'électrification de notre pays est de 98,7 % aujourd'hui [1], Nous devons commencer à penser à l'exportation de l'électricité et remplacer certaines centrales qui brûlent des combustibles fossiles et du gaz par d'autres centrales photovoltaïques afin de réserver ces ressources et les utiliser dans le domaine industriel. L'utilisation des panneaux photovoltaïques nous permet d'atteindre, en particulier, les régions isolées et très éloignées du réseau électrique national.

Plusieurs programmes utilisant l'énergie solaire, et complémentaires à l'électrification rurale par le réseau électrique conventionnel, sont en cours de réalisation. L'application des systèmes photovoltaïques pour le pompage de l'eau, entres autres applications, a enregistré des résultats très satisfaisants dans le développement des régions steppiques. De plus, Un autre programme d'électrification des zones sahariennes par des systèmes photovoltaïques est en cours de réalisation, au bénéfice des populations éparpillées du grand Sud Algérien [1].

Le gouvernement doit être conscient aussi que la montée en puissance des énergies renouvelables en Algérie ne peut se concevoir que par la réalisation d'un programme progressif de projets de production d'électricité plus importants et connectés au réseau national de distribution électrique. Cela peut réduire le prix du kW/h et donc il va contribue au développement durable de notre pays et surtout renforcer l'économie algérienne, car il va certainement attirer des nouveaux entreprises multinationales qui vont investir dans notre pays et construire des nouveaux usines.

Les générateurs photovoltaïques produisent une tension continue qui dépend fortement des conditions climatiques (Température et éclairement). Les convertisseurs DC-AC classiques peuvent seulement fonctionner lorsque la tension d'entrée sera supérieure à la tension de sortie, ce-qui présente un inconvénient major. En plus, les bras du niveau haut ne peuvent pas se fermer simultanément avec ceux du niveau inférieur. Donc, un temps mort est nécessaire pour conserver la charge mais ce temps va produire des distorsions sur les courants de sortie. [2]

Une adaptation de puissance entre la source et la charge s'avère importante pour assurer la fiabilité du système. Avec le développement de l'électronique de puissance, beaucoup de systèmes de conversion DC-AC innovants ont été conçus et parmi-eux, les onduleurs à source impédante. En effet, ces dispositifs présentent aujourd'hui une solution aux limitations des onduleurs classiques. Dans ce travail, une étude a été faite sur l'onduleur triphasé à structure Z-source qui présente le premier onduleur à source impédante crée en 2003. Cet onduleur a été commandé par la stratégie SVM à quatre court-circuits, puis il a été utilisé dans une chaîne photovoltaïque afin de connecter cette chaîne au réseau électrique.

1. Etude de l'onduleur triphasé à structure Z-Source.

1.1 Topologie d'un onduleur à structure Z-Source

L'onduleur de tension triphasé est illustré dans la figure ci-dessous, il est sous forme d'un pont triphasé constitué de 3 bras connecté à la source de tension par l'intermédiaire d'un réseau d'impédance Z-Source ainsi qu'une diode de protection qui sert à empêcher la décharge des deux condensateurs dans la source de tension continue [3][4].

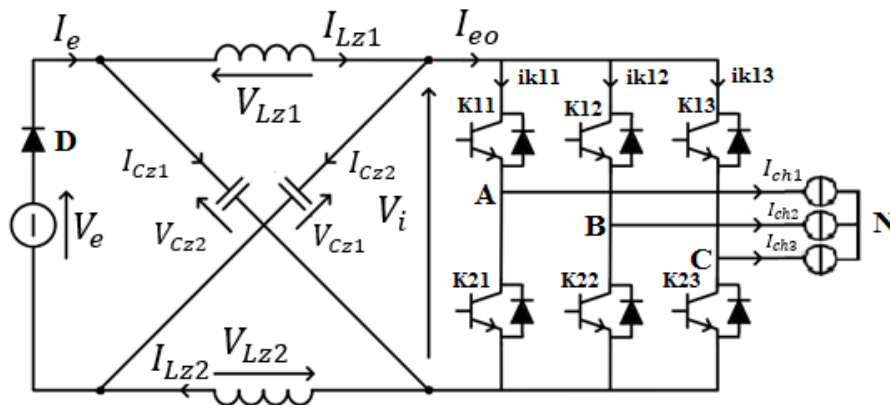


Figure 1- 1 : Structure d'un onduleur de tension à structure Z-Source.

Chaque bras de l'onduleur est constitué de deux interrupteurs réversibles en courant constitués d'un Transistor IGBT et d'une diode montée en antiparallèle. Ces deux interrupteurs fonctionnent d'une façon complémentaire pendant les phases où il y a transfert d'énergie entre la charge et la source de tension DC.

L'insertion d'un réseau d'impédance entre la source de courant continu et l'onduleur triphasé, nous avons le droit d'amorcer deux interrupteurs du même bras, chose qu'est impossible dans un onduleur traditionnel à défaut de détruire la source de tension DC, ce qui donne ainsi naissance à un nouvel état «Shoot-through State», ou état de court-circuit, un bras de l'onduleur peut remplacer un interrupteur indépendant externe à l'entrée de ce dernier, cet état est utilisé afin de commander le rapport cyclique du réseau d'impédance z-source, et ainsi régler le rapport entre la tension de la source et le bus DC à l'entrée de l'onduleur.

Le réseau d'impédance Z-Source joue un double rôle, le premier est celui d'un hacheur Boost, une fois couplé à l'onduleur triphasé, l'ensemble fonctionne en Buck Boost, puisqu'on peut effectuer l'opération Buck à travers la commande de l'onduleur. La deuxième fonction est celle d'un filtre de tension et de courant, l'impédance du réseau sert à diminuer les fluctuations de courant autour de sa valeur moyenne pendant une période de commutation, tandis que le condensateur sert à limiter les fluctuations en tension, et ainsi fournir une tension de crête plus ou moins stable à l'entrée de l'onduleur triphasé, pour ainsi obtenir des tensions alternatives d'amplitude fixe à la sortie de l'onduleur.

1.2 Analyse de fonctionnement de l'onduleur Z-Source

Dans ces deux circuits illustrant les deux états du ZSI, les interrupteurs des trois bras de l'onduleur sont remplacés par un seul interrupteur fictif K à l'extérieur de l'onduleur, cet interrupteur assure la fonction de court-circuit. Aussi les courants circulant dans les trois bras de l'onduleur vers la charge sont caractérisés par le courant I_{eo} [3], [4] et [5].

1.2.1 Etats Actifs :

Durant cet état, il y a un transfert d'énergie entre la source DC et la charge tel que :

- L'interrupteur K est bloqué.
- Les inductances se déchargent, et les condensateurs se chargent à partir de la source.
- La tension de sortie du Z-source V_i est égale à une valeur maximale « Valeur Crête », l'onduleur voit donc cette valeur crête comme tension d'entrée continue.
- La diode D est polarisée en directe donc elle est conductrice.

La figure ci-dessous illustre le circuit de l'onduleur de tension Z-source durant les états actifs, ou il y a un couplage entre les deux sources (charge et Source DC).

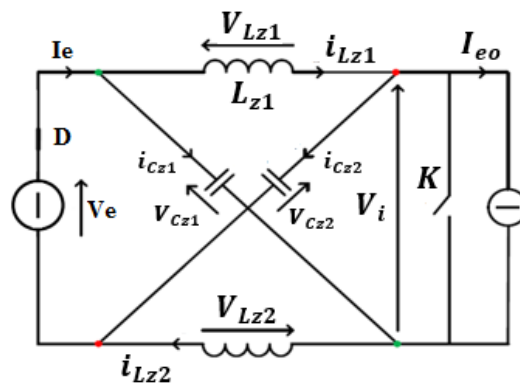


Figure 1- 2 : Circuit équivalent de l'état actif d'un onduleur Z-Source.

Cet état peut être décrit par les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{Lz1} = V_e - V_{Cz2} \\ V_{Lz2} = V_e - V_{Cz1} \\ V_i = V_{Cz1} - V_{Lz1} \\ V_i = V_{Cz2} - V_{Lz2} \end{cases} \quad (1-1) \quad \begin{cases} I_{Cz1} = i_{Lz2} - I_{eo} \\ I_{Cz2} = i_{Lz1} - I_{eo} \end{cases} \quad (1-2)$$

1.2.2 Etat de Court-Circuit (Shoot-Through State):

Durant cet état, il n'y a pas transfert de puissance (on dit que les deux sources sont découplées). La figure suivante illustre le circuit équivalent du ZSI dans cet état.

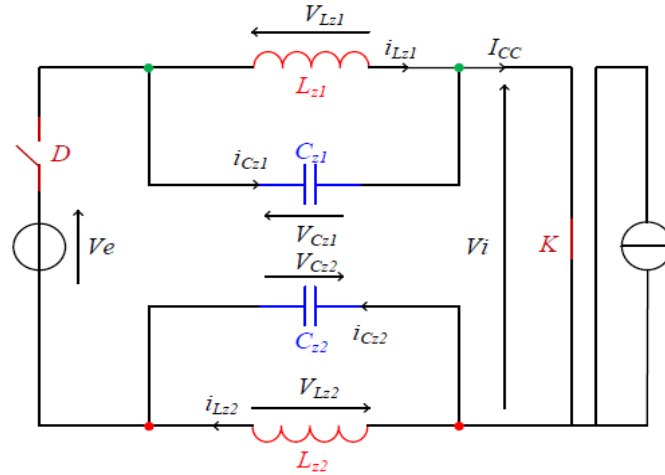


Figure 1- 3 : Circuit équivalent de l'état Shoot-Through de l'onduleur Z-Source.

Durant cet état :

- L'interrupteur K est fermé court-circuitant ainsi la charge et la diode D est bloquée.
- Les condensateurs se déchargent sur les deux inductances.
- La tension V_i à l'entrée du convertisseur est nulle.

On peut exprimer l'état Shoot-Through par les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{Lz1} = V_{Cz1} \\ V_{Lz2} = V_{Cz2} \\ V_i = 0 \end{cases} \quad (1-3) \quad \begin{cases} I_{Cz1} = -I_{Lz1} \\ I_{Cz2} = -I_{Lz2} \end{cases} \quad (1-4)$$

1.2.3 Calcul du Facteur d'élévation β :

Nous assumons que les deux inductances L_{z1} et L_{z2} et les deux capacités C_{z1} et C_{z2} sont égales respectivement afin de garantir que le réseau d'impédance est équilibré et symétrique, le facteur β est un élément clef qui caractérise le fonctionnement de l'onduleur : $\beta = V_i / V_e$.

Supposons que l'onduleur est dans un état « Shoot-through » court-circuit pendant un intervalle de temps T_0 , et durant une période de commutation T , on conclura les équations suivantes [6] :

$$T = T_1 + T_0 \quad (1-5)$$

Tel que T_1 représente une période relative aux états actifs de l'onduleur Z-Source.

La tension Moyenne continue à l'entrée du pont triphasé de l'onduleur, peut être obtenue ainsi [3] :

$$V_{Cz} = \langle v_i \rangle = \frac{(T_0 \cdot 0 + T_1 (2V_{Cz} - V_e))}{T} = \frac{T_1}{T} V_e \quad (1-6)$$

$$\text{En posant : } d = \frac{T_0}{T}, \quad (1-7)$$

$$\text{On aura donc : } V_{Cz} = \frac{1-d}{1-2d} \cdot V_e \quad (1-8)$$

La tension crête du bus continu à l'entrée du pont triphasé de l'onduleur peut être exprimée ainsi [3] :

$$\hat{v}_i = V_{Cz} - V_{Lz} = 2 V_{Cz} - V_e = \frac{T}{T_1 - T_0} \cdot V_e = \frac{1}{1-2d} \cdot V_e = \beta \cdot V_e \quad (1-9)$$

$$\text{Où : } \beta = \frac{T}{T_1 - T_0} = \frac{1}{1-2 \cdot \frac{T_0}{T}} = \frac{1}{1-2d} \geq 1 \quad (1-10)$$

Ce facteur β représente le facteur d'élévation de l'onduleur Z-Source. En considérant que le rapport cyclique d évolue dans l'intervalle $[0, 0.5]$, la formule générale du facteur d'élévation est établie en négligeant les pertes par commutation dans les interrupteurs de l'onduleur (diodes et IGBTs) ainsi que les chutes de tension résistives.

Afin de définir le gain total de l'onduleur G , on utilise la formule (1-10), multipliée par le facteur r , qui représente le coefficient de réglage, on obtient :

$$G = \frac{V_{outmax}}{V_e} = \beta \cdot r/2 = \frac{r/2}{1-2d} \text{ et } r = \frac{V_{outmax}}{V_{i/2}} \quad (1-11)$$

1.3 Modèle Moyen du réseau d'impédance de l'onduleur Z-source:

Ce modèle est obtenu en effectuant la valeur moyenne temporelle des paramètres d'état du modèle de connaissance sur une période de découpage du système. [5], [6].

$$\left\{ \begin{array}{l} L_Z \cdot \frac{d}{dt} \cdot I_{Lz}(t) = V_{Cz}(t) + (1 - d(t)) \cdot (V_e - 2 \cdot V_{Cz}(t)) - r_{Lz} \cdot I_{Lz}(t) \\ C_Z \cdot \frac{d}{dt} V_{Cz}(t) = I_{Lz}(t) - (1 - d(t)) \cdot I_{eo}(t) \end{array} \right\} \quad (1-12)$$

1.4 Modélisation de l'association Onduleur triphasé – Filtre passif:

L'onduleur Z-source impose à sa sortie un système de tension sous forme de créneaux modulés avec les stratégies de commande présentées dans le chapitre précédent. Ces créneaux sont incompatibles avec les tensions sinusoïdales du réseau électrique. Donc, il est nécessaire d'ajouter un filtre passif pour rendre les grandeurs de sortie de l'onduleur Z-Source quasi-sinusoïdaux avec éliminations des harmoniques d'ordre supérieur [7].

Cette modélisation nous permettra de simuler le système et aussi d'établir les lois de commande nécessaire pour la commande des tensions triphasées aux bornes de la charge, située après le filtre triphasé LC. La figure suivante illustre la structure d'un onduleur triphasé Z-Source associée à un filtre triphasé passif LC, et une charge connectée en étoile.

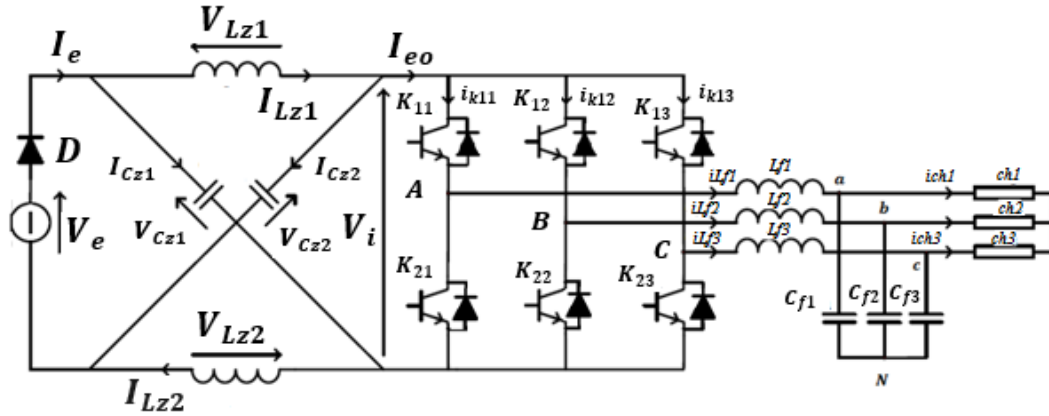


Figure 1- 4 : Structure d'un onduleur triphasé Z-Source associée à un filtre triphasé passif LC, et une charge connectée en étoile.

1.4.1 Modèle de connaissance de la partie DC-AC de l'onduleur Z-Source :

Le modèle de connaissance de l'onduleur sert à reproduire le fonctionnement de la partie DC-AC de l'onduleur, on l'utilise pour approximer le fonctionnement réel de l'onduleur à une échelle de temps liée à la fréquence de découpage, on doit donc utiliser un pas de simulation inférieure à une période de découpage afin d'observer le comportement de l'onduleur convenablement.

On utilise l'approximation du convertisseur matriciel, la modélisation consistera donc à écrire les grandeurs modulées en fonction des grandeurs commutées.

En considérant F_{ij} , la fonction de connexion pour chacun des 6 interrupteurs de l'onduleur [8] :

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{ij} = 1 \text{ si } K_{ij} \text{ est passant} \\ F_{ij} = 0 \text{ si } K_{ij} \text{ est ouvert} \end{array} \right\} \quad (1-13)$$

Les tensions sont exprimées sous la forme matricielle suivante [08] :

$$\begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} V_i \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{12} \\ F_{13} \end{bmatrix} \quad (1-14)$$

On en déduit :

$$\begin{bmatrix} V_{AC} \\ V_{BC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} - F_{13} \\ F_{12} - F_{13} \end{bmatrix} \cdot V_i \quad (1-15)$$

En appliquant la loi des nœuds, on obtient la formule du courant I_{eo} [8] :

$$I_{eo} = [F_{11} - F_{13} \quad F_{11} - F_{12}] \cdot \begin{bmatrix} i_{Lf1} \\ i_{Lf2} \end{bmatrix} \quad (1-16)$$

A partir des relations précédentes, on élabore le modèle de connaissance de l'onduleur triphasé [5],[8] :

$$\begin{bmatrix} V_{AC} \\ V_{BC} \\ I_{eo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} - F_{13} & 0 & 0 \\ F_{12} - F_{13} & 0 & 0 \\ 0 & F_{11} - F_{13} & F_{11} - F_{12} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_i \\ i_{Lf1} \\ i_{Lf2} \end{bmatrix} \quad (1-17)$$

Le modèle présenté sous forme de produit de la matrice de conversion et un vecteur des grandeurs commutées, on obtient ainsi le vecteur des grandeurs modulées. Le modèle ci-haut est considéré comme un modèle hybride puisqu'il est constitué de vecteurs comprenant grandeurs continues et une matrice de conversion comprenant des valeurs discontinues « fonction de connexion des interrupteurs ».

1.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, la structure de l'onduleur triphasé Z-Source a été présentée, ainsi que son principe général de fonctionnement permettant d'adapter la tension d'entrée du pont triphasé de l'onduleur V_e à travers l'insertion suivant un rapport cyclique d'un état de court-circuit périodique. Cet onduleur possède la particularité de fournir des tensions alternatives en sortie d'une amplitude indépendante de la tension de la source continue fournissant l'énergie à l'onduleur. Un modèle pseudo-moyen permettant d'obtenir les fonctions de transfert moyennes du système a été établi.

2. Commande de l'onduleur Z-source par la stratégie SVM modifié à 4 court-circuits :

2.1 Principe de la stratégie MLI Vectorielle:

Afin d'améliorer la tension de sortie d'un onduleur de tension, on peut agir sur sa structure ou bien sur sa stratégie de commande. La SVM ou (MLI Vectorielle) est une technique utilisée pour produire les signaux impulsions de commande appliqués aux interrupteurs des onduleurs triphasés. Reconnue pour être la plus performante et la plus utilisée, cette technique est utilisée pour offrir 15% d'élévation supplémentaire (en comparaison aux autres méthodes basées sur la MLI sinusoïdale) par rapport à la tension du bus continu et aussi afin d'obtenir une sortie très faible en distorsion harmonique (THD très bas par rapport aux autres méthodes). Cette technique est basé sur la modulation d'un vecteur spatiale, son principe consiste à traiter les tensions triphasées sinusoïdales de l'onduleur comme un vecteur spatiale d'amplitude constante et tournant suivant une pulsation constante, égale à la pulsation électrique de la sortie sinusoïdale, pour cela nous utiliserons l'une des transformées triphasé-biphasé pour transformer le vecteur de tension triphasé en un vecteur unique sur le plan d-q, ce vecteur représentera la somme spatiale des trois vecteurs de tension triphasés. La stratégie SVM approxime le vecteur de tension de référence v_{ref} durant chaque période de modulation par une combinaison de huit vecteurs, chacun relatif à une configuration donnée ou état de l'onduleur, les six vecteurs actifs divise le plan en six secteurs, (60° ou $\pi/6$) pour chaque secteur, V_{ref} doit être généré durant chaque période de modulation par deux vecteurs actifs (V_1 à V_6) adjacents et deux vecteurs d'états zéro (V_0 ou V_7), [6].

2.1.1 Etats de l'onduleur :

Les onduleurs du même bras d'un onduleur triphasé à deux niveaux fonctionnent en complémentarité, c'est à dire que si l'un des interrupteurs est fermé, l'autre doit être impérativement ouvert, comme illustré dans la figure 2-1 ci-dessous :

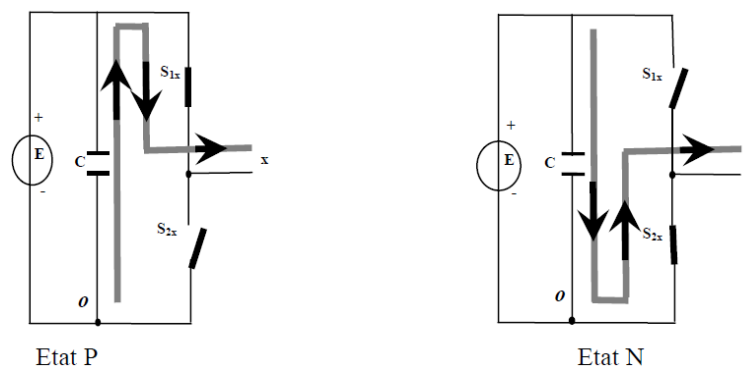


Figure 2- 1 : Etats de fonctionnement d'un bras de l'onduleur à deux niveaux.

Etant donné que chaque bras peut avoir deux états, l'onduleur entier possède $2^3 = 8$ états:

PPP, PPN, PNN, PNP, NNN, NNP, NPP et NPN. Ils sont identifiés en indiquant les états des trois bras de l'onduleur (état P ou état N). Par exemple, l'état PNN indique que le premier bras est à l'état P ($v_{10} = E$), le deuxième est à l'état N ($v_{20}=0$) et le troisième est à l'état N ($v_{30} = 0$).

2.1.2 Principe du vecteur spatial (Space Vector).

On définit le vecteur de tension spatiale (Space Vector) v_s , ce vecteur représente les trois tensions triphasées v_{10}, v_{20}, v_{30} . Ce vecteur est défini ainsi :

$$v_s = v_{1N} \cdot e^{j0} + v_{2N} \cdot e^{-j \cdot \frac{2\pi}{3}} + v_{3N} \cdot e^{j \cdot \frac{2\pi}{3}} \quad (2-1)$$

Afin d'obtenir les composantes de ce vecteur dans le repère biphasé d-q, on effectue la transformation (passage) du plan triphasé au plan biphasé d-q, en utilisant la matrice de Clark (conservation de l'amplitude), ce choix judicieux est effectué afin que le vecteur spatial v_s ait la même amplitude que le vecteur représentant la tension sinusoïdale d'une phase V_{1N}, V_{2N} ou V_{3N} .

On effectue donc le passage du plan triphasé au plan d-q :

$$\begin{pmatrix} v_d \\ v_q \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{pmatrix} X \begin{pmatrix} V_{10} \\ V_{20} \\ V_{30} \end{pmatrix} \quad (2-2)$$

Le vecteur v_s s'écrit dans le plan d-q ainsi :

$$v_s = v_d + jv_q \quad (2-3)$$

Ce vecteur v_s peut prendre huit positions discrètes dans le plan d-q, chacune des positions est relative à une des huit configurations possibles des interrupteurs de l'onduleur, six configurations actives (PNN, PPN, NPN, NPP, NNP et PNP), ces six positions actives divisent le plan d-q en six secteurs triangulaires égaux d'un angle égal à (60° ou $\frac{\pi}{3}$), et elles définissent aussi les six sommets de l'hexagone, les deux positions restantes correspondent aux configurations nulles PPP et NNN, situées au centre de l'hexagone. Les différentes positions du vecteur v_s sont représentées dans la figure suivante 2-2 :

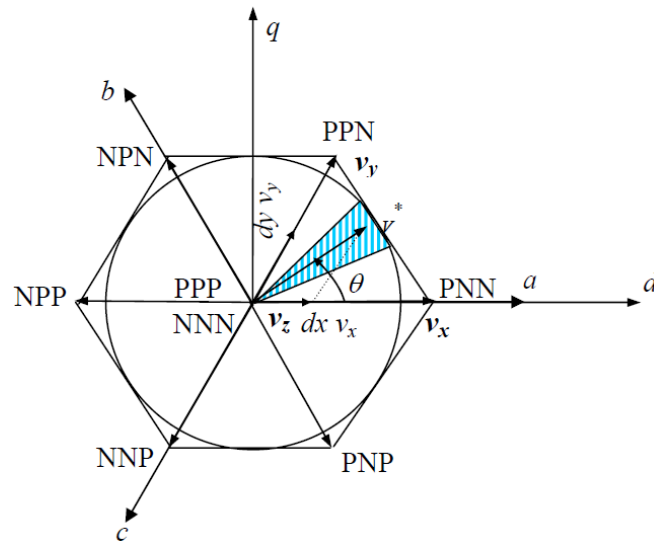


Figure 2- 2 : Diagramme représentant les positions vectorielles de l'onduleur à deux niveaux, relatives à la stratégie SVM.

2.1.3 Vecteurs de tension de référence :

L'objectif de la commande SVM de l'onduleur est de rendre les tensions de sortie v_{1N} , v_{2N} et v_{3N} les plus proches possibles des tensions sinusoïdales de référence v_{1ref} , v_{2ref} et v_{3ref} .

Afin d'atteindre cet objectif, on définit le vecteur de tension v_{sref} à partir des vecteurs de tension de référence v_{1ref} , v_{2ref} et v_{3ref} [9] :

$$v_{sref} = v_{1ref} \cdot e^{j0} + v_{2ref} \cdot e^{-j \cdot 2\frac{\pi}{3}} + v_{3ref} \cdot e^{j \cdot 2\frac{\pi}{3}} \quad (2-4)$$

$$v_{sref} = v_{dref} + j \cdot v_{qref} \quad (2-5)$$

$$v_{sref} = m \cdot V_{max} \cdot e^{j\theta} \quad (2-6)$$

Avec :

v_{dref} , v_{qref} : Composantes du vecteur v_{sref} dans le plan d-q.

m : la profondeur de modulation ($0 \leq m \leq 1$).

θ : position angulaire du vecteur v_{sref} .

Le vecteur v_{sref} tourne dans le plan d-q à une vitesse angulaire égale à la pulsation électrique des tensions de référence v_{1ref} , v_{2ref} et v_{3ref} , comme illustré dans la figure 2-2, dans laquelle on a représenté une position arbitraire θ du vecteur v_{sref} , et à partir de cette angle θ , on déduit le secteur contenant le vecteur v_{sref} de la manière suivante :

$$S = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 \leq \theta \leq \pi/3 \\ 2 & \text{si } \pi/3 \leq \theta \leq 2.\pi/3 \\ 3 & \text{si } 2.\pi/3 \leq \theta \leq \pi \\ 4 & \text{si } \pi \leq \theta \leq 4.\pi/3 \\ 5 & \text{si } 4.\pi/3 \leq \theta \leq 5.\pi/3 \\ 6 & \text{si } 5.\pi/3 \leq \theta \leq 2.\pi \end{cases} \quad (2-7)$$

Les interrupteurs de l'onduleur doivent être commandés de telle façon que le vecteur de tension de référence $v_{s\ ref}$ coïncide avec la moyenne sur une période d'échantillonnage T_s , du vecteur tension de sortie, généré par les trois vecteurs v_x, v_y, v_z , représentant les sommets du secteur triangulaire contenant le vecteur de tension de référence $v_{s\ ref}$ [9] :

$$\bar{v}_s = v_{s\ ref} = m. V_{max}. e^{i\alpha} = d_x.v_x + d_y.v_y + d_z.v_z \quad (2-8)$$

Avec (α) Position angulaire du vecteur $v_{s\ ref}$ à l'intérieur du secteur : $\Leftrightarrow \alpha = \theta. [\pi/3]$

$$d_x = \frac{T_x}{T_s}, d_y = \frac{T_y}{T_s}, d_z = \frac{T_z}{T_s} \quad (2-9)$$

T_s étant la période d'échantillonnage de la stratégie SVM.

T_x : temps d'application du vecteur actif v_x pendant une T_s .

T_y : temps d'application du vecteur actif v_y pendant une T_s .

T_z : temps d'application des deux vecteurs nulles $v_z = (V_0, V_7)$ pendant une T_s .

$$\text{Tel que } \begin{cases} d_x + d_y + d_z = 1 \\ T_x + T_y + T_z = T_s \end{cases} \quad (2-10)$$

Afin d'éviter les harmoniques de tension qui résultent de la forme non circulaire de cette hexagone, on impose donc au vecteur de tension de référence $v_{s\ ref}$ de se positionner à l'intérieur du cercle délimitée par l'hexagone comme ainsi indiqué sur la figure 2-2.

Nous en déduisons que l'amplitude d'un de vecteurs discrets (V_1, \dots, V_6) est de $(2/3.V_{dc})$. Et donc le vecteur de référence $v_{s\ ref}$ ne doit pas excéder :

$$v_{s\ ref(max)} = \cos \frac{\pi}{6}. (2/3.V_{dc}) = \frac{\sqrt{3}}{2}. (2/3.V_{dc}) = 1/\sqrt{3}. V_{dc} \quad (2-11)$$

L'amplitude de la tension simple maximale de sortie est ainsi déduite, et est égale à $1/\sqrt{3}. V_{dc}$, V_{dc} étant la tension continue à l'entrée de l'onduleur.

On en déduit ainsi que la tension composée maximale de sortie (entre lignes) est égale à V_{dc} , et sa valeur efficace est égale à $\frac{V_{dc}}{\sqrt{2}} = 0.707 V_{dc}$.

2.1.4 Période d'échantillonnage :

La période d'échantillonnage T_s doit représenter une fraction très minime de la période T des tensions de référence $v_{1ref}, v_{2ref}, v_{3ref}$. Cette période correspond à un intervalle d'angle $(T_s / T) \cdot 2\pi$ sur le diagramme vectoriel, il est appelé intervalle d'échantillonnage et représenté par la portion hachurée sur le diagramme de la figure 2-2.

La fréquence d'échantillonnage $(1 / T_s) = f_s$ doit être beaucoup plus élevée par rapport à la fréquence de la tension et du courant de sortie de l'onduleur $f = (1 / T)$. La qualité de la tension de sortie de l'onduleur dépend en grande partie de la fréquence de commutation de l'onduleur. Cette tension de sortie s'améliore proportionnellement avec l'augmentation de la fréquence d'échantillonnage de la stratégie, et ainsi avec l'augmentation de la fréquence de commutation des interrupteurs. Cependant, une augmentation exagérée de la fréquence de commutation peut conduire à un échauffement des interrupteurs de l'onduleur, et peut conduire donc à des pertes excessives appelées « pertes de commutation ».

2.1.5 Séquences des interrupteurs de l'onduleur suivant la stratégie :

Afin de déduire les rapports d_x, d_y, d_z , on décompose l'équation 2-8 (projection sur les axes d-q), après simplifications, on obtient les équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot m \cdot \cos \alpha = d_x + \frac{1}{2} \cdot d_y \\ \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot m \cdot \sin \alpha = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot d_y \end{cases} \quad (2-12)$$

Ainsi la résolution des équations 2-12 et 2-10 nous conduit aux résultats suivants :

$$\begin{cases} d_x = m \cdot \sin(\frac{\pi}{3} - \alpha) \\ d_y = m \cdot \sin \alpha \\ d_z = 1 - d_x - d_y \end{cases} \quad (2-13)$$

Les équations 2-13 peuvent s'appliquer à n'importe quel secteur, les résultats restent similaires puisque le repère stationnaire d-q peut être orienté sur n'importe quelle position discrète du vecteur v_s .

Dans le but d'approximer au maximum possible les tensions de sortie de l'onduleur (v_1, v_2, v_3) aux tensions de référence $(v_{sref1}, v_{sref2}, v_{sref3})$, durant chaque période d'échantillonnage T_s , on applique l'état X pendant une durée de temps $d_x \cdot T_s$ ainsi que l'état Y pendant une durée de temps $d_y \cdot T_s$.

Cependant l'état Z peut prendre deux séquences : $Z_1 = \text{NNN}$ et $Z_2 = \text{PPP}$, les deux séquences génèrent des tensions de sortie nulles, il est possible donc de choisir l'une ou l'autre (pendant la durée $d_z \cdot T_s$) afin de générer la tension de sortie voulue. Ce choix va donc obéir à plusieurs critères, dont l'amélioration de la forme de la tension de sortie et la

minimisation du nombre de commutation des interrupteurs pendant une période d'échantillonnage, et donc la minimisation de puissance par commutation.

La profondeur de modulation est définie dans la formule suivante :

$$m = \frac{\sqrt{3}.V_{max}}{V_i} \tag{2-14}$$

2.2 Stratégie SVM à quatre court-circuits :

Le principe de cette stratégie consiste dans un premier temps à repérer les tensions maximales du vecteur X, et les tensions minimales du vecteur Y, selon le secteur de positionnement de l'angle Θ considéré. L'idée générale s'articule sur la génération d'un état de court-circuit lors du passage d'un état zéro à un des états actifs. Lors du passage de l'état Z_1 à l'état X, on augmente la durée de conduction des interrupteurs hauts associés aux bras supportant les tensions maximales de l'état X, cette augmentation se fera au dépend de la durée associée à l'état zéro Z_1 , cette durée constitue donc un point de passage entre ces deux états. Cependant, lors du passage de l'état Y à l'état Z_2 , on augmente la durée de conduction des interrupteurs bas associés aux bras supportant les tensions minimales de l'état Y, ainsi cette augmentation se fera aussi au dépend de la durée associée à l'état zéro Z_2 , cette durée constitue un point de passage entre ces deux états.

On obtient donc deux périodes de court-circuit insérées dans l'état nulle Z_1 , et deux autres insérées dans l'état nulle Z_2 , on aboutit donc à l'ajout de quatre période égales relatif à l'état de c-c, d'où l'origine de l'appellation. Chacune des durées de court-circuit est égale à $(d.T_s / 4)$. Le principe de cette technique est illustré dans la figure 2-3 suivante [10] :

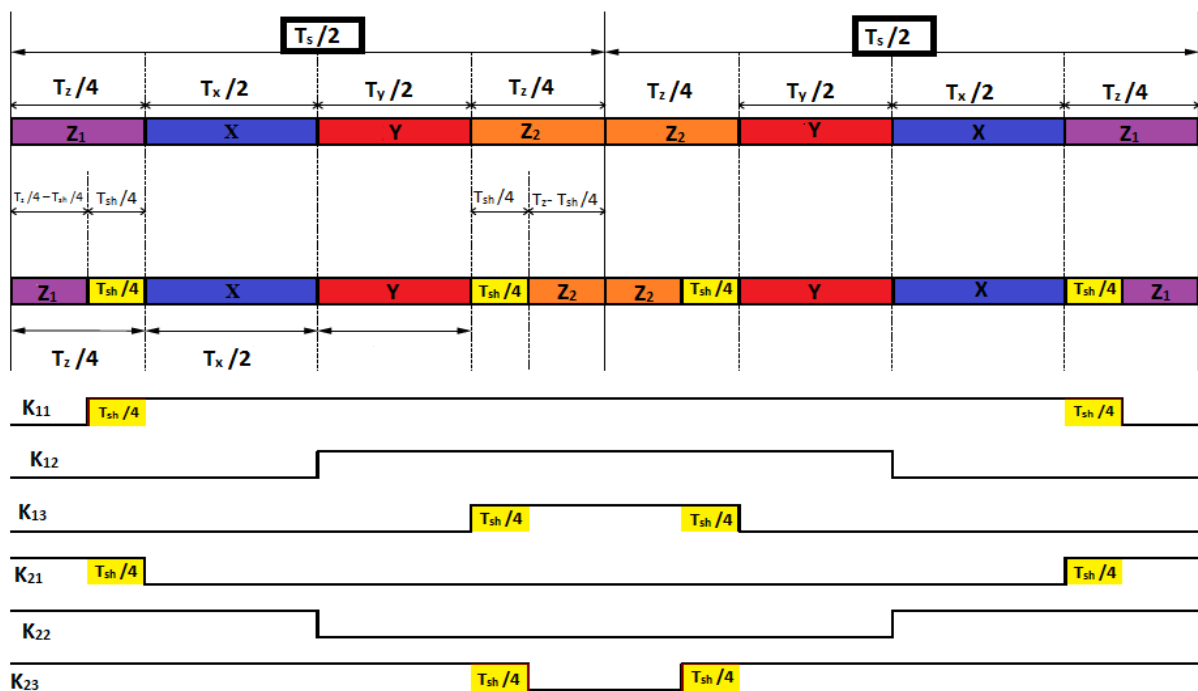


Figure 2- 3 : Séquence de la stratégie SVM à quatre court-circuits.

2.2.1 Calcul du facteur d'élévation β :

Le facteur d'élévation β dépend du nombre de court-circuit insérée dans une période d'échantillonnage, sous la seule condition que la soustraction de la durée de court-circuit de la durée totale des vecteurs nuls et des états de court-circuits soit supérieure à zéro :

Pour la SVM à quatre court-circuits, la condition citée au-dessus et qui doit être respectée est définie dans la relation suivante :

$$\left(\frac{T_z}{4}\right) - \left(d \cdot \frac{T_s}{4}\right) \geq 0 \quad (2-15)$$

Et c'est à partir de cette relations que nous pouvons déduire la condition sur la durée maximale de l'état de court-circuit , ce qui est donc exprimée dans la relation 2-16 suivante :

$$d \leq \left(\frac{T_z}{T_s}\right) \quad (2-16)$$

On obtient donc le rapport cyclique d'élévation maximale de la stratégie SVM modifiée, c'est-à-dire le taux de court-circuit qu'il est possible d'insérer pour une tension crête de la charge V_{max} :

$$d_{max} = 1 - m \quad (2-17)$$

En remplaçant la profondeur de modulation m par son expression dans la relation 2-14 dans la dernière expression 2-17:

$$d_{max} = 1 - m = 1 - \sqrt{3} \cdot \frac{V_{max}}{V_i} = 1 - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot r \quad (2-18)$$

tel que r représente le taux de modulation de la stratégie SVM :

$$r = \frac{V_{max}}{V_{i/2}} \quad (2-19)$$

De ce qui précède nous pouvons établir les expressions du facteur d'élévation et du gain total de la stratégie SVM appliquée à un onduleur triphasé à structure Z-Source :

$$\begin{cases} \beta = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot r - 1} \\ G = \frac{r/2}{\sqrt{3} \cdot r - 1} \\ \beta = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot G - 1 \end{cases} \quad (2-20)$$

2.3 Résultats et simulations :

Dans le but de valider cette stratégie, on procède à la simulation en utilisant les mêmes valeurs pour les paramètres que celles utilisées dans les simulations précédentes. En exploitant les équations de la relation 2-19, on retrouve la valeur du rapport cyclique maximum qu'on peut appliquer pour un taux de modulation $r = 0.7$, on retrouve $d = 0.393$, cependant, on doit appliquer un rapport cyclique inférieur à cette valeur, afin de ne

pas transférer tous les états zéro en états de court-circuits, on fixe donc $d = 0.358$, afin de pouvoir observer la séquence complète d'une SVM à quatre.

A partir des équations analytique de la relation 2-19, on retrouve les valeurs suivantes pour le facteur d'élévation, le gain global, ainsi que les différentes tensions de sortie du système :

$$\begin{cases} d = 0.358 \\ \beta = 3.52 \\ G = 1.232 \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} V_i = 1056 V \\ V_{Cz} = 678.16 V \\ V_{max} = 369.6 V \end{cases} \quad (2-21)$$

On procède à la simulation de la stratégie SVM à quatre court-circuits. Ce qui exige l'application de la séquence suivante pendant chaque période d'échantillonnage T_s [11] :

$$|T_{sh} - T_{z1} - T_{vx} - T_{vy} - T_{z2} - T_{sh}||T_{sh} - T_{z2} - T_{vy} - T_{vx} - T_{z1} - T_{sh}| \quad (2-22)$$

Cet enchainement d'états spécifiques consiste à [9] :

- Appliquer les quatre états X, Y, Z₁, Z₂ dans un certain ordre dans la première demi-période d'échantillonnage, et les appliquer dans un ordre inverse dans la seconde demi-période, avec l'insertion des états de shout-through.
- Il faut appliquer les états Z₁ et Z₂ par alternance.
- D'utiliser le même état zéro (Z₁ ou Z₂) au début et à la fin de chaque période d'échantillonnage T_s .

A partir de cette succession d'états, on peut déduire les fonctions logiques associées aux interrupteurs de l'onduleur F_{ij} ainsi que leurs formes durant toute une période d'échantillonnage T_s et dans les différents secteurs constituant le diagramme fonctionnel illustré dans la figure 2-2. On constate alors que chaque interrupteur ne change son état que deux fois (2 commutations) durant chaque période d'échantillonnage.

Résultats de simulation de la stratégie SVM 4 C-C :

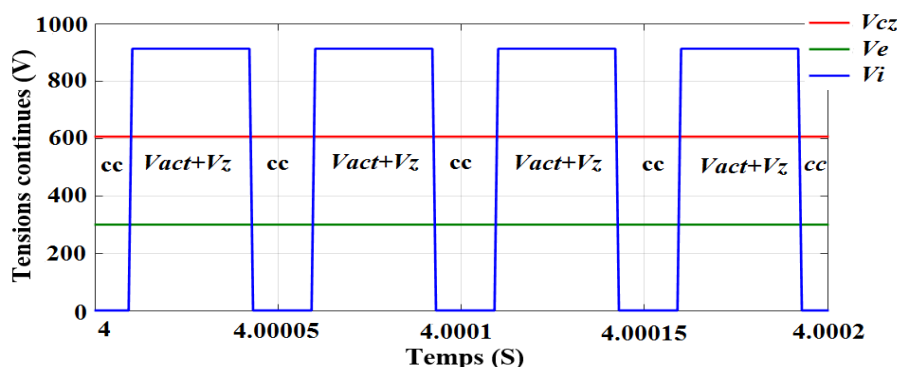


Figure 2- 4 : Résultats de simulation de la stratégie SVM à 4 court-circuits, Allure des tensions v_i, v_{Cz}, v_e .

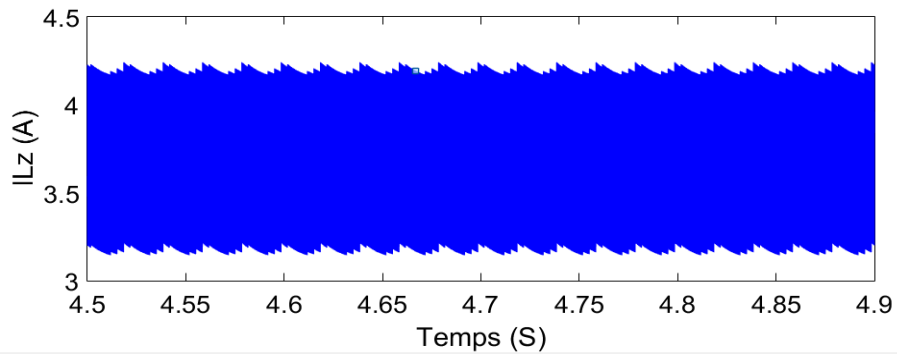


Figure 2- 5 : Résultats de simulation de la stratégie SVM à 4 court-circuits, Allure du courant I_{Lz} .

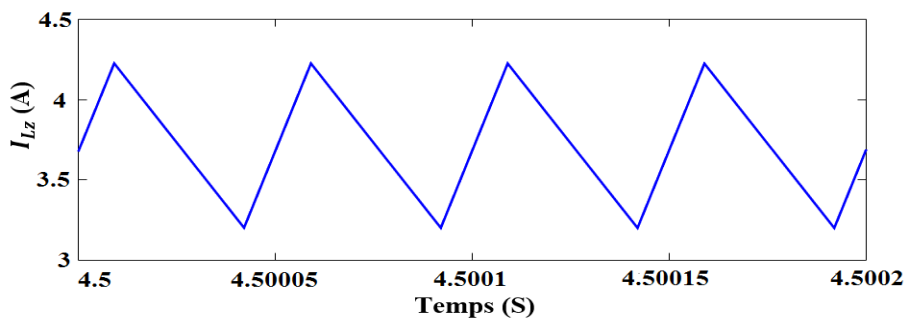


Figure 2- 6: Résultats de simulation de la stratégie SVM à 4 court-circuits, Allure du courant I_{Lz} (Zoom)

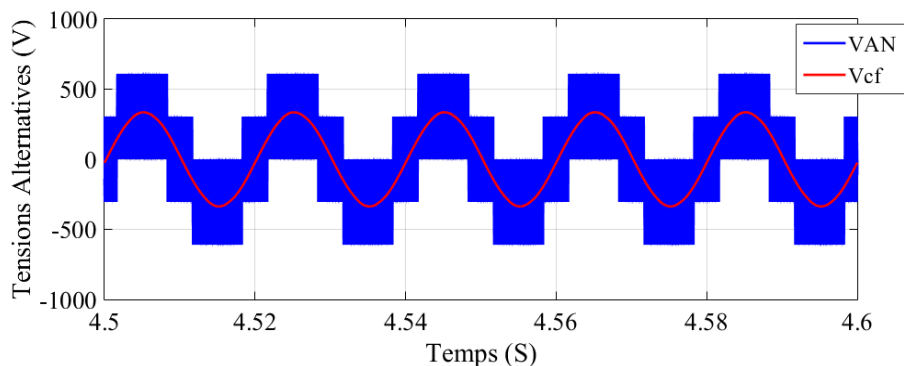


Figure 2- 7: Résultats de simulation de la stratégie SVM à 4 court-circuits, Allure des tensions V_{AN} et V_{cf} .

On constate sur la figure 2-4 l'allure de la tension v_i , on remarque clairement les séquences de court-circuits placés équitablement au début et à la fin de chaque demi-période de modulation et au milieu de ces périodes de court-circuits, se situe les périodes des vecteurs actifs, ainsi que les deux périodes des vecteurs zéro qui se situent au début et à la fin de cette période, comme illustré sur la relation 2-22.

On remarque aussi à partir des figures 2-5 et 2-6 que les ondulations sur le courant de l'inductance du réseau d'impédance I_{Lz} sont tolérables.

Les valeurs des grandeurs essentiels du système obtenues par simulation sont :

$$\begin{cases} \hat{v}_l = 915 V \\ v_{Cz} = 607 V \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \beta = 3.05 \\ d = 0.336 \end{cases} \text{ et } \begin{cases} I_{Lz \min} = 3.15 A \\ I_{Lz \max} = 4.2 A \end{cases} \text{ et } \begin{cases} v_{AN \max} = 610 V \\ v_{cf \max} = 335 V \end{cases} \quad (2-23)$$

ces valeur présentent aussi une légère différence par rapport aux valeurs calculées analytiquement, ceci est dû aux chutes de tension au niveau des inductances L_z du réseau d'impédance.

2.4 Conclusion :

Durant ce chapitre, nous avons exposé le principe de fonctionnement de la stratégie SVM à 4 court-circuits pour la commande d'un onduleur triphasé à structure Z-Source, ainsi que leurs résultats de simulation, il est à noter après l'analyse des résultats que cette stratégie peut très bien fonctionner car elle représente la SVM modifié la plus simple à réaliser et elle n'est pas lourde lorsqu'on implémente cette stratégie dans les cartes numériques, cependant il existe d'autre stratégie de SVM modifié à 6 c-c [6] et à 12 c-c (Still work on it), qui sont plus performants. Donc, il est nécessaire de faire un choix judicieux par rapport à la détermination de la stratégie approprié pour une application donnée.

3. Système photovoltaïque en mode connecté au réseau :

3.1 Introduction :

L'énergie électrique à source solaire générée à partir de cellules photovoltaïques est sous forme de courant continu, et afin de pouvoir utiliser cette énergie et l'injecter dans le réseau électrique, on est tenu de la transformer en alternatif par le biais d'onduleurs qui vont servir comme interface entre les panneaux photovoltaïques et le réseau de distribution, une technologie très approximativement similaire est utilisée avec les piles à combustible, les convertisseurs pour énergie éolienne et les moteurs, cependant malgré la similitude des dispositifs, les considérations sont très spéciales pour les différents cas. L'onduleur constitue l'interface de connexion au réseau, sa commande nécessite une régulation du courant, une régulation du bus continu, ainsi qu'une synchronisation.

Divers critères doivent être respectés telle que la stabilité du système et la qualité de l'énergie [13], ainsi l'intégration de différentes technologies qui conduit à une diversité croissante du réseau et engendre donc des normes plus restrictives [12].

La majorité de ces besoins et exigences peuvent être satisfaits suivant une commande adéquate du convertisseur relié au réseau, par conséquent, c'est à travers ces dispositifs d'électronique de puissance que les sources d'énergie renouvelable adaptent les paramètres de la puissance générée à ceux exigés par le réseau électrique [13].

Une des techniques les plus employées pour la connexion d'une production décentralisée au réseau électrique est basée sur la commande par orientation de la tension de sortie, cette technique nécessite l'utilisation d'un régulateur pour la tension du bus continu aux bornes du condensateur C_Z du réseau d'impédance ainsi qu'un autre régulateur pour l'injection des courants dans le réseau [13].

3.2 Générateur photovoltaïque :

Un générateur photovoltaïque (GPV) représente un ou plusieurs modules PV (panneaux PV) qu'ils sont composés de plusieurs cellules solaires. Il donne en sortie une tension continue. La modélisation, les caractéristiques du GPV et la technique du MPPT, ont été présentées dans les références suivantes [6].

3.3 Configuration du système :

La structure de l'étage d'adaptation pour la connexion d'un onduleur Z-Source au réseau électrique est illustrée dans la figure 3-1 suivante :

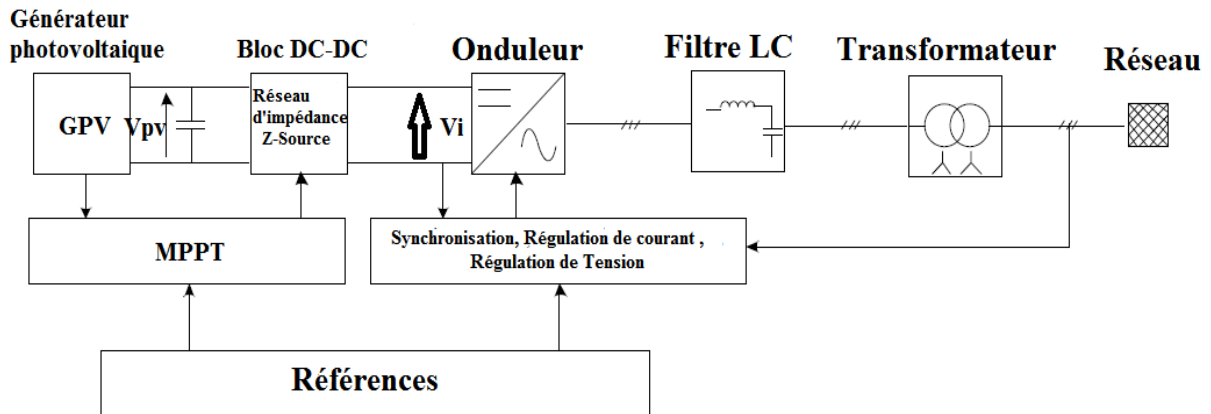


Figure 3- 1 : Diagramme général d'un système PV connecté au réseau.

Toute la puissance produite par le générateur photovoltaïque doit être transférée au réseau, le bloc DC-DC, qui est représenté par le réseau d'impédance Z-Source est en charge d'élever la tension afin d'atteindre la valeur de référence imposée pour le bus continu V_{Cz} , la tension à l'entrée de l'onduleur est mesurée de façon indirecte en multipliant la tension aux bornes du condensateur V_{Cz} par $(1 - d)$. La sortie du réseau d'impédance Z-Source est reliée à un onduleur triphasé, cet onduleur est commandé en courant afin d'injecter ce dernier au réseau avec un facteur de puissance unitaire. Un filtre est utilisé à la sortie de l'onduleur afin de réduire les distorsions de courant et de tension.

Le but de la commande appliquée est d'avoir l'aptitude de contrôler les puissances actives et réactives injectées au réseau par une régulation du courant de sortie de l'onduleur [15]. Cette commande également la régulation du bus continu fictif représenté par la tension de sortie du réseau d'impédance V_i , et qui est sous forme de créneaux, ainsi qu'une synchronisation des tensions de sortie de l'onduleur avec celles du réseau afin d'éviter la naissance d'un courant de circulation entre les deux systèmes [16].

3.4 Stratégie de commande :

La commande utilise des contrôleurs PI standards pour réguler les courants à la sortie de l'onduleur dans une boucle interne et le bus continu (Tension aux bornes du condensateur C_z du réseau d'impédance) dans une boucle externe. Une Synchronisation doit être effectuée entre les tensions de sortie de l'onduleur et celles du réseau [13].

3.4.1 Synchronisation avec le réseau :

Afin de pouvoir connecter normalement un onduleur au réseau électrique, la tension de sortie de l'onduleur doit avoir la même fréquence que celle du réseau pour les trois phases. Ceci peut se faire en déterminant l'angle de la phase de la tension à partir d'une mesure directe du réseau [14].

Cependant, les tensions au point du raccordement de l'onduleur au réseau peuvent comporter des distorsions qui peuvent subsister dans le courant de sortie de l'onduleur, il est donc nécessaire que le système de synchronisation puisse gérer ces distorsions [14].

Il existe plusieurs méthodes envisageables, cependant deux d'entre elles sont les plus fréquemment utilisées, une première méthode consiste à filtrer la tension mesurée au point de raccordement avec le réseau, l'inconvénient majeur de cette méthode est qu'elle génère un déphasage qui est d'autant plus important que la fréquence de coupure du filtre est basse, la deuxième méthode est basée sur la détection du passage par zéro de la tension, chose qui permet donc d'en déduire la période et de reconstruire un signal sinusoïdal unitaire. Cette technique est plus performante que la précédente, cependant, elle n'est pas optimale lors d'un saut de phase par exemple [17].

La méthode choisie pour notre application est à base de PLL (Phase Locked Loop). Cette technique basée sur la régulation produit un signal de sortie qui synchronise en phase et en fréquence avec le signal de l'entrée triphasé, et ceci en utilisant une boucle de réglage [18]. Le processus de synchronisation s'effectue en temps réel, ce qui amène donc la boucle à fonctionner constamment et en temps réel [14].

A- Structure d'une PLL :

Un circuit PLL est généralement constitué de trois éléments : Un détecteur de phase, Un filtre de boucle et un oscillateur.

La structure générale de PLL est illustrée sur la figure 3-2 ci-dessous :

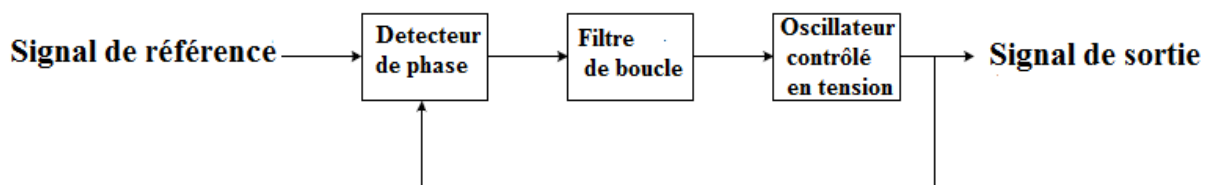


Figure 3- 2: Structure générale d'une PLL.

Le détecteur de phase est mis en œuvre en transformant les tensions triphasées du point de raccordement au réseau dans le système biphasé d-q. La différence de phase entre le signal d'entrée et le signal de sortie peut être extraite en appliquant une fonction arc tangente. Ceci fournit donc la différence de phase exacte. Cette différence peut être trouvée indirectement en supposant qu'elle est nulle lorsque $V_q = 0$.

Le filtre de boucle est un régulateur, généralement un régulateur PI dont la fonction est d'annuler l'erreur de phase. Il est possible aussi d'utiliser des régulateurs d'ordre supérieur pour augmenter la dynamique du système et ses capacités de filtrage, cependant, cela augmente la complexité du système. Ainsi, l'utilisation d'un régulateur PI nous donne un système de second ordre, ce qui nous confère la possibilité de régler la bande passante de la PLL, ainsi que le facteur d'amortissement en utilisant la théorie des systèmes linéaires.

L'oscillateur contrôlé en tension est situé après le filtre de boucle dont la sortie est une fréquence, généralement, il s'agit d'un simple intégrateur qui nous donne la phase à la sortie.

B- Principe de base d'une PLL :

Le principe de la commande PLL est l'orientation de la tension mesurée à partir du point de jonction avec le réseau suivant l'axe direct d, ceci revient donc à annuler la composante en quadrature de cette tension, en d'autres termes, annuler l'angle entre l'axe direct du repère tournant et le vecteur spatial de la tension mesurée, ce qui entraîne par la suite l'annulation de la composante en quadrature, ce principe de fonctionnement est ainsi représenté sur la figure 3-3 ci-dessous [15] :

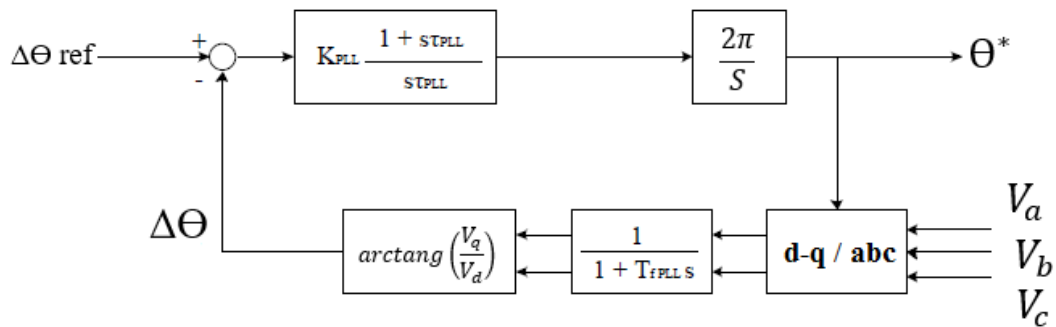


Figure 3- 3: Boucle de contrôle de la PLL.

Puisque la valeur est faible, on peut donc effectuer l'approximation suivante :

$$\arctang\left(\frac{V_q}{V_d}\right) = \left(\frac{V_q}{V_d}\right) \quad (\text{V-1})$$

C'est-à-dire que le terme *arctang* se comporte linéairement, on en déduit que :

$$\frac{V_q}{V_d} = \Delta\Theta \quad (\text{V-2})$$

Ainsi, la PLL peut être considérée comme une fonction linéaire, et ceci à des fins de modélisation. Afin d'avoir le vecteur de tension mesurée aligné sur l'axe direct du repère tournant d-q, on pose $\Delta\Theta_{ref} = 0$. Si l'angle de la tension mesurée dans le repère fixe α - β est supérieure à l'angle de l'axe d, la vitesse angulaire du repère d-q doit être augmentée, la figure 3-4 ci-dessous représente les différentes variables vectorielles.

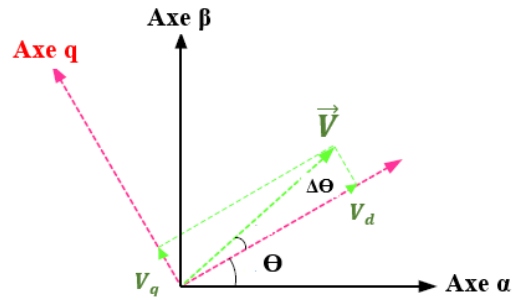


Figure 3- 4: représentation du vecteur de tension mesurée \vec{V} dans le repère d-q.

C- Dimensionnement du régulateur :

Pour la commande dans le repère synchrone, où les grandeurs sont fixes, un régulateur de type PI constitue la solution idéale pour les onduleurs triphasés connectés au réseau. Dans la forme générale se définit comme suit :

$$H_{PI}(s) = K_p \cdot \frac{1+T_i \cdot s}{T_i \cdot s} \quad (3-3)$$

La boucle de régulation illustrant le modèle de la PLL est illustrée dans la figure 3-5 suivante :

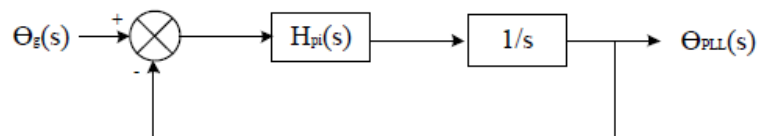


Figure 3- 5 : Modèle de la PLL.

La fonction de transfert en boucle fermée avec l'angle du réseau en entrée et l'angle de la PLL en sortie est donnée par la formule suivante :

$$M(S) = \frac{K_p \cdot s + \frac{K_p}{T_i}}{s^2 + K_p \cdot s + \frac{K_p}{T_i}} = \frac{2\xi \omega_n \cdot s + \omega_n^2}{s^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2} \quad (3-4)$$

Par identification :

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{\frac{K_p}{T_i}} \\ \xi = \frac{K_p}{2 \cdot \omega_n} = \frac{\sqrt{K_p \cdot T_i}}{2} \end{cases} \quad (3-5)$$

Les paramètres de boucle du second ordre doivent satisfaire :

$$\begin{cases} \omega_0 \geq 2\pi f_0 \\ \xi = \frac{1}{\sqrt{2}} \end{cases} \quad (3-6)$$

Le choix d'une basse fréquence de coupure ω_n assure un bon filtrage, cependant cela peut ralentir le système, une valeur élevée de ω_n permet de trouver rapidement la phase et d'assurer le suivi.

3.4.2 Régulation en courant :

Le but de cette régulation est d'imposer les valeurs de puissance active et réactive à injecter par l'onduleur au réseau [16]. Soit la figure 3-6 suivante illustrant la connexion de l'onduleur Z-Source au réseau.

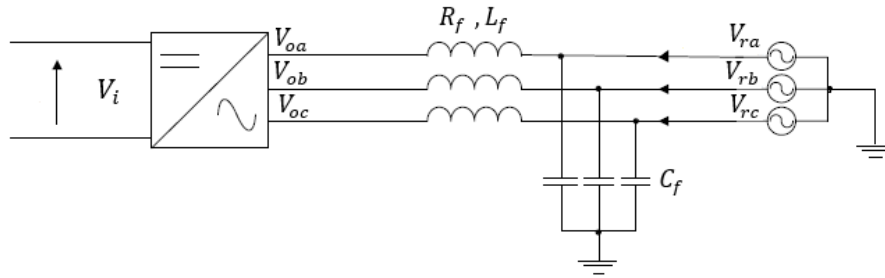


Figure 3- 6: Représentation de la connexion Onduleur Z-Source – Réseau.

En négligeant les courants passant dans les condensateurs du filtre triphasé LC [19]:

$$V_{r,k} = R_f i_k + L_f \frac{di_k}{dt} + V_{o,k} \quad k = a, b, c \quad (3-7)$$

Avec :

$V_{o,k}$: Tension à la sortie de l'onduleur.

$V_{r,k}$: Tension à la sortie du réseau.

i_k : Courant de la ligne.

R_f, L_f : Valeur de l'impédance de la partie inductive du filtre.

On peut exprimer le système sous forme matricielle [19] :

$$\begin{pmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_f + L_f \cdot S & 0 & 0 \\ 0 & R_f + L_f & 0 \\ 0 & 0 & R_f + L_f \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_{oa} \\ V_{ob} \\ V_{oc} \end{pmatrix} \quad (3-8)$$

On utilise la transformation de Park pour passer au repère d-q :

$$P(\Theta) \cdot \begin{pmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_f & 0 & 0 \\ 0 & R_f & 0 \\ 0 & 0 & R_f \end{pmatrix} \cdot P(\Theta) \cdot \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L_f & 0 & 0 \\ 0 & L_f & 0 \\ 0 & L_f & 0 \end{pmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \left(P(\Theta) \cdot \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \right) + P(\Theta) \cdot \begin{pmatrix} V_{oa} \\ V_{ob} \\ V_{oc} \end{pmatrix} \quad (3-9)$$

Ou $P(\Theta)$ représente la matrice de Park, Θ étant l'angle de rotation du repère tournant d-q.

En utilisant les propriétés matricielles classiques, on obtient le système matriciel suivant [19]:

$$\begin{pmatrix} V_{dr} \\ V_{dq} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{d0} \\ V_{q0} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R_f & -L_f \cdot \omega \\ L_f \cdot \omega & R_f \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L_f & 0 \\ 0 & L_f \end{pmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} \quad (3-10)$$

$$\begin{pmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{d0} \\ V_{q0} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R_f + L_f \cdot S & -L_f \cdot \omega \\ L_f \cdot \omega & R_f + L_f \cdot S \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} \quad (3-11)$$

On a donc le système suivant :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_f \cdot i_d + L_f \frac{di_d}{dt} - L_f \cdot \omega \cdot i_q + V_{d0} \\ V_{qr} = R_f \cdot i_q + L_f \frac{di_q}{dt} + L_f \cdot \omega \cdot i_d + V_{q0} \end{cases} \quad (3-12)$$

ω étant la pulsation de rotation du repère d-q.

En utilisant ces équations, on obtient le schéma synoptique suivant :

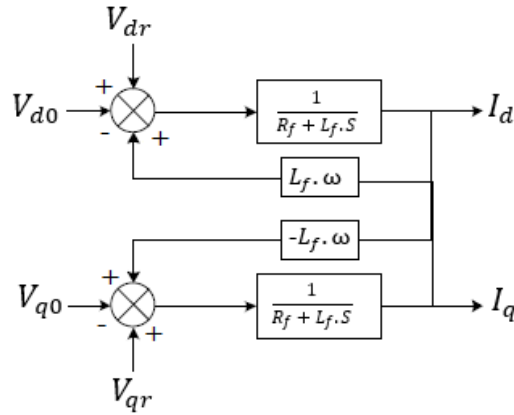


Figure 3- 7: Schéma synoptique du modèle de connexion au réseau électrique- (courants).

Ou les termes $L_f \cdot \omega \cdot i_{dq}$ représentent les termes de couplage entre les axes d et q, ce qui rend la régulation très complexe. Ainsi, on procède à une méthode de compensation par découplage par compensation qui consiste à ajouter une précommande à la boucle de régulation interne [20].

Ainsi, le contrôle des courants suivant l'axe d-q nous permet de contrôler les puissances actives et réactive :

$$\begin{cases} P_{ref} = \frac{3}{2} \cdot (V_{rd} \cdot i_{dref} + V_{rq} \cdot i_{qref}) \\ Q_{ref} = \frac{3}{2} \cdot (V_{rq} \cdot i_{dref} - V_{rd} \cdot i_{qref}) \end{cases} \quad (3-13)$$

Puisqu'on utilise la stratégie PLL, on annule la composante en quadrature de la tension du réseau ($V_{rq} = 0$), le système devient ainsi:

$$\begin{cases} P_{ref} = \frac{3}{2} \cdot (V_{rd} \cdot i_{dref}) \\ Q_{ref} = -\frac{3}{2} (V_{rq} \cdot i_{dref}) \end{cases} \quad (3-14)$$

Tel que Q_{ref} représente la puissance réactive de référence requise par la charge et qui doit être injectée dans le jeu de barre à la sortie de l'onduleur, elle nous permet d'avoir la référence du courant réactif à injecter dans le réseau i_{qref} . Cependant, la référence du courant actif i_{dref} est fournie par la boucle de régulation du bus continu V_{Cz} .

On peut déduire à partir du système d'équations (3-14) précédent que le courant i_{dref} représente l'image directe de la puissance active P_{ref} injectée dans le réseau, tandis que le courant i_{qref} est une image directe de la puissance réactive Q_{ref} .

En ce qui concerne la boucle de régulation des courants i_{dref} et i_{qref} , on a besoin de deux régulateurs, un pour le courant de ligne sur l'axe d et un autre pour le courant sur l'axe q, ces deux régulateurs fonctionnent pour le même modèle, ils sont donc identiques, on a donc besoin de calculer que les paramètres d'un seul régulateur.

Le modèle de régulation du courant est illustré dans la figure suivante :

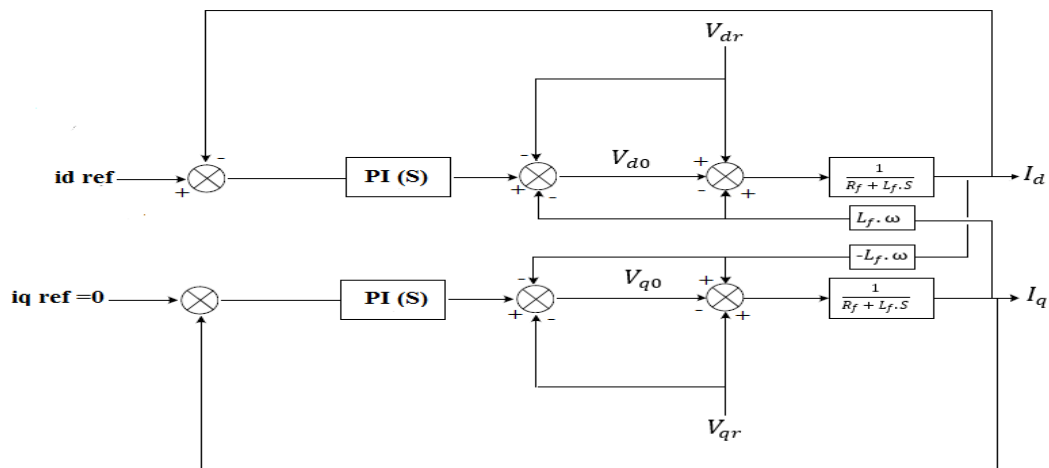


Figure 3-8: Schéma illustrant les boucles de régulation des courants sur les axes d-q.

3.4.3 Régulation de la tension du bus continu V_{Cz} :

La régulation de la tension aux bornes du condensateur V_{Cz} (Bus continu), s'effectue en absorbant ou en fournissant de l'énergie active au réseau.

Le principe est le suivant, suite à l'écart enregistrée entre la valeur de référence V_{Czref} et V_{Cz} , le fonctionnement du régulateur ajoute une puissance active fluctuante à la puissance P_{ref} et donne ainsi lieu à un courant fondamental actif i_{dref} corrigeant ainsi la tension du bus continu V_{Cz} . Le contrôleur de la tension se trouve dans la boucle externe. La sortie de ce régulateur donne une référence pour le contrôleur du courant suivant l'axe d dans la boucle interne.

En appliquant le principe de conservation de la puissance active à l'entrée et à la sortie de l'onduleur, et sachant que le transfert d'énergie de l'onduleur au réseau est nul durant la période de court-circuit de l'onduleur Z-source, on aboutit au résultat suivant :

Durant la période de non-court-circuit :

$$\text{On a: } P = V_i \cdot I_{eo1} \cdot (1 - d) = \frac{3}{2} \cdot V_{rd} \cdot I_d \quad (3-15)$$

Avec I_{eo1} étant le courant moyen de sortie du réseau d'impédance Z-Source durant la période de non-court-circuit [19]. A partir de l'équation (3-15), on obtient [19]:

$$I_{eo1} = \frac{3 \cdot V_{rd} \cdot I_d}{2 \cdot V_i \cdot (1 - d)} \quad (3-16)$$

Durant la période de court-circuit :

$$\text{On a: } I_{eo2} = 2 \cdot I_{Lz} \quad (3-17)$$

Avec I_{eo2} étant le courant moyen de sortie du réseau d'impédance Z-Source durant la période de court-circuit, et I_{Lz} est la valeur moyenne du courant passant dans l'inductance L_z du réseau d'impédance.

A partir des équations 3-16 et 3-17, on obtient :

$$I_{eo} = (1 - d) \cdot I_{eo1} + d \cdot I_{eo2} \quad (3-18)$$

On remplace I_{eo1} et I_{eo2} dans la relation 3-18 par leurs expressions respectives dans 3-16 et 3-17, et on obtient :

$$I_{eo} = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{rd} \cdot I_d}{V_i \cdot (1 - d)} \cdot (1 - d) + d \cdot 2 \cdot I_{Lz} \quad (3-19)$$

$$I_{eo} = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{rd} \cdot I_d}{V_i} + d \cdot 2 \cdot I_{Lz} \quad (3-20)$$

Selon le modèle Moyen de l'onduleur Z-Source, on a :

$$I_{Cz} = I_{Lz} - I_{eo} \quad (3-21)$$

$$I_{Cz} = (1 - d) \cdot I_{Lz} - \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{rd} \cdot I_d}{V_i} \quad (3-22)$$

$$\frac{3}{2} \cdot \frac{V_{rd} \cdot I_d}{V_i} = -I_{Cz} + (1 - 2 \cdot d) \cdot I_{Lz} \quad (3-23)$$

Afin de calculer la valeur de référence de tension à imposer au bus continu, il est indispensable d'obéir à la relation suivante:

$$V_{Cz} = \frac{V_i + V_{dc}}{2} \quad (3-24)$$

La figure 3-9 ci-dessous illustre la boucle de commande de la tension qui peut être modélisée comme suit:

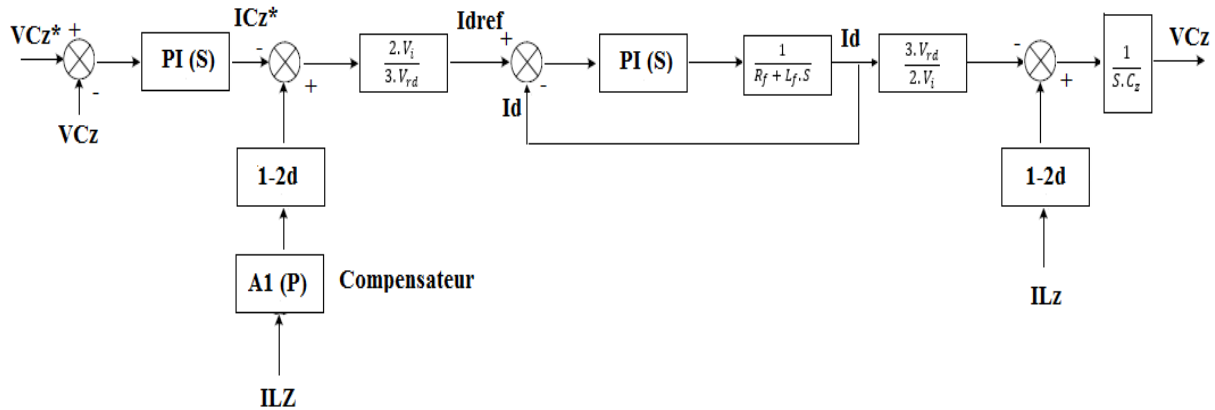


Figure 3- 9: Schéma illustrant la boucle de régulation de la tension V_{Cz} .

La commande générale du système photovoltaïque est représentée dans la figure 3-10 suivante :

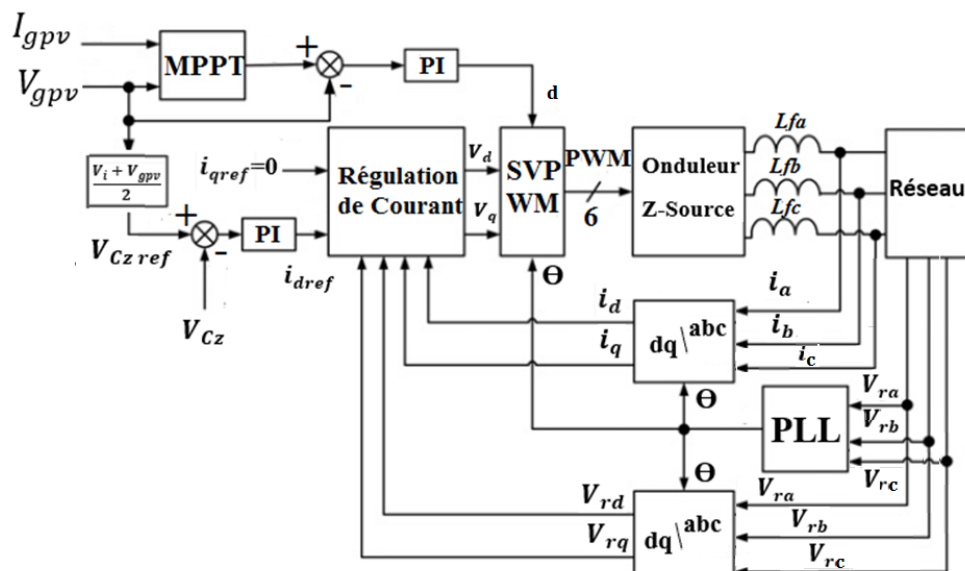


Figure 3- 10: Schéma illustrant le contrôle global du système connecté au réseau.

3.5 Résultats de simulation :

Afin de valider le modèle élaboré dans le chapitre présent, on procède à la simulation du système en utilisant les mêmes valeurs des grandeurs pour le réseau d'impédance et pour le filtre que celles utilisées dans les simulations précédentes. La sortie de l'onduleur Z-Source sera connectée à un réseau de distribution via un transformateur MT-BT. Les tensions fournies par le réseau au point de raccordement sont égales à 220 V efficace.

3.5.1 Synchronisation avec le réseau :

Afin d'effectuer la synchronisation avec le réseau, on utilise la stratégie PLL dont le schéma de contrôle est illustré sur la figure 3-3 en prenant $\Delta\theta_{ref} = 0$ et $f_{ref} = 50 \text{ Hz}$. Les résultats obtenus par simulation sont illustrés sur la figure 3-11 ci-dessous.

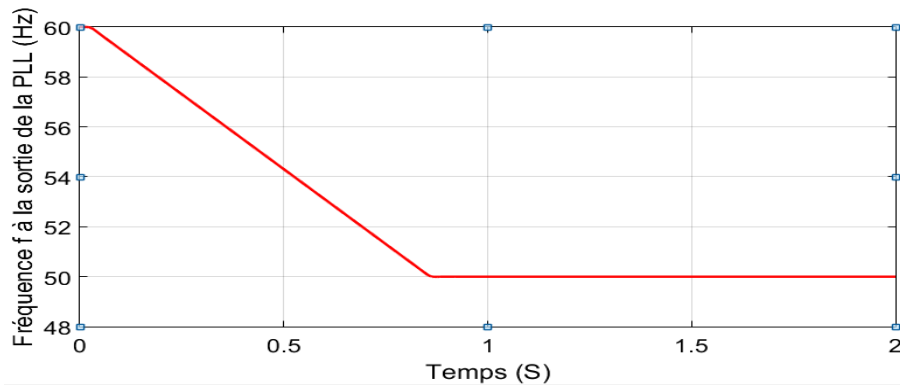


Figure 3- 11: Fréquence f fournie par la stratégie PLL ($f_{ref} = 50 \text{ Hz}$).

On peut observer sur la figure 3-11 le temps de réponse relatif à la stratégie PLL, qui est égale à 0.85s. On remarque que les sorties du bloc PLL convergent vers les valeurs de fréquence du réseau, ainsi que l'angle de rotation du vecteur spatiale V_s des tensions du réseau, utilisé par la suite dans les transformations abc-dq.

Dans la pratique, la fréquence du réseau n'est pas exactement égale à 50Hz, on admet une marge de variation de $\pm 2\text{Hz}$ (entre 48 et 52 Hz).

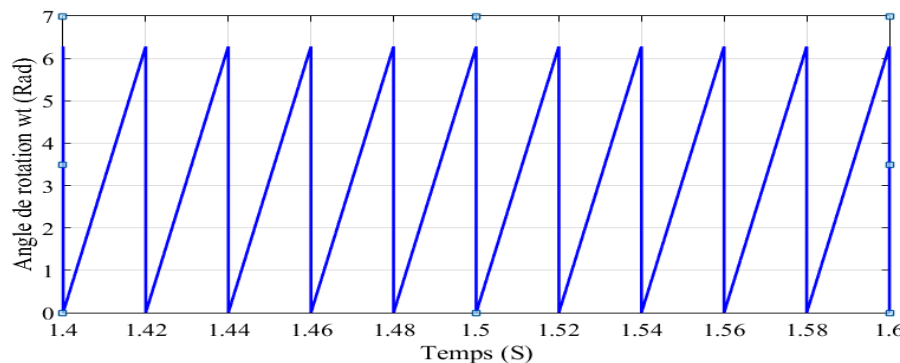


Figure 3- 12: Angle de rotation ωt fournie par la stratégie PLL ($f_{ref} = 50 \text{ Hz}$).

Ces résultats montrent la robustesse de notre PLL dans la poursuite de l'angle de phase. Puisque malgré le changement de la fréquence, les tensions sont synchronisées.

La figure 3-13 présentée ci-dessous illustre l'allure des tensions triphasées au point de raccordement de l'onduleur Z-Source au réseau électrique :

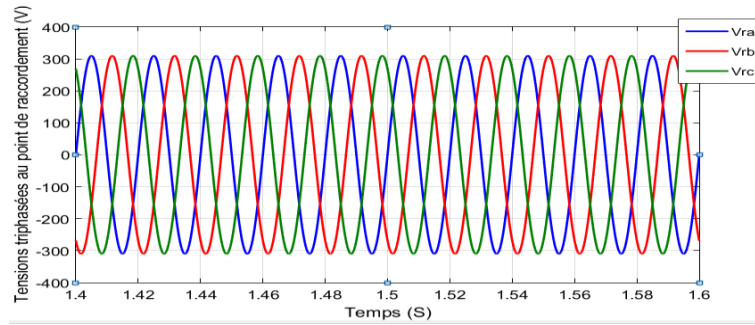


Figure 3- 13: Schéma illustrant les Tensions triphasées au point de raccordement de l'onduleur Z-Source au réseau.

3.5.2 Régulation des courants :

Le courant de référence d'axe direct est donné par le régulateur de la boucle externe, on voit bien que le courant i_d suit la valeur de référence ce qui prouve l'efficacité et la robustesse du régulateur PI utilisé.

L'allure du courant i_d est illustrée sur la figure 3-14 ci-dessous.

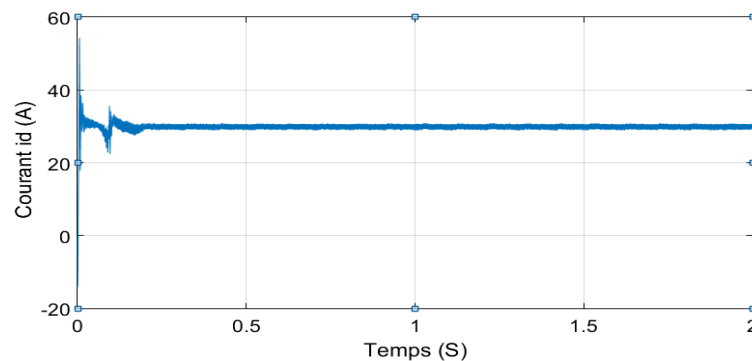


Figure 3- 14 : Allure du courant direct i_d à la sortie de l'onduleur.

Nous avons imposé un courant de référence pour l'axe en quadrature égal à zéro afin d'avoir un facteur de puissance unitaire au réseau. On voit que ce courant suit la valeur de référence ce qui prouve, encore une fois, l'efficacité du régulateur PI utilisé.

L'allure du courant i_q est illustrée sur la figure 3-15 ci-dessous.

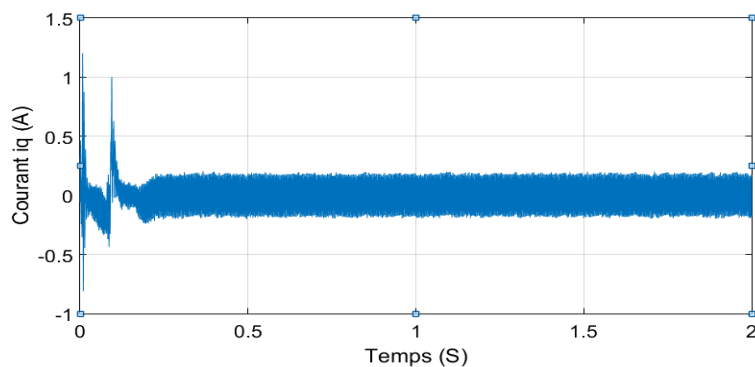


Figure 3- 15 : Allure du courant direct i_q à la sortie de l'onduleur.

3.5.3 Régulation du bus continu V_{Cz} :

La tension de référence du bus continu a été fixée à 1000V, on voit bien l'efficacité du régulateur PI, utilisé dans la boucle externe, dans l'annulation de l'erreur puisque la tension de sortie est égale à la tension de référence.

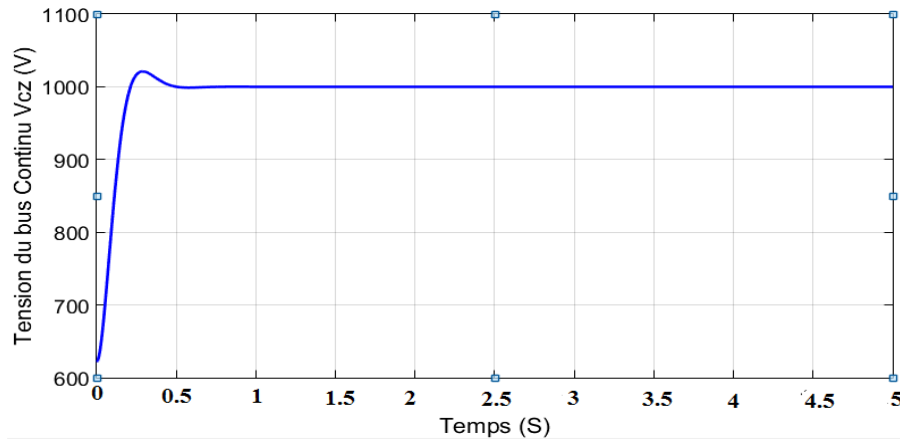


Figure 3- 16: Allure de la tension du bus continu V_{Cz} (V).

3.6 Conclusion :

Un système de commande complet de la chaîne photovoltaïque connectée a été présenté et modélisé. Les caractéristiques dynamiques du filtre de sortie et du réseau d'impédance Z-Source ont été étudiées, ainsi qu'une nouvelle stratégie de commande à deux boucles de régulation en cascade a été proposée. Un feedback précis sur la tension du bus continu a été proposée en utilisant la stratégie SVM modifiée. La commande appliquée au système est assurée par:

- La synchronisation des tensions de sorties de l'onduleur avec celles du réseau. Cette action a pour objectif de reconstituer une information sur la composante directe de la tension fondamentale.
- La régulation des courants de sortie de l'onduleur aux valeurs de référence, dans le but de contrôler les puissances actives et réactives injectées suivant les besoins de la charge.
- La régulation de la tension du bus continu suivant une valeur de référence adéquate afin de pouvoir fournir une tension de crête d'amplitude suffisante à l'entrée de l'onduleur, pour ne pas subir des distorsions sur la tension de sortie, et pouvoir en même temps contrôler la tension à la sortie du générateur photovoltaïque pour garantir un fonctionnement optimal.

Conclusion générale

Le virement de philosophie causé par la transition énergétique de l'énergie fossile vers les énergies renouvelables a lancé plusieurs défis techniques concernant l'optimisation de l'exploitation de ces dernières. Le travail effectué dans le cadre de ce Master nous a permis d'étudier un nouveau type de convertisseurs de puissance à source impédante Z-Source. Ce type de convertisseur muni d'un réseau d'impédance possède des caractéristiques qui le distinguent des convertisseurs conventionnels, lui permettant donc de surmonter leurs limitations pratiques.

Le premier chapitre a porté sur l'analyse de fonctionnement et la modélisation moyenne de cet onduleur qui assure à la fois deux fonctions, celle d'un hacheur survolteur et d'un convertisseur DC-AC classique. Le deuxième chapitre de ce mémoire a été dédiée à la présentation et la simulation de la stratégie de commande SVM modifiée à quatre court-circuits de l'onduleur Z-Source. Les résultats de simulation ont démontré les avantages et les inconvénients de cette technique. Cette stratégie est basée sur l'exploitation des états zéros pour élever la tension continue à l'entrée de l'onduleur, cependant, les grandeurs alternatives sont contrôlées en exploitant les états actifs. La loi de commande est donc générée par la combinaison de ces deux contrôles.

Le troisième chapitre de ce mémoire a porté sur l'étude de la connexion au réseau de notre chaîne de production PV. Durant cette étude, nous nous sommes principalement intéressés à la puissance injectée au réseau. La synchronisation nous a permis d'éliminer une éventuelle distorsion de la tension du point de raccordement lors de la connexion, ainsi que la régulation des tensions a servi au contrôle des puissances actives et réactives et à maintenir la tension du bus continu constante.

Ce travail non exhaustif offre quelques perspectives comme continuité présentées ci-dessous :

- Intégration de la structure étudiée dans le domaine de la traction électrique, avec utilisation des méthodes de commande non linéaires.
- La minimisation des capteurs utilisés pour le contrôle de l'onduleur.
- Au niveau du stockage, la technologie Lithium-Ion est la plus prometteuse en raison d'une meilleure tenue de recyclage, ainsi que de meilleurs rendements annoncés en charge et en décharge. Cette piste est intéressante à explorer pour les systèmes autonomes.
- Pour la production photovoltaïque en mode connecté au réseau, la rentabilité de cette dernière sera atteinte de façon optimale lors de l'association d'un système de stockage approprié et une gestion adéquate de puissance assurant la constance de la puissance fournie.

Bibliographie :

- [1] Le site officiel du Ministère de l'Énergie d'Algérie- www.energy.gov.dz - Programme d'Electrification (Consulté le 14/04/2017).
- [2] Hatziadoniu, C.J.; Chalkiadakis, F.E.; Feiste, V.K. “A power conditioner for a grid-connected photovoltaic generator based on the 3-level inverter[J]”. Energy Conversion, IEEE Transactions on Volume 14, Issue 4, Dec. 1999 pp: 1605 – 1610.
- [3] FANG.ZHENG. PENG “Z-Source Inverter”, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 39, NO. 2, MARCH/APRIL 2003.
- [4] V. S. NEVE “A literature Survey on z-source inverter”, VSRD International Journal of Electrical, Electronics & Communication Engineering, Vol. 2 No. 11 November 2012.
- [5] M.T. ACHOUR “Etude et Commande d'un Onduleur Triphasé à Structure Z-source : Application Aux Systèmes Multi-Sources”, Thèse de Magistère 2016, Ecole Militaire Polytechnique.
- [6] Y.Riache, M.M.Lamine “Étude, conception et commande d'un onduleur triphasé à structure Z-source: Application aux systèmes photovoltaïques multi-sources”, PFE 2017, ENP.
- [7] Manoj D. Patil, Rohit G. Ramteke. “L-C Filter Design Implementation and Comparative Study with Various PWM Techniques for DCMLI”. 2015 International Conference on Energy Systems and Applications (ICESA 2015). IEEE, ISBN 978-1-4673-6817-9.
- [8] G. SEGUIER, R. BAUSIERE et F. LABRIQUE, “Les convertisseurs de l'électronique de puissance _ La conversion continu-alternatif”, 2eme édition, Edition Dunod, 1995.
- [9] DJAAFER LALILI, Thèse de doctorat, “MLI Vectorielle et Commande Non Linéaire du Bus Continu des Onduleurs Multi-niveaux, Application à la Conduite de la Machine Asynchrone”, ENP 2009.
- [10] A.BATTISTON, “Modélisation, commande, et mise en œuvre des onduleurs à source impédente”, thèse de doctorat Université Lorraine. France 2014.
- [11] A. M. Trzynadlowski, “The field orientation principle in control of induction motors”, Kluwer Academic Publishers, 1994, ISBN: 0-7923-9420-8.
- [12] M. BOBROWSKA-RAFAL, K. RAFAL, M. JASINSKI, M.P. KAZMIERKOWSKI, “Grid synchronization and symmetrical components extraction with PLL algorithm for grid connected power electronic converters », Bulletin of the polish academy of sciences Vol, 59, No 4, Warsaw, 2011.

- [13] N. Hamrouni, A. Chérif, “Modeling and control of a grid connected photovoltaic system”, *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 10, N°3, Tunis, 2007.
- [14] Jim Ögren, “PLL design for inverter grid connection”, UPPSALA Universitet, 2011.
- [15] Tarjei Midtsund, “Control of Power Electronic Converters in Distributed Power Generation Systems”, Master Of Science in Energy and Environment, Norwegian University of Science and Technology, 2010.
- [16] A. NABIH, YEHEA ISMAIL, A. MAHGOUB, O. MAHGOUB “Control of Space-Vector Modulated Solar Grid-Tied Quasi-Z-source Inverter”, Center of Nanoelectronics and Devices (CND), American University in Cairo (AUC)/Zewail City (ZC), Cairo, Egypt.
- [17] Yann PANKOW, “Étude de l’intégration de la production décentralisée dans un réseau Basse Tension. Application au générateur photovoltaïque”, Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure d’Arts et Métiers, 2004.
- [18] Svein Erik Evju, “Fundamentals of Grid Connected Photo-Voltaic Power Electronic Converter Design”, Master Of Science In Energy and Environment, Norwegian University of Science and Technology, 2007.
- [19] Yu Tang, Jukui Wei, Shaojun Xie, “Grid-tied photovoltaic system with series Z-source Inverter”, Jiangsu Key Laboratory of New Energy Generation and Power Conversion, Nanjing 210016, People’s Republic of China.
- [20] Farid BOUCHAFAA, “Étude et Commande de différentes Cascades à Onduleur à Neuf Niveaux à Structure NPC, Application à la conduite d’une MSAP”, Thèse de Doctorat, ENP, 2006.