

الجمهورية الديمقراطية الشعبية الجزائرية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية بالجزائر
Ecole Supérieure des Sciences Appliquées Alger



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Département du second cycle

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Traction électrique

Thème :

Etat de l'art sur Les Convertisseurs Matriciels

Présenté par : Kasri Sinissa

Encadré par : Dr. Benachour Ali

Co-encadré par : Dr Dali Ali

Soutenu le : 02/09/2020

Devant le jury composé de :

M. Iffouzar Koussaila

M. Benachour Ali

M. Dali Ali

M. Debboucha Abdelhakim

Président

Encadreur

Co-encadreur

Examineur

Monôme N° : 25/Master / 2020

الجمهورية الديمقراطية الشعبية الجزائرية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية بالجزائر
Ecole Supérieure des Sciences Appliquées Alger



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Département du second cycle

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Traction électrique

Thème :

Etat de l'art sur Les Convertisseurs Matriciels

Présenté par : Kasri Sinissa

Encadré par : Dr. Benachour Ali

Co-encadré par : Dr Dali Ali

Soutenu le : 02/09/2020

Devant le jury composé de :

M. Iffouzar Koussaila

M. Benachour Ali

M. Dali Ali

M. Debboucha Abdelhakim

Président

Encadreur

Co-encadreur

Examineur

Monôme N° : 25/Master / 2020

ملخص:

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تقديم نبذة حول المموجات المصفوفية المقترحة في المقالات العلمية، حيث بدأنا بتقديم طوبولوجيات المموجات المصفوفية ثم طوبولوجيات المقاطع المستعملة في هؤلاء المموجات وأخيرا طرق التبديل للمقاطع ثنائية الاتجاه بأمان.

كلمات مفتاحية:

موج مصفوفي، مباشرة، غير مباشرة، التبديل، قاطع ثنائي الاتجاه.

Résumé :

L'objectif principal de ce travail est de présenter un état de l'art sur les convertisseurs matriciels proposés dans la littérature, on a entamé ce travail par une présentation des topologies des convertisseurs matriciels, ensuite les topologies des interrupteurs utilisés dans ce genre de convertisseurs et enfin les méthodes de commutations sans risques des interrupteurs bidirectionnels.

Mots Clés :

Convertisseur Matriciel, directe, indirecte, commutation, interrupteur bidirectionnel.

Abstract :

The main objective of this work is to present a state of the art on matrix converters proposed in the literature, we started this work by a presentation of the topologies of matrix converters, then the topologies of the switches used in this kind of converters. and finally the safe switching methods of bidirectional switches.

Key Words:

Matrix converter, direct, indirect, switching, bidirectional switch.

Remerciements

Au terme de ce modeste travail, je remercie tout d'abord le bon Dieu de m'avoir maintenu en bonne santé , de m'avoir donner le courage et la volonté pour arriver à voir le bout du tunnel.

*Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à mon promoteur **Mr. Benachour Ali**, et mon Co-promoteur **Mr. Dali Ali**, je tiens à leur exprimer toute ma reconnaissance pour leur disponibilité et la confiance qu'ils ont su me témoigner.*

je tiens à remercier l'ensemble des enseignants de l'Ecole Supérieure des Sciences Appliquées d'Alger spécialement ceux du département Génie électrique, pour leur encadrement tout au long de notre formation.

Que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail trouvent ici l'expression de ma sincère gratitude.

Dédicaces

A mes chers parents, Lahouas et Farida, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes chères sœurs, Ibtissem et Mounia, pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A mon frère Yacine et sa femme Hawa, pour leur appui et leur encouragement,

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

A mon Promoteur Mr. Benachour, et mon Co-promoteur Mr. Dali Ali pour leur disponibilité et leur encadrement durant la réalisation de ce modeste travail,

A mon Binôme du projet de fin d'études, Aymen, pour son aide depuis le début,

A tous mes amis de la promotion Traction Electrique 2020,

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

Merci d'être toujours là pour moi...

Table des matières

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Liste des Abréviations

1.	Introduction.....	9
2.	La base des convertisseurs matriciels	10
3.	État des topologies et des applications des Convertisseurs Matriciels	11
4.	Les Catégories des Convertisseurs matriciels	11
4.1	Les convertisseurs matriciels monophasés.....	12
4.1.1	Le CM monophasé conventionnel	12
4.1.2	Le CM à Z-Source Monophasé.....	13
4.1.3	Le CM à six interrupteurs Buck/Boost	13
4.1.4	Le CM isolé à Transformateur haute fréquence.....	13
4.2	Les Convertisseurs Matriciels triphasé.....	15
4.2.1	Le convertisseurs matriciels directe (CMD)	15
4.2.2	Le convertisseurs matriciels indirecte (CMI).....	15
4.2.3	Les Convertisseurs Matriciels triphasé Z-source (CMTZS)	16
4.2.4	Les convertisseurs Matriciels Multi-phases (CMM)	18
4.2.5	Les convertisseurs matriciels Multi-niveaux (CMMN).....	18
5.	Les Topologies des interrupteurs quatre quadrants :	20
5.1	Topologie à transistor connecté à un pont à diode	21
5.2	Topologie à transistor.....	21
5.2.1	Topologie à transistors et diodes en antiparallèle	21
5.2.2	Topologie à transistor et diode en série	22
5.3	Topologie à RB-IGBT	22
6.	Commutation des interrupteurs quatre segments	24
6.1	Problématique des commutations.....	25
6.2	Commutation en courant	25
6.2.1	Commutation en 4 étapes.....	26
6.2.2	Commutation en 3 étapes.....	27
6.2.3	Commutation en 2 étapes.....	27
6.3	Commutation en tension.....	28

6.3.1	Commutation en 4 étapes	28
6.3.2	Commutation en 2 étapes	30
6.3.3	Commutation sous signe de tension incertain	30
7.	Conclusion	32

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Liste des Figures

Figure 1. Convertisseurs Matriciels : (A) CM Directe, (B) CM Indirecte.....	10
Figure 2. Statistiques des publications en 2018.....	11
Figure 3. Catégorisation des topologies de convertisseur matriciel	12
Figure 4. Le CM monophasé conventionnel.....	13
Figure 5. CM à Z-Source Monophasé	13
Figure 6. CM à six interrupteurs Buck/Boost	14
Figure 7. CM isolé à Transformateur haute fréquence	14
Figure 8. Convertisseur Matriciels Indirecte : (A) Sparse, (B) Very Sparse, (C) Ultra Sparse.....	16
Figure 9. Convertisseurs Matriciels Z-Source : (A) Directe, (B) Indirecte	17
Figure 10. Les Convertisseurs Matriciels Multi-niveaux.	19
Figure 11. (A) CM Multi-Niveaux Avec capacités flottantes, (B) CM Multi-Niveaux à pont en H, (C) Schéma d'une cellule de commutation à pont en H.....	20
Figure 12. Caractéristique statique/dynamique idéale	20
Figure 13. les topologies des interrupteurs.	23
Figure 14. (A) Cellules de commutation du convertisseur matriciel, (B) Schéma de base pour l'étude des commutations.	24
Figure 15. Schématisation du risque lors de la commutation.	25
Figure 16. (A) Séquence de commutation en courant en quatre étapes(courant positif), (B) Interrupteurs commandés à la seconde étape de commutation.....	26
Figure 17. (A) Schématisation de la commande et de la commutation d'IGBT, (B) Exemple de commutation en trois étapes à l'aide du courant (positif).....	27
Figure 18. Exemple de commutation en deux étapes à l'aide du courant	28
Figure 19. Schéma de base pour l'étude des commutations	29
Figure 20. Exemple de commutation en quatre étapes à l'aide de la tension composée	29
Figure 21. Exemple de commutation en deux étapes à l'aide de la tension composée	30
Figure 22. Schématisation de la commutation sous tension composée incertaine	31

Liste des tableaux

Tableau 1. Résumé des topologies CM monophasés	14
Tableau 2. Résumé des topologies des Convertisseurs Matriciels triphasés	17
Tableau 3. Synthèse des interrupteurs.	24

Liste des Abréviations

- CM : Convertisseurs Matriciels.
- DMC : Convertisseurs Matriciels Directes.
- IMC : Convertisseurs Matriciels Indirectes.
- SVM : modulation des vecteurs spatiaux.
- CMM : convertisseurs matriciels monophasés.
- CMMC : Convertisseurs Matriciels monophasés conventionnels
- CMZS : Convertisseurs Matriciels à Z-source monophasées.
- THF : Transformateur Haute Fréquence.
- CMS : Convertisseurs Matriciels Sparse.
- CMVS : Convertisseurs Matriciels Very Sparse.
- CMUS : Convertisseurs Matriciels Ultra Sparse.
- CMTZS : Convertisseurs Matriciels triphasé Z-source.
- CMM : Convertisseurs Matriciels Multi-phases.
- CMMN : Convertisseurs Matriciels Multi-Niveaux.
- IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor.

1. Introduction

Dans le secteur industriel la consommation de l'énergie électrique s'est penchée vers l'alternatif car les charges industrielles sont, pour l'essentiel, des machines électriques à courant alternatif et de nombreuses applications en dépendent. Entre autres, on peut citer comme exemples d'application : La commande des moteurs alternatifs, L'interconnexion de réseaux électriques et l'amélioration du rendement des systèmes éoliens, et cela a fait que la conversion AC-AC soit la plus répandue.

Dans la communauté universitaire, une recherche est effectuée sur les convertisseurs AC-AC notamment les convertisseurs matriciels et leurs topologies étendues et cela depuis plus de trois décennies et elle est toujours très populaire, étant donné le nombre d'article publiés dans ce domaine chaque année.

Le concept du convertisseur matriciel fut décrit pour la première fois en 1976 par Guygyi -Pelly [1] proposant la réalisation d'un convertisseur direct, La dénomination "direct" découle du fait que ce convertisseur ne possède aucun étage de stockage intermédiaire dans la chaîne de conversion ,utilisant uniquement des interrupteurs bidirectionnels , totalement réversible ,disposés selon une matrice d'interconnexion.

Le convertisseur matriciel utilise des interrupteurs quatre segments, qui sont proposés dans la littérature sous forme de plusieurs topologies, et cela pour faire face au problème de commutation qui est l'un des soucis de ce genre de convertisseurs.

Dans ce qui suit, on va présenter quelques topologies des convertisseurs matriciels et des interrupteurs utilisés et aussi on va exposer des séquencements particuliers de la commande des commutations de ces interrupteurs.

2. La base des convertisseurs matriciels

Les CM transforment le courant alternatif non commandé (amplitude de tension fixe et fréquence fixe) en courant alternatif commandé (amplitude de tension variable et fréquence variable) sans aucun étage de conversion intermédiaire. Les principaux avantages d'un MC sont : le courant qui est sinusoïdal côté source, le facteur de puissance contrôlé côté source, l'absence d'une capacité de liaison DC encombrante et aucune limitation de fréquence à la sortie.[2]

Le CM dispose d'un ensemble de dispositifs de commutation bidirectionnels qui relie directement une source triphasée à une charge triphasée. Habituellement, la partie source a un caractère capacitif, ainsi les courts-circuits sont évités aux bornes d'entrée, de même, l'extrémité de la charge est de nature inductive et un circuit ouvert est évité pour fournir un chemin de commutation pour le courant.[2]

En 1983, Rodriguez a inventé une stratégie de contrôle des MC basée sur une «liaison DC fictive» également appelée méthode de contrôle indirect ou «fonction de transfert indirect», Cette méthode de contrôle est similaire aux schémas de contrôle des onduleurs, c'est à dire le motif de commutation est tel que chaque ligne de sortie est commutée aux lignes d'entrée les plus positives et négatives en utilisant la MLI (Modulation de la largeur d'impulsion).[3]

De plus, en 1989, Huber et al ont publié quelques articles de recherche utilisant les principes de fonctionnement des techniques de modulation des vecteurs spatiaux (SVM).[4], [5].

En général, les CM peuvent être divisés en deux classifications principales: les topologies Directes (DMC), et les topologies Indirectes (IMC), La figure 1-A montre la topologie DMC [6], [7] composée de neuf commutateurs bidirectionnels tandis que la figure 1-B montre la structure générale de la topologie IMC [8], [9] qui comprend un étage redresseur et un onduleur de source de tension à deux niveaux.

Les deux convertisseurs fournissent des formes d'onde d'entrée et de sortie de meilleure qualité avec des stratégies de contrôle appropriées.

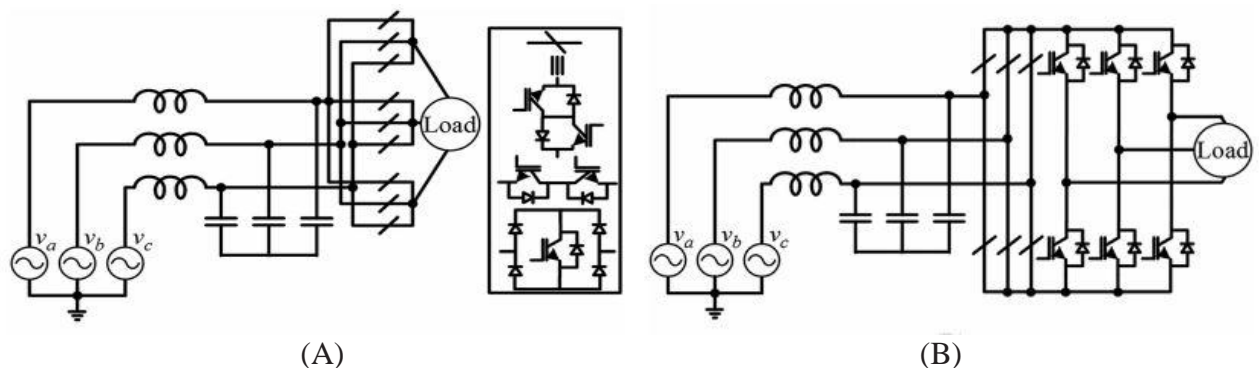


Figure 1. Convertisseurs Matriciels : (A) CM Directe, (B) CM Indirecte

3. État des topologies et des applications des Convertisseurs Matriciels

La recherche liée au CM s'est développée rapidement depuis son introduction en 1976. Des recherches intensives ont été menées dans le domaine des CM, principalement axées sur la mise en œuvre des éléments de commutation, les techniques de commande et leurs applications pratiques. La figure 1 montre le nombre d'articles de recherche publié depuis 1980 jusqu'à 2017 [2].

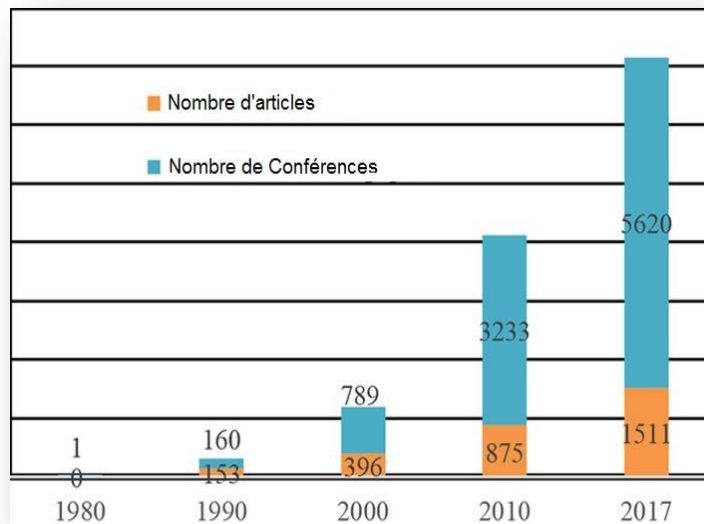


Figure 2. Statistiques des publications en 2018

4. Les Catégories des Convertisseurs matriciels

En prenant en considération les fonctions requises, les convertisseurs matriciels sont généralement classés en différentes catégories en fonction de la phase (monophasée / triphasée) et des structures (directes / indirectes / multi-niveaux). Une autre classification peut être basée sur le nombre d'entrées, par exemple : entrées triphasées ou entrées multi-phases.

L'organigramme ci-dessous montre la large catégorisation des CM en fonction des différentes structures et niveaux :

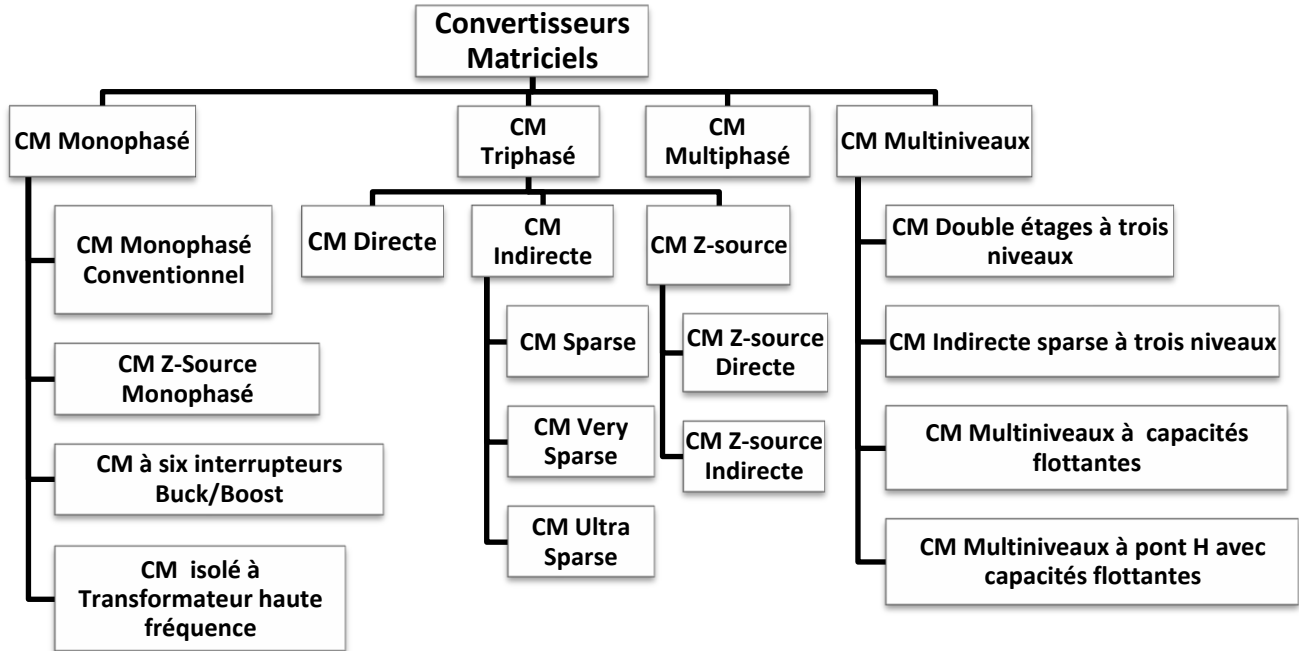


Figure 3. Catégorisation des topologies de convertisseur matriciel

4.1 Les convertisseurs matriciels monophasés

Les applications de la conversion d'énergie monophasée augmentent de jour en jour avec les convertisseurs triphasés et multi-niveaux. Au cours des deux dernières années, de nombreux nouveaux convertisseurs monophasés ont été proposés [10], [11]. Les structures générales des convertisseurs matriciels monophasés (CMM) sont illustrées dans les figures 4-7.

4.1.1 Le CM monophasé conventionnel

La figure 4 montre la structure conventionnelle du CMM. Ce convertisseur comprend quatre dispositifs de commutation bidirectionnels et fournit une variation d'amplitude et de fréquence à la sortie avec des angles de commutation pré-calculés [12].

Théoriquement, dans le CMMC, la commutation doit être instantanée et simultanée pour éviter les problèmes de court-circuit / circuit ouvert. En pratique, il est impossible d'obtenir une commutation idéale, c'est pourquoi des stratégies de commutation sont principalement utilisées dans les CM [12].

4.1.2 Le CM à Z-Source Monophasé

Le SPMC conventionnel ne peut qu'abaisser l'amplitude et augmenter la fréquence. Ainsi, le besoin à la fois d'une amplitude variable et une fréquence réglable a conduit au développement des CM à Z-source monophasée (CMZS) [13] illustré sur la figure 5.

La structure Z-source [14] a reçu beaucoup d'attention en raison de ses nombreux avantages, y compris la conversion de puissance à un étage et une fiabilité améliorée. Ainsi, les chercheurs ont utilisé des onduleurs Z-Source dans de nombreuses applications différentes [15], [16].

Il est composé de cinq commutateurs bidirectionnels, un réseau d'impédance composé de deux inductances et deux condensateurs, un filtre LC et une charge RL. Les éléments de stockage dans le réseau d'impédance fournissent la fonction d'amplification.

4.1.3 Le CM à six interrupteurs Buck/Boost

Le CM Buck-Boost à six commutateurs n'utilise qu'une seule inductance pour le stockage d'énergie par rapport au ZSMC, qui utilise deux inductances et deux condensateurs et fournit une régulation d'amplitude et de fréquence variable. La structure générale est présentée dans La figure 6, qui contient six commutateurs unidirectionnels, une inductance d'entrée et deux condensateurs de filtrage (C_{in} et C_{out}) [17].

4.1.4 Le CM isolé à Transformateur haute fréquence

Ahmed et al [18] ont proposé cette structure, qui offre une isolation électrique éliminant le besoin d'un transformateur de ligne volumineux. De plus, il fournit une fréquence de sortie variable et des tensions de sortie redressées.

Il est constitué d'un Transformateur haute fréquence, d'un condensateur de blocage de la tension continue (C_p) et de quatre interrupteurs côté primaire, et de deux interrupteurs, Condensateur C_s et un filtre LC du côté secondaire, comme illustré sur la figure 7.

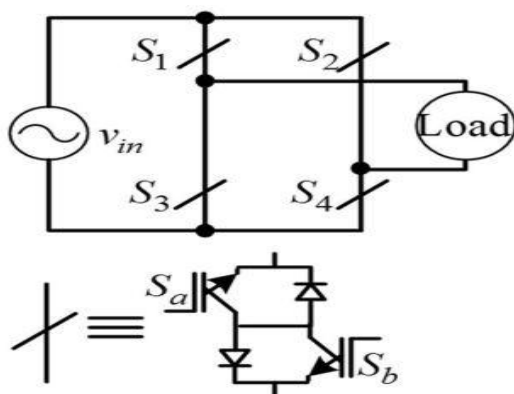


Figure 4. Le CM monophasé conventionnel

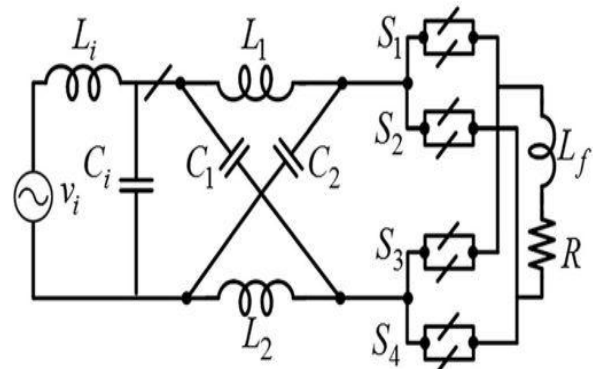


Figure 5. CM à Z-Source Monophasé

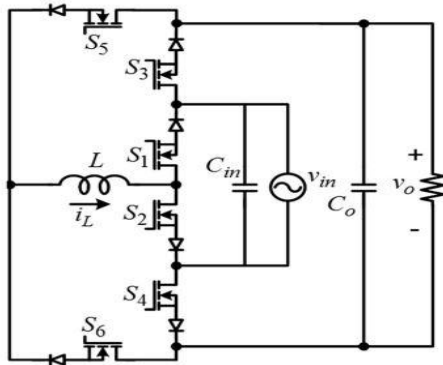


Figure 6. CM à six interrupteurs Buck/Boost

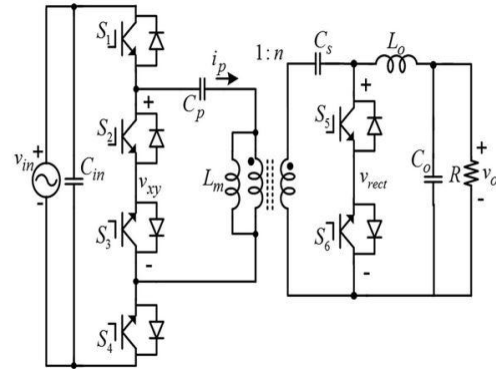


Figure 7. CM isolé à Transformateur haute fréquence

un tableau résumant les topologies monophasées des convertisseurs matriciels et quelques applications de ces derniers.

Les Topologies Monophasé	Dispositifs de commutation	Éléments de Stockage d'Energie	Caractéristique	Défis	Applications
CM monophasé conventionnel [12]	Quatre interrupteurs bidirectionnels	Aucun	Transformation et rectification, augmenter la Fréquence, abaisser la tension	Tension limitée, taux de conversion, problème de commutation	Circuit d'alimentation sans coupures.
CM à Z-Source Monophasé [13]	Cinq interrupteurs bidirectionnels	Deux inductance et deux condensateurs	Fréquence modifiée par pas, Stratégie de commutation sûre.	le volume, le cout des composants, perte de l'énergie stockée.	Contrôle des élan des ventilateurs / pompes, Commande des moteurs électriques, Chauffage inductif.
CM à six interrupteurs Buck/Boost [17]	Six interrupteurs unidirectionnels en courant et bidirectionnels en blocage de tension	Inductance	Peut fonctionner en Buck-boost, fréquence modifiée par pas, aucun problème de commutation, des Mosfets rapides peuvent être utilisé.	le volume, le cout des composants, perte de l'énergie stockée.	Booster l'alimentation par des CM AC-DC basé sur le multiplicateur de tension Cockcroft - Walton
CM isolé à Transformateur haute fréquence [18]	Six interrupteurs actifs	Un condensateur de blocage DC, un condensateur de décalage, et un THF	Isolation électrique, différents types de tensions de sortie.	problèmes de Commutation, pertes magnétique des composants	Les restaurateurs de la Tension dynamique

Tableau 1. Résumé des topologies CM monophasés

4.2 Les Convertisseurs Matriciels triphasés

Les CM triphasés sont généralement classés en trois catégories différentes, à savoir : CM directe, CM Indirecte, CM Z-source.

4.2.1 Les convertisseurs matriciels directes (CMD)

Les CMD contiennent neuf dispositifs de commutation bidirectionnels qui connectent directement une phase de source à une phase de la charge, supprimant tout élément de stockage d'énergie comme illustré sur la figure 1-(A). Il fournit un contrôle de l'amplitude et de la fréquence en fonction de la commutation du dispositif actif, La plupart des recherches concernant les CMD sont dédiées à la résolution des problèmes de commutation et à la proposition de nouvelles stratégies de modulation [19], [20].

4.2.2 Les convertisseurs matriciels indirectes (CMI)

La structure CMI conventionnelle est représentée sur la figure 1-B, Le redresseur est composé de six interrupteurs quatre segments à double commande, et l'onduleur est composé de six interrupteurs unidirectionnels.

Les interrupteurs coté redresseur permettent d'opérer avec un courant positif ou négatif, acceptant ainsi une réversibilité de puissance. A chaque instant, deux transistors et deux diodes conduisent dans le redresseur. Cette première topologie génère moins de pertes par conduction par rapport aux autres topologies indirectes, en revanche elle nécessite un plus grand nombre de transistors. [21]

Des topologies ont été proposées dans la littérature [22], [23], afin de réduire le nombre de composants commandables nécessaires et de limiter la complexité du contrôle-commande.

4.2.2.1 Le CM Sparse (CMS)

La structure sparse, représentée dans la Figure 8-(A), permet de supprimer trois composants commandables du redresseur par rapport à la topologie indirecte conventionnelle. En revanche, en fonction du sens de transit de la puissance, trois transistors et trois diodes (puissance transmise à la charge) ou deux transistors et deux diodes (puissance réinjectée dans le réseau d'entrée) sont conducteurs, ce qui génère des pertes par conduction plus élevé par rapport au CM indirecte conventionnel [24],[26].

4.2.2.2 Le CM very Sparse (CMVS)

La topologie, nommée convertisseur matriciel Very Sparse et présentée à Figure 8-B, est composée de six interrupteurs quatre segments à transistor unique. Cette topologie permet de limiter à six le nombre de composants commandables pour le redresseur, réduisant ainsi par deux leur nombre par rapport au redresseur de la topologie "indirect". Les pertes par conduction de cette topologie sont plus grandes puisque chaque élément actif nécessite la mise en conduction d'un transistor ainsi que de deux diodes. Ainsi, le redresseur sollicite, à chaque instant, deux transistors et quatre diodes [21].

4.2.2.3 Le CM Ultra Sparse (CMUS)

Cette topologie limite le nombre d'interrupteur à son strict minimum, c'est-à-dire, un seul par phase d'entrée comme le montre la Figure 8-(C). Cette topologie requiert la conduction de deux diodes et d'un transistor par bras commandé. Le redresseur de la structure produit donc des pertes par conduction similaire à celle générées par le redresseur de la topologie Very-Sparse. cette structure n'est pas réversible en puissance et ne permet donc pas le mode freinage [21].

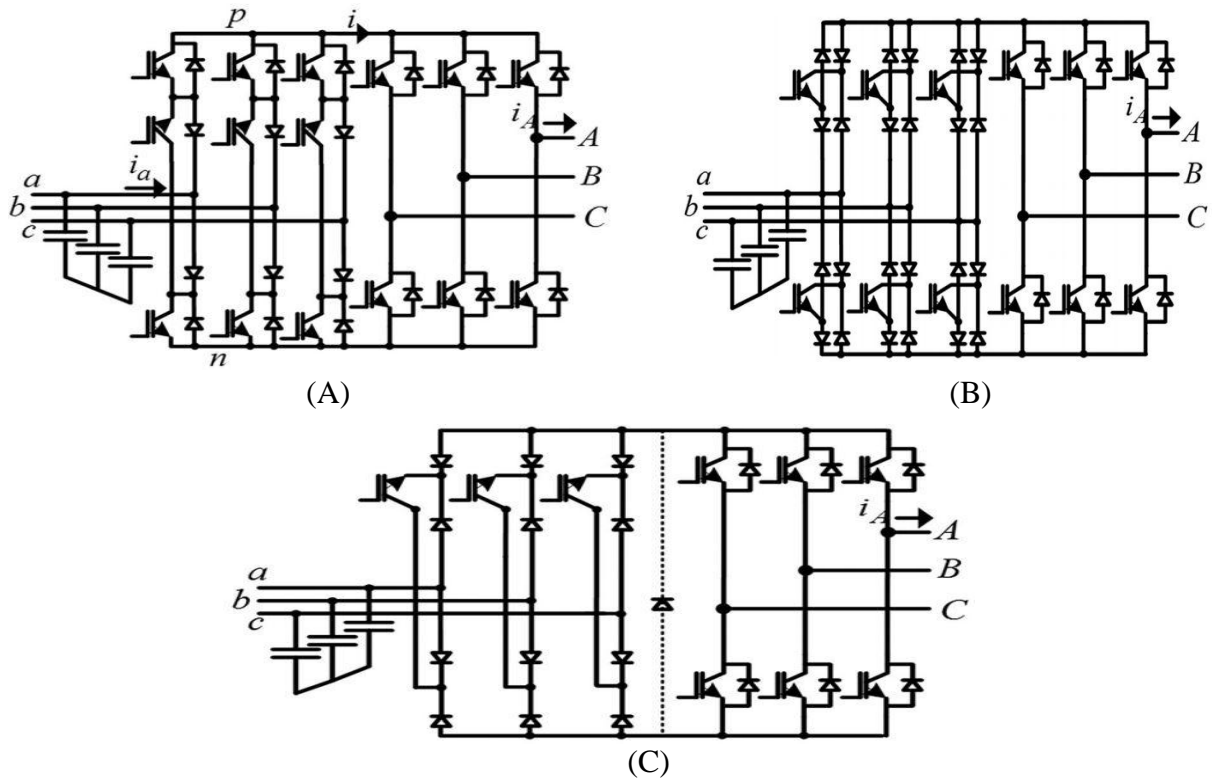


Figure 8. Convertisseur Matriciels Indirecte : (A) Sparse, (B) Very Sparse, (C) Ultra Sparse

4.2.3 Les Convertisseurs Matriciels triphasé Z-source (CMTZS)

Dans [27] une revue des topologies et les recherches sur le Z-source matriciel a été effectué. Il y a deux familles des CM Z-source. La première, directe, elle comporte un convertisseur matriciel directe et un réseau Z-source à l'entrée (Figure 9-A), et la deuxième famille des CM Z-source est de nature indirecte et elle est plus simple que la première, Elle est constituée d'un convertisseur matriciel indirecte avec un petit réseau Z-source entre les deux étages (redresseur et onduleur) (Figure 9-B).

Les paramètres LC du réseau Z-source sont similaires aux paramètres du filtre d'entrée, Ce circuit avec la boucle de contrôle permet l'amplification de la tension du bus continu pour assurer la tension requise par la charge et pour garantir un facteur de puissance égal à 1 à l'entrée. En même temps ce circuit est un filtre d'harmonique du courant d'entrée [28].

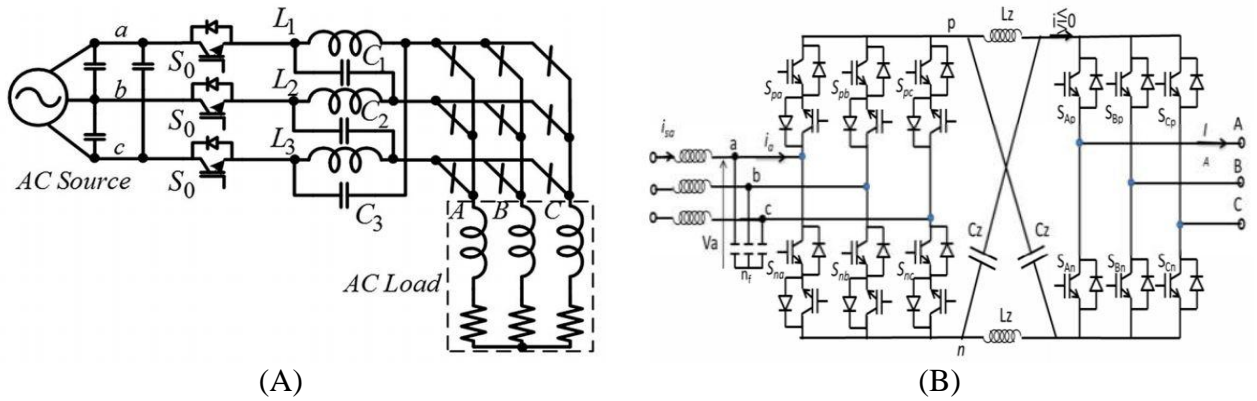


Figure 9. Convertisseurs Matriciels Z-Source : (A) Directe, (B) Indirecte

Un tableau résumant les topologies Triphasées des convertisseurs matriciels et quelques applications de ces derniers.

Les Topologies Triphasées	Dispositifs de commutation	Éléments de Stockage d'Énergie	Caractéristiques	Défis	Applications
CM Directe [29]	Neuf interrupteurs bidirectionnels	Aucun	Contrôler les commutateurs quatre quadrants Bidirectionnels, 86% de rapport de transfert de tension, fréquence variable, Facteur de puissance Unitaire.	Tension limitée, taux de conversion, problème de commutation, Conception du filtre d'entrée.	Machine asynchrone, Machine synchrone à aimant permanent.
CM Sparse [7]	15 IGBTs et Trois diodes.	Aucun	Moins d'IGBTs, fréquence variable.	86% de rapport de transfert de tension, problème de commutation	Les Avions, entraînements d'ascenseurs...
CM Very Sparse [25]	12 IGBTs et 18 Diodes	Aucun	Moins d'IGBTs, possibilité d'avoir un facteur de puissance unitaire, même taux de transfert de tension avec le CM directe conventionnel	Perte de conduction élevée	Les actionneurs dans les avions, entraînements d'ascenseurs
CM Ultra Sparse [8]	9 IGBTs et 9 diodes	Aucun	Moins d'IGBTs, moins de perte par conduction	Flux de puissance unidirectionnel	Les systèmes d'alimentation dans les avions
CM Z-source [30]	21 IGBTs	Trois inductances et trois capacités	Pouvoir fonctionner en buck/boost, fréquence variable.	Le volume, le cout et beaucoup de pertes.	Machine synchrone à aimant permanent

Tableau 2. Résumé des topologies des Convertisseurs Matriciels triphasés

4.2.4 Les convertisseurs Matriciels Multi-phases (CMM)

La figure 1 montre la configuration générale d'un CM triphasé. Les CM multi-phases (plus de trois) peuvent être facilement construits en étendant la topologie triphasée en utilisant des bras supplémentaires. Il n'y a aucune restriction sur l'extension du nombre de phases. Le nombre de phases à la fois en entrée et en sortie peut être différent des trois phases conventionnelles. Ces Convertisseurs sont des extensions de la topologie existante de (3×3) ; cependant, l'extension dans les phases d'entrée et / ou de sortie conduisent à une structure complexe. Néanmoins, le nombre plus élevé de commutateurs bidirectionnels offre plus grande flexibilité dans la commande [2].

4.2.5 Les convertisseurs matriciels Multi-niveaux (CMMN)

Les convertisseurs multi-niveaux sont l'une des topologies prometteuses pour fournir une meilleure qualité de forme d'onde de sortie avec des distorsions harmoniques plus faibles [31], [32], Cela implique le concept d'utilisation de divers petits niveaux de tension continue pour produire une forme d'onde de tension alternative, Plus le pas de tension est petit, plus la distorsion harmonique et les pertes de commutation sont faibles. [33], Les CMMN, malgré leurs caractéristiques attrayantes, ont des limites en termes de niveaux de tension (moyen à faible). Avec des topologies à plusieurs niveaux, les CMMN peuvent fournir une conversion de puissance directe avec une qualité de sortie et un facteur de puissance améliorés.

Jusqu'à présent, les trois topologies multi-niveaux les plus courantes ont été proposées [34], [35]: CM Double étages à trois niveaux, CM Indirecte sparse à trois niveaux, CM Multi-niveaux à capacités flottantes, CM Multi-niveaux à pont en H avec capacités flottantes.

4.2.5.1 Les Convertisseurs Matriciels Double étages à trois niveaux

Il se compose de deux étages de puissance comme l'CMI comme illustré à la figure 10-A, Cependant, il remplace l'étage de l'onduleur par un circuit de "diode clamped" à trois niveaux pour améliorer la qualité de la forme d'onde de sortie tout en conservant les autres caractéristiques des MC [36].

4.2.5.2 Les Convertisseurs Matriciels Indirecte sparse à trois niveaux

Comme le montre la figure 10-B, il se compose d'un étage Onduleur, d'un étage redresseur et d'un étage commutateur neutre contenant uniquement deux transistors bipolaires isolés (IGBT), Par rapport au circuit précédent, il ne nécessite que deux IGBT en parallèle avec l'onduleur pour augmenter le niveau de tension de sortie de deux à trois niveaux de tension de sortie [37].

4.2.5.3 Les Convertisseurs Matriciels Multi-niveaux à capacités flottantes

Une autre structure multi niveaux nommée CM multi-niveaux avec capacités flottantes a été proposée [31]. Sa structure est illustrée dans la figure 11-(C) Ce convertisseur est obtenu en remplaçant chaque interrupteur dans le CM directe par deux séries ou plus d'interrupteurs connectés et des condensateurs flottants. Il permet d'améliorer la tension de sortie mais par contre sa commande est très complexe à cause des tensions des capacités qui doivent être contrôlées [38].

4.2.5.4 Les Convertisseurs Matriciels Multi-niveaux à pont en H avec capacités flottantes

La structure multi-niveaux à pont-H avec capacité flottantes a été proposée dans le but d'augmenter l'efficacité de la conversion pour les faibles tensions et les faibles puissances [39], [40] mais elle présente plusieurs capacités qui compliquent sa commande et qui ne permettent pas le contrôle du facteur de puissance [28] (figure 11-(D)), cette structure est similaire à celle du MC direct mais au lieu d'utiliser des interrupteurs bidirectionnels conventionnels on utilise un Pont-H (figure 11-(E)) avec des capacités flottantes, Cette structure permet de synthétiser la tension d'entrée ainsi que la tension de sortie contrairement au MC où on synthétise la tension d'un côté et le courant de l'autre côté[28]. Elle a été étudiée en détail et appliquée dans les installations éoliennes [40]. Il est possible d'augmenter le nombre de niveaux en mettant en cascade deux ponts en H.

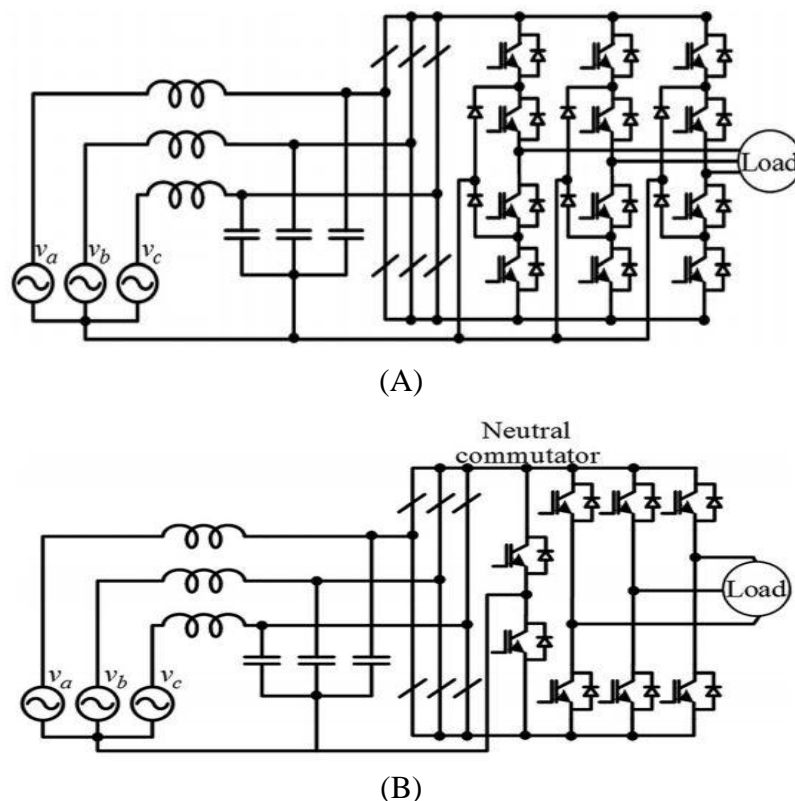


Figure 10. Les Convertisseurs Matriciels Multi-niveaux : (A) Double étages à trois niveaux, (B) Indirecte sparse à trois niveaux.

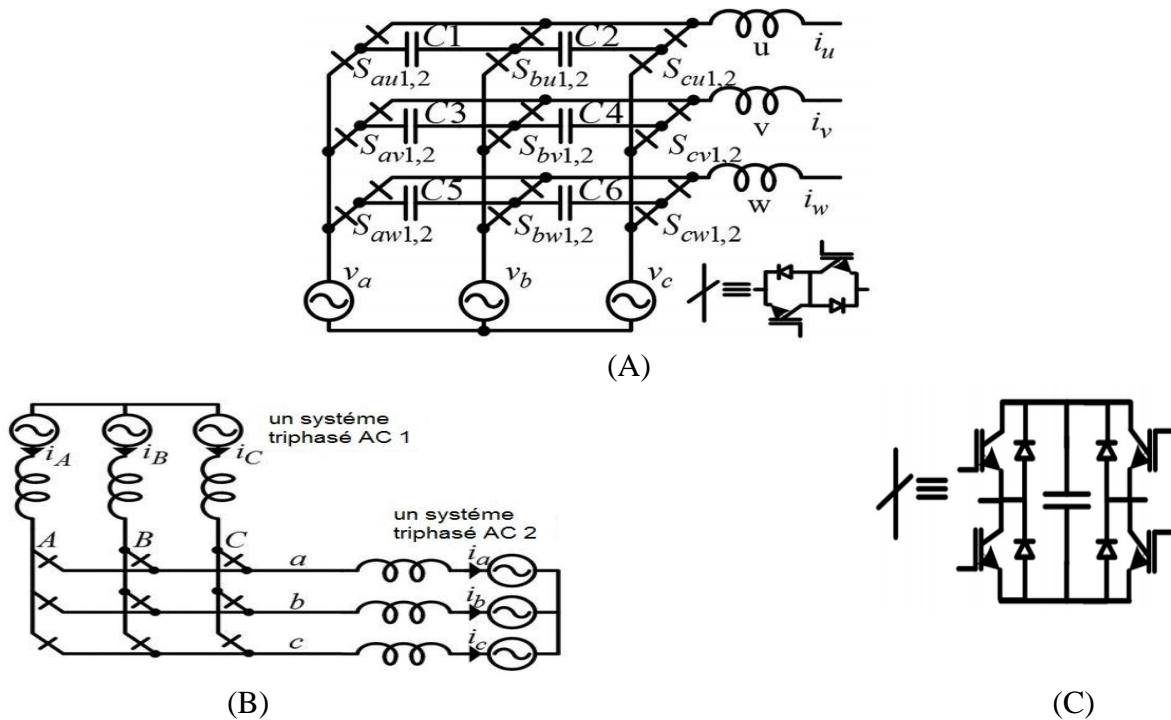


Figure 11. (A) CM Multi-Niveaux Avec capacités flottantes, (B) CM Multi-Niveaux à pont en H, (C) Schéma d'une cellule de commutation à pont en H

5. Les Topologies des interrupteurs quatre quadrants :

Le convertisseur matriciel nécessite l'utilisation de neuf interrupteurs quatre segments, dont la caractéristique statique est représentée à la Figure 12. Ces interrupteurs sont commandables aussi bien à l'amorçage qu'au blocage et nécessitent d'avoir la capacité de bloquer une tension ainsi que de conduire un courant quel que soit son signe.

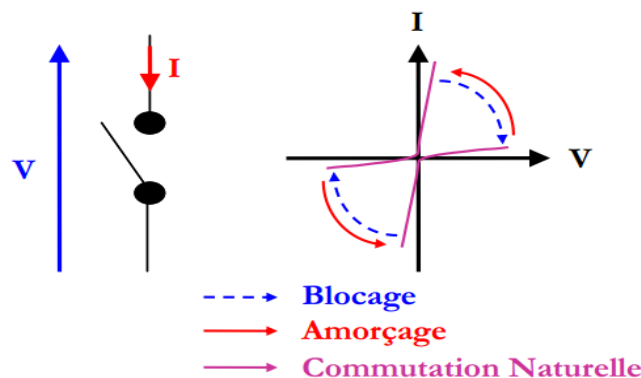


Figure 12. Caractéristique statique/dynamique idéale

Du fait de leur mise en œuvre très complexe, seules de petites productions d'interrupteurs quatre segments monolithiques sont envisageables de nos jours. La capacité de blocage en tension inverse est une faiblesse des transistors, ces composants étant capables de bloquer une tension inverse très faible (20V environ pour un transistor de calibre en tension égal à 1200V) [21].

Ces interrupteurs quatre segments sont donc créés par l'association de plusieurs éléments discrets, unidirectionnels en tension et en courant. Cette section décrit les assemblages possibles pour reproduire le comportement des interrupteurs quatre quadrant à partir d'éléments de base classiquement utilisés en électronique de puissance, c'est-à-dire le transistor et la diode.

5.1 Topologie à transistor connecté à un pont à diode

La première topologie proposée est l'association la plus simple possible. Elle est constituée d'un transistor connecté au centre d'un pont à diode comme illustré à la figure 13-D [41], [42], Ces diodes sont incluses afin de fournir la capacité de blocage en tension inverse manquant au transistor. L'avantage principal de cette topologie est de ne posséder qu'un seul et unique composant commandable.

Cette particularité permet de réduire d'une part le coût de l'association mais aussi la complexité de la commande ainsi que le nombre d'alimentation isolée nécessaire à l'alimentation des circuits drivers, qui fournissent les signaux de commande de grille (une alimentation isolée par interrupteur quatre segment).

En revanche, le défaut majeur de cet interrupteur est que trois composants (deux diodes et un transistor) sont mis en conduction lors de son activation produisant une chute de tension importante à ses bornes. Cette chute de tension engendre donc des pertes par conduction importantes limitant le rendement du convertisseur.

5.2 Topologie à transistor

5.2.1 Topologie à transistors et diodes en antiparallèle

Les interrupteurs utilisés dans les onduleurs de tension, comportent un transistor connecté en antiparallèle à une diode. Ils sont bidirectionnels en courant et unidirectionnel en tension. Deux configurations sont possibles pour concevoir un interrupteur quatre segments à base de cette configuration [41], [42].

- **Interrupteur quatre segments à émetteur commun**

Cet arrangement de semi-conducteur est composé deux diodes et deux transistors connectés comme le présente la Figure 13-B. Les diodes restent indispensables, elles permettent de fournir la capacité de blocage en tension inverse. L'un des avantages de cette structure est d'offrir un degré de liberté supplémentaire pour la gestion de la commutation de l'interrupteur.

Les pertes par conduction sont également réduites puisque, à tout moment, seuls deux éléments (un transistor et une diode) conduisent. Comme pour la topologie à pont de diodes, chaque interrupteur quatre segments, nécessite une alimentation isolée car la commande des drivers est référencée au même potentiel.

- **Interrupteur bidirectionnel à collecteur commun**

Cet arrangement est similaire et possède les mêmes caractéristiques que la configuration précédente. La différence est que les transistors sont disposés dans une configuration à collecteur commun comme le montre la Figure 13-A. Les pertes par conduction sont strictement identiques à celles de la configuration à émetteur commun. Comme les émetteurs des deux transistors ne sont pas communs, l'interrupteur quatre segments nécessite deux alimentations isolées.

5.2.2 Topologie à transistor et diode en série

Deux autres configurations possibles sont créées à partir d'un transistor en série avec une diode engendrant un composant bidirectionnel en tension mais unidirectionnel en courant. L'interrupteur quatre segments est composé de deux de ces assemblages disposés en antiparallèle comme le montre la Figure 13-C [41].

La possibilité (C-1) conduit au même nombre d'alimentations isolées que la topologie à collecteur commun de la Figure 13-A, La solution (C-2), en revanche, n'ayant pas de potentiel commun entre les émetteurs, conduit à deux alimentations isolées par interrupteur quatre segments. Pour la réalisation du convertisseur matriciel, dix huit alimentations isolées sont nécessaires.

5.3 Topologie à RB-IGBT

Certaines sociétés, comme STMicroelectronics, Fuji electric et IXYS, ont développé et commencent à proposer des interrupteurs intégrés bidirectionnels en tension (comportement similaire à un IGBT en série avec une diode), nommé RB-IGBT (Reverse Blocking IGBT) [21].

La structure du RB-IGBT est basée sur celle d'un IGBT de technologie N.P.T (Non-Punch Through) dont la tenue en tension inverse a été renforcée par une zone de déplétion verticale supplémentaire. Elle est engendrée par une introduction de caisson traversant verticalement, descendant de la jonction P+ existante pour les IGBT NPT pour rejoindre l'oxyde de silicium de la base (figure 13-F). L'interrupteur quatre segments est ainsi constitué de deux de ces interrupteurs disposés en tête-bêche (figure 13-E).

Ce nouvel interrupteur permet alors de réaliser un composant commandable, bidirectionnel en tension, dont la chute de tension à l'état passant n'est causée que par une seule jonction PN.

Cette chute de tension typique est alors de l'ordre de 1.6 à 2.2V, grâce à une forte injection de trous depuis la zone P+ en face supérieure. Cette injection permet ainsi de réduire les pertes par conduction de l'interrupteur.

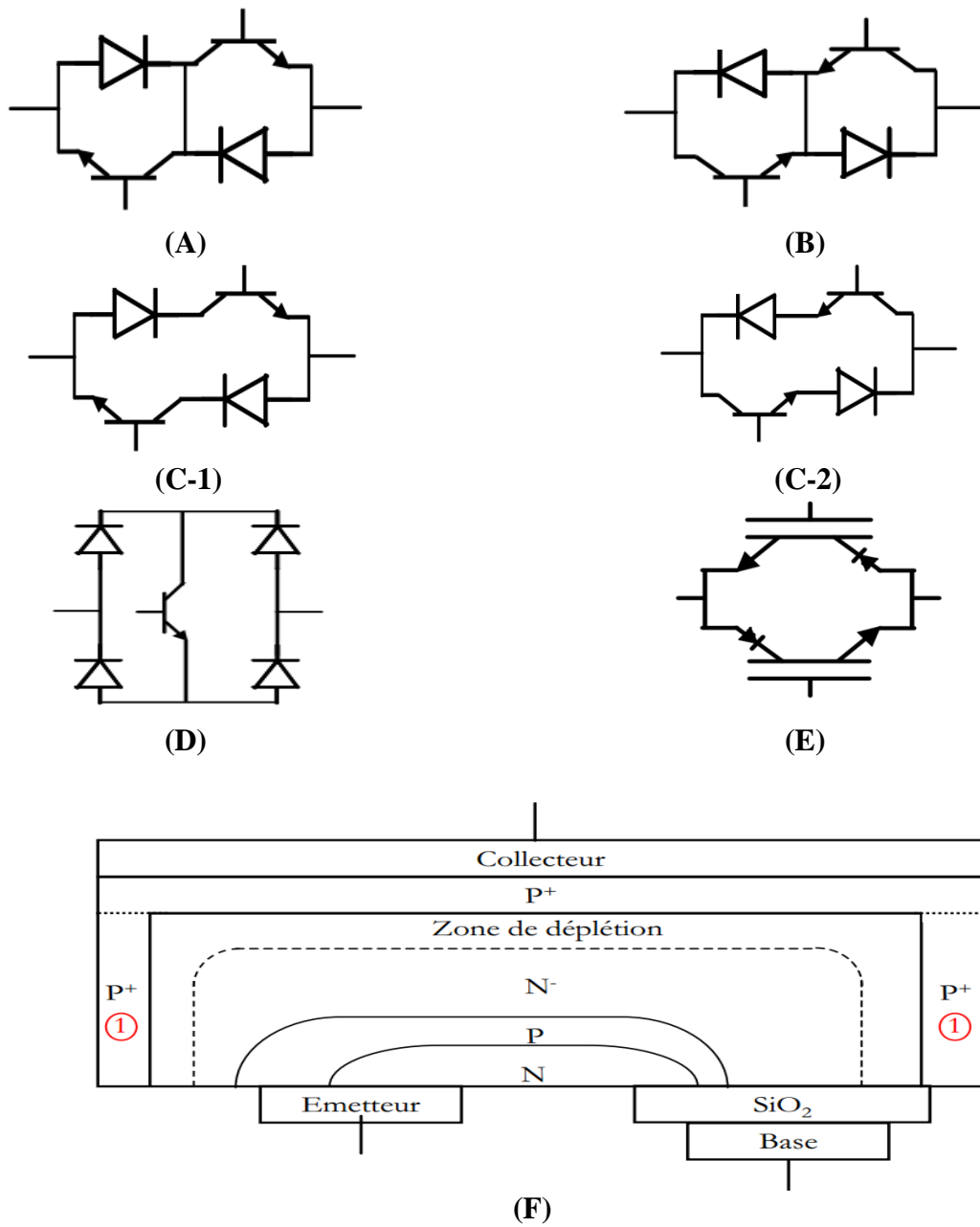


Figure 13. les topologies des interrupteurs: (A) Topologie à collecteur commun, (B) Topologie à émetteur commun, (C) Topologies sans connexion centrale, (D) Topologie à transistor connecté à un pont à diode, (E) schéma de l'interrupteur quatre quadrant à RB-IGBT, (F) Structure de la technologie RB-IGBT.

Un tableau récapitulatif (Tableau 3) permet de synthétiser les avantages et les inconvénients de chacun de ces interrupteurs quatre segments.

Association de semi conducteurs	Facilité de commande	Chute de tension en conduction	Alimentation isolée nécessaire pour le CM
Transistor et pont à diode	Simple	Elevée	9
Transistor et diode en antiparallèle	Plus Complexe	Moyenne	6 ou 9
Transistor et diode en série	Plus Complexe	Moyenne	6 ou 18
RB-IGBT	Plus Complexe	Faible	6

Tableau 3. Synthèse des interrupteurs.

6. Commutation des interrupteurs quatre segments

La commutation des interrupteurs quatre segments est plus contraignante que celle des interrupteurs utilisés dans les onduleurs de tension. En effet, aucun chemin pour le courant de sortie n'est naturellement disponible dans les interrupteurs nécessaires au fonctionnement du convertisseur matriciel, du fait de la présence d'un transistor en série avec une diode.

Puisqu'à chaque instant un seul interrupteur est fermé dans une cellule de commutation, la commutation se fait entre deux interrupteurs au sein de la cellule (Figure 14).

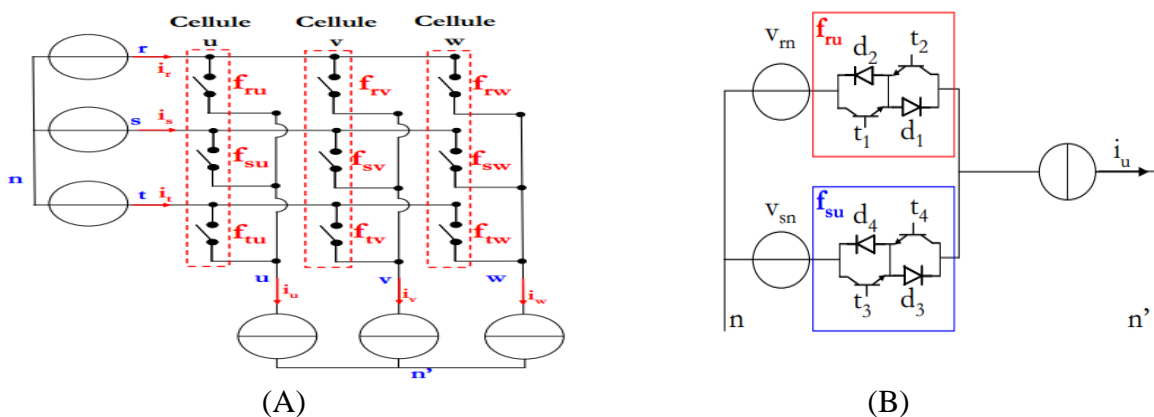


Figure 14. (A) Cellules de commutation du convertisseur matriciel, (B) Schéma de base pour l'étude des commutations.

6.1 Problématique des commutations

L'ouverture et la fermeture d'un interrupteur ne sont pas instantanées et présentent un certain retard sur la commande (Figure 15). En cas d'une commande strictement complémentaire, il peut apparaître des intervalles pendant lesquels les deux interrupteurs sont ouverts ou fermés simultanément. Un risque de court-circuit des sources de tension d'entrée ou d'ouverture des sources de courant de sortie existe donc lors des commutations.

Si la commande introduit des trous, le court-circuit des sources de tension d'entrée est évité mais l'on provoque des ouvertures des sources de courant de sortie. Si la commande introduit des chevauchements, l'ouverture des sources de courant de sortie est évitée mais l'on provoque des courts-circuits des sources de tension d'entrée. Chaque commutation va devoir être parfaitement contrôlée afin de limiter tout risque de destruction.

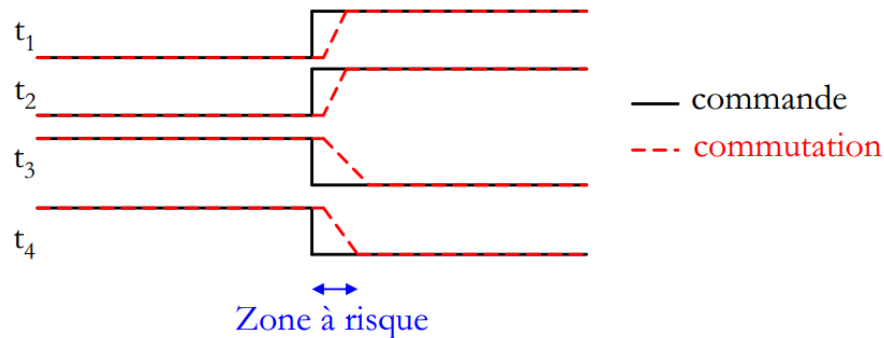


Figure 15. Schématisation du risque lors de la commutation.

Des méthodes de commutation avancées ont été proposées afin de palier à ces risques. Elles dissocient la commande des transistors d'un même interrupteur quatre segments. Cette dissociation permet de générer des séquencements particuliers de la commande des commutations des interrupteurs. Ce séquencement avancé est contrôlé soit par le courant de sortie de la cellule de commutation [43], soit par la tension composée aux bornes des deux interrupteurs commutant [44].

6.2 Commutation en courant

Lorsque la commutation est terminée, l'interrupteur quatre segments fermé doit avoir une commande active sur les deux transistors qui le constitue, permettant ainsi une bidirectionnalité en courant. Le séquencement des commutations est effectué à l'aide du signe du courant de sortie (sens de parcours du courant) dans la cellule correspondante[21].

6.2.1 Commutation en 4 étapes

Ce séquençement est organisé en quatre étapes[43], [45] , explicitées ci dessous, avec comme exemple une commutation de l'interrupteur f_{ru} vers l'interrupteur f_{su} avec un courant de sortie i_u positif (figure 14).

- Dans un premier temps, le transistor de l'interrupteur fermé, non traversé par le courant, est ouvert (t_2 dans notre exemple). Ce changement n'engendre aucune modification sur la connexion de la phase de sortie.
- Dans un second temps, le transistor de l'interrupteur ouvert pouvant conduire le courant de la charge (t_3 dans notre exemple) est fermé. Les sources de tension d'entrée ne sont pas court-circuitées grâce aux deux diodes placées en série avec les deux transistors t_1 et t_3 (Figure 16-B).
- Dans un troisième temps, le second transistor de l'interrupteur initialement fermé est ouvert (t_1 dans notre exemple).
- Pour finir, le second transistor de l'interrupteur initialement ouvert est fermé (t_4 dans notre exemple), permettant ainsi la continuité de la conduction en cas de changement de signe du courant.

Ce séquençement est présenté à la Figure 16-A pour un signe positif du courant de i_u .

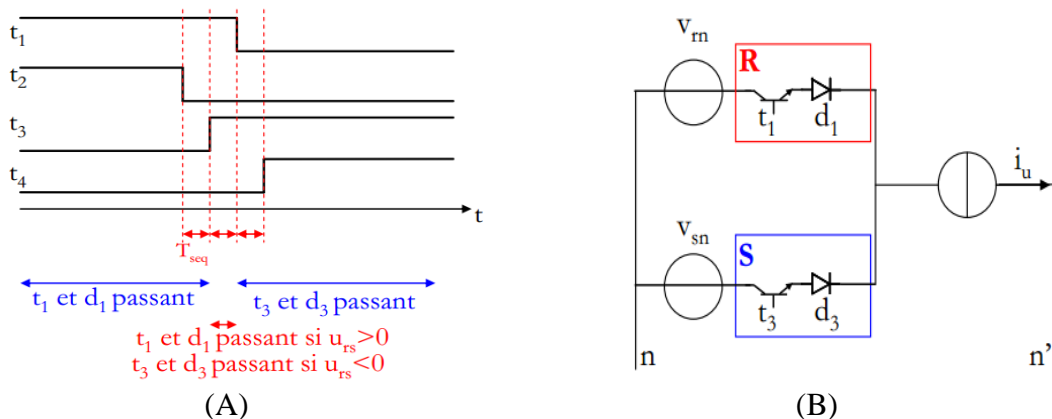


Figure 16. (A) Séquence de commutation en courant en quatre étapes(courant positif), (B) Interrupteurs commandés à la seconde étape de commutation.

La commutation est séquençée à l'aide d'un retard noté T_{seq} . Ce temps est défini à partir des caractéristiques des semi-conducteurs utilisées dans le convertisseur matriciel. Toutes ces commutations sont effectuées entre une diode et un transistor de deux interrupteurs différents.

Cette méthode de séquençement permet d'effectuer une commutation sûre mais plus lente car cette dernière nécessite trois durées T_{seq} . Ce séquençement en quatre étapes peut être simplifié afin d'accélérer la commutation et augmenter la précision de l'instant de commutation, améliorant ainsi la qualité des grandeurs commutées (tensions de sortie et courants d'entrée).

L'accélération de la commutation permet également d'augmenter la fréquence maximale de la porteuse générant la MLI. Ces simplifications entraînent des risques de problèmes d'ouverture de source de courant lors d'erreur sur la connaissance du signe du courant [21].

6.2.2 Commutation en 3 étapes

Dans [46], [47], on a proposé d'accélérer le séquençage grâce aux propriétés intrinsèques des semi-conducteurs. Son approche est basée sur l'hypothèse que la plupart des interrupteurs ont un temps de commutation plus lent à la fermeture (nommé t_{off}) qu'à l'ouverture (nommé t_{on}). comme le présente la Figure 17-A.

Cette hypothèse ($t_{off} > t_{on}$) permet d'utiliser la dynamique des interrupteurs afin de générer un chevauchement naturel lors de certaines étapes de la commutation. Dans ce séquençage, la seconde étape est synchronisée avec la troisième comme le montre la figure 17-B.

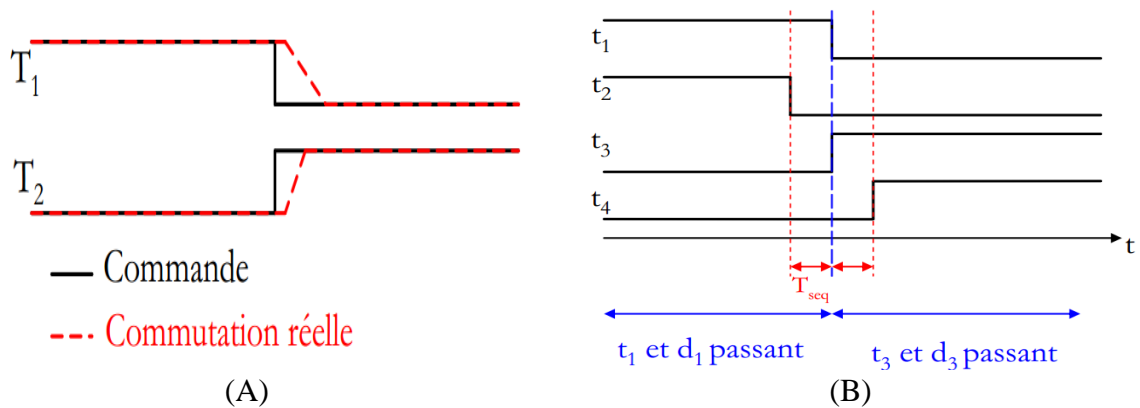


Figure 17. (A) Schématisation de la commande et de la commutation d'IGBT, (B) Exemple de commutation en trois étapes à l'aide du courant (positif)

Cette hypothèse permet d'effectuer une commutation en trois étapes et donc le temps de commutation est réduit à $2.T_{seq}$. La fréquence maximale de la porteuse générant la modulation peut ainsi être augmentée [21].

Ce mode de séquençage est peu utilisé car il nécessite de déterminer expérimentalement l'évolution des temps de commutation des interrupteurs à l'ouverture ainsi qu'à la fermeture en fonction de l'amplitude des courants à commuter. De plus l'hypothèse ($t_{off} > t_{on}$) est fautive pour certains semi-conducteurs.

6.2.3 Commutation en 2 étapes

Lorsqu'on est sûr de connaître précisément le signe du courant à commuter on peut ne commander que l'interrupteur susceptible de conduire [39],[46], comme le montre la Figure 18. Si le courant est de signe positif, seuls t₁ et t₃ peuvent être commandés, dans le cas contraire, t₂ et t₄ peuvent être commandés.

On a alors une commutation en deux étapes et le temps de commutation est réduit à une seule période T_{seq} . La fréquence maximale de la porteuse générant la modulation peut être augmentée.

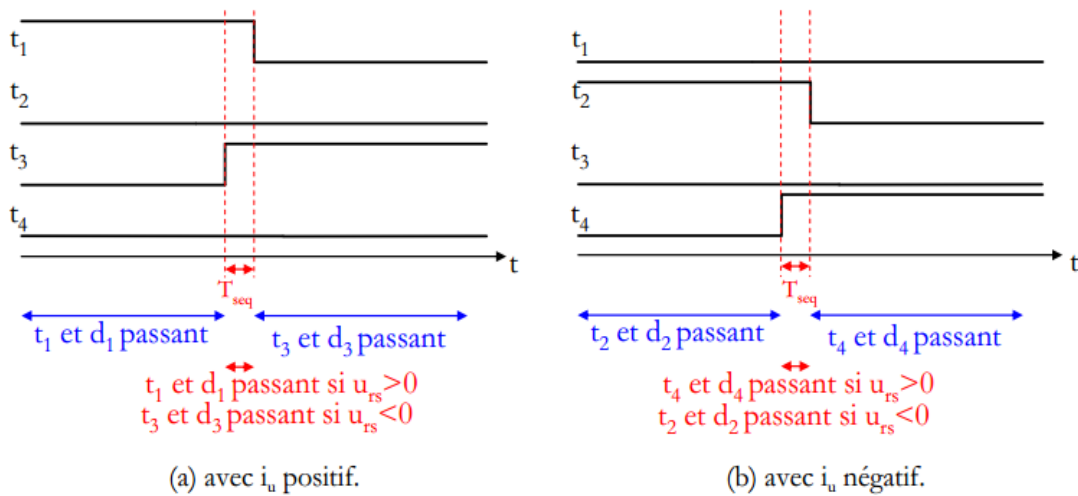


Figure 18. Exemple de commutation en deux étapes à l'aide du courant

Ces méthodes de séquençage nécessitent une connaissance parfaite du signe du courant à commuter, grandeur pouvant être délicate à connaître précisément. Quand le courant est proche de zéro, des erreurs peuvent apparaître sur l'obtention de son signe. De plus, la modulation est générée par un système numérique (DSP, FPGA et CPLD) qui échantillonnent les mesures, les rendant discontinues. Enfin, la modulation génère une ondulation de courant pouvant entraîner un changement de signe de se dernier sans que le système de mesure le détecte du fait de l'échantillonnage [21].

Un changement de signe de courant risque de s'opérer entre deux instants d'échantillonnage. Il est donc impossible de connaître précisément le signe d'un courant de faible amplitude. Cette imprécision peut être amplifiée par les erreurs de mesure introduites par les capteurs de courants ainsi que par les comparateurs utilisés dans la chaîne de traitement. Ces imprécisions rendent difficile l'utilisation de ces séquençages contrôlés par le courant lorsque son amplitude faible [47].

Il est possible de générer le séquençage d'une commutation par la tension.

6.3 Commutation en tension

6.3.1 Commutation en 4 étapes

De nouveau lorsque la commutation est terminée, la commande de l'interrupteur fermé impose une commande active sur les deux transistors qui le constitue, permettant ainsi une bidirectionnalité en courant. Le schéma de base pour l'étude des commutations est rappelé ci-dessous.

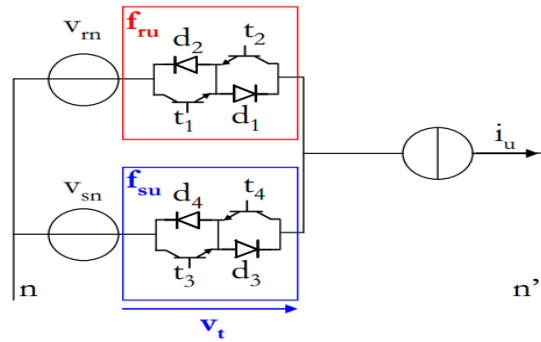


Figure 19. Schéma de base pour l'étude des commutations

Le séquençage des commutations est effectué à l'aide du signe de la tension composée aux bornes des deux interrupteurs à commuter (U_{rs} dans notre cas pour la commutation de R vers S) [41], [43]. Ce séquençage est réalisé en quatre étapes explicitées ci-dessous avec comme exemple une tension U_{rs} positive.

- Dans un premiers temps, la connaissance de la tension aux bornes de l'interrupteur ouvert (v_t) permet de fermer un des deux transistors (t_3 ou t_4) sans produire de modification sur la connexion de la phase de sortie (le transistor fermé est choisi tel que la diode en série avec ce dernier possède une tension négative, t_3 dans notre exemple avec U_{rs} positive).
- Dans un second temps, le transistor de l'interrupteur initialement fermé, et conduisant le courant du même signe que celui du transistor venant d'être fermé, est ouvert (t_1 dans notre exemple).
- Dans un troisième temps, le second transistor de l'interrupteur initialement ouvert est fermé (t_4 dans notre exemple).
- Pour finir, le second transistor de l'interrupteur initialement fermé est ouvert (t_2 dans notre exemple). Cette dernière étape permet ainsi de générer une continuité du courant en cas de changement de signe du courant.

Cette méthode de séquençement est présentée à la Figure 20 pour une tension composée U_{rs} positive.

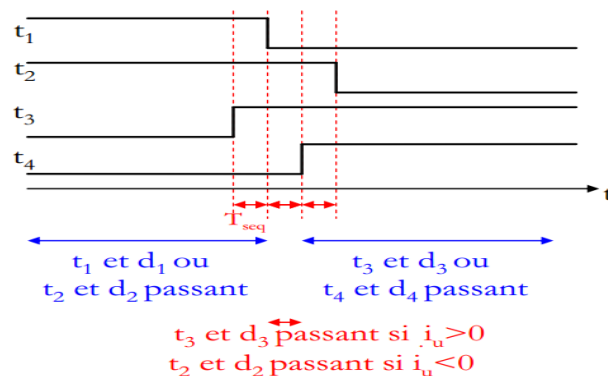


Figure 20. Exemple de commutation en quatre étapes à l'aide de la tension composée (U_{rs} positive)

Ce séquençage en quatre étapes a la même durée que le séquençage de la commutation par le courant en quatre étapes.

6.3.2 Commutation en 2 étapes

Il est intéressant d'accélérer ce séquençage. Pour cela, il est possible d'étendre à la commutation en tension, l'utilisation des propriétés des semi-conducteurs utilisés pour le séquençage en trois étapes par le courant [47]. Les deux premières étapes ainsi que les deux dernières étapes sont synchronisées. Chaque fermeture d'interrupteur est synchronisée avec l'ouverture du transistor de l'autre interrupteur véhiculant le courant du même signe comme le présente la Figure 21.

Ce mode de séquençage est très peu utilisé car il présente les mêmes inconvénients que précédemment.

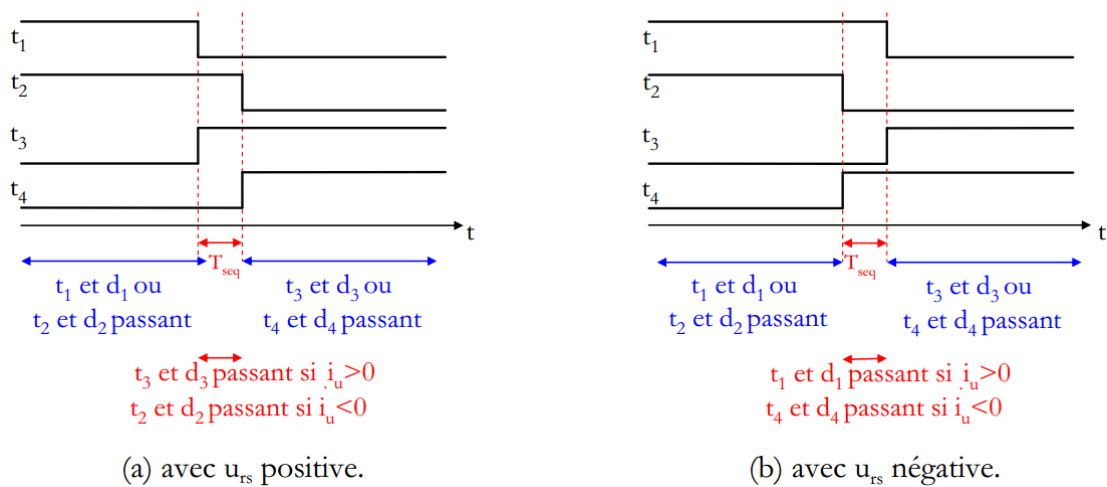


Figure 21. Exemple de commutation en deux étapes à l'aide de la tension composée

6.3.3 Commutation sous signe de tension incertain

Toutes ces méthodes de séquençage nécessitent une connaissance parfaite du signe de la tension composée aux bornes des interrupteurs commutant. Lors d'une mesure de tension proche de zéro, des erreurs de signe peuvent apparaître dues à la discrétisation de cette tension par le circuit de commande et aux erreurs de mesure des capteurs et de la chaîne de traitement. Ces imprécisions limitent l'utilisation de ces séquençages contrôlés par la tension quand son amplitude est faible.

Chacune des cellules de commutation du convertisseur matriciel est alimentée par deux tensions composées indépendantes. Lorsque les deux interrupteurs doivent commuter une tension composée proche de 0V, il est possible de générer cette commutation plus sûrement en passant par le troisième potentiel [48]. La solution initialement proposée est de générer une commutation supplémentaire évitant ainsi toute commutation sous tension trop faible comme le montre Figure 22.

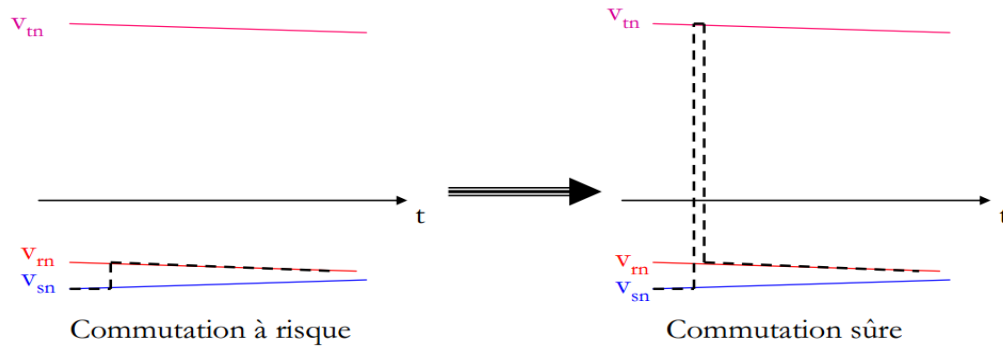


Figure 22. Schématisation de la commutation sous tension composée incertaine

Cette méthode est certes intéressante, car elle réduit les risques de destruction lors des commutations, mais elle engendre des pertes par commutations supplémentaires non négligeables car une simple commutation sous tension proche de zéro est remplacée par deux commutations avec une tension aux bornes des transistors proche de 86% de la tension composée réseau maximale et ce sous le même courant.

7. Conclusion

Ce travail a présenté les différentes topologies du CM ainsi que les méthodes de commutations des interrupteurs bidirectionnels. Ces topologies sont réparties en plusieurs familles, selon les fonctions requises : phase, structure, nombre d'entrées et sorties.

On a cité les topologies des interrupteurs développés dans la littérature, et on a traité le séquençage des commutations des interrupteurs quatre segments nécessaire pour faire commuter sans risques les cellules du convertisseur matriciel.

Finalement, On peut conclure que le convertisseur matriciel est une alternative importante pour la conversion AC/AC vu ses avantages et ses multiples applications et vu l'immensité des travaux de recherche sur ce type de convertisseur, il est attendu qu'il remplacera bientôt les convertisseurs AC-AC classiques dans plusieurs applications notamment dans les applications éoliennes, du fait des avantages qu'il offrira par rapport aux autres options.

Références bibliographiques

• REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] L. Gugyi, *Static Power Frequency Changers; Theory, Performance, and Application*. Wiley-Interscience, 1976.
- [2] R. Alamdari, Z. Aleem, A. Iqbal, and S. Winberg, "Matrix converters for electric power conversion: Review of topologies and basic control techniques," *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 29, no. 10, p. e12063, 2019.
- [3] J. Rodriguez, "A new control technique for AC-AC converters," in *Control in Power Electronics and Electrical Drives 1983*, Elsevier, 1984, pp. 203–208.
- [4] L. Huber, D. Borojevic, and N. Burany, "Voltage space vector based PWM control of forced commutated cycloconverters," 1989, pp. 106–111.
- [5] L. Huber and D. Borojevic, "Space vector modulated three-phase to three-phase matrix converter with input power factor correction," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 31, no. 6, pp. 1234–1246, 1995.
- [6] A. Alesina and M. G. Venturini, "Analysis and design of optimum-amplitude nine-switch direct AC-AC converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 4, no. 1, pp. 101–112, 1989.
- [7] M. Vijayagopal, P. Zanchetta, L. Empringham, L. De Lillo, L. Tarisciotti, and P. Wheeler, "Control of a direct matrix converter with modulated model-predictive control," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no. 3, pp. 2342–2349, 2017.
- [8] L. Tarisciotti *et al.*, "Modulated predictive control for indirect matrix converter," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no. 5, pp. 4644–4654, 2017.
- [9] L. Wang *et al.*, "A three-level T-type indirect matrix converter based on the third-harmonic injection technique," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 5, no. 2, pp. 841–853, 2017.
- [10] N. Takaoka, H. Takahashi, and J. Itoh, "Isolated single-phase matrix converter using center-tapped transformer for power decoupling capability," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 2, pp. 1523–1531, 2017.
- [11] Z. Idris, S. M. Noor, and M. K. Hamzah, "Safe commutation strategy in single phase matrix converter," 2005, vol. 2, pp. 886–891.
- [12] A. Zuckerberger, D. Weinstock, and A. Alexandrovitz, "Single-phase matrix converter," *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, vol. 144, no. 4, pp. 235–240, 1997.
- [13] M.-K. Nguyen, Y.-G. Jung, Y.-C. Lim, and Y.-M. Kim, "A single-phase Z-source buck–boost matrix converter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 2, pp. 453–462, 2009.
- [14] F. Z. Peng, X. Yuan, X. Fang, and Z. Qian, "Z-source inverter for adjustable speed drives," *IEEE Power Electron. Lett.*, vol. 1, no. 2, pp. 33–35, 2003.
- [15] Z. Aleem, D. Shin, H. Cha, J.-P. Lee, D.-W. Yoo, and F. Z. Peng, "Parallel operation of inverter using trans-Z-source network," *IET Power Electron.*, vol. 8, no. 11, pp. 2176–2183, 2015.
- [16] Z. Aleem and M. Hanif, "Operational analysis of improved Γ -Z-source inverter with clamping diode and its comparative evaluation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 12, pp. 9191–9200, 2017.
- [17] H. F. Ahmed, H. Cha, A. A. Khan, J. Kim, and J. Cho, "A single-phase buck–boost matrix converter with only six switches and without commutation problem," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 2, pp. 1232–1244, 2016.
- [18] H. F. Ahmed, H. Cha, and A. A. Khan, "A single-phase buck matrix converter with high-frequency transformer isolation and reduced switch count," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 9, pp. 6979–6988, 2017.
- [19] I. B. Klumpner Frede Blaabjerg, Christian, "The Matrix Converter: overvoltages caused by the input filter, bidirectional power flow, and control for artificial loading of induction motors," *Electr. Mach. Power Syst.*, vol. 28, no. 2, pp. 129–142, 2000.
- [20] D. Casadei, G. Serra, and A. Tani, "The use of matrix converters in direct torque control of induction machines," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 48, no. 6, pp. 1057–1064, 2001.
- [21] F. Gruson, "Modulation naturelle généralisée des convertisseurs matriciels pour la variation de vitesse," 2010.
- [22] P. Correa, J. Rodriguez, and J. Espinoza, "Predictive control of an indirect matrix converter," 2008, pp. 1332–1336.
- [23] H. Wang *et al.*, "Topology and modulation scheme of a three-level third-harmonic injection indirect matrix converter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 10, pp. 7612–7622, 2017.
- [24] J. W. Kolar, T. Friedli, J. Rodriguez, and P. W. Wheeler, "Review of three-phase PWM AC–AC converter topologies," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 11, pp. 4988–5006, 2011.
- [25] J. W. Kolar, M. Baumann, F. Schafmeister, and H. Ertl, "Novel three-phase AC-DC-AC sparse matrix converter," 2002, vol. 2, pp. 777–791.
- [26] J. W. Kolar, F. Schafmeister, S. D. Round, and H. Ertl, "Novel three-phase AC–AC sparse matrix converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 5, pp. 1649–1661, 2007.

-
- [27] O. Ellabban, H. Abu-Rub, and S. Bayhan, "Z-source matrix converter: An overview," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 11, pp. 7436–7450, 2015.
- [28] A. Benachour, "Commande sans Capteur basée sur DTC d'une Machine Asynchrone alimentée par Convertisseur Matriciel," 2017.
- [29] R. K. Gupta, K. K. Mohapatra, A. Somani, and N. Mohan, "Direct-matrix-converter-based drive for a three-phase open-end-winding ac machine with advanced features," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 12, pp. 4032–4042, 2010.
- [30] Z. Aleem, S. L. Winberg, A. Iqbal, M. A. E. Al-Hitmi, and M. Hanif, "Single-Phase Transformer-based HF-Isolated Impedance Source Inverters With Voltage Clamping Techniques," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 11, pp. 8434–8444, 2019.
- [31] Y. Shi, X. Yang, Q. He, and Z. Wang, "Research on a novel multilevel matrix converter," 2004, vol. 3, pp. 2413–2419.
- [32] S. Liu, M. Saeedifard, and X. Wang, "Analysis and control of the modular multilevel matrix converter under unbalanced grid conditions," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 6, no. 4, pp. 1979–1989, 2018.
- [33] C. Newton, M. Sumner, and T. Alexander, "The investigation and development of a multi-level voltage source inverter," 1996.
- [34] J. Rodriguez, J.-S. Lai, and F. Z. Peng, "Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 4, pp. 724–738, 2002.
- [35] P. Wheeler, X. Lie, M. Y. Lee, L. Empringham, C. Klumpner, and J. Clare, "A review of multi-level matrix converter topologies," 2008, pp. 286–290.
- [36] Y. Sun, W. Xiong, M. Su, X. Li, H. Dan, and J. Yang, "Topology and modulation for a new multilevel diode-clamped matrix converter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 12, pp. 6352–6360, 2014.
- [37] C. Klumpner, M. Lee, and P. Wheeler, "A new three-level sparse indirect matrix converter," 2006, pp. 1902–1907.
- [38] P. Szcześniak, "Review of AC–AC Frequency Converters," in *Three-phase AC-AC Power Converters Based on Matrix Converter Topology*, Springer, 2013, pp. 17–86.
- [39] R. W. Erickson and O. A. Al-Naseem, "A new family of matrix converters," 2001, vol. 2, pp. 1515–1520.
- [40] R. Erickson, S. Angkititrakul, and K. Almazeedi, "New Family of Multilevel Matrix Converters for Wind Power Applications: Final Report, July 2002-March 2006," National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2006.
- [41] S. L. Arevalo, "Matrix converter for frequency changing power supply applications," 2008.
- [42] M. Matteini, "Control techniques for matrix converter adjustable speed drives," 2001.
- [43] N. Burany, "Safe control of four-quadrant switches," 1989, pp. 1190–1194.
- [44] L. Empringham, L. de Lillo, P. W. Wheeler, and J. C. Clare, "Matrix converter protection for more electric aircraft applications," 2006, pp. 2564–2568.
- [45] A. Schuster, "A matrix converter without reactive clamp elements for an induction motor drive system," 1998, vol. 1, pp. 714–720.
- [46] M. Tewolde and S. P. Das, "A novel control of bi-directional switches in matrix converter," 2006, pp. 1–6.
- [47] P. Wheeler, J. Clare, and L. Empringham, "Minimization of matrix converter commutation times," *EPE J.*, vol. 13, no. 1, pp. 15–18, 2003.
- [48] M. Ziegler and W. Hofmann, "A new two steps commutation policy for low cost matrix converters," 2000, pp. 445–450.