

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



DÉPARTEMENT D'ÉLECTRONIQUE

Mémoire de master

En vue de l'obtention du master en Electronique

Thème :

**LES CONVERTISSEURS MULTINIVEAUX
ET LEURS APPLICATIONS**

Encadré par :

Pr. C. LARBES

Réalisé par :

Mr. YAHIA-AMMAR Mohamed

Promotion: Juin 2013

ملخص:

الهدف من هذا العمل هو دراسة المحولات مستمر-متناوب ذات مستويين و طرق التحكم فيها، وخاصة الطريقة المعروفة بتغيير عرض النبضة، وذكر إمكانية تطبيقها من على المحولات متعددة المستويات. كلمات مفتاحية : محول مستمر-متناوب، التحكم في المحول، تغيير عرض النبضة، متعدد المستويات.

Résumé

L'objectif de ce mémoire est l'étude des onduleurs de tensions et ces commandes appliquées pour les onduleurs à deux niveaux, et ces extensions pour les onduleurs multi-niveaux, et en particulier la méthode de modulation de la largeur d'impulsion MLI.

Mots clés: onduleur de tension, multiniveaux, commande de l'onduleur, modulation de la largeur d'impulsion.

Abstract

The aim of this work is the study of inverters and their control methods for two level inverters and their extension for multilevel inverters, and specially the method of pulse width modulation PWM.

Key words: inverter, multilevel, control, pulse width modulation.

Remerciements

Nous exprimons notre profonde gratitude, notre grand respect et notre sincère reconnaissance à notre promoteur le Pr. LARBES de l'Ecole Nationale Polytechnique pour avoir assumé la lourde responsabilité de nous encadrer, de nous avoir orienté et conseiller tout au long de ce travail ainsi pour la confiance qu'il nous a accordée .

Nous remercions également notre co-promoteur Mr A.GUELLAL de l'Ecole Nationale Polytechnique pour ses précieux conseils, son suivi, sa disponibilité et son aide.

Nous remercions chaleureusement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptent d'évaluer notre projet.

Nous souhaitons aussi remercier tous les enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, et en particulier, Nos professeurs d'Electronique qui nous ont encadrés auparavant et tous nos enseignants pour les connaissances qu'ils nous ont transmis, leur disponibilité et leurs efforts.

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

Table de matières

INTRODUCTION GENERALE	7
EVOLUTION DES SEMI-CONDUCTEURS DE PUISSANCE.....	8
INTERET DES ONDULEURS MULTINIVEAUX.....	11
I-STRUCTURES DE CONVERSION D'ENERGIE MULTINIVEAUX.....	13
1- Convertisseur Clampé par le Neutre (NPC).....	13
2- Convertisseur Multicellulaire Série (FC).....	19
a-Onduleur multicellulaire série 3 niveaux.....	19
b-Convertisseur multicellulaire série p cellules N niveaux.....	23
CONCLUSION.....	29
BIBLIOGRAPHIE.....	30

Listes de figures

Figure I-1 Onduleur NPC 3 niveaux	13
Figure I-2 Configurations possibles du convertisseur NPC.....	15
Figure I-3 Porteuses, modulante et signaux de commande de T1 et T2 d'un onduleur NPC.....	16
Figure I-4 Tension découpée et courant de charge d'un convertisseur NPC 3 niveaux.....	17
Figure I-5 Spectre de la tension de sortie d'un onduleur NPC 3 niveaux.....	18
Figure I-6 Onduleur NPC 5 niveaux.....	18
Figure I-7 Convertisseur Multicellulaire Série (a) représentation 1 – (b) représentation 2.....	19
Figure I-8 Configurations possibles du convertisseur multicellulaire série.....	20
Figure I-9 Tension découpée et courant de charge d'un convertisseur FC 3 niveaux.....	21
Figure I-10 Spectre de la tension de sortie d'un onduleur FC 3 niveaux.....	22
Figure I-11 Porteuses,modulante et signaux de commande d'un onduleur FC 3 niveaux.....	23
Figure I-12 Onduleur multicellulaire série n cellules.....	25
Figure I-13 Onduleur multicellulaire série 3 cellules 4 niveaux.....	26
Figure I-14 Tension découpée et courant de charge d'un convertisseur FC 4 niveaux.....	26
Figure I-15 Spectre de la tension de sortie d'un onduleur FC 4 niveaux.....	27
Figure I-16 Tensions aux bornes des condensateurs flottants de l'onduleur FC 4 niveaux.....	28

Listes de tableaux

Tableau I-1 Phases de fonctionnement de l'onduleur NPC 3 niveaux15

Tableau I-2 Etats des signaux de commande et tension découpée résultante pour un
convertisseur FC 3 cellules27

Cette partie du rapport regroupe l'ensemble des notations et abréviations utilisées lors de la rédaction.

C	Condensateur flottant de la cellule k (F)
E	Bus continu (V)
f_{app}	Fréquence apparente de sortie du convertisseur (Hz)
$f_{déc}$	Fréquence de découpage (Hz)
f_{mod}	Fréquence de modulation (Hz)
I_{Ck}	Courant moyen dans le condensateur flottant de la cellule k (A)
I_{dc}	Courant continu (A)
I_S	Courant de charge (A)
k	Indice d'une cellule de commutation, $k \in (1, \dots, p)$
N_{conf}	Nombre de configurations possibles de la structure du convertisseur
N_{niv}	Nombre de niveaux de tension générés par le convertisseur
p	Nombre de cellules du convertisseur
T_{mod}	Période de modulation (s)
V_{Ck}	Tension aux bornes du condensateur flottant de la cellule k (V)
V_{Cellk}	Tension de la cellule k (V)
V_{int}	Tension aux bornes d'un interrupteur à l'état bloqué (V)
V_S	Tension de sortie monophasée (V)
φ_k	Déphasage des signaux de commande de la cellule k (°)
α_k	Rapport cyclique de la cellule k

ABREVIATIONS

AC	Alternatif
DC	Continu
FC	Convertisseur multicellulaire série (Flying Capacitor converter)
GTO	Gate Turn-Off Thyristor
IGBT	Insulated-Gate-Bipolar-Transistor
IGCT	Integrated-Gate-Commutated-Thyristor
MOSFET	Metal-Oxid Semiconductor Field Effect Transistor
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsions
NPC	Convertisseur clampé par le neutre (Neutral Point Clamped converter)
OFF	Etat bloqué du semi-conducteur
ON	Etat passant du semi-conducteur
PM	Point Milieu capacitif du bus continu
SMC	Convertisseur multicellulaire superposé (Stacked Multicell Converter)

INTRODUCTION GENERALE

L'évolution des propriétés des semi-conducteurs de puissance a stimulé la croissance du marché des convertisseurs dédiés aux applications moyenne tension/moyenne et forte puissance allant de quelques kilowatts à plusieurs mégawatts dans la gamme du kilovolt. Cette évolution a influencé principalement les domaines de l'industrie et de la traction (locomotives 3kV, variateurs de vitesse 4.5kV pour l'industrie et pour la propulsion de navires électriques), mais a également eu un impact significatif sur les systèmes de génération d'énergie électrique, de distribution et de transmission. [ANN]

Cette augmentation des niveaux de puissance mis en jeu s'est traduit par une hausse des niveaux de tension et de courant, et a nécessité le développement de semi-conducteurs de plus en plus performants. Néanmoins, malgré des avancées significatives, l'évolution des possibilités de ces derniers est lente à l'heure actuelle par rapport au marché de la demande, notamment au niveau des calibres en tension disponibles.

En parallèle, de nombreuses études ont été menées pour concevoir de nouvelles structures de conversion d'énergie [LAI] [ROD]. Basés sur l'association de structures élémentaires, ces convertisseurs constituent des solutions attrayantes pour les applications moyennes tension/forte puissance. Ainsi, un grand nombre d'applications en électronique de puissance combinent de nos jours les derniers développements en matière de semi-conducteurs moyenne tension avec des structures de conversion d'énergie innovatrices et des commandes avancées [MEY2] [COU].

EVOLUTION DES SEMI-CONDUCTEURS DE PUISSANCE [ANN]

Depuis les débuts de l'électronique de puissance, un certain nombre de semi-conducteurs, pour la plupart à base de silicium, ont été utilisés : diodes, transistors bipolaires, MOSFETs, thyristors, GTOs, IGBTs, IGCTs, etc.

Les avancées technologiques des dernières décennies ont permis à ces derniers d'évoluer constamment vers un idéal : impédances nulle à l'état passant et infinie à l'état bloqué, puissance consommée et temps de commutation nuls.

Les deux plus célèbres interrupteurs commandés sont le thyristor, apparu en 1957, et le transistor bipolaire, développé au début des années 60. Leurs principes de base sont à l'origine de la plupart des composants semi-conducteurs commandés qui ont été conçus jusqu'à présent.

Depuis les années 90, les interrupteurs dédiés aux applications moyenne tension nécessitant des semi-conducteurs commandés à l'amorçage et au blocage sont principalement les IGBTs et IGCTs ; le thyristor GTO étant destiné à être remplacé par l'IGCT [ALV]. Le transistor IGBT est usuellement associé à une diode antiparallèle. Ces deux composants de puissance forment donc des interrupteurs 3 quadrants bidirectionnels en courant et unidirectionnels en tension.

L'IGBT est privilégié pour le domaine de la basse et moyenne puissance (100kW à 2-3 MW), tandis que l'IGCT semble être la meilleure option pour les applications de moyenne et forte puissance (1MW à 100MW).

Le transistor bipolaire à grille isolée IGBT (Insulated-Gate-Bipolar-Transistor) est un composant de puissance qui est né dans les années 1985, suite à la recherche des électroniciens de puissance pour développer, sur la même structure, un composant qui rassemble les avantages du transistor bipolaire (chute de tension faible en conduction, tension à l'état bloqué élevée) et ceux du transistor MOSFET (commande en tension, énergie de commande faible et vitesse élevée de commutation) [ION]. Il en a résulté un transistor commandé en tension, avec des performances intéressantes : fréquence de

commutation élevée et chute de tension en conduction faible. Il a cependant aussi hérité de certains inconvénients, comme une certaine sensibilité aux charges électrostatiques et la présence d'une traînée de courant au blocage. Trois générations d'IGBTs se sont succédées au cours des années. La deuxième génération est structurée sur deux types d'IGBTs : les uns à vitesse élevée de commutation et tension de saturation plus grande (Fast IGBT), et les autres à faible tension de saturation, mais plus lents (Low Loss IGBT). La troisième génération, grâce aux nouvelles technologies NPT (Non Punch Through – structure homogène) a réussi à donner des IGBTs qui allient les deux qualités en même temps. Certains constructeurs ont développé des IGBTs 3^{ème} génération rapides [INF][SEM].

Pour des raisons économiques, une demande croissante apparaît actuellement pour des semi-conducteurs plus compacts avec des pertes réduites (conduction et commutation). De nombreuses recherches sont réalisées depuis plusieurs années afin de développer de nouvelles structures, permettant une augmentation de la densité de courant et de la densité de dissipation d'énergie tout en réduisant la capacité thermique du silicium. Parmi les différentes solutions envisagées, les structures Planar SPT (Soft-Punch-Through) et Vertical Trench FS (Field Stop) offrent les meilleures performances et des améliorations significatives par rapport à la technologie NPT [ALV]. Ces structures sont utilisées par ABB Semi-conducteurs et Semi Kron pour certaines gammes de composants [ABB] [SEM]

L'IGCT (Integrated-Gate-Commutated-Thyristor), quant à lui, est une évolution moderne du thyristor GTO, permettant un fonctionnement sans circuit d'aide à la commutation grâce à une commande rapprochée intégrée au composant. Il combine donc les excellentes propriétés statiques du thyristor (calibres élevés en courant et en tension) et les performances dynamiques du transistor bipolaire (blocage par la commande, etc.).

Tout comme l'IGBT, trois familles d'IGCT peuvent être distinguées : à faibles pertes en conduction pour les disjoncteurs alternatif ou continu ; à faibles pertes en commutation pour les applications d'entraînement moyenne tension ; et à faibles pertes globales et plage de température élevée pour la traction [ALV].

A l'heure actuelle, 6,5kV/600A, 4,5kV/900A et 3,3kV/1,2kA, sont les principaux calibres d'IGBTs moyenne tension disponibles dans le commerce. Ils sont principalement accessibles sous forme de modules single et duaux. Les calibres inférieurs disposent d'un choix plus variés de modules : TriPack, FourPack, SixPack, Chopper, ainsi que de versions Press-Pack [INF][ABB][SEM].

Les IGCTs, quant à eux, ne sont vendus que sous forme de Press-Pack pour des calibres de 4,5kV/4kA et 6kV/3kA [ABB]. ABB Semi-conducteurs en collaboration avec TU Berlin réalise depuis quelques années le développement d'un IGCT 10kV [BER].

Les calibres en tension disponibles pour ces deux interrupteurs sont quasiment identiques et ceux en courant ne constituent pas un problème majeur grâce à la mise en parallèle de modules ou de puces dans un même composant. Pour une application donnée, le choix du composant à utiliser (IGBT ou IGCT) dépend donc de considérations diverses : implantation, facilité de commande, fiabilité, robustesse, maintenance, et bien sûr disponibilité du marché et coûts. Une analyse au cas par cas doit être réalisée, afin de définir la solution la plus avantageuse à tous les niveaux. Néanmoins, pour une technologie de composants donnée, une augmentation du calibre en tension se traduit par une hausse importante de la tension à l'état passant et une diminution de la fréquence de commutation autorisée [DEL].

Diverses technologies et connaissances ont été mises en œuvre, afin d'améliorer les propriétés des semi-conducteurs de puissance. Les efforts en matière de R&D ont été dirigés afin de minimiser les pertes à l'amorçage et en commutation, d'opérer à des fréquences de découpage de plus en plus élevées, d'améliorer la dissipation thermique, la fiabilité et la robustesse des composants, etc.

Le silicium atteignant ses limites (fréquence de découpage, thermique, etc.), de nouveaux matériaux comme le diamant [SCH] et le carbure de silicium SiC [ELA] sont à présent considérés pour de nouvelles avancées technologiques.

INTERET DES ONDULEURS MULTINIVEAUX [MAR]

Malgré l'évolution énorme des composants semi-conducteurs, la valeur limitée de la tension de blocage des interrupteurs réalisables jusqu'à présent reste toujours inférieure à la tension de service des équipements haute tension. Pour aller au-delà de ces limitations, nous disposons de deux possibilités :

- la réalisation de macro-interrupteurs. Ces macro-interrupteurs sont obtenus en associant en série des interrupteurs de tension de blocage inférieure à la tension de service souhaitée. Cette technique présente l'inconvénient de nécessiter la mise en place de résistances d'équilibrage, afin que la tension à l'état bloqué se répartisse uniformément entre les différents éléments constituant le macro-interrupteur.

- la réalisation d'un convertisseur multiniveau. Cette méthode consiste à employer un convertisseur de topologie plus complexe. Le nombre d'interrupteurs utilisés est du même ordre que pour le convertisseur constitué de macro-interrupteurs, mais les éléments sont associés de manière différente. La commande nécessite davantage de signaux, mais le convertisseur résultant présente de meilleures performances.

En plus de permettre d'obtenir une tension de service plus élevée sans recourir à des macro-interrupteurs, l'adoption d'un convertisseur multiniveau présente d'autres avantages :

- La résolution obtenue est plus élevée, le convertisseur est capable de générer plus que deux ou trois niveaux. Le réglage de la tension est plus fin, ce qui permet de réduire les contraintes imposées à la charge qui subit sans cela une tension qui commute entre ses deux valeurs maximales. La taille des filtres passifs parfois nécessaires pour limiter ces sollicitations peut être réduite.

Dans le même temps, le système gagne une plus grande dynamique et cela permet un réglage plus rapide.

- La tension commutée est réduite à la valeur du pas du convertisseur, c'est-à-dire à la valeur de tension bloquée par ses interrupteurs. Cela réduit d'autant les pertes par commutation. D'autre part, la fréquence de pulsation de chacun de ses éléments est plus basse que la fréquence de pulsation apparente de la tension appliquée à la charge. Cela autorise une augmentation de cette fréquence de pulsation qui permet une réduction de la dimension des filtres ou une amélioration de la qualité des signaux filtrés.

- En terme de production, selon la topologie choisie, il est possible de réaliser un convertisseur modulaire composé de modules identiques. Le nombre de modules peut éventuellement être adapté à la tension de service du convertisseur.

Du point de vue des performances, il est donc intéressant d'utiliser des convertisseurs multiniveaux, même lorsqu'une structure simple est réalisable sans l'aide de macro-interrupteurs.

L'intrant des convertisseurs multiniveaux est toutefois limité par quelques inconvénients. La commande est beaucoup plus complexe et les techniques sont encore peu répandues dans l'industrie. Sauf lorsqu'on prévoit des modules redondants, l'accroissement de la complexité du système entraîne une diminution de sa fiabilité. Même à nombre de composants égal, ces convertisseurs sont plus coûteux. En effet, en utilisant des macro-interrupteurs, la commande ne diffère pas de celle d'un convertisseur simple, en revanche en utilisant une structure plus complexe, le nombre de signaux différents à gérer augmente.

I - STRUCTURES DE CONVERSION D'ENERGIE MULTINIVEAUX

Les structures de conversion d'énergie multiniveaux reposent sur les associations de semi-conducteurs de puissance d'une manière particulières.

Ce rapport est consacré à la présentation du fonctionnement, de la commande de deux structures de conversion d'énergie multiniveaux : le convertisseur clampé par le neutre, le convertisseur multicellulaire série

Les semi-conducteurs de puissance sont supposés parfaits (i.e. aucune perte n'est considérée en conduction et en commutation), ainsi que les sources de tension et de courant.

1-Convertisseur Clampé par le Neutre (NPC)

Le convertisseur NPC (Neutral Point Clamped) 3 niveaux est apparu au début des années 1980 [BRE] (Figure I-1).

La répartition de la tension d'entrée sur les interrupteurs à l'état bloqué est assurée par des diodes connectées à un point milieu (C). Ces deux diodes imposent un potentiel $E/2$ aux points A et B.

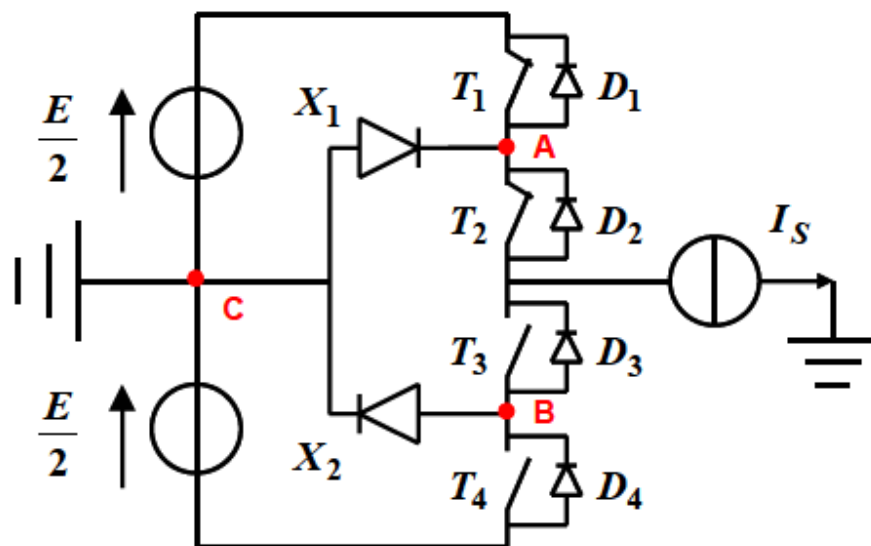


Figure I-1 Onduleur NPC 3 niveaux

Les trois niveaux de tension possibles en sortie ($-E/2$, 0 et $E/2$) sont obtenus en fonction du choix des interrupteurs rendus passants.

La Figure I-2 illustre les configurations possibles du convertisseur en fonction du signe du courant et de la tension de sortie. T_1 et T_3 (respectivement T_2 et T_4) sont commandés de manière complémentaire.

L'état de deux interrupteurs sur 4 est toujours est figé durant la moitié de la période de modulation T_{mod} :

-Si la modulante est positive, alors T_2 est toujours passant et T_4 toujours bloqué. Si T_1 est amorcé, alors T_3 est OFF et la tension de sortie est fixée à $E/2$ (cas A); au contraire si T_3 est ON, alors T_1 est OFF, et la tension de sortie est égale à 0 V (cas C).

-De même si le signal modulant est négatif, T_1 est toujours bloqué et T_3 toujours passant. Si T_4 est amorcé, alors T_2 est OFF et la tension de sortie est fixée à $-E/2$ (cas B); à l'inverse si T_2 est ON, alors T_4 est OFF, et la tension de sortie est égale à 0 V (cas C).

-Le signe du courant de charge indique si celui-ci circule à travers une diode ou un transistor.

L'une des particularités de cette topologie est que les semi-conducteurs externes, T_1 et T_4 , ne découpent pas pendant au moins la moitié de la période de modulation. Les diodes X_1 et X_2 n'interviennent pas pour les phases de fonctionnement A et B. En revanche, l'une d'entre elles est passante dans le cas C et permet de fixer le potentiel du point A ou du point B à 0 V. Le signe du courant de charge indique quelle diode est rendue passante : si $I_s > 0$, X_1 est amorcée et X_2 est bloquée ; la configuration est inversée pour $I_s < 0$.

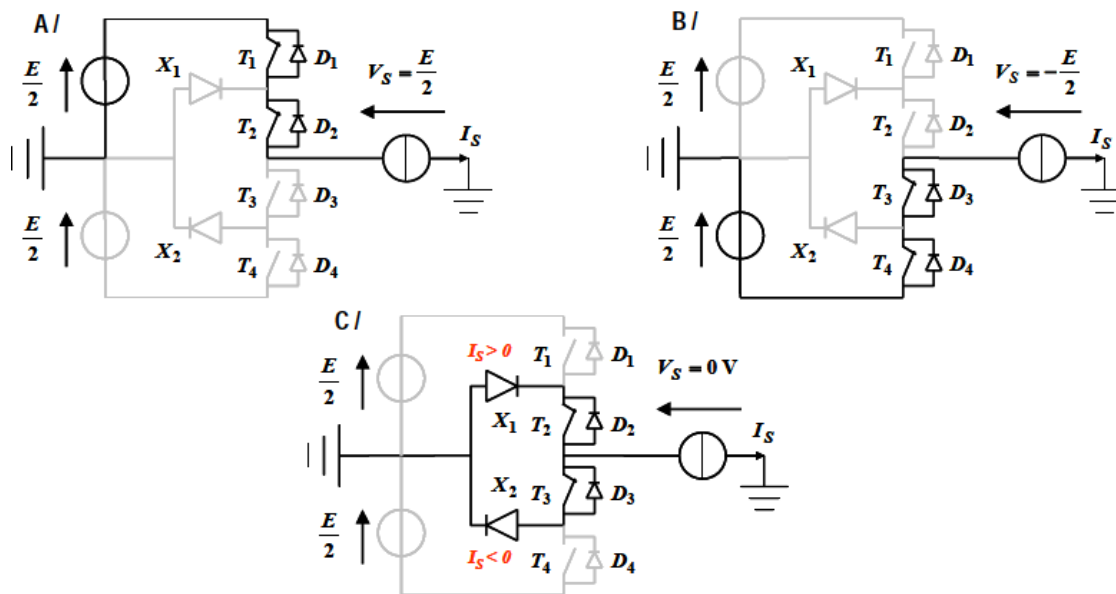


Figure I-2 Configurations possibles du convertisseur NPC

Le Tableau I-1 résume le fonctionnement de l'onduleur NPC 3 niveaux en fonction du sens de circulation du courant de charge.

Sens du courant	Le courant circule à travers...	Tension découpée
$I_S > 0$	T_1, T_2	$E/2$
	X_1, T_2	0
	D_4, D_3	$-E/2$
$I_S < 0$	T_3, T_4	$-E/2$
	T_3, X_2	0
	D_2, D_1	$E/2$

Tableau I-1 Phases de fonctionnement de l'onduleur NPC 3 niveaux

La commande de cet onduleur est réalisée simplement à l'aide d'une commande MLI intersective classique. La Figure I-3 présente les porteuses, la référence sinusoïdale et les signaux de commande utilisés pour atteindre cet objectif. Il est important de rappeler que les semi-conducteurs T3 et T4 sont respectivement complémentaires de T1 et T2. La comparaison entre la porteuse positive et la référence sert à générer les ordres de commande des semi-conducteurs T1 et T3 ; inversement l'association de la modulante et la porteuse négative permet de déterminer les instants de commutation de T2 et T4. Les phases durant lesquelles l'état des interrupteurs est figé (passant ou bloqué) sont également visibles.

La Figure I-4 présente les résultats d'une simulation faites par une ancienne thèse [ANN] d'un onduleur NPC 3 niveaux avec $E = 3600V$, un courant de charge maximal égal à $377A$, une fréquence de découpage de $f_{dec} = 1\text{ KHz}$ et une référence sinusoïdale avec $k = 0,8$ et $f_{mod} = 50\text{ Hz}$. Les trois niveaux de tension en sortie du convertisseur sont bien distincts. Le spectre de la tension de sortie laisse apparaître un fondamental à 50Hz et un premier ensemble d'harmoniques autour de la fréquence de découpage (Figure I-5).

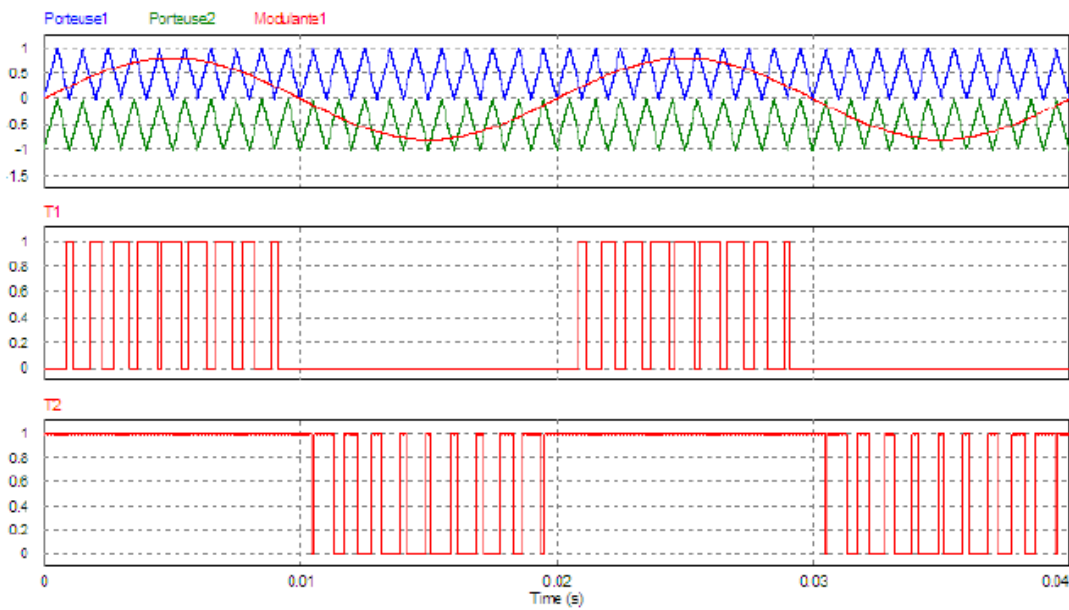


Figure I-3 Porteuses, modulante et signaux de commande de T1 et T2 d'un onduleur NPC

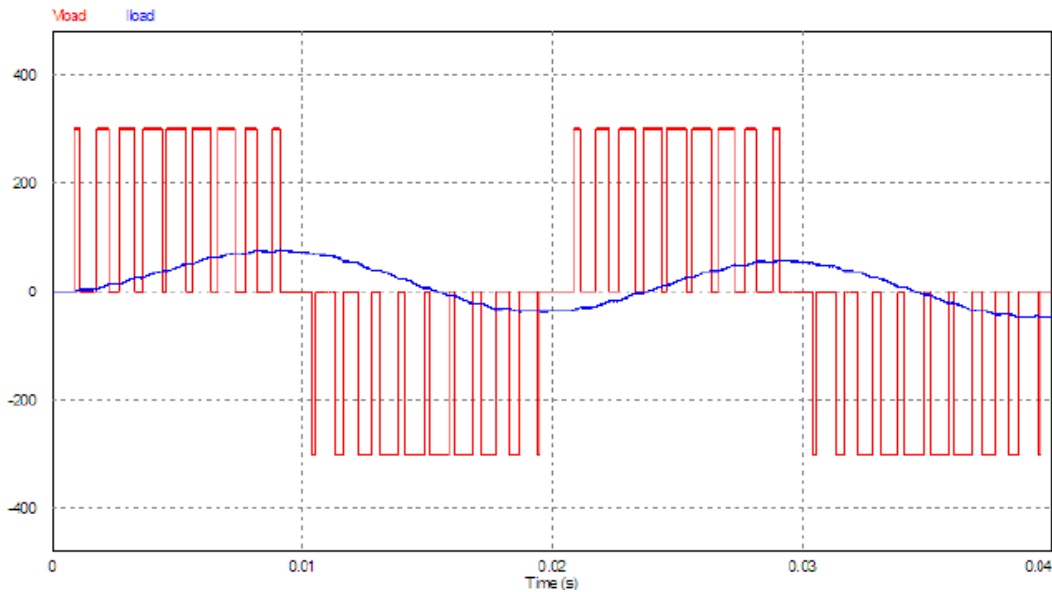


Figure I-4 Tension découpée et courant de charge d'un convertisseur NPC 3 niveaux

Le convertisseur NPC permet d'obtenir des performances statiques et dynamiques très intéressantes par rapport à une structure à deux niveaux et ses applications sont diverses de nos jours : entraînement moyenne tension pour l'industrie, appareillages pour la marine, activité minière et traction. Le NPC apparaît également prometteur dans le domaine de l'énergie éolienne, ainsi que pour les applications basse tension [TEI].

Cependant, l'utilisation d'un pont diviseur capacitif fait apparaître des problèmes d'équilibrage du point milieu [CEL]. Le potentiel de celui-ci peut onduler avec une amplitude importante, voir diverger dans certains cas. De nombreuses solutions ont été étudiées et ont permis d'apporter des réponses à ce problème soit par utilisation de commandes actives [BRU] soit par introduction de circuits annexes assurant une stabilité du potentiel du point milieu. Ces solutions, très performantes, sont également très pénalisantes en termes de complexité et de coût global du convertisseur et condamnent, dans la plupart des cas, l'utilisation de la topologie NPC pour un nombre de niveaux supérieur à trois (Figure I-6 – onduleur NPC 5 niveaux).

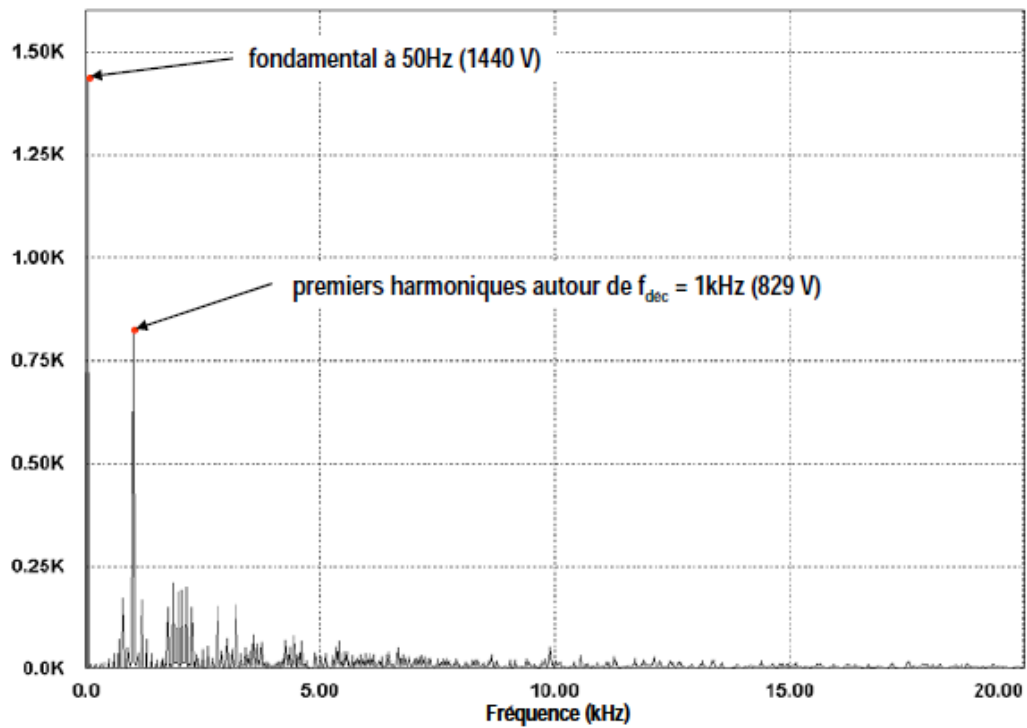


Figure I-5 Spectre de la tension de sortie d'un onduleur NPC 3 niveaux

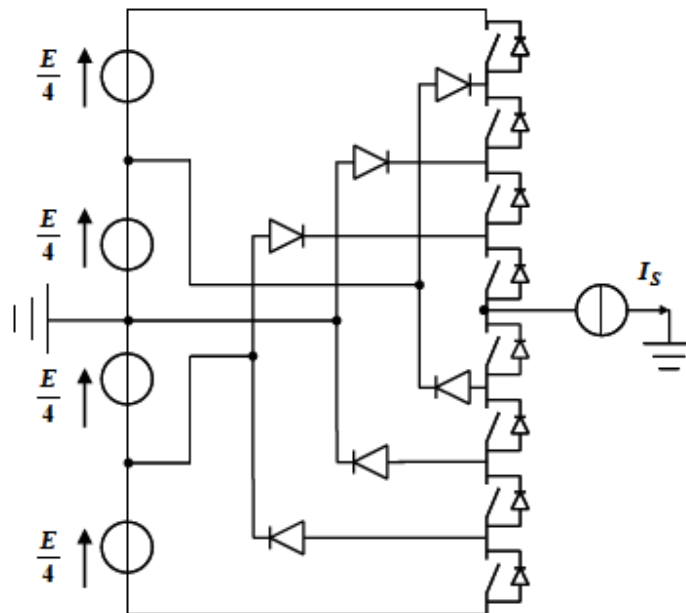


Figure I-6 Onduleur NPC 5 niveaux

2-Convertisseur Multicellulaire Série (condensateur flottant) (FC)

Cette structure est apparue au début des années 90 [BRE1] [MEY1]. Le principe du convertisseur multicellulaire série FC (Flying Capacitor) est la mise en série de cellule de commutation. Les cellules sont connectées entre elles par une source de tension. Ceci permet d'avoir une tension multiniveaux, ainsi que d'autres propriétés intéressantes qui sont rapidement rappelées.

Dans un premier temps, nous allons expliquer et détailler le fonctionnement, la commande et les caractéristiques de l'onduleur multicellulaire série 3 niveaux (2 cellules). Les généralités et particularités de la structure font ensuite l'objet d'un second paragraphe.

a-Onduleur multicellulaire série 3 niveaux

La structure multicellulaire 3 niveaux est composée de 2 cellules, contenant chacune deux interrupteurs, et connectées entre elles par un condensateur flottant (Figure I-7).

Les interrupteurs T1 et T4 (respectivement T2 et T3) sont commandés de manière complémentaire et ne doivent jamais être passants en même temps pour ne pas court-circuiter les sources de tension. Ces couples d'interrupteurs forment donc des cellules de commutation.

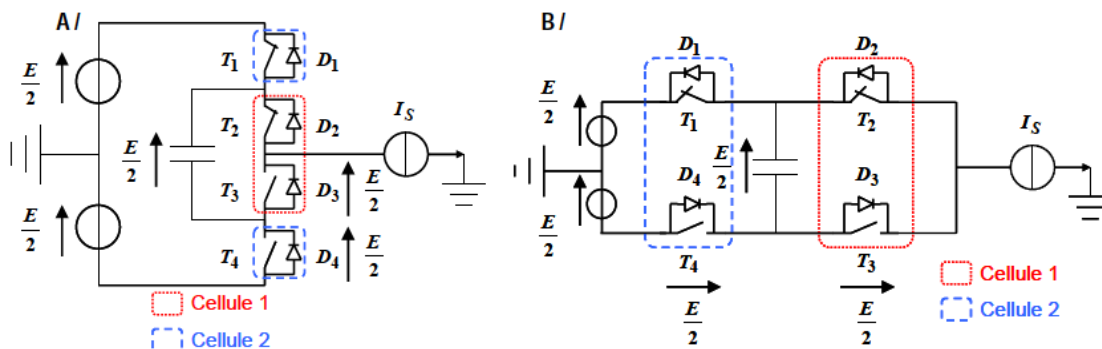


Figure I-7 Convertisseur Multicellulaire Série (a) représentation 1 – (b) représentation 2

Les tensions appliquées aux cellules de commutation sont imposées par les sources de tension flottantes ; ces dernières sont, dans le cas de la Figure I-7, égales à $E/2$ quel que soit l'état des interrupteurs. La contrainte en tension aux bornes des interrupteurs bloqués ne dépasse donc pas cette valeur. Les cellules de commutation sont indépendantes les unes par rapport aux autres et les semi-conducteurs découpent pendant l'intégralité de la période de modulation.

Il existe quatre configurations possibles pour un convertisseur multicellulaire 3 niveaux, configurations présentées par la Figure I-8. Cette structure permet d'obtenir trois niveaux de tension en sortie : 0 et $\pm E/2$. Le niveau de tension intermédiaire (0 V) peut être généré de deux manières différentes (cas C et D), ce qui implique un transit d'énergie en fonction du sens de circulation du courant de charge. Cette particularité permet de contrôler la tension aux bornes du condensateur flottant.

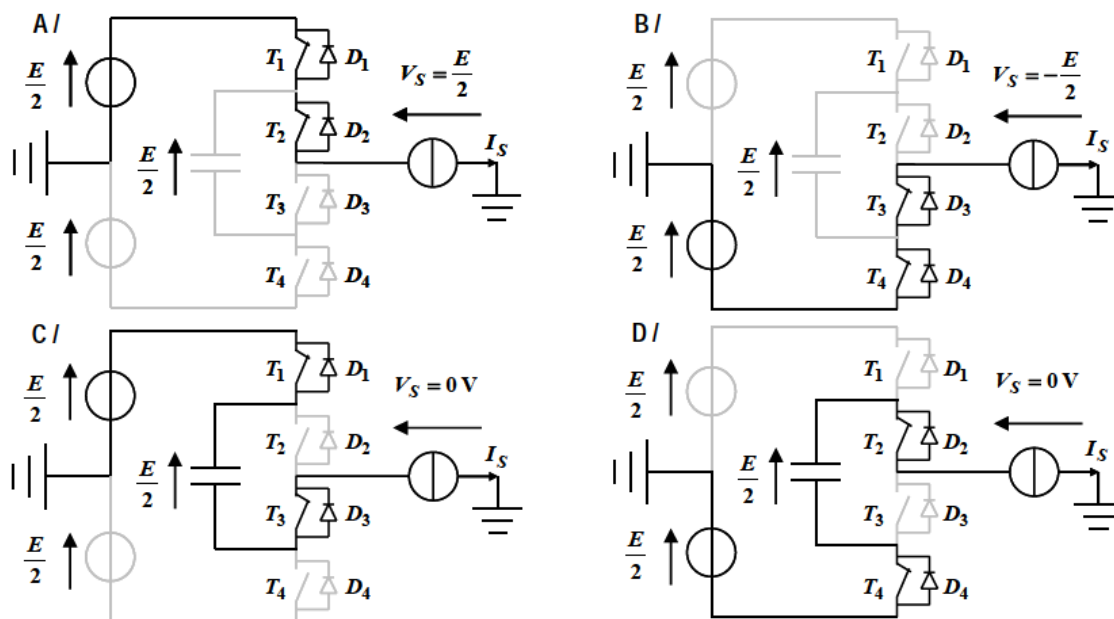


Figure I-8 Configurations possibles du convertisseur multicellulaire série

La Figure I-9 montre les résultats d'une simulation faites par une ancienne thèse [ANN] d'un onduleur FC 3 niveaux avec $E = 3600V$, un courant de charge maximal égal à 377A, une fréquence de

découpage de $f_{\text{déc}} = 1 \text{ KHz}$ et une référence sinusoïdale avec $k = 0,8$ et $f_{\text{mod}} = 50 \text{ Hz}$. Le condensateur flottant est préchargé à $V_c = 1800 \text{ V}$.

Tout comme l'onduleur NPC, on discerne les trois niveaux de tension en sortie.

Une propriété de cette topologie : la fréquence apparente est proportionnelle au nombre de cellules de commutation et à la fréquence de découpage instantanée des interrupteurs.

Le spectre de la tension de sortie laisse apparaître un fondamental à 50Hz et un premier ensemble d'harmoniques autour de $f_{\text{app}} = 2\text{kHz} = 2 \times f_{\text{déc}}$ (Figure I-10).

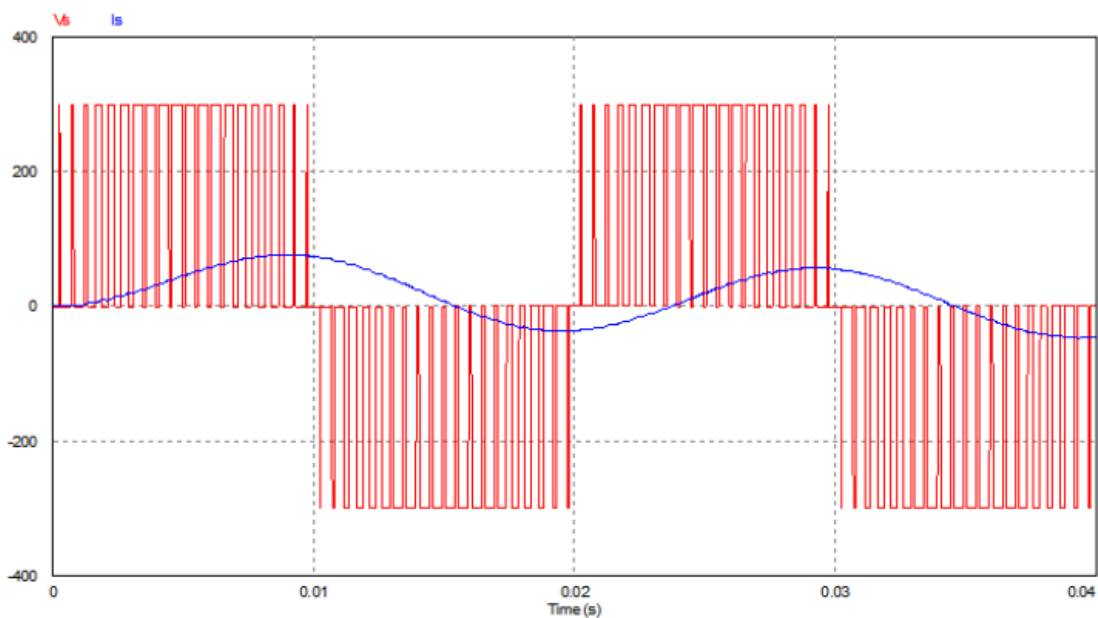


Figure I-9 Tension découpee et courant de charge d'un convertisseur FC 3 niveaux

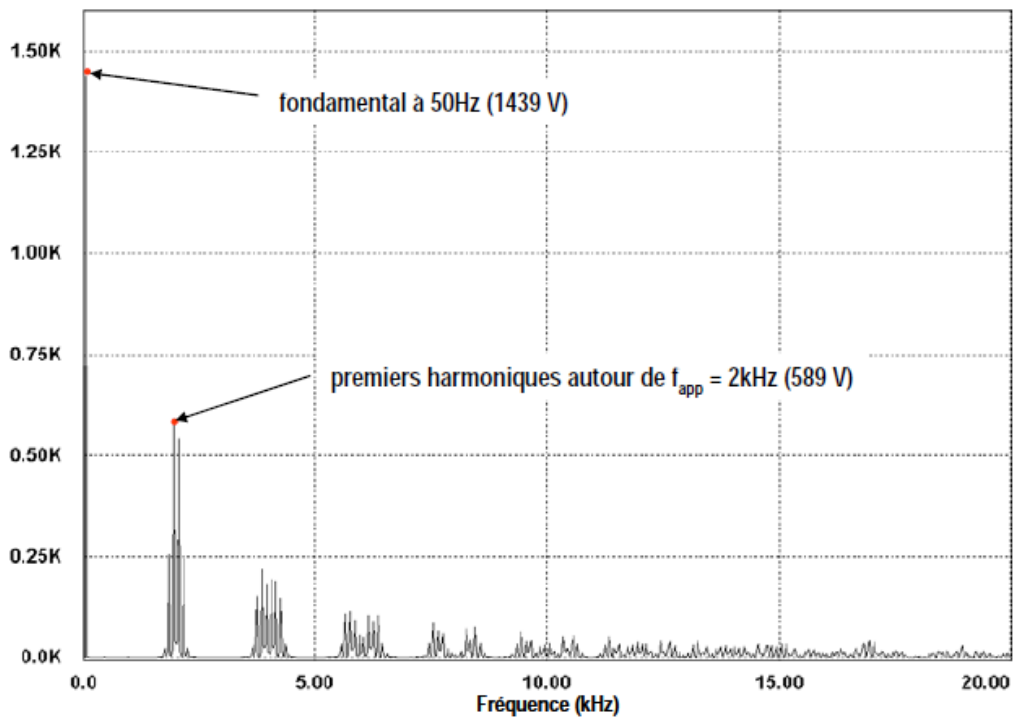


Figure I-10 Spectre de la tension de sortie d'un onduleur FC 3 niveaux

Les cellules de commutation sont indépendantes l'une par rapport à l'autre, ce qui permet d'utiliser des commandes décalées pour chaque cellule. La Figure I-11 présente les porteuses, la référence sinusoïdale et les signaux de commande utilisés pour générer la tension découpée. Contrairement à l'onduleur NPC, les porteuses occupent l'intégralité de la plage de modulation. Leur déphasage, π dans ce cas précis, dépend du nombre de cellules. Cet aspect est explicité au paragraphe suivant. Nous ne visualisons que les commandes de T_1 et T_2 puisqu'ils opèrent respectivement de manière complémentaire avec T_3 et T_4 .

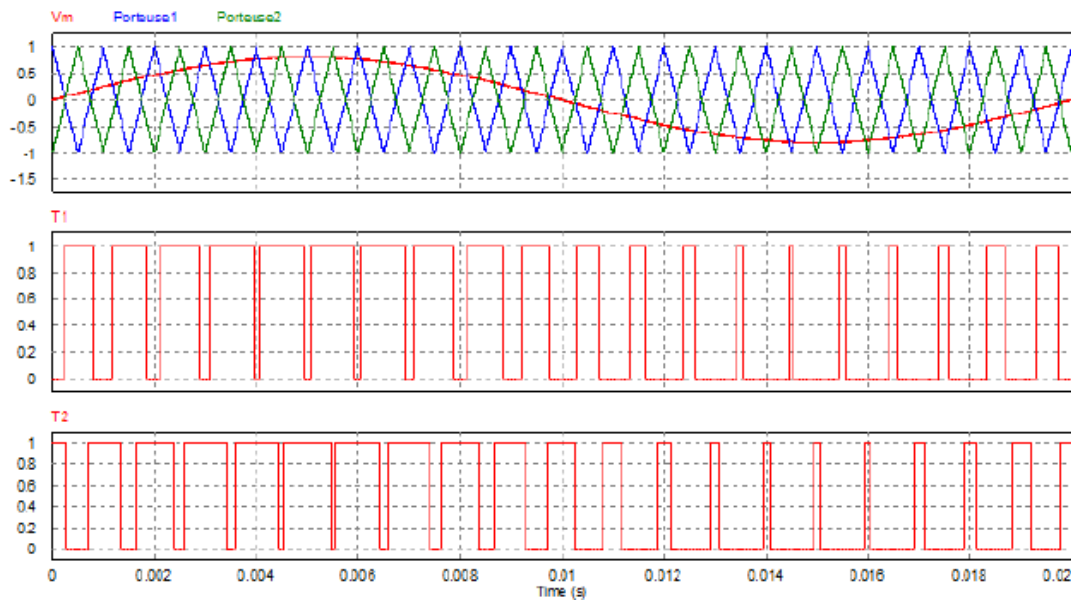


Figure I-11 Porteuses, modulante et signaux de commande de T1 et T2 d'un onduleur FC 3 niveaux

2-Convertisseur multicellulaire série p cellules N niveaux

Le schéma général d'un bras d'onduleur multicellulaire est illustré par la Figure I-12[HAM] [MEY] [MEY3]. Il se compose de p paires de semi-conducteurs 3 quadrants séparés par (p-1) condensateurs flottants. Les deux interrupteurs de chaque paire doivent toujours être dans un état opposé, afin d'éviter un court-circuit des sources de tension. Ceci est obtenu grâce au contrôle des deux IGBTs avec des signaux quasi-opposés en intégrant des temps morts à chaque commutation. Pour cette raison, chaque paire constitue une cellule de commutation.

Le principe de cette topologie est de fractionner la tension du bus continu en p sources de tension élémentaires. Le fonctionnement de chaque cellule de commutation est similaire à celui d'un onduleur 2 niveaux classique avec une source de tension égale à E/p et une source de courant I_{dc} . Chaque interrupteur bloqué doit maintenir à ses bornes une tension maximum égale à :

$$V_{\text{celk}} = E/p, k \in \{1, \dots, p\} \quad (1)$$

et le courant circule à travers le composant complémentaire qui est dans un état passant. Cette condition est assurée si la tension aux bornes des condensateurs flottants de chaque cellule vérifie la relation suivante :

$$V_{ck} = E \times k / p, k \in \{1, \dots, p\} \quad (2)$$

Néanmoins, cette valeur théorique évolue en pratique, car il y a circulation de courant dans les condensateurs en fonction des signaux de commande. L'ondulation résultante est stable si la valeur moyenne du courant est nulle sur une période de découpage :

$$\overline{I_{ck}} = 0, k \in \{1, \dots, p\} \quad (3)$$

Ce critère de stabilité est vérifié à partir du moment où les ordres de commande des cellules de commutation ont un rapport cyclique identique, peu importe leur déphasage relatif Φ_k . Ce dernier a cependant une influence conséquente sur le spectre harmonique de la tension de sortie [MEY2][MEY3].

Si les signaux de commande de chaque cellule sont régulièrement déphasés, tel que :

$$\Phi_k = (k - 1) \times 2\pi / p, k \in \{1, \dots, p\} \quad (4)$$

Les variations de la tension de sortie sont limitées à E/p et la fréquence apparente en sortie est proportionnelle à la fréquence de découpage instantanée des semi-conducteurs :

$$f_{app} = p \times f_{déc} \quad (5)$$

De fait, les premiers harmoniques du spectre de sortie apparaissent à cette fréquence et possèdent une amplitude p fois plus faible que celle d'un onduleur 2 niveaux classique. Les raies harmoniques se situent ensuite aux fréquences de valeurs entières multiples de p [GAT]. Cette commande est obtenue en comparant des porteuses décalées de $2\pi/p$ avec une modulante sinusoïdale.

Un onduleur multicellulaire série avec p cellules peut générer

$$N_{niv} = p + 1 \quad (6)$$

Niveaux de tension en sortie et possède :

$$N_{conf} = 2^p \quad (7)$$

Configurations différentes de la structure.

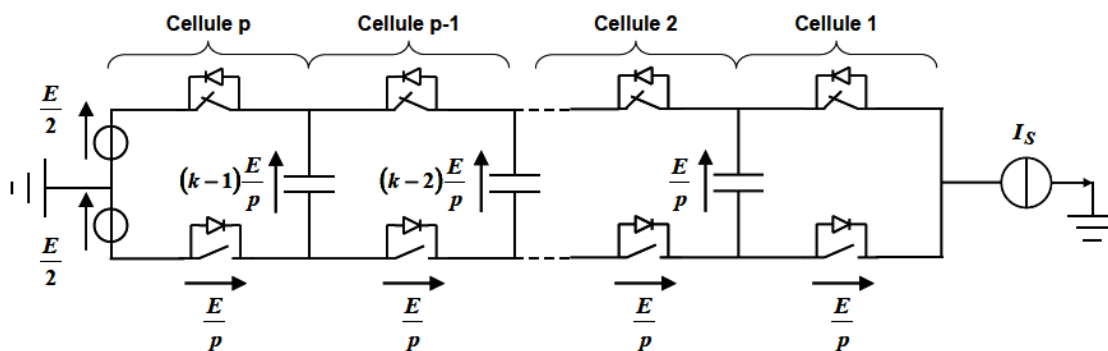


Figure I-12 Onduleur multicellulaire série n cellules

Les Figure I-14 et Figure I-15 illustrent brièvement les caractéristiques de sortie d'un onduleur multicellulaire série 4 niveaux représenté en Figure I-13 ; ceci uniquement dans le but d'apprécier la qualité de la tension découpée et du spectre harmonique. Comparé au spectre harmonique de la Figure I-10 (cas de l'onduleur 3 niveaux), la Figure I-15 montre un décalage fréquentiel et une diminution de l'amplitude du premier ensemble d'harmoniques qui apparaît à présent autour de $f_{app} = 3 \text{ kHz}$. La simulation est inspiré d'une ancienne thèse [ANN], avec $V_{C2} = 2400 \text{ V}$ et $V_{C1} = 1800 \text{ V}$.

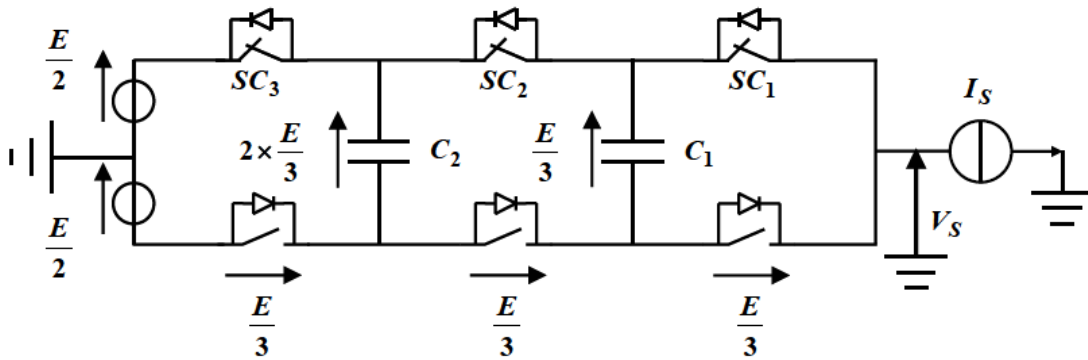


Figure I-13 Onduleur multicellulaire série 3 cellules 4 niveaux

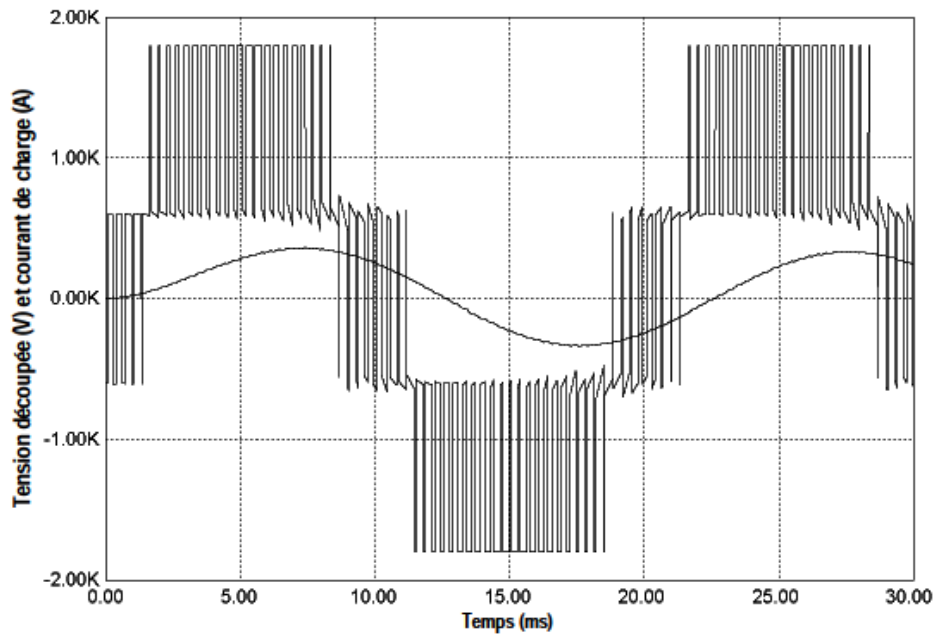


Figure I-14 Tension découplée et courant de charge d'un convertisseur FC 4 niveaux

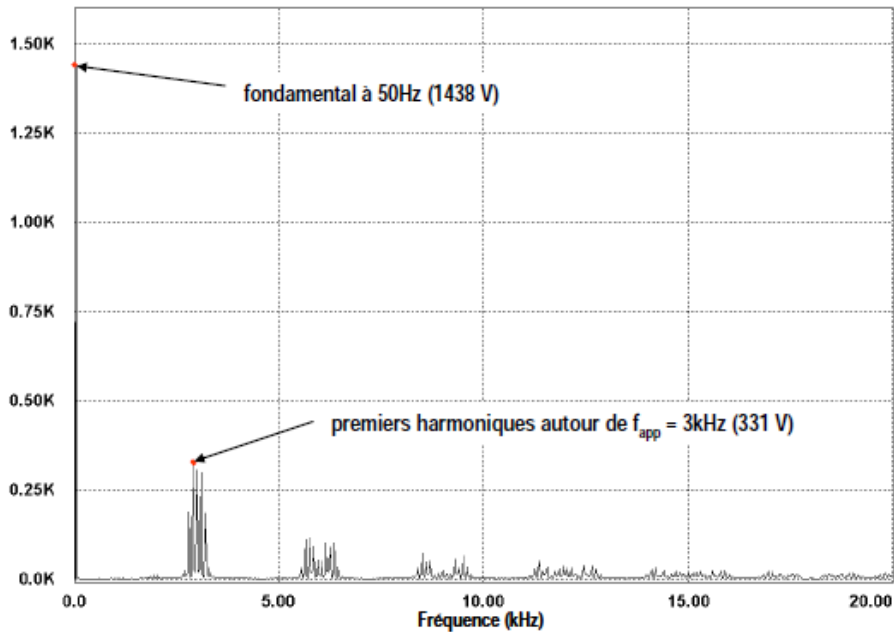


Figure I-15 Spectre de la tension de sortie d'un onduleur FC 4 niveaux

La dernière propriété du convertisseur multicellulaire série apparaît de manière évidente à partir de 3 cellules, à savoir les redondances existantes au niveau de la commande pour l'obtention d'un niveau de tension précis en sortie. Pour un onduleur 4 niveaux par exemple, le Tableau I-4 regroupe l'ensemble des combinaisons éventuelles des ordres de commande, ainsi que la tension de sortie associée. Il apparaît 3 combinaisons possibles pour générer les niveaux de tension intermédiaires $\pm E / 6$.

Niveau de tension	Combinaison des ordres de commande {SC ₃ , SC ₂ , SC ₁ }	Tension de sortie V _s
+2	{1,1,1}	V _s = E/2
+1	{1,1,0}	V _s = E/6
	{1,0,1}	V _s = E/6
	{0,1,1}	V _s = E/6
-1	{0,0,1}	V _s = - E/6
	{0,1,0}	V _s = - E/6
	{1,0,0}	V _s = - E/6
-2	{0,0,0}	V _s = - E/2

Tableau I-2 Etats des signaux de commande et tension découpée résultante pour un convertisseur FC 3 cellules

La Figure I-16 illustre la stabilité des tensions aux bornes des condensateurs flottants de la structure obtenue à l'aide de porteuses décalées de $2\pi/3$.

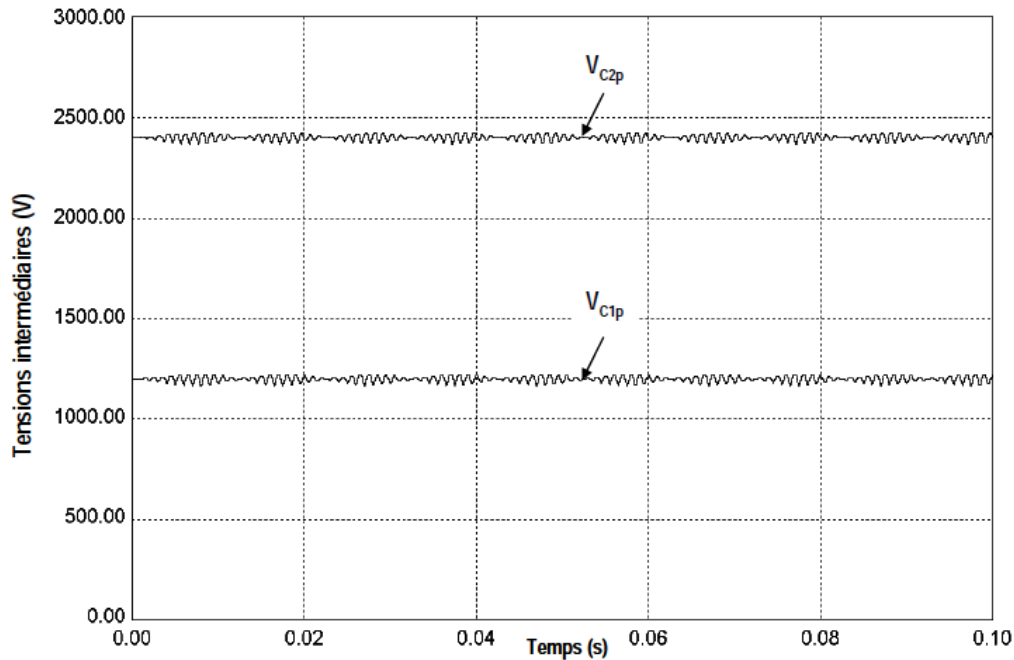


Figure I-16 Tensions aux bornes des condensateurs flottants de l'onduleur FC 4 niveaux

Le convertisseur multicellulaire série a permis le développement d'entraînements haute tension performants avec des bras d'onduleurs composés de 2 ou 3 cellules, améliorant ainsi la qualité de la tension découpée d'un facteur 4 ou 9 [MEY2][COU]. Cette constatation a un impact significatif sur les éléments de filtrage par rapport aux structures de conversion classiques. Néanmoins, si le nombre de cellules est supérieur à 5, la quantité d'énergie stockée dans les condensateurs flottants a un impact considérable sur le prix de la structure envisagée. Cette topologie est de nos jours considérée rentable jusqu'à 4 ou 5 cellules pour les applications de forte puissance [ANN].

CONCLUSION

Les avancées technologiques récentes ont permis le développement continu des semi-conducteurs de puissance moyenne tension, entièrement commandés, à base de silicium. Leur évolution en termes de calibres en courant et en tension reste cependant limitée à l'heure actuelle notamment à cause des limites physiques de ce matériau, malgré les nouvelles structures de composants considérées (SPT, Trench, etc.).

Les besoins actuels en terme de puissance ne cessent de croître et la limitation technologique des composants a légitimé le développement de topologies de conversion d'énergie reposant sur l'association en série de structures élémentaires. Elles sont de plus en plus répandues, car elles présentent l'avantage d'utiliser des semi-conducteurs commandés de calibre plus faible en tension avec des fréquences de commutation plus élevées.

La structure NPC 3 niveaux est très utilisée, car elle est simple à mettre en œuvre et accessible pour les applications envisagées avec les gammes de tension actuelles des semi-conducteurs. Le contrôle du point milieu reste cependant contraignant.

Les topologies multicellulaires, quant à elles, utilisent la mise en série d'interrupteurs, assurant ainsi la répartition de la contrainte en tension du convertisseur sur plusieurs cellules de commutation.

L'entrelacement ou le décalage des commandes permet à ces convertisseurs de faire apparaître des niveaux de tension E/n et de multiplier la fréquence apparente en sortie. Ces améliorations induisent un spectre de la tension de sortie de meilleure qualité d'un point de vue harmonique et permettent de réduire de façon significative les besoins en terme de filtrage (volume, énergie stockée, coût). Pour la topologie multicellulaire série toutefois, l'augmentation de la tension entraîne indirectement une augmentation de la taille des condensateurs, et au-delà de 6kV, le prix et le volume tendent à devenir prohibitifs.[ANN]

Les structures de conversion d'énergie multiniveaux connaissent un essor dans le domaine des applications moyenne tension/forte puissance, car elles possèdent de meilleures performances que les topologies classiques et permettent l'utilisation de composants moyenne tension pour des niveaux de tension toujours plus élevés.

BIBLIOGRAPHIE

- [ALV] Silverio Alvarez Hidalgo. *Characterisation of 3.3kV IGBTs for Medium Power Applications*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005
- [ANN] Anne-Marie LIENHARDT Etude de la Commande et de l'Observation d'une Nouvelle Structure de Conversion d'Energie de type SMC (Convertisseur Multicellulaire Superposé)Thèse de Doctorat 2006.
- [BER] S.Bernet, E. Carroll, P. Streit, O. Apeldoorn, P. Steimer, S. Tschirley. "Design, Tests and Characteristics of 10 kV IGBTs". IEEE Industrial Applications Society Annual Meeting, Salt Lake City, 2003.
- [BRU] T. Brückner, S. Bernet and H.Güldner, "The Active NPC Converter and Its Loss-Balancing Control". IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 52, no. 3, June 2005.
- [CEL] N. Celanovic and D. Boroyevich, "A comprehensive study of neutral point voltage balancing problem in three-level neutral-point-clamped voltage source PWM inverters". *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 15, no. 2, pp. 242–249, March 2000.
- [COU] J. Courault, O. Lapierre and J.-L. Pouliquen, "Industrial Interests of Multilevel Converters". *EPE 1999*, September 1999, Lausanne, Suisse.
- [ELA] A. Elasser and T.P. Chow, "Silicon carbide benefits and advantages for power electronics circuits and systems". *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, issue 6, pp. 969-986, June 2002.
- [GAT] G. Gateau, T. A. Meynard and H. Foch, "Stacked Multicell Converter (SMC): Properties and Design". *IEEE PESC 2001*, vol. 3, pp. 1583-1588, June 2001, Vancouver, Canada.
- [ION] Ionescu, Ai, Six, Bausière, Florica, Fodor, Mihalache, Radomirescu. Composants semi-conducteurs de puissance. Technica Bucarest, 1994.
- [LAI] J.-S. Lai and F.Z. Peng, "Multilevel Converters – A New Breed of power Converters". *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32 no. 3, May/June 1996.
- [MAR] Mariethoz ,Etude formelle pour la synthèse des onduleur multiniveaux asymétrique Topologie , modulation et commande thèse doctorat 2005
- [MEY] T.A. Meynard and H. Foch, "Multilevel choppers for high voltage applications". *EPE Journal*, vol. 2, no. 1, pp. 45-50, March 1992.
- [MEY2] Thierry A. Meynard, Henri Foch, Philippe Thomas, Jacques Courault, Roland Jakob, and Manfred Nahrstaedt, "Multicell Converters: Basic Concepts and Industry Applications". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 5, pp. 955-964, October 2002.

[MEY3] T.A. Meynard and H. Foch, "Multilevel Conversion: High Voltage Choppers and Voltage- Source Inverters". *IEEE PESC 1992*, vol. 1, pp. 397-403, June 1992.

[ROD] J. Rodriguez, J.-S. Lai and F.Z.Peng, "Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls and Applications". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 4, pp. 724-738, August 2002

[TEI] R. Teichmann and S. Bernet, "Three-level topologies for low voltage power converters in drives, traction, and utility applications". *IEEE Industrial Applications Society Annual Meeting*, pp. 160–167, Salt Lake City, UT, 2003.

[INF] <http://www.infineon.com/cgi-bin/ifx/portal/ep/channelView.do?channelId=77033>

[SEM] <http://www.semikron.com/internet/index.jsp?sekId=12>

[ABB] <http://www.abb.com/product/us/9AAC910029.aspx?country=US>