

Analyse des perturbations CEM conduites de mode commun des convertisseurs multicellulaires DC/AC

Hugot Pichon¹; Jean-Christophe Crebier¹; Yves Lembeye¹

¹Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP*, G2Elab, 38000 Grenoble, France

RESUME - Cet article propose un travail de modélisation et d'analyse des perturbations conduites de mode commun induites par des convertisseurs modulaires multicellulaires de type DC/AC, associés en série coté AC. A l'analyse suivent plusieurs recommandations pour assurer un entrelacement efficace des cellules de conversion permettant de réduire fortement les besoins de filtrage des courants de mode commun produits par onduleur multicellulaire. L'impact de ces recommandations sur l'évolution des perturbations conduites de mode différentielle est également analysé pour en tirer un bilan global. L'ensemble est illustré et validé au niveau théorique par des résultats de simulation.

Mots-clés—Réseau de convertisseurs, CEM conduite, courant de mode commun, modèle, analyse, recommandations

1. INTRODUCTION

Les convertisseurs modulaires DC/AC conçus à partir de cellules de conversion élémentaires standardisées (CSC) présentent des atouts qui attirent de plus en plus l'attention des concepteurs d'électronique de puissance [1], [2]. Un exemple de topologie est présenté dans la Fig. 1, dans laquelle, chaque cellule de conversion élémentaire est représentée par un étage de conversion DC/DC isolé, par exemple un convertisseur DAB (Dual Active Bridge) suivi d'un pont en H pour produire l'onde AC basse fréquence à partir d'un découpage HF appliqué sur des inductances de sortie L_s . En général, ces architectures de conversion sont associées en parallèle coté DC et en série coté AC pour interfaçer, par exemple, une batterie de stockage à une charge sensible [3]. Par la suite, ce type de convertisseur sera mentionné par son acronyme, le PCA pour Power Converter Array.

Concernant la conversion DC/AC raccordée au réseau de distribution électrique et soumise au respect des normes CEM conduites en vigueur, les convertisseurs modulaires apportent des dividendes importants sur les courants de mode différentiel grâce aux multiniveaux et à l'entrelacement des ordres de

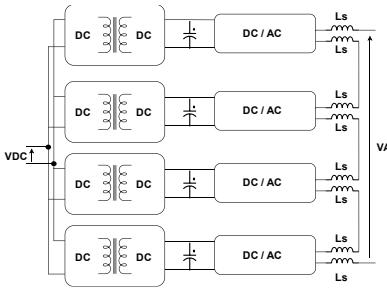


Fig. 1 : convertisseur DC/AC multicellulaire à connexion parallèle coté DC et série coté AC en vue d'un raccordement réseau d'un batterie BT

commande [2], [4]. Cependant, peu d'études s'intéressent aux perturbations de mode commun produites par ce type de convertisseurs avec ces stratégies de commande. Cet article propose une analyse conceptuelle des perturbations conduites de mode commun induites par des réseaux de convertisseurs élémentaires de type DC/AC, associés en série coté AC. Tout d'abord, une démarche de modélisation qualitative des courants HF de mode commun est introduite. Cela permet de mener une étude et une analyse des différents courants de mode communs produits par les nombreuses commutations au sein d'un PCA. A l'analyse faite, suivent plusieurs recommandations pour assurer un entrelacement efficace des cellules limitant le besoin de filtrage du réseau de convertisseurs.

L'impact de ces recommandations sur l'évolution des perturbations conduites de mode différentiel est également analysé pour en tirer un bilan global. L'ensemble est illustré et validé théoriquement par des résultats de simulation. Des résultats pratiques sont en cours de réalisation pour confirmer les travaux d'analyse. Ils seront disponibles pour le jour de la présentation de l'article à la conférence et feront l'objet d'une publication ultérieure.

2. MODELISATION DES PERTURBATIONS CEM DE MODE COMMUN D'UN CONVERTISSEUR DC/AC MODULAIRE

L'étude et l'analyse des perturbations CEM conduites de mode commun est difficile à théoriser en totalité sur des systèmes complexes tels que les convertisseurs modulaires DC/AC. En effet, ces perturbations circulent à travers les nombreux éléments parasites des dispositifs réels, qu'il peut s'avérer difficile de bien lister et représenter. Egalelement, chaque commutation coté étage de conversion DC/AC induit des variations de potentiels dans toute la structure de conversion. Pour tenter de représenter les principaux courants de mode commun, il faut faire un ensemble d'hypothèses et de simplifications que nous allons énoncer rapidement. Fort de ces hypothèses, un modèle équivalent haute fréquence sera proposé. Compte tenu de l'importance des instants de commutation dans la représentation des courants de mode commun, une démarche spécifique sera présentée pour appréhender les nombreux instants de commutation qui existent dans un convertisseur DC/AC modulaire.

Le travail de modélisation des perturbations de mode commun est très dépendant de la structure physique du convertisseur qui est étudié. Dans le cas présent, les convertisseurs modulaires sont réalisés par associations série parallèle de cellules standards de conversion (CSC) préconçues, réalisées et déjà mises en œuvre. La Fig. 2 ci-dessous présente

les photos d'une CSC DC/AC, face avant et, à titre d'exemple de mise en œuvre, celle d'un convertisseur PCA DC/AC réalisé à partir de l'association de 12 CSCs. Chaque CSC présente les caractéristiques suivantes : $V_{inDC}=40V$, $I_{outAC}=2A_{eff}$, $Pout=80W$. De son côté, le PCA fonctionne en convection naturelle et présente les caractéristiques suivantes : $V_{inDC}=40V$, $V_{outAC}=230V_{eff}$ et $Pout=960W$. Pour la suite de l'article, les schémas équivalents et modèles seront basés sur l'association de 4 CSC pour des raisons de simplification et de compréhension des phénomènes lors de l'analyse.

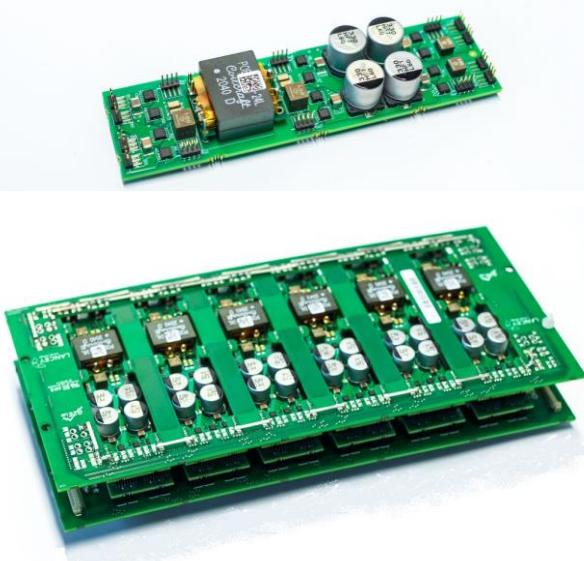


Fig. 2 : Photos d'une CSC faces avant et d'un prototype PCA pour le raccordement au réseau BT d'une batterie Li-Ion 36V.

Sans rentrer dans le détail des géométries de ce prototype PCA, il est possible de donner quelques ordres de grandeurs qui sont rappelées dans le tableau ci-dessous.

CSC	$L \times l \times h$ [cm]	$13 \times 2.8 \times 2$
	Densité de puissance [$W \cdot cm^{-3}$]	1,1
PCA	$L \times l \times h$ [cm]	$14 \times 17 \times 4,1$
	Densité de puissance [$W \cdot cm^{-3}$]	1

La densité de puissance de cette onduleur isolé est de l'ordre de 2 fois la densité des onduleurs du marché grand public.

Le prototype présenté ci-dessus a été testé dans les conditions normatives de la norme EN55022 pour évaluer sa signature CEM conduite dans des conditions d'entrelacement à 1/6 de la période de découpage des ponts en H (100kHz). La Fig. 3 ci-dessous en présente un relevé avant l'ajout des filtres CEM coté AC. Les perturbations de mode commun, caractérisées par des amplitudes des harmoniques relativement constantes sur une large plage de fréquence, sont bien visibles sur le relevé. Il apparaît tout à fait pertinent de chercher à réduire le plus possible en amont les niveaux des perturbations CEM conduites pour réduire la taille des moyens de filtrage nécessaires pour passer la norme. C'est tout l'objet du travail de recherche qui est présenté dans cet article.

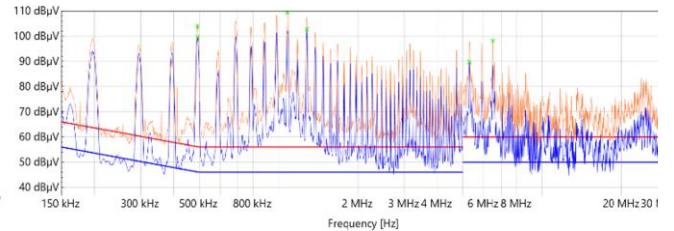


Fig. 3 : Relevé CEM d'un PCA DC/AC à 12 CSCs dans les conditions de la norme EN55022.

2.1 Hypothèses prises en compte pour la modélisation des perturbations de mode commun des convertisseurs PCA.

- Seules les perturbations conduites de mode commun émises par les étages de conversion DC/AC sont prises en compte dans cette étude. De fait, les perturbations conduites de mode commun émises par les convertisseurs DAB ne sont pas représentées,
- Pour établir le schéma équivalent haute fréquence permettant de modéliser les perturbations conduites de mode commun, les composants passifs (condensateurs, inductance et transformateurs) sont supposés parfaits et sont représentés par leurs modèles parfaits,
- Les sources de perturbation de mode commun sont représentées par des sources de tension en créneaux qui reproduisent les variations de potentiels entre les points milieux des ponts en H des CSC et leur bus DC respectifs,
- Les chemins de propagation de mode commun pris en compte dans le modèle équivalent sont représentés par des condensateurs « parasites » de petites valeurs, tous connectés entre l'un des potentiels de la partie puissance d'une CSC et la terre,
- Les cellules standards de conversion (CSC) sont toutes considérées strictement identiques,
- Les chemins de propagation de mode commun entre chaque CSC et la terre sont considérés identiques,
- Pour développer un modèle fidèle de la réalité, les valeurs des condensateurs sont proportionnelles à la surface physique des potentiels électriques de la CSC présentée Fig. 2,
- Les chemins de propagation de mode commun de la partie DC/DC de chaque CSC sont représentés par un condensateur unique dont la valeur est proportionnelle à la surface de l'étage de conversion DC/DC,

2.2 Modèle équivalent haute fréquence pour l'étude des perturbations de mode commun d'un PCA.

Pour étudier les perturbations conduites de mode commun du PCA, l'étage de conversion DC/DC isolé de chaque CSC est remplacé par une source de tension DC idéale (voir Fig. 4). Les points milieux de chaque pont en H formant l'étage de conversion DC/AC de chaque CSC sont reliés en série à travers des inductances parfaites de sortie L_s pour former le PCA.

Pour représenter les chemins de propagation des perturbations conduites de mode commun, 4 capacités parasites de mode commun $C_{(A,B1,B2 \text{ et } C)}$ sont reliées, comme représenté Fig. 4, de la terre à chacun des 4 potentiels des ponts en H de chacune des CSC que l'on nomme point chaud. Les valeurs des capacités attachées aux bornes + et - sont sensiblement plus importantes que celles attachées aux points milieux des ponts en H. Cette hypothèse fait appel à une logique de mise en œuvre concrète énoncée partie 2.1.

On obtient alors avec un circuit équivalent haute fréquence dédié à l'étude des courants de mode commun. Celui-ci est présenté Fig. 4. Il est composé uniquement, au niveau de chaque CSC, par une source de tension DC, un pont en H, à l'origine des perturbations CEM, et des composants passifs pour former les chemins de propagation et de retour des courants de mode commun à travers la phase et le neutre coté AC. Le PCA est formé par associations en série des CSC et le circuit est fermé coté réseau par un RSIL.

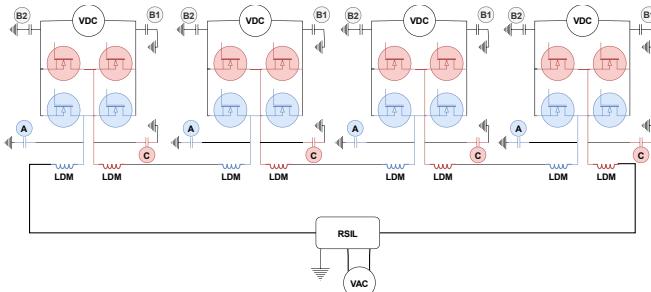


Fig. 4 : Schéma équivalent simplifié pour l'étude des perturbations conduites de mode commun et de mode différentiel d'un réseau de convertisseur.

Etape ultime de simplification et de modélisation, chaque pont en H peut être remplacé par deux sources de tension [5], une pour chaque bras du pont en H. Ces sources de tension en crêteaux représentent les sources d'excitation de mode commun comme illustré Fig. 5 avec le code couleur correspondant à la Fig. 2. Cela permet de simplifier le modèle en retirant les transistors et la source de tension idéale à l'échelle de chaque CSC.

Les condensateurs parasites B1 et B2 de chaque CSC, étant reliés à la source parfaite de tension, ils seront considérés en parallèle dans le modèle haute fréquence.

On obtient alors avec un circuit équivalent haute fréquence, dédié à l'étude des courants de mode commun et composé uniquement de sources de tension HF en crêteau, qu'il faut paramétrier, et de composants passifs. Le circuit est toujours fermé coté réseau par un RSIL.

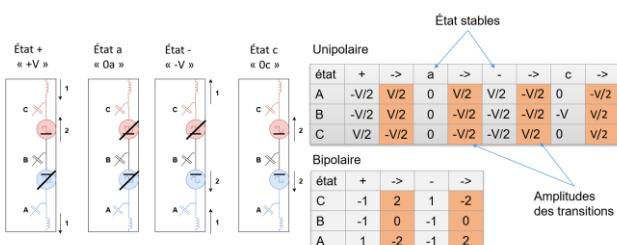


Fig. 5 : Représentations graphiques des états et de la composition des tableaux dans le cas d'un convertisseur unipolaire à une cellule

2.3 Paramétrage des instants de commutation pour chaque CSC

Les définitions des ordres de commande appliqués à chacun des ponts en H des CSC permettent de paramétrier les sources de tension équivalentes introduites dans la partie précédentes et illustrées Fig. 5. Pour assurer le bon fonctionnement du PCA et la bonne répartition des tensions au sein des CSC, les rapports cycliques appliqués à chaque CSC sont considérés égaux. Il existe différentes stratégies de pilotage des ponts en H pour définir les valeurs des rapports cycliques et le déphasage relatif au cours de la période de découpage. On peut citer par exemple

les MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) unipolaires ou bipolaires ou encore des commandes plus complexes telles que les commandes vectorielles. Les PCA offrent l'opportunité d'entrelacer ces commandes pour faire apparaître des fréquences de découpage apparentes élevées tout en profitant de caractéristiques multiniveaux pour réduire les tensions appliquées aux inductances de sorties [4]. Ces techniques sont bien connues pour offrir une forte réduction dans les besoins de filtrage de mode différentiel. Se faisant, cela conduit à répartir les instants de commutation sur toute la période de découpage.

Les instants de commutation ou plus particulièrement les fronts de tension induits par les commutations des bras de pont sont connus pour être à l'origine des perturbations conduites de mode commun. La prise en compte et la représentation de ces instants de commutation est donc importante dans le travail de modélisation. Dans une structure PCA, beaucoup les instants à considérer sont donc nombreux.

Dans le cadre de l'étude des perturbations conduites de mode commun, une approche via le théorème de superposition a été entreprise. Il a été considéré que les commutations des transistors des ponts en H excitent l'ensemble des capacités parasites du système à tour de rôle. A chacun des instants de commutation, les impacts sur les tensions des points chauds, induits par les commutations simultanées d'un ou plusieurs bras de ponts en H, peuvent être sommés. L'impact sur le signe des courants de mode commun induits par les commutations sur fronts montant ou descendant est également pris en compte. Ainsi, pour chaque instant de commutation, à l'échelle d'une période de découpage haute fréquence, toutes les propagations des courants de mode commun peuvent être définies puis étudiées.

A partir de cette approche, et en fonction de la stratégie de commande considérée et de l'agencement des inductances de filtrage en sortie des ponts en H, les différences de potentiels aux bornes des condensateurs parasites peuvent être exprimées. Les tableaux 2 et 3 présentent, pour un réseau de convertisseurs, formé de 4 CSC, les résultats de superposition des courants de mode commun induits par les commutations des transistors d'un ou plusieurs bras de ponts en H sur les tensions des condensateurs parasites C_A C_B C_C de chaque CSC. Pour des raisons de lisibilité, les valeurs dans les tableaux expriment le nombre de 16ème de la tension DC cumulée ($Vdc/16$). Le facteur d'échelle de 1/16ème étant le facteur d'échelle minimum permettant de représenter les tensions aux bornes des composants inductifs en valeurs entières. Le code couleur des chiffres dans les tableaux permet de souligner la présence ou l'absence d'une antisymétrie des évolutions aux instants de commutation.

La lecture des tableaux 2 et 3 est la suivante : Les colonnes en clair présentent les états stables entre les instants de commutation. Les 4 caractères dans la ligne sombre supérieure définissent les états stables (+ pour une sortie positive à $V/2$, - pour une sortie négative à $-V/2$). Entre ces colonnes se trouvent les colonnes dans lesquelles sont calculées les amplitudes des fronts de tensions appliquées aux différents condensateurs parasites du PCA. Le signe permet de distinguer si le front est montant (signe +) ou descendant (signe -). Les trois dernières colonnes représentent la somme des évolutions pour chaque type de condensateur.

Tableau 3. La commande **unipolaire entrelacée**: niveaux de tension des condensateurs $C_{A,B,C}$ aux états stables, contribution des commutations à l'évolution des tensions en Vdc/16

	++++	a+++	aa++		aac+		aacc		
A1	-4	1	-3	1	-2	1	-1	1	0
B1	-4	1	-3	1	-2	1	-1	1	0
C1	4	-7	-3	1	-2	1	-1	1	0
A2	-4	-5	-9	3	-6	3	-3	3	0
B2	-4	-5	-9	3	-6	3	-3	3	0
C2	4	-5	-1	-5	-6	3	-3	3	0
A3	-4	-3	-7	-3	-10	5	-5	5	0
B3	-4	-3	-7	-3	-10	-3	-13	5	-8
C3	4	-3	1	-3	-2	-3	-5	5	0
A4	-4	-1	-5	-1	-6	-1	-7	7	0
B4	-4	-1	-5	-1	-6	-1	-7	-1	-8
C4	4	-1	3	-1	2	-1	1	-1	0
$\sum \Delta V_A$		-8		0		8		16	
$\sum \Delta V_B$		-8		0		0		8	
$\sum \Delta V_C$		-16		-8		0		8	

Les courant de mode commun sont supposé lié uniquement à l'évolution des tension au borne des condensateur $C_{A,B,C}$. ainsi, par la loi des maille, les courant traversant le RISL sont égaux la somme des courant traversant les condensateurs calculable a tout instant selon l'équation (1):

$$I_{RLSIN} = C_{A\&C} \times \sum \frac{dV_{C_{A\&C}}}{dt} + C_B \times \sum \frac{dV_{C_B}}{dt} \quad (1)$$

Tableau 2. La commande **bipolaire entrelacée** : niveaux de tension des condensateurs C_{ABC} aux états stables, contribution des commutations à l'évolution des tensions en Vdc/16

	++++	-+++	---+	---	----	----	----	----	
A1	-2	1	-1	1	0	1	1	1	2
B1	-2	-3	-5	1	-4	1	-3	1	-2
C1	2	-3	-5	1	-4	1	-3	1	-2
A2	-2	-5	-7	3	-4	3	-1	3	2
B2	-2	-5	-7	-1	-8	3	-5	3	-2
C2	2	-5	-3	-5	-8	3	-5	3	-2
A3	-2	-3	-5	-3	-8	5	-3	5	2
B3	-2	-3	-5	-3	-8	1	-7	5	-2
C3	2	-3	-1	-3	-4	-3	-7	5	-2
A4	-2	-1	-3	-1	-4	-1	-5	3	2
B4	-2	-1	-3	-1	-4	-1	-5	3	-2
C4	2	-1	1	-1	0	-1	-1	-1	-2
$\sum \Delta V_A$		-8		0		8		12	
$\sum \Delta V_B$		-12		-4		4		12	
$\sum \Delta V_C$		-12		-8		0		8	

Cette représentation des instants de commutation sous la forme d'un tableau de fronts de tensions appliqués aux condensateurs parasites du PCA permet de mettre en évidence les différentes contributions des courants de mode commun, leurs sens de circulation dans le schéma équivalent HF et, le cas échéant, les opportunités de compensation et de recyclage en interne au PCA si des synchronisations astucieuses sont possibles. C'est ce qui est présenté dans la partie suivante.

3. ANALYSE DES COURANTS DE MODE COMMUN DANS LES PCA DC/AC

Les descriptions des fronts de commutation d'un PCA à 4 CSC pour des lois de commande bipolaire et unipolaire avec entrelacement sont présentées dans les tableaux 2 et 3 ci-dessus. Il est facile de constater que, quelle que soit la loi de commande considérée avec entrelacement, de nombreux courants de mode commun sont produits au niveau de tous les condensateurs parasites du PCA lors de chacune des commutations mises en œuvre. Cela se traduit par des niveaux de perturbations conduites de mode commun très importants. Il serait donc souhaitable de tenter de synchroniser des fronts de commutation, à l'intérieur d'un PCA, entre CSC, pour tenter de compenser des courants de mode commun ou dit autrement pour leur offrir des chemins de recyclage en interne au convertisseur.

3.1 Opportunité de la symétrisation des ordre de commande

La structure électrique et physique d'un PCA présente la particularité d'offrir une forte symétrie qui est propice à la compensation des courants de mode commun comme cela a été montré par le passé sur des structures plus simples dans [6]. L'idée, dans le cas présent, consiste à utiliser la pluralité des CSC pour systématiquement synchroniser la commutation opposée de deux sources de perturbations de mode commun parfaitement symétriques.

Tableau 5. La commande **bipolaire entrelacée symétrisée** : niveaux de tension des condensateurs C_{ABC} aux états stables, contribution des commutations à l'évolution des tensions en Vdc/16

	++++	-++-	----	+-+	++++				
A1	-4	4	0	4	4	-4	0	-4	-4
B1	-4	-4	-8	4	-4	4	0	-4	-4
C1	4	-12	-8	4	-4	12	8	-4	4
A2	-4	-4	-8	12	4	4	8	-12	-4
B2	-4	-4	-8	4	-4	4	0	-4	-4
C2	4	-4	0	-4	-4	4	0	4	4
A3	-4	4	0	4	4	-4	0	-4	-4
B3	-4	4	0	-4	-4	-4	-8	4	-4
C3	4	4	8	-12	-4	-4	-8	12	4
A4	-4	12	8	-4	4	-12	-8	4	-4
B4	-4	4	0	-4	-4	-4	-8	4	-4
C4	4	-4	0	-4	-4	4	0	4	4
$\sum \Delta V_A$		16		16		-16		-16	
$\sum \Delta V_B$		0		0		0		0	
$\sum \Delta V_C$		-16		-16		16		16	

Avec l'exemple d'un PCA composé de 4 CSC, si l'on synchronise les commutations duales de deux CSC opposées dans l'agencement électrique et physique du PCA, tous les courants de mode communs induits dans tous les condensateurs parasites du PCA se recyclent deux à deux. Cette configuration est présentée dans les tableaux 5 et 6, dans lesquels des MLI bipolaires et unipolaires sont mises en œuvre avec deux niveaux d'entrelacement. Comme on peut le voir dans le tableau, cela

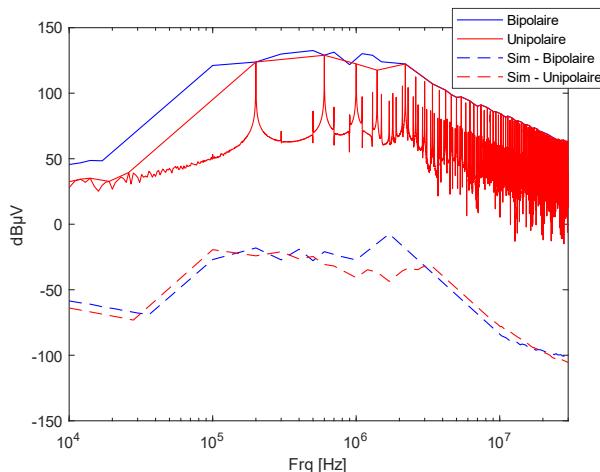


Fig. 6 : Enveloppes des spectres de courant de mode commun traversant les résistances du RSIL dans le cas de PCA à 4 Cellules suivant qu'ils soient commandés selon des MLI bipolaires, unipolaire, symétrisées ou non.

produit des courants de mode commun qui se compensent deux à deux. Suivant l'axe d'antisymétrie représenté par une ligne épaisse au centre des tableaux.

Tableau 6. La commande **unipolaire entrelacée symétrisée** : niveaux de tension des condensateurs C_{ABC} aux états stables, contribution des commutations à l'évolution des tensions en Vdc/16

	1111	-11+	--++	1-+1	1111				
A1	-4	2	-2	2	0	-2	-2	-4	
B1	-4	2	-2	2	0	-2	-2	-4	
C1	4	-6	-2	2	0	6	6	-2	4
A2	-4	-2	-6	6	0	2	2	-6	-4
B2	-4	-2	-6	6	0	2	2	-6	-4
C2	4	-2	2	-2	0	2	2	2	4
A3	-4	2	-2	2	0	-2	-2	-2	-4
B3	-4	2	-2	-6	-8	-2	-10	6	-4
C3	4	2	6	-6	0	-2	-2	6	4
A4	-4	6	2	-2	0	-6	-6	2	-4
B4	-4	-2	-6	-2	-8	2	-6	2	-4
C4	4	-2	2	-2	0	2	2	2	4
$\sum \Delta V_A$		8		8		-8		-8	
$\sum \Delta V_B$		0		0		0		0	
$\sum \Delta V_C$		-8		-8		8		8	

Pour s'en convaincre, des simulations temporelles ont été réalisées sur un modèle topologique d'un PCA à 4 CSC relié à un RSIL. La Fig. 6 ci-dessous présente les relevés des spectres réalisés dans le domaine fréquentiel sur l'une des résistances du RSIL pour une configuration avec symétrie deux à deux et une autre sans cette symétrie. Dans ce cas parfait, pour lequel les valeurs des composants du modèle de simulation sont parfaites,

et les instants de commutation sont parfaitement synchronisés, les courants de mode commun disparaissent au niveau du RSIL.

Une analyse a été menée pour voir si l'emplacement des inductances de filtrage de mode différentiel pouvait lui aussi avoir un impact sur la réduction des perturbations de mode commun. Les conclusions de l'analyse sont les suivantes :

La répartition du filtre de mode différentiel en sortie de chaque cellule limite les risques de résonances hautes fréquences entre les inductances d'interconnexion et le condensateur parasite des points chauds. Cependant, elle défavorise le recyclage cellule à cellule du courant de mode commun. Du point de vue des émissions conduites, la concentration du filtre de mode différentiel en extérieur devrait donc être favorisée. Le risque de résonances défavorables pour les émissions en champs proche et lointain doit encore être traité.

3.2. Avantages et inconvénients de la synchronisation et de la symétrisation des fronts de commutation des CSC 2 à 2.

Comme nous venons de le voir, la synchronisation et la symétrisation des fronts de commutations des CSC deux à deux permettrait idéalement de recycler les courants de mode commun à l'intérieur du PCA. Se faisant, l'effort de symétrisation réduit le niveau d'entrelacement d'un facteur 2. Cela se traduit par une augmentation de l'amplitude des courants de mode différentiel à l'échelle du PCA d'un facteur 4 (12dBµV).

Si la commande unipolaire présentait un réel inconvénient vis-à-vis du recyclage des perturbations de mode commun générées dans un onduleur en pont complet du fait de la désynchronisation des fronts de commutation [6], ce n'est plus le cas dans une configuration PCA. Ainsi, l'application de l'entrelacement, de la commande unipolaire et de la synchronisation deux à deux des CSC symétriques offrent le compromis le plus abouti en termes de réduction et d'optimisation des perturbations conduites de mode commun et de mode différentiel. En effet, en théorie, les perturbations de mode différentiel sont, dans ce cas, comparable à celles produites par l'entrelacement d'une MLI bipolaire sans symétrisation et coté perturbation de mode commun, le recyclage est censé être total.

Cette approche théorique trouve ces limites dans le fait que les courants de mode commun induits par chacune des commutations ne sont jamais totalement synchronisés ni totalement identiques en raison des tolérances sur les composants ou encore des légères différences dans les temps de propagations des ordres de commande. Toutefois, il a été montré à plusieurs reprises dans la littérature [7] que cet effet de recyclage était le plus souvent bénéfique. Egalement, dans le cas des structures de conversion multicellulaires, les différences entre les cellules de conversion élémentaires tendent à se réduire ce qui va dans le bon sens. Enfin, les stratégies d'opposition présentées dans cet article ne nécessitent pas des ordres de commande supplémentaires. Seul un routage adéquat est nécessaire pour assurer le fonctionnement des CSC en opposition de phase deux à deux.

3.3. Limite physique de la synchronisation

Une validation expérimentale de cette approche est nécessaire. Malheureusement, au moment de la rédaction de la version finale de l'article, nous ne sommes pas en mesure de présenter des résultats concluants, pour des raisons de délais de production du prototype permettant de mettre en œuvre la stratégie de pilotage incluant l'entrelacement et la symétrisation

des ordres de commande deux à deux. Seuls des résultats en simulation sont proposés pour compléter la démonstration avec un jeu de paramètres faisant ressortir des imperfections au niveau des symétries de synchronisations.

Ainsi la figure 7 suivante présente, pour comparaison, des spectres de mode commun dans les conditions d'une MLI unipolaire symétrisée mais en supposant que les cellules symétriques subissent un décalage temporel des ordres commandes de 1 à 5 nanosecondes.

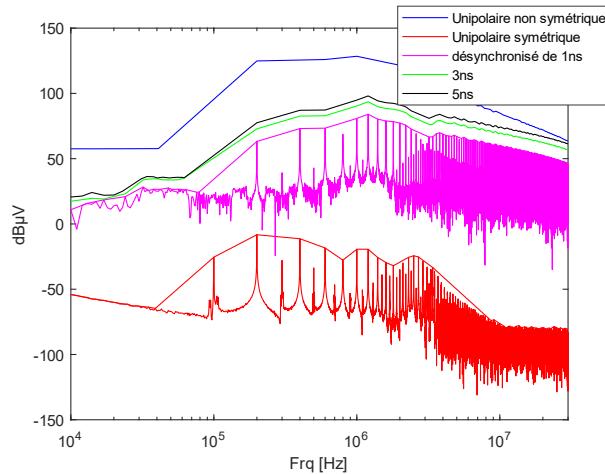


Fig. 7 : Enveloppes des spectres du courant de mode commun générés par un PCA à 4 cellules en MLI unipolaire. Comparaison de l'efficacité du recyclage en fonction du temps de désynchronisation des commutations.

4. CONCLUSION

Cet article a présenté une démarche de modélisation des perturbations conduites de mode commun d'un convertisseur PCA à base de cellules standards de conversion de type DC/AC. Il a été montré que l'entrelacement des ordres de commande, utilisé pour réduire les courants différentiels, induisait des perturbations conduites de mode commun importantes au niveau de toutes les capacités parasites du PCA. L'analyse de la structure du PCA et des opportunités offertes par la forte symétrie électrique et physique du convertisseur a permis de

mettre en évidence que la synchronisation des fronts de commutation en phase des CSC symétriques deux à deux permettait de recycler les courants de mode commun produits dans tout le PCA et à chaque commutation. L'approche a été validée par des simulations temporelles. Il a été mis en évidence qu'un compromis était possible au niveau des lois et stratégies de commande des CSC du PCA pour réduire à la fois les perturbations de mode commun et de mode différentiel. La démonstration en pratique reste à faire pour valider totalement la démarche vis-à-vis des imperfections du système de conversion. Si les bénéfices de la démarche sont confirmés, l'opportunité de mettre en œuvre des convertisseurs DC/AC raccordés sur le réseau BT sans besoin d'y adjoindre un filtre important de mode commun sera un nouvel atout de l'approche de conception modulaire type PCA en électronique de puissance.

5. REFERENCES

- [1] M. Liserre *et al.*, « Power Routing: A New Paradigm for Maintenance Scheduling », *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 14, n° 3, p. 33-45, sept. 2020, doi: 10.1109/MIE.2020.2975049.
- [2] J. W. Kolar, F. Krismer, Y. Lobsiger, J. Muhlethaler, T. Nussbaumer, et J. Minibock, « Extreme Efficiency Power Electronics ».
- [3] J. Rodriguez *et al.*, « Multilevel Converters: An Enabling Technology for High-Power Applications », *Proc. IEEE*, vol. 97, n° 11, p. 1786-1817, nov. 2009, doi: 10.1109/JPROC.2009.2030235.
- [4] J.-C. Crebier *et al.*, « DC-AC Isolated Power Converter Array. Focus on Differential Mode Conducted EMI », *Electronics*, vol. 8, n° 9, p. 999, sept. 2019, doi: 10.3390/electronics8090999.
- [5] Y. Zhang, S. Wang, et Y. Chu, « Comparison of Radiated Electromagnetic Interference (EMI) Generated by Power Converters with Silicon MOSFETs and GaN HEMTs », in *2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, mars 2019, p. 1375-1382. doi: 10.1109/APEC.2019.872225.
- [6] J. C. Crebier, L. Jourdan, R. Popescu, et J. P. Ferrieux, « Common mode disturbance reduction of PFC full bridge rectifiers », in *2000 IEEE 31st Annual Power Electronics Specialists Conference. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37018)*, juin 2000, p. 922-927 vol.2. doi: 10.1109/PESC.2000.879937.
- [7] S. Wang et F. C. Lee, « Investigation of the Transformation Between Differential-Mode and Common-Mode Noises in an EMI Filter Due to Unbalance », *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 52, n° 3, p. 578-587, août 2010, doi: 10.1109/TEMC.2009.2038899.