

Les onduleurs multiniveaux: évolution de la recherche et applications futures

Augmentation de puissance et réduction des harmoniques par des onduleurs multiniveaux

Dans le domaine des onduleurs de nouvelles topologies sont apparues au cours des dernières années. Elles comprennent principalement la technique des onduleurs NPC à potentiels distribués, la technique dite des cellules imbriquées et superposées, ainsi que la technique des convertisseurs cascades. Les travaux de recherche présentés dans cet article constituent les éléments d'une chaîne bien définie et cohérente, où les propriétés des montages et les technologies ont été successivement mises en question et améliorées. Dans le contexte global des recherches effectuées en partie avec des partenaires industriels, des applications potentielles ont fait l'objet de certaines études. Simultanément, des aspects plus formels ont été traités, aboutissant à des thèses innovantes.

En électronique de puissance moderne, la technique des onduleurs multiniveaux représente un domaine de recherche important, recherche liée également à des

Alfred Rufer

applications toujours plus performantes et plus puissantes. Si depuis plus d'une décennie les onduleurs appelés «à trois niveaux» sont devenus des produits presque classiques, d'autres topologies sont apparues au cours des dernières années, aussi bien au niveau académique qu'au niveau industriel. Ces topologies comprennent principalement la technique des onduleurs NPC à potentiels distribués, la technique dite des cellules imbriquées et superposées, ainsi que la technique des convertisseurs cascades.

Deux motivations principales sont à l'origine des onduleurs multiniveaux, à savoir d'une part l'augmentation de puissance par le biais de la génération de

tensions plus élevées, au-delà de celles compatibles avec les tensions de blocage des dispositifs à semi-conducteurs de puissance. D'autre part, on cherche à obtenir des grandeurs de sortie ayant une meilleure définition, c'est-à-dire qui présentent un contenu harmonique réduit.

Topologies et modes d'alimentation

Les topologies conventionnelles d'onduleurs multiniveaux sont représentées schématiquement à la figure 1, où l'on considère les trois topologies les plus connues.

Si le mode d'alimentation direct du côté continu des deux premières solutions apparaît comme évident et simple, la troisième solution nécessite l'utilisation de sources isolées entre elles. Dans ce sens, il est possible d'utiliser un transformateur à enroulements multiples et qui fonctionne à la fréquence industrielle [5, 6], mais on peut également alimenter les différents niveaux à partir d'un circuit continu commun à l'aide de convertisseurs DC-DC isolés qui utilisent des cir-

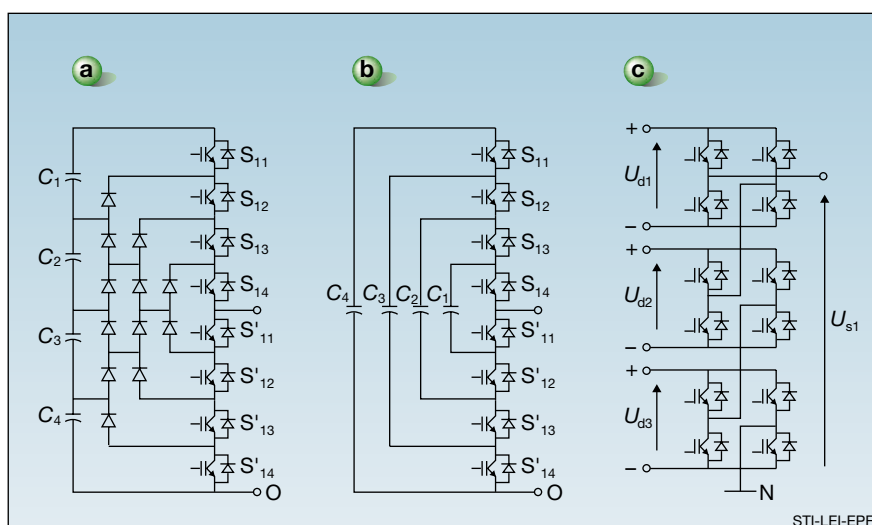


Figure 1 Topologies conventionnelles d'onduleurs multiniveaux

a: Onduleur NPC⁽¹⁾ à potentiels distribués à structure pyramidale proposée par Barbi [1] sur la base de la structure plus générique proposée par Nabae [2];
b: Onduleur multiniveaux à cellules imbriquées. On a représenté une branche d'onduleur selon la technique des cellules imbriquées proposée par Meynard et Foch [3]; c: Onduleur multiniveaux à convertisseurs cascades. Branche proposée initialement par Marchesoni [4] et Hammond [5].

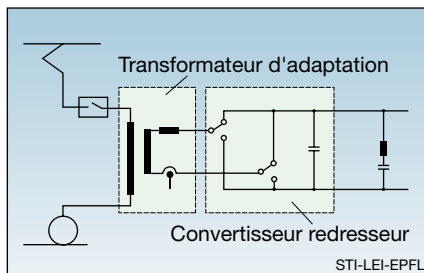


Figure 2 Adaptation de la tension de la caténaire à la tension des convertisseurs par transformateur basse fréquence

uits intermédiaires alternatifs à moyenne fréquence (MF). Dans la plupart des études conduites au Laboratoire d'électronique industrielle de l'EPFL, des solutions de ce type ont été analysées, à l'exemple d'une interface d'alimentation de traction à courant alternatif [7].

En complément des topologies et modes d'alimentation présentés dans cet article, des études ont été conduites au LEI et sont encore en cours dans lesquelles on utilise aussi des convertisseurs de tension sans alimentation propre [8].

Topologies basées sur la transformation de tension à MF

L'avantage des topologies basées sur la transformation de tension à MF réside essentiellement dans le gain de poids associé au changement de la fréquence de transformation électromagnétique, d'un domaine basse fréquence (BF) où le volume de fer des transformateurs conventionnels est fortement pénalisant (16.6 Hz), à un domaine de MF, de quelques kHz, où le volume du support magnétique nécessaire n'est plus comparable. La figure 2 représente une configuration classique du circuit d'entrée d'une locomotive, où le niveau de tension de la caténaire de 15 kV est adapté au niveau de la tension du convertisseur redresseur, c'est-à-dire de 2 à 3 kV si celui-ci utilise des dispositifs à semi-conducteurs de puissance conventionnels. Sur la fi-

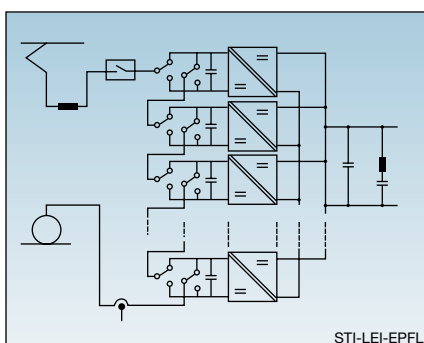


Figure 3 Interface directe d'une chaîne de convertisseurs alimentés individuellement par un étage d'isolation MF

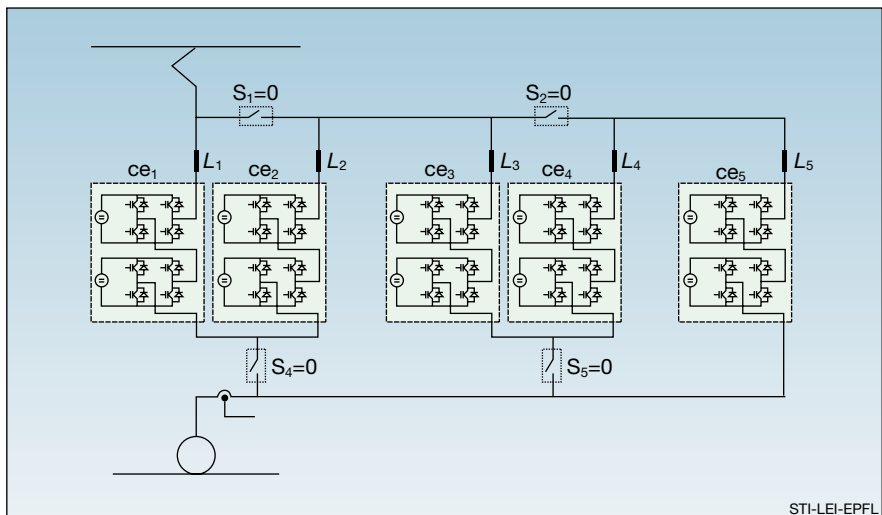


Figure 4 Convertisseur configurable pour locomotive multicourants

gure, on remarquera également la présence d'une inductance de lissage placée entre le transformateur et le redresseur, et qui représente des masse et volume non négligeables, et qui doit limiter les harmoniques de courant engendrés par la forme pulsée de la tension du redresseur. La limitation de la fréquence de pulsation et le nombre peu élevé de niveaux (2) du redresseur sont les facteurs déterminants pour le dimensionnement de cette inductance.

La figure 3 représente une configuration possible d'étage d'entrée utilisant un convertisseur à nombre de niveaux élevé,

constitué par une chaîne de convertisseurs élémentaires, tous connectés en série du côté alternatif, et alimentés chacun par un convertisseur DC-DC. La chaîne de convertisseurs permet un lien direct avec la caténaire à 15 kV si le nombre de convertisseurs permet d'atteindre une tension suffisamment élevée. Sur la figure, on a également représenté une inductance de lissage, mais cette dernière peut être de petites dimensions de par la bonne définition de la tension alternative obtenue. Dans cette configuration, les convertisseurs DC-DC alimentant chacun des niveaux doivent être dimensionnés pour

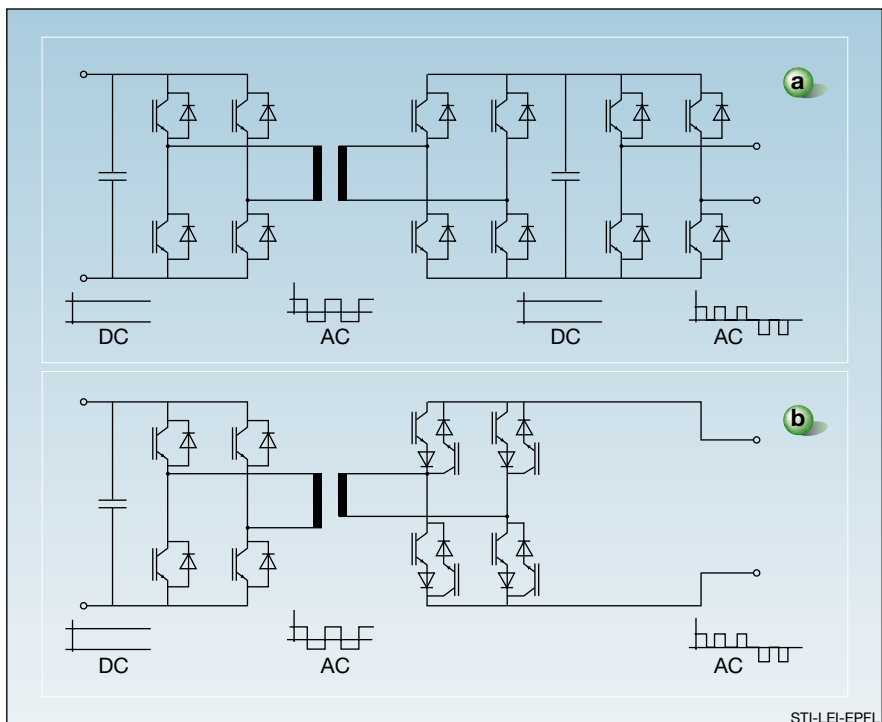


Figure 5 Montages de convertisseur élémentaire d'une chaîne multiniveaux avec circuit d'alimentation par étage à moyenne fréquence

a: Convertisseurs à commutation dure et cascade de trois étages; b: Convertisseurs à commutation douce et cascade de deux étages

une tension d'isolation suffisante, compatible avec le niveau de la tension de la caténaire. Le convertisseur multiniveaux représenté dans la figure 3 a fait l'objet de plusieurs travaux de thèse, réalisés dans le cadre d'un programme de recherche subventionné à l'échelle nationale, et impliquant les deux écoles polytechniques suisses [9, 10]. L'industrie de la traction électrique en Suisse a également été un acteur important dans ce programme de recherche subventionné par la Commission pour la Technologie et l'Innovation CTI.

Le convertisseur configurable: une application originale pour les locomotives multi-courants

Dans le cadre du projet de recherche décrit ci-dessus, une solution très originale a été étudiée [9, 11] et a fait l'objet d'un brevet. Il s'agit d'une application originale des convertisseurs multiniveaux comme convertisseur configurable. Dans cette topologie, on peut obtenir, grâce au choix de configuration, une adaptation flexible pour la tension d'entrée. Par une mise en série ou en parallèle des cellules élémentaires, il est en effet possible de faire fonctionner une locomotive sur différents systèmes d'alimentation, à savoir une tension élevée ou basse, ou alors continue ou alternative. On rencontre ce genre de situation couramment en Europe, lors du franchissement de frontières. La figure 4 montre une configuration spécifique où 10 cellules peuvent être exploitées en connexion série pour une compatibilité avec le réseau alternatif à 15 kV. La même chaîne de convertisseurs élémentaires peut être aussi exploitée en fermant les interrupteurs. Dans ce cas, une modification des fonctions de modulation des convertisseurs permet de faire fonctionner le système sur une caténaire à 3 kV continu par exemple.

Double et triple conversion, commutation dure et commutation douce

Sur la figure 3, on a représenté schématiquement le convertisseur d'entrée d'une locomotive fonctionnant sur le principe des étages à MF. Dans la configuration représentée, et en considérant un seul des niveaux élémentaires de la chaîne multiniveaux, on s'aperçoit que le flux d'énergie traverse successivement trois étages de conversion utilisant des dispositifs à semiconducteurs de puissance. En premier, on trouve le convertisseur qui contribue à la tension de la chaîne à niveaux multiples. Et comme ce dernier est interfacé par un étage d'isolation à

MF, le même flux d'énergie traverse encore deux fois un convertisseur statique, à savoir au primaire et au secondaire du transformateur de MF. La conséquence en est que le rendement énergétique est durement affecté, de par la multiplication successive par les valeurs du rendement élémentaire de chaque convertisseur. Sur la figure 5a, on a représenté à nouveau le schéma détaillé des éléments constitutifs de la conversion à trois étages successifs, où l'on a indiqué également la nature continue ou alternative des grandeurs aux niveaux considérés. On remarquera que par rapport à la figure 3, l'ordre de conversion est inversé, c'est-à-dire que l'entrée alternative se situe à droite de la figure, tandis que l'étage continu est placé à gauche.

La figure 5b représente une nouvelle topologie de convertisseur qui permet idéalement de remplir la même fonction que celle réalisée par le montage de la figure 5a. On s'aperçoit que ce montage n'utilise que deux étages de conversions successives, ce qui permet de réduire sensiblement les pertes. De plus le fonctionnement de ce montage correspond à un fonctionnement à commutations douces, ce qui limite encore les pertes par commutation de ces convertisseurs [12, 13].

Les convertisseurs multi-niveaux asymétriques, un potentiel important

Dans un contexte plus général des applications, l'intérêt de réaliser des convertisseurs à niveaux multiples réside dans leur capacité à générer des formes d'ondes de très bonne qualité, et de définition temporelle augmentée. Ces propriétés sont liées à de nombreux avantages, à commencer par la réduction des harmoniques de courant produites dans le circuit interfacé. On a ainsi utilisé pour les convertisseurs multiniveaux l'appellation de convertisseurs à haute définition.

Pour les convertisseurs décrits ci-dessus, on utilise un principe d'addition de niveaux tous égaux entre eux. On appelle aussi ces circuits «convertisseurs multi-niveaux à étages symétriques». Pour ce type de convertisseurs, il est évident que l'on ne peut que générer par somme un nombre d'états égal à un multiple de la valeur d'un niveau élémentaire, auquel s'ajoute un niveau égal à zéro. La différence entre deux niveaux quant à elle est toujours égale à zéro. En choisissant une répartition des amplitudes des cellules élémentaires de façon asymétrique, il devient possible de générer des valeurs supplémentaires, notamment en utilisant des valeurs de différences non nulles.

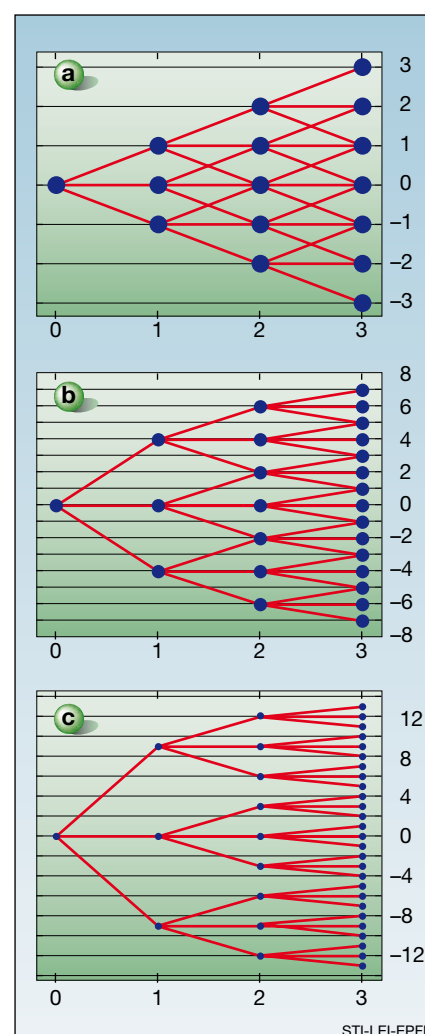
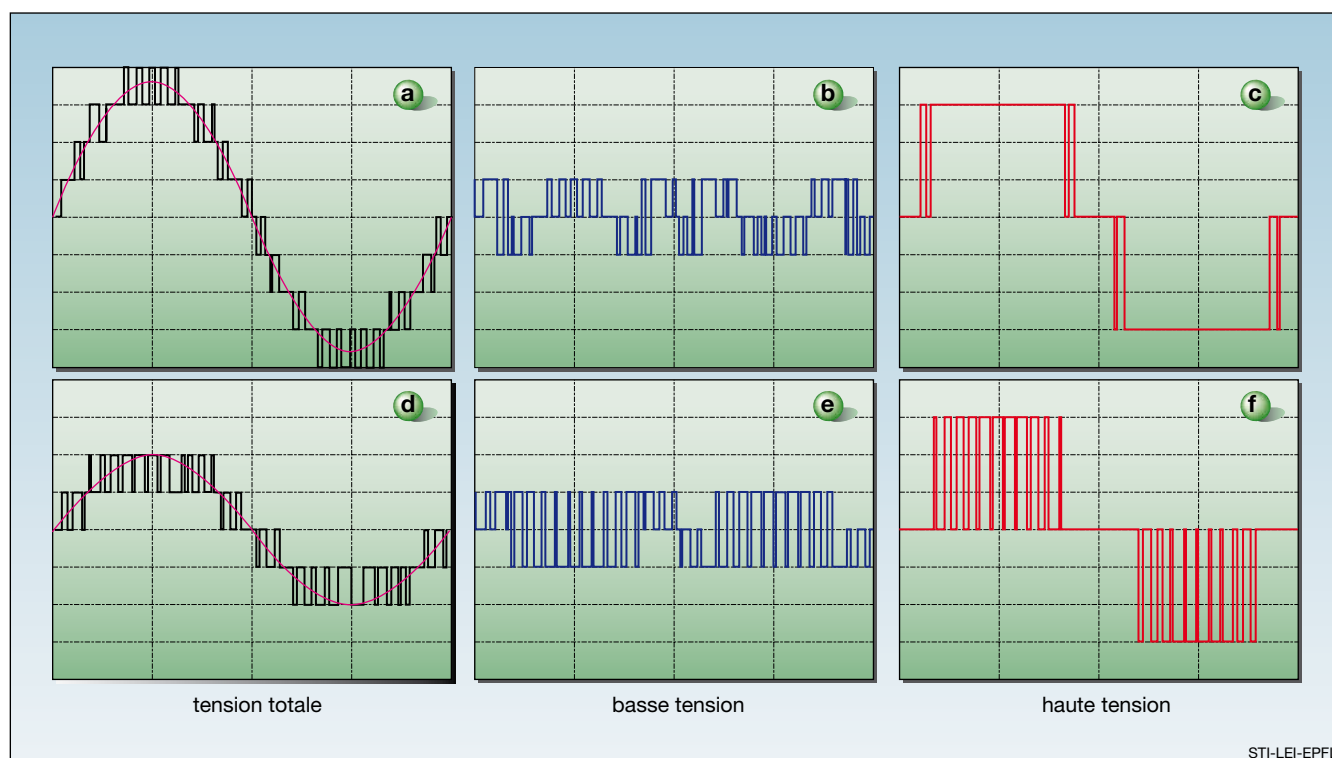


Figure 6 Nombre de niveaux atteignable

a: avec un montage de trois cellules symétriques; b: avec un montage asymétrique de trois cellules, la répartition des niveaux étant proportionnelle aux facteurs (4, 2, 1); c: avec un montage asymétrique de trois cellules, la répartition des niveaux étant proportionnelle aux facteurs (9, 3, 1).

Comme exemple pratique simple, on peut considérer une structure composée de deux cellules, l'une ayant une tension égale au double de l'autre. Pour la tension résultante, on obtient ainsi trois valeurs positives, une nulle, et trois négatives. On notera que chaque cellule doit pouvoir générer elle-même une valeur de tension positive, la valeur nulle ou une valeur négative. Cette condition correspond aux propriétés d'un montage de cellule élémentaire telles que celles constituant la chaîne représentée sur la figure 1c.

Pour illustrer l'énorme potentiel que représente le principe de l'asymétrie pour les convertisseurs montés en chaîne, on a représenté sur la figure 6 trois cas de dimensionnement pour trois cellules de ponts en «H» montés en série. Le schéma d'un tel convertisseur est représenté sur la figure 1c. La figure 6a représente le



STI-LEI-EPFL

Figure 7 Modulation des niveaux d'un convertisseur asymétrique

a, b, c: Utilisation judicieuse des propriétés de chaque technologie de semi-conducteurs; d, e, f: Modulation avec pulsations prohibitives et échanges entre cellules élémentaires.

nombre de niveaux que l'on peut générer lorsque les trois valeurs des échelons apportés par les différents convertisseurs sont égales, c'est-à-dire un dimensionnement dit symétrique. Dans ce cas, il existe 7 niveaux possibles, compris entre -3 et $+3$, la valeur unitaire étant donnée par la valeur des niveaux identiques. En abscisse, on a indiqué le nombre de cellules actives (K), à savoir un maximum de trois pour cet exemple. Le nombre de niveaux que l'on peut générer s'exprime par la relation $N = 2 \cdot K + 1$ si les niveaux sont égaux (symétriques).

Dans les figures 6a et 6b, on a représenté les combinaisons possibles pour un onduleur multiniveaux monophasé asymétrique. On voit ici que le nombre de niveaux peut augmenter fortement, même si le nombre de convertisseurs élémentaires reste égal à trois. Sur la figure 6b, la répartition des valeurs des niveaux partiels correspond à des facteurs 4, 2 et 1 par rapport à la valeur unitaire. Dans ce cas, on peut générer un nombre de niveaux différents égal à 15 pour la tension de sortie. On remarquera que dans cette configuration, il existe des niveaux ayant une redondance, c'est-à-dire qu'ils peuvent être générés par différents états d'enclenchement des cellules.

Sur la figure 6c, le nombre de niveaux que l'on peut générer à l'aide de trois

cellules est encore augmenté, grâce à un dimensionnement utilisant des facteurs 9, 3 et 1. Dans ce cas on obtient le nombre maximum de niveaux atteignable, c'est-à-dire 27. Ce nombre correspond à la valeur théorique de $N = 3^K$. On remarquera également que les états redondants ont disparu.

Techniques de modulation et dimensionnement

Un convertisseur multiniveaux, qu'il soit symétrique ou asymétrique, ne peut être modulé que par un circuit adéquat permettant de définir les états d'enclenchement des différents dispositifs à semiconducteurs de chaque cellule élémentaire. Il s'agit cependant pour les montages asymétriques de respecter les propriétés liées à chaque technologie employée pour les cellules respectives. Le dimensionnement des différentes valeurs des niveaux élémentaires devra être fait en considérant les complémentarités existant entre des technologies différentes, c'est-à-dire par exemple les tensions de blocage des dispositifs de chaque cellule. On pourra combiner dans des cellules associées l'utilisation de la technologie IGBT²⁾ et de la technologie MOSFET³⁾, la première étant mieux adaptée à la réalisation des niveaux «élevés», et la seconde à la réalisation des niveaux plus faibles.

Lors de l'utilisation de convertisseurs à trois cellules, on peut exploiter également des techniques telles que celle de l'IGCT⁴⁾, à blocage encore plus élevé, mais avec une rapidité de commutation plus faible. Pour illustrer ces propriétés, on a représenté dans les figures 7 a, b et c un cas de convertisseur où la cellule de tension la plus élevée est utilisée pour générer l'amplitude la plus grande de la tension totale (figure 7a). On s'aperçoit que la cellule de tension la plus grande a une fréquence de commutation la plus faible. Pour la cellule de tension plus basse, on a la possibilité de fonctionner à fréquence de pulsation plus élevée, et de générer ainsi une tension de meilleure définition. Par opposition à ce procédé, et sans respecter les conditions de commutation de chaque étage et technologies respectives, on peut aussi générer les ondes partielles par une modulation plus simple, mais qui pourra générer beaucoup plus de pertes de commutation. La stratégie illustrée par les courbes des figures 7d, e et f pourra causer dans une structure asymétrique des échanges non désirés de puissance entre les étages à l'intérieur du convertisseur. Il en résultera également une forte augmentation de la sollicitation des semiconducteurs et une production bien plus élevée de pertes par conduction.

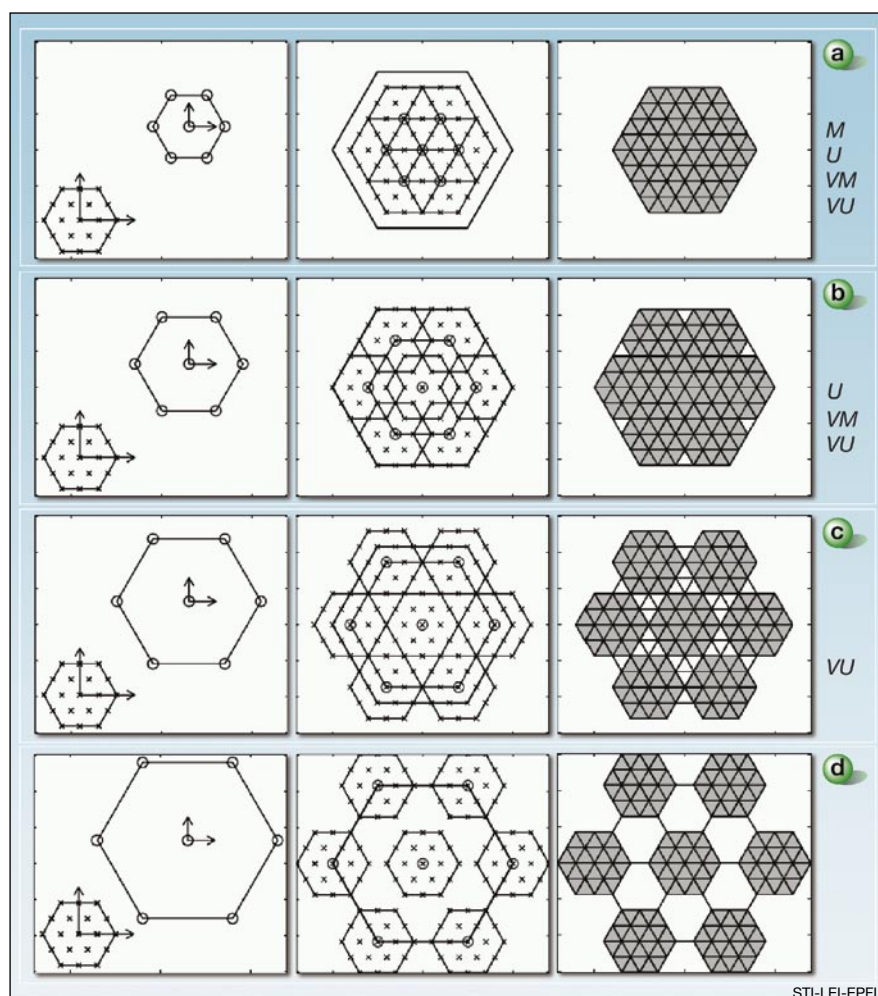


Figure 8 Combinaisons de 2 cellules triphasées

De haut en bas le pas de la cellule haute tension est augmenté: a: $\Delta U_2 = 2 \cdot \Delta U_1$; b: $\Delta U_2 = 3 \cdot \Delta U_1$; c: $\Delta U_2 = 4 \cdot \Delta U_1$; d: $\Delta U_2 = 5 \cdot \Delta U_1$.

1^{ère} colonne: ensembles des phaseurs spatiaux des cellules prises individuellement; 2^{ème} colonne: ensemble de phaseurs spatiaux obtenus par combinaison; 3^{ème} colonne: domaines d'uniformité et de modulation obtenus; à droite: propriétés de la combinaison. «M»: respecte la condition scalaire de modulation optimisée; «U»: respecte la condition d'uniformité mono-phasée; «VM»: respecte la condition vectorielle de modulation optimisée; «VU»: respecte la condition vectorielle d'uniformité.

Afin de mieux analyser et comprendre les propriétés des structures asymétriques, une étude détaillée avec définition systématique des domaines d'utilisation et description des propriétés élémentaires a été réalisée [14]. On y a défini par exemple les différents domaines de fonctionnement, en distinguant les états atteignables par la représentation des phaseurs spatiaux que peut générer un convertisseur triphasé. On a ainsi défini les domaines atteignables, domaine de variation régulière de la tension que l'on peut générer (domaine d'uniformité), et le domaine de modulation qui est le domaine dans lequel on peut atteindre sans restriction temporelle un phaseur à partir d'un état initial donné. La figure 8 représente ces différents domaines pour une structure asymétrique où les amplitudes des cellules de bas niveau et de haut niveau sont dimensionnées dans un rapport

allant de 1:2 à 1:5. Il est évident que pour le lecteur non averti une étude de [14] s'avère indispensable pour comprendre les spécificités de cette technique. Cependant, l'illustration est particulièrement parlante pour un dimensionnement dans un rapport de 1:5, où le convertisseur ne permet pas de couvrir un champ uniforme de phaseurs spatiaux. On rappellera que les phaseurs spatiaux représentés dans les colonnes du milieu et de la droite de la figure sont obtenus par sommation des phaseurs spatiaux élémentaires représentés sur la gauche de la figure, et qui sont générés par les convertisseurs élémentaires (triphasés). Les définitions telles que condition d'uniformité et condition de modulation sont définies dans [14] selon qu'il s'agisse d'un convertisseur monophasé ou un convertisseur triphasé (conditions vectorielles). Cette étude à caractère plus académique a pu être réa-

lisée grâce au soutien par le Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique.

Développements et applications futures

Les travaux de recherche de Laboratoire d'électronique industrielle (LEI) ont amené à travers plusieurs publications à une reconnaissance internationale en techniques de convertisseurs multinationaux et topologies asymétriques, pour finalement mener à une intégration de l'unité dans un programme de recherche international. Dans ce cadre nouveau, les recherches communes s'orienteront sur des applications pour la gestion flexible des flux et transferts énergétiques par des structures modulaires. Un chapitre de ces recherches sera dédié notamment à l'intégration des énergies renouvelables, et à la gestion rapide et flexible des transferts dans des réseaux complexes. Certains problèmes liés à la production décentralisée d'énergie électrique devraient également être traités dans cette étude.

Références

- [1] X. Yuan, I. Barbi: Fundamentals of a New Diode Clamping Multilevel Inverter. IEEE Transactions on Power Electronics, vol.15, N° 4, juillet 2000.
- [2] A. Nabae, I. Takahashi, H. Akagi: A New Neutral Point Clamped PWM Inverter. IEEE Ind. Applic. Soc. Conf. Proceed. pp. 761-766, 1980.
- [3] T. Meynard, H. Foch: Imbricated Cells Multilevel Voltage-Source Inverters for High-Voltage Applications. EPE Journal, vol. 3, juin 1993.
- [4] M. Marchesoni, M. Mazuchelli, S. Tenconi: A Non Conventional Power Converter for Plasma Stabilisation. PESC 88, 11-14 avril 1988, Conf. Rec. vol. 2, pp. 626-633.
- [5] P. Hammond: A New Approach to Enhance Power Quality for Medium Voltage Drives. IEEE Petroleum and Chemical Ind. Conf. Appl., pp. 231-235, septembre 1995.
- [6] J. Song-Manguelle: Convertisseurs multinationaux asymétriques alimentés par transformateurs multi-secondaires basse-fréquence: réactions au réseau d'alimentation. Thèse EPFL N° 3033, (2004), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [7] N. Schibli, A. Rufer: Single and three phased multilevel converters for traction systems 50Hz/16 2/3 Hz. Symposium EPE 97: European Conference on Power Electronics and Applications, septembre, Trondheim, Norway.
- [8] M. Veenstra: Investigation and control of a hybrid asymmetric multi-level inverter for medium-voltage applications. Thèse EPFL N° 2846, (2003), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, http://biblion.epfl.ch/EPFL/theses/2003/2846/EPFL_TH2846.pdf
- [9] N. Schibli: Symmetrical multilevel converters with two quadrant DC-DC feeding. Thèse EPFL N° 2220, (2000), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [10] M. Steiner: Seriegeschaltete Gleichspannungswischenkreisumrichter in Traktionsanwendungen am Wechselspannungsfahrdraht. Diss. ETH Nr. 13753, (2000) ETH Zürich.
- [11] A. Rufer, N. Schibli, C. Chabert, C. Zimmermann: Configurable Front-End Converters for Multicurrent Locomotives Operated on 16 2/3 Hz AC

and 3 kV DC Systems. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 18, N° 5, septembre 2003, pages: 1186–1193

- [12] C. Chabert, A. Rufer: Multilevel Converter with 2 Stage-Conversion. EPE 2001: European Conference on Power Electronics and Applications, 27–29 auguste, Graz, Austria.
- [13] C. Zimmermann, A. Rufer, C. Chabert: Non-Linear Properties and Efficiency Improvements of a Bi-Directional Isolated DC-AC Converter with Soft Commutation. IAS 05: 2005 IEEE Industry Applications Conference – 40th IAS Annual Meeting, 2–6 octobre, Hong Kong (Chine)
- [14] S. Mariethoz: Etude formelle pour la synthèse de convertisseurs multiniveaux asymétriques: topologies, modulation et commande. Thèse EPFL N° 3188, (2005) Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, http://biblion.epfl.ch/EPFL/theses/2005/3188/EPFL_TH3188.pdf

Informations sur l'auteur

Alfred Rufer est professeur et directeur du Laboratoire d'électronique industrielle de l'EPFL, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Il a obtenu son diplôme d'ingénieur de cette école en 1976, et bé-

néficie d'une expérience industrielle de 1978 à 1993. A cette date, il est nommé professeur assistant à l'EPFL, puis professeur ordinaire. En 1997, il reprend la direction du LEI au départ en retraite du professeur Hansruedi Bühler.

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Laboratoire d'électronique industrielle, STI-LEI-EPFL, CH-1015 Lausanne, alfred.rufer@epfl.ch

¹ NPC: angl. Neutral Point Clamped (clampé par le neutre)

² IGBT: Integrated Gate Bipolar Transistor

³ MOSFET: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

⁴ IGCT: Integrated Gate Controlled Thyristor

Zusammenfassung

Mehrstufige Umrichter: Forschung und künftige Anwendungen

Mehr Leistung, weniger Oberwellen dank mehrstufigen Umrichtern. Auf

dem Gebiet der Umrichtertechnik sind in den letzten Jahren neue Konzepte erschienen. Es betrifft dies in erster Linie die 3-Punkt-Wechselrichter mit Potenzialverteilung, die Technik übereinandergegriffener bzw. überlagerter Zellen sowie kaskadierter Umrichter. Die im Artikel vorgestellten Forschungsarbeiten sind Bestandteile einer klar definierten, konsequenten Reihe, wobei die Eigenschaften der eingesetzten Aufbauten und die entsprechenden Technologien nach und nach hinterfragt und verbessert wurden. Im Rahmen von mit Industriepartnern gemeinsam durchgeführten Forschungsarbeiten wurden mögliche Anwendungen untersucht. Gleichzeitig wurden auch eher formelle Aspekte behandelt, die zu innovativen Thesen führten.