



Open Archive Toulouse Archive Ouverte

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible

This is an author's version published in: <http://oatao.univ-toulouse.fr/23364>

To cite this version:

Berkoune, Karima  *Approche mathématique originale appliquée à la modélisation des stratégies de modulation des onduleurs multiniveaux*. In: Conférence des Jeunes Chercheurs en Génie Électrique JCGE2015, 10 June 2015 - 11 June 2015 (Cherbourg, France).

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: tech-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr

Approche mathématique originale appliquée à la modélisation des stratégies de modulation des onduleurs multiniveaux

Karima BERKOUNE

Laboratoire Génie de Production, INPT-ENIT, Université de Toulouse, 47 Av d'Azereix, 65000 Tarbes, France
karima.berkounne@enit.fr

RESUME – Les travaux présentés dans ce document visent à définir une nouvelle approche pour la modélisation et la génération de stratégie de modulation des convertisseurs statiques, en particulier pour les onduleurs de tension multiniveaux. De par sa généralité, elle s'applique à la Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) et propose une démarche en vue d'une extension applicable également aux modulations vectorielles. Cette approche s'appuie sur l'utilisation d'inverse généralisée qui permet de résoudre un système linéaire surdimensionné possédant une infinité de solution. Cette approche est utilisée dans notre étude sur les onduleurs multiniveaux. Un exemple d'application pour l'établissement d'un modèle d'un onduleur à capacités flottantes à trois niveaux est mis en œuvre.

ABSTRACT – The work presented in this document are intended to define a new approach to modeling and generation of static converters modulation strategy, especially for multi-level inverters. By its generic, it obviously includes Pulse Width Modulation (PWM) and proposes an approach for a generic model which will also apply to vector modulation. This approach is based on the use of mathematical tool called generalized inverse that solves an oversized linear system with an infinity of solution. This approach is used in our study of the inverters including flying capacitor 3 level inverter.

MOTS-CLES – Modélisation, Onduleurs multiniveaux, Stratégies de modulation, inverses généralisées.

1. Introduction

1.1 Contexte

Les convertisseurs statiques sont des dispositifs électriques nécessitant la conversion de l'énergie électrique d'une forme vers une autre forme. Ils sont mis en œuvre dans de nombreuses applications. Certaines applications telles que le ferroviaire, l'aéronautiques ou l'automobile, nécessitent des convertisseurs DC-AC appelés onduleurs. Suivant les architectures réalisées, ces convertisseurs permettent de raccorder des sources de tension continues à des charges ou récepteur, se comportant comme des sources de courant alternatives. Dans de nombreuses applications, ces dernières sont des machines électriques fonctionnant en moteur. Si l'application nécessite de faire varier la vitesse de rotation du moteur par la maîtrise de l'énergie transférée entre la source et le récepteur, alors on est en présence d'un variateur électronique de vitesse. Ce type de convertisseur permet de garantir par une commande adaptée, des valeurs moyennes de tension et des fréquences de signaux de sortie variables.

Tous ces domaines d'application ont engendré et suscitent encore une multitude d'études qui développent, testent et proposent différentes structures de conversion des onduleurs de tension ou différents algorithmes pour les piloter [1], [9]

1.2 Objectifs

Les travaux présentés dans ce document visent à définir une nouvelle approche pour la modélisation et la génération de stratégie de modulation des convertisseurs statiques, en particulier pour les onduleurs de tension. De par sa mise en œuvre, elle englobe évidemment la Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) et propose une démarche en vue d'un modèle générique qui s'appliquera également aux modulations vectorielles. Afin de travailler dans un cadre où les modélisations simples des convertisseurs sont valables, nous choisissons des hypothèses qui nous permettent de travailler dans une zone de linéarité du convertisseur :

- Durant la période de commutation, la variation des courants dans la charge est constante. Par conséquent on peut ne s'intéresser qu'à la valeur moyenne du signal de tension de sortie ;
- A chaque période de commutation l'interrupteur change d'état ;
- Le signal de sortie vaut 1 si la porteuse est plus grande que la modulante, sinon il vaut 0.

Il est à noter que le fonctionnement en surmodulation n'est pas adressé dans les premiers modèles établis. Implémenter une stratégie de modulation revient à combiner des références (généralement issues d'un système de régulation en boucle fermée), qui représentent un jeu de séquences d'état des interrupteurs, c'est le cas des modulations vectorielles de type Space Vector Modulation- SVM, ou de rapport cycliques pour un bras d'onduleur (ration du temps de fermeture d'un interrupteur sur la période de commutation) dans le cas des Modulations de Largeur d'Impulsions MLI.

Le modèle récepteur considéré est régi par l'équation suivante :

$$\dot{X} = AX + BU \quad (1)$$

Dans le cas d'une charge R-L équilibrée, la variation de courant I s'écrit de la manière suivante :

$$\frac{dI}{dt} = \frac{R}{L}I + \frac{1}{L}U \quad (2)$$

Avec U tension simple appliquée. Les variables I et U peuvent être triphasées et peuvent donc être des vecteurs colonnes. Et dans le cas du convertisseur, on adopte un modèle moyen et on regarde dans un premier temps la commande par MLI :

$$U = k_E M \alpha \quad (3)$$

Avec : k_E un coefficient lié à la structure du convertisseur utilisé et il est en fonction de la tension du bus-dc E , U est la tension de sortie de l'onduleur, α est le rapport cyclique et M est la matrice qui lie α et U dans le modèle l'onduleur.

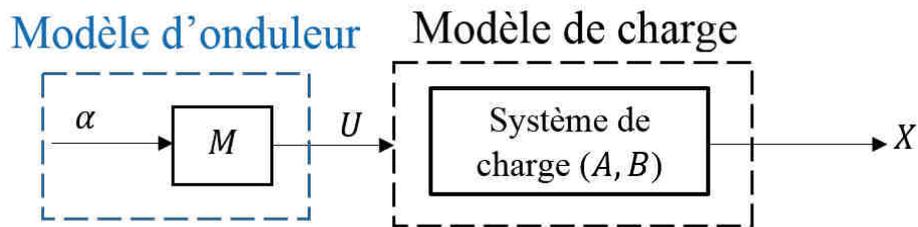


Figure 1 : Boucle d'action du modèle du convertisseur et de la charge

Cette partie du graphe (boucle d'action) représente le processus de modulation où on injecte des variables d'entrée qui sont, selon le type de stratégie de modulation utilisé, soit des rapports cycliques α_i dans le cas d'une MLI, soit des instants de commutations a_i dans le cas de la SVM avec i indice représentant le bras d'onduleur et la cellule de commutation concernée. Ces derniers sont liés aux variables de sortie U par le bloc matriciel appelé M dans le cas d'une MLI et M' dans le cas de la SVM. Par la suite, le modèle de la charge permet de reconstruire la variable asservie que nous considérerons comme mesurable, X .

Nous constatons que l'équation (3) peut se mettre sous la forme d'une équation du système linéaire compatible qui s'écrit sous la forme :

$$y = Mx \quad (4)$$

Où M est une matrice ($m \times n$), y est un vecteur m connu et x le vecteur des (n) inconnues à déterminer.

A partir du modèle de connaissance de la charge et du convertisseur, un pilotage de l'ensemble n'est possible que lors de la prise en compte de la boucle de réaction. Généralement on procède par inversion successive des blocs du modèle ou par insertion de correcteurs lors de modèles causaux.

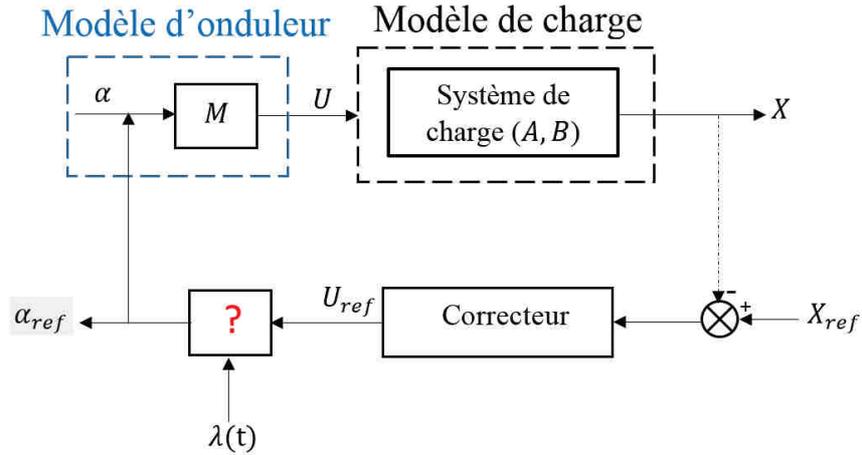


Figure 2 : Boucle d'action et de réaction du modèle du convertisseur et de la charge

Il est remarquable que la relation liant α à U est linéaire. Il serait donc normal de trouver l'inverse de M dans la boucle de réaction. Cependant, selon les architectures considérées, la matrice M n'admet pas d'inverse. C'est le cas notamment des onduleurs de tension triphasés.

Avec,

$$M = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

D'après la matrice M , nous pouvons constater que son déterminant est nul et que le rang de cette matrice elle-même est inférieur à la dimension de U , d'où la conclusion que M n'admet pas d'inverse.

Cependant ce système est déjà mis en œuvre et utilisé très largement, comme dans le cas de [2]. Dans ces solutions empiriques, les variables mesurées X sont comparées avec les variables de référence X_{ref} afin d'avoir les tensions de références U_{ref} (boucle de réaction). De nos jours, les tensions de références sont adaptées (par le biais de coefficients) et corrigées par l'addition de valeurs, notées ici λ . Ainsi, les solutions particulières sont obtenues pour les rapports cycliques de références α_{ref} [3].

Au contraire, notre démarche consiste à exprimer l'ensemble des solutions mathématiques qui permettent d'obtenir l'ensemble des solutions liant les rapports cycliques aux tensions de références.

Le travail mené aborde aussi l'expression des domaines de validité domaine pour les valeurs et ou expressions des λ . Nous avons également souhaité démontrer que toutes les stratégies de modulation dont MLI et SVM pourraient être déduites d'une même démarche de modélisation et de génération de l'ensemble de solutions.

2. Modélisation et généralisation de l'onduleur à capacités flottantes FC à N niveaux

La généralisation à N niveaux de ces modèles est nécessaire, et pour cela, nous allons faire une étude détaillée sur l'onduleur à capacités flottantes (FC) comme illustré sur la Figure 3

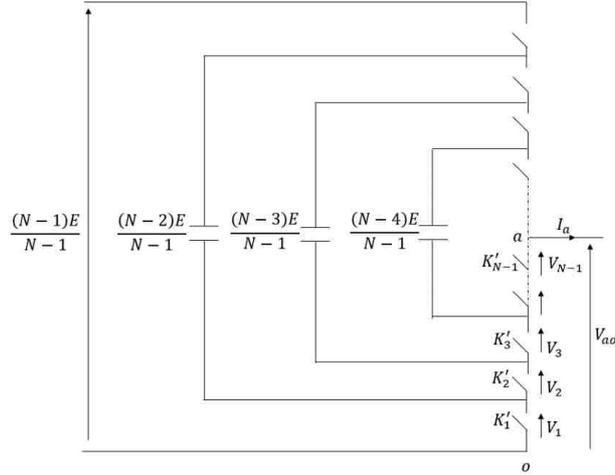


Figure 3 : Bras d'onduleur à capacités flottantes à N niveaux

A partir de la Figure 3, nous constatons que l'expression de la tension du bras de V_{ao} et l'expression de sa valeur moyenne $\langle V_{ao} \rangle$ sont est données par l'équation suivante:

$$V_{ao} = \sum_{i=1}^{N-1} V_i \Leftrightarrow \langle V_{ao} \rangle = \sum_{i=1}^{N-1} \langle V_i \rangle \quad (6)$$

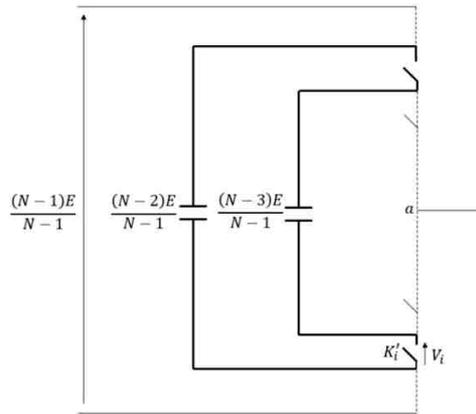


Figure 4 : Cellule de commutation d'un FC à N niveaux

Comme illustré sur la Figure 4, au sein d'une cellule de commutation quelconque, l'expression de la valeur moyenne de la tension \underline{V}_i est toujours égale à:

$$\langle \underline{V}_i \rangle = \sum_{i=1}^{N-1} \frac{E}{N-1} \alpha_i \quad (7)$$

En la combinant avec l'expression [6] on peut la mettre sous la forme

$$\langle V_{ao} \rangle = \sum_{i=1}^{N-1} \frac{E}{N-1} \alpha_i \quad (8)$$

Et peut-être écrite sous la forme:

$$\langle V_{ao} \rangle = \frac{E}{N-1} L\alpha \quad (9)$$

Avec $L = [1 \ \dots \ 1]$ un vecteur ligne de dimension $(N-1)$.

Finalement, l'expression de la tension de phase pour les trois bras de l'onduleur est donnée comme par:

$$\underline{\langle V_{lo} \rangle} = \frac{E}{N-1} I_3 \otimes L \underline{\alpha} \quad (10)$$

Avec \otimes , le produit de Kronecker, qui possède des propriétés intéressantes pour la factorisation de matrices aux expressions particulières [5].

Les trois tensions triphasées de sortie sont alors exprimées comme suit:

$$\underline{\langle V_{IN} \rangle} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \underline{V_{lo}} = \frac{1}{3} M \underline{V_{lo}} \quad (11)$$

Au final, la tension de charge devient en utilisant les propriétés du produit Kronecker [6]:

$$\underline{\langle V_{IN} \rangle} = \frac{E}{3(N-1)} (M \otimes L) \underline{\alpha} \quad (12)$$

Nous précisons que $\underline{V_{IN}}$ et $\underline{\alpha}$ sont des vecteurs colonnes de dimension $3(N-1)$.

3. Application à l'onduleur FC 3N (3 Niveaux)

Pour obtenir l'ensemble des solutions, on utilise l'outil mathématique appelé inverses généralisées qui permet de trouver des degrés de liberté [7].

L'expression de la tension de sortie est donnée par

$$\underline{\langle V_{IN} \rangle} = \frac{E}{6} \begin{bmatrix} 2 & 2 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 2 & 2 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 2 & 2 \end{bmatrix} \underline{\alpha} = \frac{E}{6} G \underline{\alpha} \quad (13)$$

En utilisant la notion d'inverse généralisée décrite dans [4], l'ensemble des solutions est donné par :

$$\underline{\alpha} = \frac{6}{E} G^+ V_{ref} + (I - G^+ G) \underline{z} \quad (14)$$

Où G^+ , est une inverse généralisée particulière au sens de Moore-Penrose.

Finalement, l'expression des rapports cycliques est donnée sous forme matricielle comme suit:

$$\underline{\alpha} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \\ -1 & -1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{refa} \\ V_{refb} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Comme nous le remarquons, nous avons quatre degrés de liberté à définir. Un DDL propre pour chaque bras et un autre en commun. L'idée c'est de pouvoir jouer sur ces DDL pour voir leurs influences sur l'onduleur FC.

4. Résultats de simulation

Les simulations sont faites avec les paramètres suivants: $R = 15\Omega$, $L = 1mH$, $V_{max} = \frac{E}{4}$ et $w = 315$.

La modulation MLI est faite en deux parties Figure 5. Une partie où on prend $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 0$, et $\lambda_4 = \frac{3}{2} + \frac{3V_{No}}{E}$.

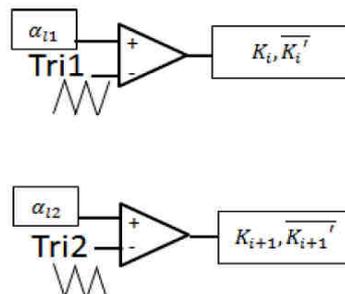


Figure 5 : Schéma d'une MLI pour un seul bras d'onduleur

Et une partie où les DDL λ_1, λ_2 et λ_3 sont des formes sinusoïdales déphasées de $\frac{2\pi}{3}$ et $\lambda_4 = \frac{3}{2} + \frac{3V_{No}}{E}$.

Il est remarquable que cette solution garanti la zone de linéarité maximale. Les limites indiquées sont similaires à celles présentées dans un onduleur triphasé classique [8].

Les résultats de simulation sont basés sur l'analyse de FFT de la tension aux bornes de la capacité du bus continu comme illustré sur les figures suivantes :

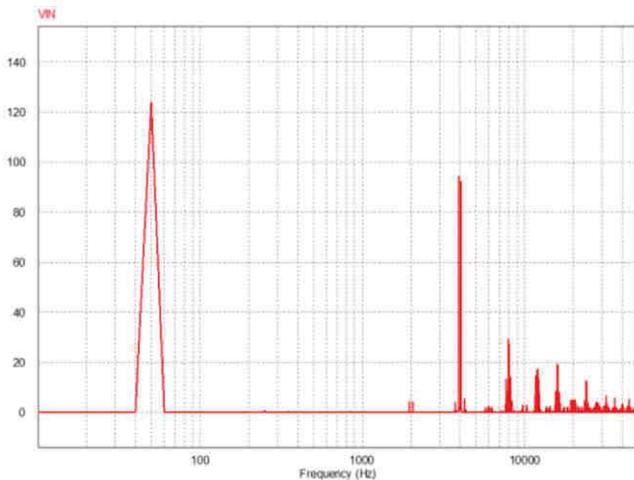


Figure 6 : FFT de tension pour $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 0$

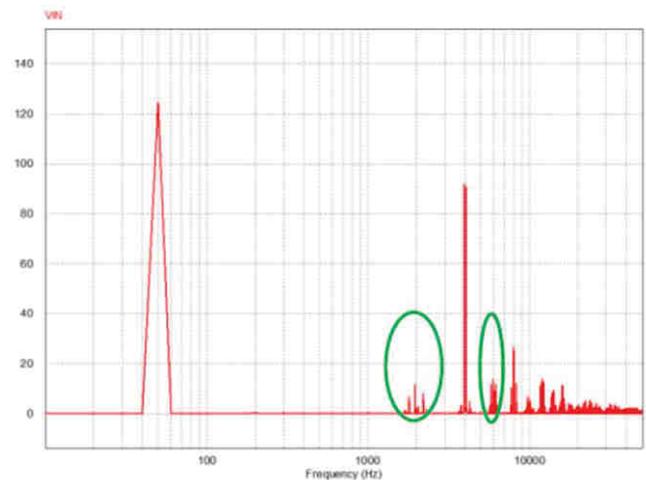


Figure 7: FFT de tension pour des DDL sous forme de sinus

Il semble bien d'après les résultats de simulation que l'utilisation des degrés de liberté (DDL) sous forme de sinus a bien une influence sur la tension de capacité (cercle vert). Nous remarquons bien que la FFT de la tension de la figure 7 est plus importante par rapport à la figure 6. Ce qui s'explique par l'influence du DDL choisi sur la tension de capacité.

5. Conclusion

Notre travail traite une nouvelle approche mathématique pour la MLI, appliquée à la modélisation de l'onduleur multi-niveaux. Un mode moyen est utilisé combiné avec la théorie inverse généralisée afin de révéler les degrés de liberté autorisés dans une telle structure. Il est également démontré qu'il existe des DDL qui peuvent être fixés afin d'améliorer certains critères qui doivent être définis.

Références

- [1] A. Leredde "Etude, commande et mise en oeuvre de nouvelles structure multiniveaux. PhD thesis, INPT (2011).
- [2] S. L. Capitaneanu, "Optimisation de la fonction MLI d'un onduleur de tension deux-niveaux}". PhD thesis. INPT (2002).
- [3] X. Lu, B. Ge et F. Z. Peng "Minimizing dc capacitance requirement of cascaded h₂ bridge multilevel inverters for photovoltaic systems by 3rd harmonic injection". In Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), IEEE, pp 240-245, 2012.
- [4] K. Berkoune, P. E. Vidal et F. Rotella "New pulse width modulation approach and model applied to multilevel inverters" ELECTRIMACX, 2014.
- [5] F. Charles et L. Van "The ubiquitous kronecker product" Journal of Computational and Applied Mathematic, 2000.
- [6] J. Brewer "Kronecker products and matrix calculus in system theory". Circuits and Systems, IEEE Transaction on, 25(9): 772-781, 1978.
- [7] F. Rotella et P. Borne "Théorie et pratique du calcul matriciel", 1995.
- [8] P. E. Vidal, et all "Generalized inverse applied to Pulse Width Modulation for static conversion". Power Electronic and application EPE, European conference on, 2013.