Caractérisation vectorielle de convertisseurs statiques matriciels

Détermination des degrés de liberté d'une commande

Éric Semail[1] — Christian Rombaut[2]

L2EP, Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique de Puissance de Lille
http://www.univ-lille1.fr/l2ep/ — Eric.Semail@univ-lille1.fr

[1]L2EP, Université de Lille 1, Bât. P2, F-59655 Villeneuve d'Ascq Cedex

[2]L2EP, ENSAM Centre de Lille, 8 Bd Louis XIV, F-59046 Lille Cedex

RÉSUMÉ. *Une caractérisation vectorielle de convertisseurs statiques matriciels est proposée. Elle généralise le formalisme des phaseurs complexes et permet de dégager certaines propriétés intrinsèques du convertisseur. Cette caractérisation est mise à profit pour déterminer le nombre de degrés de liberté pour le contrôle d'une charge polyphasée. Une représentation graphique dans le cas de l'onduleur de tension triphasé deux niveaux est présentée.*

ABSTRACT. *A vectorial characterization of static converters is proposed. It generalizes the complex phasor formalism and allows to highlight intrinsic properties of converter. These characterization is used to determine the number of freedom's degrees for the control of a polyphase load. A graphic representation in the case of the two levels voltage inverter is expounded.*

MOTS-CLÉS : *formalisme, phaseur complexe, vecteur d'espace, onduleurs, polyphasé.*

KEY WORDS: *formalism, complex phasor, space vector, inverters, polyphase.*

1. Introduction

Pour la commande des convertisseurs on dispose essentiellement du formalisme matriciel [HAU 99] et de celui des phaseurs complexes [VAS 88]. Ce dernier, dont le caractère graphique permet d'utiliser des connaissances élémentaires de géométrie, est bien adapté aux systèmes triphasés usuels. Notre démarche [SEM 00] consiste à élaborer, pour l'étude des systèmes polyphasés, un formalisme qui généralise la notion de phaseur complexe en bénéficiant des outils de la géométrie vectorielle.

2. Caractérisation vectorielle du convertisseur statique matriciel

Le convertisseur que nous considérons connecte k sources de tensions à p sources de courants à l'aide d'interrupteurs supposés idéaux (voir Figure 1). On utilise pour caractériser l'état du convertisseur les fonctions de connexion f_{rs}[1]. Pour l'onduleur de tension triphasé deux niveaux qui sert de support pour les représentations graphiques, p = 3, k = 2, v_{t1} = E et v_{t2} = - E.

Afin de mettre en exergue la méthode d'étude proposée nous nous intéressons seulement à l'interaction entre le convertisseur et la source de courant, composée de p bobines couplées en anneau.

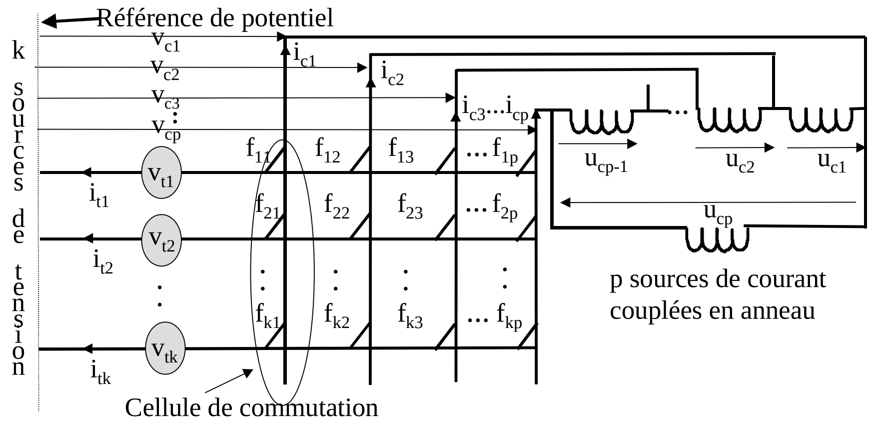

Figure 1. *Représentation du convertisseur matriciel*

[1] f_{rs} = 1 si l'interrupteur qui lie la r^ième source de tension à la s^ième source de courant est fermé, 0 s'il est ouvert.

2.1. ***Espace vectoriel et famille associés à la source de courant***

Le convertisseur impose **p** tensions à la source de courant. Vu de cette dernière, nous associons donc au convertisseur un espace de dimension **p**, noté E_{cp}, espace muni d'une base orthonormée directe B_c. Définissons alors le vecteur tension :

$$\overrightarrow{v_c} = v_{c1}\,\overrightarrow{x_{c1}} + v_{c2}\,\overrightarrow{x_{c2}} + \ldots + v_{cp}\,\overrightarrow{x_{cp}} \quad \text{avec } B_c = \left\{\overrightarrow{x_{c1}},\ \overrightarrow{x_{c2}},\ldots,\ \overrightarrow{x_{cp}}\right\}.$$

Les règles de compatibilité des sources impliquent par ailleurs une contrainte pour chaque cellule de commutation à savoir :

$$\forall s \in \{1,\ldots,p\},\ \sum_{r=1}^{r=k} f_{rs} = 1\,.$$

Il vient qu'il y a k combinaisons possibles pour chaque cellule. On en déduit, pour le modulateur qui comporte p cellules, le nombre possible de combinaisons et donc de vecteurs : $H = k^p$. ($2^3 = 8$ pour onduleur de tension triphasé « classique » à 3 cellules de commutation de 2 interrupteurs). On crée ainsi une famille de H vecteurs $\overrightarrow{v_{cr}}$ ($0 \le r \le (H-1)$), **caractéristique du convertisseur**.

Posons $\overrightarrow{OM_r} = \overrightarrow{v_{cr}}$. Les points M_r définissent alors les sommets d'un polyèdre. Dans notre exemple, ce sont les 8 sommets d'un cube (voir Figure 2).

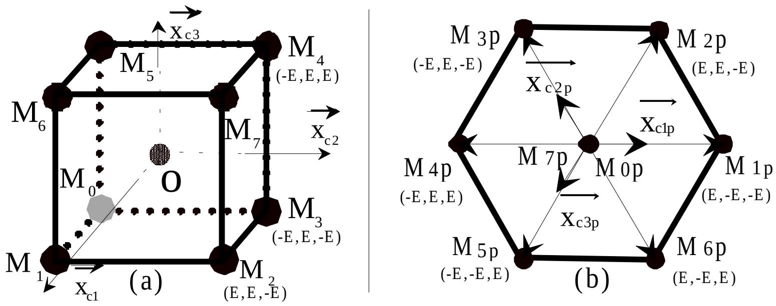

Figure 2. *Caractérisation de l'onduleur de tension triphasé deux niveaux*
(a) Par l'approche proposée *(b) Par les phaseurs complexes*

2.2. ***Cas d'un convertisseur piloté aux valeurs moyennes***

Rappelons qu'aux instants kT d'échantillonnage la valeur moyenne glissante du vecteur tension imposé à la source de courant par le convertisseur s'exprime :

$$\left\langle \overrightarrow{v_c} \right\rangle (kT) = \frac{1}{T}\int_{(k-1)T}^{kT} \overrightarrow{v_c}(t)\,dt = \sum_{r=1}^{r=N} \frac{t_r}{T}\,\overrightarrow{v_{cr}} \quad \text{avec } T = \sum_{r=1}^{r=N} t_r \quad \text{et}$$

t_r durée est la durée pendant laquelle est activé le vecteur $\overrightarrow{v_{cr}}$.

En posant $\overrightarrow{OM} = \left\langle \overrightarrow{v_c} \right\rangle (kT)$, il vient : $\overrightarrow{OM} = \sum_{r=1}^{r=N} \frac{t_r}{T}\,\overrightarrow{OM_r}$.

M est donc le barycentre des N points M_r avec les coordonnées barycentriques positives t_r/T. Par conséquent, M appartient au polyèdre défini par l'ensemble des points M_r. Ce ne sont plus uniquement les sommets de ce polyèdre qui caractérisent le convertisseur mais son **volume**. Dans l'exemple traité c'est donc le cube.

3. Détermination des degrés de liberté d'une commande

Les relations[2] qui existent entre les tensions u_{ck} aux bornes de la charge et celles v_{ck} imposées par le convertisseur définissent une application linéaire A_c. Notons $KerA_c$ son noyau et OrKe, un espace orthogonal à $KerA_c$ tel que E_c est somme de ces deux sous espaces. Tout vecteur $\overrightarrow{v_c}$ se décompose alors de façon unique en un vecteur de $KerA_c$ et un autre $\overrightarrow{v_{cp}}$ de OrKe. Pour obtenir $\overrightarrow{v_{cp}}$, il suffit de projeter $\overrightarrow{v_c}$ sur OrKe parallèlement à $KerA_c$.

Puisque tout vecteur appartenant au noyau a une image nulle par A_c, seule l'image de $\overrightarrow{v_{cp}}$ a un effet pour la source. Pour caractériser le convertisseur du point de vue de la source, il suffit de ne considérer que la projection de tout vecteur de E_c sur OrKe. Nous en déduisons que la dimension du noyau $KerA_c$ fournit le nombre de degrés de liberté pour la commande du convertisseur. Dans le cas triphasé, OrKe est un plan et la projection du cube est l'hexagone classiquement considéré par la théorie des phaseurs complexes (voir Figure 2). Le noyau est une droite de vecteur directeur $\overrightarrow{x_{c1}}+\overrightarrow{x_{c2}}+\overrightarrow{x_{c3}}$, on dispose donc d'un degré de liberté dont l'exploitation mène aux commandes avec injection d'harmonique trois.

4. Conclusion

Nous avons présenté une caractérisation vectorielle de convertisseur qui généralise, pour l'étude des systèmes polyphasés, la méthode des vecteurs d'espace. La notion d'application linéaire qui nous a permis de définir le nombre de degrés de liberté conduit plus généralement à une méthode de synthèse de commande.

5. Bibliographie

[HAU 99] HAUTIER J.P., CARON J. P., *Convertisseurs statiques : méthodologie causale de modélisation et de commande*, Édition Technip, Paris, 1999.

[SEM 00] SEMAIL E., Outils et méthodologie d'étude des systèmes électriques polyphasés. Généralisation de la méthode des vecteurs d'espace, Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2000

[2] $u_{c1} = v_{c1}-v_{c2}$; $u_{c2} = v_{c2}-v_{c3}$;… ; $u_{ck} = v_{ck}-v_{ck+1}$;… ; $u_{cp-1} = v_{cp-1}-v_{cp}$; $u_{cp} = v_{cp}-v_{c1}$.

[VAS 88] VAS P., *Vector control of AC machines*, Clarendon Press, Oxford, 1988.