

Modélisation, simulation et commande des systèmes VSC-HVDC multi-terminaux

Samy AKKARI
Supélec
samy.akkari@supelec.fr

Jing DAI
Supélec
jing.dai@supelec.fr

Marc PETIT
Supélec
marc.petit@supelec.fr

Xavier GUILLAUD
L2EP, Université Lille
xavier.guillaud@ec-lille.fr

RESUME – Le développement des énergies renouvelables et en particulier de l'énergie éolienne offshore, ainsi que la multiplication des liaisons HVDC entre les différents pays de l'Union Européenne, conduit à considérer la création d'un réseau maillé HVDC en complément du réseau maillé HVAC actuel. Cet article propose dans un premier temps une méthode permettant de modéliser, sous le logiciel de simulation MATLAB-Simulink, tout système VSC-HVDC multi-terminaux indépendamment de sa topologie et de ses caractéristiques. Dans un deuxième temps, le principe de la commande d'une liaison HVDC (liaison bi-terminaux) est décrit dans son cas de fonctionnement normal, puis généralisé à un réseau multi-terminaux afin d'en expliciter les limites. Enfin, une proposition de « droop mode » est étudiée afin d'améliorer la commande du système VSC-HVDC considéré en assouplissant les contraintes de tension sous-jacentes à la commande précédente.

MOTS-CLES – Multi-terminal HVDC (MTDC), modèle idéal, commande maître-esclave, slack-bus, droop mode

1. Introduction

L'Union européenne s'est engagée à réduire ses émissions de CO₂ de 20% et à atteindre une part d'énergie renouvelable de 20% dans sa consommation énergétique d'ici 2020 [1]. L'EWEA (European Wind Energy Association) estime qu'il est nécessaire d'installer une puissance éolienne offshore de 15 à 35 GW d'ici 2020 afin de respecter cet engagement [2]. L'énergie ainsi produite devra être acheminée vers les réseaux terrestres. Le potentiel existant dans la zone Manche et Mer du Nord soulève la question de la construction d'un véritable réseau électrique et non de simples liaisons point à point entre chaque champ d'éoliennes et la côte. Ce réseau permettra de sécuriser l'acheminement de l'énergie tout en renforçant les interconnexions entre les trois zones UK, Europe continentale et pays nordiques. Compte-tenu de la nécessité de poser du câble sous-marin, la technologie HVDC est la solution la plus intéressante, d'un point de vue économique et technologique, afin d'acheminer cette énergie éolienne offshore vers le continent.

Cet article propose tout d'abord une approche originale permettant de modéliser, sous le logiciel de simulation MATLAB-Simulink, tout système MTDC indépendamment de sa topologie et de ses caractéristiques. Le modèle proposé utilise un modèle de convertisseurs idéaux et un modèle de lignes en PI. Dans un deuxième temps, une étude d'une liaison HVDC bi-terminaux standard est réalisée. La stratégie de commande maître-esclave de cette liaison HVDC est ensuite réutilisée dans le cas d'un système HVDC multi-terminaux afin d'en expliciter les limites et les contraintes, et plus particulièrement pour le réglage de la tension sur le réseau HVDC. Enfin, une proposition de stratégie de commande « droop mode » est implémentée pour compléter la stratégie de commande maître-esclave et assouplir ses contraintes de tension sur le système MTDC.

2. Modélisation et simulation d'un système MTDC

Dans cette partie sont décrits les différents éléments élémentaires qui constituent un réseau maillé HVDC ainsi que leur modélisation. L'originalité de cette modélisation repose sur le fait que les éléments sont modélisés

indépendamment les uns des autres et peuvent ensuite être assemblés sous MATLAB-Simulink pour générer la topologie du réseau HVDC désiré.

2.1 Modélisation des différents éléments constituant un réseau maillé HVDC

Dans cette étude nous ne nous intéressons pas à l'influence du réseau HVDC sur les différents réseaux AC. Aussi dans un souci de simplification nous considérons les sources de puissance AC comme des bus infinis reliés chacun à un convertisseur AC/DC (cf. Figure 1). Nous travaillons dans le plan tournant dq0 et les convertisseurs de tensions sont supposés idéaux.

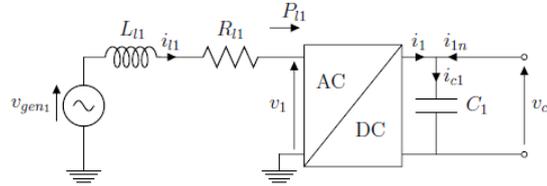


Figure 1 : Modèle de la source de puissance et du convertisseur [4]

En utilisant la loi de Kirchoff dans le plan dq0 on obtient l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} v_{gen1d} \\ v_{gen1q} \end{bmatrix} = L_{l1} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{l1d} \\ i_{l1q} \end{bmatrix} + R_{l1} \cdot \begin{bmatrix} i_{l1d} \\ i_{l1q} \end{bmatrix} + L_{l1} \cdot \omega \begin{bmatrix} -i_{l1q} \\ i_{l1d} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{1d} \\ v_{1q} \end{bmatrix}$$

Puisque les convertisseurs sont supposés idéaux, on a conservation de la puissance de chaque côté du convertisseur :

$$v_{c1} \cdot i_1 = \frac{3}{2} (v_{1d} \cdot i_{1d} + v_{1q} \cdot i_{1q})$$

Ce qui nous permet d'obtenir v_{c1} et donc de modéliser notre convertisseur :

$$v_{c1} = \frac{1}{C_1} \int (i_1 + i_{1n}) dt$$

2.2 Mise en place de la commande des convertisseurs

En alignant l'axe d du plan dq0 avec l'axe a du plan (abc) à l'aide d'une PLL, nous sommes en mesure de contrôler indépendamment la puissance active (ou la tension DC) de la puissance réactive (ou la tension AC).

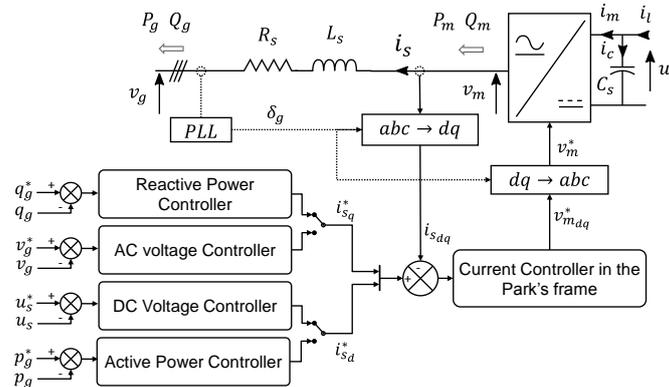


Figure 2 : Diagramme de la commande des convertisseurs [5]

La boucle interne de courant sera détaillée dans l'article complet.

3. Stratégie de commande des systèmes MTDC

3.1 Les limites de la commande « maître – esclave »

Une liaison HVDC bi-terminaux suit généralement la stratégie de commande dite « maître-esclave ». C'est la stratégie de commande la plus simple : un convertisseur, appelé « maître », régule la tension DC de la liaison, pendant que le deuxième convertisseur, appelé « esclave » régule la puissance injectée ou soutirée de la liaison HVDC [6].

En régulant la tension, le convertisseur « maître » joue le rôle de nœud bilan (ce convertisseur est aussi appelé « slack-bus ») : il assure l'équilibre de puissance dans la liaison HVDC. Ainsi si la puissance injectée par le convertisseur esclave fluctue, le convertisseur maître doit fournir ou soutirer de la puissance afin de maintenir la tension DC à sa valeur nominale.

L'équation (1) montre que la capacité entre les deux convertisseurs joue le rôle d'inertie. Il y a une parfaite analogie avec les réseaux AC pour lesquels la fréquence (donc la vitesse électrique des groupes) est l'image de l'équilibre entre l'offre ($P_{injectée}$) et la demande ($P_{soutirée}$), et les masses tournantes des alternateurs assurent l'inertie (2).

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = V_{dc}(I_1 + I_2) = P_1 - P_2 \quad (1)$$

$$J \frac{d\Omega}{dt} = P_{injectée} - P_{soutirée} \quad (2)$$

Les convertisseurs VSC peuvent contrôler indépendamment les échanges de puissance réactive avec leurs réseaux AC.

Pour des réseaux multi-terminaux (N convertisseurs), la stratégie précédente pourrait être mise en œuvre sous la forme de N-1 convertisseurs (« esclaves ») pilotés en puissance et un pilotant la tension DC. Le principal inconvénient de cette stratégie est qu'en cas de variation de la puissance sur un convertisseur (défaillance ou variabilité de la source connectée à ce convertisseur), celui qui pilote la tension DC est seul pour ré-équilibrer le bilan de puissance. Ainsi tout l'écart de puissance est transmis à la zone AC reliée au convertisseur piloté en tension, et ce convertisseur doit être suffisamment dimensionné pour jouer un tel rôle. Il n'y a pas de mutualisation des efforts pour corriger une défaillance, contrairement à ce qui se fait dans les réseaux AC interconnectés.

3.2 Mise en place d'un « droop mode »

Dans cette section, le système MTDC de la Figure 3 est considéré.

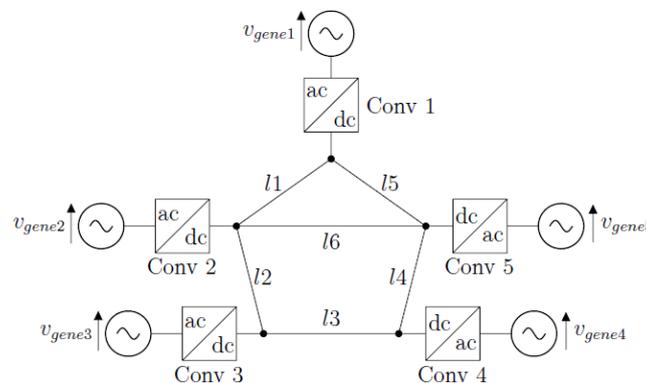


Figure 3 : Système MTDC à 5 nœuds et 6 lignes

Certains convertisseurs commandés en tensions sont par ailleurs dotés d'une commande « droop voltage control » comme proposée à la Figure 4.

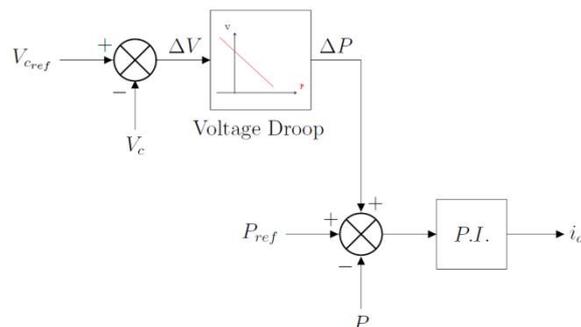


Figure 4 : Boucle de régulation avec "voltage droop control"

Dans cette étude de cas, le réseau AC n°1 représente une ferme éolienne offshore, et les autres réseaux AC représentent différents pays limitrophes.

La stratégie de contrôle est la suivante : Le convertisseur n°1 injecte la puissance générée par la ferme éolienne, le convertisseur n°2 se comporte comme le nœud bilan du réseau DC, c'est-à-dire qu'il régule la tension DC à une consigne de référence. Les convertisseurs n° 3, 4 et 5 injectent ou soutirent des puissances selon les consignes imposées. Ces trois derniers convertisseurs répondent cependant à des commandes « voltage droop control » afin de participer à l'effort fourni par le convertisseur n°2 en cas de besoin.

Dans le cadre de cette étude de cas, les trois commandes « voltage droop control » se basent sur une pente de la droite $V=f(P)$ de coefficient $K = -10\text{MW/kV}$. Ainsi pour une chute de tension de 1kV, le convertisseur va injecter 10MW en plus dans le réseau DC. Il est à noter que la participation de chaque convertisseur à l'effort général peut être ajustée en entrant des coefficients K différents pour chaque convertisseur.

A $t_0=15\text{s}$, la puissance injectée par la ferme éolienne chute brusquement de 60MW en 2 secondes (chute de la puissance du vent, ou déconnexion d'une batterie d'éolienne pour maintenance, etc...). La Figure 5 montre que le slack-bus n'est pas le seul à compenser la différence de puissance : les convertisseurs esclaves dotés d'une commande de voltage droop control participent également, permettant de soulager partiellement le convertisseur maître.

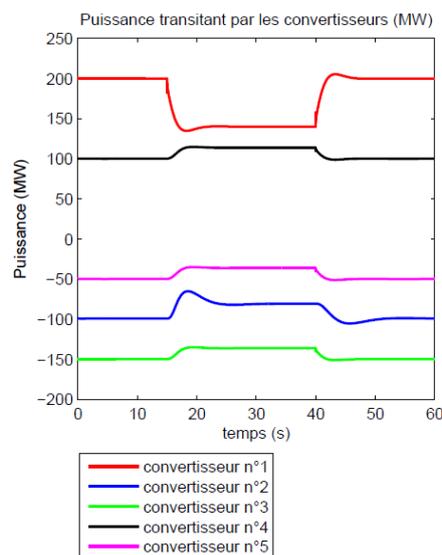


Figure 5 : Puissances traversant les convertisseurs du réseau HVDC

4. Conclusion

Cet article propose une nouvelle approche pour simuler rapidement et efficacement tout système MTDC sous MATLAB-Simulink. L'utilisation de ce modèle démontre l'inadéquation de la stratégie de commande « maître – esclave » dans le cas des réseaux HVDC multi-terminaux. Cependant l'ajout d'une commande « voltage droop control » en complément de la commande « maître – esclave » permet de s'affranchir des limitations et contraintes de cette dernière.

Références

- [1] The European Commission. « Renewable energy: Processing towards the 2020 target », Communication from the Commission to the European Parliament and the Council.
- [2] The European Wind Energy Association. « Delivering offshore wind power in Europe ».
- [3] M. Petit. « Les réseaux HVDC: une solution parfois nécessaire pour renforcer les systèmes électriques ».
- [4] S. Akkari. « Modeling of Multiterminal VSC-HVDC Systems », Master Thesis.
- [5] J. Descloux, P. Rault, S. Nguefeu, J-B Curis, X. Guillaud, F. Colas and B. Raison. « HVDC meshed grid : Control and protection of a multi-terminal HVDC system », cigré 2012.
- [6] J. Dai, S. Akkari and M. Petit. « Commande en tension dans un réseau HVDC », revue 3EI n°73, Juillet 2013