HAL open science

Commande Des Liaisons HVDC Dans Un Contexte Réseau

Leyla Arioua, Bogdan Marinescu, Eric Monmasson

To cite this version:

Leyla Arioua, Bogdan Marinescu, Eric Monmasson. Commande Des Liaisons HVDC Dans Un Contexte Réseau. 2012 Conférence Internationale Francophone d'Automatique, Jul 2012, Grenoble, France. hal-00955632

HAL Id: hal-00955632

https://hal.science/hal-00955632v1

Submitted on 6 Mar 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Conférence Internationale Francophone d'Automatique (CIFA2012)
Grenoble, France. 4-6 Juillet 2012

Commande des liaisons HVDC dans un contexte réseau

Leyla Arioua [*,**] **Bogdan Marinescu** [*,**] **Eric Monmasson** [***]

[*] *RTE R&D Département Expertise Système,*
Immemuble le Colbert
9, Rue de la porte de Buc. 78005 Versailles Cedex, France.
leyla.arioua@rte-france.com, bogdan.marinescu@rte-france.com
[**] *Laboratoire Systèmes et applications des technologies de l'information et de l'énergie (SATIE)*
UMR 8146 CNRS
ENS Cachan, avenue du Président Wilson 94235 Cachan, France.
leyla.arioua@ens-cachan.fr, bogdan.marinescu@satie.ens-cachan.fr
[***] *Laboratoire Systèmes et applications des technologies de l'information et de l'énergie (SATIE)*
Université de Cergy-Pontoise, site de Neuville 95031 Cergy-Pontoise cedex, France.
eric.monmasson@u-cergy.fr

Résumé : Maintes solutions ont été proposées afin de contrôler les liaisons à courant continu (HVDC-High Voltage Direct Current). Cependant la plupart d'entre elles ne prennent pas en considération le système électrique (réseau et machines) sur lequel la liaison est implantée et avec lequel elle interagit. Cet article montre comment les régulateurs de ses convertisseurs peuvent être synthétisés de façon à ce que les performances dynamiques (par exemple la stabilité transitoire) du système électrique soient assurées, en plus des exigences locales liées à la liaison continue (i.e., contrôle du transit de puissance active et de la tension). Afin d'y parvenir, un nouveau modèle de commande est développé. Ce dernier est ensuite utilisé afin de synthétiser une loi de commande par retour de sortie, qui permet un placement de pôles robuste, et n'utilisant que les mesures disponibles localement (i.e., au niveau des stations de conversion). Ce nouveau cadre de commande est une alternative à la commande vectorielle classique. Des simulations sont présentées afin de valider cette approche utilisant la SimPower Toolbox de Matlab ainsi qu'Eurostag pour des systèmes de grande dimension.

Mots-clés: HVDC, stabilité transitoire, retour de sortie, placement de pôles.

1. INTRODUCTION

La liaison en courant continu, est un moyen de transport de l'électricité longtemps utilisé pour assurer un échange énergétique entre deux réseaux tout en respectant la séparation électrique des deux systèmes (voir, par exemple, Goodrich et Andersen (1987)). Plus précisément, le transport étant effectué en courant continu, les deux réseaux qui échangent l'énergie restent des plaques en courant alternatif bien séparées. La gestion des deux systèmes électriques reste donc indépendante l'une de l'autre et les perturbations habituelles de l'un des systèmes (courts-circuits, défaillances des ouvrages - groupes de production et/ou éléments du système de transmission, etc.) ne se propagent pas à l'autre système. C'est le cas, par exemple, de la liaison à courant continu existant entre la France et l'Angleterre. Cette séparation entre les deux systèmes facilite la conception des lois de commande de l'électronique de puissance des convertisseurs de la liaison qui sont conçus en faisant abstraction des dynamiques des deux systèmes que la ligne interconnecte.
Toutefois, ces dernières années, les liaisons à courant continu sont de plus en plus installées non pour connecter deux réseaux synchrones différents, mais à l'intérieur d'une même plaque synchrone pour augmenter la capacité de transport à certains endroits critiques. Ces liaisons à courant continu coexistent donc avec les lignes classiques de transport en courant alternatif.
L'utilisation dans ce nouveau contexte des liaisons à courant continu soulève des nouvelles questions aux exploitants de réseaux électriques (comme RTE en France). En effet, il a été montré en Hammad (1999); To et al. (1994) que les régulations de la liaison en courant continu ont un impact direct et significatif sur la dynamique (i.e., sur la stabilité transitoire) du système électrique au sein duquel elle est implantée. Il en résulte clairement que les approches de synthèse des lois de commande des convertisseurs des liaisons en courant continu doivent être revues en profondeur dans le cas où cette liaison coexiste avec d'autres liaisons classiques en courant alternatif. Le reste du système électrique doit être pris en compte lors du calcul de ces lois de commande afin de s'assurer que ces nouveaux éléments, participent d'une manière optimale à l'effort global de stabilisation du système électrique.

Pour cela nous avons :
- developpé un modèle de commande nous permettant de prendre en compte l'ensemble du système électrique lors de la synthèse du régulateur. Ce modèle doit être, non seulement de taille réduite (petit nombre de machines par rapport à la taille du système physique), mais doit aussi conserver le comportement dynamique de l'ensemble du système. Ceci nous amène à proposer une méthode de sélection des machines à maintenir dans ce modèle de commande.
- synthétisé, en utilisant le modèle de commande mentionné ci-dessus, un régulateur pour les convertisseurs de la liaison de façon à ce que les performances dynamiques (telle que la stabilité transitoire) du système électrique soient assurées, en plus des exigences locales liées à la liaison continue (i.e., contrôle du transit de puissance active et de la tension). De plus ce régulateur n'utilise que les variables disponibles localement au niveau de la liaison.
Il s'agit d'une approche nouvelle, car, bien que de nombreux régulateurs de convertisseurs HVDC aient été proposés pour améliorer les performances dynamiques dont la stabilité transitoire, beaucoup, considèrent que la liaison à courant continu est placée entre deux nœuds infinis Mauricio et Exposito (2006), Ruan et al. (2006) et Ruan et al. (2007), l'influence des autres éléments du réseau étant négligée. Dans d'autres cas tels que Hammad (1999); Hu et al. (2005); Mao et al. (2006); To et al. (1994), l'ensemble du système (toutes les machines) est pris en compte tel quel (i.e., le modèle de commande est identique au système physique et aucune réduction n'est proposée) et une loi de commande est développée sur la base de ce modèle. Cependant, dans le cas où il est question d'un système à grande dimension, une telle approche n'est pas envisageable. En Hazra et al. (2009), trois stratégies de commande de la liaison HVDC sont présentées pour améliorer la stabilité transitoire. Bien qu'il s'agisse d'un autre contexte, l'idée de prendre en compte les caractéristiques dynamiques du système est mise en évidence, sauf que dans ce cas ce sont les variables AC telles que les vitesses des rotors, les phases de tensions triphasés, et le flux des puissances transitées, qui sont utilisées comme entrées du régulateur. Par conséquent, l'inconvénient de cette méthode est la nécessité d'utiliser des variables distantes qui ne sont pas toujours disponibles au niveau de la liaison DC.

Le reste de l'article est organisé comme suit. En section 2, le choix du modèle de commande et sa structure sont présentés, par rapport aux objectifs de régulations. La section 3 présente la synthèse de la loi de commande par retour de sortie. Des résultats de simulation sont donnés en section 4 puis une conclusion et des perspectives sont proposées en section 5.

2. MODÈLE DE COMMANDE

2.1 Objectifs de régulation

La situation mentionnée dans l'introduction est reproduite sur l'exemple suivant.

Cas d'étude N°1 : l'interconnexion France-Espagne
Un modèle réduit de 23 machines est utilisé pour les deux zones (Fig. 1). Les machines et leurs régulations sont

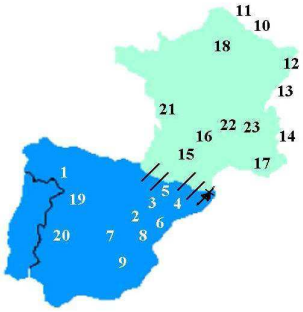

FIGURE 1. Interconnexion France-Espagne

prises en compte par des modèles non-linéaires détaillés et seulement le réseau à très haute tension est modélisé (voir Ramaswamy et al. (1995) pour plus de détails sur la modélisation de ce benchmark). L'interconnexion des deux zones par quatre lignes AC est renforcée par une ligne DC supplémentaire (Fig. 1).
Les régulateurs des convertisseurs de la ligne HVDC doivent assurer, en plus de la poursuite des références données pour la puissance active, la puissance réactive et la tension sur la ligne DC, la non-détérioration de stabilité transitoire de la région voisine de la ligne DC, voire son amélioration.

2.2 Choix de la structure du modèle de commande

D'une part, la structure de notre modèle de commande doit être suffisamment simple (point de vue taille) pour permettre la synthèse d'un régulateur de taille réduite et utilisable ainsi en pratique. Il faudra donc passer par une réduction du nombre de machines.
D'autre part, l'objectif étant d'améliorer la stabilité transitoire du système électrique, notre choix a été porté sur le maintien dans le modèle de commande des machines les plus *critiques* de la zone du système voisine de liaison DC, i.e., les premières à perdre le synchronisme suite à des défauts importants.
Pour un système électrique, *le temps critique d'élimination de défaut* (TCED), représente la marge de stabilité transitoire du système. C'est la durée maximale d'application du défaut, pour laquelle le système est capable de retrouver son point de fonctionnement d'avant le défaut Kundur (1994). L'instabilité se manifeste par la perte de synchronisme d'une ou plusieurs machines tournantes du système, appelées machines critiques. Certaines de ces machines sont retenues dans le modèle de commande. Comme montré en section 2.3.2, la topologie du réseau est également réduite afin d'obtenir la structure générale en Fig. 2 de notre modèle de commande, n et m étant le nombre de machines critiques retenues des deux côtés de la liaison HVDC.

2.3 Construction du modèle de commande

2.3.1 Sélection des machines critiques Le principe de la méthode de sélection est d'appliquer des court-circuits sur différents nœuds du système, désignés au préalable (listes d'incidents dimensionnants), puis d'y calculer les temps critiques d'élimination de défauts . Le classement se fait en ordonnant de façon croissante ces temps, tout en faisant correspondre pour chaque cas, les premières machines

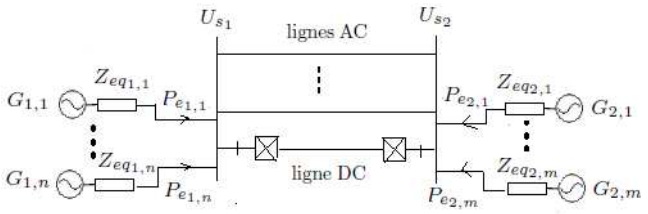

FIGURE 2. Structure du modèle de commande

à perdre le synchronisme. En se fixant un seuil maximum de temps critique toléré, on prendra les machines correspondant aux temps inferieurs à ce seuil (machines critiques) pour constituer notre modèle de commande. On constituera de cette façon plusieurs modèles selon le nombre de machines conservées dans le modèle (p=2, 4, etc.). A chaque étape des tests de validation sont effectués en comparant les réponses du modèle réduit avec celles du modèle complet (dynamiques au niveau de la liaison HVDC et temps critiques d'élimination de défaut des machines retenues). On retient le modèle qui assure un bon compromis entre sa dimension et ses performances. Les résultats de calcul des TCED avec Eurostag (voir Meyer et Stubbe (1992)), sont donnés en Tableau 1 pour l'interconnexion France-Espagne.

TABLE 1. Les Machines les plus critiques retenues lors de la séléction

Gen (Fr)	$TCED[ms]$	Gen (Es)	$TCED[ms]$
$G14(Fr)$	120	$G9(Es)$	173
$G18(Fr)$	131	$G8(Es)$	181
$G10(Fr)$	180	$G1(Es)$	200
$G21(Fr)$	185	$G5(Es)$	219

2.3.2 Réduction de la topologie On utilise un équivalent de type Ward (voir Luong (2008)) afin de remplacer la topologie du réseau par des impédances équivalentes entre les stators des machines retenues et les terminaux de la liaison DC et des injecteurs de courant sont rajoutés aux nœuds stator des machines gardées.

2.3.3 Modélisation de la liaison HVDC Un modèle géneral est utilisé pour la liaison HVDC (voir Ruan et al. (2006, 2007) pour le cas HVDC-VSC). Il est donné en Fig. 3 et consiste en deux stations de conversion, chacune interconnectée à une partie du réseau électrique à une impédance équivalente $Z_1 = R_1 + j\omega L_1$et $Z_2 = R_2 + j\omega L_2$, réspectivement. Z_1 et Z_2 modèlisent les transformateurs et les filtres RL. C_1 et C_2 sont les valeurs des capacités DC des deux côtés de la liaison à courant continu.

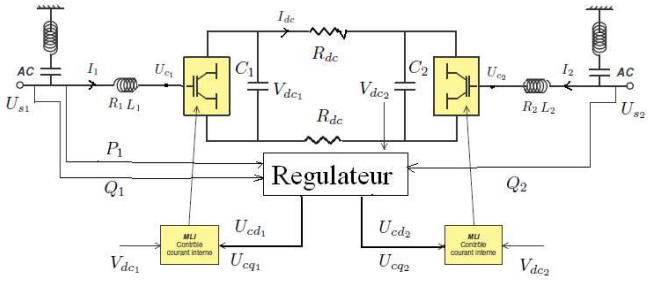

FIGURE 3. Schèma representant la liaison HVDC VSC

Chacune des deux stations de conversion a deux degrés de liberté. Dans cet article, nous avons choisi d'asservir les grandeurs habituelles : le transit de puissance active, la tension continue d'un côté (par exemple, le côté onduleur, i.e., station 2 en Fig. 3) et les puissances réactives Q_1, Q_2 des deux côtés. Toutefois, la structure du régulateur est nouvelle, comme expliqué en section 3.
Le référentiel d-q coïncidant avec la tension terminal, les notations ci-dessous sont utilisées :
U_{sd_1}, U_{sd_2}, U_{sq_1} et U_{sq_2} sont les composantes d-q de U_{s_1} et U_{s_2},tensions AC côté réseau. U_{cd_1}, U_{cd_2}, U_{cq_1} et U_{cq_2} sont celles de U_{c_1} et U_{c_2} tensions AC côté convertisseurs. $I_{d_{1,2}}$,$I_{q_{1,2}}$ sont les composantes des courants de lignes I_1 et I_2. $V_{dc_{1,2}}$,I_{dc} représentent respectivement les tensions des deux côtés de la ligne DC et le courant qui parcourt la ligne à courant continu (Fig. 3). La valeur de l'inductance de cette dernière étant généralement très petite, elle sera négligée afin de simplifier les équations.

P_1, P_2, Q_1 et Q_2 sont les puissances actives et réactives transférées du réseau vers les stations DC. On considère les conversions AC/DC et DC/AC instantanées (i.e., on ne prend pas en compte les dynamiques de la MLI).
On peut donc écrire :

$$\frac{dI_{d_1,q_1}}{dt} = -\frac{R_1}{L_1} I_{d_1,q_1} + \omega I_{d_1,q_1} + \frac{U_{sd_1,q_1} - U_{cd_1,q_1}}{L_1} \quad (1)$$

et une équation similaire du coté de la station 2.
Au niveau de la ligne DC :

$$\frac{dV_{dc_1}}{dt} = \frac{3(U_{sd_1} I_{d_1} + U_{sq_1} I_{q_1})}{2C_1 V_{dc_1}} - \frac{V_{dc_1} - V_{dc_2}}{R_{dc} C_1} \quad (2)$$

$$\frac{dV_{dc_2}}{dt} = \frac{3(U_{sd_2} I_{d_2} + U_{sq_2} I_{q_2})}{2C_2 V_{dc_2}} + \frac{V_{dc_1} - V_{dc_2}}{R_{dc} C_2} \quad (3)$$

$$I_{dc} = \frac{V_{dc_1} - V_{dc_2}}{R_{dc}}. \quad (4)$$

Les puissances actives et réactives sont données par :

$$P_{1,2} = \frac{3}{2}(U_{sd_{1,2}} I_{d_{1,2}} + U_{sq_{1,2}} I_{q_{1,2}}) \quad (5)$$

$$Q_{1,2} = \frac{3}{2}(U_{sq_{1,2}} I_{d_{1,2}} - U_{sd_{1,2}} I_{q_{1,2}}) \quad (6)$$

2.3.4 Validation préliminaire du modèle de commande A ce stade, i.e., avant son utilisation pour la synthèse du régulateur, le modèle de commande est validé en comparant ses réponses aux défauts dimensionnants avec celles obtenus avec le système complet. Pour le cas d'étude N°1, un défaut proche de la machine G_{10} a été appliqué. On constate en Fig. 4 que l'on garde la même allure de réponse, même si les deux réponses ne sont pas complètement identiques. Ceci est suffisant pour obtenir des TCED proches (180 ms avec le modèle complet et 185 ms avec le modèle réduit).

3. SYNTHÈSE DE LA LOI DE COMMANDE

3.1 Choix de la structure du régulateur

Afin d'éviter d'avoir recours à des variables distantes du système électrique, nous avons opté pour une loi de commande par retour de sortie. Cette loi utilise donc uniquement les sorties des convertisseurs, à savoir, selon les

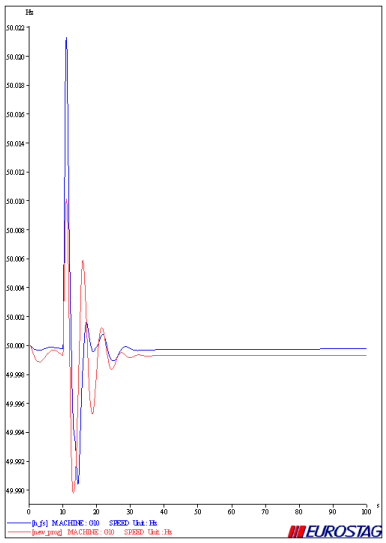

FIGURE 4. Vitesse de la machine G10 dans les deux cas de réseau complet et reduit

choix d'asservissements fait en section 2.3.3, les puissances active et réactives et la tension continue du coté de la liaison DC. De plus, le modèle de commande présenté en section 2 nous permet de synthétiser les commandes des deux convertisseurs simultanément et d'une manière coordonnée. Plus précisément, un seul régulateur avec plusieurs entrées/sorties sera fourni pour l'ensemble de la liaison DC et du système électrique (Fig. 5). En conséquence, une loi de commande linéaire et à retour de sortie sera synthétisée.

3.2 Mise en oeuvre du régulateur

3.2.1 Linéarisation du modèle de commande Le modèle de commande décrit en section 2 est de la forme mathématique suivante :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x,U) \\ y &= h(x) \end{aligned} \tag{7}$$

où

$x = [V_{dc_1} \quad V_{dc_2} \quad P_{e_{1,1}} ... P_{e_{1,n}} \; P_{e_{2,1}} ... P_{e_{2,m}}]^T$

$y = [P_1 \quad Q_1 \quad Q_2 \quad V_{dc_2}]^T$

$U = [U_{cd_1} \quad U_{cq_1} \quad U_{cd_2} \quad U_{cq_2}]^T$

$y_{ref} = [P_1^{ref} \quad Q_1^{ref} \quad Q_2^{ref} \quad V_{dc_2}^{ref}]^T.$

Comme pour le modèle de commande on a négligé les dynamique de la MLI (voir section 2.3.3), la commande qui sera effectivement appliquée à la MLI est, $U_{pwm} = [U_{cd_1}, U_{cq_1}, U_{cd_2}, U_{cq_2}]$.

Le système linéaire, obtenu après linéarisation du système (7) autour du point de fonctionnement : x_0 et U_0 (valeurs en régime statique) se met sous la forme génerale

$$\begin{aligned} \Delta\dot{x} &= A\Delta x + B\Delta U \\ \Delta Y &= C\Delta x. \end{aligned} \tag{8}$$

3.2.2 Synthèse du régulateur linèaire à deux degrés de liberté (RST) L'approche décrite par Vidyasagar (1985)

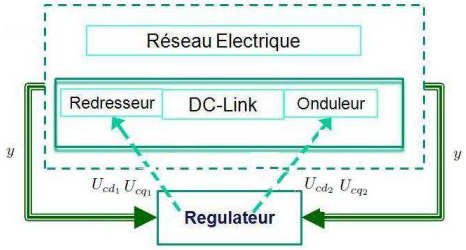

FIGURE 5. La boucle fermée

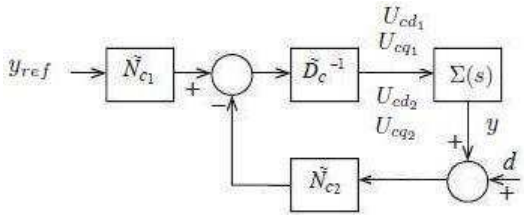

FIGURE 6. Régulateur à deux degrés de liberté

est utilisée sur la matrice de transfert $\Sigma(s)$ du modèle (8). Cette methode est basée principalement sur les factorisations co-premières à droite et à gauche de $\Sigma(s)$:

$$\Sigma = N_p {D_p}^{-1} = {\tilde{D}_p}^{-1} \tilde{N}_p \tag{9}$$

et sur la résolution de l'équation de Bezout pour X et Y

$$XN_p + YD_p = I. \tag{10}$$

Les termes N_p,D_p, $\tilde{D}_p$,$\tilde{N}_p$,X,Y sont des matrcies de transfert propres et stables déterminées à partir d'un placement de pôles par retour d'état (voir Vidyasagar (1985)) de type LQ.

L'ensemble des régulateurs permettant d'assurer la stabilité est Vidyasagar (1985) :

$$Set(\Sigma) = (Y - R\tilde{N}_p)^{-1}[\tilde{N}_{c1} \quad X + R\tilde{D}_p] \tag{11}$$

où $\tilde{N}_{c1}$ est arbitraire et R est choisi afin que

$$(Y - R\tilde{N}_p) \qquad soit \quad inversible. \tag{12}$$

Pour la mise en oeuvre en Fig. 6, on pose :

$$\begin{aligned} \tilde{D}_c &= Y - R\tilde{N}_p \\ \tilde{N}_{c2} &= X + R\tilde{D}_p \end{aligned} \tag{13}$$

Afin d'obtenir un régulateur avec action integrale, la contrainte $\tilde{D}_c(0) = 0$ doit être considérée en plus de la condition (12).

$\tilde{N}_{c1}$ doit être choisi propre et stable. De plus, $\tilde{N}_{c1}(0)$=$\tilde{N}_{c2}(0)$ va nous assurer la poursuite des références y_{ref} sans erreur stationnaire.

Le transfert entrée/sortie du système en boucle fermée est donné par :

$$H_{y_{ref} \to y} = N_p(\tilde{D}_c D_p + \tilde{N}_{c2} N_p)^{-1} \tilde{N}_{c1} \tag{14}$$

4. TESTS DE VALIDATION

A ce stade du travail, nous avons testé des régulateurs synthétisés avec le modèle de commande le plus simple, à savoir celui qui comporte seulement deux machines, les

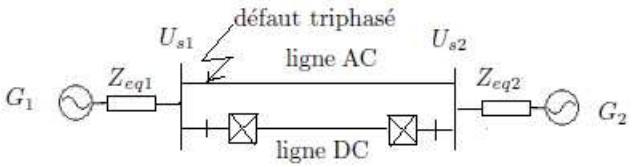

FIGURE 7. Modèle à deux machines

plus critiques des deux zones se situant de part et d'autre de la liaison.
Les tests ont été réalisés sur deux cas. Le premier correspond au cas d'étude N°1, présenté en section 2. Il a l'avantage d'une validation sur un système de taille relativement grande, qui privilégie l'aspect réseau. Par contre, la liaison est modélisée d'une manière très simplifiée qui néglige particulièrement les phénomènes de commutation.

Le bon fonctionnement des convertisseurs en présence de ce nouveau régulateur a été validé sur le second cas :

Cas d'étude N°2 : modèle à deux machines
On considère le système de la Fig. 7, ce modèle (de SimPower Toolbox) représente de façon détaillée les IGBT (les commutations se font à 2700Hz), les transformateurs et les filtre AC et DC. La MLI quant à elle utilise une porteuse triangulaire de fréquence égale à 27 fois celle du fondamental .

4.1 Tests en Simulink

Nous avons d'abord testé les performances locales. La réponse de la puissance active P_1 à un échelon appliqué à t=5 s sur sa référence P_1^{ref} est donnée en Fig. 8. Cette réponse satisfait les exigences habituelles de cahiers des charges pour ce type de liaison.

On teste par la suite, les performances réseau en appliquant un défaut triphasé proche de la station redresseur (à une distance d'environ 10% de la station 1) et d'une durée de 200 ms (voir Fig.7). Les réponses des différentes variables à ce défaut sont représentées sur les figures de 9 à 11. Les réponses obtenues avec le nouveau régulateur (RST) (traits interrompus) sont comparées avec celles obtenues avec la commande vectorielle standard developpée pour le benchmark HVDC VSC de SimPower ToolBox de Matlab (trait plein). Concernant la puissance active en Fig. 9, on constate un dépassement moins important dans le cas RST et surtout un temps de réponse plus faible. Même constations faites concernant la tension V_{dc_2} en Fig. 10. La réponse de la puissance réactive Q_1, est représentée en Fig.11. Un temps de réponse plus faible est observé dans le cas RST. On peut donc globalement constater de meilleures performances réseau avec la commande RST.

4.2 Tests en Eurostag

Dans cette section on se replace dans notre cas d'étude N°1 (voir section 2) qui est un système à plus grande dimension (23-machines). Dans ce cas, on ne pourra pas utiliser des simulations Matlab vu le nombre de machines présentes sur le réseau, mais on simulera notre système au complet avec le logiciel Eurostag.

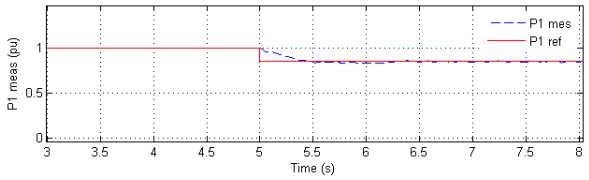

FIGURE 8. Réponse de la puissance active P_1 à un échelon appliqué sur sa référence

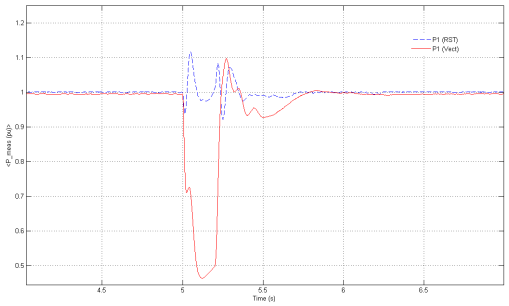

FIGURE 9. Puissance actives transité coté redresseur dans les deux cas de commande vectorielle et RST

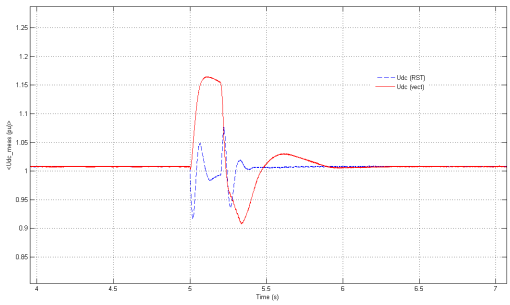

FIGURE 10. Tension continue V_{dc_2} dans les deux cas de commande vectorielle et RST

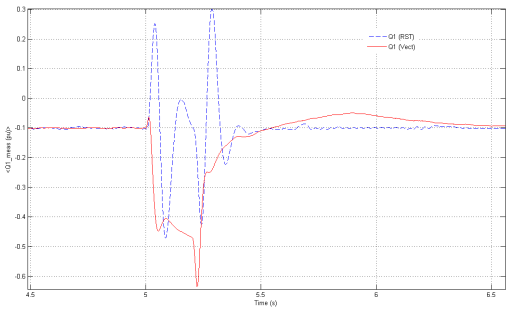

FIGURE 11. Puissance réactive Q_1 dans les deux cas d'une commande vectorielle et RST

Un défaut triphasé de 200 ms est appliqué sur une ligne du réseau reliée au point de raccordement de la machine G_{17} (à une distance d'environ 20% de la machine). La Fig. 12 représente la variation de la vitesse angulaire dans les deux cas (régulateur RST et commande standard). On obtient une réponse plus amortie dans le premier cas (commande RST).
Au niveau de la tension au nœud de raccordement de la machine G_{17}, une chute moins importante est observée en Fig. 13 et une réponse un peu plus amortie dans le cas du régulateur RST. En ce qui concerne les courants de lignes, il a été constaté que ces derniers sont maitrisés et cela

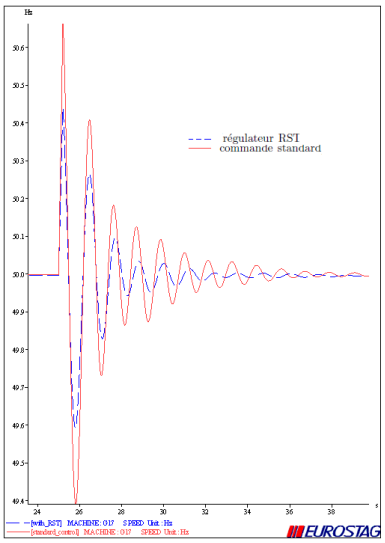

FIGURE 12. Vitesse angulaire de G17 cas d'un défaut triphasé proche

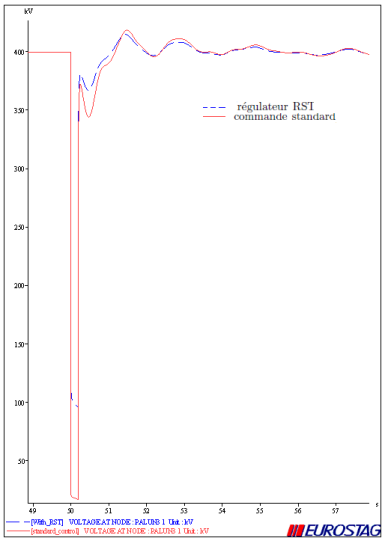

FIGURE 13. Tension au nœud de raccordement de la machine G17 cas d'un défaut triphasé proche

même en présence d'un court-circuit. Ces deux derniers tests montrent un meilleur niveau de stabilité transitoire de la zone proche de la liaison dans le cas de l'utilisation du nouveau régulateur.

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans cet article nous avons proposé une nouvelle approche de synthèse des régulateurs pour les convertisseurs de liaisons HVDC. Le régulateur développé dans ce nouveau cadre nous a permis non seulement d'améliorer la stabilité transitoire du système électrique dans lequel la ligne est implantée, mais aussi d'obtenir de meilleures performances locales en comparaison avec les méthodes classiques de commande. De plus, de part sa structure, il assure une bonne coordination entre les deux convertisseurs. A ce stade, les tests de validation ont été faits avec la structure de modèle de commande la plus simple, à savoir, seulement deux machines retenues, celles les plus critiques des deux côtés de la liaison. L'amélioration des performances constatée nous encourage à poursuivre nos tests avec des modèles de commande plus élaborés et affiner ainsi le choix des machines à retenir dans ces modèles. Ce nouveau cadre de commande proposé est également flexible et ouvert. Des travaux sont actuellement en cours pour améliorer la robustesse de la commande. Egalement, d'autres types de lois de commande, par exemple, non-linéaire, peuvent être envisagés. Nous comptons également étudier le cas où les deux stations sont commandées par deux régulateurs distincts car cela peut s'avérer nécessaire en cas de rupture de communication entre les deux stations de conversion.

ACKNOWLEDGEMENTS

Nous tenons à remercier M. Sébastien HENRY, Chef du département Expertise Système de RTE R&D et M. Alexandre PARISOT, chef du pôle Intégration de Nouvelles Technologies pour leurs remarques et suggestions.

RÉFÉRENCES

Goodrich, F. et Andersen, B. (1987). The 2000 mw hvdc link between england and france. *Power Engineering Journal*, 1(2), 69–74.

Hammad, A. (1999). Stability and control of hvdc and ac transmission in parallel. *IEEE Trans. on Power Delivery*, 14(4), 1545–1554.

Hazra, J., Phulpin, Y., et Ernst, D. (2009). Hvdc control strategies to improve transient stability in interconnected power system. *PowerTech Conference*.

Hu, Z., Mao, C., et Lu, J. (2005). Improvement of transient stability in ac system by hvdc light. *IEEE/PES*.

Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control*. MacGraw-Hill, New York.

Luong, T. (2008). *Analyses dynamiques du réseau de distribution en présence des productions décentralisées*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble.

Mao, C., Hu, Z., Lu, J., Chang, D., et Fan, S. (2006). Application of an optimal coordinated control strategy to vsc hvdc. *IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*.

Mauricio, J. et Exposito, A. (2006). Modeling and control of an hvdc-vsc transmission system. *IEEE/PES*.

Meyer, B. et Stubbe, M. (1992). Eurostag, a single tool for power system simulation. *Proc. T et D Int.*

Ramaswamy, G., Verghese, G., Rouco, L., Vialas, C., et Demarco, C. (1995). Synchrony, aggregation and multi-area eigenanalysis. *IEEE Trans. Power Syst*, 10(4), 1986–1993.

Ruan, S., Li, G., Jiao, X., Sun, Y., et Lie, T. (2006). Adaptive control design for vsc-hvdc systems based on backstepping method. *Electric Power Systems Research*, 77(2007), 559–565.

Ruan, S., Li, G., Peng, L., Sun, Y., et Lie, T. (2007). A nonlinear control for enhancing hvdc light transmission system stability. *Electric Power And Energy Systems*, 29(2007), 565–570.

To, K., David, A., et Hammad, A. (1994). A robust coordinated scheme for hvdc transmission with parallel ac systems. *IEEE Trans. on Power Delivery*, 9(3).

Vidyasagar, M. (1985). *Control System Synthesis : A Factorization Approach*. M.I.T.Press, Massachusetts.