



Le 4<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et  
Renouvelables  
The 4<sup>th</sup> International Seminar on New and Renewable  
Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa - Algérie 24 - 25 Octobre 2016



# Transmission de Puissance Entre Deux Réseaux Asynchrones en Utilisant la Technologie HVDC

Ali BERBOUCHA\*, Kaci GHEDAMSI

Laboratoire de Maitrise des Énergies Renouvelables, Faculté de Technologie, Université de Bejaia. Algeria

Email: [b.ali06@hotmail.fr](mailto:b.ali06@hotmail.fr).

**Abstract**— Dans Cet article, une introduction aux systèmes HVDC, qui sont largement utilisés dernièrement pour le transport de l'énergie de source renouvelables, et pour d'autres applications, est présentée. Commenant par une comparaison avec les systèmes de transport d'électricité classiques (HVAC), puis une présentation des différentes configuration qu'on peut trouver dans la littérature, après les différentes stratégies de contrôle sont développées, et en fin une application qui consiste a la connexion et l'échange de puissance entre deux réseaux asynchrones comme le cas entre la Russie et la Finlande.

**Keywords**— Convertisseurs source de tension, courant continue haute tension, Back to back HVDC, réseaux asynchrones.

## I. INTRODUCTION

Le système de transport traditionnel d'électricité basé sur les réseaux alternatifs triphasés, en général, fonctionne bien et avec de bons niveaux de fiabilité. Il y a cependant des défis découlant principalement de Impact environnemental et de l'augmentation de la production renouvelable, (selon [1] la prochaine décennie sera consacrée à l'exploitation à grande échelle de l'énergie éolienne offshore, ce qui signifie la nécessité de transporter l'énergie électrique sur de longues distances pour établir une connexion avec le réseau d'alimentation principal). Cela augmentera probablement le niveau de la variabilité et l'imprévisibilité dans le fonctionnement des réseaux électriques, ce qui conduit à un besoins accru de réserve de puissance pour l'équilibrage de la consommation d'énergie et qui nécessitera un contrôle de flux de puissance plus souple. La solution qui surmonte ces problèmes est l'utilisation des systèmes de transport à courant continu haute tension (High Voltage Direct Current "HVDC") qui sont plus réalisables et aussi plus compétitifs que les systèmes de transport alternative traditionnels (HVAC) surtout avec le développement des composants d'électronique de puissance. L'un des plus importants avantages de la technologie HVDC sur la technologie HVAC c'est que le premier est adapté pour les longues distances avec des pertes minimales. Le deuxième avantage concerne le droit de passage (Right-of-Way); il est souvent plus facile d'obtenir l'autorisation pour les câbles à courant continu en raison des impacts environnementaux réduits [2]. Le système HVDC est une technologie d'électronique de puissance utilisé dans les

systèmes d'énergie électrique principalement en raison de sa capacité de transmission de grande quantité d'énergie sur de longues distances [3], des lignes aériennes ou des câbles souterrains / sous-marins peuvent être utilisés comme moyen de transport. La technologie HVDC a été utilisée pour la première fois en 1954 dans le câble d'interconnexion sous-marine entre l'île de Gotland (Suède) et de la Suède. Depuis ses débuts jusqu'au milieu des années 1970, les transmissions HVDC étaient basées sur les diodes à vapeur du mercure, après cela, pour les 25 années suivante, LCC - utilisant les thyristors comme composant de base ont été utilisés dans les systèmes HVDC. Une fois que le développement des dispositifs de commutation haute puissance et leur disponibilité à des prix bas, les LCCs étaient remplacés par des convertisseurs en source de tension (VSC) [3]. L'objectif de cet article est de développer une bonne compréhension du comportement et le contrôle concernant la transmission HVDC et comme application la connexion et l'échange de puissance entre deux systèmes asynchrones.

## II. COMPARAISON DES SYSTEMES HVAC ET HVDC

Les systèmes HVDC et HVAC peuvent être comparés essentiellement selon deux points de vue: du point de vue des coûts, du point de vue technique.

### A. Point de vue technique

Les systèmes HVDC surmontent certains des problèmes qui sont habituellement associés aux systèmes de transport HVAC tel que :

- La technologie HVDC permet la transmission de puissance et l'interconnexion de deux systèmes d'alimentation en courant alternatif avec des fréquences différentes. Des liaisons de ce type existent au Japon (Sakuma et ShinShinano) et au Brésil (Itaipu).
- Dans le cas des systèmes HVAC le transfert de puissance est limité à cause de l'angle de phase qui augmente avec la distance, cette distance est limitée à 50km [4], pour résoudre ce problème l'exploitant de réseau peut utiliser des moyens de compensation en puissance réactive, le long de la ligne, tels que des dispositifs FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System). Cependant, ces artifices ont un coût très important et de plus, ne peuvent pas toujours être



# Le 4<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

## The 4<sup>th</sup> International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa - Algérie 24 - 25 Octobre 2016



installés à l'endroit le plus opportun, comme par exemple pour une liaison offshore, qui ainsi nécessiterait spécifiquement la construction de plates-formes en mer/océan pour accueillir ces dispositifs FACTS, par contre l'effet inductif et capacitif ne limitent pas la capacité de transmission ou de la longueur maximale d'une ligne de transport HVDC et la section du conducteur est pleinement utilisée parce qu'il n'y a pas d'effet de peau.

### B. Point de vue économique

Economiquement parlant les systèmes HVDC présentent quelques avantages sur les systèmes de transport HVAC classique qui peuvent être résumés par :

- Compte tenu des exigences d'isolation similaires pour les niveaux de tension crête, une ligne DC va transporter la même quantité de puissance avec deux conducteurs comme une ligne AC avec trois conducteurs; Ainsi, pour le même niveau de puissance, un système HVDC nécessitera un droit de passage moins chère, des tours simples et aussi les coûts des conducteurs et des isolateurs seront réduits, en comparaison avec une système HVAC classique.

- Les pertes de transmission de puissance sont réduites lorsque l'option de DC est utilisée à la place de l'option AC (selon [5], les pertes par effet joules sont 25% inférieures en DC qu'en AC pour une même puissance transmise, en comparant une ligne AC à 3 conducteurs et une ligne DC à 2 conducteurs) ; en plus, lorsque un système HVDC est utilisé, l'absence de l'effet de peau et les pertes diélectriques sont maintenues à un niveau bas (estimées à 15% selon [6]), ainsi l'efficacité de la transmission est augmentée, faut noter aussi que les ligne DC ne consomme pas de l'énergie réactive. Il en résulte que la ligne DC est plus économique.

Cependant, l'inconvénient des transmissions HVDC en ce qui concerne les coûts provient de l'utilisation des convertisseurs et des filtres.

La Figure 1 montre une courbe de comparaison des coûts typiques entre le transport d'électricité en AC et DC considérant:



Fig. 1 Coût total / Distance [7]

- Les coûts des stations
- Les coûts des lignes
- Valeur de pertes capitalisées

Selon cette figure il existe une distance appelée "Break-Even distance" à partir de laquelle une liaison HVDC devient économiquement plus intéressante qu'une liaison HVAC pour une même puissance transmise. Dans le cas des lignes aériennes cette distance varie de 500 à 800 km, selon [7], et Pour les câbles de type "sous-marin", la distance est estimée entre 70 et 100 km, selon [6].

En conclusion, on peut dire que la technologie de transmission HVDC est attrayante et avantageuse pour le transport de puissance longues distance, transfert de puissance avec des câbles sous-marin et aussi des interconnexions asynchrones [4].

### III. CONFIGURATION DES SYSTEMES HVDC

Basé sur les fonctions et les emplacements des stations de conversion, quatre configurations des systèmes HVDC principaux sont utilisées [8].

#### A. Configuration HVDC monopolaire

Dans cette configuration, deux convertisseurs séparés par une ligne unipolaire sont utilisés, le retour s'effectuant par l'impédance de la terre ou la mer, un conducteur métallique peut être utilisé comme chemin de retour comme illustré sur la Figure 2.

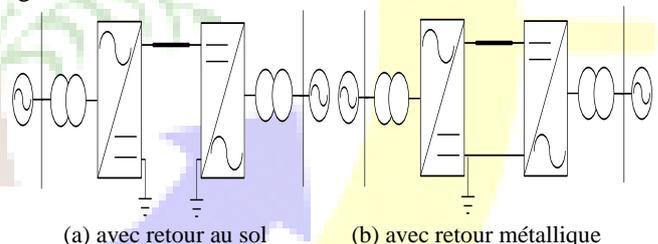


Fig. 2 Configuration HVDC monopolaire

Ce dernier est préférable car les interférences causées par les électrodes de mises à la terre sont très importantes. Cela peut provoquer un assèchement du sol ou une production d'éléments chimiques comme le chlore dans la mer [9]. Cette configuration est généralement préférée dans le cas des transmissions par câble avec des connexions sous-marines [8].

#### B. Configuration HVDC Back-to-back

Dans cette configuration, les deux stations de convertisseurs sont placées sur le même site et il n'y a pas de transmission de puissance avec une liaison à courant continu sur une longue distance [8].

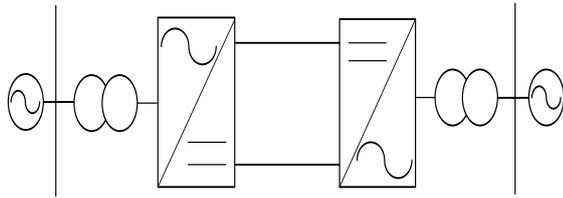


Fig. 3 Configuration HVDC Back-to-back

Le schéma de principe de ce système est présenté sur la Figure 3. Un tel système est utilisé pour l'interconnexion de deux systèmes de courant alternatif avec des fréquences différentes (interconnexion asynchrone).

### C. Configuration HVDC bipolaire

Dans cette configuration la liaison est constituée d'un pôle positif et d'un autre négatif avec une mise à la terre souvent réalisée au point milieu du bus continu. Fondamentalement le système bipolaire est constitué de deux systèmes monopolaires. L'avantage de cette configuration, est donnée par le fait que l'un des pôles peut continuer à transmettre la puissance dans le cas où l'autre on est hors service [8]. Le système HVDC bipolaire est illustré sur la Figure 4.

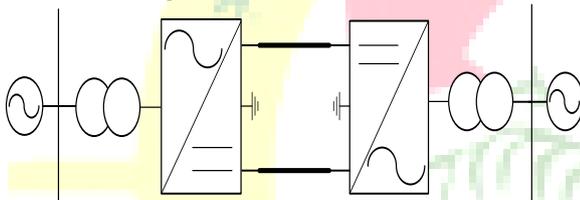


Fig.4 Configuration HVDC bipolaire

### D. Configuration HVDC multi-terminal

Un système HVDC multi-terminal est composé de trois ou plusieurs sous-stations de conversion, comme présenté sur la Figure 5, certains d'entre elles travaillant comme onduleurs tandis que les autres comme redresseur [10]. Deux liaisons de ce type sont recensées à travers le monde : la liaison Sardaigne - Corse - Italie à trois terminaux et la liaison Quebec - Nouvelle Angleterre à cinq terminaux [6]. En raison du nombre élevé de postes de conversion utilisés dans un tel système, l'utilisation de cette configuration n'est pas justifiée du point de vue économique.

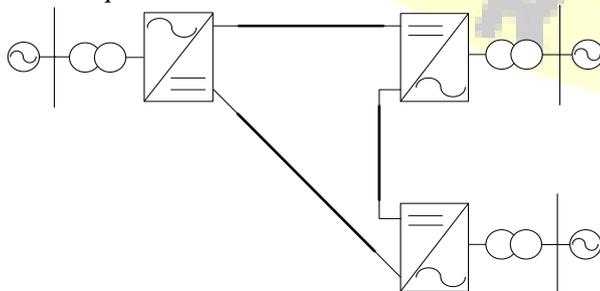


Fig.5 Configuration HVDC multi-terminal

## IV. CONTROLE D'UN SYSTEME VSC-HVDC

Le contrôle d'un système HVDC basé VSC est réalisé en utilisant une boucle de commande interne de courant et d'autres boucles de commande externes [11]. La boucle de commande interne de courant contrôle les courants coté alternatif, les références de courant alternatif sont fournis par les contrôleurs externes [11]. Les commandes externes comprennent le régulateur de tension continue, le régulateur de tension alternative, le régulateur de puissance active et le régulateur de puissance réactive. Ainsi, la référence du courant direct peut être obtenue à partir du régulateur de la tension continue ou du régulateur de puissance active, d'autre part, la référence du courant quadratique peut être obtenue à partir du régulateur de la puissance réactive ou du régulateur de tension alternative [11]. La structure de contrôle globale du système VSC-HVDC est illustrée sur la Figure 6.

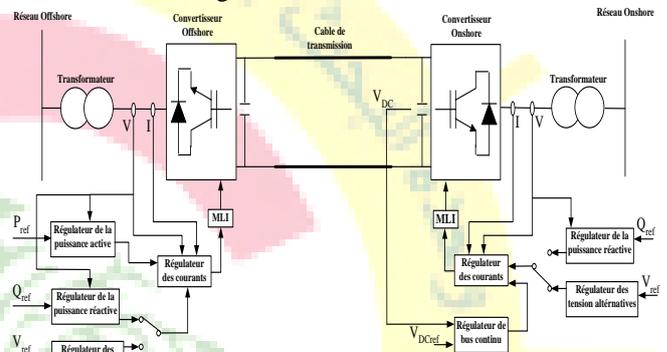


Fig.6 Contrôle globale du système VSC-HVDC

### A. Contrôle des courants

Le régulateur de courant est mis en œuvre dans référentiel synchrone  $dq$ . Habituellement, les structures  $dq$  de contrôle sont associées à des contrôleurs PI en raison de leur bon comportement [12]. Cependant, d'après [12], les performances des régulateurs de courant PI ne sont pas satisfaisantes lorsqu'ils ont pour objectif de réguler des systèmes couplés. Par conséquent, afin d'améliorer les performances des régulateurs PI dans de tels systèmes, un système de découplage est généralement utilisé [12]. La structure du régulateur de courant dans le référentiel synchrone est présentée sur la Figure 7.

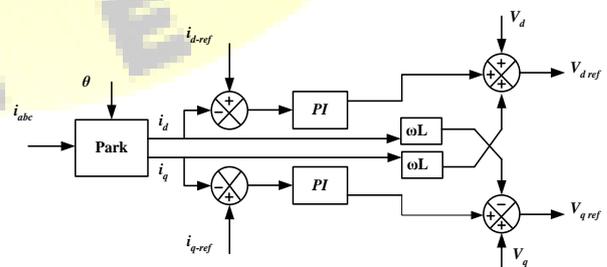


Fig.7 Structure du régulateur de courant dans le référentiel synchrone

### B. Contrôle de la tension de bus continu

L'objectif de ce régulateur est de réguler la tension de bus continu à sa valeur de référence. Il est utilisé uniquement sur le côté Onshore de la transmission HVDC et il fournit à sa sortie la valeur de référence du courant direct. Le schéma de principe du régulateur bus continu est représenté sur la Figure 8.

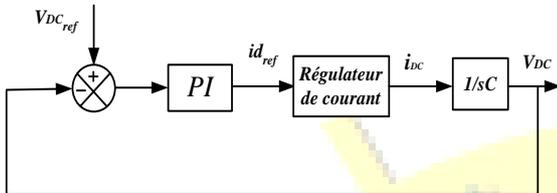


Fig.8 Structure du régulateur de bus continu

### C. Contrôle de la puissance active

Pour plus de simplicité, le contrôleur de puissance active peut être modélisé comme un simple régulateur proportionnel, la référence du courant direct est obtenu en utilisant les équations des puissances active et réactive de instantanées [3], donnée par :

$$\begin{cases} P = V_d i_d + V_q i_q \\ Q = V_d i_q - V_q i_d \end{cases} \quad (1)$$

A partir de cette équation, la référence du courant direct est obtenue :

$$i_{d \text{ ref}} = \frac{P_{\text{ref}} \cdot V_d - Q_{\text{ref}} \cdot V_q}{V_d^2 + V_q^2} \quad (2)$$

Avec  $P_{\text{ref}}$  est la référence de la puissance active et  $Q_{\text{ref}}$  est la référence de la puissance réactive. Si un contrôle plus précis de la puissance active est demandé, un régulateur PI peut être utilisé, [13]. Pour cette approche, le principe du dispositif de commande de la puissance active est représenté sur la Figure 9.

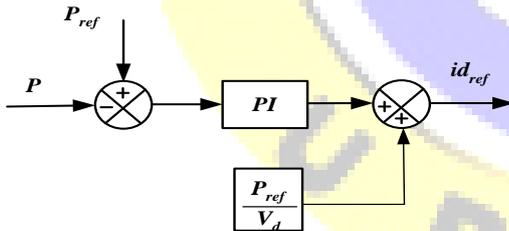


Fig.9 Contrôle de la puissance active avec un régulateur PI [3]

### D. Contrôle de la puissance réactive

Le contrôleur de puissance réactive mise en œuvre est similaire à celui de puissance active qui était présenté précédemment. Dans ce cas, la valeur de référence du courant quadratique est également obtenue à partir des équations (1), ce qui nous donne :

$$i_{q \text{ ref}} = \frac{P_{\text{ref}} \cdot V_q - Q_{\text{ref}} \cdot V_d}{V_d^2 + V_q^2} \quad (3)$$

Si un contrôle plus précis de la puissance réactive est souhaité, la structure représentée sur la Figure 10 peut être utilisée [3].

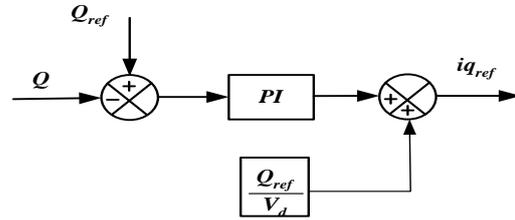


Fig.10 Contrôle de la puissance réactive avec un régulateur PI [3]

### E. Contrôle des tensions alternatives

Dans les systèmes VSC-HVDC, une autre variable peut être soumise à un contrôle qui est la tension alternative. Dans la littérature des stratégies de contrôle de la tension alternative sont décrits. La première stratégie, est réalisée en contrôlant la chute de tension au niveau de la réactance de phase comme décrit dans [3]. La deuxième stratégie qui peut être utilisée pour contrôler la tension alternative est décrite en détail dans [14], elle est réalisée en contrôlant la chute de tension sur le filtre capacitif. Le schéma de principe de la première stratégie est illustré sur la Figure 11.

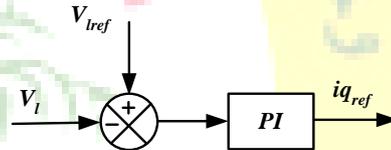


Fig.11 Contrôle des tensions alternatives [3]

## V. SIMULATION ET ANALYSE

Dans cette partie, une des applications des systèmes HVDC sera l'objet des simulations, la connexion entre deux réseaux asynchrones. Une station HVDC « back to back » sera utilisé, c'est le cas par exemple pour relier le réseau électrique du Québec et les réseaux voisins de l'interconnexion de l'Est, en Amérique du Nord. La ligne étant courte, la tension DC est choisie beaucoup plus basse que dans le cas des stations normales, cela permet de réduire la taille des composants, leur isolation diélectrique ne devant pas être aussi importante. La Figure 12 nous montre le schéma du système global. Pour le control de notre système, on utilisera le régulateur de la puissance active et le régulateur de la puissance réactive pour fournir les signaux de références au régulateur du courant coté A et, le régulateur de bus continu et le régulateur de la puissance réactive pour fournir les signaux de référence au régulateur de courant coté B.

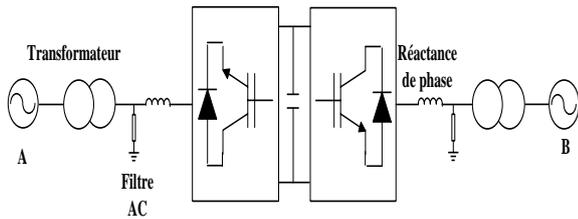


Fig.12 Système global

Comme on peut le voir sur La Figure 13et 14, les tensions de ligne sur les deux bornes sont présentées et comme on peut le constater elles ont la même fréquence mais elles sont asynchrones.

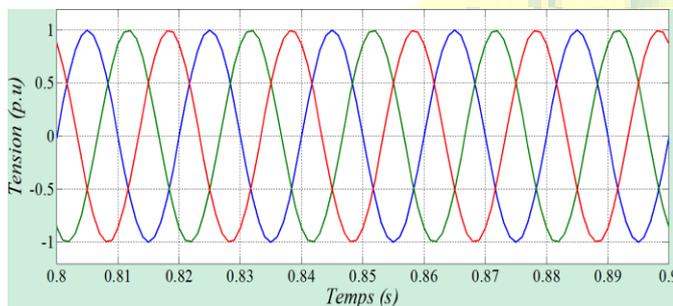


Fig.13 Tensions triphasées mesurées sur le coté A

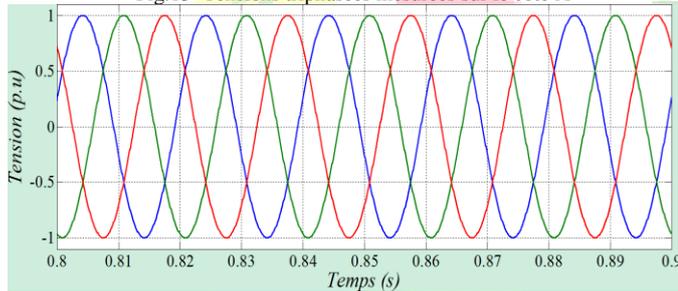


Fig.14 Tensions triphasées mesurées sur le coté B

Avant de commencer l'analyse du comportement de notre système, une convention de signes devrait être imposée. Par conséquent, dans tous les résultats à venir, le signe négatif indique que le terminal envoie la puissance, tandis que le signe positif indique que le terminal est alimenté en puissance. Afin d'analyser le comportement du système mis au point, les changements dans les références des puissances active et réactive sont produits au niveau du terminal A comme le montre la Figure 15.

A  $t = 1$  s, un changement de 0,3 p.u est appliqué à la référence de la puissance active (augmentation de 0.2 p.u. à 0.5 p.u.).

A  $t = 1.5$  s, un changement de 0.3 p.u. est appliqué à la référence de la puissance réactive (augmentation de 0 à 0.3 p.u.).

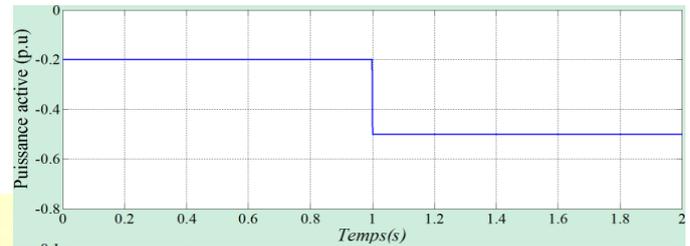


Fig.15 Valeur de référence pour les puissances active et réactive

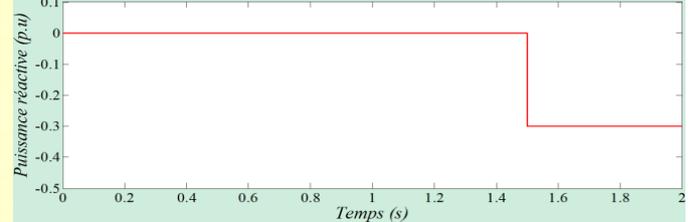


Figure 16 et Figure 17 présentent les puissances de référence et mesurées active et réactive des deux coté

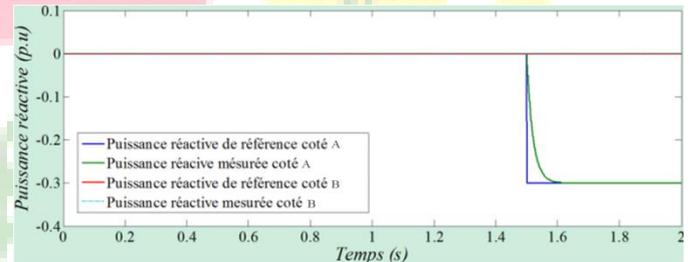


Fig.16 Puissance réactive de référence et mesuré sur les deux cotés

A  $t = 1.5$ s un changement sur la référence de la puissance réactive coté A est fait on remarque que la puissance réactive mesurée suit bien sa référence, par contre sur le coté B il n y a aucun changement vu que chaque convertisseur contrôle la puissance réactive de son coté. (Figure 16).

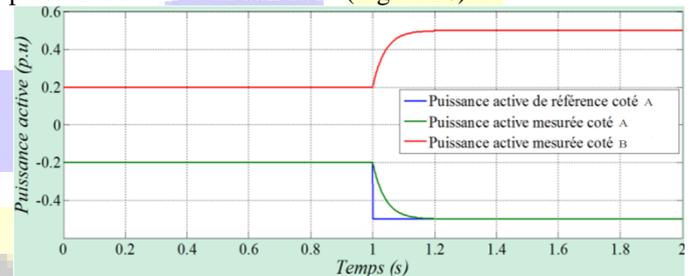


Fig.17 Puissance active de référence et mesuré sur les deux cotés

A  $t = 1$ s un changement sur la référence de la puissance active coté A est fait on remarque que la puissance active mesurée suit bien sa référence, et ce même changement est noté coté réseau B mais avec un signe contraire ce qui signifie qu'il reçoit et qu'il ya une transmission complète de puissance active. (Figure 17).

Les courants  $i_d$  et  $i_q$  qui sont contrôlés dans la boucle de régulation interne sont représentés sur les Figures 18 et 19. En



raison du fait que  $i_d$  détermine la puissance active, on peut observer que sa référence évolue proportionnellement avec la référence de la puissance active (Figure 18), d'autre part, en raison du fait que  $i_q$  est directement liée à la puissance réactive, sa référence évolue selon les variations de la puissance réactive. De plus, parce que les composants  $d$  et  $q$  du courant sont couplés chaque modification de la forme d'onde d'un élément provoquera une petite transition sur la forme d'onde de l'autre composant.

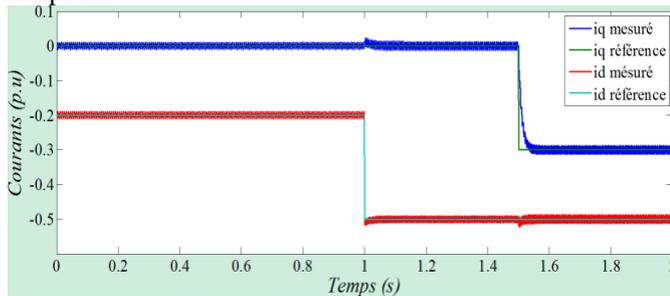


Fig.18 Courant  $d$ - $q$  référence et mesurés coté A

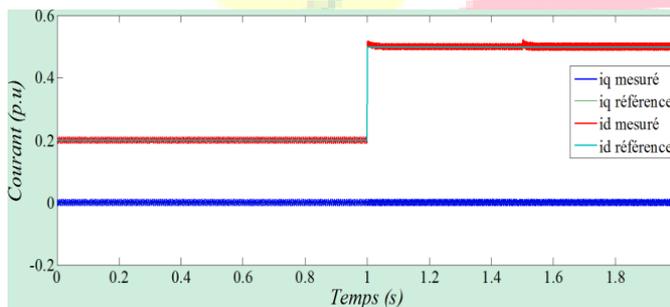


Fig.19 Courant  $d$ - $q$  référence et mesurés coté 50Hz

Les figures 20 et 21 représentent les courants mesurés sur les deux coté, on remarque que sur le coté B, où on a juste un changement au niveau de la puissance active, une seule augmentation à  $t = 1s$ , par contre sur le coté B avec un changement de la puissance active à  $t = 1s$  et un changement de la puissance réactive à  $t = 1.5s$ , deux variations du courant sont enregistrées.

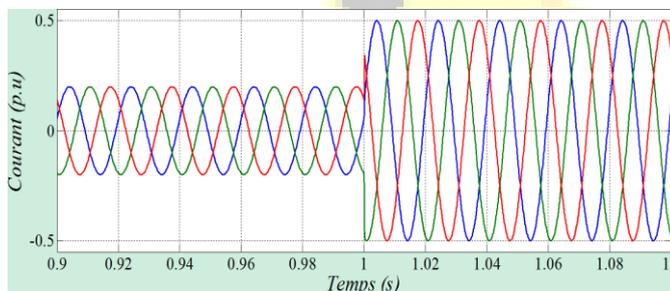


Fig.20 Courant triphasées mesurées sur le coté B

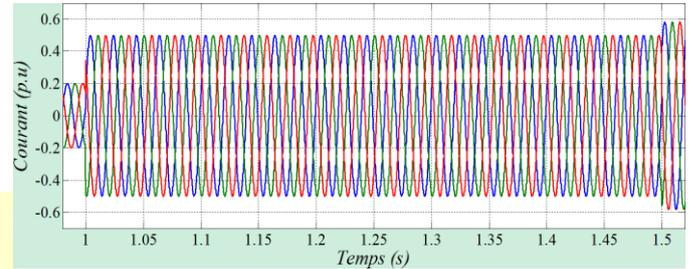


Fig.21 Courant triphasées mesurées sur le coté A

## VI. CONCLUSIONS

Dans cet article, l'utilisation d'un système HVDC, pour l'interconnexion et l'échange de puissance entre deux réseaux asynchrones, est présentée et analysée, en commençant par donner les avantages des systèmes HVDC par rapport aux systèmes classiques HVAC, puis les différentes topologies et les techniques de contrôle, et terminant par une simulation qui montre le bon comportement de notre système.

## REFERENCES

- [1] EWEA, \Pure power - wind energy targets for 2020 and 2030," tech. rep., EWEA, 2009.
- [2] EWEA, \Oceans of opportunity - harnessing Europe's largest domestic energy resource offshore," tech. rep., EWEA, September 2009.
- [3] C. Du, The control of VSC-HVDC and its use for large industrial power systems. PhD thesis, Department of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 2003.
- [4] M. P. Bahrman, \Hydc transmission overview," IEEE, pp. 1-7, 2008.
- [5] Fabrice D'EUSTACHIO. Les enjeux des systèmes HVDC dans les réseaux de transport d'électricité Mémoire présenté en vue d'obtenir UE « Information et communication pour l'ingénieur » SESSION 2013 / 2014
- [6] MONJEAN Pascal, 2012. Optimisation de l'architecture et des flux énergétiques de centrales à énergies renouvelables offshore et onshore équipées de liaisons en continu.
- [7] High Voltage Direct Current Transmission – Proven Technology for Power Exchange.: SIEMENS [en ligne].
- [8] N. Flourentzou, V. G. Agelidis, and G. D. Demetriades, \Vsc-based hvdc power transmission systems: An overview," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, pp. 592-602, March 2009.
- [9] Theodore WILDI, Gilbert SYBILLE. Electrotechnique, De Boeck, 2005.
- [10] K. R. Padiyar, HVDC Power Transmission Systems. John Wiley & Sons, 1990. ISBN 0-470-20267-X.
- [11] C. Du, A. Sanino, and M. Bollen, \Analysis of the control algorithms of voltage source converter hvdc," Power Tech, IEEE Rusia, pp. 1-7, 2005.
- [12] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, and A. Timbus, \Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, pp. 1398-1409, 2006.
- [13] A. Lindberg, PWM and Control of Two and Three Level High Power Voltage Source Converters. PhD thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1995.
- [14] A. Yazdani and R. Iravani, Voltage Source Converters in Power Systems. John Wiley & Sons, March 2010. ISBN: 978-0-470-52156-4.