

Compensation dans les Réseaux Electriques par un Système FACTS de Type STATCOM

Mimi Belatel

*Laboratoire d'Electrotechnique, Faculté des Sciences de la Technologie
Université des frères Mentouri, Constantine, Algérie*

belatelmimi2002@yahoo.fr

Résumé— L'étude de la stabilité des réseaux électriques constitue un sujet important pour la planification et l'exploitation des réseaux électriques. L'amortissement du système peut être obtenu par des moyens classiques de régulation de la tension et de la fréquence par des dispositifs FACTS, ces dispositifs sont de plus en plus utilisés dans les réseaux électriques. Ce travail présente la commande par MLI de l'écoulement de la puissance active et réactive dans une ligne de transport par les systèmes FACTS de type STATCOM qui est le plus simple des compensateurs. Les résultats de la simulation avec MATLAB/SIMULINK ont validés le modèle utilisés et ils ont bien montrés que le compensateur a réalisé avec une grande efficacité notre objectif crucial dans l'optimisation de la puissance réactive et la compensation de la tension dans le réseau.

Mots-clés— Compensation, Réseaux Electriques, STATCOM.

I. INTRODUCTION

Depuis de nombreuses années, le développement de l'énergie électrique dans le monde a conduit à un vaste système de production, transport et distribution d'énergie. Ce système a été, en très grande partie, conditionné par une contrainte très forte: l'énergie électrique étant très difficilement stockable, elle doit être acheminée en temps réel des centres de production vers les consommateurs finaux, industriels ou domestiques. L'industrialisation et la croissance de la population sont les premiers facteurs pour lesquels la consommation de l'énergie électrique augmente régulièrement. Ainsi, pour avoir un équilibre entre la production et la consommation, il est à première vue nécessaire d'augmenter le nombre de centrales électriques, de lignes, de transformateurs, ... etc., ce qui implique une augmentation du coût et une dégradation du milieu naturel. En conséquence, il est aujourd'hui important d'avoir des réseaux maillés et de travailler proche des limites de stabilité afin de satisfaire ces nouvelles exigences.

La gestion du réseau électrique ne consiste pas seulement à faire en sorte que les transits de puissance soient inférieurs aux capacités de transport du réseau. Il faut également surveiller plusieurs paramètres techniques, dont le niveau de tension: La tension électrique doit rester dans une plage autorisée en tout point du réseau, dans toutes les situations de production et de consommation prévisible. Pour faire face à ce phénomène néfaste, les stabilisateurs de puissance PSS (*Power System Stabilizers*) implantés depuis les années 60, ne peuvent assurer seuls l'amortissement de ces oscillations.

Des nouveaux dispositifs appelés FACTS (*Flexibles AC Transmission Systems*), sont placés dans le réseau, qui ont bénéficiés de l'évolution de la technologie de l'électronique de puissance. Ces dispositifs sont insérés dans un réseau électrique pour satisfaire plusieurs besoins, tels que la répartition des puissances, la compensation de la puissance réactive, et le renforcement de la stabilité des réseaux électriques. La nouvelle architecture des réseaux électriques ouvre des nouveaux axes de recherche. Le dimensionnement des systèmes FACTS fait l'objet de plusieurs travaux de recherches et plus particulièrement le STATCOM qui est le plus connus dans cette famille parce qu'il est capable de contrôler indépendamment et simultanément la puissance active et réactive ainsi il peut contrôler la tension pour améliorer les performances du réseau électrique et sa stabilité. Le STATCOM a joué un rôle important dans les systèmes exécutés depuis 1980.

- Le STATCOM de ± 80 MVAR appliqué à un réseau de transport de 154 kV à Inuyama au Japon et a été commercialisé depuis 1991 par Kansai Electric Power Corporation et Mitsubishi Electric Power Corporation.
- Le STATCOM de ± 100 MVAR à 161 kV installé à la station de Sullivan du Nord-est de Tennessee par Westinghouse Electric Corporation aux Etats Unis en 1995 [1-3]

II. MODELISATION DU STATCOM

Le STATCOM «*Static Synchronous Compensator*» est le premier FACTS qui utilise un onduleur à source de tension pour convertir une tension d'entrée DC en une tension AC afin de compenser les besoins actives et réactives du système. Le STATCOM, a connu jusqu'à présent différentes appellations:

- ASVC (*Advanced Static Var Compensator*),
- STATCON (*STATic CONDenser*);
- SVG (*Static Var Generator*);
- SVC light ;

Le STATCOM a été employé pour contrôler la puissance réactive, en plus du contrôle de la tension, qui est sa tâche principale. Il peut également être utilisé pour des tâches

supplémentaires telles que l'amortissement des oscillations électriques, ce qui entraîne une amélioration de la capacité de transmission. Le STATCOM présente plusieurs avantages à savoir:

- L'étendue de la plage d'opération est plus large qu'un SVC classique.
- Les performances dynamiques sont plus élevées qu'avec un SVC classique.
- Bonne réponse à faible tension: le STATCOM est capable de fournir son courant nominal même lorsque la tension est presque nulle.
- Un contrôle optimal de la tension, les phases sont contrôlées séparément pendant les perturbations du système.

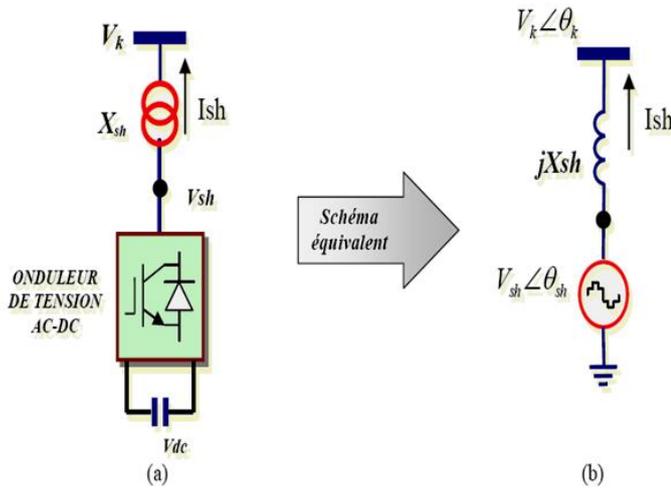


Fig. 1: (a) structure d'un STATCOM (b) schéma équivalent

Le STATCOM permet le même contrôle qu'un SVC mais avec plus de robustesse, ce dispositif est capable de délivrer la puissance réactive même si la tension du jeu de connexion est très faible, d'après sa caractéristique on constate que le courant maximal du STATCOM est indépendant de la tension du nœud. Pour un STATCOM idéal, n'ayant pas des pertes actives, l'équation de la puissance réactive suivante décrit le transfert de cette dernière avec le réseau électrique:

$$Q_{sh} = \frac{|V_k|^2}{X_{sh}} - \frac{|V_k| \cdot |V_{sh}|}{X_{sh}} \cos(\theta_k - \theta_{sh}) = \frac{|V_k|^2 - |V_k| \cdot |V_{sh}|}{X_{sh}} \quad (1)$$

- Si $|V_k| < |V_{sh}|$, alors Q_{sh} devient négative et le STATCOM fournit de la puissance réactive.
- Si $|V_{sh}| < |V_k|$, alors Q_{sh} devient positive et le STATCOM absorbe de la puissance réactive.

La figure 2 donne le schéma de principe de l'onduleur de tension triphasé, il est placé entre une source de tension triphasée parfaite, donc de tension constante et une charge

triphase équilibrée parcourue par des courants (i_a, i_b, i_c) formant un système triphasé sinusoïdale équilibré.

L'onduleur est un assemblage de trois ponts monophasés formés chacun de deux interrupteurs en série (Ka et Ka' , Kb et Kb' , Kc et Kc').

Pour que les six interrupteurs puissent imposer les tensions de sortie, qu'elles soient les courants (i_a, i_b, i_c). Il faut que ces interrupteurs soient bidirectionnels en courant. Chacun d'eux est formé d'un semi-conducteur à ouverture et fermeture commandées.

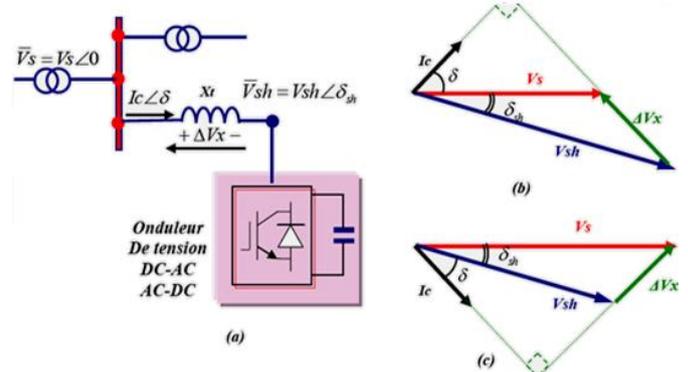


Fig. 2: Schéma de principe de l'onduleur de tension à MLI connecté à un réseau

Si la tension de référence est sinusoïdale, deux paramètres caractérisent la commande MLI: l'indice de modulation m et le taux de modulation r_m .

- *Indice de modulation*

$$m = \frac{f_p}{f_r} \quad (2)$$

Où f_r : est la fréquence de la tension de référence et f_p est celle de la porteuse.

- *Taux de modulation*

$$r_m = \frac{V_R}{V_P} \quad (3)$$

Où V_R : est l'amplitude de la tension de référence et V_P est celle de la porteuse.

La porteuse est un signal triangulaire caractérisé par sa fréquence f_p et sa valeur de crête V_P . On définit l'équation de la porteuse dans sa période $[0, T_p]$ par:

$$\begin{cases} v_p = v_p \left(-1 + 4 \frac{t}{T_p} \right) & \text{si } t \in \left[0, \frac{T_p}{2} \right] \\ v_p = v_p \left(3 - 4 \frac{t}{T_p} \right) & \text{si } t \in \left[\frac{T_p}{2}, T_p \right] \end{cases} \quad (4)$$

La référence est un signal sinusoïdal d'amplitude V_R et de fréquence f_r .

En triphasé, les trois tensions sinusoïdales de référence sont données par:

$$v_{ref_a} = V_r \sin(2\pi f_r t) \quad (5)$$

$$v_{ref_b} = V_r \sin\left(2\pi f_r t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (6)$$

$$v_{ref_c} = V_r \sin\left(2\pi f_r t - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (7)$$

La commande à MLI sinus triangle utilise la comparaison avec les trois composantes de la tension de référence afin de calculer les états (S_a , S_b et S_c) des interrupteurs de l'onduleur. Ceux-ci sont donnés par l'équation suivante:

$$s_i = \begin{cases} 1 & \text{si } (v_{refi} - v_p) \geq 0 \\ 0 & \text{si } (v_{refi} - v_p) < 0 \end{cases} \quad \text{avec } i = a, b, c \quad (8)$$

L'objectif de la modélisation est de trouver une relation entre les grandeurs de commande et les grandeurs électriques de la partie alternative et continue de l'onduleur.

Le principe général de la MLI sinus-triangle est la détermination des instants de commutation des interrupteurs de l'onduleur à partir d'une comparaison d'un signal triangulaire porteuse avec une sinusoïde modulante qui représente l'image du signal souhaité à la sortie de l'onduleur. Le mode de fonctionnement est très simple:

- Si $v_{ref} > v_p$: l'interrupteur supérieur du bras de pont conduit;
- Si $v_{ref} < v_p$: l'interrupteur inférieur du bras de pont conduit.

Où v_{ref} : représente une des trois tensions de référence, et v_p représente le signal triangulaire ou l'onde porteuse. Ce type de commande est appelé commande par modulation de largeur d'impulsion où commande MLI (*PWM en anglais*). Cette technique exige une commande séparée pour chaque phase de l'onduleur. La détermination des instants d'ouverture et de fermeture des interrupteurs est réalisée en temps réel, par une électronique de commande analogique ou numérique ou parfois hybride. La figure 3 donne une présentation graphique du signal de référence et du signal porteuse.

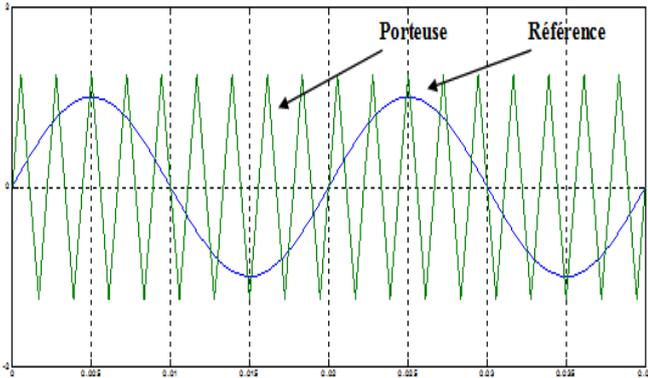


Fig. 3: Représentation graphique du signal de référence et du signal porteuse

Les compensateurs shunts sont bien reconnus dans la compensation de l'énergie réactive et par conséquent la régulation de la tension au jeu de barre où ils sont connectés. Le STATCOM est un générateur synchrone statique qui génère une tension alternative triphasé synchrone avec la tension du réseau à partir d'une source de tension continue. L'amplitude de la tension du STATCOM peut être contrôlée afin d'ajuster la quantité de l'énergie réactive à échanger avec le réseau. En général la tension du STATCOM V_{sh} est injectée en phase avec la tension V_t de la ligne et dans ce cas il n'y a pas d'échange de l'énergie active avec le réseau mais seulement la puissance réactive qui sera injectée ou absorbée par le STATCOM.

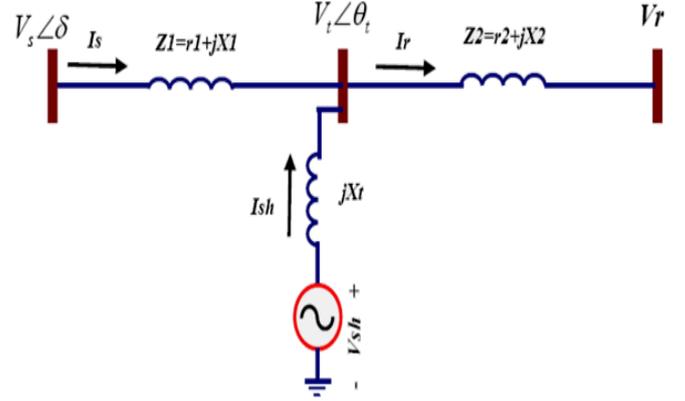


Fig. 4: Schéma équivalent du STATCOM connecté à un réseau électrique

Pour étudier les relations entre le réseau électrique et le STATCOM on va adopter pour cela le modèle mathématique de la figure 4 qui représente le schéma unifilaire d'un réseau électrique et d'un STATCOM installé dans une ligne de transport. Les équations des courants I_s , I_{sh} et I_r sont les suivants:

$$\bar{I}_s = \frac{(\bar{Z}_2 + jX_t)\bar{V}_s - \bar{Z}_2\bar{V}_{sh} - jX_t\bar{V}_r}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + jX_t + (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \quad (9)$$

$$\bar{I}_{sh} = \frac{-\bar{Z}_2\bar{V}_s + (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)\bar{V}_{sh} - \bar{Z}_1\bar{V}_r}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + jX_t + (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \quad (10)$$

$$\bar{I}_r = \frac{jX_t + \bar{Z}_1\bar{V}_{sh} - (\bar{Z}_1 + jX_t)\bar{V}_r}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + jX_t + (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \quad (11)$$

Les puissances injectées par la source V_s peut être calculée à partir des équations:

$$P = \text{Re}(\bar{V}_s \cdot \bar{I}_s^*) = \text{Re} \left[\bar{V}_s \times \left(\frac{(\bar{Z}_2 + jX_t)\bar{V}_s - \bar{Z}_2\bar{V}_{sh} - jX_t\bar{V}_r}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + jX_t + (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \right)^* \right] \quad (12)$$

$$Q = \text{Im}(\bar{V}_s \cdot \bar{I}_s^*) = \text{Im} \left[\bar{V}_s \times \left(\frac{(\bar{Z}_2 + jX_t)\bar{V}_s - \bar{Z}_2\bar{V}_{sh} - jX_t\bar{V}_r}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + jX_t + (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \right)^* \right] \quad (13)$$

La puissance nominale du STATCOM dépend de la puissance réactive demandée pour la compensation au point

de connexion. Le calcul de la répartition de charge (écoulement de puissance) détermine la tension du jeu de barre à réguler et la quantité de la puissance réactive nécessaire pour atteindre cet objectif [3-6].

Le schéma de teste du réseau de transport de l'énergie électrique utilisé pour valider le fonctionnement du STATCOM est représenté par la figure suivante:

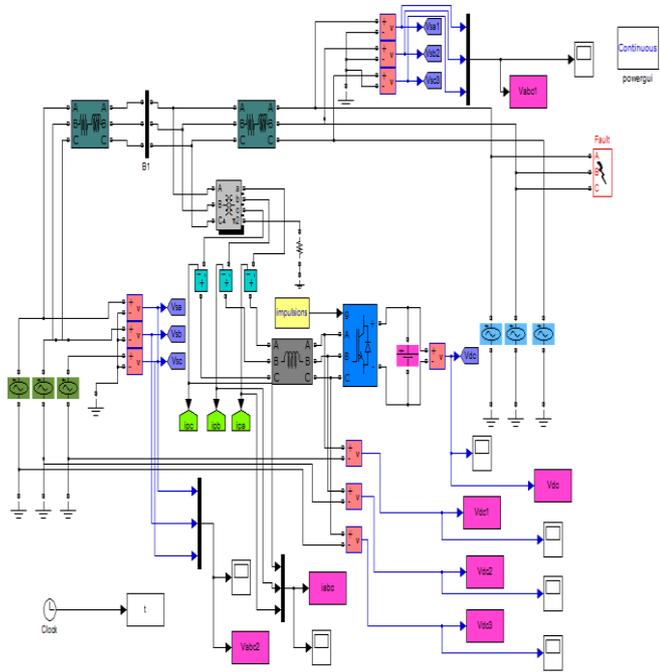


Fig. 5: Modèle d'un STATCOM sous Matlab/Simulink pour la compensation dans une ligne électrique en présence d'un défaut

Les figures 6, 7 et 8 montrent respectivement la variation de la tension V_s en présence d'un défaut temporaire, puis une variation de l'amplitude et enfin une variation dans la fréquence et l'amplitude en même temps à cause d'un défaut.

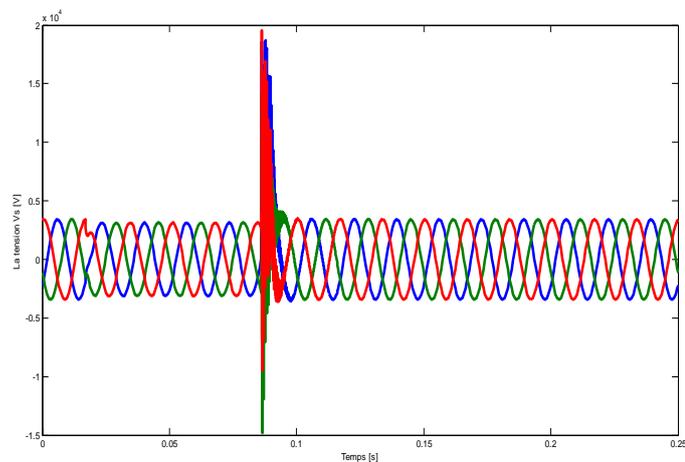


Fig. 6: Les tensions de sources (V_s) en présence d'un défaut temporaire

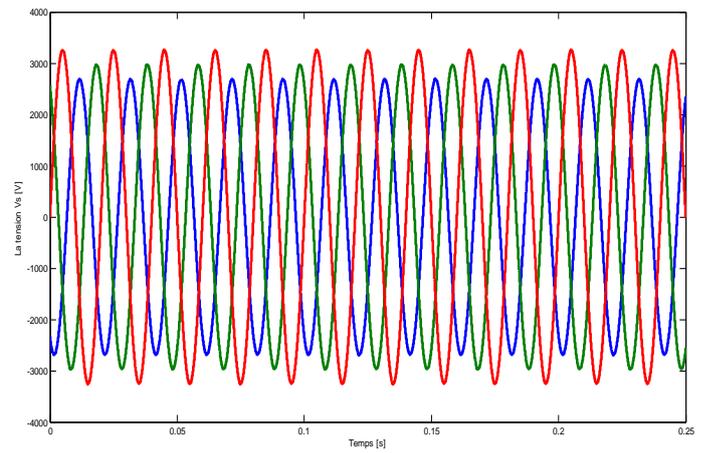


Fig. 7: Les tensions de sources (V_s) en présence d'un défaut d'amplitude

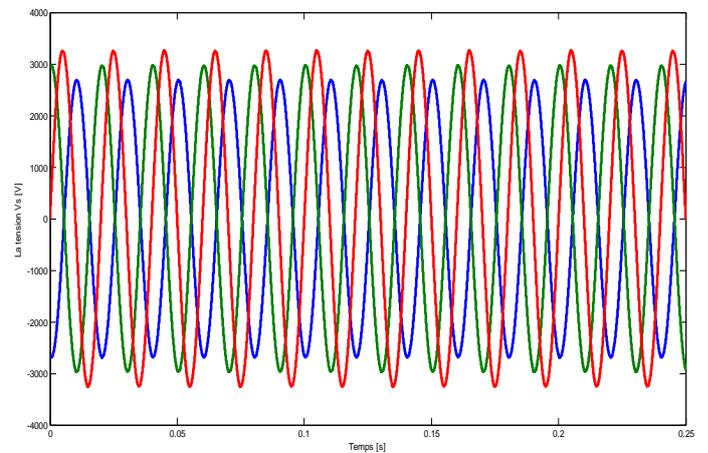


Fig. 8: Les tensions de sources (V_s) en présence d'un défaut de fréquence et d'amplitude

Normalement la tension en sortie de l'onduleur est un signal rectangulaire d'amplitude $\pm V_{dc}$ et de rapport cyclique variant comme le signal modulant, donc de manière sinusoïdale.

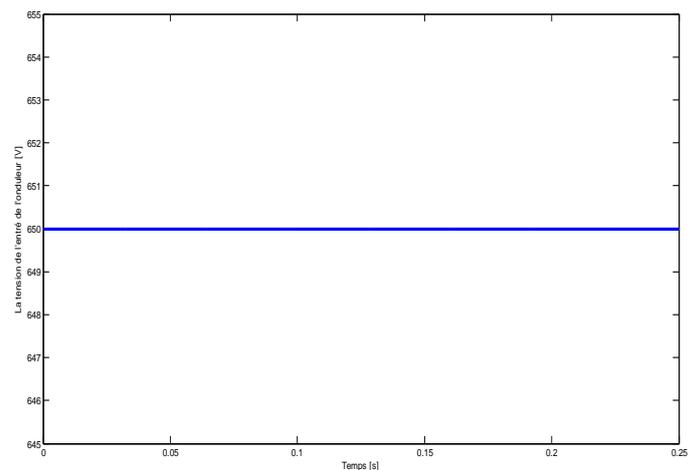


Fig. 9: La tension d'entrée de l'onduleur

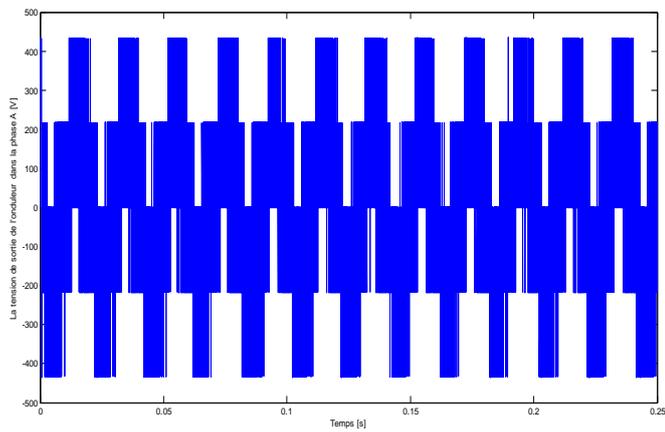


Fig. 10: La tension de sortie de l'onduleur

Les courants superposés sur leurs références et les courants dans les trois phases ABC sont données par les figures suivantes:

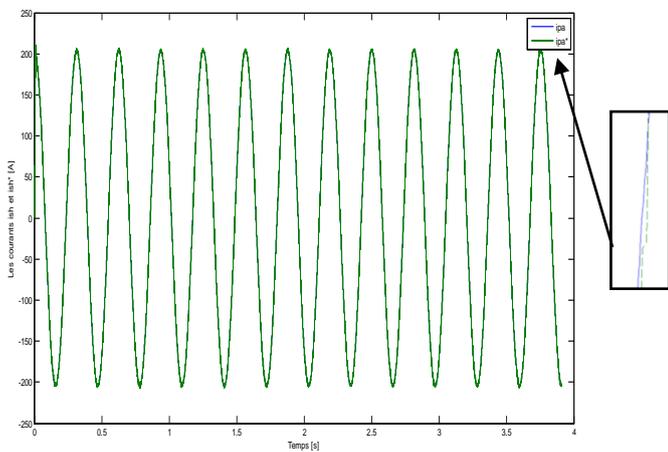


Fig. 11: Les courants ish et ish*

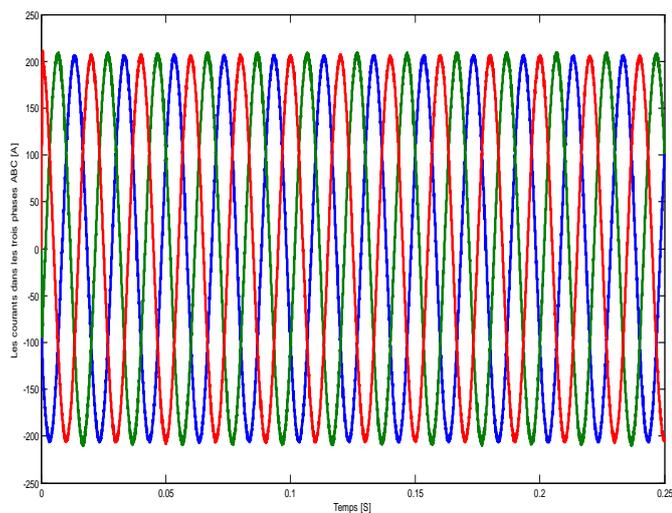


Fig. 12: Les courants dans les trois phases ABC

Les puissances injectées par le STATCOM sont la puissance réactive Q_{sh}^* calculée en fonction de la chute de tension et la puissance active P_{sh}^* représentant les pertes joules dans le circuit continu et des interrupteurs dans l'onduleur.

Ces puissances qui sont les images des courants (I_{shd}^* , I_{shq}^*) active et réactive qu'on a déterminé depuis le système d'équation suivant écrit dans le référentiel tournant au synchronisme (d, q):

$$\begin{bmatrix} I_{shd}^* \\ I_{shq}^* \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{V_d^2 + V_q^2} \begin{bmatrix} V_d & -V_q \\ V_q & V_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{shd}^* \\ Q_{shq}^* \end{bmatrix} \quad (14)$$

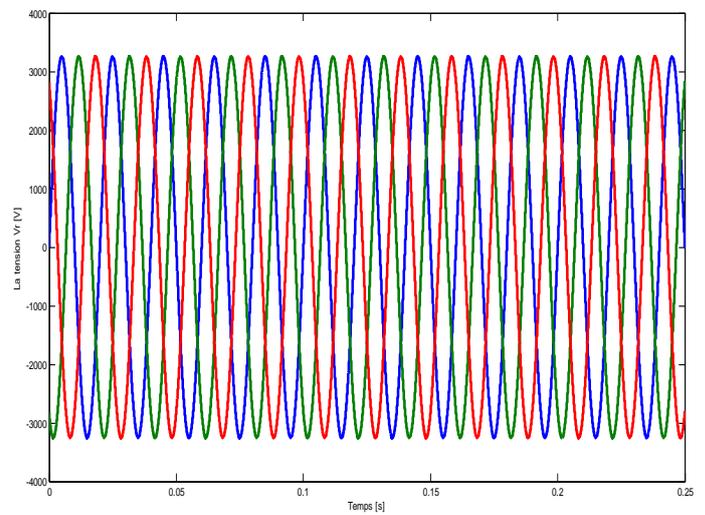


Fig. 13: Les tensions du récepteur (Vr)

D'après les résultats présentés dans la figure 13, on remarque que les tensions du récepteur sont équilibrées et cela est réalisé par la compensation du STATCOM. On rappelle que la fonction principale du STATCOM est de maintenir la tension constante aux bornes du condensateur. Donc le contrôle avec un STATCOM se fait par le réglage de l'erreur entre la tension continu et sa référence. Lorsqu'on remplace le condensateur par une source de tension continue, le contrôle du STATCOM est dit parfait.

L'effet de la compensation de l'énergie réactive se répercute directement sur le transit de la puissance active dans la ligne. La fourniture de l'énergie réactive au point de consommation permet un transit plus important de la puissance active en minimisant le flux de puissance réactive dans la ligne de transport. La tension du jeu de barre où ce dispositif est connectée, est régulée à la valeur de la tension V_r . L'erreur statique entre cette tension V_r réglée et la tension de référence V_s est due aux simplifications effectuées dans l'expression de la puissance réactive de

référence $Q_{sh}^* = \frac{V_s * \Delta V}{X}$ demandée à injecter par le contrôleur STATCOM. La figure 14 représente la puissance réactive Qsh et Qsh* du STATCOM.

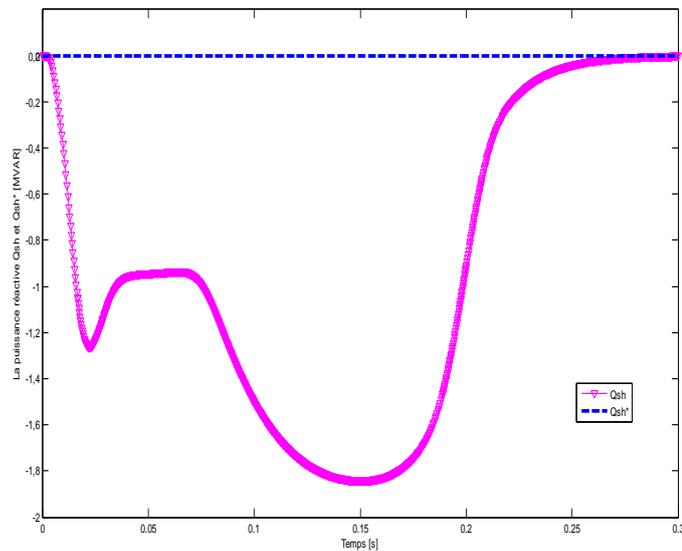


Fig. 14: La puissance réactive Qsh et Qsh* du STATCOM

III. CONCLUSION

Le développement de l'électronique de puissance a permis d'améliorer la gestion des réseaux électriques en introduisant un nouveau concept par le système FACTS qui est le STATCOM, avec lequel le contrôle de la puissance réactive dans les lignes est atteint et performé par l'injection de la tension ou du courant d'un onduleur conçu avec des interrupteurs statiques modernes. De plus ce dispositif n'échange pas d'énergie active avec le réseau et la compensation n'est pas faite par des condensateurs connectés directement au réseau électrique ce qui élimine totalement le problème de résonance synchrone qui nuit le transport électrique.

Cette étude nous a permis de juger ce dispositif très bénéfique pour les réseaux électriques en démontrant une flexibilité dans la compensation de la puissance réactive basée sur la commande MLI d'un onduleur qui représente l'élément constitutif de base du STATCOM.

REFERENCES

- [1] K. El Yassini-Aabie et Z. M. Raissouli, "Outils d'Aide à la Décision pour la Planification des Réseaux de Distribution de l'Énergie Électrique", *Conférence TAMTAM'09, Revue ARIMA*, Vol. 13, 2010, pp. 105-118
- [2] H. Bounechba, "Contrôle des Puissances par UPFC dans un Réseau Électrique", *Projet FDM, Université Mentouri de Constantine, Algérie*, 2011.
- [3] M. Belatel et R. Gherrez, "Étude de la compensation dans les réseaux électriques par un Statcom", *Université des frères Mentouri, Constantine, Algérie*, 2015.

- [4] A. Alibi, H. Laib et L. Delendi, "Apport des FACTS pour la Compensation Shunt dans un Réseau Électrique: Modélisation et Commande d'un STATCOM", *Revue des Sciences de la Technologie, RST*, Vol. 2, N°. 1, 2011, pp.111-120.
- [5] M.S. Eimoursi and A. M. Sharaf, "Voltage Stabilization and Reactive Compensation Using a Novel FACTS- STATCOM Scheme", *CCECE/CCGEI Conference*, Saskatoon, May 2005.
- [6] G. Sundar and S. Ramareddy, "Digital Simulation of Multilevel Inverter Based STATCOM", *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2009, pp. 10-24.