

III.1. Introduction

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.

Dans cette partie, la modélisation du compensateur statique d'énergie réactive de type avancé STATCOM est présentée. Nous commençons la modélisation par la présentation et la simplification des équations mathématiques afin d'aborder le contrôle de notre système dans le repère triphasé ABC et dans le repère de Park d-q.

III.2. Static Synchronous Compensator (STATCOM)

III.2.1. Description

Le concept de base du STATCOM a été proposé par Gyugyi en 1976. Les premiers STATCOM, à base de convertisseurs de deux niveaux, appliqués dans les réseaux de transports sont:

- le STATCOM de ± 80 MVAR appliqués à un réseau de transport de 154KV à Inuyama au Japon et à 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.

Le STATCOM est la version des SVC composé d'un convertisseur de tension à base de semi-conducteur de haute technologie (IGBT, IGCT) associé à un condensateur comme source de tension continue et l'ensemble connecté en parallèle au réseau par le biais d'un transformateur de couplage comme représenté dans la figure (III.1) [30].

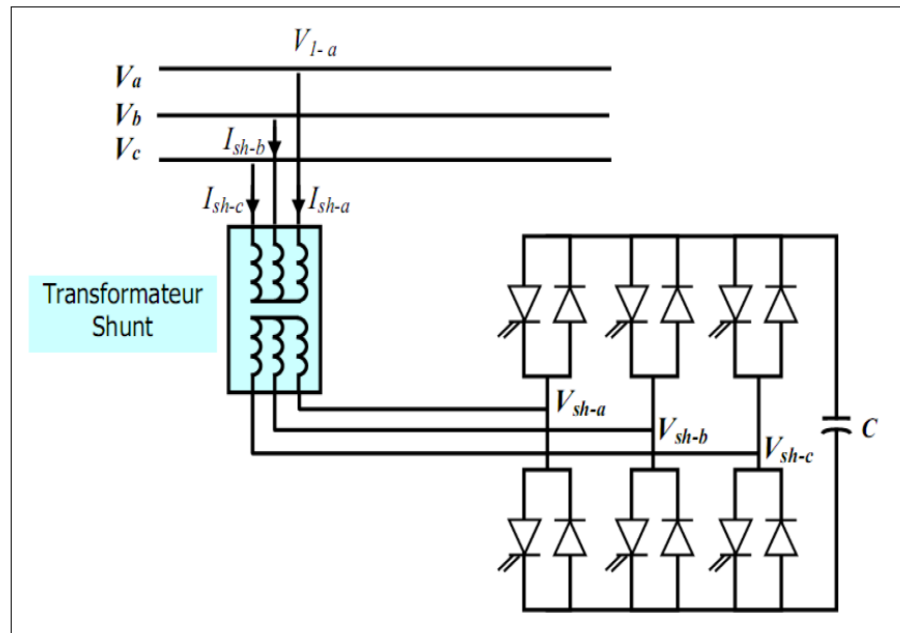


Figure III. 1: structure de base d'un STATCOM couplé au réseau

IEEE définit le STATCOM (Static Synchronous Compensator) comme un générateur synchrone fonctionnant comme un compensateur parallèle de l'énergie réactive dont le courant capacitif ou inductif généré peut être contrôlé séparément de réseaux, afin de faciliter la tenue de tension, d'accroître la stabilité en régime transitoire et d'amortir les oscillations de puissance [31]

III.2.2. Le STATCOM présente plusieurs avantages

- bonne réponse à faible tension : le STATCOM est capable de fournir son courant nominal, même lorsque la tension est presque nulle.
- bonne réponse dynamique : Le système répond instantanément.
- L'étendue de la plage de l'opération est plus large qu'avec un SVC classique.
- Pour un contrôle optimal de la tension, les phases sont contrôlées séparément pendant les perturbations du système.
- Un design modulaire du convertisseur permet une adaptation pour une grande plage de puissance [8].

III.2.3. Principe de Fonctionnement

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 comme le résume la figure (III.2) [30]

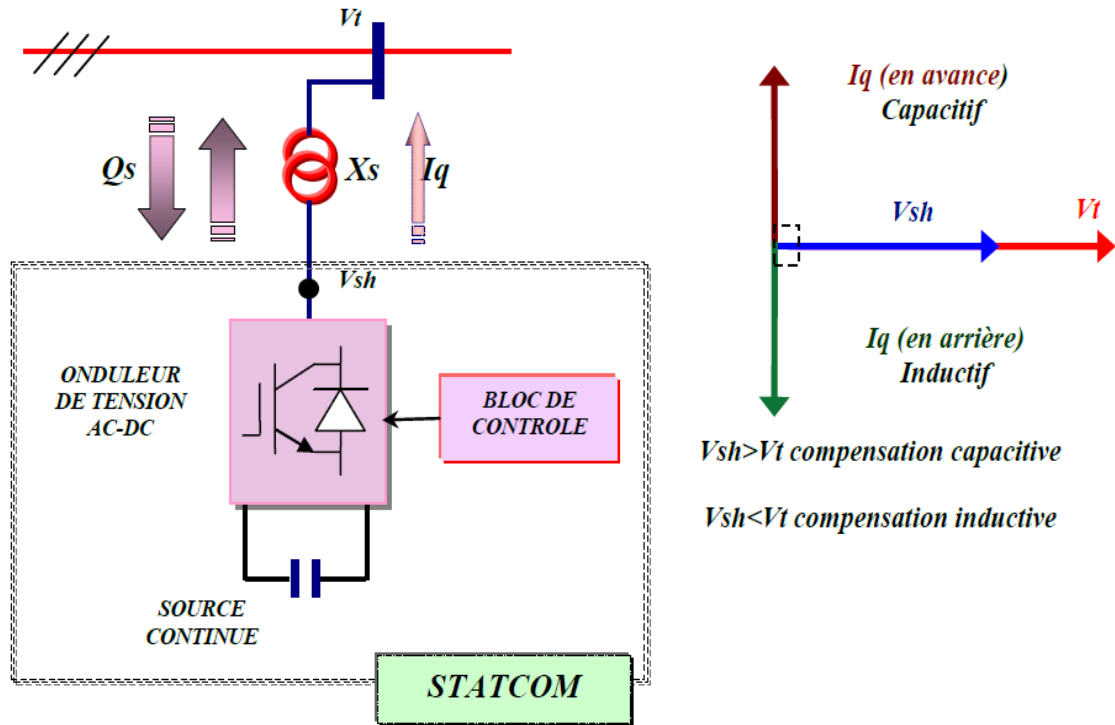


Figure III. 2: STATCOM (Static Synchronous Compensator)

L'échange d'énergie réactive se fait par le contrôle de la tension de l'onduleur V_{sh} , qui est en phase avec la tension du jeu de barre là où le STATCOM est connecté V_t . Le fonctionnement peut être décrit comme suit :

L'écoulement des puissances active et réactive, entre ces deux sources de tension est donné par :

$$\triangleright P = \frac{V_t V_{sh}}{X_{sh}} \sin \delta \quad (III.1)$$

$$\triangleright Q = \frac{V_t}{X_{sh}} (V_t - V_{sh} \cos \delta) \quad (III.2)$$

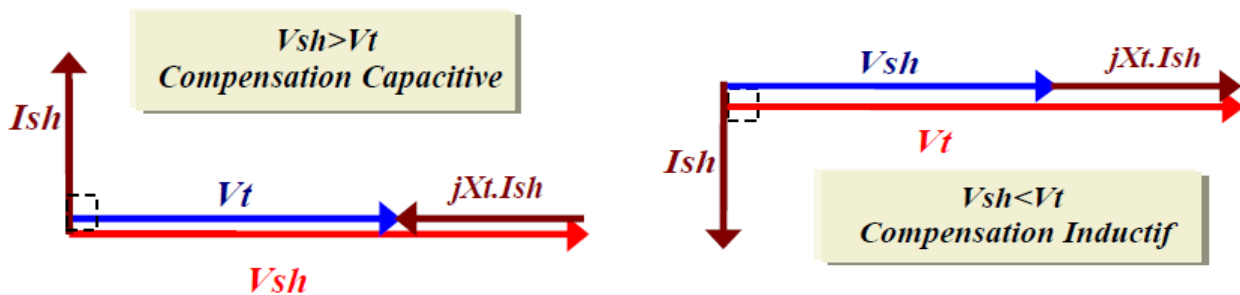
Avec l'hypothèse d'un STATCOM idéal (convertisseur sans pertes), la contrainte de fonctionnement que doit satisfaire le STATCOM est de ne pas échanger la puissance active avec le réseau.

La condition est : $(\delta = 0)$

D'après cette condition la tension injectée par le STATCOM V_{sh} doit être en phase avec la tension du jeu de barre de raccordement.] [30].

A partir des équations (III.1) et (III.2) On peut envisager trois cas possibles en considérant:

- Si le module de la tension du STATCOM V_{sh} égale le module de la tension V_t u réseau aucun transfert de l'énergie n'est effectué.
- Si $V_{sh} > V_t$ donc $Q_{sh} > 0$, le STATCOM fonctionne en mode capacitif et fournit une puissance réactive au réseau.
- Si $V_{sh} < V_t$ $Q_{sh} < 0$, le STATCOM dans ce cas absorbe la puissance réactive a partir du réseau et fonctionne en mode inductif



NB: 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.

III.3. Circuit principal du STATCOM

Le STATCOM proposé est un convertisseur à MLI (Modulation de largeur d'impulsion) continu - alternatif donné par la figure (III.1). Son circuit principal est constitué par un onduleur à source de tension relié au réseau électrique par l'intermédiaire d'une réactance relativement faible X_s (qui est habituellement constituée par l'inductance de fuite par phase du transformateur de couplage), la partie continue est connectée à un condensateur jouant le rôle d'accumulateur d'énergie.

L'onduleur, qui est la pièce maîtresse du STATCOM, est constitué par douze commutateurs à semi-conducteurs commandables à l'ouverture et à la fermeture. Chaque commutateur est shunté par une diode branchée en antiparallèle.

La figure (III.3) représente le schéma du circuit équivalent du STATCOM dans cette représentation L_s est l'inductance de fuite par phase du transformateur reliant le STATCOM au réseau, R_s représente les pertes actives du transformateur et de l'onduleur. Dans la partie continue C représente la capacité du condensateur jouant le rôle d'accumulateur d'énergie. V_{oa} et V_{sa} sont les amplitudes des fondamentales des tensions de sortie de l'onduleur et celle du réseau respectivement [33]

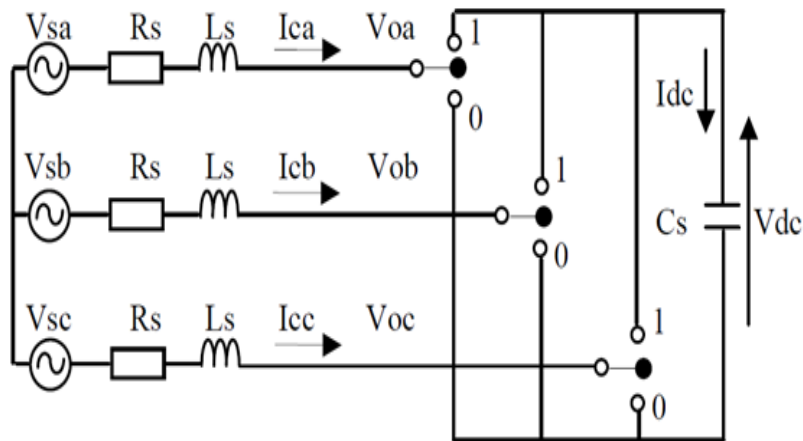


Figure III. 3:Circuit équivalent du STATCOM

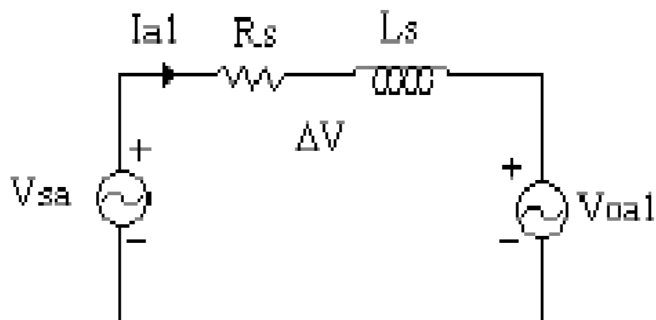


Figure III. 4:Circuit monophasé équivalent du STATCOM

Avec :

V_{sa} : Tension simple du réseau.

V_{oa1} : Composante fondamentale de la tension de sortie du STATCOM.

I_{a1} : Composante fondamentale du courant du STATCOM.

III.4. Modélisation du STATCOM

La modélisation du STATCOM est simplifiée en utilisant le circuit représenté par la figure (III.3) ainsi que le circuit équivalent monophasé représenté par la figure (III. 4). La modélisation de ce circuit est basée sur les hypothèses suivantes :

- Tous les interrupteurs sont supposés idéals.
- Les trois tensions de la source alternative sont équilibrées.
- Toutes les chutes de tensions dans le compensateur sont représentées par les résistances R_s .
- Les harmoniques causés par l'action d'ouverture et de fermeture des interrupteurs sont supposés négligeables.

En utilisant la représentation matricielle sur le système d'axe abc le modèle mathématique du STATCOM est donné par le système d'équations suivant :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s/L_s & 0 & 0 \\ 0 & -R_s/L_s & 0 \\ 0 & 0 & -R_s/L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} v_{sa} & -v_{oa} \\ v_{sb} & -v_{ob} \\ v_{sc} & -v_{oc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.3})$$

Les tensions générées par l'onduleur sont données par (III.2)

$$\begin{bmatrix} v_{oa} \\ v_{ob} \\ v_{oc} \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{III.4})$$

Le modèle matriciel du côté continu est

donné par :

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{i_{dc}}{C} \quad (\text{III.5})$$

Le modèle du compensateur à base de l'onduleur est complètement défini par les équations (III.3), (III.4) et (III.5) (38)

III.4.1. Modèle du compensateur sur les axes d-q

Nous allons procéder à la transformation des axes abc vers les axes d-q du modèle établi au paragraphe précédent. Cette transformation va se faire en considérant les hypothèses simplificatrices suivantes [5].

- Les GTO sont considérés comme des interrupteurs idéaux.
- La source est équilibrée.
- Les harmoniques générées par les GTO sont négligées.

La source de tension triphasée V_{ABC} et la matrice de transformation de Park P sont respectivement définies comme suit :

$$V_{ABC} = \begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} V_L \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (\text{III.6})$$

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \alpha) & \cos(\omega t - 2\pi/3 + \alpha) & \cos(\omega t + 2\pi/3 + \alpha) \\ \sin(\omega t + \alpha) & \sin(\omega t - 2\pi/3 + \alpha) & \sin(\omega t + 2\pi/3 + \alpha) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

Avec :

- V_L Tension efficace composée.
- w Pulsation de la source.

La tension délivrée par l'onduleur en absence d'harmoniques est représentée par :

$$v_{OABC} = \begin{bmatrix} v_{OA} \\ v_{OB} \\ v_{OC} \end{bmatrix} = F \cdot v_{dc} \quad (\text{III.8})$$

Avec F fonction de commutation définie par la relation (III.9)

$$F = \sqrt{\frac{2}{3}} D \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \alpha) \\ \sin(\omega t - 2\pi/3 + \alpha) \\ \sin(\omega t + 2\pi/3 + \alpha) \end{bmatrix} \quad (\text{III.9})$$

$$IM = \sqrt{2/3} D \quad (\text{III.10})$$

Avec D : indice de modulation dans les axes de

Park

L'inverse de la matrice P est égal à sa transposée.

$$P^{-1} = P^T$$

(III.11)

L'équation de la source

devient :

$$V_{qd0} = P \cdot V_{ABC} = V_L \begin{bmatrix} -\sin \alpha \\ \cos \alpha \\ 0 \end{bmatrix}$$

(III.12)

celle de l'onduleur devient :

$$v_{oqd0} = P \cdot v_{OABC} = \begin{bmatrix} 0 \\ D \\ 0 \end{bmatrix} \cdot v_{dc}$$

(III.13)

La relation (III.3) transformée sur les axes d-q donne la relation (III.14)

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s/L_s & -\omega \\ \omega & R_s/L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_q - v_{oq} \\ v_d - v_{od} \end{bmatrix}$$

(III.14)

Remplaçons (III.12) et (III.13) dans (III.15) on obtient :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R/L & -\omega \\ \omega & R/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} -V_L \sin \alpha \\ V_L \cos \alpha - D \cdot U_c \end{bmatrix}$$

(III.15)

D'après (III.15) on constate que le paramètre de contrôle α se présente sous la forme de $\sin \alpha$ et $\cos \alpha$. On est donc en présence d'un système non linéaire.

III.4.2. Modèle linéaire

Nous linéarisons le système d'équation d'état (III.15) autour d'un point de fonctionnement, en prenant en considération les hypothèses suivantes.

- La variation de α autour de zéro.
- La variation $\Delta\alpha$ petite ($|\Delta\alpha| < 5^\circ$)
- Les termes de perturbation du second ordre négligés.

La notation Δ est introduite pour indiquer une valeur perturbée.

Les relations de (III.16) à (III.20) sont introduites dans le système (III.15).

$$i_q = i_{qo} + \Delta i_q$$

(III.16)

$$i_d = i_{do} + \Delta i_d \quad (\text{III.17})$$

$$v_{dc} = v_{dco} + \Delta v_{dc} \quad (\text{III.18})$$

$$\alpha = \alpha_o + \Delta \alpha \quad (\text{III.19})$$

$$Q = Q_o + \Delta Q \quad (\text{III.20})$$

Le système d'état linéarisé est donné par la relation (III.21)

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta i_{qo} \\ \Delta i_{do} \\ \Delta U_{co} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & -\omega & 0 \\ \omega & -R/L & -D/L \\ 0 & D/2C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{qo} \\ \Delta i_{do} \\ \Delta U_{co} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} -V_L \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \Delta \alpha \quad (\text{III.21})$$

$$\Delta Q = \begin{bmatrix} -V_L & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{qo} \\ \Delta i_{do} \\ \Delta v_{dco} \end{bmatrix} \quad (\text{III.22})$$

III.5. Synthèse des Réglages du STATCOM

III.5.1. Réglage proportionnel-Intégral (PI)

A partir du système d'équations d'état (III.21) et (III.22) nous déterminons la fonction de transfert du système qui lie la puissance réactive à l'angle de commande $\Delta \alpha$, en utilisant la transformée de Laplace on aura :

$$G(s) = \frac{\Delta Q_c(s)}{\Delta \alpha(s)} = \frac{A(s)}{B(s)} \quad (\text{III.23})$$

$$A(s) = \frac{V_L^2}{L} \left[s^2 + \frac{R}{L} s + \frac{D^2}{LC} \right]$$

$$B(s) = s^3 + \frac{R}{L} s^2 + \left\{ \left[\frac{R}{L} \right]^2 + \frac{D^2}{LC} + \omega^2 \right\} s + \frac{D^2 R}{L^2 C}$$

La figure (III.9) représente la réponse en boucle ouverte de $G(s)$, en prenant comme paramètres du système ceux donnés par le tableau (III.1). On constate que la réponse est lente, il faut au moins de 250 ms (15 cycles) pour atteindre le régime établi.

Signification	Symbole	Valeur
Fréquence réseau	F	50 [Hz]
Tension composée efficace du réseau	V_L	220[v]
Résistance représentant les pertes Totale	R_s	1
Inductance de liaison	L	5 [mH]
Capacité	C	500
Indice de Modulation	$\sqrt{\frac{2}{3}} D$	1.2

Tableau III. 1:Pramaitre du circuit

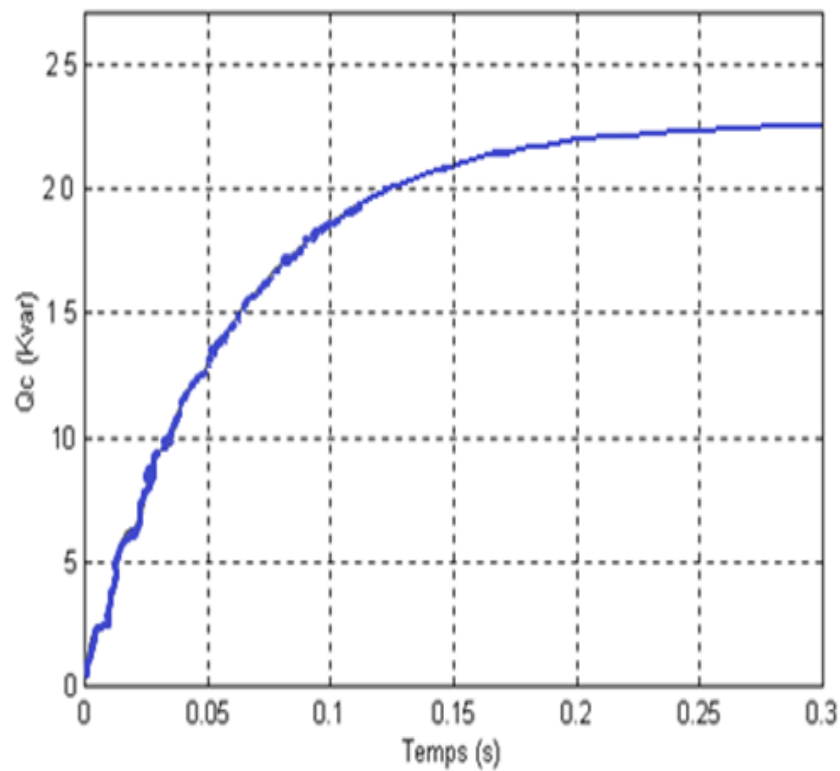


Figure III.5:Réponse en boucle ouverte.

III.5.2.Détermination des paramètres du régulateur PI

La fonction de transfert du régulateur PI est :

$$F_{PI}(s) = K\left(1 + \frac{1}{T_i s}\right)$$

La fonction de transfert en boucle fermée du régulateur PI associé à la fonction de transfert $G(s)$ est donnée par :

$$[F_{PI} \cdot G]_{BF}(s) = \frac{F_{PI} \cdot G}{1 + F_{PI} \cdot G} \quad (\text{III.24})$$

En prenant $T_i = 0.05$, la valeur de K qui donne une réponse en boucle fermée avec un amortissement $\zeta = 0.707$ est :

$$K = 0.2588$$

Ainsi les paramètres du régulateur PI sont :

$$K_p = K = 7.5 * 10^{-5}$$

$$K_i = \frac{K}{T_i} = 2.09 * 10^{-3}$$

La réponse du système en boucle fermée est illustrée par la figure (III.10).

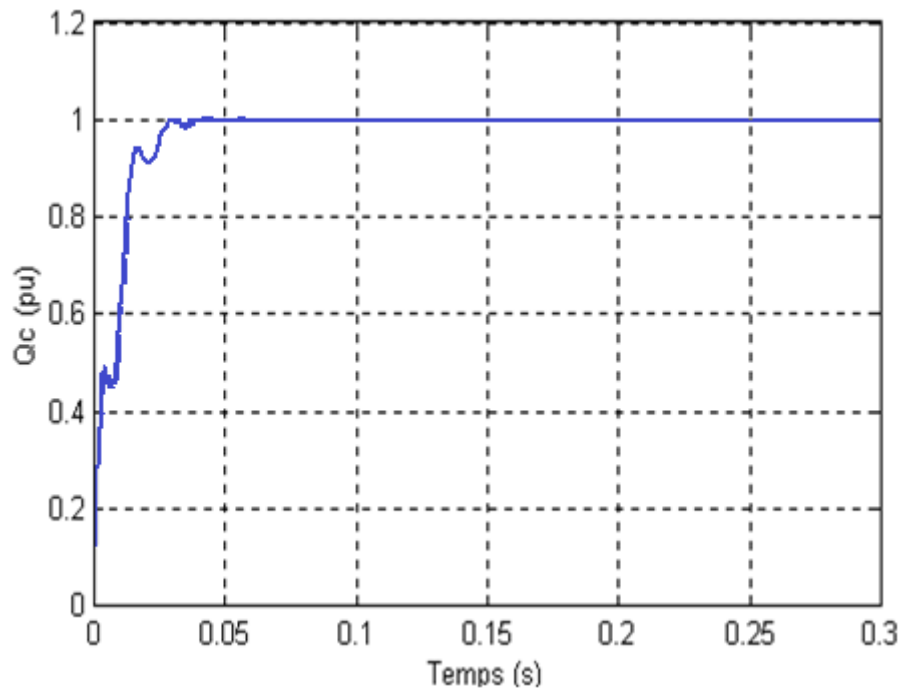


Figure III. 6:Réponse en boucle fermée

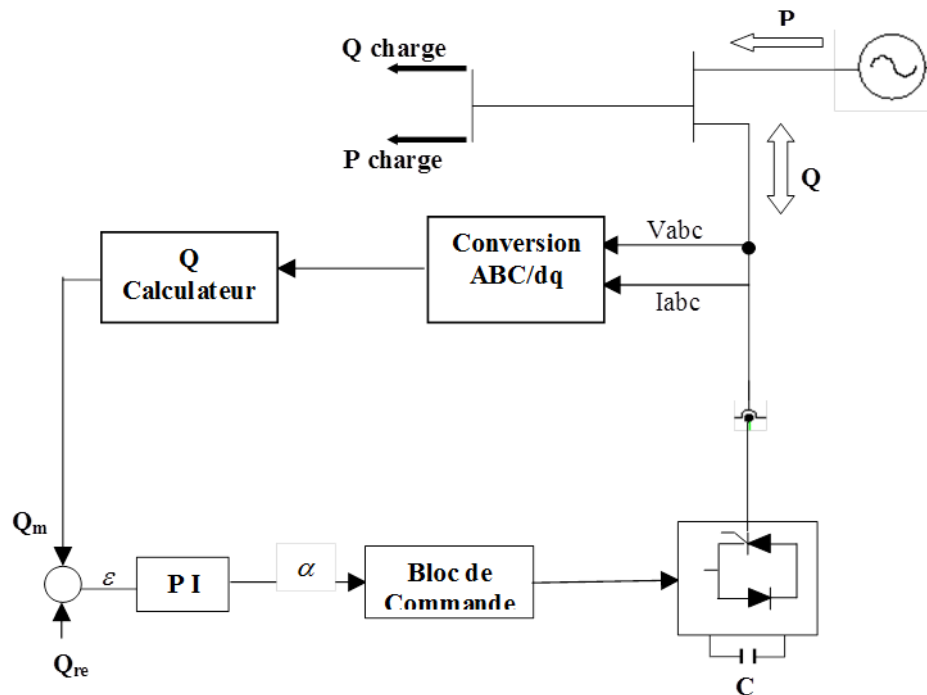


Figure III. 7:Circuit de commande du compensateur.

Résultats de simulation du STATCOM basé à un onduleur à cinq niveaux

Le STATCOM génère un courant capacitif si la tension de sortie de l'onduleur est supérieure à celle du réseau, et il absorbe un courant inductif si sa tension de sortie de l'onduleur est inférieure à celle du réseau, ainsi en faisant varier l'amplitude des tensions de sortie produites par l'onduleur, l'échange d'énergie réactive entre le STATCOM et le réseau peut être aisément réglé. (Le changement de mode se fait à l'instant $t = 1s$).

La figure (III.9) montre le réglage de l'énergie réactive en fonction de l'angle d'amorçage des thyristors qui forment les cellules de l'onduleur de tension deux niveaux qui délivrent à son tour les trois tensions à sa sortie. L'efficacité d'utilisation du régulateur PI est bien illustrée en effet les résultats obtenus sont très satisfaisants on voit bien que le STATCOM régule bien l'énergie réactive et la consigne est bien suivie.

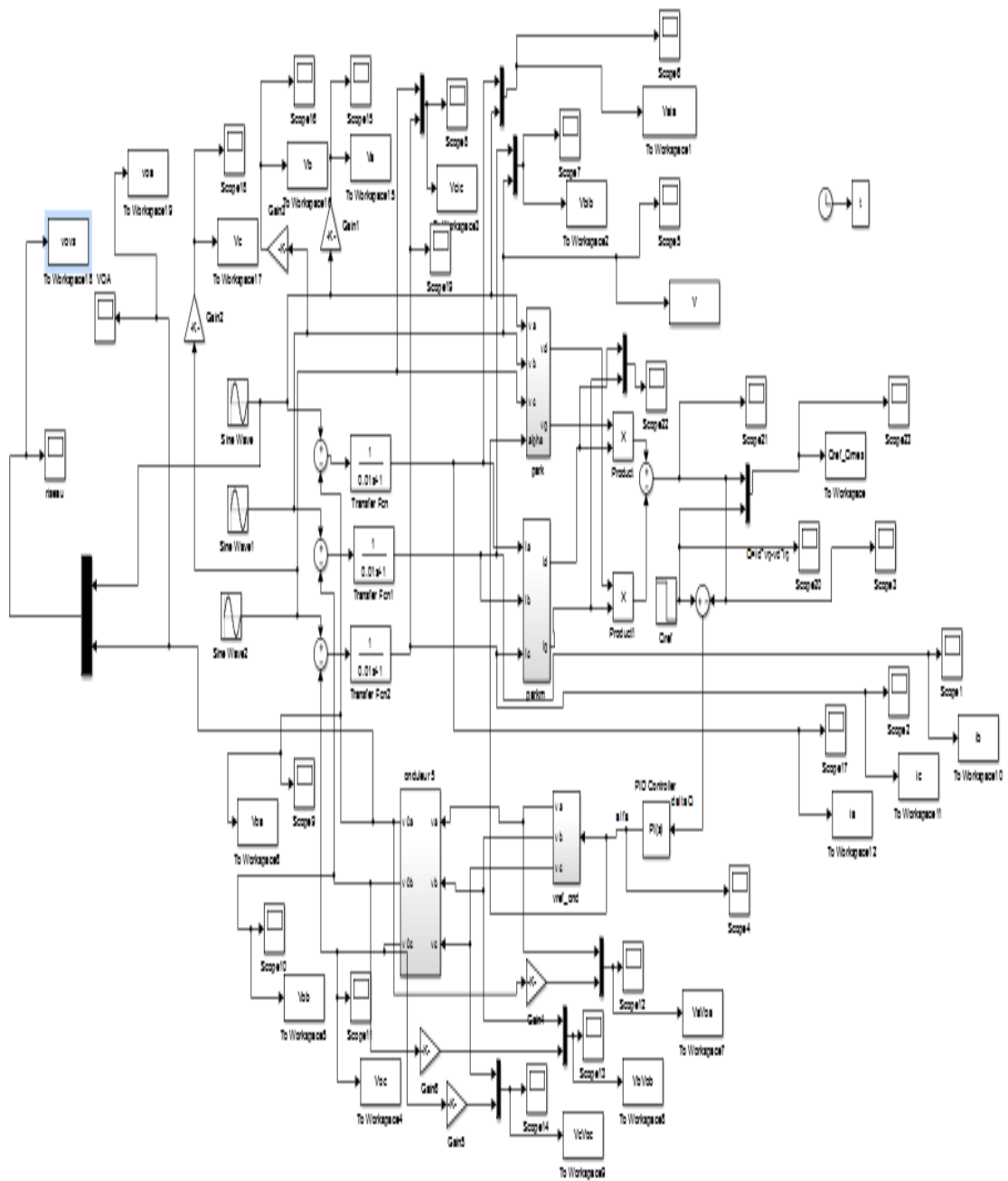


Figure III. 8: Schéma de Simulink du SATATCOM

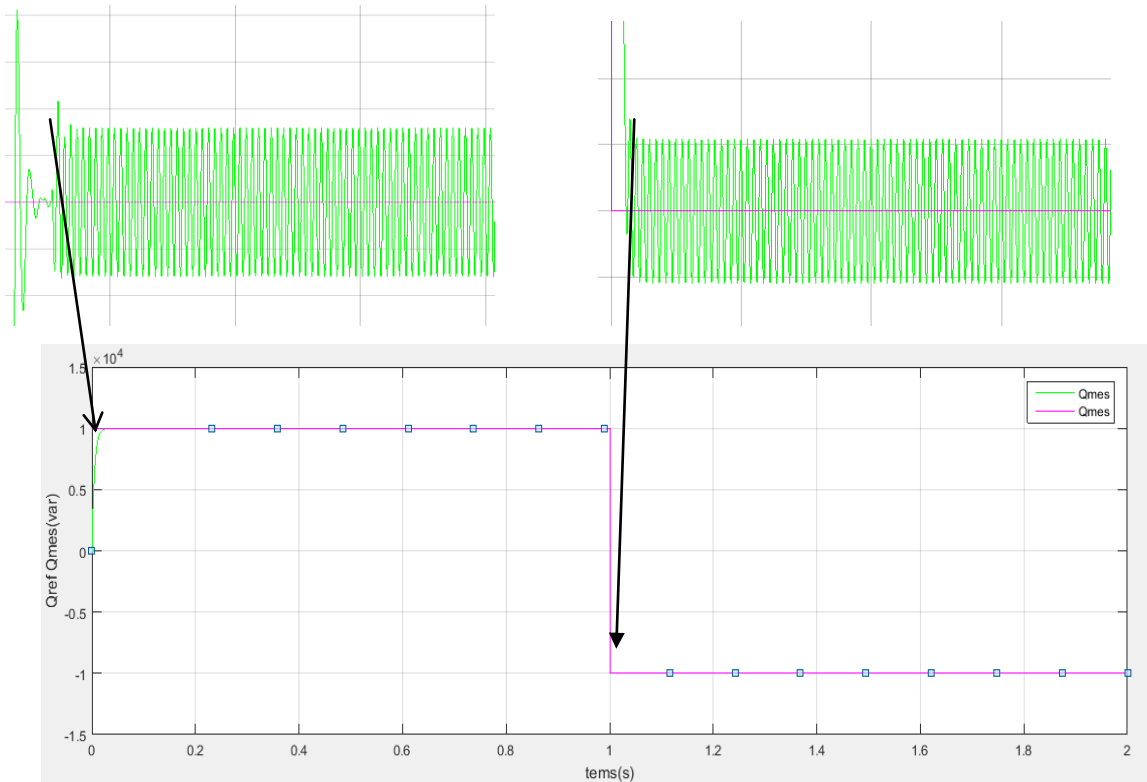


Figure III. 9 : régulation de l'énergie réactive.

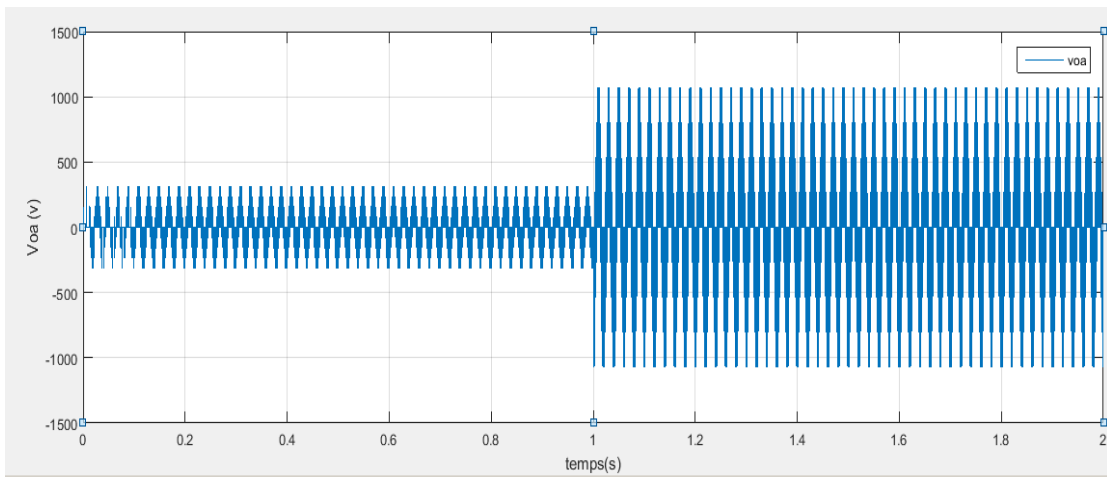


Figure III.10: tension de la sortie de l'onduleur

La figure (III.10) illustre la sortie de l'onduleur, les tensions changent de valeur selon le mode ou se trouve l'onduleur a $t = 1s$ on passe du mode inductif au mode capacitif.

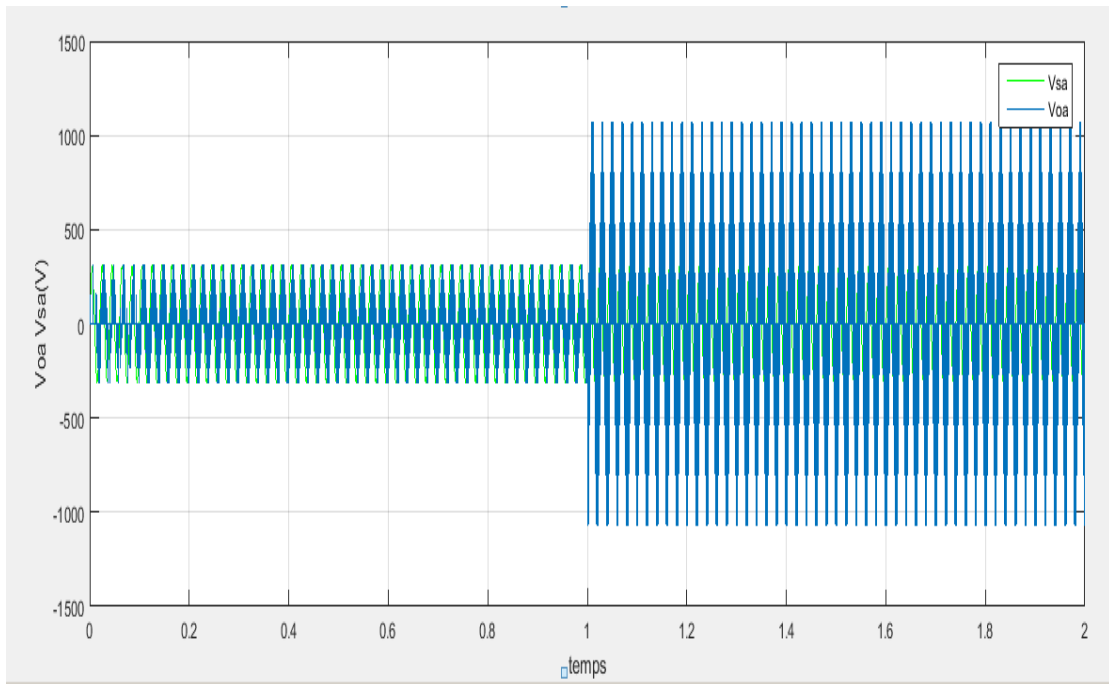
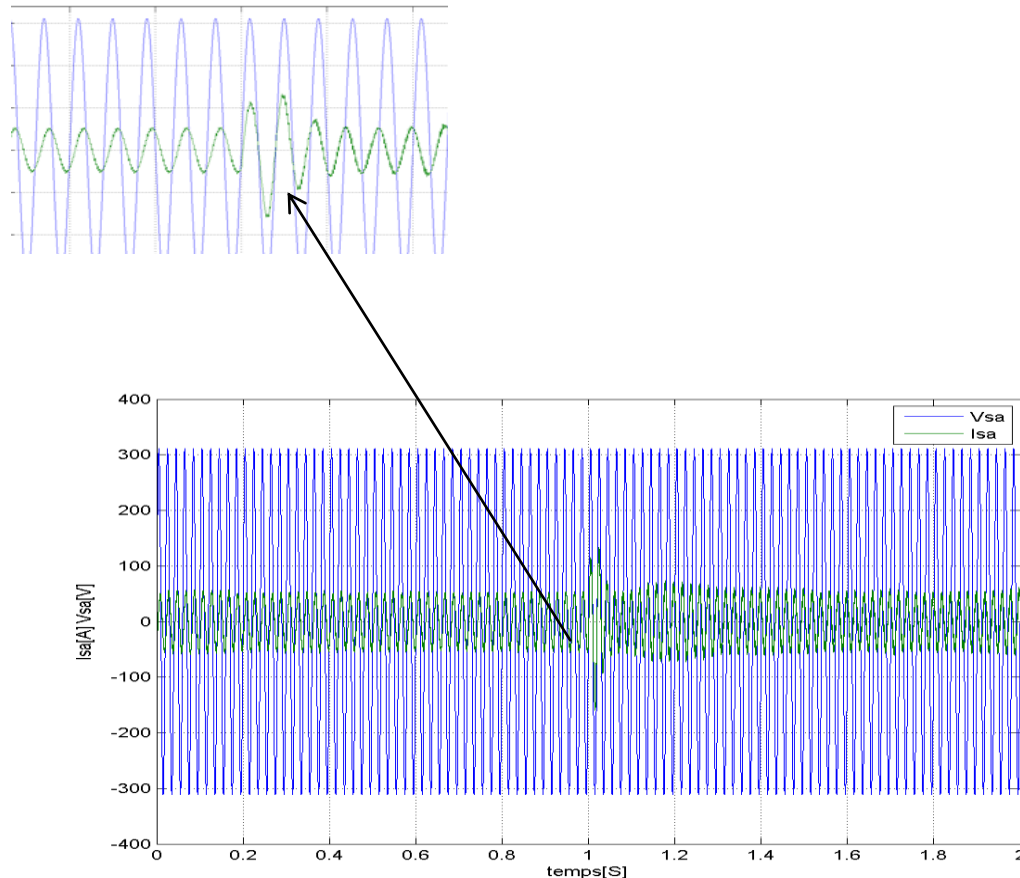


Figure III. 11: tension de l'onduleur avec tension du réseau

La figure (III.11) montre les courbes des tensions de l'onduleur avec la tension d'une phase du réseau. Au mode inductif on voit bien que la tension du réseau est supérieure à la tension de l'onduleur, au passage au mode capacitif, la tension de l'onduleur devient supérieure à celle du rése



La

Figure III. 12: déphasage entre tension et courant dans le réseau.

figure (III.12) illustre bien le déphasage entre tension et courant (voir le zoom), le passage du mode inductif au mode capacitif à l'instant $t = 0.5s$ est bien visible

Le zoom de figure (III.12) donnant les courbes de courant et tension de phase montrent le déphasage lors du passage du mode inductif au mode capacitif dans le point de changement de consigne à l'instant $t = 1s$.

III.6. Conclusion

Le compensateur statique d'énergie réactive de type avancé (STATCOM) est basé sur la technique de l'équivalence exacte avec le compensateur synchrone tournant conventionnel, ce type de compensateur utilise un onduleur à source de tension transformant du continu en alternatif avec un condensateur dans la partie continue utilisé comme un élément de stockage d'énergie.

La modélisation dans le repère triphasé ABC et dans le repère de Park d-q nous a permis de contrôler facilement notre système.

Ce chapitre nous a permis de faire une étude globale sur le compensateur statique d'énergie réactive de type avancé STATCOM, en particulier à l'aboutissement à un modèle mathématique pour une meilleure compréhension du comportement et du fonctionnement de notre compensateur.

