

Contrôle des Transits de Puissance par l'Utilisation d'un UPFC Connecté à une Ligne de Transmission

M. Mezaache, K. Chikhi, et C. Fetha

Université de Batna

Rue Chahid Mohamed El-Hadi Boukhrouf, Batna 05000, ALGERIE

E-Mails: mezaache_mohamed@yahoo.fr, k_chikhi@lycos.com

Abstract—The FACTS systems are elements of fast answer, they give in principle a more flexible control of the power out-flow, they also give the possibility to load the lines of transit to values close to their thermal limit and increase the capacity of transfer of the power of a region to another.

The FACTS technologies involve conversion and switching of power electronics in the range of a few tens to few hundred megawatts. The new state devices such as MOSFETs, IGBTs, GTOs and also other suitable power electronic devices are used as controlled switches in FACTS devices. The universal and most flexible FACTS device is the Unified Power Flow Controller "UPFC", this device is the combination of three compensators characteristic; i.e., impedance, voltage magnitude and phase angle, that are able to produce a more complete compensation [1].

Key-Words—FACTS, MOSFETs, IGBTs, GTOs, UPFC.

Résumé—Les systèmes FACTS sont des éléments de réponse rapide, ils donnent en principe un contrôle plus souple de l'écoulement de puissance, ils donnent aussi la possibilité de charger les lignes de transit à des valeurs près de leur limite thermique et augmentent la capacité de transfert de la puissance d'une région à une autre.

Les technologies des FACTS impliquent la conversion et changer de l'électronique de puissance dans la gamme de quelques dizaine à quelques cent mégawatts. Les nouveaux dispositifs statiques tels que MOSFETs, IGBTs, GTOs et aussi autres dispositifs de l'électronique de puissance convenables sont utilisés pour contrôler les interrupteurs dans les dispositifs FACTS. Le dispositif universel et plus flexible des FACTS est le contrôleur de transit de puissance unifié "UPFC", ce dispositif est la combinaison de trois caractéristiques de compensateurs; c.-à-d., impédance, grandeur de tension et angle de phase, qui est capable de produire une compensation plus complète [1].

Mots Clés—FACTS, MOSFETs, IGBTs, GTOs, UPFC.

I. INTRODUCTION

LE marché de l'énergie déréglementé exige une exploitation flexible des systèmes énergétiques pour assurer que les contrats de fourniture d'électricité puissent être respectés [2].

Parmi les systèmes de compensation et de contrôle appartenant à la famille des FACTS, l'UPFC "Unified Power Flow Controller" est un dispositif plus flexible et complexe qui a émergé pour le contrôle et l'optimisation des réseaux électriques [3].

II. ETUDE ET MODELISATION DE L'UPFC

A. Structure de Base d'un UPFC

L'UPFC est l'union de deux compensateurs, l'un est un compensateur série et l'autre est un compensateur shunt. Son schéma de base est donné par la "Fig. 1" [4], [5].

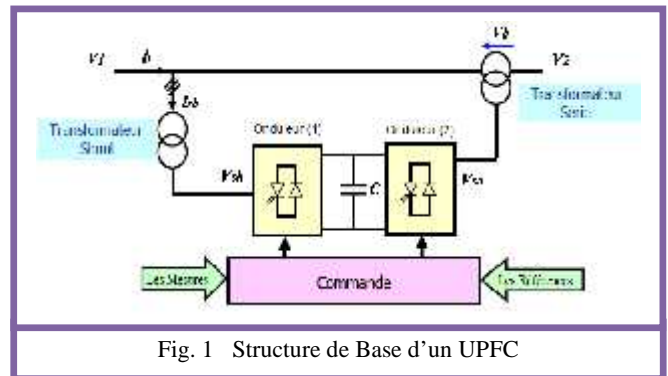


Fig. 1 Structure de Base d'un UPFC

B. Principe de Fonctionnement d'un UPFC

Le réglage de la tension additionnelle " V_b " en amplitude et en phase permet d'obtenir trois modes de fonctionnement de la partie série.

Il fonctionnera comme un régulateur de tension pur si la tension " V_b " insérée est en phase avec la tension " V_2 ", comme indiqué sur la "Fig. 2.a".

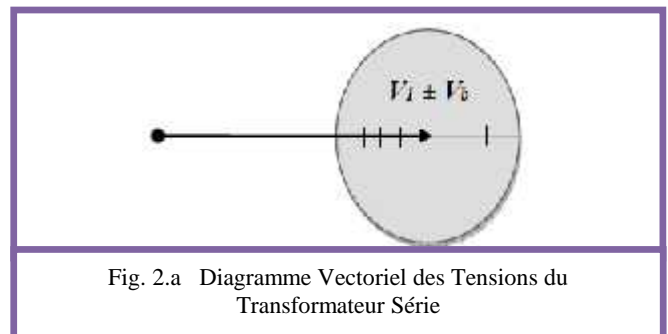


Fig. 2.a Diagramme Vectoriel des Tensions du Transformateur Série

"compensateur série" si la tension additionnelle " V_b " est perpendiculaire au courant de la ligne " i_r ", la "Fig. 2.b".

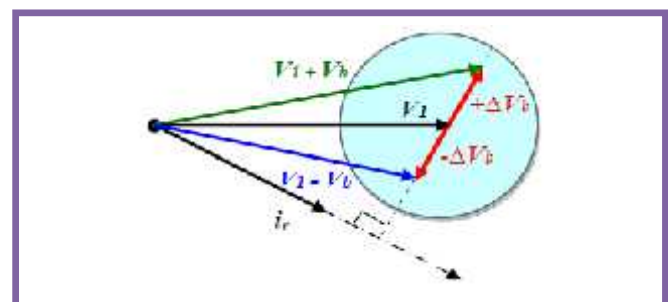


Fig. 2.b Diagramme Vectoriel des Tensions du Transformateur Série

Il fonctionnera comme un régulateur de l'angle de phase si l'amplitude et la phase de la tension injectée "V_b" sont calculées de la manière à obtenir le même module de la tension avant et après l'UPFC, la "Fig. 2.c".

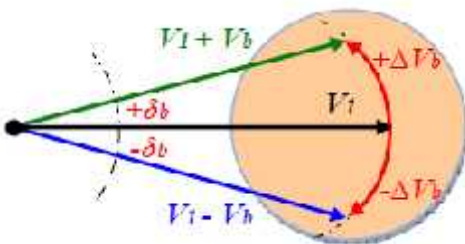


Fig. 2.c Diagramme Vectoriel des Tensions du Transformateur Série

Le but principal de ces trois modes de fonctionnement est le contrôle des puissances actives et réactives qui transitent dans la ligne, de plus, l'UPFC est capable de combiner les différentes compensations et de basculer d'un mode de fonctionnement à un autre, la "Fig. 2.d".

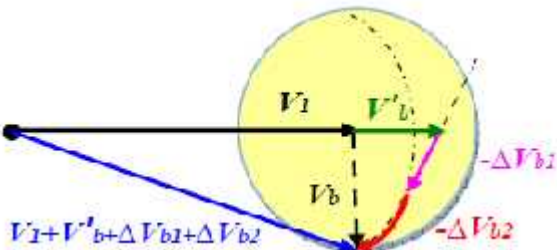


Fig. 2.d Diagramme Vectoriel des Tensions du Transformateur Série

La partie shunt est utilisée afin de compenser la puissance réactive pour maintenir le plan de tension au point de raccordement constant et éventuellement fournir de la puissance active injectée dans le réseau par la partie série [5].

C. Modélisation de l'UPFC

1) Modélisation de la Partie Série de l'UPFC

La "Fig. 3" représente la structure triphasée de la partie série de l'UPFC.

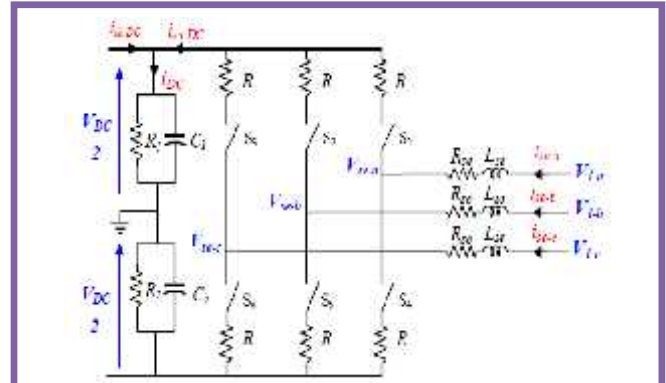


Fig. 3 Schéma Simplifié de la Partie Série de l'UPFC

L'équation (1) illustre la relation entre les courants et les tensions, côté alternatif.

$$L_{se} \begin{bmatrix} \frac{di_{se-a}}{dt} \\ \frac{di_{se-b}}{dt} \\ \frac{di_{se-c}}{dt} \end{bmatrix} + R_{se} \begin{bmatrix} i_{se-a} \\ i_{se-b} \\ i_{se-c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{l-a} \\ V_{l-b} \\ V_{l-c} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{se-a} \\ V_{se-b} \\ V_{se-c} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Nous considérons "w₁, w₂, et w₃" les fonctions de commutation des trois bras de l'onduleur série, définies de la manière suivante:

Pour k ∈ {1, 2, 3}, on a les deux cas suivants:

$$\begin{cases} w_k = 1 & \text{si } S_k \text{ est fermé et } S_{k+3} \text{ est ouvert.} \\ w_k = -1 & \text{si } S_k \text{ est ouvert et } S_{k+3} \text{ est fermé.} \end{cases}$$

De ce fait, la tension "V_{se-a}" s'écrit sous la forme suivante:

$$\begin{bmatrix} V_{se-a} \\ V_{se-b} \\ V_{se-c} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_{se-a} \\ i_{se-b} \\ i_{se-c} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} \frac{V_{DC}}{2} \quad (2)$$

En remplaçant l'équation (2) dans l'équation (1), nous trouvons:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{se-a} \\ i_{se-b} \\ i_{se-c} \end{bmatrix} = \frac{-(R_{se} + R)}{L_{se}} \begin{bmatrix} i_{se-a} \\ i_{se-b} \\ i_{se-c} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{se}} \begin{bmatrix} V_{l-a} \\ V_{l-b} \\ V_{l-c} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_{se}} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} \frac{V_{DC}}{2} \quad (3)$$

La puissance active côté alternatif "P_{se-AC}" s'écrit de la manière suivante:

$$P_{se-AC} = \begin{bmatrix} i_{se-a} & i_{se-b} & i_{se-c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{se-a} \\ V_{se-b} \\ V_{se-c} \end{bmatrix} \quad (4)$$

2) Modélisation de la Partie Shunt de l'UPFC

La structure triphasée de cette partie est identique à celle de la partie série comme indiquée sur la "Fig. 4".

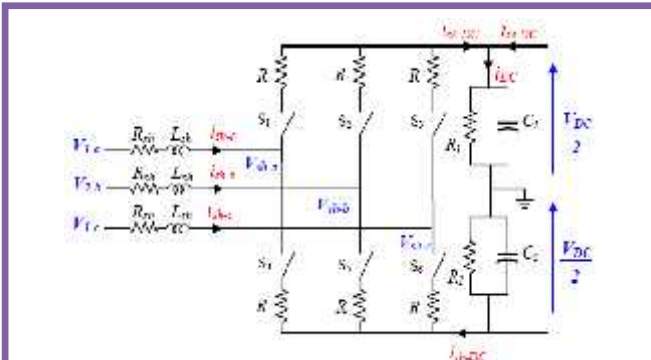


Fig. 4 Schéma Simplifié de la Partie Shunt de l'UPFC

Nous obtenons des résultats similaires à ceux de la partie série [5], [6], et [7].

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sh-a} \\ i_{sh-b} \\ i_{sh-c} \end{bmatrix} = \frac{-(R_{sh} + R)}{L_{sh}} \begin{bmatrix} i_{sh-a} \\ i_{sh-b} \\ i_{sh-c} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \begin{bmatrix} V_{1-a} \\ V_{1-b} \\ V_{1-c} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_{sh}} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} \frac{V_{DC}}{2}. \quad (5)$$

III. SIMULATION DE L'UPFC

La simulation de l'UPFC a été performée dans l'environnement MATLAB/ SIMULINK.

A. Réseau Etudié

Notre réseau est constitué d'un générateur "G" de "400 (KV)" avec une puissance nominale de "1000 (MVA)", connecté au réseau infini à travers une ligne de transport d'énergie électrique de "500 (Km)" de longueur, comme le montre sur la figure suivante:

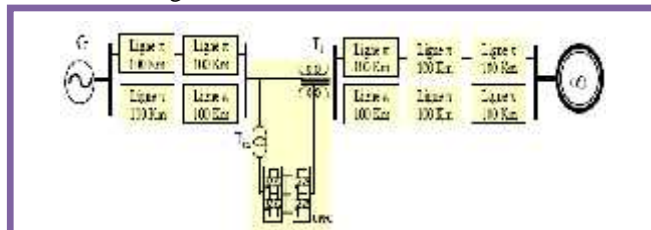


Fig. 5 Schéma du Réseau Etudié

Le schéma équivalent du réseau est présenté par la "Fig. 6" [5], [6].

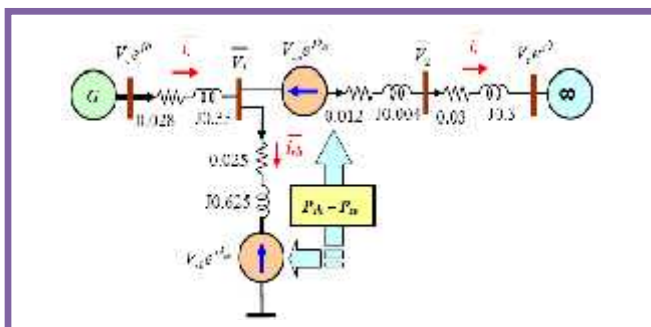


Fig. 6 Schéma Equivalent du Réseau en Grandeurs Réduites

Nous avons utilisé les grandeurs réduites pour simplifier les calculs. La tension du jeu de barre de génération "\$V_s=1\$ (p.u.)", et le système énergétique débite sur une charge "\$P_1=0.9\$ (p.u.), et \$Q_1=0.5\$ (p.u.)" dans un état d'équilibre. A l'instant "\$t=1\$ (s)", nous avons changé les références de puissances pour qu'elles deviennent "\$P_2 =0.9\$ (p.u.), et \$Q_2=0.1\$ (p.u.)". Enfin, à l'instant "\$t=2\$ (s)" nous avons changé les références de puissances pour qu'elles deviennent "\$P_3=1.3\$ (p.u.), et \$Q_3=0.1\$ (p.u.)".

En passant par la transformation de Park "d, q" pour réduire les équations.

On prend le même système pour la partie shunt.

B. Résultats de Simulation

On trouve les figures qui montrent les variations de:

- La tension délivrée en série "\$V_{se}\$" et en shunt "\$V_{sh}\$".
- Le courant injecté par la partie série "\$I_{se}\$" et par la partie shunt "\$I_{sh}\$".
- La puissance active "\$P_{se}\$" et réactive "\$Q_{se}\$" injectée par le SSSC, et aussi "\$P_{sh}\$" et "\$Q_{sh}\$" injectée par le STATCOM.

1) Résultats de Simulation de la Partie Série de l'UPFC "SSSC"

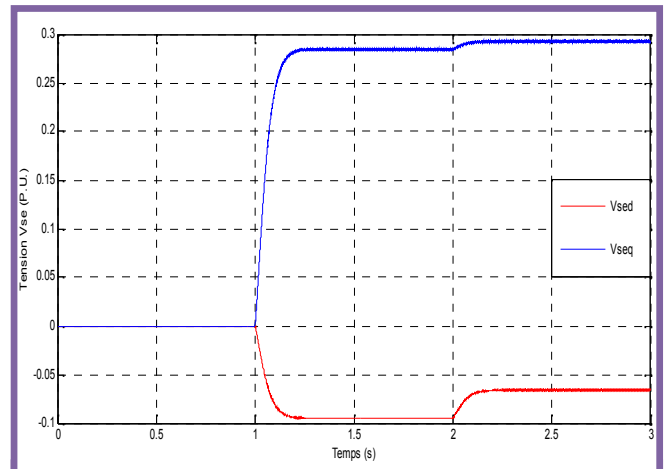
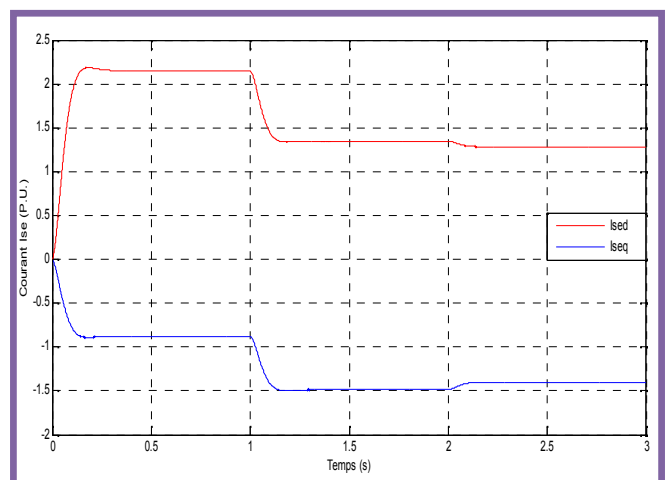


Fig. 7 Les Tensions de SSSC "\$V_{sed}\$ et \$V_{seq}\$"



$$\begin{cases} P_{se} = \frac{3}{2}(V_{sed} I_{sed} + V_{seq} I_{seq}) \\ Q_{se} = \frac{3}{2}(V_{seq} I_{sed} + V_{sed} I_{seq}) \end{cases} \quad (6)$$

Fig. 8 Les Courants de SSSC “ I_{sed} et I_{seq} ”

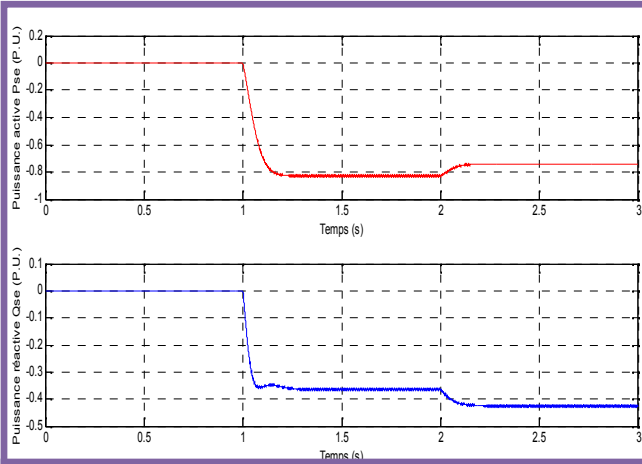


Fig. 9 La Puissance Active “ P_{se} ” et Réactive “ Q_{se} ” de SSSC

✿ *Interprétation des Résultats*

L’examen de courbes précédentes après les simulations numériques permet de constater que, la partie série de l’UPFC est caractérisée par:

☑ *Evolution de la tension “ V_{se} ”*

Au premier instant “0 $t < 1$ (s)”, le SSSC n’est pas branché.

A l’instant “1 $t < 2$ (s)”, on injecte une tension “ V_{se} ” en série par rapport au courant de la ligne.

Dans le dernier intervalle “2-3 (s)”, la tension “ V_{se} ” augmente à cause de l’effet de la charge “ P_3, Q_3 ” sur la ligne de transport.

☑ *Evolution du courant “ I_{se} ”*

Pendant la compensation de SSSC qui limitée dans l’intervalle de temps “1.0 (s)” jusqu’à “3.0 (s)”, la réactance de la ligne augmente en limitant le courant “ I_{sed} ” à “1.3 (p.u.)” dans le but de contrôler le transit de la puissance dans la ligne, comme le montre sur la “Fig. 8”.

☑ *Evolution de la puissance active “ P_{se} ” et de la puissance réactive “ Q_{se} ”*

Les allures de deux puissances “ P_{se} ” et “ Q_{se} ” suivent respectivement l’allure de deux relations suivantes:

2) *Résultats de Simulation de la Partie Shunt de l’UPFC “STATCOM”*

On trouve les résultats suivants:

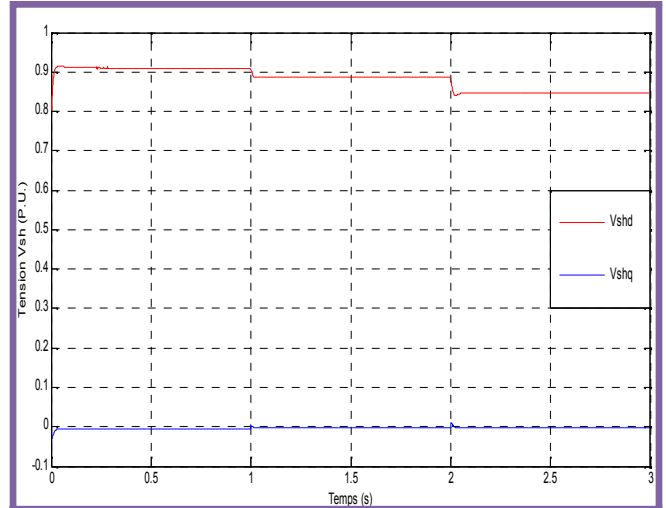


Fig. 10 Les Tensions de STATCOM “ V_{shd} et V_{shq} ”

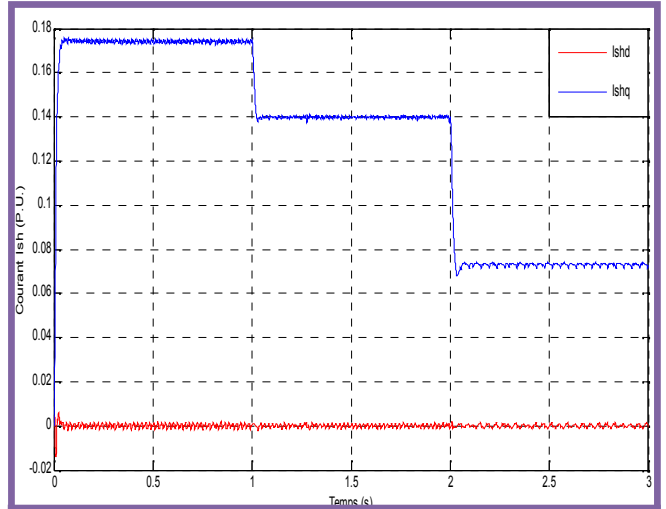


Fig. 11 Les Courants de STATCOM “ I_{shd} et I_{shq} ”

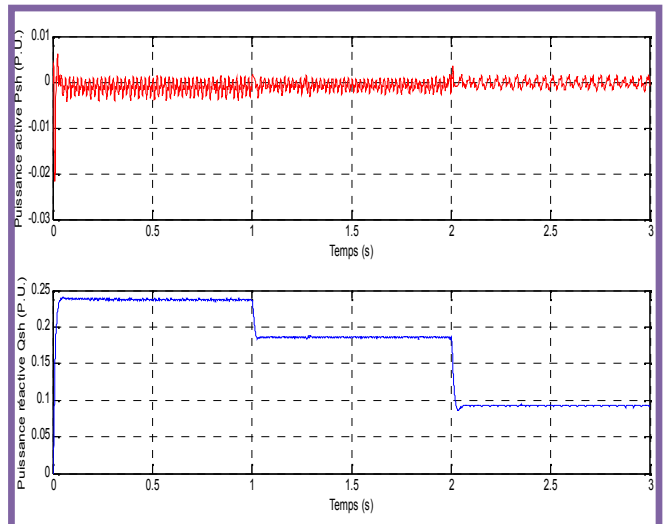


Fig. 12 La Puissance Active " P_{sh} " et Réactive " Q_{sh} " de STATCOM

• Interprétation des Résultats

L'examen de courbes précédentes après les simulations numériques permet de constater que, la partie shunt de l'UPFC est caractérisée par:

☑ Evolution de la tension " V_{sh} "

Le STATCOM injecte une tension " V_{shd} " en phase avec la tension " V_1 " où " $V_{shq} = 0$ " et " $V_{1d} = V_1, V_{1q} = 0$ " qui augmente à l'instant " $t=1$ (s)", ensuite on charge la ligne avec une autre charge différente pour avoir qu'est ce qui se passe dans le réseau.

☑ Evolution du courant " I_{sh} "

L'augmentation de la réactance de ligne a abaissé le courant " I_{seq} " à "0.075 (p.u.)" dans le but de compenser la puissance réactive dans la ligne, comme le montre sur la "Fig. 11".

☑ Evolution de la puissance active " P_{sh} " et de la puissance réactive " Q_{sh} "

Avant " $t=1$ (s)", le STATCOM injecte une quantité de puissance réactive " Q_{sh} " de l'ordre de "0.24 (p.u.)" pour soulever la tension " V_1 " à "0.8 (p.u.)". Mais après la mise en service de la charge " P_2, Q_2 " à l'instant " $t = 1$ (s)" et la charge " P_3, Q_3 " à l'instant " $t = 1$ (s)", la puissance " Q_{sh} " décroît considérablement en fonction de ces charges sur la ligne électrique.

Une petite quantité de la puissance active " P_{sh} " est absorbée dans cette phase pour maintenir la tension à la borne du condensateur constante.

IV. CONCLUSION

Un FACTS agit généralement en fournissant ou en consommant dynamiquement de la puissance réactive sur le réseau. Ceci a pour effet d'augmenter ou de diminuer l'amplitude de la tension à son point de connexion et par conséquent la puissance active maximale transmissible.

Les résultats obtenus par ces différentes simulations ont validé d'une manière générale les différents modèles de deux parties de l'UPFC "STATCOM et SSSC" qui sont utilisés dans certaines fonctions de contrôle: la régulation de la tension par compensation de l'énergie réactive c'est pour le

STATCOM et le contrôle du flux de puissance active et réactive concernant le SSSC [8].

Pour cela; dans le futur travail, on essaiera de faire une étude complète de l'UPFC installé en Algérie, avec le placement optimal de ce dispositif dans le réseau électrique, pour accroître la stabilité des réseaux surtout de grandes tailles.

REFERENCES

- [1] N.F. Mailah, and S.M. Bashi, "Single phase unified power flow controller (UPFC): Simulation and construction", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 8, p. 1, 2009.
- [2] R. Grünbaum, M. Noroozian, et B. Thorvaldsson, "FACTS – Les systèmes performants pour le transport flexible de l'énergie électrique", *5 Revue ABB*, Suède, vol. 17, p. 1, 1999.
- [3] S. Tara Kalyani, and G. Tulasiram Das, "Simulation of real and reactive power flow control with UPFC connected to a transmission line", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 7, p. 3-5, 2008.
- [4] A. Abdelaali, "Contrôle des réseaux électriques par les systèmes FACTS: (Flexible AC Transmission Systems)", *Mémoire de Magister en Electrotechnique*, Option Electricité Industrielle, Université de Batna, 2009.
- [5] D. Louardi, "Contrôle de l'écoulement de puissance active par système FACTS", *Mémoire de Magister en Electrotechnique*, Option Electricité Industrielle, Université de Batna, 2009.
- [6] G. S. Eskandar, "Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques", *Thèse de Doctorat*, Université de Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2003.
- [7] B. Larouci, L. Benaïssa, et M. Rahli, "Amélioration de l'influence des variations paramétriques sur les performances de l'UPFC par un régulateur à base de logique floue", *7^{ème} Conférence Internationale en Génie Electrique*, vol. 5, pp. 90-94, Université de Batna, 8- 10 Octobre 2012.
- [8] G. Radman, and R. S. Raje, "Power flow model/calculation for power systems with multiple FACTS controllers", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 11, p. 1, 2006.