

## ETUDE PAR SIMULATION HIL DES PERFORMANCES D'UN STATCOM POUR LA STABILISATION DE LA TENSION D'UNE GENERATRICE ASYNCHRONE AUTO EXCITEE DANS UN RESEAU AUTONOME SOUS LABVIEW AVEC LA CARTE ARDUINO

HOUNKPE HOUENOU G.A.<sup>1,\*</sup>, HOUNGAN K. Th.<sup>1</sup>,  
MOUKENGUE IMANO. A.<sup>2</sup>, VIANOU A.<sup>1</sup>

1- Laboratoire d'Electrotechnique, de Télécommunication et d'Informatique Appliquée  
(ECOLE POLYTECHNIQUE d'ABOMEY CALAVI/Université d'Abomey Calavi)

01 BP : 2009 Cotonou

2- Laboratoire d'Electronique, d'Electrotechnique, d'Automatique et  
Télécommunications, équipe de recherche en Système d'Energie Electrique, Université  
de Douala, BP : 8698 Douala ; Cameroun

Correspondance : courriel : [geramavie@gmail.com](mailto:geramavie@gmail.com)

(Reçu le 24 Octobre 2014 ; Révisé le 17 Avril 2015 ; Accepté le 24 Avril 2015)

### RESUME

Ce travail présente l'étude par simulation *Hardware In the Loop* (HIL) des performances d'un STATCOM pour la stabilisation de la tension délivrée par une génératrice asynchrone triphasée auto excitée dans un réseau autonome. Nous avons combiné l'utilisation du logiciel de simulation LABVIEW et la carte ARDUINO pour réaliser cette simulation. Les modèles de la génératrice asynchrone auto excitée et du compensateur statique parallèle STATCOM ont été réalisés dans LABVIEW. La carte ARDUINO utilisée a permis de générer les signaux de Modulations de Largeurs d'Impulsion qui commandent les interrupteurs du convertisseur statique. La Commande Prédictive par Modèle (MPC) a permis la régulation de la tension par rapport aux consignes indiquées. Les résultats obtenus sont satisfaisants aux vues du temps de réponse de la commande par rapport aux corrections apportées par la commande et les signaux de commandes envoyés par la carte sur les interrupteurs.

Mots clés : STATCOM, génératrice asynchrone auto excitée, MPC.

### ABSTRACT

This paper presents the study by simulation *Hardware In the Loop* (HIL) of the performances of a STATCOM for the stabilization of the tension delivered by tree- self excited induction generator in an autonomous network. We combined the use of the software of the simulation LABVIEW and card ARDUINO to carry out this simulation. Models of the asynchronous generator self excited and the parallel Static Compensator (STATCOM) have been realized in LABVIEW. Card ARDUINO used allowed to generate signals of Pulse Widths Modulations which order switches of the STATCOM. The Model Predictive Command (MPC) allowed the regulation of the tension with regard to the indicated instructions. The obtained results are satisfactory in terms of the time of response of the command with regard the corrections brought by the command and the signals of commands sent by the card on switches.

Keywords: STATCOM, self excited induction generator, MPC.

## 1. INTRODUCTION

L'énergie électrique est un facteur essentiel dans le développement et l'évolution de la société humaine. Elle est la forme d'énergie indispensable de par sa souplesse d'utilisation et sa multiplicité de domaines d'activités, où elle joue un rôle de premier plan. Compte tenu du nombre croissant de la population, la production de cette énergie devient très importante et l'utilisation des formes de production de proximité permet la réduction des coûts, afin de favoriser les consommateurs ordinaires de trouver l'énergie pour leur besoin au quotidien. La machine asynchrone triphasée, compte tenu de ses multiples performances est utilisée dans la production de l'énergie électrique surtout grâce à la démultiplication des sources de production.

Cette machine utilisée en génératrice produit de l'énergie dont la fréquence et la tension varient très vite non seulement avec la vitesse d'entraînement mais aussi avec la charge. En effet, la génératrice asynchrone nécessite l'énergie réactive fournie par un banc de condensateurs pour sa magnétisation, et la charge puise éventuellement dans ce même banc de condensateurs son énergie réactive, diminuant ainsi l'excitation de la génératrice ; d'où la nécessité de compenser cette énergie réactive (POITIERS, 2003, IDJDARENE K et al 2007, YOUSSEF et al 2008). Les compensateurs à base d'électronique de puissance ont une influence certaine sur le comportement des réseaux électriques. Ainsi, l'avènement des FACTS a contribué pleinement à la résolution de telles situations (PONMURUGAVEL et GHOUSE 2013,

MEKKAOUI et al. 2014, PADIAR 2007, CHOUBEY et CHOUDHARY 2013)

Plusieurs études sur la génératrice asynchrone à cage d'écureuil ont été menées pour réguler la tension et la fréquence dans un réseau électrique isolé avec des résultats très intéressants. La qualité des résultats de la commande prédictive de type MPC a été prouvée avec des temps de réponse assez satisfaisant, par rapport aux différentes méthodes utilisées dans la régulation prise en compte dans notre cas (PONMURUGAVEL et GHOUSE 2013)

Dans l'étude comparative entre les différentes méthodes de commandes, à savoir la commande prédictive, proportionnel intégral et logique floue (PONMURUGAVEL et GHOUSE 2013), il a été prouvé la rapidité de réponse de la commande prédictive par rapport aux autres.

Dans ce travail consacré à l'étude de la stabilisation de la tension de la génératrice asynchrone triphasée auto-excitée, il est procédé à la modélisation de la génératrice, du système de compensation et de la charge, avant de passer à la méthode de commande des interrupteurs du STATCOM pour l'optimisation du système en utilisant la commande prédictive de type MPC.

## 2. Présentation du système étudié

Le système en étude est constitué d'une génératrice asynchrone triphasée auto excitée par un banc de condensateurs, d'un compensateur statique STATCOM (STATIC COMPensator) et d'une charge inductive équilibrée. Cet ensemble est représenté à la Figure 1.

Etude par simulation HIL des performances d'un STATCOM pour la stabilisation de la tension  
d'une génératrice asynchrone auto excitée dans un réseau autonome sous LABVIEW  
avec la carte ARDUINO

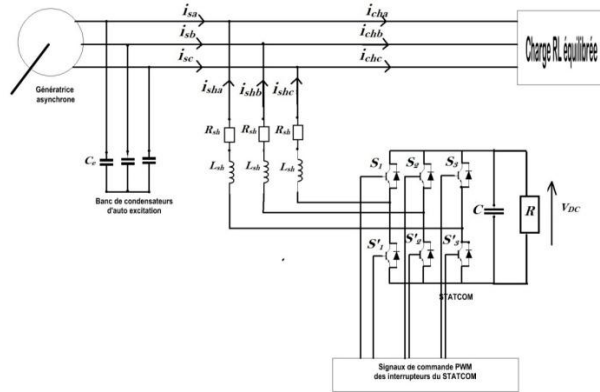


Figure 1 : Présentation du système étudié

### 3. Modèle mathématique du système

#### 3.1. Modélisation de la génératrice asynchrone triphasée

Nous considérerons le régime de saturation de l'inductance de magnétisation. Les systèmes d'équations (1) et (2) représentent le modèle mathématique correspondant sans la prise en compte des condensateurs d'auto amorçage.

En appliquant les transformations de Park aux équations électriques de la génératrice triphasée asynchrone, on a dans le référentiel d-q (POITIERS, 2003, IDJDARENE K et al 2007, YOUSSEF et al 2008):

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{sd}}{dt} = -R_s A \varphi_{sd} + \omega_s \varphi_{sq} + R_s B \varphi_{rd} + v_{sd} \\ \frac{d\varphi_{sq}}{dt} = -\omega_s \varphi_{sd} - R_s A \varphi_{sq} + R_s B \varphi_{rq} + v_{sq} \\ \frac{d\varphi_{rd}}{dt} = R_r B \varphi_{sd} - R_r C \varphi_{rd} + \omega_r \varphi_{rq} \\ \frac{d\varphi_{rq}}{dt} = R_r B \varphi_{sq} - \omega_r \varphi_{rd} - R_r C \varphi_{rq} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} i_{sd} = A \varphi_{sd} - B \varphi_{rd} \\ i_{sq} = A \varphi_{sq} - B \varphi_{rq} \\ i_{rd} = C \varphi_{rd} - B \varphi_{sd} \\ i_{rq} = C \varphi_{rq} - B \varphi_{sq} \\ i_{md} = i_{sd} + i_{rd} \\ i_{mq} = i_{sq} + i_{rq} \end{cases} \quad (2)$$

$$A = \frac{l_r + l_m}{l_r l_m + l_s (l_r + l_m)} ; B = \frac{l_m}{l_r l_m + l_s (l_r + l_m)} ;$$

$$C = \frac{l_s + l_m}{l_r l_m + l_s (l_r + l_m)} \quad (3)$$

où :

$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}, \varphi_{rd}$  et  $\varphi_{rq}$  désignent les flux respectifs au stator et au rotor dans le référentiel d-q.

$v_{sd}, v_{sq}, v_{rd}$  et  $v_{rq}$  représentent les tensions respectives au stator et au rotor dans le référentiel d-q.

$R_s, R_r, l_s, l_r$  et  $l_m$  désignent les résistances et inductances au stator et au rotor et l'inductance de magnétisation.

$i_{sd}, i_{sq}, i_{rd}$  et  $i_{rq}$  désignent les courants au stator et au rotor dans le référentiel d-q.

L'inductance de magnétisation est fonction du courant de magnétisation  $i_m$ . Elle est approximée soit par une fonction polynôme soit par une fonction exponentielle dépendante du courant de magnétisation ou de la tension de phase, exprimé à travers l'équation (4).

$$l_m = A_4 i_m^4 + A_3 i_m^3 + A_2 i_m^2 + A_1 i_m + A_0$$

$$\text{ou } i_m = \sqrt{i_{md}^2 + i_{mq}^2} \quad (4)$$

Les coefficients du polynôme de l'équation (4) sont donnés par :

$$A_4 = -0.10370088.10^{-4} ; A_3 = 0.36874912.10^{-3} ; A_2 = -0.44345428.10^{-2} ; A_1 = 0.14891028.10^{-1} ; A_0 = 0.10499759$$

En considérant une charge équilibrée, on a la relation matricielle (5) qui désigne l'équation

d'auto-amorçage de la génératrice aux bornes des condensateurs d'excitation  $C_e$ .

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_e} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_e} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{sd} - i_{chd} \\ -i_{sq} - i_{chq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & p_p \Omega \\ -p_p \Omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sq} \\ v_{sd} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$i_{chd}$  et  $i_{chq}$  sont les courants de la charge dans le référentiel d-q.  $p_p$  et  $\Omega$  représentent respectivement le nombre de paires de pôle et la vitesse de rotation de la machine. Pour une charge RL, les tensions  $v_{sd}$  et  $v_{sq}$  aux bornes de la charge dans le référentiel d-q sont exprimées par le système d'équations :

$$\begin{cases} v_{sd} = R i_{chd} + L \frac{di_{chd}}{dt} \\ v_{sq} = R i_{chq} + L \frac{di_{chq}}{dt} \end{cases} \quad (6)$$

Chacune de ces équations (5) et (6) complètera le modèle de la génératrice asynchrone pour donner le bloc de simulation final souhaité pour les études.

### 3.2. Modélisation du système de compensation STATCOM

A partir des différentes modèles mathématiques du STATCOM de la littérature (PONMURUGAVEL et GHOUSE 2013, MEKKAOU et al. 2014, PADIAR 2007, PETITCLAIR 1997) nous avons obtenu le système d'équations (7) dans le référentiel d-q. Les différentes grandeurs intervenant dans le modèle sont réelles.

$$\begin{cases} \frac{di_{shd}}{dt} = -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} i_{shd} + \omega i_{shq} + \frac{1}{L_{sh}} (v_{shd} - v_m) \\ \frac{di_{shq}}{dt} = -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} i_{shq} - \omega i_{shd} + \frac{1}{L_{sh}} v_{shq} \\ \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{\frac{3}{2V_{dc}}(V_{shd}i_{shd} + V_{shq}i_{shq})}{C} - \frac{V_{dc}}{RC} \end{cases} \quad (7)$$

En ramenant les différentes grandeurs réelles du modèle (7) en grandeurs réduites, le modèle devient (8):

$$\begin{cases} \frac{di'_{shd}}{dt} = -\frac{R'_{sh}\omega_0}{L'_{sh}} i'_{shd} + u_1 \\ \frac{di'_{shq}}{dt} = -\frac{R'_{sh}\omega_0}{L'_{sh}} i'_{shq} + u_2 \\ \frac{dV'_{dc}}{dt} = \frac{3C'\omega_0}{2V'_{dc}} \left( u_1 i'_{shd} \frac{L'_{sh}}{\omega_0} + V'_m i'_{shd} + u_2 i'_{shq} \frac{L'_{sh}}{\omega_0} \right) - C'\omega_0 \frac{V'_{dc}}{R'} \end{cases} \quad (8)$$

avec

$$u_1 = \omega_0 \omega' i'_{shq} + \frac{\omega_0}{L'_{sh}} (v'_{shd} - V'_m) ;$$

$$u_2 = -\omega_0 \omega' i'_{shd} + \frac{\omega_0}{L'_{sh}} (v'_{shq}).$$

$X'$  désigne la valeur réduite de la grandeur réelle  $X$

Le modèle obtenu en (8) peut être simplifié en linéarisant le modèle de l'équation (7) autour du point de fonctionnement. Ainsi en développant le modèle non linéaire en série de Taylor autour des points  $P_0 = [i'_{shd0}, i'_{shq0}, V'_{dc0}]^T$  et  $u_0 = [u_{10}, u_{20}]^T$  et en négligeant les termes d'ordre supérieur à 1, le modèle (8) se présente sous la forme suivante de l'équation (9) :

$$\Delta \dot{P} = A \Delta P + B \Delta u \quad (9)$$

avec

$$\Delta P = \begin{bmatrix} \Delta i'_{shd} \\ \Delta i'_{shq} \\ \Delta V'_{dc} \end{bmatrix}, \Delta u = \begin{bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial i'_{shd}} & \frac{\partial f_1}{\partial i'_{shq}} & \frac{\partial f_1}{\partial V'_{dc}} \\ \frac{\partial f_2}{\partial i'_{shd}} & \frac{\partial f_2}{\partial i'_{shq}} & \frac{\partial f_2}{\partial V'_{dc}} \\ \frac{\partial f_3}{\partial i'_{shd}} & \frac{\partial f_3}{\partial i'_{shq}} & \frac{\partial f_3}{\partial V'_{dc}} \end{bmatrix}_{P_0}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \frac{\partial f_1}{\partial u_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u_1} & \frac{\partial f_2}{\partial u_2} \\ \frac{\partial f_3}{\partial u_1} & \frac{\partial f_3}{\partial u_2} \end{bmatrix}_{u_0}$$

$$\text{Où } f_1 = \frac{di'_{shd}}{dt}, \quad f_2 = \frac{di'_{shq}}{dt}, \quad f_3 = \frac{dV'_{dc}}{dt}$$

Après développement et simplification de  $A$  et  $B$ , le modèle linéarisé du STATCOM est exprimé par l'équation (10) :

$$\begin{bmatrix} \Delta i'_{shd} \\ \Delta i'_{shq} \\ \Delta V'_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R'_{sh}\omega_0}{L'_{sh}} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R'_{sh}\omega_0}{L'_{sh}} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i'_{shd} \\ \Delta i'_{shq} \\ \Delta V'_{dc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ b_{31} & b_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

avec

$$\begin{aligned} a_{31} &= \frac{3C'\omega_0(a_1u_{10}+V'_m)}{2V'_{dc0}}; \\ a_{32} &= \frac{3C'\omega_0(a_1u_{20})}{2V'_{dc0}}; \\ a_{33} &= -\frac{3C'\omega_0(a_1u_{10}I'_{shd0}+V'_mI'_{shd0}+a_1u_{20}I'_{shq0})}{2V'^2_{dc0}} - \frac{C'\omega_0}{R'} \\ b_{31} &= \frac{3C'\omega_0(a_1I'_{shd0})}{2V'_{dc0}}; \\ b_{32} &= \frac{3C'\omega_0(a_1I'_{shq0})}{2V'_{dc0}} \end{aligned}$$

Dans les équations (7) à (10) les notations  $i_{shd}$ ,  $i_{shq}$ ,  $V_{shd}$ ,  $V_{shq}$  et  $V_{DC}$  désignent les courants et tensions de sortie côté alternatif et la tension du côté continu du compensateur STATCOM.

#### 4. Commande des interrupteurs du STATCOM

##### 4.1. Stratégie de la commande prédictive

La commande prédictive de type MPC est une commande qui utilise explicitement un modèle d'état du système à commander pour prédire les sorties et les états futurs du système à commander. Cette capacité de prédiction permet de calculer des commandes optimales à appliquer à un système pour l'amener dans un état désiré à partir de la minimisation d'un critère de performance. La minimisation du critère de performance conduit à une suite de commande à appliquer au système, mais seul le premier élément est appliqué : c'est le critère de l'horizon fuyant.

Le modèle d'état discret utilisé par la commande prédictive est le suivant (PONMURUGAVEL et GHOSH 2013)

$$\begin{cases} x_m(k+1) = A_m x_m(k) + B_m u(k) \\ y(k) = C_m x_m(k) \end{cases} \quad (11)$$

Avec  $x_m$  le vecteur d'état,  $u$  l'entrée du système,  $y$  la sortie du système.

Dans la majorité des applications de la commande prédictive, c'est le modèle d'état incrémenté du système qui est utilisé. Ce modèle se présente sous la forme suivante.

$$\begin{bmatrix} \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_m & 0^T_m \\ C_m A_m & I_{p \times p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_m \\ C_m B_m \end{bmatrix} \Delta u(k) \quad (12)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} 0_m & I_{p \times p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \quad (10)$$

A l'aide du modèle incrémenté, les variables de sorties prédites se calculent par la formule(13) :

$$\begin{aligned} y(k_i + N_p | k_i) &= CA^{N_p} x(k_i) + \\ &CA^{N_p-1} B \Delta u(k_i) + CA^{N_p-2} B \Delta u(k_i + 1) + \\ &\dots + CA^{N_p-N_c} B \Delta u(k_i + N_c - 1) \end{aligned} \quad (13)$$

Les constantes  $N_p$  et  $N_c$  sont appelées respectivement horizon de prédiction et horizon de commande. La fonction coût qui reflète l'objectif de la commande est définie par :

$$J = (R_s - Y)^T (R_s - Y) + \Delta U^T \bar{R} \Delta U \quad (14)$$

où,  $Y$  est un vecteur contenant les sorties prédites sur l'horizon de prédiction, et  $R_s$  est un vecteur contenant les consignes c'est-à-dire l'objectif désiré sur l'horizon de prédiction.

La minimisation de  $J$  fournit :

$$\Delta U = [\Delta u(k_i) \Delta u(k_i + 1) \Delta u(k_i + 2) \dots \Delta u(k_i + N_c - 1)]^T \quad (15)$$

Selon le principe de l'horizon fini, seul la commande  $\Delta u(k_i)$  est appliquée au système.

##### 4.2. Algorithme de génération de MLI

La figure 2 montre les étapes parcourues pour la communication entre la carte et le logiciel de simulation LABVIEW.

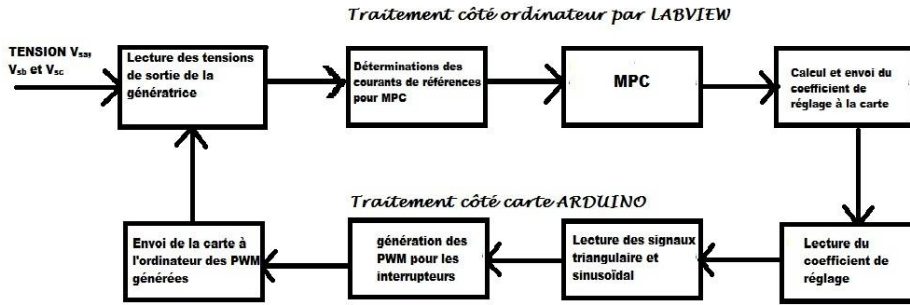


Figure 2 : Algorithme de génération de MLI par la carte ARDUINO pour LABVIEW

### 4.3. Présentation de la carte ARDUINO

La carte Arduino UNO est une carte à microcontrôleur AVR ATMEGA328. Elle s'interface au PC par l'entremise d'une prise USB. Les différentes parties de cette carte sont présentées à la figure 3.

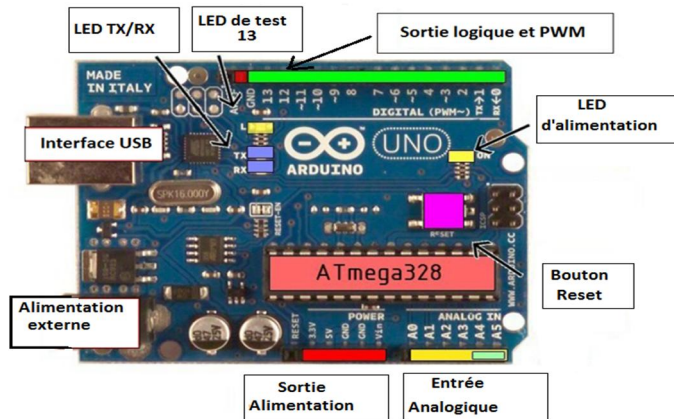


Figure 3 : Présentation de la carte Arduino UNO

Le logiciel de programmation utilisé est arduino1.5.5-r2. C'est une application Java multiplateformes, servant d'éditeur de code et de compilateur.

Les caractéristiques essentielles de cette carte sont consignées dans l'annexe.

## 5. Simulation et analyse des résultats

### 5.1. Environnement de simulation

Tout l'ensemble a été modélisé dans l'environnement LABVIEW. Une partie de la commande a été élaborée dans LABVIEW et les résultats sont envoyés vers la carte ARDUINO

pour générer les signaux de commande des interrupteurs du STATCOM.

Les caractéristiques respectives de la génératrice asynchrone triphasée auto-excité, du compensateur parallèle STATCOM et de la charge sont consignées dans l'annexe A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub> et A<sub>4</sub>.

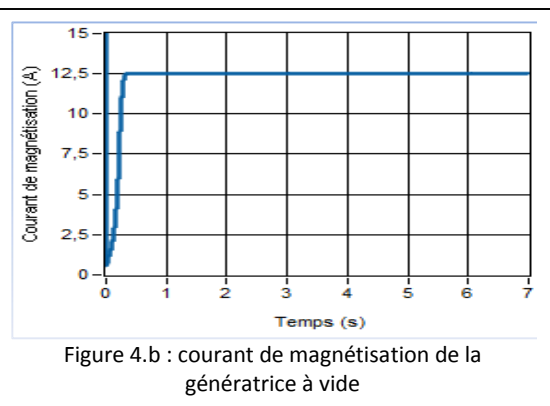
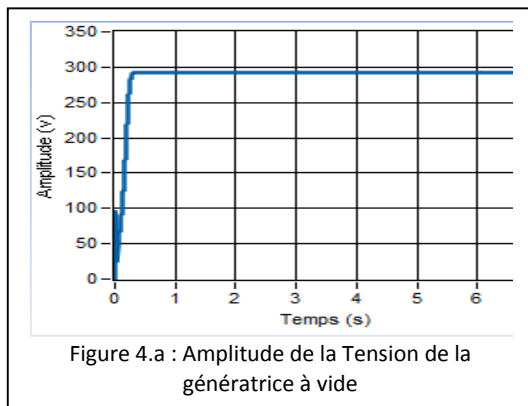
### 5.2. Résultats de simulation et discussions

La vitesse d'entraînement de la génératrice asynchrone triphasée à cage d'écureuil est constante et égale à 1510tr/mn.

# Etude par simulation HIL des performances d'un STATCOM pour la stabilisation de la tension d'une génératrice asynchrone auto excitée dans un réseau autonome sous LABVIEW avec la carte ARDUINO

Les figures 4.a et 4.b désignent respectivement l'amplitude maximale de tension et du courant

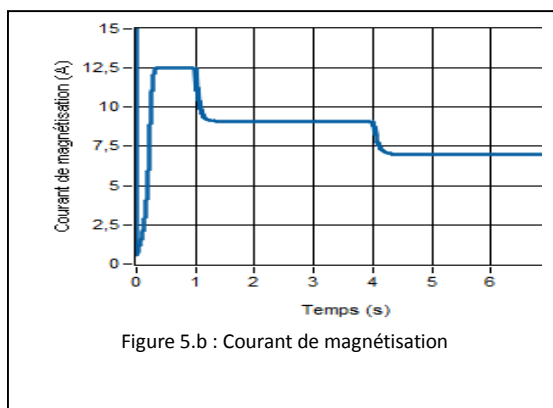
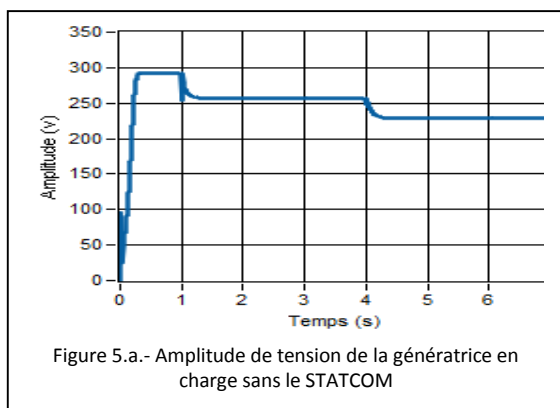
de magnétisation de a génératrice asynchrone triphasée auto excitée à vide.



On remarque que les courbes de la tension de sortie aux bornes de la génératrice et du courant de magnétisation ont la même allure.

Les charges ont été connectées à la génératrice aux instants  $t=1s$  et  $t=4s$ .

Les figures 5.a et 5.b désignent respectivement l'amplitude de tension et du courant de magnétisation de la génératrice asynchrone triphasée auto excitée amorcée à vide et ensuite connectée à deux charges inductives équilibrées sans le STACOM.

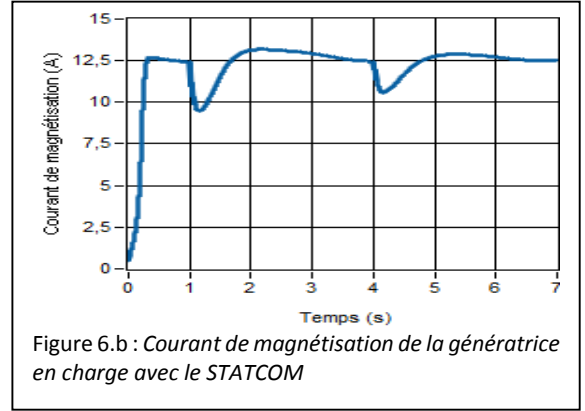
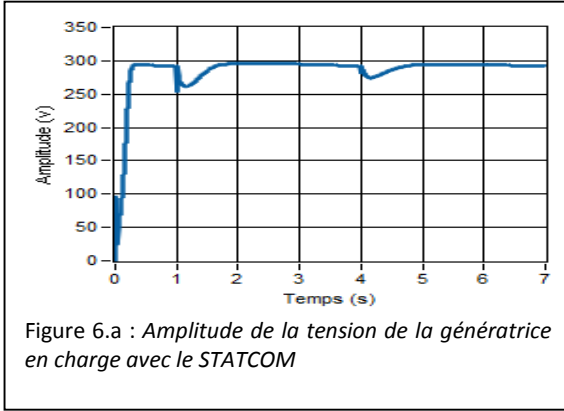


A la connexion de la charge, celle-ci provoque une dégradation de la tension de sortie de la génératrice et on note que la courbe du courant de magnétisation subit de même une dégradation. Mais les deux courbes gardent encore les mêmes allures.

Cette chute de tension est dommageable pour les récepteurs car en supposant la tension de sortie de la génératrice normale pour leur fonctionnement alors on note une baisse de tension.

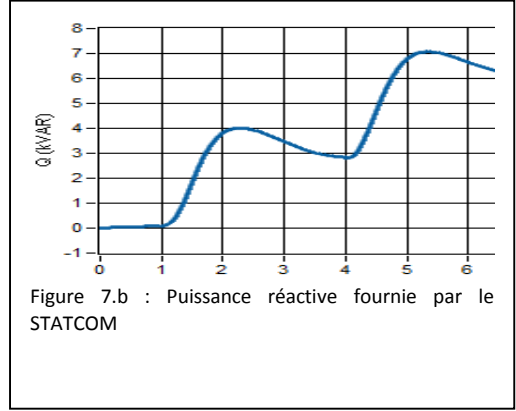
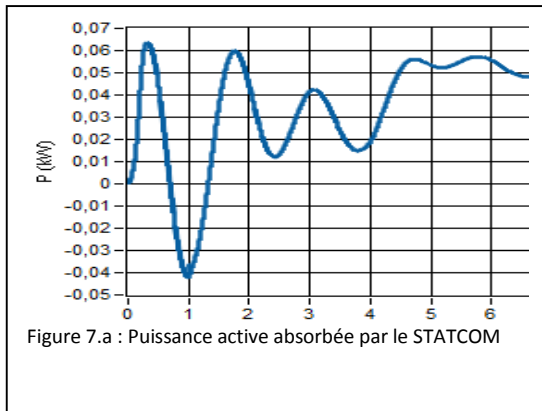
Pour ramener cette tension de sortie à sa valeur normale, il faudra exciter davantage la génératrice en l'excitant par le courant de magnétisation.

Les figures 6.a et 6.b désignent respectivement l'amplitude de tension et du courant de magnétisation de la génératrice asynchrone triphasée auto excitée amorcée à vide et ensuite connectée à deux charges inductives équilibrées avec le STATCOM pour le contrôle de la stabilité de la tension.



La tension de sortie comme le courant de magnétisation subit une fluctuation dès la connexion de la charge et chaque fois le STATCOM réagit pour ramener la tension à valeur de référence en agissant sur le courant de magnétisation.

Les figures 7.a et 7.b désignent les puissances active et réactive du STATCOM.



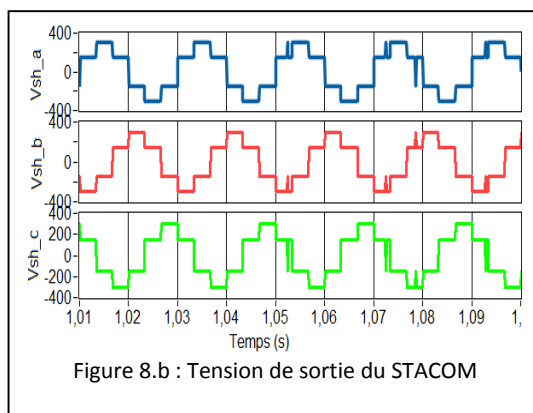
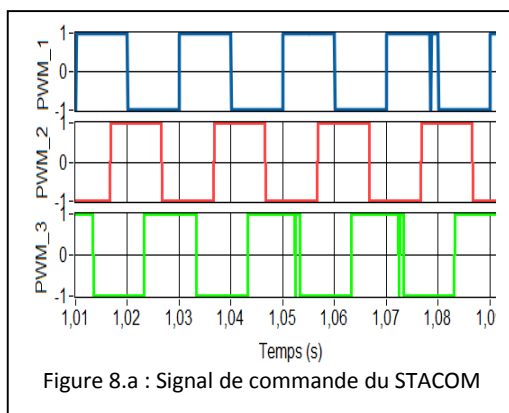
Le STATCOM ne consomme pratiquement pas de puissance active mais plutôt fournit plus de puissance réactive. Il est à remarquer qu'avant la connexion de la première charge à  $t=1s$ , la puissance réactive est nulle alors que celle active est non nulle car le compensateur se

comporte dans ce cas comme un récepteur (MOHAMMADI 2012).

Les figures 8.a et 8.b représentent les signaux de commande du STATCOM envoyés par la carte ARDUINO et les tensions de sortie du STATCOM.



# Etude par simulation HIL des performances d'un STATCOM pour la stabilisation de la tension d'une génératrice asynchrone auto excitée dans un réseau autonome sous LABVIEW avec la carte ARDUINO



A la connexion des différentes charges, on remarque la dégradation de la tension de même que le courant de magnétisation de la génératrice lorsque le STATCOM n'est pas connecté. Cependant en présence du STATCOM, bien que la tension de sortie de la génératrice subisse une variation, elle revient à sa valeur initiale après une courte durée (PONMURUGAVEL et GHOUSE 2013). Cela est dû au rôle fondamental du STATCOM qui est contrôlé par une commande prédictive par modèle (MPC). Le temps de réponse est très court l'une des spécificités de la commande MPC (PONMURUGAVEL et GHOUSE 2013).

Il ressort de ces résultats que la commande prédictive MPC du STATCOM permet

d'influencer le comportement du réseau alimenté par une génératrice asynchrone.

## CONCLUSION

Cette étude a permis de mesurer les performances d'un STATCOM à stabiliser la tension de sortie d'une génératrice asynchrone dans un réseau électrique autonome. Au vu des résultats obtenus compte tenu de la commande utilisée, il est clair que l'utilisation d'un STATCOM dans la régulation d'un système de production et consommation directes sans de longues lignes de transport permettrait d'améliorer le taux d'utilisation de l'énergie électrique dans les régions isolées mais dotées de faible potentiel de production de cette énergie.

## ANNEXES

### A1.- Caractéristique de la carte ARDUINO.

- ✓ Microcontrôleur : ATmega328
- ✓ Tension d'alimentation interne = 5V
- ✓ Tension d'alimentation (recommandée)= 7 à 12V, limites =6 à 20 V
- ✓ Entrées/sorties numériques : 14 dont 6 sorties PWM
- ✓ Entrées analogiques = 6
- ✓ Courant max par broches E/S = 40 mA
- ✓ Courant max sur sortie 3,3V = 50mA
- ✓ Mémoire Flash 32 KB dont 0.5 KB utilisée par le bootloader
- ✓ Mémoire SRAM 2 KB
- ✓ mémoire EEPROM 1 KB
- ✓ Fréquence horloge = 16 MHz
- ✓ Dimensions = 68.6mm x 53.3mm

A2.- Machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil

$P_n=4\text{KW}$  ;  $U_n=400\text{V}$  ;  $N_n=1430\text{tr/mn}$  ;  $f=50\text{Hz}$  ;  $J=0,0095\text{ kg.m}^2$  ;  $p_p=2$  ;

$R_s=1,405\Omega$  ;  $R_r=1,395\Omega$  ;  $l_s=l_r=0,005839\text{H}$  ;  $L_m=0,1722\text{H}$

A3.- Compensateur STATCOM :

$L_{sh}=0.2\text{ pu}$ ,  $R_{sh}=0.0014\text{ pu}$ ,  $R=10\text{pu}$ ,  $V_{DC}=400\text{ V}$ ,  $C=46\text{ mF}$

A4.- Pour les charge inductives :

$R=35\Omega$ ,  $L=120\text{mH}$  et  $R=45\Omega$ ,  $L=120\text{mH}$

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. POITIERS F., 2003. "Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'utilisation de l'Energie Eolienne, Machine asynchrone à cage autonome ; Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau". *Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes*.
2. IDJDARENE K., REKIOUA D., REKIOUA T. et TOUNZIA., 2007. Contrôle d'une éolienne en fonctionnement autonome basée sur une génératrice asynchrone. *Revue des Energies Renouvelables CER'07 Oujda*, pp 51 - 54
3. YOUSSEF K.H., M. A. WAHBA, H. A. YOUSEF and O. A. SEBAKHY, 2008. "A New Method for Voltage and Frequency Control of Stand-Alone Self-Excited Induction Generator Using PWM Converter with Variable DC link Voltage". *American Control Conference*, pp 2486-2491
4. PONMURUGAVEL P.S., S.M. GHOUSE, 2013. "Design and Modelling of Fuzzy and Model Predictive Controllers for STATCOM to enhance Transient Stability of Power System". *International Journal of Engineering and Technology (IJET)*, Vol 5 No 3, 2609-2619.
5. MEKKAOUI A., LAOUER M. et M.YOUNES, 2014. Etude comparative des performances d'un STATCOM et d'un SVC sur la stabilité d'un parc éolien connecté au réseau électrique. *Revue des Energies Renouvelables Vol. 17 N°1 pp. 149 - 157*.
6. PADIAR K.R., 2007. "FACTS controllers in power transmission and distribution", *new age international publishers, New Delhi*
7. CHOUBEY A., D. CHOUDHARY, 2013. "Voltage stability with the help of STATCOM. *International Journal of Scientific Research Engineering & Technology (IJSRET)*, pp 145-150.
8. JOY N., R. P.THOMAS, B.CHERIAN, 2013. "Voltage and Frequency Controller Along With Power Quality Improvement for Wind Power Generating System with BESS". *International Journal of Advanced Research in Electrical. Electronics and Instrumentation Engineering Vol. 2, Issue 1, pp 638-644*.
9. PETITCLAIR P., 1997. "Modélisation et Commande de structures FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System) : Application au STATCOM (STATIC COMPensator)". *Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble*.
10. MOHAMMADI S., 2012. "Impacts of D-STATCOM on voltage stability". *Indian J. Edu. Inf. Manage.*, Vol. 1, No. 9.