

Etude de l'auto-excitation d'une génératrice asynchrone.

Okana N.M.^{1*}, Kamabu T.¹, Tshani P.T.²

Abstract

Self-excitation study of an induction generator

Received:
July 18, 2014

Revised:
June 11, 2015

Published online:
September 27, 2015

Keywords:

Induction generator,
saturation, self-excited
induction generator,
transient analysis, self
excitation, modeling

The aim of this paper is to use last research results on electrical machinery saturation modeling and modern calculation tools to study self-excitation induction generator. After an overview on the induction machine equations, the basics elements for understanding the phenomenon are presented. The paper presents a process for taking into account the saturation of the magnetic circuit in the generator modeling. Two methods for capacitor banks calculations are explained and a set of simulations are made to point out the influence of saturation on the self-excitation process.

¹ Département d'électricité, Faculté Polytechnique, Université de Kinshasa, B.P. 255 Kinshasa XI, Kinshasa, D. R. Congo.

² SEP CONGO, 1 Avenue des Pétroles, C/Gombe, B.P. 2197 Kinshasa I, Kinshasa, R.D. Congo

* To whom correspondence should be addressed: marienokana@hotmail.com / marien.okana@unikin.ac.cd

INTRODUCTION

L'auto-excitation de la génératrice asynchrone est un sujet qui revêt un regain d'intérêt avec l'utilisation de plus en plus fréquente de la machine asynchrone dans les systèmes de production d'énergie électrique. Le domaine des énergies renouvelables, en général, et celui des éoliennes, en particulier, a largement contribué au développement de la machine asynchrone en tant que génératrice [BANSAL, 2005].

La machine asynchrone, dans son fonctionnement en mode génératrice, pose un problème particulier : elle ne peut pas s'amorcer seule en génératrice et a besoin d'une source extérieure pour réaliser cette opération qui porte le nom d'auto-excitation [CHATELAIN, 1982].

Nous avons rappelé les concepts de base pour la compréhension de l'auto-excitation d'une génératrice asynchrone en détaillant les relations de base pour la compréhension de ce phénomène. Une attention

particulière est accordée à la prise en compte de la saturation dans la modélisation de la machine.

Après un rappel des équations de la machine asynchrone, le phénomène proprement dit d'auto-excitation de la génératrice asynchrone est abordé ainsi que le choix des éléments des batteries de condensateurs qui constituent les éléments clés du processus d'autoamorçage de la génératrice asynchrone.

Le phénomène d'auto-excitation est illustré par des simulations sur *Matlab/Simulink*. Ces simulations permettent notamment de voir l'influence de la modélisation de la machine asynchrone sur l'étude de l'auto-excitation de la génératrice asynchrone [ABDESSEMED, 2011].

MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Equations de la machine asynchrone

Les équations électriques et magnétiques de la machine asynchrone selon les axes directe (indice d) et en quadrature (indices q), pour un référentiel tournant à la vitesse ω_a par rapport au stator, sont reprises par les relations (1) à (8).

- Equations de tension statorique et rotorique

$$-u_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \psi_{ds} - \omega_a \cdot \psi_{qs} \quad (1)$$

$$-u_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \psi_{qs} + \omega_a \cdot \psi_{ds} \quad (2)$$

$$0 = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \psi_{dr} - (\omega_a - \omega_m) \cdot \psi_{qr} \quad (3)$$

$$0 = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \psi_{qr} + (\omega_a - \omega_m) \cdot \psi_{dr} \quad (4)$$

- Equations de flux statoriques et rotoriques

$$\psi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \quad (5)$$

$$\psi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \quad (6)$$

$$\psi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds} \quad (7)$$

$$\psi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} \quad (8)$$

Les relations entre inductances sont les suivantes.

$$L_s = M + L_{\sigma s} \quad (9)$$

$$L_r = M + L_{\sigma r} \quad (10)$$

M est l'inductance de magnétisation tandis que $L_{\sigma s}$ et $L_{\sigma r}$ sont les inductances de dispersion des phases respectivement statorique et rotorique.

Les composantes du courant de magnétisation selon les axes d et q sont données par les relations 11 et 12.

$$i_{md} = i_{ds} + i_{dr} \quad (11)$$

$$i_{mq} = i_{qs} + i_{qr} \quad (12)$$

La prise en compte des relations (5) à (8) permet de réécrire les équations (1) à (4) comme suit.

$$-u_{ds} = R_s i_{ds} + L_s \frac{d}{dt} i_{ds} + M \frac{d}{dt} i_{dr} - \omega_a L_s i_{qs} - \omega_a M i_{qr} \quad (13)$$

$$-u_{qs} = R_s i_{qs} + L_s \frac{d}{dt} i_{qs} + M \frac{d}{dt} i_{qr} + \omega_a L_s i_{ds} + \omega_a M i_{dr} \quad (14)$$

$$0 = R_r i_{dr} + L_r \frac{d}{dt} i_{dr} + M \frac{d}{dt} i_{ds} - (\omega_a - \omega_m) L_r i_{dr} - (\omega_a - \omega_m) M i_{qs} \quad (15)$$

$$0 = R_r i_{qr} + L_r \frac{d}{dt} i_{qr} + M \frac{d}{dt} i_{qs} + (\omega_a - \omega_m) L_r i_{dr} + (\omega_a - \omega_m) M i_{ds} \quad (16)$$

En utilisant le modèle d'état de la machine avec les courants statoriques et rotoriques comme grandeurs d'état, ces équations peuvent être réécrites sous forme matricielle [ABDESSEMED, 2011].

$$\frac{d}{dt} [i] = -[L]^{-1} [R] [i] + [L]^{-1} [B] [u] \quad (17)$$

$$\frac{d}{dt} [i] = -[L]^{-1} \{ [R_1] + (\omega_a - \omega_m) [R_2] + \omega_a [R_3] \} [i] + [L]^{-1} [B] [u] \quad (18)$$

avec :

$$[i] = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}; [u] = \begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \\ u_{dr} \\ u_{qr} \end{bmatrix}$$

$$[R] = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_a L_s & 0 & -\omega_a M \\ \omega_a L_s & R_s & \omega_a M & 0 \\ 0 & -(\omega_a - \omega_m) M & R_r & -(\omega_a - \omega_m) L_r \\ (\omega_a - \omega_m) M & 0 & (\omega_a - \omega_m) L_r & R_r \end{bmatrix}$$

$$[R_1] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix};$$

$$[R_2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -M & 0 & -L_r \\ M & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix};$$

$$[R_3] = \begin{bmatrix} 0 & -L_s & 0 & -M \\ L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$[B] = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

et

$$[L] = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}$$

- Puissance et couple

Le couple électromagnétique est notamment donné par les relations 19 à 21.

$$C_{ém} = p(\psi_{ds} \cdot i_{qs} - \psi_{qs} \cdot i_{ds}) \quad (19)$$

$$C_{ém} = p \frac{M}{L_r} (\psi_{dr} \cdot i_{qs} - \psi_{qr} \cdot i_{ds}) \quad (20)$$

$$C_{ém} = pM(i_{dr} \cdot i_{qs} - i_{qr} \cdot i_{ds}) \quad (21)$$

La puissance électromagnétique peut s'écrire comme:

$$p_m = \omega_m M (i_{dr} \cdot i_{qs} - i_{qr} \cdot i_{ds}) \quad (22)$$

Les équations (21) et (22) montrent que l'interaction entre les courants statoriques et rotoriques est à l'origine de la création du couple électromagnétique et par conséquent, de la puissance échangée entre le stator et le rotor, ainsi que de la puissance mécanique à l'arbre de la machine.

Equations en régime permanent triphasé équilibré

En régime triphasé équilibré, les différentes grandeurs statorique et rotorique peuvent être exprimées sous forme de phaseur et les équations électriques de la machine deviennent :

$$\underline{U}_s = R_s \underline{I}_s + jX_s \underline{I}_s + jX_m \underline{I}_m \quad (23)$$

$$\frac{\underline{U}_r}{g} = 0 = \frac{R_r}{g} \underline{I}_r + jX_r \underline{I}_r + jX_m \underline{I}_m \quad (24)$$

$X_m (= \omega M)$, $X_s (= \omega L_{os})$ et $X_r (= \omega L_{or})$ sont respectivement la réactance de magnétisation, la réactance d'une phase statorique et la réactance d'une phase rotorique rapportée au stator.

Ces équations conduisent au schéma équivalent de la machine asynchrone sur lequel la résistance des pertes fer a été négligée.

Prise en compte de la saturation

La prise en compte de la saturation dans la modélisation de la machine asynchrone se réalise en considérant que les inductances varient avec le courant

de magnétisation [ABDESSEMED, 2011 ; PAPADOPOULOS *et al.*, 1996].

La principale hypothèse considérée est que les inductances de fuites statorique et rotorique restent constantes et que seule l'inductance mutuelle (et l'inductance de magnétisation) est variable [ABDESSEMED, 2011 ; PAPADOPOULOS *et al.*, 1996]. Ce qui conduit à considérer que seul le flux mutuel et donc le flux de magnétisation se sature et non le flux de fuite.

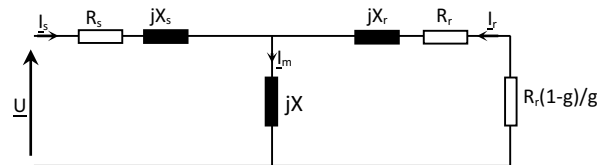


Figure I. Schéma équivalent d'une machine asynchrone à rotor en court-circuit

Les composantes des flux et des courants de magnétisation suivants les axes d et q sont liées par les relations 25 et 26 (Figure II).

$$\psi_{md} = |\psi_m| \cos \beta$$

et

$$\psi_{mq} = |\psi_m| \sin \beta \quad (25)$$

$$i_{md} = |i_m| \cos \beta$$

et

$$i_{mq} = |i_m| \sin \beta \quad (26)$$

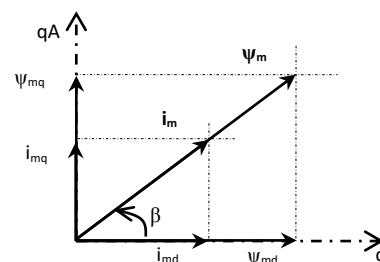


Figure II. Flux et courant de magnétisation

Les inductances de magnétisation statique (M) et dynamique (L) sont définies comme suit.

$$M(i_m) = \frac{|\psi_m|}{|i_m|}$$

et

$$L(i_m) = \frac{d|\psi_m|}{d|i_m|}$$

Abdessemed [2011] définit les inductances cycliques suivantes :

- Inductance cyclique d'insaturation

$$\mathcal{E}_{dq} = \frac{i_{md} \cdot i_{mq}}{|i_m|^2} (L - M) = \sin^2 \beta \cos^2 \beta (L - M) \quad (27)$$

- Inductance cyclique de saturation selon l'axe d

$$\mathcal{E}_{md} = M + \frac{i_{md}}{i_{mq}} \mathcal{E}_{dq} = M + \frac{\cos \beta}{\sin \beta} \mathcal{E}_{dq} \quad (28)$$

- Inductance cyclique de saturation selon l'axe q

$$\mathcal{E}_{mq} = M + \frac{i_{mq}}{i_{md}} \mathcal{E}_{dq} = M + \frac{\sin \beta}{\cos \beta} \mathcal{E}_{dq} \quad (29)$$

Papadopoulos *et al.* [1996] donne des définitions légèrement différentes de ces inductances cycliques mais qui n'introduisent que des modifications mineures dans la forme des équations.

En considérant un référentiel fixe ($\omega_a=0$), les équations de tension statoriques et rotoriques prennent la forme suivante :

$$-u_{ds} = R_s i_{ds} + L_{\sigma s} \frac{d}{dt} i_{ds} + \mathcal{E}_{md} \left(\frac{d}{dt} i_{ds} + \frac{d}{dt} i_{dr} \right) + \mathcal{E}_{dq} \left(\frac{d}{dt} i_{qs} + \frac{d}{dt} i_{qr} \right) \quad (2.30)$$

$$-u_{qs} = R_s i_{qs} + L_{\sigma s} \frac{d}{dt} i_{qs} + \mathcal{E}_{dq} \left(\frac{d}{dt} i_{ds} + \frac{d}{dt} i_{dr} \right) + \mathcal{E}_{mq} \left(\frac{d}{dt} i_{qs} + \frac{d}{dt} i_{qr} \right) \quad (2.31)$$

$$0 = R_r i_{dr} + L_{\sigma r} \frac{d}{dt} i_{dr} + \mathcal{E}_{md} \left(\frac{d}{dt} i_{ds} + \frac{d}{dt} i_{dr} \right) + \mathcal{E}_{dq} \left(\frac{d}{dt} i_{qs} + \frac{d}{dt} i_{qr} \right) + \omega_m \cdot (L_r i_{qr} + M i_{qs}) \quad (2.32)$$

$$0 = R_r i_{qr} + L_{\sigma r} \frac{d}{dt} i_{qr} + \mathcal{E}_{dq} \left(\frac{d}{dt} i_{ds} + \frac{d}{dt} i_{dr} \right) + \mathcal{E}_{mq} \left(\frac{d}{dt} i_{qs} + \frac{d}{dt} i_{qr} \right) - \omega_m \cdot (L_r i_{dr} + M i_{ds}) \quad (2.33)$$

Les fonctions $M(i_m)$ et $L(i_m)$ sont déterminées à partir de la courbe de magnétisation $\psi_m(i_m)$.

De même qu'évoqué précédemment, Abdessemed [2011] propose de réécrire ces équations sous forme d'équations d'état avec les courants statoriques et rotoriques comme grandeurs d'état.

$$\frac{d[i]}{dt} = -[L]^{-1} [R][i] + [L]^{-1} [B][u] \quad (35)$$

$$\frac{d[i]}{dt} = -[L]^{-1} \{ [R_1] + \omega_m [R_2] \} [i] + [L]^{-1} [B][u] \quad (36)$$

Avec

$$[i] = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}; [u] = \begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \\ u_{dr} \\ u_{qr} \end{bmatrix}$$

$$[R] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & \omega_m M & R_r & \omega_m L_r \\ -\omega_m M & 0 & -\omega_m L_r & R_r \end{bmatrix};$$

$$[R_1] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_s \end{bmatrix};$$

$$[R_2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix};$$

$$[R_3] = \begin{bmatrix} 0 & -L_s & 0 & -M \\ L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$[B] = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ et}$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{\sigma s} + \mathcal{E}_{md} & \mathcal{E}_{dq} & \mathcal{E}_{md} & \mathcal{E}_{dq} \\ \mathcal{E}_{dq} & L_{\sigma s} + \mathcal{E}_{mq} & \mathcal{E}_{dq} & \mathcal{E}_{mq} \\ \mathcal{E}_{md} & \mathcal{E}_{dq} & L_{\sigma r} + \mathcal{E}_{md} & \mathcal{E}_{dq} \\ \mathcal{E}_{dq} & \mathcal{E}_{mq} & \mathcal{E}_{dq} & L_{\sigma r} + \mathcal{E}_{mq} \end{bmatrix}$$

AUTO-EXCITATION DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE

Phénomène d’auto-excitation ou d’auto-amorçage

La **Figure III** présente le schéma équivalent d’une machine asynchrone auto-excitée.

L’amorçage de l’auto-excitation de la génératrice asynchrone, illustré par la **Figure IV**, se réalise suivant le processus décrit dans les lignes qui suivent.

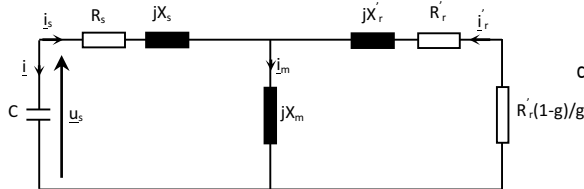


Figure III. Schéma équivalent d’une machine asynchrone auto-excitée.

La présence d’une force électromotrice rémanente $E_{srém}$ qui induit une tension $u_{srém}$ aux bornes du stator permet le début de l’amorçage en produisant un courant qui circule vers le condensateur.

La relation (36) lie cette tension induite à ce courant capacitif, i_c .

$$u_{srém} = \frac{1}{C} \int i_c dt \tag{36}$$

En d’autres mots, le courant capacitif produit par la tension statorique $u_{srém}$ sert de courant magnétisant pour l’excitation de la génératrice.

$$i_m = i_s = -i_c \tag{37}$$

Les relations (36) et (37), permettent de tracer la droite de la valeur efficace de la tension statorique en fonction de la valeur efficace du courant magnétisant. Le point d’intersection de cette droite avec la courbe de magnétisation correspond au point de fonctionnement de la génératrice (**Figure IV**).

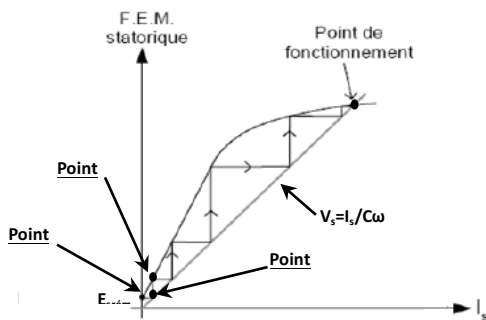


Figure IV. Phénomène d’autoamorçage

Le processus d’auto-excitation se stabilise au point d’intersection de la courbe de magnétisation avec la courbe de la tension statorique en fonction du courant magnétisant. Dans le cas contraire, la tension augmenterait de manière indéfinie. Ce point de fonctionnement se situe sur la partie saturée de la courbe de magnétisation. L’amorçage ne peut pas avoir lieu dans la zone linéaire de la courbe. Par conséquent, l’étude correcte du phénomène d’auto-excitation de la génératrice asynchrone doit être réalisée avec un modèle de la machine qui prend en compte la saturation du circuit magnétique.

La transformation de *Park* de l’équation (36) est donnée par la relation (38).

$$\begin{cases} i_{ds} = C \frac{du_{ds}}{dt} \\ i_{qs} = C \frac{du_{qs}}{dt} \end{cases} \tag{38}$$

Conditions d’auto-excitation

Relations de base

Le début du processus d’auto-excitation de la génératrice asynchrone est conditionné par la valeur du courant capacitif. Cette dernière doit être suffisante pour provoquer l’amorçage de la génératrice.

Le schéma équivalent d’une génératrice asynchrone auto-excitée par une capacité C et alimentant une charge d’impédance Z_l est illustré à la **Figure V**.

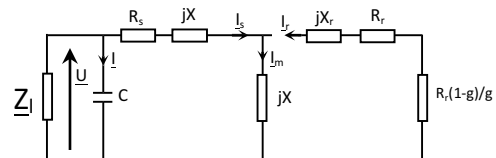


Figure V. Schéma équivalent d’une génératrice asynchrone auto-excitée alimentant une charge

Châtelain [1982] propose de noter Z_{tot} l’impédance total de la génératrice qui est donné par la relation (39) et Z_{ch} l’impédance totale de la capacité et de la charge qui est donnée par la relation (40). Le schéma de la **Figure V** peut être modifié comme à la **Figure VI**.

$$Z_{tot} = R_s + jX_s + \frac{jX_m \left(\frac{R_r}{g} + jX_r \right)}{\frac{R_r}{g} + j(X_r + X_m)} \tag{39}$$

$$\underline{Z}_{ch} = \underline{Z}'_l + \frac{1}{j\omega C'} = \frac{\frac{1}{j\omega C'} \cdot \underline{Z}'_l}{\frac{1}{j\omega C'} + \underline{Z}'_l} \quad (40)$$

Appelons $\underline{Z}_{rés}$, l'impédance du réseau qui est la somme de \underline{Z}'_l et \underline{Z}_{tot} .

$$\underline{Z}_{rés} = \underline{Z}_{ch} + \underline{Z}_{tot} \quad (41)$$

Le phénomène d'auto-excitation de la machine asynchrone se base sur le phénomène de résonance. Pour que la machine asynchrone fonctionne de manière stable en génératrice auto-excitée, les condensateurs d'auto-amorçage doivent entrer en résonance avec les inductances de la génératrice asynchrone et des charges éventuellement connectées au stator.

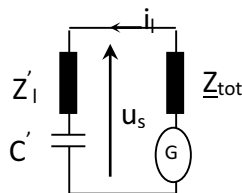


Figure VI. Génératrice asynchrone auto-excitée en charge

Cette condition de fonctionnement de la génératrice asynchrone se traduit par les relations (42) et (43).

$$Re(\underline{Z}_{rés}) = 0 \quad (42)$$

$$Im(\underline{Z}_{rés}) = 0 \quad (43)$$

Ces deux relations sont complétées par une condition de démarrage de l'auto-excitation donnée par Boldea [2006] et Châtelain [1982].

$$Re(\underline{Z}_{rés}) < 0 \quad (44)$$

La résolution de ces équations permet de déterminer les paramètres électriques de la génératrice : tension de sortie, fréquence, courant statorique, puissances active et réactive délivrées pour une charge et une machine donnée.

Notons que la non-linéarité de la relation entre l'inductance et le courant de magnétisation rend les calculs très complexes à résoudre.

Choix des condensateurs

Le choix d'une valeur adéquate des capacités des condensateurs pour une machine et une charge données est donc crucial. Deux méthodes peuvent être utilisées pour le calcul de la capacité d'auto-excitation. La première méthode, proposée par Châtelain [1982], consiste à calculer la valeur de la capacité par la résolution des équations (42) et (43). La seconde méthode, proposée par Boldea [2006], consiste à

choisir la capacité à partir de la courbe de magnétisation.

Méthode n°1

Les équations (42) et (43) étant difficiles à résoudre, Châtelain [1982] propose les hypothèses suivantes pour trouver une solution approchée :

- la génératrice s'auto-excite à vide (Figure IV) ;
- la courbe de magnétisation est linéaire ;
- les éléments du circuit équivalent sont connus et de valeurs constantes.

Seuls les condensateurs d'auto-excitation sont connectés aux bornes de la machine.

$$\underline{Z}_{ch} = \frac{1}{j\omega C} \Rightarrow \underline{Z}_{rés} = R_s + j \left(X_s - \frac{1}{\omega C} \right) + \frac{jX_m \left(\frac{R_r + jX_r}{g} \right)}{\frac{R_r}{g} + j(X_r + X_m)}$$

$$Re(\underline{Z}_{rés}) = R_s + \frac{X_m^2 \frac{R_r}{g}}{\left(\frac{R_r}{g} \right)^2 + (X_r + X_m)^2} \quad (45)$$

$$Im(\underline{Z}_{rés}) = X_s - \frac{1}{\omega C} + \frac{X_m \left[X_r (X_m + X_r) + \left(\frac{R_r}{g} \right)^2 \right]}{\left(\frac{R_r}{g} \right)^2 + (X_r + X_m)^2} \quad (46)$$

Il n'y a qu'une seule inconnue dans les relations (45) : le glissement g et deux inconnues dans la relation (46) : le glissement g et la capacité C .

La démarche consistera à déterminer le glissement en résolvant l'équation (42) et utiliser cette valeur pour déterminer la capacité C en résolvant l'équation (43).

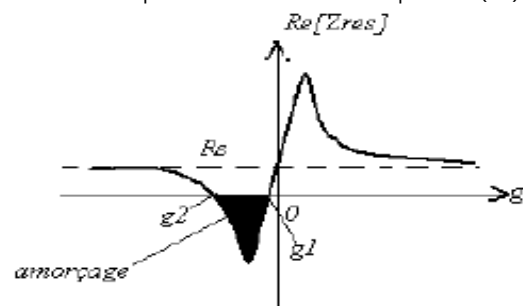


Figure VII. Domaine d'amorçage d'une machine asynchrone

Comme nous le montre la courbe de la partie réelle de l'impédance $\underline{Z}_{rés}$ en fonction du glissement, l'équation (42) possède deux solutions dont l'une a une

valeur proche de zéro, g_1 , et l'autre proche de -1 , g_2 . Il en résulte que deux valeurs de capacité seront également trouvées, C_1 et C_2 .

Un glissement négatif et proche de zéro signifie que la machine doit tourner à une vitesse légèrement supérieure à la vitesse de synchronisme. Une valeur du glissement proche de -1 signifie que la machine doit tourner à une vitesse proche du double de la vitesse de synchronisme.

Ces valeurs sont les valeurs extrêmes (voir **Figure VII**) et l'amorçage aura lieu pour des valeurs de glissement comprises entre g_1 et g_2 et pour des valeurs de capacité entre C_1 et C_2 .

Châtelain [1982] propose des formules approchées pour le calcul de C_1 et C_2 .

$$C_1 \approx \frac{1}{\omega_m^2 L_{\sigma r}} \quad (47)$$

$$C_2 \approx \frac{1}{\omega_m^2 \sigma L_{\sigma s}} \quad (48)$$

Avec le coefficient de dispersion donné par la relation (49).

$$\sigma = 1 - \frac{M}{L_{\sigma r} L_{\sigma s}} \quad (49)$$

Cette méthode permet, sans faire des calculs trop compliqués, de déterminer la vitesse à la quelle doit être entraînée la machine et la capacité des condensateurs d'auto-excitation. Cependant comme précisé précédemment, la prise en compte de la saturation est essentielle dans l'étude de l'auto-excitation de la génératrice asynchrone. De plus les réactances dépendent de la fréquence qui, elle dépend de la vitesse de rotation de la machine et ne sont donc pas constantes.

Toutefois, dans les simulations, les valeurs des capacités ainsi calculées permettent l'auto-excitation de la génératrice asynchrone.

Méthode n°2

Cette seconde méthode se base sur les principes de base du phénomène d'auto-excitation [BOLDEA, 2006]. Le point de fonctionnement de la machine est le point d'intersection entre la courbe de magnétisation (dans la zone de saturation) et la droite de la tension aux bornes de la capacité.

La valeur de la capacité est choisie de manière à ce que le point d'intersection des deux courbes corresponde à la tension de sortie désirée V_t . La droite de la tension aux bornes de la capacité possède deux

limites. La première correspond à la partie linéaire de la courbe de magnétisation et la seconde est déterminée par le courant maximal que peut supporter les enroulements statoriques.

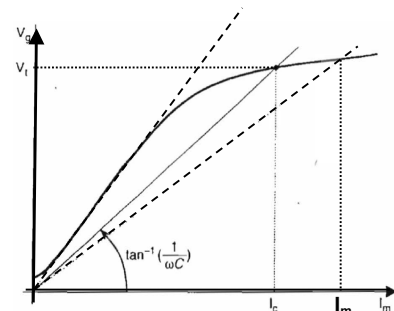


Figure VIII. Choix de la capacité d'auto-excitation

Cette méthode, qui est très exacte, suppose la connaissance précise de la courbe de magnétisation.

SIMULATIONS

Application numérique

Trois simulations ont été réalisées sur Matlab/Simulink pour illustrer le phénomène d'auto-excitation de la génératrice asynchrone.

Simulation 1 : modèle classique de la machine asynchrone (pas de saturation) sans condensateur d'auto-excitation.

Simulation 2 : modèle classique de la machine asynchrone avec condensateur d'auto-excitation.

Simulation 3 : modèle saturé de la machine asynchrone avec condensateur d'auto-excitation.

Les données de la machine utilisée pour les simulations sont reprises ci-dessous.

$P_n = 2,2 \text{ kW}$; $U_n = 220/380 \text{ V}$; $I_n = 9/5.3 \text{ A}$; $p = 2$; $f_n = 50 \text{ Hz}$; $N = 1500 \text{ tr/min}$; $R_s = 3,38 \Omega$; $R_r = 3,88 \Omega$; $L_{\sigma r} = 1,086 \text{ H}$;

$L_{\sigma s} = 1,086 \text{ H}$; $L_m = 0,18 \text{ H}$.

Les expressions du flux magnétique, des inductances de magnétisation statique et dynamique en fonction du courant magnétisant sont données respectivement par les relations (50), (51) et (52).

$$\psi_m(i_m) = 0,6425731 \arctg(0,493329 i_m) \quad (50)$$

$$M(i_m) = \begin{cases} 0,317 \text{ H} ; & \text{pour } i_m = 0 \text{ A} \\ \frac{0,6425731 \cdot \arctg(0,493329 \cdot i_m)}{i_m} \text{ H} ; & \text{pour } i_m \neq 0 \text{ A} \end{cases} \quad (51)$$

$$L(i_m) = \frac{0,317}{0,2433735 i_m^2 + 1} \quad (52)$$

$$C_1 = 3,712 \cdot 10^{-5} F$$

La détermination des condensateurs d'auto-excitation se base sur la méthode n°1 en utilisant la relation (47).

Deux modèles ont été utilisés : l'un ne prenant pas en compte la saturation du circuit magnétique (Figure IX) et l'autre prenant en compte la saturation (Figure X).

Et la valeur de la capacité des condensateurs calculée est reprise ci-après.

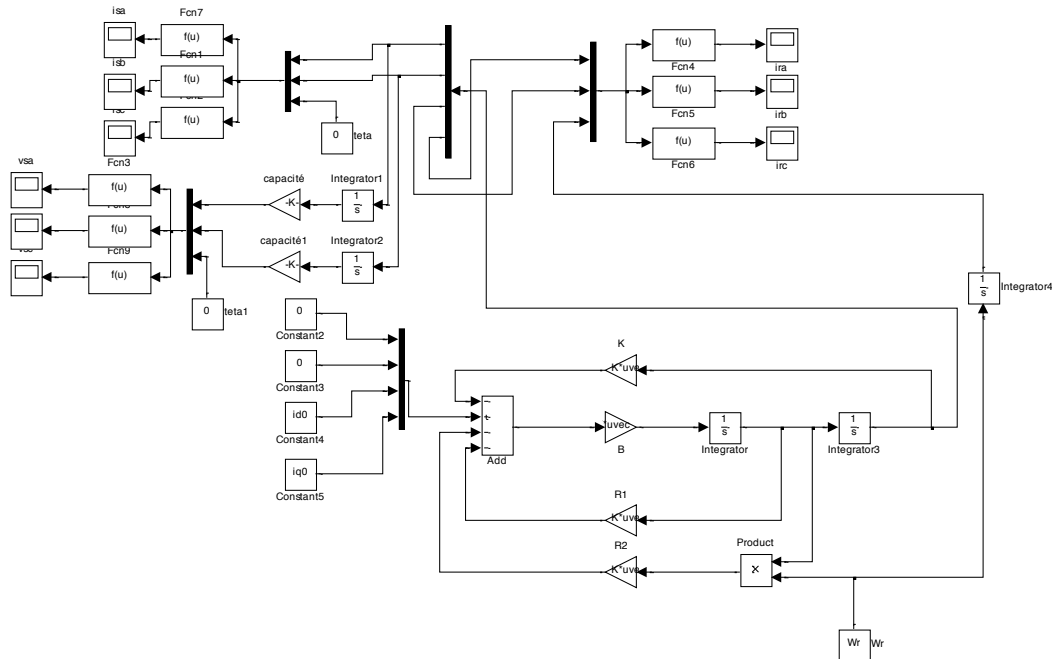


Figure IX. Schéma bloc de simulation de la génératrice asynchrone non-saturée.

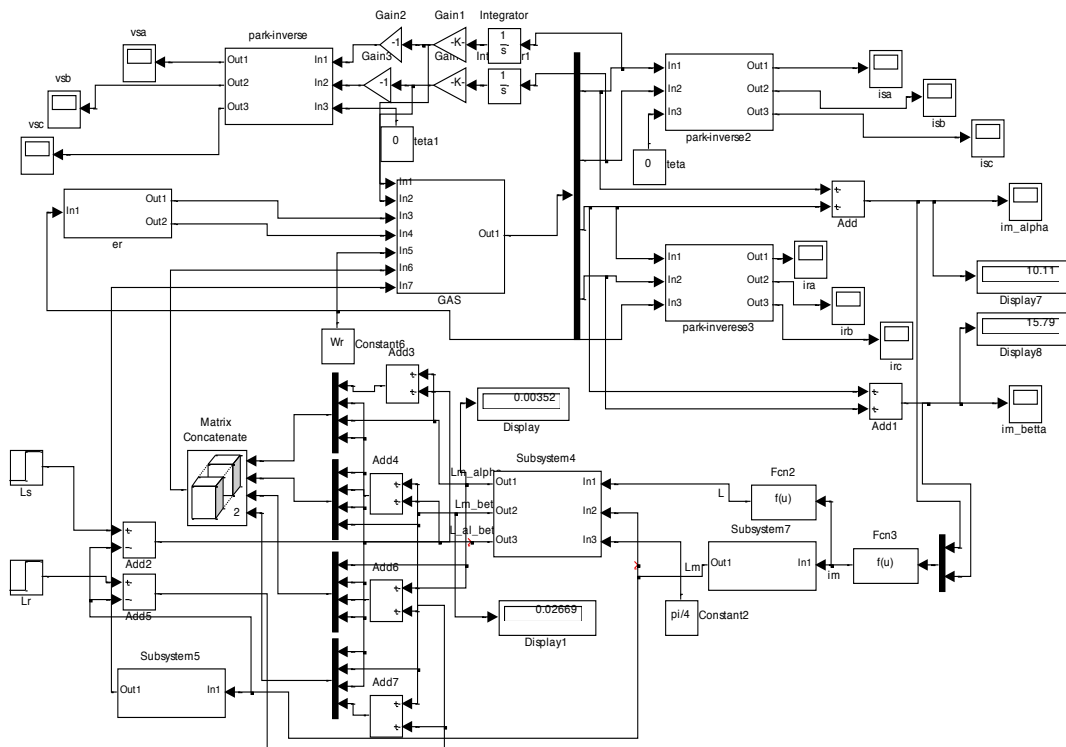


Figure X. Schéma bloc de simulation de la génératrice asynchrone saturée.

Pour les deux modèles, les matrices $[R_1]$ et $[R_2]$ ci-après sont utilisées sur les schémas bloc.

$$[R_1] = \begin{bmatrix} 3.38 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3.38 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3.88 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.88 \end{bmatrix}$$

et

$$[R_2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.18 & 0 & 1.086 \\ -0.18 & 0 & -1.086 & 0 \end{bmatrix}$$

Les matrices $[B]$ et $[L]$ sont utilisées dans le modèle non-saturé.

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{1}{3.712 \cdot 10^{-5}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{3.712 \cdot 10^{-5}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

et

$$[L] = \begin{bmatrix} 1.086 & 0 & 0.18 & 0 \\ 0 & 1.086 & 0 & 0.18 \\ 0.18 & 0 & 1.086 & 0 \\ 0 & 0.18 & 0 & 1.086 \end{bmatrix}$$

Résultats des simulations et interprétations

Simulation n°1

La **Figure XI** montre la courbe de la tension statorique de la génératrice asynchrone sans condensateur d'auto-excitation. Comme prévu par les relations théoriques, l'entraînement de la génératrice asynchrone à vide ne produit aucune tension aux bornes statoriques de la machine.

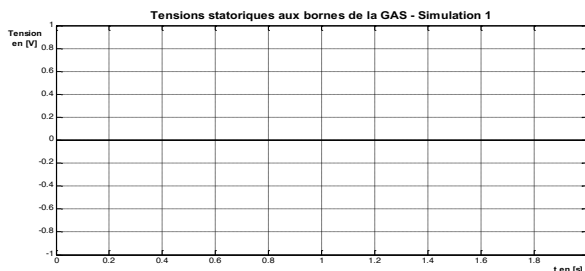


Figure XI. Tension statorique - Simulation n°1

Simulation n°2

Les **Figures XII** et **XIII** montrent respectivement les allures de la tension d'auto-amorçage à vide et du courant statorique de la génératrice asynchrone.

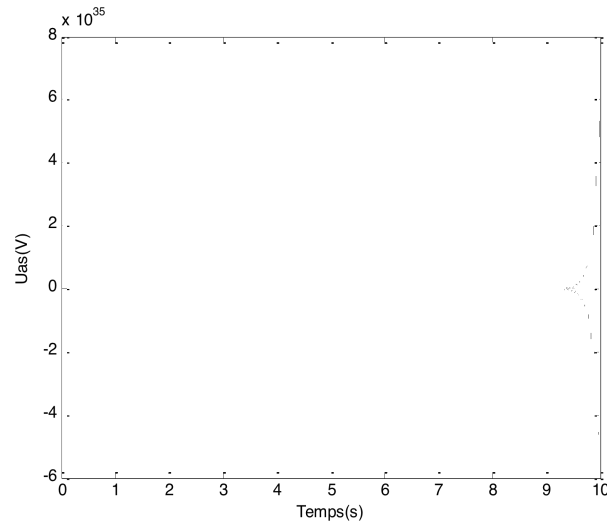


Figure XII. Tension statorique - Simulation n°2

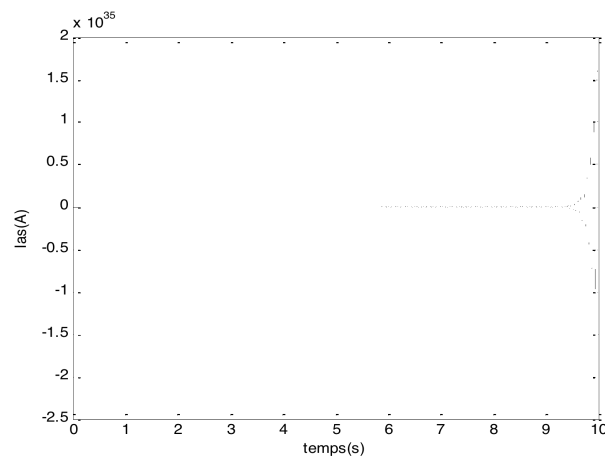


Figure XIII. Courant statorique - Simulation n°2

On constate que la tension induite croît indéfiniment de façon exponentielle avec des oscillations entretenues. Cela est dû essentiellement à l'hypothèse de non saturation du circuit magnétique de la machine.

Simulation n°3

La **Figure XIV** présente les allures des inductances de magnétisation statique et dynamique.

Les **Figures XV** et **XVI** montrent respectivement les allures de la tension d'auto-amorçage à vide et du courant statorique de la génératrice asynchrone.

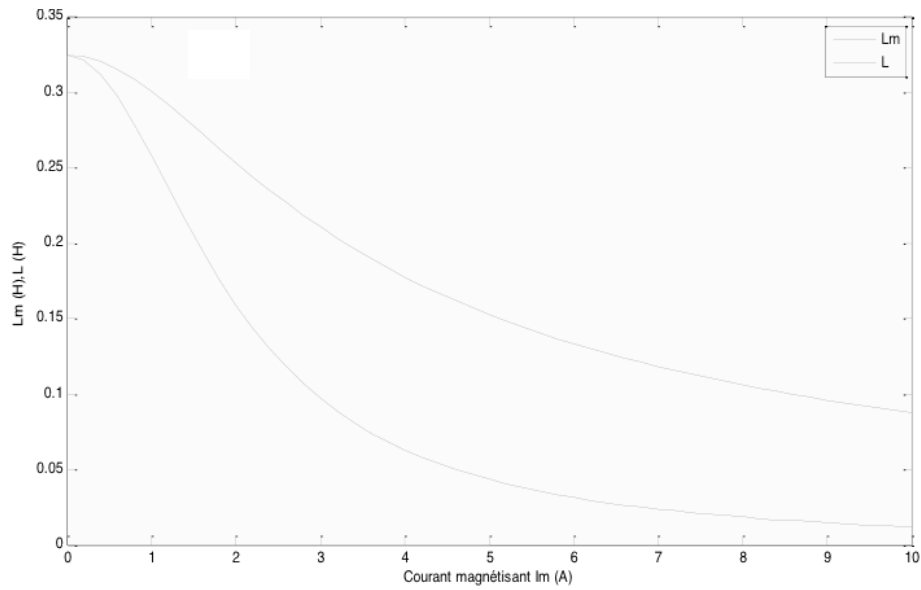


Figure XIV. Allures des inductances de magnétisation statique et dynamique

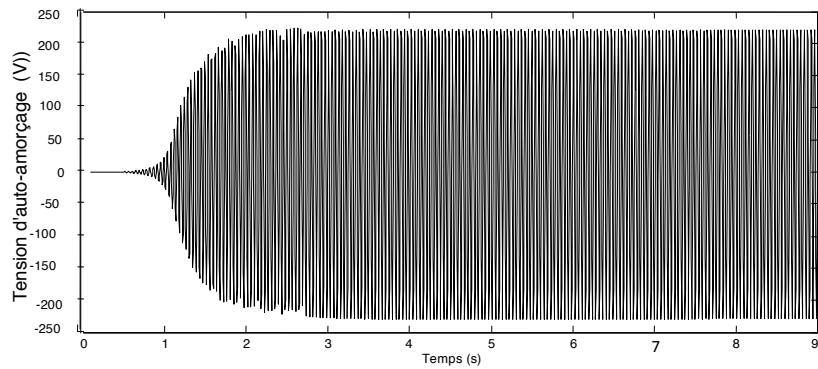


Figure XV. Tension statorique - Simulation n°3

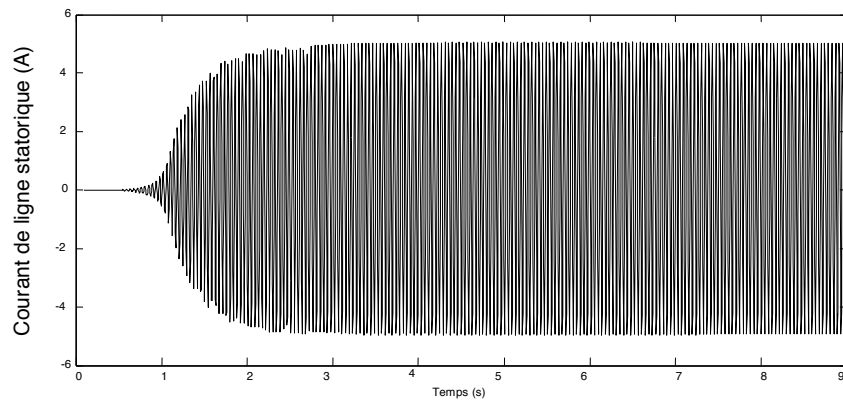


Figure XVI. Courant statorique - Simulation n°3

Au démarrage, la tension et le courant générés croissent de façon exponentielle, puis se stabilisent respectivement à 220 V et 4.2 A en régime totalement établi. L'allure des courbes de la tension et du courant statoriques correspondent à celles rencontrées chez Abdessamed [2011], Moussa Siddo [2007] et Bansal [2005].

CONCLUSION

Les éléments de base pour la compréhension du phénomène d'auto-excitation de la génératrice asynchrone ont été présentés en rappelant les principales équations de la machine asynchrone.

L'analyse du processus d'auto-excitation de cette génératrice a permis de relever les modifications à faire

sur les hypothèses classiques considérées dans l'étude du comportement de cette machine. Il a été démontré par les relations mathématiques et les résultats des simulations, qu'un modèle adéquat de la machine asynchrone se devait de prendre en compte la saturation du circuit magnétique.

Les simulations faites ont eu pour but d'illustrer le phénomène d'auto-excitation. Des simulations plus détaillées devraient prendre en compte un organe d'entraînement dont on pourrait imposer les valeurs de couple et de vitesse. On pourrait ainsi voir plus clairement l'influence des variations de la vitesse d'entraînement sur la tension de sortie de la génératrice.

RESUME

Cet article se base sur le développement actuel des moyens de calcul et les avancées dans la modélisation de la saturation des machines électriques pour réaliser l'étude de l'auto-excitation de la génératrice asynchrone. Après un rappel des équations de la machine asynchrone, les éléments de base pour la compréhension du phénomène sont présentés. La démarche à suivre pour prendre en compte la saturation du circuit magnétique dans la modélisation de la génératrice est présentée. Deux méthodes de détermination des valeurs des condensateurs d'auto-excitation sont également présentées et des simulations sont réalisées pour illustrer l'influence de la saturation sur le processus d'auto-excitation.

Mots clés : Génératrice asynchrone, saturation, génératrice auto-excitée, analyse transitoire, auto-excitation, modélisation

REFERENCES ET NOTES

- ABDESSEMED R. [2011]. *Electrotechnique Modélisation & Simulation des Machines Electriques Niveau C*, Ellipses Marketing, ELLIPSES MARKETING édition.
- BANSAL R.C. [2005]. *Three-Phase Self-Excited Induction Generators: An Overview; IEEE Transactions On Energy Conversion*, 20(2) : 292-299.
- BOLDEA I. [2006]. *Variable speed generators*, Polytechnical Institute Timisoara, CRC PRESS, Portland, OR.
- CHATELAIN J. [1982] *Traité d'Electricité*, Volume X, Presses Polytechniques romandes, Lausanne.
- FARRET F.A. & SIMOES GODOY M. [2004] *Renewable energy systems: Design and Analysis with Induction Generators*, CRC PRESS.
- LEVI E. & LIAO Y.W. [1998]. Modelling and simulation of a stand-alone induction generator with rotor flux oriented control, *Electric Power Systems Research* 46 : 141-152
- LEVI E. & LIAO Y.W. [2000]. An experimental investigation of self-excitation in capacitor excited induction generators, *Electric Power Systems Research* 53 : 59-65.
- LEVI E., RAUSKI D. [1993]. Self-excitation modelling in deep-bar and double-cage induction generators, 6th IEE Int. Conf. on Electrical Machines and Drives, Oxford, UK, IEE Conf. Pub. 376 : 162-167.
- MOUSSA SIDDO A. [2007]. *Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne*, Projet de fin d'étude, Ecole Nationale Polytechnique d'Algérie.
- PAPADOPOULOS M.P., PAPATHANASSIOU S.A. et TENTZERAKIS S.T. [1996]. Modelling of induction machine main flux saturation in the arbitrary reference frame - A case study on wind turbine self-excitation, Proceedings of International Conference on Electrical Machines (ICEM'96), Vigo, Espagne.



This work is in open access, licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons license, unless indicated otherwise in the credit line; if the material is not included under the Creative Commons license, users will need to obtain permission from the license holder to reproduce the material. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>