

MODELE DEDIE A LA SIMULATION DES RUPTURES DE BARRES DANS UN MOTEUR ASYNCHRONE A CAGE

SAHRAOUI Mohamed, ZOUZOU Salah Eddine, A. Menacer, A. Aboubou et A. Derghal.

Laboratoire de Modélisation des Systèmes Energétiques

Département d'Electrotechnique.

Université Mohamed KHIDER BP 145, Biskra. Algérie.

s_moh78@yahoo.fr

***Résumé:** dans cet article nous présenterons un modèle mathématique dédié à la simulation des ruptures de barres dans un moteur asynchrone triphasé à cage. Ce modèle est basé sur un circuit maillé représentant la cage rotorique. Des testes de simulation nous ont permis de montrer l'efficacité de ce modèle pour décrire le comportement de la machine dans l'état sain et avec défaut.*

***Mots clés :** Moteurs Asynchrones, Cage d'Ecureuil, Diagnostics, Modélisation.*

1. Introduction

Le moteur asynchrone à cage est une composante clé de la plupart des équipements industriels, du fait de sa grande robustesse et son prix de revient. Il est en effet, omniprésent dans les secteurs de pointes comme l'aéronautique, le nucléaire, la chimie,...

Malgré toutes ces qualités, un certain nombre de contraintes de différentes natures (thermiques, électriques, mécaniques et d'environnement) peuvent affectés la durée de vie de la machine en faisant apparaître des pannes dans le stator et le rotor [7], [8]. Ces pannes occasionnent des pertes économiques considérables, il faut donc mettre en œuvre des systèmes de surveillance afin d'éviter les arrêts imprévus.

Un mauvais fonctionnement d'un moteur asynchrone peut être due aux :

❖ Défauts rotoriques :

- Rupture de barres.
- Cassure d'anneaux.
- Excentricité statique et/ou dynamique.
- Défaut de circuit magnétique (rupture de tôles).

❖ Défauts statoriques :

- Court circuit dans les spires d'une même phase.
- Court circuit entre phases.
- Coupure d'une phase.
- Défaut de circuit magnétique (rupture de tôles).

Une étude [5] faite sur les pannes des machines asynchrones a montrée que près de 40% des défauts sont liées aux roulements, 38% sont concentrées au niveau du stator et 10% au niveau du rotor, le reste (12%) touche d'autres parties de la machine. Les ruptures de barres ou d'anneaux de court-circuit ont fait l'objet de nombreux travaux, vu l'inaccessibilité en fonctionnement des grandeurs rotoriques d'une part et d'autre part, ce type de défaut s'est avéré dangereux et peut être la cause d'autres pannes au niveau du stator et du rotor lui même.

L'étude et la mise au point des méthodes de diagnostic du moteur asynchrone nécessitent l'aménagement d'un environnement expérimental riche. En effet, les méthodes élaborées doivent être testées pour diverses conditions de fonctionnement et pour des machines de caractéristiques différentes ce qui est rarement possible en pratique ; c'est pour cette raison que la modélisation et la simulation des machines électriques constituent une étape primordiale en matière de diagnostic. Elles permettent la compréhension du fonctionnement defectueux et la vérification, sur un prototype virtuel, des algorithmes de détection des défauts. Elles nous permettent aussi, de construire des bases de données sur les manifestations électriques et magnétiques de ces défauts. Il est important donc, de synthétiser un modèle adapté au problème à traiter, décrivant le comportement de la machine non pas de la façon moyenne,

comme pour la commande, mais d'une façon la plus fine possible.

Parmi les approches de modélisation, nous citons deux :

- Approche numérique (La méthode des réseaux de perméances [9] et La méthode des éléments finis [10]).

- Approche analytique [1][3][4].

La méthode des éléments finis permet de reproduire fidèlement le comportement électromagnétique de la machine, et de simuler les défauts d'une manière plus proche de la réalité. Cependant, les moyens et le temps de calcul freinent l'utilisation de tels méthodes en simulation et l'évaluation des algorithmes de détection des défauts. Pour cela, nous avons privilégié l'approche analytique, afin de disposer d'un modèle mathématique ne nécessitant pas d'outils de calculs complexe.

2. Modèle mathématique

La modélisation nous permet de représenter la rupture de barres pour un moteur à cage. Pour cela, nous avons modélisé le rotor par des mailles reliés entre elles électriquement et couplés magnétiquement, où une maille est constituée de deux barres et les deux portions d'anneaux qui les reliant (figure1). Le nombre d'équations différentielles obtenues est égal au nombre de barres plus une (afin de prendre en considération l'un des deux anneaux) [1].

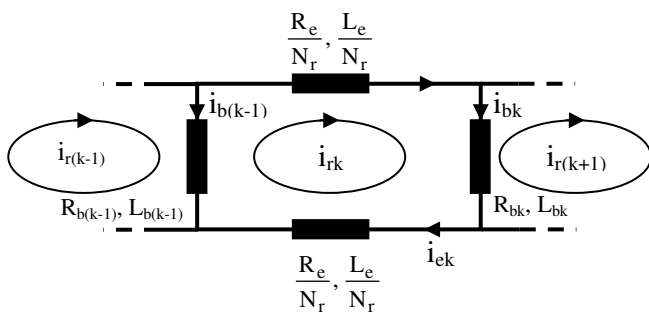


Figure 1 : Schéma équivalent d'une maille du rotor.

3. Expressions des inductances

Il est évident que le calcul des inductances de la machine est la clé de succès de la simulation. Ces inductances sont calculées par l'approche analytique qui s'articule sur le

concept d'inductance qui est basé sur la relation linéaire flux – courant.

❖ **L'inductance principale statorique (magnétisante) :**

$$L_{sp} = L_{ms} = \frac{4\mu_0 N_s^2 R l}{e \pi p^2} \quad (1)$$

❖ **L'inductance mutuelle statorique :**

$$M_s = -\frac{L_{sp}}{2} \quad (2)$$

❖ **L'inductance propre (totale) d'une phase statorique**

$$L_{as} = L_{bs} = L_{cs} = L_s = L_{sp} + L_{sf} \quad (3)$$

❖ **L'inductance cyclique statorique**

$$L_{sc} = L_{sp} + L_{sf} - M_s = \frac{3}{2} L_{sp} + L_{sf} \quad (4)$$

❖ **L'inductance propre (totale) d'une maille rotorique :**

$$L_{rp} = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \mu_0 \frac{2\pi}{e} R l \quad (5)$$

❖ **L'inductance mutuelle entre mailles rotorique non adjacentes.**

$$M_{rr} = -\frac{\mu_0}{N_r^2} \frac{2\pi}{e} R l \quad (6)$$

❖ **L'inductance mutuelle entre mailles rotorique adjacentes.**

$$M_{r_{k(k-1)}} = M_{r_{k(k+1)}} = M_{rr} - L_b$$

❖ **L'inductance mutuelle rotorique - statorique :**

$$M_{r_{k sa}} = L_{sr} \cos(\omega_r t + k a) \quad (7)$$

$$\text{avec : } L_{sr} = \frac{4\mu_0 N_s R l}{e p^2 \pi} \sin\left(\frac{a}{2}\right)$$

$$\text{où : } a = p \frac{2\pi}{N_r} \text{ et } k=0, 1, \dots, N_r-1$$

4. Mis en équation

4.1. Equations de tensions au stator

$$[V_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{sabc}] \quad (8)$$

avec :

$$[\phi_{sabc}] = [L_s][i_{sabc}] + [M_{sr}][i_{rk}] \quad (9)$$

d'où :

$[v_{sabc}] = [v_{sa} \ v_{sb} \ v_{sc}]^T$, le vecteur de tensions statoriques.

$[i_{sabc}] = [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc}]^T$, le vecteur de courants statoriques.

$[i_{rk}] = [i_{r0} \ i_{r1} \ \dots \ i_{rk} \ \dots \ i_{r(N_r-1)}]^T$, le vecteur de courants

dans les mailles rotoriques.

$[\phi_{sabc}] = [\phi_{sa} \ \phi_{sb} \ \phi_{sc}]^T$, le vecteur de flux statoriques.

Les matrices $[R_s]$, $[L_s]$ et $[M_{sr}]$ sont données dans l'annexe 1.

4.2. Equations de tensions au rotor

L'équation de tension pour une maille ' k ' de la cage rotorique est donnée par :

$$\begin{aligned} R_{bk} i_{r(k-1)} + \left(2 \frac{R_e}{N_r} + R_{b(k-1)} + R_{bk} \right) i_{rk} \\ - R_{bk} i_{r(k+1)} - \frac{R_e}{N_r} i_e + \frac{d}{dt} \phi_{rk} = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

D'où :

$$\begin{aligned} \phi_{rk} = \left(L_{rp} + 2L_b + 2 \frac{L_e}{N_r} \right) i_{rk} - M_{rr} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq k}}^{N_r-1} i_{rj} - L_b (i_{r(k-1)} + i_{r(k+1)}) - \frac{L_e}{N_r} i_e \\ - L_{sr} \left[\cos(\theta_r + ka) : \cos(\theta_r + ka - \frac{2\pi}{3}) : \cos(\theta_r + ka - \frac{4\pi}{3}) \right] [i_{sabc}] \end{aligned} \quad (11)$$

Il faut compléter les équations des circuits du rotor par celles de l'anneau de court circuit :

$$\frac{R_e}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} i_{rk} + \frac{L_e}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} \frac{d}{dt} i_{rk} - R_e i_e - L_e \frac{d}{dt} i_e = 0 \quad (12)$$

4.3. Equations globale des tensions

$$[V] = [R] [I] + [L] \frac{d[I]}{dt} + \frac{d[L]}{dt} [I] \quad (13)$$

avec :

$[V] = [v_{sa} \ v_{sb} \ v_{sc} : 0 \ 0 \ \dots \ 0 : 0]^T$: le vecteur global des tensions $(Nr+4 \times 1)$.

$[I] = [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc} : i_{r0} \ i_{r1} \ \dots \ i_{rk} \ \dots \ i_{r(N_r-1)} : i_e]^T$: le vecteur global des courants $(Nr+4 \times 1)$,

$$[R] = \begin{bmatrix} [R_s] & \vdots & [0] \\ \dots & \vdots & \dots \\ [0] & \vdots & [R_r] \end{bmatrix}, \quad [L] = \begin{bmatrix} [L_s] & \vdots & [M_{sr}] \\ \dots & \vdots & \dots \\ [M_{sr}]^T & \vdots & [L_r] \end{bmatrix}$$

$$\text{et } \frac{d[L]}{dt} = \begin{bmatrix} [0] & \vdots & \frac{d[M_{sr}]}{dt} \\ \dots & \vdots & \dots \\ \frac{d[M_{sr}]^T}{dt} & \vdots & [0] \end{bmatrix}$$

On remarque que la matrice $[M_{sr}]$ dépend du temps, ce qui nécessite l'inversion de la matrice inductance $[L]$, de dimension $Nr+4$, à chaque pas de calcul. Pour rendre cette matrice constante on applique la transformation de Park sur les équations de tensions globales. Le repère de Park doit être lié au rotor. Finalement la mise en équation du modèle de la machine conduit à un système complet de dimension $Nr+4$:

$$\begin{bmatrix} v_{os} \\ v_{ds} \\ v_{qs} \\ \dots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} = [L_{tr}] \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{os} \\ i_{ds} \\ i_{qs} \\ \dots \\ i_{r0} \\ \vdots \\ i_{rk} \\ \vdots \\ i_{r(N_r-1)} \\ \dots \\ i_e \end{bmatrix} + [R_{tr}] \begin{bmatrix} i_{os} \\ i_{ds} \\ i_{qs} \\ \dots \\ i_{r0} \\ \vdots \\ i_{rk} \\ \vdots \\ i_{r(N_r-1)} \\ \dots \\ i_e \end{bmatrix} \quad (14)$$

$[L_{tr}]$ et $[R_{tr}]$ sont les matrices globales des résistances et des inductances après la transformation de Park. Elles sont présentées dans l'annexe 1.

A ces équations, on ajoute celles électromécaniques afin d'avoir la vitesse électrique de rotation et la position θ_r du rotor.

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{J} (C_e - C_r - k_0 \omega_m) \quad (15)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_r = \omega_r \quad (16)$$

avec :

$$T_e = \sqrt{\frac{3}{2}} P L_{sr} \left\{ i_{qs} \sum_{k=0}^{N_r-1} i_{rk} \cos(ka) - i_{ds} \sum_{k=0}^{N_r-1} i_{rk} \sin(ka) \right\} \quad (17)$$

5. Résultats de la simulation

Les paramètres du moteur, utilisé en simulation, sont présentés dans l'annexe 2. La figure 2 montre l'évolution du couple électromagnétique et le courant statorique ainsi que la vitesse de rotation et le courant dans la barre 1 lors d'un démarrage à vide sous une tension nominale avec une alimentation sinusoïdale équilibrée. A l'instant $t=0.6s$, nous procédons à un échelon de couple résistant nominal de $1.5Nm$. Le couple électromagnétique vient équilibrer le couple résistant (figure III.2.a), le courant augmente à la valeur nominale (figure 2.b) et la vitesse diminue à la vitesse nominale (figure 2.c).

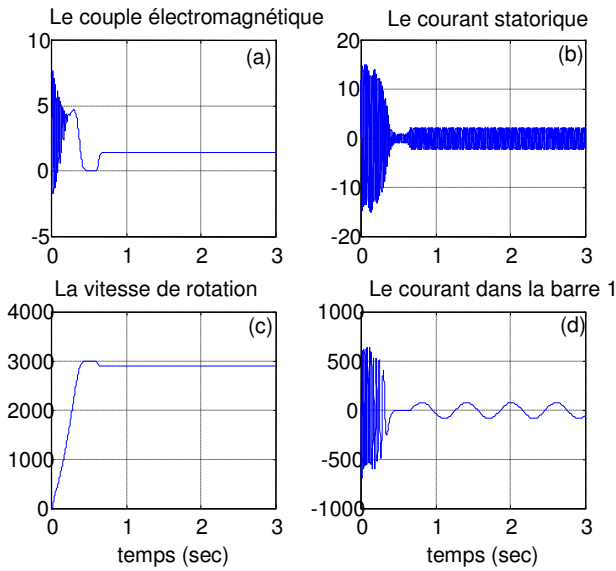


Figure 2 : Le moteur est à l'état sain.

Le tableau 1 montre que les résultats obtenus par simulation sont en bonne concordance qualitative et quantitative avec ceux réels du moteur [6].

Paramètres	Résultats réels [6]	Résultats calculés (simulation)	Erreur relative (%)
Puissance (w)	450	455.14	1.14
Courant statorique (A)	1.7	1.6	5.88
Vitesse (tr/mn)	2895	2899	0.1

Tableau 1

5.1. Simulation de la rupture de barres

Il est assez difficile de décrire exactement la succession des phénomènes physiques entrant en jeu lors d'une rupture d'une barre.

On peut modéliser la cassure d'une barre par l'annulation du courant qui traverse cette barre [11]. Les matrices des inductances et des résistances sont modifiées de telle façon que : si la barre k est rompue, le courant i_{bk} doit être nul. Dans ce cas, le courant dans la maille $(k-1)$ devient égal au courant dans la maille (k) , c'est-à-dire, $(i_{r(k-1)} = i_{rk})$. Ceci est traduit dans les matrices des inductances et des résistances, par l'addition des deux colonnes et des deux lignes liées aux courants $i_{r(k-1)}$ et i_{rk} . Le courant i_{rn} est donc supprimé du vecteur des courants, en d'autres termes l'ordre du système est réduit.

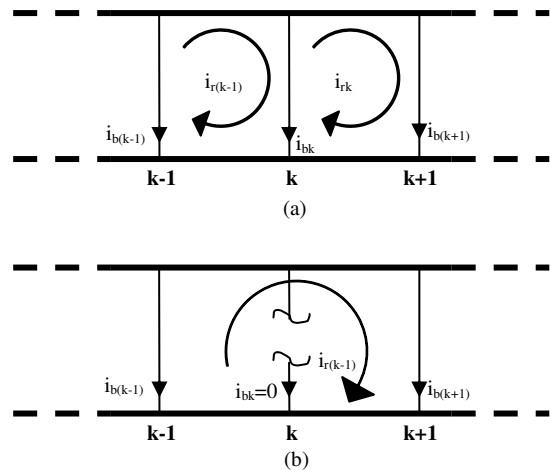


Figure 3 : schéma équivalent de la cage rotorique pour a. Etat sain, b. Avec une barre rompue.

E. Ritchie [4], a comparé entre les résultats de simulation, lorsqu'on modélise la cassure d'une barre par la méthode décrite ci-dessus, et les résultats expérimentaux. Il a trouvé que cette méthode est limitée. Ceci est dû aux hypothèses simplificatrices, puisque dans le modèle mathématique on a négligé les courants de fuite entre les barres. En réalité, et d'après Kerszenbaum [12], le courant dans une barre rompue n'est jamais nul. Il existe toujours un courant qui passe tangentiellement à travers les tôles du rotor vers les barres adjacentes. Il est possible de modéliser ce phénomène par

l'addition d'une résistance de grande valeur par rapport à la résistance de la barre rotorique rompue.

D'après A. Abed [1], la valeur de la résistance à additionner pour simuler la rupture d'une barre dépend des paramètres de la machine et particulièrement du pas de simulation. En ce qui nous concerne, avec un pas de simulation de 10^{-3} sec, une augmentation de 30 fois de la résistance initiale de la barre nous a permis, d'aboutir à des résultats en concordance avec ceux prévus par la théorie. On note que l'augmentation de la résistance plus de 30 fois amène à des instabilités numériques, pour éviter ce problème il faut diminuer le pas de calcul.

A l'instant $t=2s$, on simule la rupture de la barre 1, et à l'instant $t=3s$, on simule la rupture de la deuxième barre. La figure 4 montre l'influence de ce défaut sur le couple, courant statorique, la vitesse et le courant dans la barre 1. On constate que la rupture d'une barre rotorique crée des oscillations dans le couple et dans la vitesse, ainsi qu'une modulation du courant statorique. Les amplitudes de ces oscillations et ces modulations augmentent avec le nombre de barres cassées.

La figure 5.a et 5.b, représente les valeurs efficaces des courants dans les barres rotoriques, pendant la rupture de la barre 1. On constate que la présence d'une barre cassée, provoque une surintensité dans les barres voisines (les barres 2 et 27).

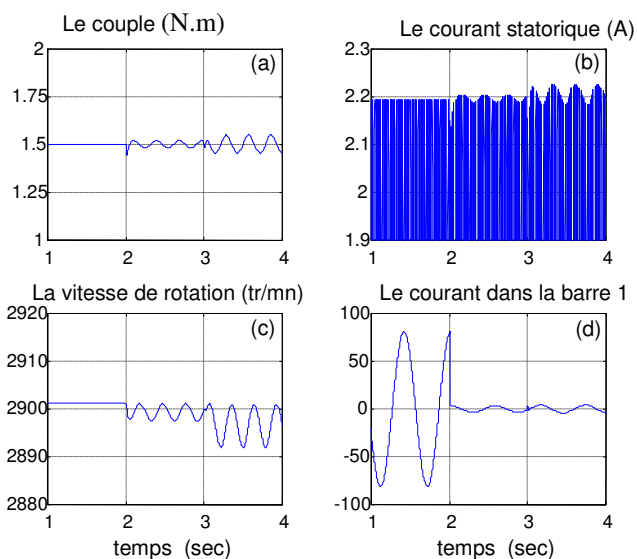


Figure 4 : Moteur avec une barre cassée (Agrandissement)

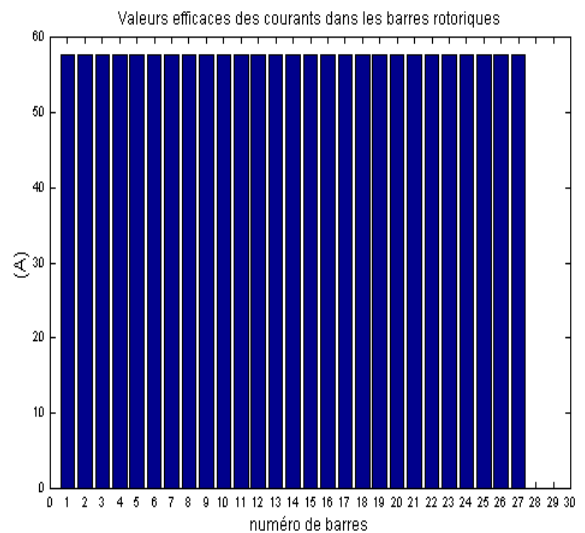


Figure 5.a : Moteur sans défaut

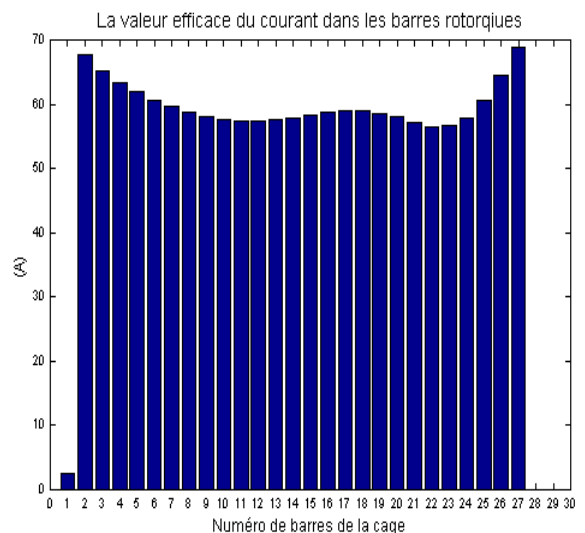


Figure 5.b : Moteur avec une barre cassée.

8. Conclusion

Un modèle mathématique multi - enroulement permettant la simulation des cassures de barres a été présenté. Le choix d'un tel modèle; nous est imposé par l'objectif de simuler une rupture de barre au rotor. Pour cela nous avons cherché à représenter toutes les barres du rotor. L'introduction du défaut se réduit à une simple augmentation de la résistance de la barre dont on veut simuler la rupture. Nous avons trouvé que la rupture d'une barre provoque des oscillations dans le couple, la vitesse et le courant statorique et crée en même temps une surintensité dans les barres au voisinage de la barre rompue.

Annexe1

La matrice $[L_{tr}]$ est donnée par :

$$\begin{bmatrix}
 L_s + 2M_s & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & \vdots & 0 \\
 0 & L_s - M_s & 0 & \vdots & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr} & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr}\cos(a) & \dots & \dots & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr}\cos((Nr-1)a) & \vdots & 0 \\
 0 & 0 & L_s - M_s & \vdots & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr}\sin(a) & \dots & \dots & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr}\sin((Nr-1)a) & \vdots & 0 \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 0 & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr} & 0 & \vdots & L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{Nr} & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} - L_b & \vdots & -\frac{L_e}{Nr} \\
 0 & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr}\cos(a) & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr}\sin(a) & \vdots & M_{rr} - L_b & L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{Nr} & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 0 & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr}\cos((Nr-1)a) & \sqrt{\frac{3}{2}}L_{sr}\sin((Nr-1)a) & \vdots & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} - L_b & L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{Nr} & \vdots & -\frac{L_e}{Nr} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 0 & 0 & 0 & \vdots & -\frac{L_e}{Nr} & \dots & \dots & \dots & -\frac{L_e}{Nr} & \vdots & L_e
 \end{bmatrix}$$

La matrice $[R_{tr}]$ est donnée par :

$$\begin{bmatrix}
 r_s & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & \vdots & 0 \\
 0 & r_s & \omega r(M_s - L_s) & \vdots & 0 & -\omega r L_{sr} \sqrt{\frac{3}{2}} \sin(a) & \dots & \dots & -\omega r L_{sr} \sqrt{\frac{3}{2}} \sin((Nr-1)a) & \vdots & 0 \\
 0 & \omega r(L_s - M_s) & r_s & \vdots & \omega r L_{sr} \sqrt{\frac{3}{2}} & \omega r L_{sr} \sqrt{\frac{3}{2}} \cos(a) & \dots & \dots & \omega r L_{sr} \sqrt{\frac{3}{2}} \cos((Nr-1)a) & \vdots & 0 \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 0 & 0 & 0 & \vdots & R_{b0} + R_{b(Nr-1)} + 2\frac{R_e}{Nr} & -R_{b0} & 0 & \dots & -R_{b(Nr-1)} & \vdots & -\frac{R_e}{Nr} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & -R_{b(k-1)} & R_{bk} + R_{b(k-1)} + 2\frac{R_e}{Nr} & -R_{bk} & 0 & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 0 & 0 & 0 & \vdots & -R_{b(Nr-1)} & 0 & \dots & -R_{b(Nr-2)} & R_{b(Nr-1)} + R_{b(Nr-2)} + 2\frac{R_e}{Nr} & \vdots & -\frac{R_e}{Nr} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 0 & 0 & 0 & \vdots & -\frac{R_e}{Nr} & \dots & \dots & \dots & -\frac{R_e}{Nr} & \vdots & R_e
 \end{bmatrix}$$

$[R_s]$: matrice des résistances statoriques.

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

$[L_s]$: matrice des inductances statoriques.

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{as} & M_s & M_s \\ M_s & L_{bs} & M_s \\ M_s & M_s & L_{cs} \end{bmatrix}$$

$[M_{sr}]$: matrice des inductances mutuelles entre phases statoriques et mailles rotoriques.

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} \dots & L_{sr} \cos(\theta_r + k a) & \dots & \vdots & 0 \\ \dots & L_{sr} \cos(\theta_r + k a - \frac{2\pi}{3}) & \dots & \vdots & 0 \\ \dots & L_{sr} \cos(\theta_r + k a - \frac{4\pi}{3}) & \dots & \vdots & 0 \end{bmatrix} \quad \text{où : } k=0, 1, 2, \dots, Nr-1$$

$[R_r]$: la matrice des résistances rotoriques.

$$\begin{bmatrix} R_{b0} + R_{b(Nr-1)} + 2\frac{R_e}{N_r} & -R_{b0} & 0 & \dots & -R_{b(Nr-1)} & \vdots & -\frac{R_e}{N_r} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & R_{b(k-1)} & R_{bk} + R_{b(k-1)} + 2\frac{R_e}{N_r} & -R_{bk} & 0 & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -R_{b(Nr-1)} & 0 & \dots & -R_{b(Nr-2)} & R_{b(Nr-1)} + R_{b(Nr-2)} + 2\frac{R_e}{N_r} & \vdots & -\frac{R_e}{N_r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\frac{R_e}{N_r} & \dots & \dots & \dots & -\frac{R_e}{N_r} & \vdots & R_e \end{bmatrix}$$

$[L_r]$: matrice des inductances rotoriques.

$$\begin{bmatrix} L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} - L_b & \vdots & -\frac{L_e}{N_r} \\ M_{rr} - L_b & L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} - L_b & L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} & \vdots & -\frac{L_e}{N_r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\ -\frac{L_e}{N_r} & \dots & \dots & \dots & -\frac{L_e}{N_r} & \vdots & L_e \end{bmatrix}$$

Annexe 2

❖ Paramètres du moteur

P: 450 w	R_b : 74 $\mu\Omega$
V: 127 v	L_e : 0.33 μH
f : 50 Hz	Ns: 193
P: 1	R_e : 74 $\mu\Omega$
Nr: 27	L_b : 0.33 μH
R_s : 4.1 Ω	J: 4.5 10^{-3} Nms ²
Lsf : 17.5 mH	
k0: 5 10^{-6} Nms ²	

❖ Liste des symboles

B_s : Induction magnétique de l'entrefer créée par le courant statorique.

B_{rd} : Induction magnétique créée dans l'entrefer par le courant du système direct équivalent au rotor.

B_{ri} : Induction magnétique créée dans l'entrefer par le courant du système inverse équivalent au rotor.

B_k : induction magnétique dans l'entrefer produit par une maille rotorique k.

i_{bk} : Courant dans la barre k.

i_{rk} : Courant dans la maille k.

i_e : Courant dans l'anneau de court circuit

i_{ek} : Courant dans une portion d'anneau

i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} : Courants statoriques.

v_{sa}, v_{sb}, v_{sc} : Tensions statoriques

i_{ds}, i_{qs} : Composantes biphasées du courant statorique

φ_{Bs} : Phase du champ tournant statorique

φ_{Brd} : Phase du champ tournant rotorique direct

φ_{Bri} : Phase du champ tournant rotorique inverse.

$[R], [L]$: Matrices globales des résistances et des inductances avant la transformation du Park.

$[R_{tr}], [L_{tr}]$: Matrices globales des résistances et des inductances après la transformation du Park.

θ_s : Position des grandeurs statoriques.

μ_0 : Perméabilité magnétique du vide (de l'air).

θ_r : Position du rotor.

ω_s : Pulsation statorique

ω_r : Vitesse électrique de rotation.

a : Angle électrique entre deux barres rotoriques.

❖ Références

- [1] : A. Abed, L. Baghli, H. Razik, A. Rezzoug, "Modelling Induction Motors for Diagnostic Purposes", EPE'99, 7-9 September 1999, 233.pdf, Lausanne, Suisse, pp. 1-9.
- [2] : A. Abed, "Contribution à l'Etude et au Diagnostic de la Machine Asynchrone", Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, mars 2002.
- [3] : S. T. Manolas, J. Tegopoulos, M. Papadopoulos, "Analysis of Squirrel Cage Induction Motors with Broken Rotor Bars", Proc. ICEM'96, Vol 3, Vigo, Spain 1996, pp 19-23.
- [4] : E. Ritchie, X. Deng, T. Jokinen, "Modèle Dynamique d'un Moteur à Cage d'Ecureuil Triphasé avec Défauts du Rotor", ICEM'94, Paris France, 1994, pp. 694-698.
- [5] : W. T. Thomson, M. Fenger, "Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults", IEEE Industry Application Magazine, July/August 2001, pp. 26-34.
- [6] : P. Vas, F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, "Transient Modelling Oriented to Diagnostics of Induction Machines with rotor Asymetries", Proc. ICEM'94, 1994, pp. 62-67.
- [7] : A. H. Bonnett and G. C. Soukup, "Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28, No 4, July/August 1992, pp. 921-937.
- [8] : Y. Han, Y. H. Song, "Condition Monitoring Techniques for Electrical Equipment – A Literature Survey", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 1, January 2003, pp. 4-13.
- [9] : A. Jaco, A. Makki, H. Yahoui, G. Grellet, "Modelling of Three Phase Asynchronous Motor Application to Magnetic Faults Diagnostic", ICEM 98, Istanbul, Turkey, Vol 1. 1998, pp. 443-447.
- [10] : J. F. Bangura, N. A. Demerdash, "Comarison Between Characterization and Diagnosis of Broken Bars/End-Ring Connectors and Airgap Eccentricities of Induction Motors in ASD's Using a Coupled Finite Element-State Space Method", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 15, No. 1, March 2000, pp. 47-56.
- [11] : H. A. Toliyat, T. A. Lipo, "Transient Analysis of Cage Induction Machines Under Stator, rotor bars and end – ring Faults", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 10, N°6, June 1995, pp. 241-247.
- [12] : I. Kerszenbaum, C. F. Landy, "The Existance of Large Inter – Bar Currents in Three Phase Squirrel Cage Motors with Rotor – Bar and/or End – Ring Faults", IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol 103, n°7, July 1984, pp 1854-1862.