

MODÉLISATION ET SIMULATION D'UNE MACHINE ASYNCHRONE À CAGE À L'AIDE DU LOGICIEL MATLAB/SIMULINK

Mamadou Lamine Doumbia

Ingénieur de Recherche
6579 Rue BRIAND
Montréal (Québec)
CANADA, H4E 3L4

Abdoulaye Traoré

Directeur adjoint
École Nationale d'Ingénieurs
B.P. 242 Bamako
MALI

Mots clés : Machine électrique, Moteur électrique, Modélisation, Simulation, Matlab, Simulink.

Thème scientifique : Sciences de l'ingénieur (Génie électrique)

RÉSUMÉ

En ingénierie, la simulation est un moyen efficace et économique, couramment utilisé pour faire des études préliminaires et/ou comparatives, tant au stade du développement (conception), qu'au cours du fonctionnement normal des systèmes. Actuellement, plusieurs outils de simulation, parmi lesquels MATLAB/SIMULINK™, sont utilisés dans l'industrie et dans les milieux universitaires. Dans ce travail, nous présenterons le principe de modélisation et de simulation d'une machine électrique : le moteur asynchrone à cage d'écureuil. Ce dernier, grâce aux nombreux avantages qu'il procure par rapport aux autres types de moteurs électriques, s'est imposé comme le moteur de premier choix dans les mécanismes industriels. Le travail comprendra les sections suivantes :

- l'introduction, où nous présenterons l'importance des machines électriques dans l'économie moderne ainsi que les outils de simulation couramment dans le domaine du génie électrique,
- le développement du modèle du moteur asynchrone à cage qui permettra d'établir le modèle mathématique du moteur étudié,
- la présentation sommaire de MATLAB/SIMULINK™ en tant que logiciel de modélisation et de simulation en ingénierie,
- la réalisation du modèle de simulation du moteur asynchrone à cage dans l'environnement MATLAB/SIMULINK™,
- la présentation des résultats obtenus suite à la simulation du moteur asynchrone à cage,
- la conclusion, où sera résumé le travail effectué.
- la référence bibliographique.

1. Introduction

Le moteur asynchrone ou moteur d'induction est actuellement le moteur électrique dont l'usage est le plus répandu dans l'industrie. Son principal avantage réside dans l'absence de contacts électriques glissants, ce qui conduit à une structure simple et robuste facile à construire. Le domaine de puissance va de quelques watts à plusieurs mégawatts. Relié directement au réseau industriel à tension et fréquence constantes, il tourne à vitesse variable peu différente de la vitesse synchrone; c'est lui qui est utilisé pour la réalisation de la quasi-totalité des entraînements à vitesse constante. Le moteur asynchrone permet aussi la réalisation d'entraînements à vitesse variable et la place qu'il prend dans ce domaine ne cesse de croître. Dans les pays industrialisés, plus de 60% de l'énergie électrique consommée est transformée en énergie mécanique par des entraînements utilisant les moteurs électriques.

La simulation est un moyen efficace et économique, utilisé pour faire des études préliminaires et/ou comparatives, tant au stade du développement (conception), qu'au cours du fonctionnement normal des systèmes. Plusieurs outils (spécialisés ou non) de simulation sont utilisés dans le domaine de l'électronique de puissance ou de la commande des machines électriques : ATOSEC5, EMTP, SPICE, SIMNON, MATLAB, SIMULINK, etc. La difficulté de simulation du moteur asynchrone provient de sa structure fortement non-linéaire. Le modèle contient plusieurs blocs non linéaires.

2. Modélisation du moteur asynchrone à cage

Les équations générales (1) décrivant le fonctionnement des moteurs à courant alternatif dans un référentiel $d-q$ se retrouvent dans la littérature technique consacrée aux machines électriques.

$$\begin{aligned}u_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_a \psi_{qs} \\u_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_a \psi_{ds} \\u_{dr} &= R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega_a - \omega_r) \psi_{qr} \\u_{qr} &= R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega_a - \omega_r) \psi_{dr}\end{aligned}\tag{1}$$

En réécrivant les équations précédentes dans un référentiel stationnaire $d-q$ ($\omega_a = 0$), on obtient le modèle de la partie électrique du moteur asynchrone :

$$\begin{aligned}
u_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} \\
u_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} \\
0 &= R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} + \omega_r \psi_{qr} \\
0 &= R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} - \omega_r \psi_{dr}
\end{aligned} \tag{2}$$

Le rotor du moteur asynchrone à cage étant fermé sur lui même (court-circuité), on prend u_{dr} et u_{qr} égales à zéro.

Les flux couplés statoriques et rotoriques sont obtenus à partir des inductances propres et mutuelles :

$$\begin{aligned}
\psi_{ds} &= L_s i_{ds} + L_{sr} i_{dr} \\
\psi_{qs} &= L_s i_{qs} + L_{sr} i_{qr} \\
\psi_{dr} &= L_r i_{dr} + L_{sr} i_{ds} \\
\psi_{qr} &= L_r i_{qr} + L_{sr} i_{qs}
\end{aligned} \tag{3}$$

L'équation du couple électromagnétique du moteur est :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p [\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}] = \frac{3}{2} p L_{sr} (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \tag{4}$$

L'équation du mouvement, reliant les parties électrique et mécanique s'écrit comme suit :

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} = C_{em} - C_r \tag{5}$$

Les tensions biphasées dans l'équation (2) sont obtenues comme suit :

$$\begin{aligned}
u_{ds} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \left(u_{as} - \frac{1}{2} u_{bs} - \frac{1}{2} u_{cs} \right) \\
u_{qs} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} u_{bs} - \frac{\sqrt{3}}{2} u_{cs} \right)
\end{aligned} \tag{6}$$

Les équations de transformation inverse des courants statoriques sont :

$$\begin{aligned}
i_{as} &= \sqrt{\frac{2}{3}} i_{ds} \\
i_{bs} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \left(-\frac{1}{2} i_{ds} + \frac{\sqrt{3}}{2} i_{qs} \right) \\
i_{cs} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \left(-\frac{1}{2} i_{ds} - \frac{\sqrt{3}}{2} i_{qs} \right)
\end{aligned} \tag{7}$$

3. Outils de simulation MATLAB/SIMULINK

3.1. Matlab

Un système interactif et convivial de calcul numérique et de visualisation graphique, destiné aux ingénieurs et scientifiques. Il possède un langage de programmation à la fois puissant et simple d'utilisation. Il permet d'exprimer les problèmes et solutions d'une façon aisée, contrairement à d'autres langages de programmation. Il intègre des fonctions d'analyse numérique, de calcul matriciel, de traitement de signal, de visualisation graphique 2D et 3D, etc. Il peut être utilisé de façon interactive ou en mode programmation. En mode interactif, l'utilisateur a la possibilité de réaliser rapidement des calculs sophistiqués et d'en présenter les résultats sous forme numérique ou graphique. En mode programmation, il est possible d'écrire des scripts (programmes) comme avec d'autres langages. L'utilisateur peut aussi créer ses propres fonctions pouvant être appelées de façon interactive ou par des scripts. Ces fonctions fournissent à MATLAB un atout inégalable : son extensibilité. Ainsi, l'environnement MATLAB peut facilement être étendu. Dans MATLAB, l'élément de base est la matrice. L'utilisateur ne s'occupe pas des allocations de mémoire ou de redimensionnement comme dans les langages classiques. Les problèmes numériques peuvent être résolus en un temps record, qui ne représente qu'une infime partie du temps à passer avec d'autres langages comme le Basic, C, C++ ou le Fortran. MATLAB s'est imposé dans les milieux universitaire et industriel comme un outil puissant de modélisation, de simulation et de visualisation de problèmes numériques. Dans le monde universitaire, MATLAB est utilisé pour l'enseignement de l'algèbre linéaire, le traitement du signal, l'automatique, etc., ainsi que dans la recherche scientifique. Dans le domaine industriel, il est utilisé pour la résolution et la simulation de problèmes d'ingénierie et de prototypage. MATLAB est une abréviation de MATrix LABoratory. Écrit à l'origine, en Fortran, par Cleve Moler, MATLAB était destiné à faciliter l'accès au logiciel matriciel développé dans les projets LINPACK et EISPACK. La version actuelle est écrite en C. Sa disponibilité est assurée sur plusieurs plates-formes : Sun, Bull, HP, IBM, Compatibles PC, Macintosh, et plusieurs machines parallèles. MATLAB est conforté par une multitude de boîtes à outils (toolboxes) spécifiques à des domaines variés. Un autre atout de MATLAB, est sa portabilité; la même portion de code peut être utilisée sur différentes plates-formes sans la moindre modification.

3.2. Simulink

SIMULINKTM est un programme pour la simulation des systèmes dynamiques linéaires

et non linéaires; une extension de MATLABTM, dans laquelle la définition des modèles se fait par schémas blocs (diagramme structurel). Le diagramme structurel permet la représentation graphique d'un système d'équations linéaires et non linéaires. Il met en évidence la structure du système et permet de visualiser les interactions entre les différentes grandeurs internes et externes. On distingue alors particulièrement bien les contre-réactions, les couplages réciproques, les non-linéarités, etc. Les éléments qui composent le diagramme structurel représentent des opérations mathématiques, à savoir addition, soustraction, multiplication avec un coefficient, intégration et différentiation, ainsi que la multiplication et la division de deux variables et la fonction non linéaire d'une variable. SIMULINK possède une interface graphique pour visualiser les résultats sous forme de graphiques ou de valeurs numériques en cours de simulation. Les paramètres régissant le fonctionnement des systèmes peuvent être modifiés en ligne, c'est à dire en cours de simulation, et l'on peut observer leur effet immédiatement. SIMULINK est bâti autour d'une bibliothèque de blocs (librairies) classés par catégories. Les principales librairies sont montrées dans le tableau 1.

Tableau 1

Librairie	Contenu
Sources	Différents types de signaux d'entrée
Sinks	Appareils virtuels de visualisation
Continuous	Systèmes et opérateurs continus
Discrete	Blocs représentant les systèmes discrets
Math	Opérateurs mathématiques
Functions & Tables	Fonctions et tables de valeurs
Nonlinear	Systèmes et opérateurs non linéaires
Signals & Systems	Blocs de connexion et sous-systèmes

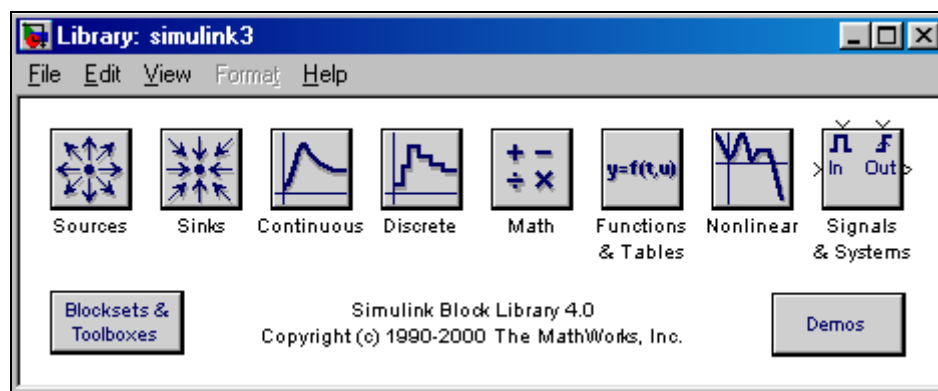


Figure 1 Librairie SIMULINK

4. Développement du modèle SIMULINK du moteur asynchrone

La figure 2 représente le modèle SIMULINK du moteur asynchrone décrit par les équations (2) à (7). Chaque bloc de la figure est issu d'une équation. Ainsi, le bloc

« Transformation abc----> dq » est réalisé à partir de l'équation (6). Le contenu du bloc est représenté à la figure 3.

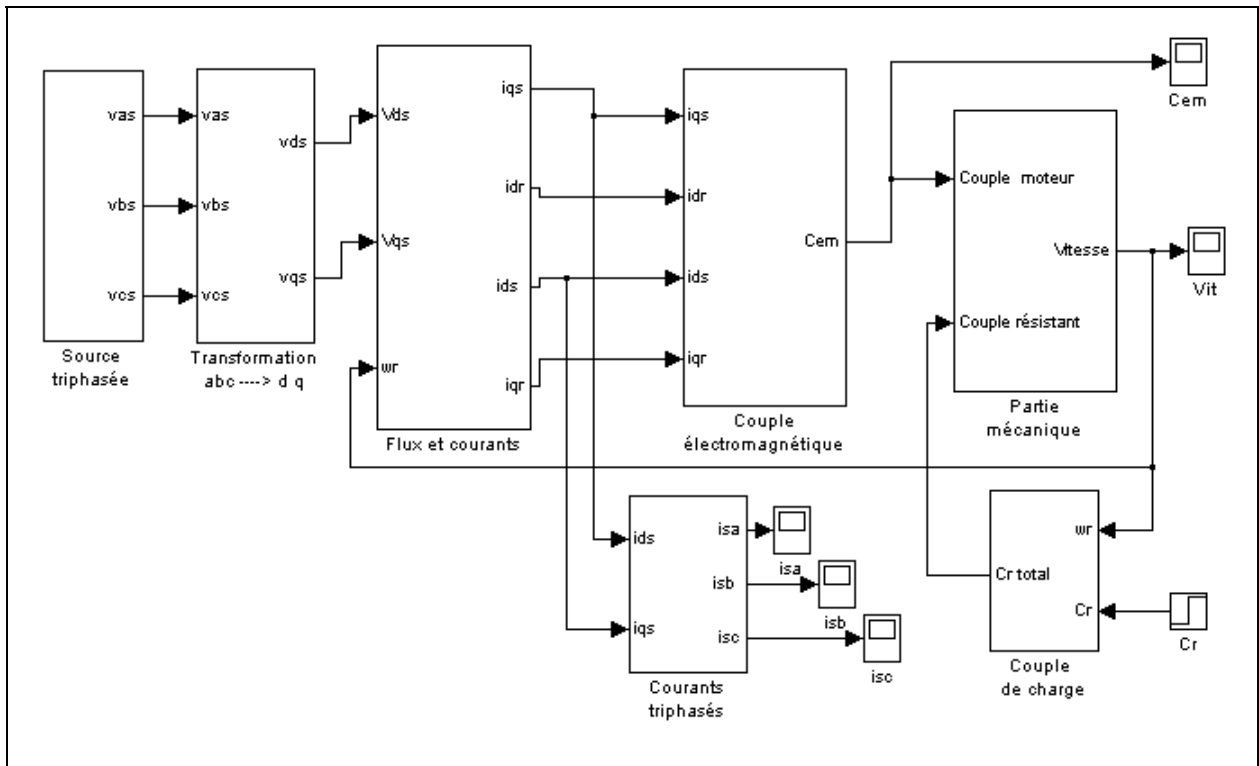


Figure 2 Modèle SIMULINK d'un moteur asynchrone à cage

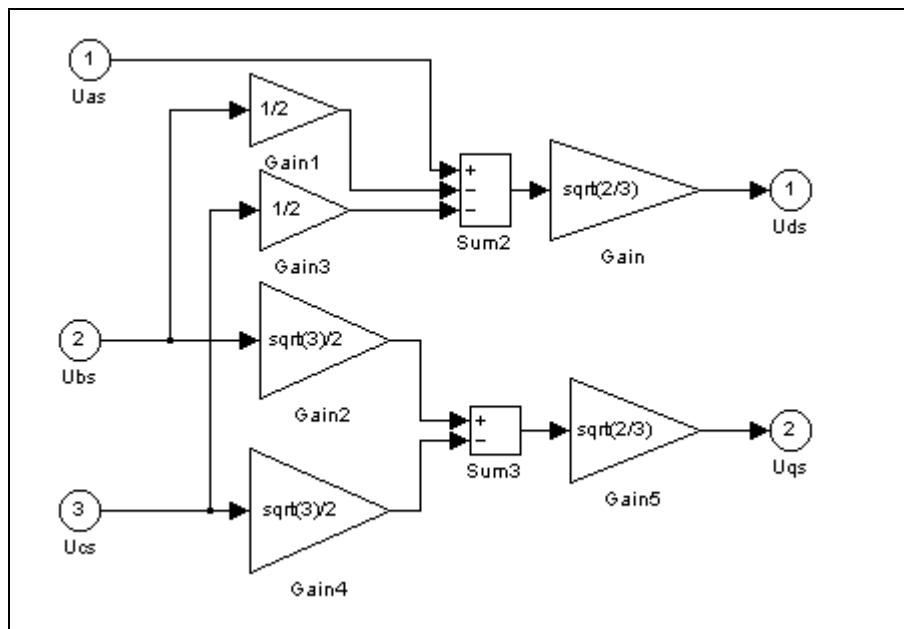


Figure 3 Bloc de transformation triphasée-biphasé

5. Résultats de la simulation

La figure 4 montre les résultats de la simulation du processus de démarrage à vide du moteur asynchrone suivi de l'application d'une charge de 30 Nm à l'instant 0.3 s. Les figures 4.a, 4b, 4c, 4d, représentent respectivement les courbes de la vitesse, la couple électromagnétique, du courant statorique et de la tension statorique.

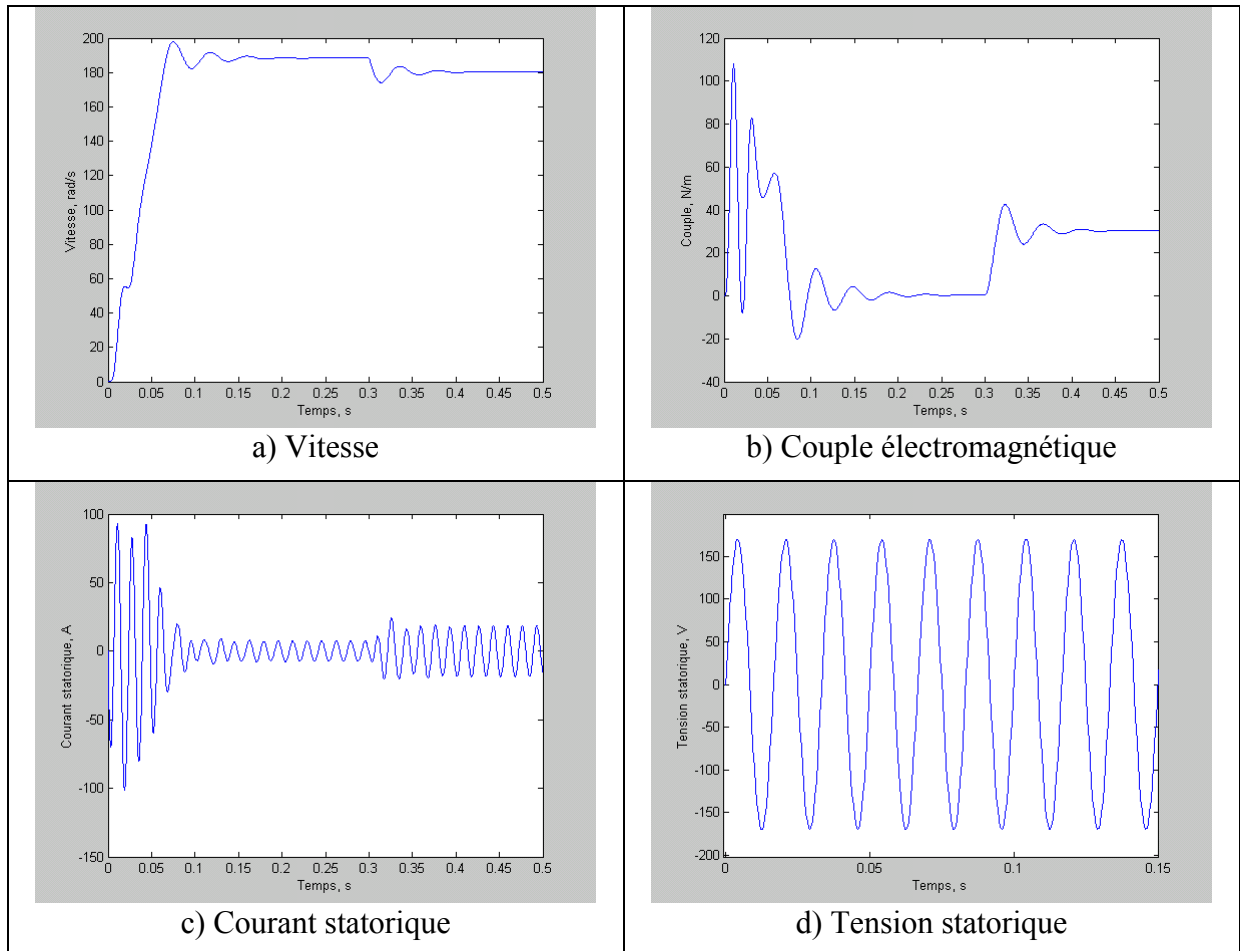


Figure 4 Résultats de la simulation du processus de démarrage du moteur asynchrone

6. Conclusion

Ce travail présente la modélisation et la simulation d'un moteur asynchrone à cage par le logiciel MATLAB/SIMULINK. Ce type de moteur s'est imposé dans l'industrie grâce à sa robustesse et sa simplicité de construction; par contre sa simulation est difficile, car le modèle est fortement non linéaire. Actuellement, la disponibilité de puissants outils informatiques de calcul permet de surmonter cette difficulté. Le processus de démarrage du moteur, suivi de l'application d'une charge entraînée a été modélisé et simulé. Les résultats obtenus démontrent la justesse du modèle développé. D'autres régimes de fonctionnement du moteur peuvent être facilement étudiés.

7. Bibliographie

- [1] V. Rajagopalan, *Computer-Aided Analysis of Power Electronic Systems*, Marcel Dekker, Inc, 1987.
- [2] H. Bulher, *Électronique de réglage et de commande*, Presses polytechniques et universitaires romandes, vol. XVI Traité d'électricité, 1990.
- [3] M. Gheorghe, *Application Simulink pour l'étude par simulation des systèmes d'entraînement de machines électriques*, Mémoire de maîtrise, Ecole Polytechnique de Montréal, 1995.
- [4] M. L. Doumbia, G. Roy, V. Rajagopalan, "An Integrated Solution for Simulating Electrical Drive Systems with Matlab/Simulink", *International Symposium on Industrial Electronics*, 1997.
- [5] M. L. Doumbia, G. Roy, V. Rajagopalan, V. Missurenko, "Comparative Study of Multi-Mass Models of Electrical Drives With Asynchronous Motors", *Revue canadienne de Génie électrique et de Génie informatique*, 1998.
- [6] M. L. Doumbia, *Outil d'aide à la conception des systèmes d'entraînement de machines électriques : Exemple d'application*, *International Symposium on Industrial Electronics*, Thèse de Doctorat, École Polytechnique de Montréal, 2000.
- [7] SIMULINK *User's Guide*, The MathWorks, Inc., 1996.

Annexe

Données du moteur

Puissance nominale :	$P_n = 2.2 \text{ kW}$
Fréquence nominale :	$f_n = 60 \text{ Hz}$
Tension ligne-ligne :	$V_{ll} = 208 \text{ V}$
Nombre de pôles :	$P = 4$
Résistance du stator :	$r_s = 0.6 \Omega$
Résistance du rotor :	$r_r' = 0.4 \Omega$
Inductance statorique :	$L_s = 61 \text{ mH}$
Inductance rotorique :	$L_r' = 61 \text{ mH}$
Inductance mutuelle:	$L_{sr} = 59 \text{ mH}$
Moment d'inertie du rotor :	$J = 0.0175 \text{ kgm}^2$
Coefficient de frottement :	$B = 0.00187 \text{ Nm / rad / s}$