

Modélisation et simulation d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation

[Modeling and simulation of a Double Feed Asynchronous Machine]

Agnimoan Constant ALIHONOU¹⁻², Léandre Mathias VISSOH¹, Jules Anicet YAMONCHE¹, Jonas EDOU¹⁻⁴, Victorien CHEGNIMONHAN¹⁻³, and Clotilde Tognon GUIDI¹⁻²

¹Laboratory of Processes and Technological Innovations, National Institute Technology (INSTI) of Lokossa, Lokossa, Benin

²Laboratory for Energy and Applied Mechanics (LEMA, UAC), University of Abomey-Calavy, Abomey-Calavy, Benin

³PTAA CRA Agonkanmey, INRAB, Abomey-Calavy, Benin

⁴Laboratory of Théoretical Physic and Physics Mathematics, University of Abomey-Calavy, Abomey-Calavy, Benin

Copyright © 2024 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The double feed asynchronous machines are increasingly used in modern wind farms to optimize wind turbine performance. These machines have the ability to adapt to variations in wind speed and also contribute to the stability of the electricity network. In this article, the modeling and simulation of the double feed asynchronous machine has been done. The different machine parameters such as speed, torque, flows and currents were analyzed. The results showed that all the quantities of the machine have an oscillating transient regime. Thus, the very unstable open-loop nature of the double feed asynchronous machine appears very clearly. In order to resolve this problem, the use of looped commands becomes essential.

KEYWORDS: stability, oscillating transient regime, open loop, looped control.

RESUME: Les machines asynchrones à double alimentation sont de plus en plus utilisées dans les parcs éoliens modernes afin d'optimiser la performance des éoliennes. Ces machines ont la capacité de s'adapter aux variations de la vitesse du vent et aussi de contribuer à la stabilité du réseau électrique. Dans cet article, la modélisation et la simulation de la machine asynchrone à double alimentation a été faite. Les différents paramètres de la machine tels que la vitesse, le couple, les flux et les courants ont été analysés. Les résultats ont montré que toutes les grandeurs de la machine ont un régime transitoire oscillant. Ainsi, le caractère très instable en boucle ouverte de la machine asynchrone à double alimentation apparaît très clairement. Afin de régler ce problème, le recours aux commandes bouclées devient indispensable.

MOTS-CLEFS: stabilité, régime transitoire oscillant, boucle ouverte, commande bouclée.

1 INTRODUCTION

Les énergies renouvelables, représentent une source d'énergie inépuisable et propre qui joue un rôle essentiel dans la transition vers un système énergétique plus durable et respectueux de l'environnement. Parmi ces énergies, l'éolien se distingue comme une des solutions les plus prometteuses pour réduire notre dépendance aux combustibles fossiles et lutter contre le changement climatique [1]. L'énergie éolienne est captée à l'aide de turbine éolienne qui convertit l'énergie cinétique du vent en électricité. Une avancée significative dans ce domaine est l'utilisation de machine asynchrone à double alimentation (MADA), qui améliore l'efficacité et la flexibilité des systèmes éoliens [1], [2]. Les machines asynchrones à double alimentation

sont largement utilisées dans les parcs éoliens modernes pour optimiser leurs performances, améliorer leur capacité à s'adapter aux variations de la vitesse du vent et contribuer à la stabilité du réseau électrique. Cette technologie représente une étape importante dans l'évolution de l'énergie éolienne vers une source d'électricité fiable, efficace et intégré au réseau [2], [3], [5].

Les machines asynchrones à double alimentation permettent d'alimenter les éoliennes à partir de deux sources d'énergie, la première alimentation est externe au réseau électrique et la deuxième provient du générateur éolien lui-même [4]. Cette configuration offre une meilleure gestion de la puissance, notamment en permettant d'ajuster la vitesse de rotation du générateur pour maximiser la production d'électricité tout en garantissant une stabilité du réseau [1], [2], [4].

2 MATERIEL ET METHODES

2.1 MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION

Dans le but de rendre plus simple à exploiter les équations électrique et mécanique de la machine asynchrone à double alimentation, nous avons opté pour un changement de repère. Dans notre étude nous avons utilisé la transformation de Park.

2.1.1 TRANSFORMATION DE PARK

Afin de rechercher les lois de contrôle d'une machine à courant alternatif, nous pouvons la modéliser dans le repère (d, q) tournant dont l'orientation est a priori arbitraire. Ce modèle est obtenu après transformation virtuelle de la machine triphasée en une machine diphasée équivalente [6], [7], [8], [9].

Cette transformation qui permet le passage du système triphasé s'effectue en faisant correspondre aux variables réelles leurs composantes homopolaires, directes et en quadrature [6], [7]. La figure n°1 montre la représentation de la MADA dans le repère de Park.

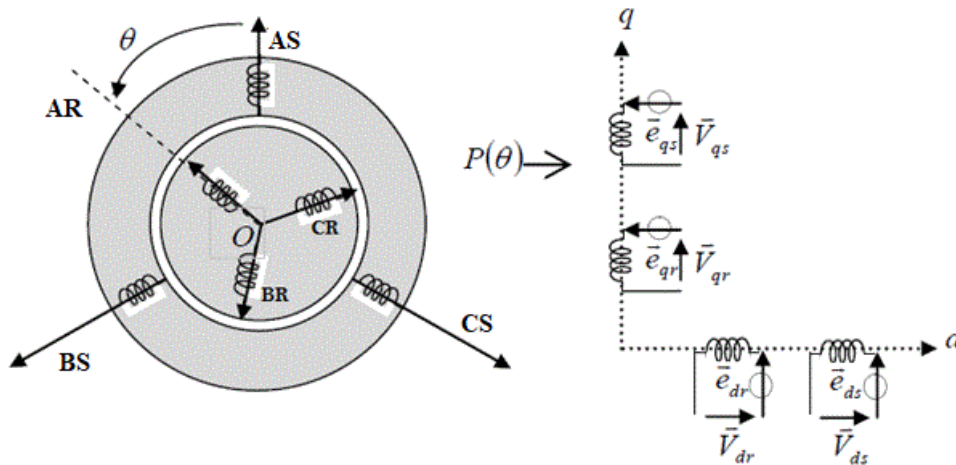


Fig. 1. Représentation de la MADA dans le repère de Park [6], [7], [8]

L'équation (1) illustre la matrice $P(\theta)$ utilisée pour le passage du système triphasé au système biphasé

$$[P(\theta)] = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Le changement de variables relatif aux courants, tensions et flux est défini par la transformation (2):

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} = [P(\theta)] \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

Avec x: tensions, courant ou flux, et les indices suivant représentent:

- **0**: indice de l'axe homopolaire.
- **d**: indice de l'axe direct.
- **q**: indice de l'axe en quadrature.

Et pour la transformation inverse on utilise la matrice $[P(\theta)]^{-1}$:

$$[P(\theta)]^{-1} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Alors les variables réels sont obtenus à partir des variables biphasées

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.1.2 EQUATIONS ELECTRIQUES ET MAGNETIQUES DANS LE SYSTEME D'AXES (D, Q)

Les expressions des tensions statorique et rotorique suivant l'axe (d, q) sont données par [6], [7], [8], [11].

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_{coor} \cdot \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} - \omega_{coor} \cdot \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_{coor} - \omega_r) \cdot \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} - (\omega_{coor} - \omega_r) \cdot \phi_{dr} \end{cases} \quad (5)$$

Avec: ω_{coor} : Vitesse du système d'axe (d, q)

Les expressions des flux statoriques et rotoriques dans le système (d, q)

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + M I_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + M I_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M I_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (6)$$

2.2 CHOIX DU REFERENTIEL

Pour étudier la théorie des processus transitoires des machines électriques, il est recommandé de choisir un système d'axes de référence qui permet d'aboutir au système différentiel le plus simple possible, car le résultat final est indépendant du choix du système de coordonnées. On trouve que le calcul peut être plus ou moins complexe. A partir du système d'axe (d, q) on peut avoir d'autres axes qui sont des cas particuliers. Dans la suite, les composantes homopolaires sont supposées nulles [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12]:

- Référentiel fixé par rapport au stator: $\omega_{coor} = 0$
- Référentiel fixé par rapport au rotor: $\omega_{coor} = \omega_r$
- Référentiel fixé par rapport au champ tournant $\omega_{coor} = \omega_s$

Cette dernière représentation qui fait correspondre des grandeurs continues aux grandeurs sinusoïdales en régime permanent, la conception du contrôle vectoriel par orientation du flux nécessite ce choix et les modèles d'action dépendent de la position du référentiel par rapport aux divers axes de flux.

2.2.1 MODELE BIPHASE DE LA MADA LIE AU CHAMP TOURNANT

La précision dans la modélisation est essentielle pour des analyses efficaces et fiables. Le modèle biphasé offre une alternative plus flexible dans la modélisation des machines. Nous avons opté pour ce modèle afin d'obtenir une modélisation simple, fiable et précise. Les équations des tensions issues de ce modèle sont exprimées par:

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \cdot \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} - \omega_s \cdot \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \phi_{dr} \end{cases} \quad (7)$$

D'autre part, on peut déduire l'expression de la puissance électromagnétique de la machine dans le repère de Park après le calcul de la puissance instantanée comme suit [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12]:

A travers les équations des tensions (7), nous avons déduire les expressions ci-dessous. Nous pouvons ainsi écrire l'expression de la puissance instantanée par:

$$P(t) = \frac{3}{2} [(V_{ds} \cdot I_{ds} + V_{qs} \cdot I_{qs}) + (V_{dr} \cdot I_{dr} + V_{qr} \cdot I_{qr})] \quad (8)$$

En remplaçant V_{ds} , V_{qs} , V_{dr} et V_{qr} par leurs expressions, on aura l'équation:

$$P(t) = P_{js}(t) + P_{jr}(t) + P_{mgs}(t) + P_{mgr}(t) + P_{em}(t) \quad (9)$$

Les pertes Joule dans l'enroulement du stator et du rotor sont respectivement données par l'équation suivant:

$$\begin{cases} P_{js}(t) = \frac{3}{2} \cdot R_s \cdot (I_{ds}^2 + I_{qs}^2) \\ P_{jr}(t) = \frac{3}{2} \cdot R_r \cdot (I_{dr}^2 + I_{qr}^2) \end{cases} \quad (10)$$

L'expression de l'énergie électromagnétique avec la source statorique et rotorique est illustrée par l'équation suivante:

$$\begin{cases} P_{mgs}(t) = \frac{3}{2} \cdot (\phi_{ds} \cdot I_{ds} + \phi_{qs} \cdot I_{qs}) \\ P_{mgr}(t) = \frac{3}{2} \cdot (\phi_{dr} \cdot I_{dr} + \phi_{qr} \cdot I_{qr}) \end{cases} \quad (11)$$

Pour déterminer la puissance électromagnétique de la machine, nous avons utilisé les expressions des flux magnétiques présentées dans l'équation (6), on obtient :

$$P_{em}(t) = \frac{3}{2} \cdot \omega \cdot (\phi_{ds} \cdot I_{qs} + \phi_{qs} \cdot I_{ds}) \quad (12)$$

Sachant que:

$$P_{em}(t) = \Omega_r \cdot C_{em} \text{ et } \omega_r = \Omega_r \cdot n_p$$

On déduit l'expression du couple électromagnétique:

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot n_p \cdot (\phi_{ds} \cdot I_{qs} + \phi_{qs} \cdot I_{ds}) \quad (13)$$

Par ailleurs, les puissances active et réactive statorique et rotorique sont données par:

$$\text{Puissance statorique: } \begin{cases} P_s = \frac{3}{2}(V_{ds}I_{ds} + V_{qs}I_{qs}) \\ Q_s = \frac{3}{2}(V_{qs}I_{ds} - V_{ds}I_{qs}) \end{cases} \quad (14)$$

$$\text{Puissance rotorique: } \begin{cases} P_r = \frac{3}{2}(V_{dr}I_{dr} + V_{qr}I_{qr}) \\ Q_r = \frac{3}{2}(V_{qr}I_{dr} - V_{dr}I_{qr}) \end{cases} \quad (15)$$

2.3 MISE SOUS FORME D'EQUATION D'ETAT

Les équations (5) peuvent être disposées sous la forme de représentation d'état. On choisit pour vecteur d'état $x = [\phi_{ds}, \phi_{qs}, I_{dr}, I_{qr}]$, on trouve les équations d'état sous forme matricielle suit [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12]:

$$\begin{cases} L \frac{dx}{dt} = A \cdot x + B \cdot U \\ y = C \cdot x \end{cases} \quad (16)$$

$$\text{Avec: } U = [V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}, V_{qr}]^T, B = [I]_{4 \times 4}$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{L_s} & \omega_s & \frac{R_s M}{L_s} & 0 \\ -\omega_s & \frac{-R_s}{L_s} & 0 & \frac{R_s M}{L_s} \\ 0 & \frac{M}{L_s}(\omega_s - \omega_r) & -R_r & \sigma \cdot (\omega_s - \omega_r) \\ -\frac{M}{L_s}(\omega_s - \omega_r) & 0 & -\sigma \cdot (\omega_s - \omega_r) & -R_r \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\text{Et } L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{M}{L_s} & 0 & \sigma & 0 \\ 0 & \frac{M}{L_s} & 0 & \sigma \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\sigma = 1 - \left(\frac{M^2}{L_s L_r} \right) : \text{coefficient de dispersion.} \quad (19)$$

3 RESULTATS ET DISCUSSION

De nos jours, il existe toute une panoplie de logiciels utilisés pour l'étude des machines électriques. Afin de simuler le comportement de la machine asynchrone à double alimentation (MADA), nous avons opté pour le logiciel MATLAB/SIMULINK.

La machine asynchrone à double alimentation dont les paramètres sont donnés en annexe, est alimentée par un réseau triphasé équilibré. Son modèle est basé sur les équations obtenues avec la transformation de Park.

Les figures 2 à 7, illustrent les résultats de la simulation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) concernant respectivement la vitesse, le couple, les courants et les flux, pour un démarrage à vide ($C_r = 0$). Dans le but d'obtenir des résultats plus précis des phénomènes électriques et thermiques au sein de la machine, nous avons court-circuité son rotor. À gauche on a les simulations du modèle de la machine par le réseau triphasé tel que, le rotor est court-circuité. A droite sont donnés les résultats de la simulation telle que, le rotor pour des raisons de stabilité est alimenté par une tension et une fréquence réduites (de l'ordre de 10%) par rapport aux grandeurs statoriques.

La simulation s'effectue au départ d'un démarrage à vide. On remarque que toutes les grandeurs de la machine ont un régime transitoire oscillant. La variation de la vitesse de rotation de la machine est illustrée à la fig. 2.

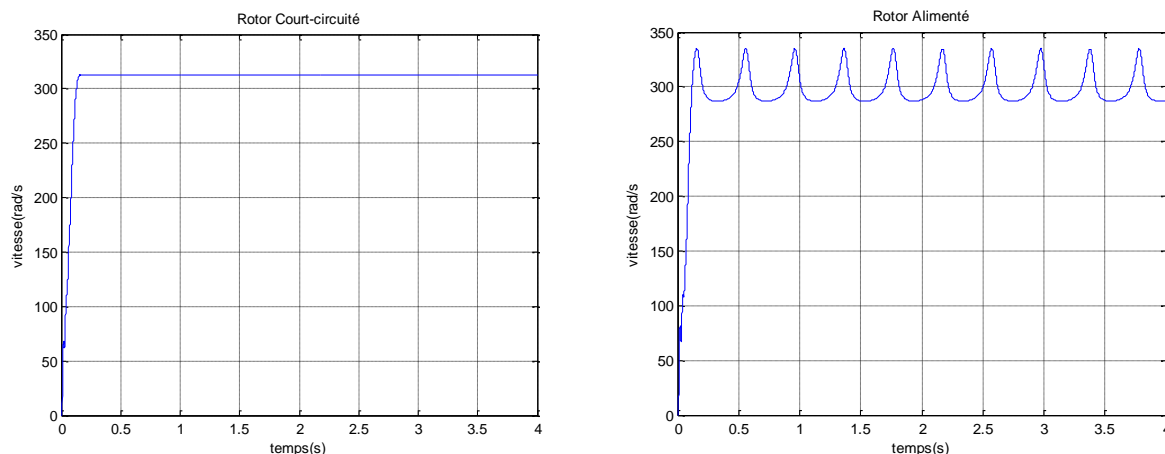


Fig. 2. La vitesse de rotation dans les deux cas (rotor alimenté et rotor court-circuité)

Lorsque le rotor de la machine est alimenté (figure à droite), on observe une oscillation de la vitesse de rotation qui varie entre 280 et 340 rad/s. Par contre, lorsque le rotor de la machine est court-circuité (figure à gauche), on constate que la vitesse de rotation se stabilise à une valeur proche de 315 rad/s après un temps égal à environs 0,2 s.

La fig.3 montre la variation du couple électromagnétique de la machine dans le cas du rotor alimenté et celui du rotor court-circuité.

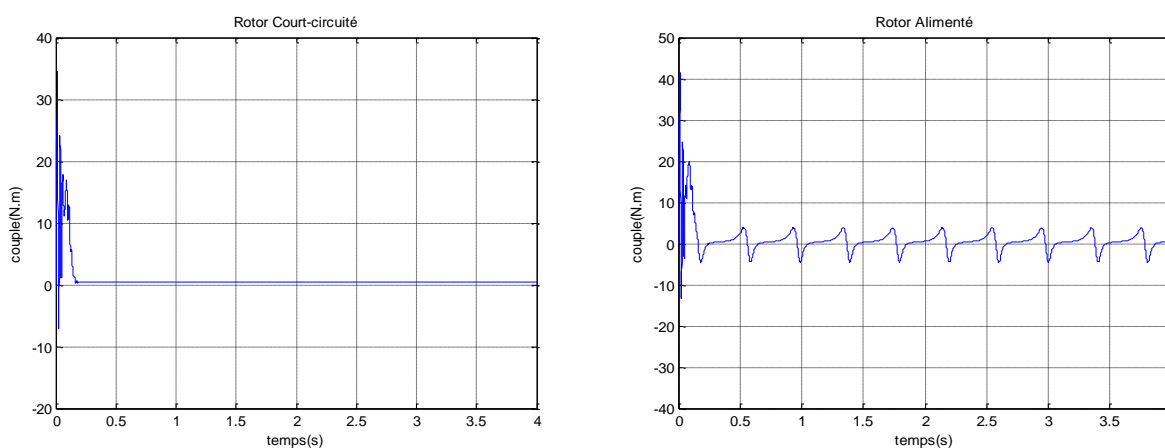


Fig. 3. Le couple électromagnétique dans les deux cas (rotor alimenté et rotor court-circuité)

On constate une stabilisation du couple électromagnétique à une valeur proche de 0 après 0,15 s, lorsque le rotor est court-circuité (figure à gauche). Lorsque le rotor est alimenté (figure à droite), le couple électromagnétique de la machine oscille entre 5 et - 5 N/m après 0,15s.

La variation du courant statorique de la machine dans le cas du rotor alimenté et celui du rotor court-circuité est illustrée par la fig.4.

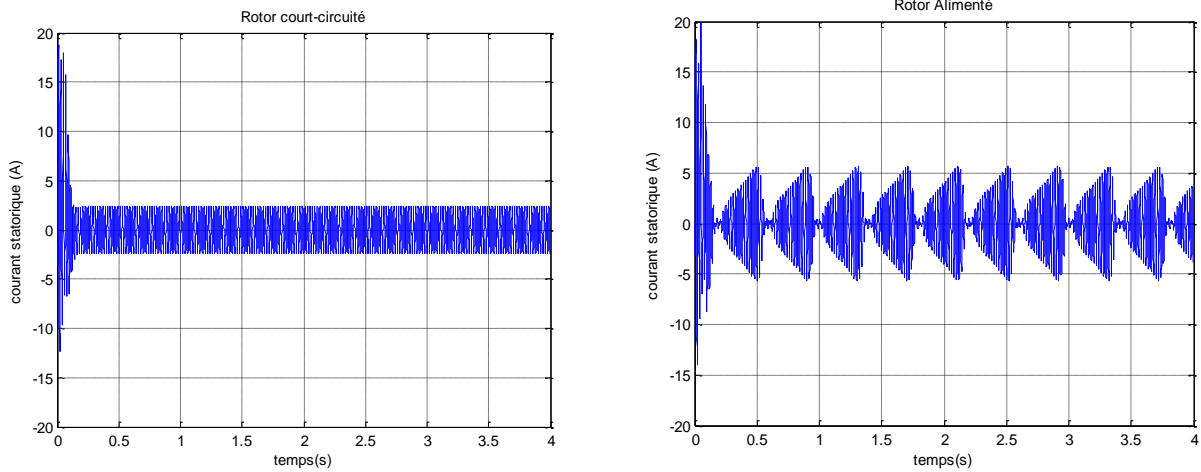


Fig. 4. Le courant statorique dans les deux cas (rotor alimenté et rotor court-circuité)

Le courant statorique en rotor court-circuité oscille autour de 0 après 0,2 s, par contre en rotor alimenté, le courant statorique varie entre 5 et -5 A après 0,20s.

La fig.5 présente la variation du courant rotorique de la machine dans le cas du rotor alimenté et celui du rotor court-circuité.

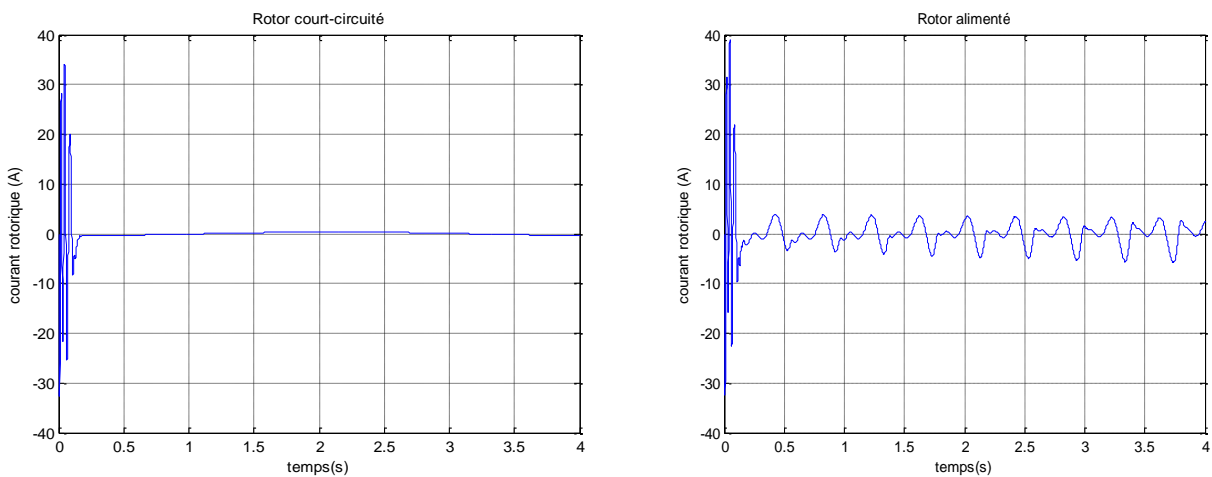


Fig. 5. Le courant rotorique dans les deux cas (rotor alimenté et rotor court-circuité)

Le courant rotorique en rotor court-circuité prend la valeur 0, par contre en rotor alimenté, le courant rotorique varie entre 5 et -5 A après 0,2s. On constate ainsi l'importance des courants statoriques et rotoriques pendant le démarrage, et après un temps égal à environs 0,2 s, les courants statoriques et rotoriques se stabilisent et prennent des valeurs proches de zéro.

La fig.6 montre la variation du flux statorique de la machine dans le cas du rotor alimenté et celui du rotor court-circuité.

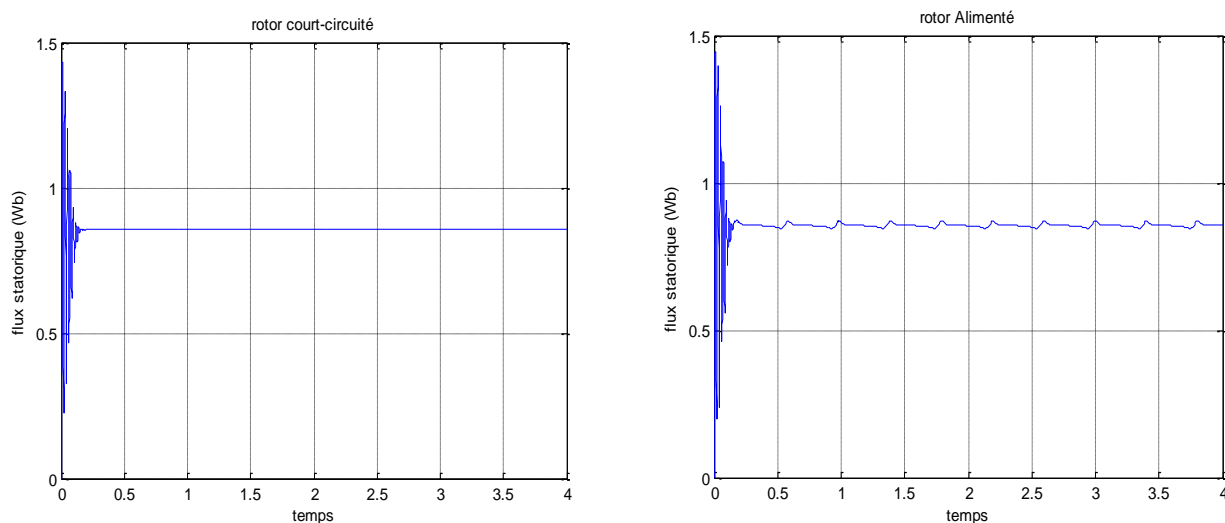


Fig. 6. Le flux statorique dans les deux cas (rotor alimenté et rotor court-circuité)

On constate que le flux statorique en rotor court-circuité et alimenté garde une valeur constante de 0,8 Wb après un temps de 0,2s. La variation du flux rotorique de la machine dans le cas du rotor alimenté et celui du rotor court-circuité est illustrée par la fig.7.

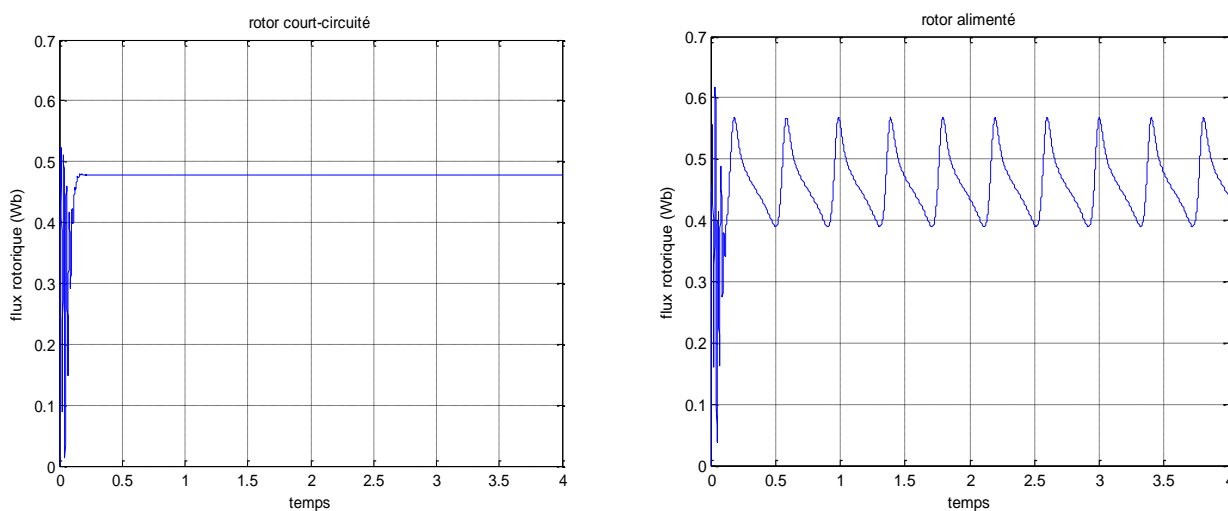


Fig. 7. Le flux rotorique dans les deux cas (rotor alimenté et rotor court-circuité)

A travers la fig.7, on remarque que le flux rotorique en rotor court-circuité atteint la valeur de 0,4 Wb après un temps de 0,1s, par contre dans le cas du rotor alimenté le flux rotorique varie 0,4 et 0,58Wb.

On remarque à travers ces résultats de simulation obtenus que toutes les grandeurs de la machine ont un régime transitoire oscillant. Il apparait clairement que la machine asynchrone à double alimentation se distingue par un caractère très instable en boucle ouverte. En effet, des perturbations trop exagérées sont apparues sur les différentes grandeurs de la machine depuis l'alimentation du rotor. Ces dernières sont dues à l'absence d'un contrôle strict de la position relative entre les deux forces magnétomotrices développées par les deux armatures de la machine. Afin de régler ce problème, le recours aux commandes bouclées devient indispensable.

4 CONCLUSION

A travers cet article, nous avons présenté le modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère de Park lié au champ tournant. Ce modèle a été développé dans le cadre de certaines hypothèses simplificatrices que nous devons respecter. Lors de cette modélisation, nous nous sommes attachés à développer un modèle en vue de la commande de la machine. Les résultats de simulation de modélisation de la machine asynchrone double alimentée montrent des problèmes de stabilité de ses paramètres en boucle ouverte, dans ce cas, le recours aux commandes bouclées, et spécialement les commandes de type vectoriel devient indispensable.

REFERENCES

- [1] Solution Green Power, 2024, Introduction aux éoliennes.
[en ligne] <https://www.solutiongreenpower.fr/les-energies-renouvelables/eoliennes/introduction-aux-eoliennes/>, consulté le 10/05/2024.
- [2] Connaissance des Energies, 2024, Energie éolienne: fonctionnement, avantages, chiffres clés et enjeux.
<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-eolienne>, consulté le 10/05/2024.
- [3] WindExchange, 2024, What is wind power ? <https://www.windexchange.energy.gov> [en ligne], consulté le 11/05/2024.
- [4] Robyns Benoît, Labrique Sophie, 2024, La Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA).
<https://sites.uclouvain.be/elee/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereEolienne/Mada/Mada.htm>, [en ligne], consulté le 12/05/2024.
- [5] Xavier Lagorce, 2010, Machine Asynchrone à Double Alimentation.
- [6] Ben kadem Somia, Ben mebarek Dalila, 2018. Commande d'une machine asynchrone à double alimentation pour la production d'énergie éolienne, Mémoire De Master Université Ahmed Draïa Adrar, Algérie.
- [7] Khelfat L., Maataoui L., 2017, Etude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée, Mémoire De Master Université Badji Mokhtar- Annaba, Algérie.
- [8] ASMA B. A., 2016, Etude de la commande d'un système éolien base sur une GADA, Université Hadj Lakhdar - Batna.
- [9] Ben Nadji Hocine B. A., 2015, commande de la puissance active et réactive du GADA par la Méthode de mode glissant, El-Oued, Algérie.
- [10] Ben Slimane, Heithem Hamza Akrem, 2021, Commande d'un moteur asynchrone à double alimentation. Mémoire De Master, Université Badji Mokhtar – Annaba, Algérie.
- [11] Akkari Nadia, 2010, Contribution à l'alimentation de la Robustesse de la Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation, Thèse de Doctorat, Université de Batna, Algérie.
- [12] Maacha Rachid, 2011, Modélisation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation, mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Automatique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie.

NOTATIONS ET SYMBOLES:

Q_s : Puissance réactive du stator

Q_r : Puissance réactive du rotor

Q_{sr} : Somme des puissances réactive statorique et rotorique

S_r : Puissance apparente maximale du rotor

d : Indice de l'axe direct

q : Indice de l'axe en quadrature

P_r : Puissance rotorique

P_s : Puissance Statorique

C_s, C_r : Flux statorique et rotorique

C_e : Couple électromagnétique

C_{em} : Couple électromécanique

C_r : Couple résistant

ω_{coor} : Vitesse angulaire du repère biphasé (d, q)

ω : Vitesse angulaire de rotation du rotor

ω_s : Vitesse angulaire de rotation du champ tournant

a_r, b_r, c_r : Trois phases du rotor

ANNEXE A:

Données du moteur asynchrone à double alimentation

VALEURS NOMINALES:

- Puissance: 0.8 kW
- Tensions: 220 / 380 V
- Période: 50 Hz
- Courants: 5.8 / 3.2 A
- Connexion du rotor-étoile: 3×120 V - 4.1 A
- Vitesse: 1420 tr/min

PARAMÈTRE:

- R_s (Résistance du stator) = 11.98 Ω
- R_r (Résistance du rotor) = 0.904 Ω
- L_s (Inductance du stator) = 0.414 H
- L_r (Inductance de rotor) = 0.0556 H
- M (Inductance mutuelle) = 0.126 H
- Pôle: $P = 2$

CONSTANTES MÉCANIQUES:

- J (Inertie de rotor) = 0.01 kg.m²
- f (Coefficient de frottement) = 0.001