

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE AMA R TELIDJI DE LAGHOUAT



FACULTE DE TECHNOLOGIE
Département d'Electrotechnique

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en Electromécanique
Option : **Electrotechnique industrielle**

Présenté par :

SAFI ABDELBASSET

BAGADI BILLAL ABD ELBASSET

THEME

**Modélisation et simulation des comportements
électromécanique d'une machine asynchrone**

Soutenu le 23/06/2018

Devant le jury :

Président	Dr. Mekhanet Mohammed
Examineur	Pr. Seghir Tahar
Examineur	Dr. Bendjedia Bachir
Encadreur	Pr. Zegnini Boubakeur

Juin2019

Table des matieres:

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de mon projet ainsi je le dédie à celle qui m'a élevé, m'a nourrit, m'a bien éduqué, ma Mère, celui qui m'a toujours soutenu et aidé dans toute ma vie mon Père je leurs exprime mes profondes et éternelles gratitude et reconnaissance pour tout ce qu'ils ont fait pour moi, sans leur éducation et leurs sacrifices, je n'aurai jamais pu réussir dans mes études.

Je le dédie également à mes sœurs et mes frère Et mes oncles mes amis, et à tous mes collègues

abdelbasset safi

Table des matieres:

Dédicace

Ce que personne ne peut compenser les sacrifices qu'ils ont consentis pour mon éducation et pour mon bien être, qui n'ont jamais cessé de me soutenir moralement et matériellement pour que je puisse finir mes études et avoir une bonne formation et surtout être le meilleur :

A mes très chers parents BAGADI Mohamed (رحمه الله) et BAGADI Bakhta.

A mes frères Yahya, Nassireddine, et mes sœurs.

A mon encadreur Prof ZEGNINI Boubakeur. de mes études par ses précieux conseils et orientations bénéfiques.

A tous mes amis.

A ceux qui sont la source de mon inspiration et mon courage.

Je dédie ce travail ✍

BAGADI Billal

REMERCIEMENTS

Le travail présenté dans ce mémoire a été accompli au laboratoire LEDMASCD de l'Université de Laghouat.

*Nous voudrions remercier Prof **ZEGNINI Boubakeur**, Professeur. à l'Université de Laghouat, de nous avoir proposé le sujet de ce mémoire et de l'avoir dirigé, grâce à ses conseils judicieux.*

*Nous remercions vivement Dr. **Mekhanet Mohammed**, Maitre de conférences à l'Université de Laghouat, de nous 'avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury de ce mémoire.*

*Nos sincères remerciements vont de même aux examinateurs qui m'ont fait l'honneur de participer au jury, prof **Seghir Tahar** et Dr **Bendjedia***

Bachir

En fin, nos grands remerciements vont également à tous mes collègues du département de l'électrotechnique enseignants, techniciens, administratifs et étudiants, qui n'ont pas cessé de nous encourager pour pouvoir achever ce travail

Table des matieres:

ملخص:

في مذكرتنا، باستخدام نموذج المتجه الفضاء، والرسم المكافئ أحادي الطور في حالات التشغيل الثلاث: الفراغ، الدوار المغلق والحمل. من أجل الاقتراب من حالة حقيقية؛ من المهم إجراء الاختبارات باستخدام محرك غير متزامن Langlois -MAT20 -C1 أيضا، حددنا وسائط المخطط المكافئ لجهاز الحلقة غير المتزامن. باستخدام برنامج Matlab، قمنا بمحاكاة التصرف الكهروميكانيكي لهذا الجهاز. ركزت هذه الدراسة على تحديد الجوانب في مجال النمذجة من خلال الوصول إلى معلومات الدوار والجزء الثابت والسرعة و العزم وخاصة في الوضع الديناميكي. نحن مهتمون بالخدمة المستمرة التي تستقر بها أخيرا الماكينة لنتيح لنا الوصول إلى دراسة الحصيلة الطاقوية لهذا المحرك.

كلمات مفتاحية: الة غير متزامنة. النمذجة. ماتلاب. السلوك الكهربائي، السلوك الميكانيكي. الحصيلة الطاقوية.

Résumé :

Dans notre mémoire de master, en utilisant le modèle vecteur espace et son schéma équivalent monophasé dans les trois cas de fonctionnement: à vide, à rotor bloqué et en charge. Dans le but de s'approcher d'un cas réel ; il est important de réaliser les essais avec un moteur asynchrone Langlois-MAT20-C1. Aussi, nous avons déterminé les paramètres du schéma équivalent de la machine asynchrone à bague. A l'aide d'un programme Matlab, nous avons simulé les comportements électriques et mécaniques de cette machine. Cette étude a visée des aspects déterminants dans le domaine de modélisation en accédant aux informations rotoriques et statoriques, vitesse et couple surtout en régime dynamique. Nous sommes intéressés par le service continu dans lequel les paramètres de la machine finissent par se stabilisés afin de nous donner accès à l'étude du bilan énergétique de cette machine.

Mots clés : *machine asynchrone, modélisation, simulation, Matlab /Simulink, comportement électrique, comportement mécanique, bilan énergétique.*

Abstract:

This master memory, using the space vector model and equivalent single-phase diagram in the three operating cases: locked rotor with and without load. In order to approach a real case; Also, it is important to carry out the tests with an asynchronous motor Langlois-MAT20-C1,we determined the parameters of the equivalent scheme of the asynchronous machine. Using Matlab program, we simulated the electrical and mechanical behavior of this machine. This study focuses on determining aspects in the modeling domain by accessing rotor and stator information, velocity torque especially in dynamic mode. We are interested in the continuous service in which the parameters of the machine finally stabilize to give us access to the study of the energy balance of this machine.

Keywords: *machine asynchrone, Modeling , Matlab /Simulink, electrical behavior, mecanique behavior, balance energy,*

Table des matieres:

Table des matieres:

Introduction Générale	1
Chapitre 1 : Généralités sur les machines asynchrone	
1.1 Historique de la MAS	<u>2</u>
1.2 Introduction	<u>2</u>
1.3:Description de la MAS	<u>2</u>
1.4 Symbole de la MAS.....	<u>3</u>
1.5 Les types de la machines asynchrones	<u>4</u>
1.6 Utilisation de la MAS	<u>5</u>
1.6.1 Moteur asynchrone.....	<u>5</u>
1.6.2 Générateur asynchrone.....	<u>5</u>
1.7 Constitution d'une machine Asynchrone triphasée :	<u>5</u>
1.7.1 Stator ou inducteur :	<u>5</u>
1.7.2 Rotor ou induit:	<u>6</u>
1.7.2.1 Rotor à cage (d'écureuil).....	<u>7</u>
1.7.2.2 Rotor bobiné.....	<u>7</u>
1.7.3 Le bobinage de MAS.....	<u>8</u>
1.7.4 Plaques signalétiques :	<u>9</u>
1.7.5 Les organes mécaniques :	<u>10</u>
1.8 Principe de fonctionnement :	<u>10</u>
1.9 Glissement :	<u>11</u>
1.10 Vitesse de synchronisme :	<u>11</u>
1.11 Couplage :	<u>12</u>
1.12 Les avantages et les inconvénients de la machine asynchrone :	<u>12</u>
1.13 La différence entre un moteur à cage et à bague	<u>13</u>
1.14 Conclusion :	<u>14</u>

Table des matieres:

Chapitre 2: Modélisation d'une machine asynchrone

2.1 Introduction :	<u>15</u>
2.2 Hypothèses simplificatrices :	<u>15</u>
2.3 Description paramétrique de la machine asynchrone triphasée :	<u>16</u>
2.4 Modèle vecteur espace.....	<u>17</u>
2.4.1 Equation régissant les fonctionnements de la machine asynchrone	<u>17</u>
2.4.2 Transformation triphasé- biphasé :	<u>18</u>
2.4.2.1 Transformation de concordai :	<u>19</u>
2.4.2.2 Transformation de Park :	<u>20</u>
2.4.3 Modèle réduit :	<u>22</u>
2.5 Schéma monophasé équivalent :	<u>23</u>
2.6 Conclusion :	<u>25</u>

Chapitre 3 : Etude expérimentale et simulation de MAS

3.1 Introduction :	<u>26</u>
3.2 Identification des paramètres électriques.....	<u>28</u>
3.2.1 Méthode de la plaque signalétique.....	<u>28</u>
3.2.2Méthode des essais classiques :	<u>29</u>
3.2.2.1 Essai à courant continu :	<u>29</u>
3.2.2.2 Essai à vide :	<u>30</u>
3.2.2.3 Essai a rotor bloquée:	<u>31</u>
3.3 Simulation des Comportements électrique de MAS :	<u>32</u>
3.4 Simulation des Comportements mécanique de MAS	<u>34</u>
3.5 Bilan de puissance en service continu :	<u>35</u>
3.6 Conclusion :	<u>38</u>
Conclusion générale.....	<u>39</u>
Bibliographie.....	<u>40</u>
ANNEXE.....	<u>42</u>

Liste des figures

Figure 1.1 : Symbole de MAS.....	3
Figure 1.2 : Rotor (à gauche) et stator (à droite) d'une machine asynchrone	4
Figure 1.4 : Stator de machine asynchrone.....	6
Figure 1.5 : Rotor à cage d'écureuil de machine asynchrone.....	6
Figure 1.6 : Rotor à excitation bobinée de machine asynchrone.....	7
Figure 1.7.1 le bobinage de MAS (Stator)	8
Figure 1.8 le bobinage de MAS la plaque signalétique d'un moteur asynchrone	8
Figure 1.10 : Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone'	10
Figure 1.11 : couplage Etoile et triangle de MAS	12
Figure 2.1 Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée.	17
Figure 2.4 : Transformation triphasée-biphasée	19
Figure 2.5 transformation de Park	21
Figure 2.6 Schéma monophasé équivalent de MAS.....	24
Figure 3.1 les borne de moteur asynchrone a rotor bobiné (Langlois-MAT20-C1).....	26
Figure 3.2 Machine asynchrone à rotor bobiné (Langlois-MAT20-C1)	27
Figure 3.3 Montage de l'essai à courant continu.....	29
Figure 3.4 Tensions triphasées équilibrées en fonction du temps (alimentation de MAS.....	29
Figure 3,5 Courant statorique et rotorique en fonction du temps (a vide)	32
Figure 3.6 Courant statorique maximale fonction du temps (a vide).....	32
Figure 3,7 Courant statorique et rotorique en fonction du temps (en charge)	32
Figure 3.8. Evolution du glissement en fonction du temps	32
Figure 3.9. Couple en régime transitoire et permanent (à vide).....	33
Figure 3,10 Vitesse mécanique en régime transitoire et permanent (à vide).....	33

Figure 3,11 Couple en régime transitoire et permanent (en charge).....	34
Figure 3,12 Vitesse mécanique en régime transitoire et permanent (en charge).....	34
Figure 3.13 Evolution de la perte statorique en fonction du temps.....	405
Figure 3.14. Evolution de la perte rotorique en fonction du temps	41
Figure 3.15 Evolution de perte supplémentaire en charge en fonction du temps.....	41

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux

Tableau 3.1 Résultats de la méthode de la plaque signalétique.....	28
Tableau 3.2 Résultats statoriques pour l'essai en courant continu.....	30
Tableau 3.3 Résultats rotoriques pour l'essai en courant continu.....	30
Tableau 3.4 Résultats de l'essai à vide.....	31
Tableau 3.5 Résultats de l'essai à rotor bloqué.....	32
Tableau 3.6 Résultats des pertes.....	39

Table de nomenclature

Table de nomenclature

Symbole	Signification
s, r	Indices correspondants au stator et au rotor.
a, b, c	Indices correspondants aux trois phases a, b, c.
d, q	Axes correspondants au référentiel lié au champ tournant.
θ_s, θ_r	Angles électriques statoriques et rotoriques.
α, β	Axes correspondants au référentiel fixe par rapport au stator.
X, Y	Axes correspondants au référentiel fixe par rapport au rotor.
L_s, L_r	Inductances cycliques statorique et rotorique par phase.
l_s, l_r	Inductances propres d'une phase statorique et rotorique.
M	Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.
J	Moment d'inertie des masses tournante
R_s, R_r	Résistances d'enroulement statorique et rotorique par phase.
T_r	Constante de temps rotorique.
p	Nombre de paire de pôle.
C_{em}	Couple électromagnétique.
C_r	Couple résistant.
Ω	Vitesse mécanique du rotor.
ϕ_s, ϕ_r	Flux statorique, rotorique.
v_{ao}, v_{bo}, v_{co}	Tensions de branche.
v_{an}, v_{bn}, v_{cn}	Tensions de phase
MAS	Machine asynchrone

Introduction Générale

Introduction Générale

Les machines asynchrones spécialement les moteurs asynchrones jouent un rôle important dans le domaine de la conversion de l'énergie électromécanique. du fait de sa simplicité de construction, d'utilisation et d'entretien, de sa robustesse et sont faible coût d'achat de fabrication.

Le moteur asynchrone, est très répandu dans le milieu industriel. son utilisation classique est avant tout l'entraînement des systèmes à vitesse constante.

Aujourd'hui, avec la commande et le contrôle électronique du moteur lui ouvre un large champ d'utilisation. Le moteur asynchrone n'est plus limité à des applications à vitesse fixe. ce moteur asynchrone à bague est caractérisé par des équations électriques complexes, ou apparaissent des paramètres dont la détermination s'avère difficile, de plus, la difficulté d'accéder aux informations rotoriques, nous laisse dans l'impossibilité de voir le comportement et l'évolution des courants rotoriques en régime dynamique.

Dans ce contexte le mémoire comporte trois chapitres :

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à l'étude des composants et du fonctionnement de la machine asynchrones. Après une brève introduction des constitutions de la machine et leurs principes de fonctionnement.

Le deuxième chapitre est dédié à la présentation de la modélisation de la MAS à l'aide du modèle vecteur espace. Cette modélisation est caractérisée par les équations régissant les fonctionnements de la machine asynchrone en mettant en œuvre la transformation triphasée –biphasé pour trouver un modèle simple permettant de passer de trois phases à deux phases dans le but d'avoir le schéma équivalent monophasé de cette machine.

Le dernier chapitre est réservé à des essais expérimentale de la machine en simulant les évolutions dynamiques du courant et tension et couple et la vitesse de la machine à vide et en charge. en fin un intérêt particulier est donné au service continu dans lequel les paramètres finissent par se stabiliser c'est pourquoi il est nécessaire de s'intéresser au bilan de puissance du moteur asynchrone

Chapitre 1

Généralités sur les machines asynchrone

1.1 Historique de la MAS :

Historiquement le dix-neuvième siècle fût l'époque des grandes découvertes en Electrotechnique dont les bases fondamentales ont été établies (1820-1830) par des hommes de science parmi lesquels on peut citer, OERSTED, AMPERE, BIOT, SAVART, LA PLACE, OHM, FARADAY. Plus tard en (1873) MAXWELL formalisa les lois de l'électromagnétisme moderne dans son ouvrage fameux ;"Treatise on Eelectricity and Magnétisme". Mais ce n'est qu'à partir de (1870) que l'électrotechnique industrielle s'affirma notamment grâce à la production d'énergie électrique par les génératrices à courant continu (dynamos) de gramme et de siemens. Ensuite, dans les années (1880), furent conçus les alternateurs et les transformateurs polyphasés.

Les premiers devaient concurrencer et détrôner les dynamos pour la production de l'électricité, enfin les travaux du yougoslave TESLA et de l'italien FERRARIS complétèrent les systèmes a courants alternatifs polyphasés par la conception et la construction des machines d'induction ou asynchrones en (1888).

En 1889, Michail OssipowitschDoliwo-Dobrowolski, électricien allemand d'origine russe, invente le premier moteur asynchrone à courant triphasé à cage d'écureuil qui sera construit industriellement à partir de 1891.

1.2 Introduction :

La machine asynchrone ou à induction occupent une place prépondérante dans tous les secteurs industriels, L'objectif de cette chapitre est l'étude en général de moteur asynchrone Par définitions détaillées et les types existée et l'utilisation en général et le structure de les éléments composée cette machine et le principe de fonctionnement.

1.3 Description de la MAS :

La machine asynchrone occupe une grande place dans les applications industrielles. La croissance d'utilisation de cette machine électrique est essentiellement due à sa simplicité de construction, son faible coût, et robustesse mécanique.[01]

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction comprend un stator et un rotor, constitués d'empilement de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles sont placées les enroulements. Le stator est fixe ; on y trouve les enroulements reliés à la source,[02]

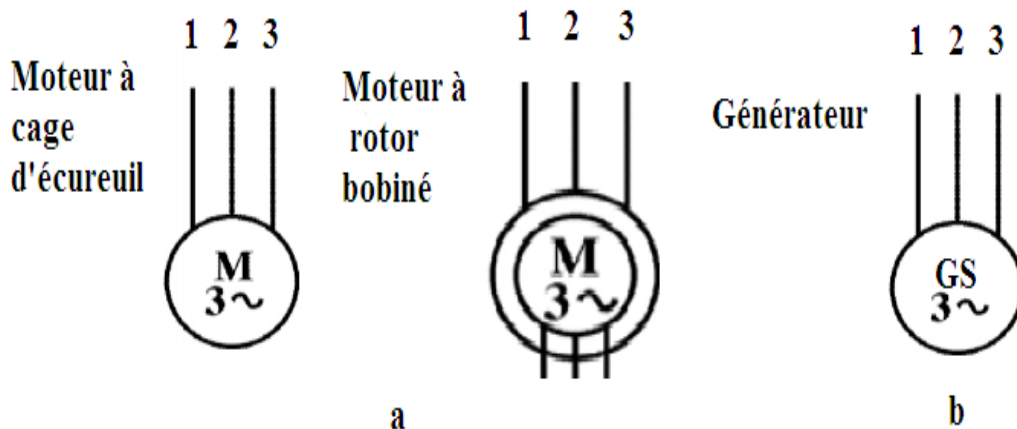
Chapitre 1: Généralités sur les machines asynchrone

La machine asynchrone est une machine à courant alternatif, la vitesse du rotor et la vitesse du champ magnétique tournant ne sont pas égales à cause du glissement. Le rotor est toujours en retard par rapport au champ statorique, la machine asynchrone est dite (machine à induction) car l'énergie est transférée du stator au rotor ou inversement par induction électromagnétique. [03] ,

Cette machines possédant un rotor « en cage d'écureuil » sont aussi connues sous le nom de machines à cage ou machines à cage d'écureuil. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui traversent leur stator.[05], Le stator représente la partie statique de la machine, il est constitué d'un circuit magnétique comportant de multiples encoches à l'intérieur desquelles sont bobinés trois enroulements formant les enroulements statoriques. Au centre de ce cylindre, on trouve le rotor de la machine dont le circuit magnétique est composé des barres généralement en cuivre ou en aluminium coulé sous pression. Ces barres sont reliées entre-elles à chaque extrémité par un anneau de court-circuit..[04].

1.4 Symbole de la MAS :

La machine asynchrone peut être représentée par son symbole normalisé général qui précise fonctionne en moteur ou en générateur .Le symbole peut être apporté des précisions sur la nature de la machine [05].



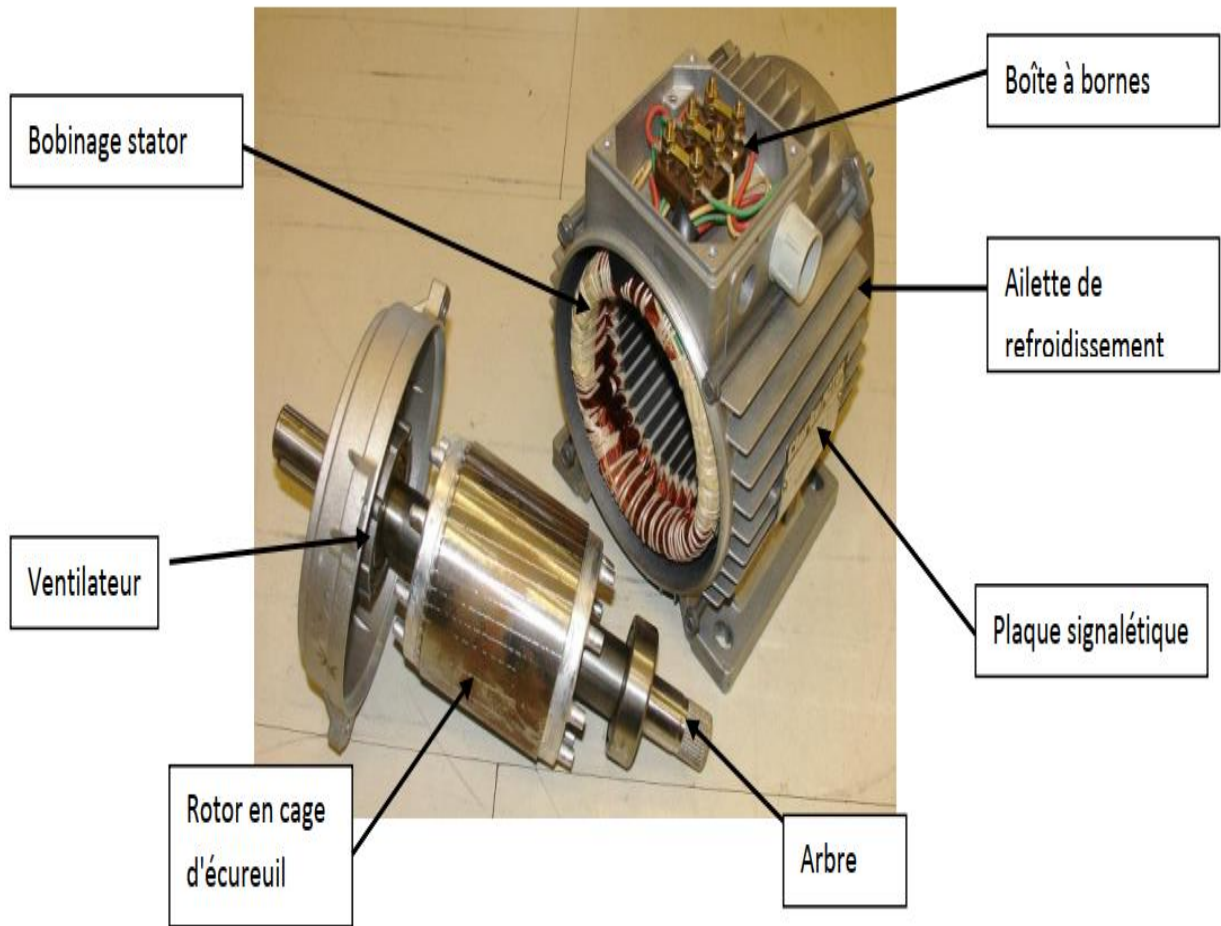


Figure 1.2 : Rotor (à gauche) et stator (à droite) d'une machine asynchrone

1.5 Types de la machines asynchrones:

On peut distinguer deux types de machines asynchrones:

- Les machines à cage d'écurieil (induction) : Une des armatures le rotor d'ordinaire n'est pas alimenté les courant qui y circulent sont induits par l'autre armature.
- Les machines à bagues: l'armature tournante est reliée au réseau par un collecteur, ce qui permet d'apporter ou de prélever de la puissance au rotor sans imposer la fréquence des courants dans celui-ci. Les moteurs d'induction sont tellement plus utilisés que les autres lorsqu'on parle de moteur asynchrone on sous-entend d'induction. Les autres sont appelés moteurs à courants alternatifs à collecteur. Dans les deux cas on parle de moteurs car ces machines sont destinées à fournir de la puissance mécanique à partir du réseau électrique. Elles ne fonctionnent en génératrices que lors du freinage en récupération. [06]

Chapitre 1: Généralités sur les machines asynchrone

1.6 Utilisation de la MAS:

Nous pouvons utiliser la machine en :

1.6.1 Moteur asynchrone:

Le moteur asynchrone est le moteur industriel par excellence, les moteurs asynchrones ont, pour leur grande majorité, un rotor à cage. Les progrès accomplis ces dernières années dans l'alimentation et la commande des machines n'ont fait que réduire la part des moteurs asynchrone à rotor bobiné par rapport à leurs homologues à cage d'écureuil.

1.6.2 Générateur asynchrone:

Le générateur asynchrone est beaucoup plus rare que l'alternateur, mais on le trouve dans quelques applications de puissance limitée comme les microcentrales hydrauliques, il occupe surtout la plus grande part du marché des éoliennes, le plus souvent avec des machines à cage d'écureuil pour les puissances modestes, mais aussi avec des machines à rotor bobiné pour les installations plus importantes.

1.7 Constitution d'une machine Asynchrone triphasée :

Le moteur asynchrone composé de plusieurs pièces, nous expliquerons le rôle de chaque pièce :

1.7.1 Stator ou inducteur :

Anneau de tôles encoché à l'intérieur et portant un enroulement triphasé semblable à celui d'un alternateur. Cet enroulement est presque toujours relié à la source et constitue le primaire.





Figure 1.3 : Stator de machine asynchrone[06]

1.7.2 Rotor ou induit:

Anneau de tôles rainuré à l'extérieur, concentrique à la première et séparé de lui par un entrefer étroit d'épaisseur constante. Le rotor porte un enroulement polyphasé mis en court-circuit constituant le secondaire. On distingue principalement deux types de rotor :

1.7.2.1 Rotor à cage (d'écureuil):

L'ensemble à l'aspect d'une cage cylindrique dont à chaque bout une couronne métallique est raccordée dans laquelle se trouve un empilement de tôles dont l'axe du moteur passe au centre.



Figure 1.4 : Rotor à cage d'écureuil de machine asynchrone[06]

1.7.2.2 Rotor bobiné :

Comme pour le rotor à cage il est constitué de tôles empilées, mais des encoches sont pratiquées pour le passage du bobinage qui lui-même est raccordé en une extrémité en bout d'arbre sur des bagues

Chapitre 1: Généralités sur les machines asynchrone

l'autre extrémité du bobinage est connecté ensemble (point milieu du couplage étoile). Sur les bagues viennent frotter les balais (aussi appelé les collecteurs) qui sont raccordés au dispositif de démarrage (résistance).

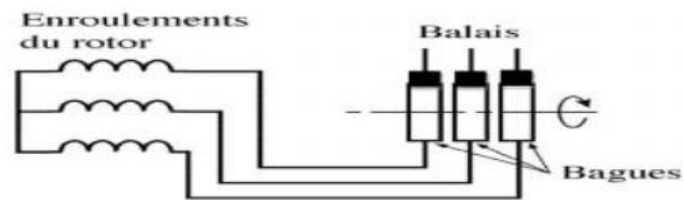


Figure 1.5 : Rotor à excitation bobinée de machine asynchrone

1.7.3 Bobinage de MAS :

Les bobines sont logées dans les encoches du stator. S'il y a un paire de pôles magnétique pour chacune des trois phases, si on augmente le nombre de paires de pôles, il est possible d'obtenir des moteurs avec des fréquences de rotation différentes.

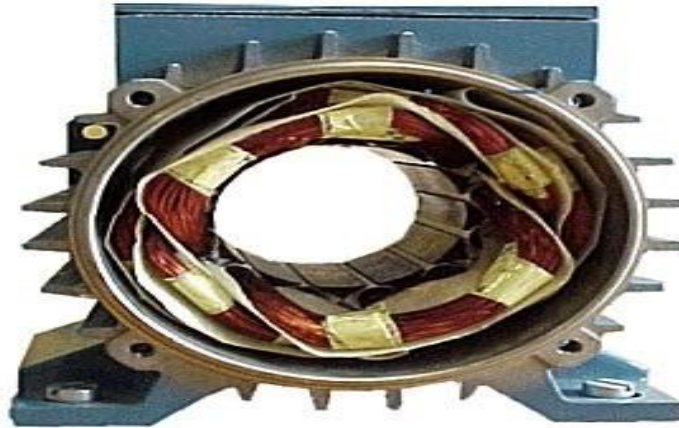


Figure 1.6.1 le bobinage de MAS (Stator)

Le branchement des bobines sur le réseau se fait au niveau de la plaque à borne située sur le dessus du moteur. On dispose ainsi de 6 connexions, une pour chacune des extrémités des trois bobines. Les bornes sont reliées aux bobines selon le schéma ci-contre.

1.7.4 Plaques signalétiques :

La plaque signalétique d'un moteur asynchrone est la carte d'identité du moteur délivrée et certifiée par le constructeur, elle contient donc les caractéristiques nominales électriques du moteur.

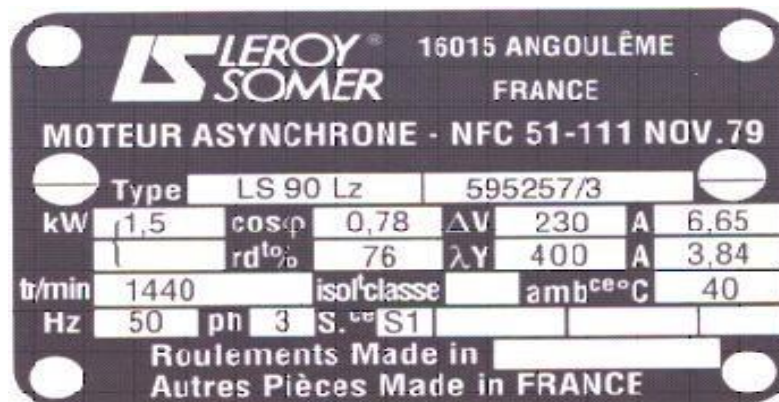


Figure 1.7 le bobinage de MAS la plaque signalétique d'un moteur asynchrone

- **Type** : (LS90Lz) référence propre au constructeur
- **Puissance** : (1,5Kw) puissance utile délivrée sur l'arbre du moteur.
- **Facteur de puissance ou cos phi** : (0,78) permet le calcul de la puissance réactive consommée.
- **rendement** (76%) : permet de connaître la puissance électrique consommée ou absorbée

Chapitre 1: Généralités sur les machines asynchrone

- **Tensions** : (230v/400v) la première indique la valeur nominale de la tension aux bornes d'un enroulement. elle détermine le couplage (étoile ou triangle) à effectuer en fonction de la tension du réseau d'alimentation.
- **Intensités** : (6,65A/3,84A) Elles représentent l'intensité en ligne (dans chaque phase) pour chacun des couplages.
- **vitesse** : (1440 Tr/min) Indique la vitesse nominale du rotor. On dit aussi vitesse réelle. On connaît alors La vitesse de synchronisme **ns** du moteur (ici 1500 tr/min)
- **Classe d'isolement** : (non indiquée) .
- **Température ambiante** : (40°C) utilisation recommandée maximum
- **Fréquence** : (50Hz) fréquence du réseau d'alimentation.
- **Nombre de phases** : (Ph 3) moteur triphasé
- **Service** : (SI) utilisation en marche continue, intermittente...
- **Indice de protection IP** : (non indiquée) défini par trois chiffres le degré de protection du moteur à a poussière, à l'eau et aux chocs mécaniques.

1.7.5 Les organes mécaniques :

La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi-accouplement. Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé. Son dimensionnement est fonction des efforts de flexion (force centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique radiale, etc...), des efforts radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges, des efforts de torsion (couple électromagnétique transmis en régimes permanent et transitoire). Il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation.

1.8 Principe de fonctionnement :

La machine asynchrone triphasée comporte un stator fixe et un rotor mobile autour de l'axe de symétrie de la machine. Le stator est constitué schématiquement de trois bobinages décalés de $\frac{2\pi}{3}$ et alimentés par un système de tensions équilibrées de fréquence f .

Les trois enroulements statoriques alimentés par un réseau triphasé équilibré créent dans l'entrefer un champ magnétique tournant à la fréquence de rotation de synchronisme n_s .

Les conducteurs du rotor sont soumis à ce champ tournant. Ils sont alors traversés par des

Chapitre 1: Généralités sur les machines asynchrone

courants de Foucault induits d'après la loi de Lenz ("les courants induits s'opposent par leurs effets à la cause qui leur donnent naissance"). Les enroulements du rotor étant en court-circuit, la circulation des courants est alors possible. Les forces de Laplace qui en résultent exercent des moments sur le rotor. Le rotor tourne alors à la fréquence de rotation n . De par son principe, la fréquence de rotation du rotor est inférieure à la fréquence de synchronisme f_s : $f < f_s$.

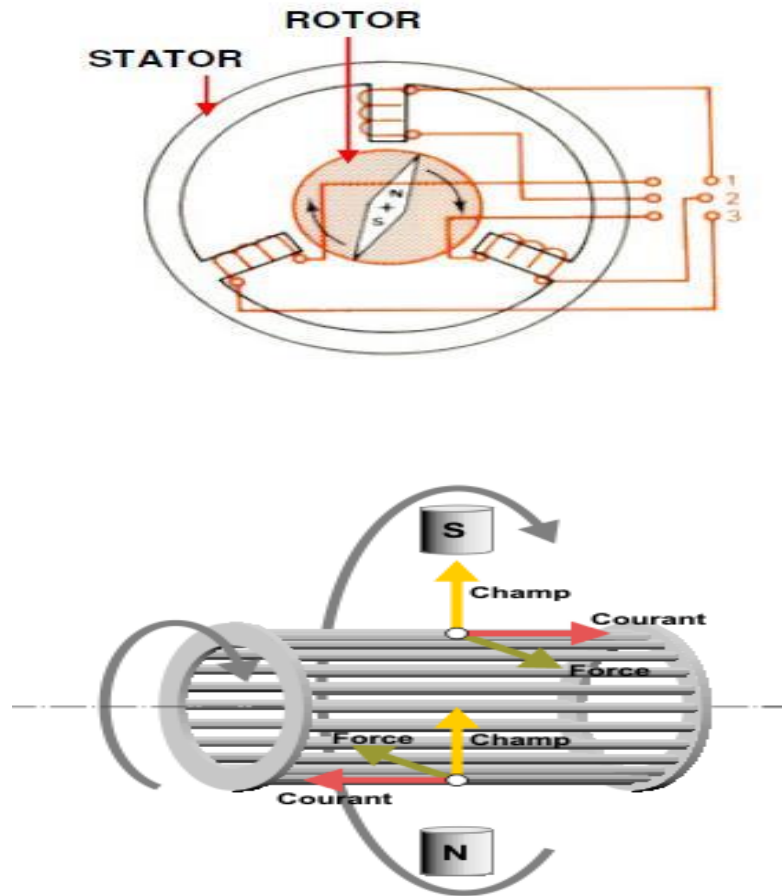


Figure 1.8 : Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone'

1.9 Glissement :

On appelle glissement le rapport de la fréquence (vitesse) de rotation de glissement à la fréquence (vitesse) de rotation de synchronisme.. On exprime généralement g en pourcentage.

On définit le glissement g par la relation:

$$g = \frac{n_g}{n_s} = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \quad \text{Avec :} \quad \Omega_s = 2\pi n_s \quad \text{et} \quad \Omega = 2\pi n$$

Chapitre 1: Généralités sur les machines asynchrone

Examinons les différents cas possibles :

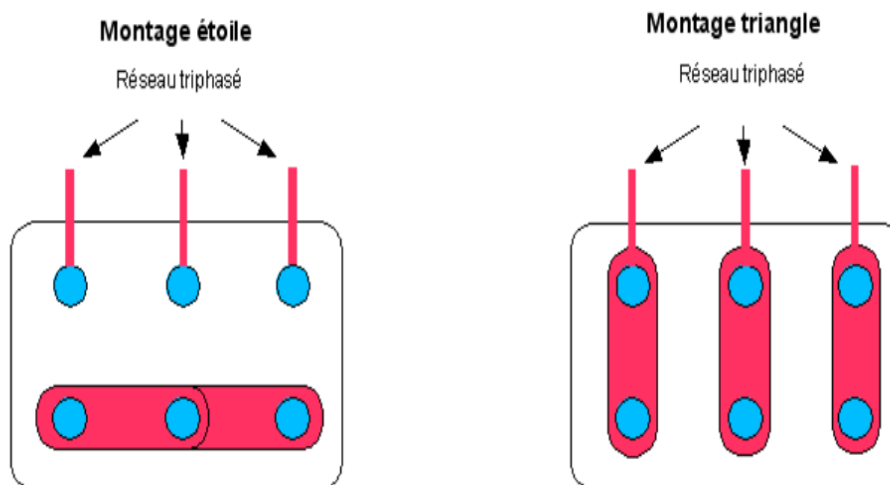
- $g=0$ pour $N_r = N_s$ il n'y a pas de couple.
- $g<0$ pour $N_r > N_s$ la machine fonctionne en génératrice.
- $g> 0$ pour $N_r < N_s$ la machine fonctionne en moteur.
- $g = 1$ pour $N_r = 0$ la machine est à l'arrêt.

1.10 Vitesse de synchronisme :

Le moteur asynchrone triphasé démarre seul et il prend rapidement sa vitesse de régime en charge comme à vide. Sa fréquence de rotation n est proche de la fréquence de rotation de synchronisme $n_s = \frac{f}{p}$ mais toujours inférieure, elle diminue peu entre la marche à vide et en charge.

1.11 Couplage :

Il y a deux possibilités de branchement du moteur au réseau électrique triphasé. Le montage en étoile et le montage en triangle. Avec un branchement en étoile, la tension aux bornes de chacune des bobines est d'environ 230V. Dans le montage en triangle, chacune des bobines est alimentée avec la tension nominale du réseau (400V). On utilise le montage étoile si un moteur de 230V doit être relié sur un réseau 400V ou pour démarrer un moteur à puissance réduite dans le cas d'une charge avec une forte inertie mécanique.



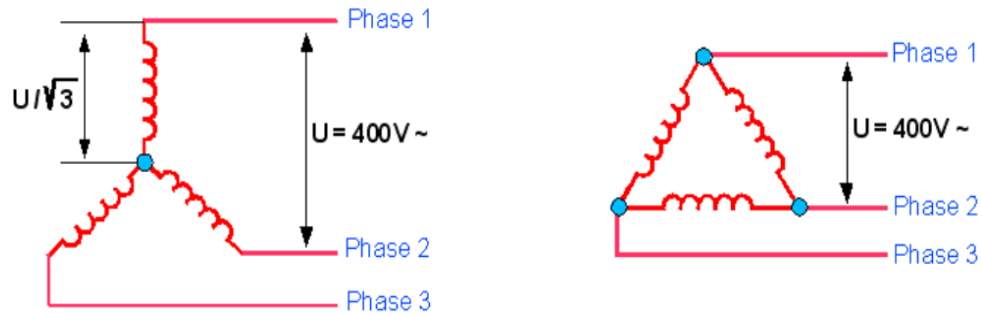


Figure 1.9 : couplage Etoile et triangle de MAS

1.12 Avantages et inconvénients de la machine asynchrone :

La machine asynchrone à cage a l'avantage d'être simple, fiable, robuste, économique et possède une bonne standardisation. en revanche, quand l'emploi de la vitesse variable est justifié, ce moteur présente l'inconvénient du couplage du flux avec le couple électromagnétique c'est à dire le découplage naturel de la machine à courant continu n'existe plus.

D'autre part, cette machine cache à travers sa simple structure une complexité fonctionnelle du fait que l'accès direct aux grandeurs rotoriques est impossible, le réglage du courant rotorique n'est possible qu'à travers le courant statorique.

Dans de nombreuses applications industrielles qui ne nécessitent pas la variation de la vitesse, l'inconvénient de la machine se situe dans ce courant absorbé qui est de l'ordre de 5 à 8 fois le courant nominal et de ce faible couple au démarrage ce qui pourrait rendre cette machine incapable de démarrer en charge. L'emploi d'autres moteurs qui ont au démarrage un couple plus au moins important et absorbent un courant relativement acceptable tout en conservant les caractéristiques de la machine en fonctionnement normal résout bien le problème dans ce domaine d'applications industrielles.

La machine qui semble répondre à ses deux souhaits contradictoires est bien évidemment la machine d'induction à double cage car la machine à barres profondes a au démarrage.[07].

1.13 Différence entre un moteur à cage et à bague

L'enroulement est remplacé par des barres en cuivre ou en aluminium logées dans des encoches et réunies à leurs extrémités par 2 couronnes en cuivre ou en Aluminium.

Chapitre 1: Généralités sur les machines asynchrone

Généralement, ces barres sont inclinées afin de réduire les harmoniques de dentures. Le courant qui passe par une barre revient par la barre situé à une distance polaire et il n'est pas nécessaire d'isoler les barres de la masse du rotor, car les courants induits s'établissent surtout dans les barres (résistivités différentes : beaucoup plus faible pour le cuivre).

Dans un moteur à cage, il n'y a pas de balais pour amener l'énergie au rotor (contrairement au rotor à bague!). Dans un rotor à cage, le champ magnétique du rotor est induit par le champ magnétique du stator.

Dans un rotor à bague, le champ du rotor est fabriqué par des enroulements (bobines) qui sont alimentés par les balais

Par comparaison avec les moteurs à bagues, les moteurs à cage ont l'avantage d'être robuste et de coût beaucoup plus faible ; mais ils présentent l'inconvénient qui est l'impossibilité de faire varier la résistance du rotor, ce qui rend défavorable les conditions de démarrages avec la tension du réseau.

1.14 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons fait une étude bibliographique sur la MAS, ses constitutions, son principe de fonctionnement, les domaines de son utilisation et son mode de couplage ainsi que les avantages et les inconvénients du moteur asynchrone. En fin une comparaison a été faite entre les moteurs asynchrones à bague et à rotor bobine. Les informations retenues dans ce chapitre nous donnent accès à la modélisation de MAS au deuxième chapitre de ce mémoire.

Chapitre 2

Modélisation d'une Machine

Asynchrone

2.1 Introduction :

Après avoir vu dans le chapitre précédent la MAS en général, donc L'étude de tout système physique nécessite une modélisation[08].

La modélisation d'une machine électrique est une phase primordiale de son développement, les progrès de l'informatique et du génie des logiciels permettent de réaliser des modélisations performantes et d'envisager l'optimisation des machines électriques.

Ainsi, la modélisation permet de guider les développements par une quantification des phénomènes.[09]

On développe dans ce chapitre le modèle vecteur espace par des équations différentielles régissant le fonctionnement de la machine et Les modèles issus de la transformation de Park ou de Concordia, et son schéma équivalent monophasé.

Nous utiliserons un modèle de la machine asynchrone qui décrit le comportement dynamique des différentes grandeurs concernées par le système de contrôle (flux magnétique, courants, tensions, etc...)

On suppose la machine triphasée au stator et au rotor et, pour simplifier les équations, bipolaires.[10].

2.2 Hypothèses simplificatrices :

L'étude du fonctionnement de la machine asynchrone consiste à rechercher l'ensemble des équations reliant les variables internes aux grandeurs externes : tensions aux bornes de la machine, courants consommés et couple disponible. Les différentes approches pour l'étude du modèle du moteur asynchrone reposent sur la résolution des équations de l'électromagnétisme et de la mécanique. Les différences proviennent des hypothèses simplificatrices qu'il est possible de faire, en fonction du domaine de fréquence concernée, et de la topologie (structure physique) du système étudié, c'est-à-dire en fonction des objectifs de la modélisation. Les hypothèses généralement admises dans le modèle de la machine asynchrone sont :

- L'absence de saturation et de pertes dans le circuit magnétique (l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables).
- La parfaite symétrie de la machine.

Chapitre 2: Modélisation d'une machine asynchrone

-La répartition spatiale sinusoïdale des différents champs magnétique le long de l'entrefer (l'entrefer est constant).

-L'équivalence du rotor en court-circuit à un enroulement triphasé monté en étoile.

-L'alimentation est réalisée par un système de tensions triphasées symétriques.

-Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau.

Ainsi, parmi les conséquences importantes de ces hypothèses on peut citer [11]:

-L'additivité de flux;

-La constance des inductances propres;

-La constance des résistances statoriques et rotoriques;

-La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelle entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle de leurs axes magnétiques.

2.3 Description paramétrique de la machine asynchrone triphasée :

La machine asynchrone triphasée comporte un stator fixe et un rotor mobile autour de l'axe de symétrie de la machine. Dans des encoches régulièrement réparties sur la face interne du stator sont logés trois enroulements identiques, à p paires de pôles ; leurs axes sont distants entre eux d'un angle électrique égal à $2\pi / 3$.

Les phases du stator sont alimentées par un réseau triphasé de tensions sinusoïdales à fréquence et amplitude constantes ou par un onduleur de tension ou de courant à fréquence et à amplitude réglables.

La structure électrique du rotor peut-être réalisée :

- soit par un système d'enroulements triphasés (rotor bobiné), raccordés en étoile à trois bagues sur lesquelles frottent trois balais fixes accessibles par la plaque à bornes et mis en court-circuit pendant les régimes permanents,

- Soit par une cage conductrice intégrée aux tôles ferromagnétiques (rotor à cage) Il sera admis que la deuxième structure est électriquement équivalente à la première. [11].

2.4 Modèle vecteur espace :

La représentation schématique de la MAS dans l'espace électrique est donnée sur la figure (2.1). Elle est munie de six enroulements,

Chapitre 2: Modélisation d'une machine asynchrone

- Le stator de la machine est formé de trois enroulements fixes décalés de 120° électrique dans l'espace et traversés par trois courants variables.
- Le rotor peut être modélisé par trois enroulements identiques décalés dans l'espace de 120°. Ces enroulements sont en court-circuit et la tension à leurs bornes est nulle.[12]

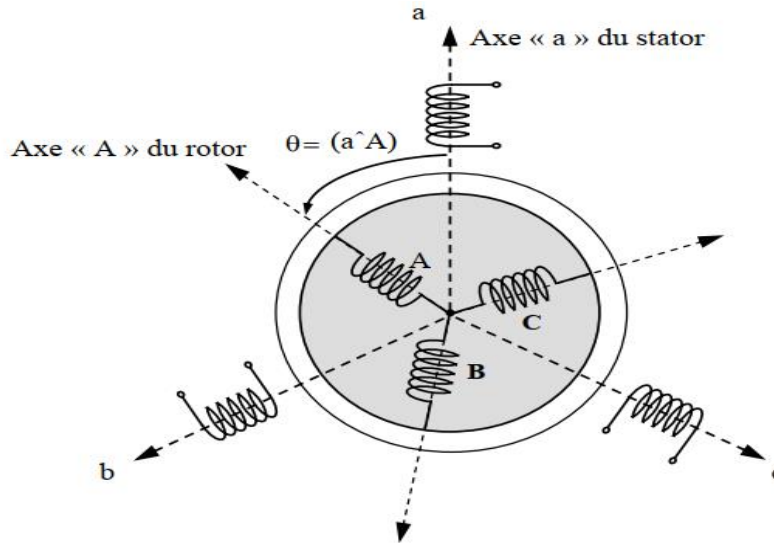


Figure 2.1 Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée. [12]

2.4.1 Equation régissant les fonctionnements de la machine asynchrone

La mise en équation des moteurs asynchrones triphasés aboutit à des équations différentielles à coefficients variables. L'étude analytique du comportement du système est alors laborieuse, vu le grand nombre de variables.

On utilise des transformations mathématiques qui permettent de décrire le comportement du moteur à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants..

D'après la loi de Faraday, on peut écrire que :

$$V = Ri + \frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$

Nous avons appliqué cette formule dans les trois phases de la machine asynchrone, et obtenu les équations suivantes) :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Chapitre 2: Modélisation d'une machine asynchrone

$$\text{et } \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = R_r \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Chaque flux comporte une interaction avec les courants de toutes les phases y compris la sienne (notion de flux / inductance propre). Voici l'équation matricielle de flux:

$$\begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \\ \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s m_s m_s & : & m_1 m_3 m_2 \\ m_s l_s m_s & : & m_2 m_1 m_3 \\ m_s m_s l_s & : & m_3 m_2 m_1 \\ \dots & \dots & \dots \\ m_1 m_2 m_3 & : & l_r m_r m_r \\ m_3 m_1 m_2 & : & m_r l_r m_r \\ m_2 m_3 m_1 & : & m_r m_r l_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \\ I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$m_1 = m_{rS} \cos \theta \quad (2.5)$$

$$m_2 = m_{rS} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right), \quad (2.6)$$

$$m_3 = m_{rS} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.7)$$

2.4.2 Transformation triphasé- biphasé :

Les transformations de Concordia ou de Park permettent d'obtenir un système équivalent formé de trois enroulements orthogonaux, deux de ces enroulements sont situés dans le même plan que les enroulements a, b, et c. Le troisième enroulement est situé dans le plan orthogonal au plan formé par les axes de phases a, b, et c et représente la composante homopolaire. En se basant sur les hypothèses simplificatrices, et en appliquant la transformation de Park ou la transformation de Concordia au stator et au rotor, on peut exprimer l'ensemble des relations de la machine dans ce repère. Le repère de Park (d, q, o) est à priori quelconque, on peut ainsi considérer qu'il tourne à une vitesse arbitraire. Des choix plus ou moins pertinents peuvent être faits en fonction du repère auquel on lie la représentation de Park. Tandis que la transformation de Concordia conserve la puissance instantanée elle est donc invariante en puissance.

2.4.2.1 Transformation de concordai :

Le but de modélisation est de trouver un modèle simple pour la machine asynchrone, permettant de passer de trois phases à deux phases. On considère que les trois phases sont un groupe de base qui forme un repère.

Chapitre 2: Modélisation d'une machine asynchrone

Tout d'abord, on utilise la transformation de Concordia pour passer à un autre repère. La relation entre les deux repères est montrée dans la Figure 2.2. Chaque vecteur dans le repère abc peut être multiplié par une matrice pour le mettre dans le repère.

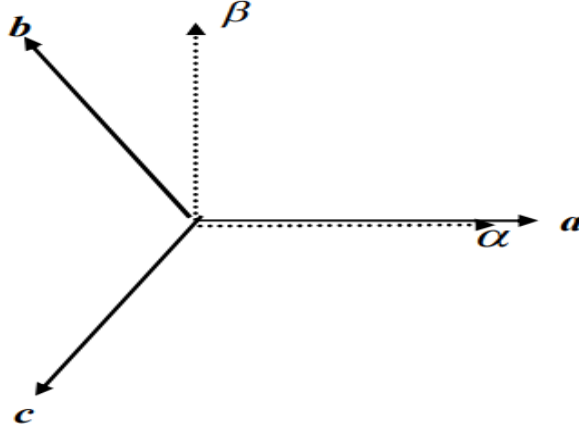


Figure 2.2 : Transformation triphasée-biphasée

Comme le montre la figure 2.2, cette transformation permet d'écrire les équations qui décrivent le modèle du moteur asynchrone dans un repère biphasé fixe.

En effet, les grandeurs triphasées statoriques et rotoriques (a, b, c) sont écrites dans un repère biphasé (α, β) en quadrature de phase. La transformation est réalisée par la matrice suivante :

$$T_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 0 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

On multiplie les équations de tension et les équations de flux par cette matrice T_{32} et on obtient les nouvelles équations suivantes :

$$\text{Tensions statorique :} \quad \begin{bmatrix} V_{\alpha s} \\ V_{\beta s} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} I_{\alpha s} \\ I_{\beta s} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{\alpha s} \\ \Phi_{\beta s} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$\text{Tensions rotorique:} \quad \begin{bmatrix} V_{\alpha r} \\ V_{\beta r} \end{bmatrix} = R_r \begin{bmatrix} I_{\alpha r} \\ I_{\beta r} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{\alpha r} \\ \Phi_{\beta r} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Pour simplifier les équations de flux, on introduit les inductances cycliques :

L_s et L_r À partir de l'équation originale de flux, on peut trouver la valeur de L_s et L_r . On sait que.

$$\Phi_{\alpha s} = L_s I_{\alpha s} + m_s I_{\beta s} + m_s I_{\alpha r} + m_1 I_{\beta r} + m_2 I_{\alpha r} + m_2 I_{\beta r} \quad (2.11)$$

Chapitre 2: Modélisation d'une machine asynchrone

Car la machine est alimentée par une source de tension triphasée équilibrée, on a encore ;

$$I_{as} + I_{bs} + I_{cs} = 0. \quad (2.12)$$

On pose nommée inductance cyclique qui prend compte la contribution des 3 phases au stator même si le flux magnétique semble ne provenir que du courant I_{as} .

$$\text{On pose ;} \quad M = \frac{3}{2} m_{sr} \quad (2.13)$$

$$\text{Donc le flux :} \quad \Phi_{as} = L_s I_{as} + I_r M \cos \theta. \quad (2.14)$$

On en déduit donc les équations de flux:

$$\begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M \cos \theta & -M \sin \theta \\ 0 & L_s & M \sin \theta & M \cos \theta \\ M \cos \theta & -M \sin \theta & L_r & 0 \\ -M \sin \theta & M \cos \theta & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{ar} \\ I_{br} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Pour simplifier l'écriture, on note :

$$P[\theta] = \begin{bmatrix} M \cos \theta & -M \sin \theta \\ -M \sin \theta & M \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Donc l'équation précédente devient :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & P[\theta] \\ 0 & L_s & \\ P[-\theta] & L_s & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{ar} \\ I_{br} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Cette transformation permet donc de simplifier les équations électriques du moteur asynchrone d'un système de six équations à un système de quatre équations. En plus Cette transformation assure la conservation de la puissance instantanée, ce qui est un avantage pour la modélisation du moteur asynchrone.

2.4.2.2 Transformation de Park :

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasée - diphasé suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère abc vers le repère aβ puis vers le repère d-q. Le repère aβ est toujours fixe par rapport au repère abc (Figure 2.6), par contre le repère d-q est mobile. Il forme avec le repère fixe aβ un angle qui est appelé l'angle de la transformation de Park ou angle de Park.

Chapitre 2: Modélisation d'une machine asynchrone

Revenons au choix de ces angles de transformation pour chaque ensemble de grandeurs (statoriques et rotoriques). Si l'on note par θ_s . L'angle de la transformation de Park des grandeurs statoriques (resp. rotoriques), il existe une relation qui les lie et qui simplifie les équations et par la même le modèle final. Les repères de la transformation de Park des grandeurs statoriques et celle des grandeurs rotoriques doivent coïncider pour simplifier ces équations (Figure 2.3).[13].

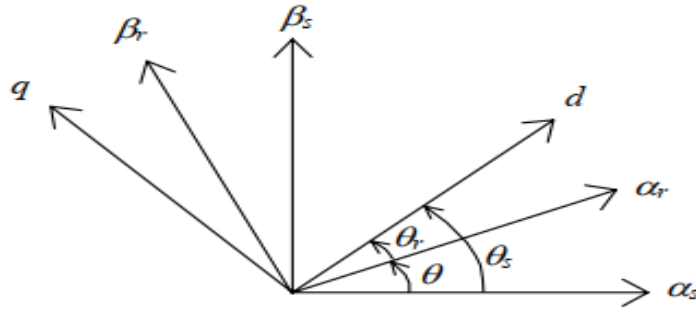


Figure 2.3 transformation de Park

Une fois les équations placées dans le repère, on continue de transformer les équations dans un repère mobile : Celui de Park.

Matrice de passage pour les grandeurs statoriques

$$\begin{bmatrix} X_{ds} \\ X_{qs} \end{bmatrix} = P[\theta_s] \begin{bmatrix} X_{as} \\ X_{bs} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

et pour les grandeurs rotorique :

$$\begin{bmatrix} X_{dr} \\ X_{qr} \end{bmatrix} = P[\theta_r] \begin{bmatrix} X_{ar} \\ X_{br} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

On a aussi une relation qui indique que.

$$\theta_s = \theta_r + \theta \quad (2.20)$$

On applique cette transformation à l'équation obtenue après une transformation de Concordia, et on trouve que :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + P \left[\frac{\pi}{2} \right] \dot{\theta}_s \begin{bmatrix} \emptyset_{ds} \\ \emptyset_{qs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \emptyset_{ds} \\ \emptyset_{qs} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Chapitre 2: Modélisation d'une machine asynchrone

$$\begin{bmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = R_r \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + P \left[\frac{\pi}{2} \right] \dot{\theta}_r \begin{bmatrix} \emptyset_{dr} \\ \emptyset_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \emptyset_{dr} \\ \emptyset_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

On remarque que $\dot{\theta}_s = \omega_s$ et $\dot{\theta}_r = \omega_r$ (2.23)

Il reste à calculer les équations de flux :

$$\begin{bmatrix} \emptyset_{ds} \\ \emptyset_{qs} \\ \emptyset_{dr} \\ \emptyset_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

On peut maintenant exprimer les tensions et les flux avec des grandeurs dans le repère d.q

Equation :

$$V_{ds} = R_s I_{ds} - \omega_s \emptyset_{qs} + \frac{d}{dt} \emptyset_{ds} \quad (2.25)$$

$$V_{qs} = R_s I_{qs} + \omega_s \emptyset_{ds} + \frac{d}{dt} \emptyset_{qs} \quad (2.26)$$

$$V_{dr} = R_r I_{dr} + \omega_r \emptyset_{qr} + \frac{d}{dt} \emptyset_{dr} \quad (2.27)$$

$$V_{qr} = R_r I_{qr} + \omega_r \emptyset_{dr} + \frac{d}{dt} \emptyset_{qr} \quad (2.28)$$

On remarque que :

$$\omega_r = g\omega_s \text{ et } \omega_s - \omega_r = \omega \quad (2.29)$$

2.4.3 Modèle réduit :

On applique les équations de flux et de tension sous forme de vecteur:

$$\vec{X} = Xd + jXq \text{ ou } \vec{X} = |X|e^{-j\omega t} \quad (2.30)$$

On réussit à réduire le nombre d'équation de 8 à 2. Finalement, on met nos équations sous forme matricielle. On trouve le modèle vecteur espace.

$$\text{Flux :} \quad \underline{\emptyset} = \underline{L} \cdot \underline{I} \quad (2.31)$$

$$\text{Avec} \quad \underline{L} = \begin{bmatrix} L_s & M \\ M & L_r \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

$$\text{Tension :} \quad \underline{V} = \underline{R} \cdot \underline{I} + \underline{L} \cdot \underline{\dot{I}} \quad (2.33)$$

$$\text{Avec} \quad R = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ -j\omega M & R_r + j\omega L_r \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

2.5 Schéma monophasé équivalent :

En régime permanent, il est plus intéressant de déterminer le schéma monophasé équivalent. A partir d'un groupe d'équations numéroté.

On peut enlever tous les termes des dérivées car le flux se stabilise en régime permanent, en suite on met les termes restant sous forme vectorielle et on obtient un nouveau groupe d'équations :

$$\vec{V}_s = R_s \vec{I}_s + j\omega_s \vec{\Phi}_s \quad (2.35)$$

$$\vec{V}_r = R_r \vec{I}_r + j\omega_r \vec{\Phi}_r \quad (2.36)$$

Dans la machine asynchrone, la valeur de tension rotorique est égale à 0, donc on peut diviser l'équation 2 par g des deux côtés. Le but est de supprimer les variables ω_s .

Voici le résultat:

$$0 = \frac{R_r}{g} \vec{I}_r + j\omega_s \vec{\Phi}_r \quad (2.37)$$

On procède vers l'étape suivante:

$$0 = \frac{R_r}{g} I_r + j\omega_s (L_r \vec{I}_r + M \vec{I}_s) \quad (2.38)$$

$$0 = \frac{R_r}{g} I_r + j\omega_s L_r \vec{I}_r - j\omega_s M \vec{I}_r + j\omega_s M \vec{I}_r + j\omega_s M \vec{I}_r \quad (2.39)$$

$$= \frac{R_r}{g} I_r + j\omega_s (L_r + M) \vec{I}_r + j\omega_s (\vec{I}_r + M \vec{I}_s) \quad (2.40)$$

On pose :

$$L_{rp} = L_r - M \text{ et } \vec{I}_\mu = \vec{I}_r + J \vec{I}_s \quad (2.41)$$

$$0 = \frac{R_r}{g} \vec{I}_r + j\omega_s L_{rp} \vec{I}_r + j\omega_s M \vec{I}_\mu \quad (2.42)$$

Au stator on fait la même chose et on a :

$$\vec{V}_s = R_s \vec{I}_s + j\omega_s L_{rp} \vec{I}_s + j\omega_s M \vec{I}_\mu \quad (2.43)$$

Chapitre 2: Modélisation d'une machine asynchrone

$$\text{Avec} \quad L_{rp} = L_s - M \quad (2.44)$$

Pour faire apparaître la partie perte fer, on sépare la partie imaginaire et la partie réelle du courant, on peut noter $\vec{I}_R = \vec{I}_\mu \cos \delta$ et $\vec{I}_S = \vec{I}_\mu \sin \delta$ par la définition,

Donc on a :

$$\vec{I}_\mu = \vec{I}_\mu \cos \delta + \vec{I}_\mu \sin \delta, \quad (2.45)$$

le multiple par M on obtient :

$$w_s M \vec{I}_\mu = w_s M \cos \delta \vec{I}_\mu + j w_s M \sin \delta \vec{I}_\mu \quad (2.46)$$

On pose :

$$R_{fer} = w_s M \cos \delta \vec{I}_\mu \quad \text{et} \quad X_\mu = w_s M \sin \delta, \quad (2.47)$$

Au final on a réussi à présenter les deux côtes de la machine asynchrone dans un même schéma.

$$\text{Dans ce schéma :} \quad \sqrt{R_{fer}^2 + X_\mu^2} = w_s M. \quad (2.48)$$

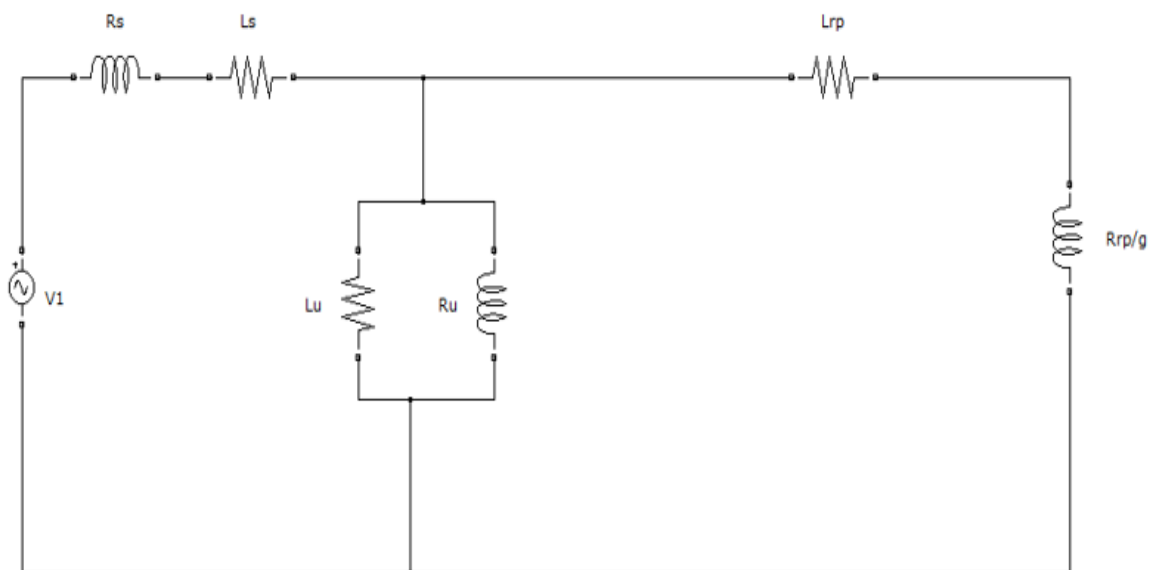


Figure 2.4 Schéma monophasé équivalent de MAS

2.6 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons étudié la modélisation de la MAS par la modèle vecteur espace cette méthode consiste à simplifier le maximum d'équations qui décrivent le comportement dynamique des différentes grandeurs de la MAS tels que (flux magnétique, courant, tensions...etc.) et à la Transformation triphasé- biphasé pour passer à un autre repère pour tracer et identifier les éléments du circuit monophasé équivalent. Une identification du moteur asynchrone a bague est nécessaire, elle fera objet dans le prochain chapitre

Chapitre 3

Etude Expérimentale et Simulation de MAS

3.1 Introduction :

Après avoir terminé dans le chapitre précédent l'étude un modèle mathématique de la machine asynchrone composé par un système d'équations contient des paramètres, donc Si de nombreuses études et modèles ont été réalisés dans la littérature, le passage à la partie expérimentale est loin d'être évident. Pour la validation de ce vecteur de paramètres, nous avons testé et comparé avec les résultats obtenus par quelques essais classiques.

Les données des plaques signalétiques ainsi les données fournies par les constructeurs des machines asynchrones ne sont pas suffisants pour connaître tous les paramètres électriques et mécaniques de ces machines, et c'est pour cela on recourt à des essais pratiques pour la détermination de ces paramètres,

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. Sont utilisés dans l'industrie et dans les milieux universitaires.

L'objectif de ce chapitre est effectuant les essais est de déterminer les paramètres concrets de la machine et de les utiliser dans la simulation.

La machine étudiée est une machine asynchrone à rotor bobiné disponible au laboratoire LEDMASCD (Langlois-MAT20-C1) ayant les indications de la plaque signalétique suivant :

1.5KW; 230/400V - 50Hz; 6.4/3.7A; 1340tr/min; $\cos\varphi = 0.8$

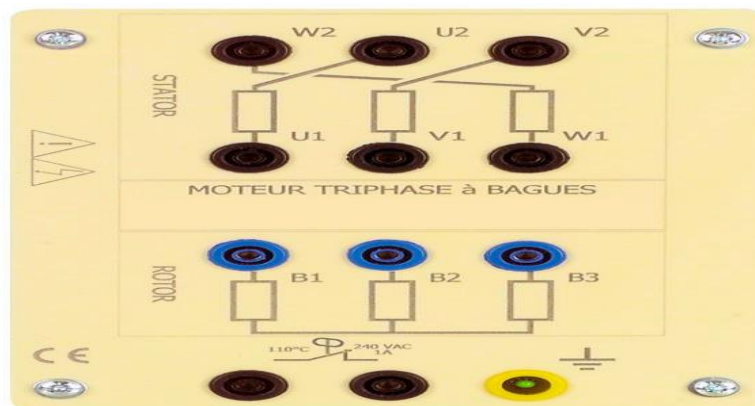


Figure 3.1 Borne de moteur asynchrone a rotor bobiné (Langlois-MAT20-C1)



Figure 3.2 Machine asynchrone à rotor bobiné (Langlois-MAT20-C1)

3.2 Identification des paramètres électriques

L'identification des paramètres de la MAS s'appuie sur un modèle d'état bien choisi, cela permet de mieux appliquer la méthode appropriée. En effet, lors de cette investigation, le modèle adopté est celui de Park idéalisé (paramètres constants et ne varient pas au cours du fonctionnement), à quatre paramètres électriques (fuites totalisées dans le stator) sans la prise en compte des pertes fer.

3.2.1 Méthode de la plaque signalétique :

Cette méthode permet une estimation grossière (très approximative), directe et rapide des paramètres électriques de la MAS tout en employant les indications (nominales) de la plaque signalétique telle que $I V_s, I_s, f_s, \cos\phi, g_N$ [14], [15].

Donc :

$$\sigma = \frac{1 - \cos\phi_s}{1 + \cos\phi_s} \quad (3.1)$$

$$M = I_s \frac{1 - \sigma}{\sigma} \quad (3.2)$$

$$L_s = M + I \quad (3.3)$$

$$I_s = \frac{V_s \sqrt{\sigma}}{I W_s} \quad (3.4)$$

Moyennant les relations qui caractérisent cette méthode, on peut estimer, très approximativement, les paramètres de la MAS en régime nominal. Les résultats obtenus sont reportés dans le tableau 3.1 donné ci-après :

Tableau 3.1 Résultats de la méthode de la plaque signalétique.

σ	L_s (H)	M
0.111	0.338	0.30

σ : Coefficient de dispersion de flux..

L_s : Inductance propre (cyclique) du stator [H].

Chapitre 3: Etude expérimentale et simulation de MAS

3.2.2 Méthode des essais classiques :

Cette méthode consiste en la mesure par phase, des puissances actives (P) et réactives (Q) lors des essais effectués en régime permanent à puissance utile nulle : l'essai à vide ($g \approx 0$) et l'essai à rotor bloqué ($g = 1$). La méthode classique est plus électrotechnicienne c'est à dire plus physique, et se rapportant au modèle mathématique de Park défini avec des paramètres inductifs et résistifs que l'on doit identifier au préalable par des essais expérimentaux.

3.2.2.1 Essai à courant continu :

Le but de cet essai est de déterminer la résistance statorique R_s et rotorique R_r de la machine utilisée. (il faut faire fonctionner la machine 20 min en charge nominale)

Mode opératoire

- On donne une tension composée respectivement aux bornes de la phase a et de la phase b statoriques et aux phases rotoriques.
- On fait varier la valeur de cette tension et on mesure les courants qui les parcourent.

Le montage de cet essai à courant continu est illustré sur la figure suivante:



Figure 3.3 Montage de l'essai à courant continu.

Chapitre 3: Etude expérimentale et simulation de MAS

Voici le tableau de donnée:

- Pour le stator :

Tableau 3.2 Résultats statoriques pour l'essai en courant continu.

Tension V (v)	5.25	9	14
Courant I(A)	1.5	2.5	3.7
Résistance R_S (Ω)	3.5	3.6	3.78

$$R_s = 3.62\Omega$$

- Pour le rotor

Tableau 3.3 Résultats rotoriques pour l'essai en courant continu.

Tension V (v)	1.1	1.8	2.4
Courant I(A)	1.5	2.5	3.6
Résistance R_r (Ω)	0.73	0.72	0.66

$$R_r = 0.35\Omega$$

3.2.2.2 Essai à vide :

Dans ce cas, la machine est alimentée à sa tension et à sa fréquence nominale, et tourne à vide, le rotor est en court-circuit dans les machines à bagues.

Mode opératoire :

- On branche le stator du machine en triangle.
- On applique graduellement la tension jusqu' à la tension nominale sur le moteur.

Il existe cependant un couple résistant de très faible valeur équivalent aux pertes mécaniques dues aux frottements et à la ventilation.

Chapitre 3: Etude expérimentale et simulation de MAS

Cet essai à vide permet de déterminer R_{e0} et X_{e0} par la mesure en triphasé de P_0 , Q_0 et V_0 , soient :

$$R_s = \frac{P_0}{P_0^2 + Q_0^2} V_{s0}^2 \quad (3.5)$$

$$\frac{Q_0}{P_0^2 + Q_0^2} V_{s0}^2 = W_s L_s \quad (3.6)$$

V_{s0} :Tension statorique à vide.

P_0 :Puissance active absorbée à vide.

Q_0 :Puissance réactive absorbée à vide.

Voici le tableau de données :

Tableau 3.4 Résultats de l'essai à vide

V_0 (v)	I_0 (A)	P_0 (w)	Q_0 (w)	R_s (Ω)	L_s (H)
230	0.14	100	282.842	3.62	0.338

3.2.2.3 Essai a rotor bloquée:

Le but de cet essai est de déterminer la résistance rotorique et la somme de deux inductances cycliques.

•Mode opératoire :

- On alimente la machine par la tension triphasée équilibrée.
- On augmente progressivement la valeur de tension.
- On s'arrête quand le rotor commence à tourner et on diminue un peu la tension pour garder la vitesse nulle.

Dans cet essai, aussi appelé « essai en court-circuit », le rotor est bloqué (enroulement court-circuité, arbre bloqué). La vitesse de rotation étant nulle ($g = 1$), aucune puissance mécanique n'est délivrée sur l'arbre, et le courant absorbé n'est limité que par l'impédance interne de la machine qui est relativement faible.

Chapitre 3: Etude expérimentale et simulation de MAS

L'essai doit être effectué à tension réduite de façon à limiter le courant à sa valeur nominale (risque d'un échauffement prohibitif de la machine)

Donc on calcul aussi la valeur moyenne du tension et puis la puissance

$$S = V_{\text{moy}} \cdot I_{\text{moy}} \quad (3.7)$$

et

$$Q_{1cc} = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (3.8)$$

$$\frac{P_{cc}}{P_{cc}^2 + Q_{cc}^2} V_{scc}^2 = R_s + R_r \quad (3.9)$$

Voici le tableau de données :

Tableau 3.5 Résultats de l'essai à rotor bloqué

$V_{1cc}(v)$	$I_{1cc}(A)$	$P_{1cc}(w)$	$Q_{1cc}(VAR)$	$R_s(\Omega)$	$L_s(H)$
75	3	112	253.55	2.55	0.338

3.3 Simulation des Comportements électriques de MAS :

Cette partie consiste en la simulation des modèles d'essais des machines étudiées en introduisant les paramètres issus des différentes méthodes exposées précédemment dans le but de valider l'identification développée.

La machine asynchrone est normalement alimentée directement à partir du réseau industriel par un système de tensions triphasées équilibrées.

Dans certaines applications pour lesquelles la variation de la vitesse est nécessaire, le moteur sera alimenté par un système de tensions triphasées ou par un système de courants triphasés (injectés) dans les enroulements du stator, par l'intermédiaire d'un convertisseur électronique de puissance placé entre le moteur et le réseau industriel électrique.

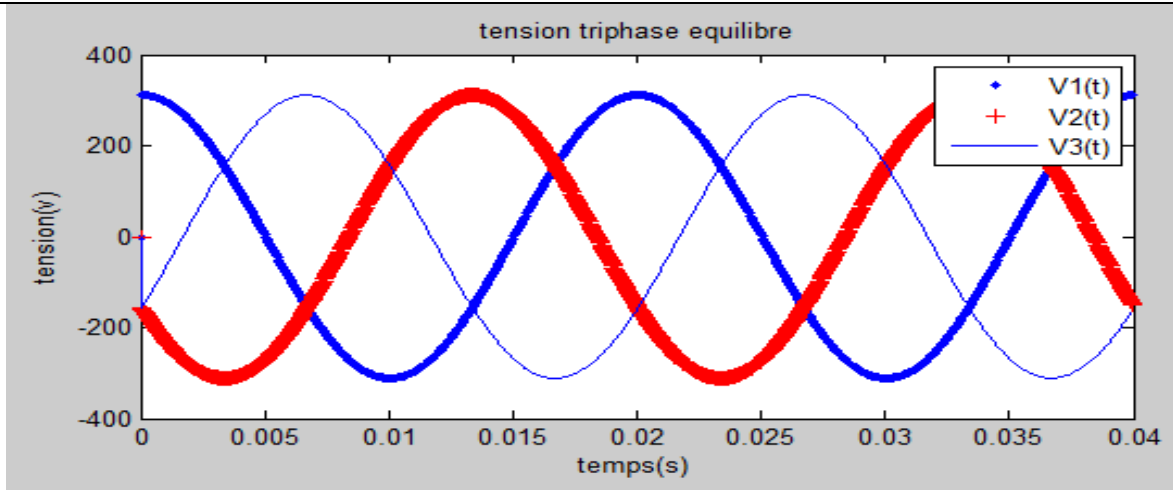


Figure 3.4 tensions triphasées équilibrées en fonction du temps (alimentation de MAS)

En première étape on va simuler numériquement le fonctionnement de la machine asynchrone alimenté directement par le réseau standard 220/380V, 50Hz et sans l'application de perturbation. L'examen des courbes de la figure 3.4 permet de constater que le démarrage à vide avec une tension nominale permet d'avoir:

Aux premiers instants, les courants statoriques présentent des oscillations successives autour de zéro, mais qui disparaissent rapidement au bout de quelques alternances, le régime permanent est atteint, ces oscillations peuvent être à l'origine de la destruction de la machine par échauffement en cas de répétitions excessives.

Premièrement, nous simulons l'essai à vide (Voir Figure 3.5), nous avons le courant statorique I_s qui se stabilise à 0.5 A, donc $I_{s\text{eff}}$ (valeur efficace) à 0.35A qui est proche de la valeur que nous avons mesurée en essai 0.14 A.

De plus, les courants commencent à se stabiliser après 0.2s (environ 10 périodes) et la valeur maximale dans le régime transitoire est 23.6 A, soit presque 10 fois la valeur finale. C'est pourquoi nous pouvons conclure que la machine a un temps de démarrage d'environ 0,15s et que le courant de démarrage est trop important.

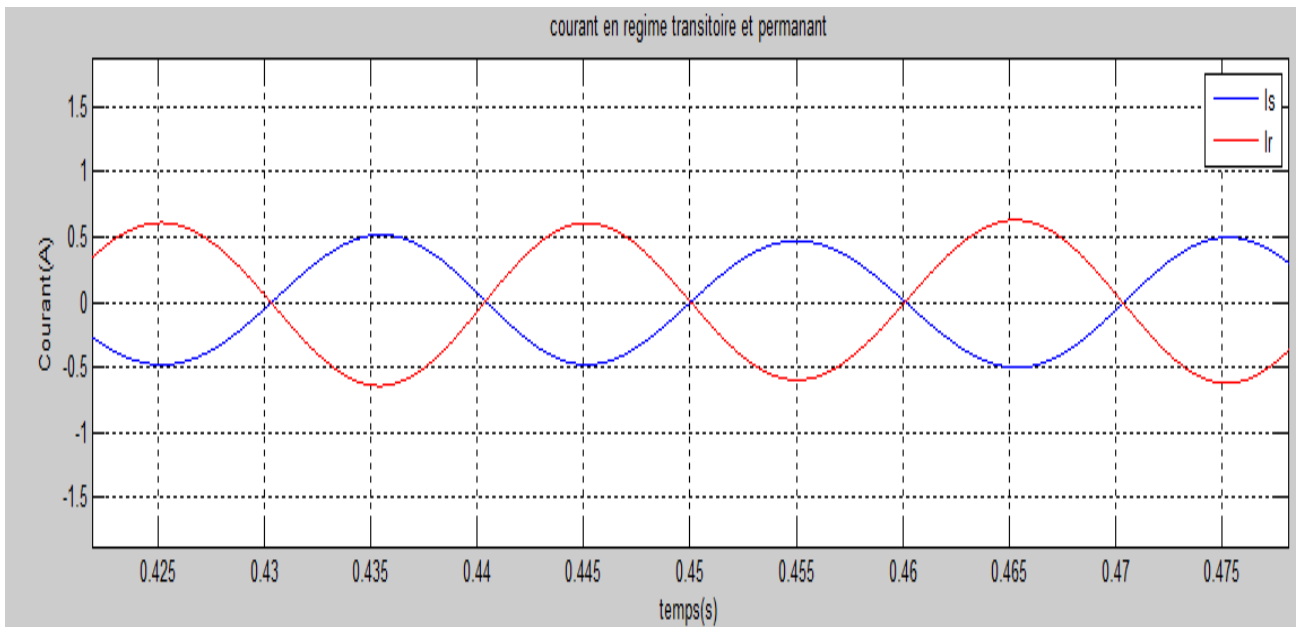
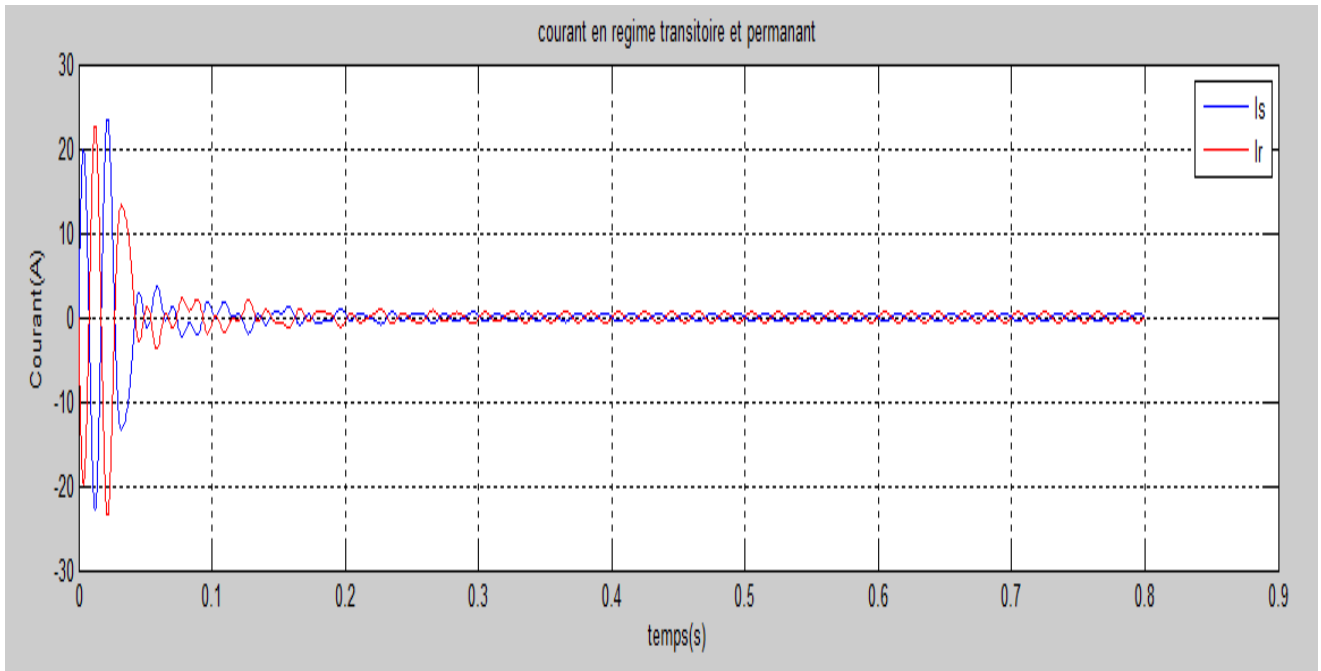


Figure 3.5 Courant statorique et rotorique en fonction du temps (à vide)

Chapitre 3: Etude expérimentale et simulation de MAS

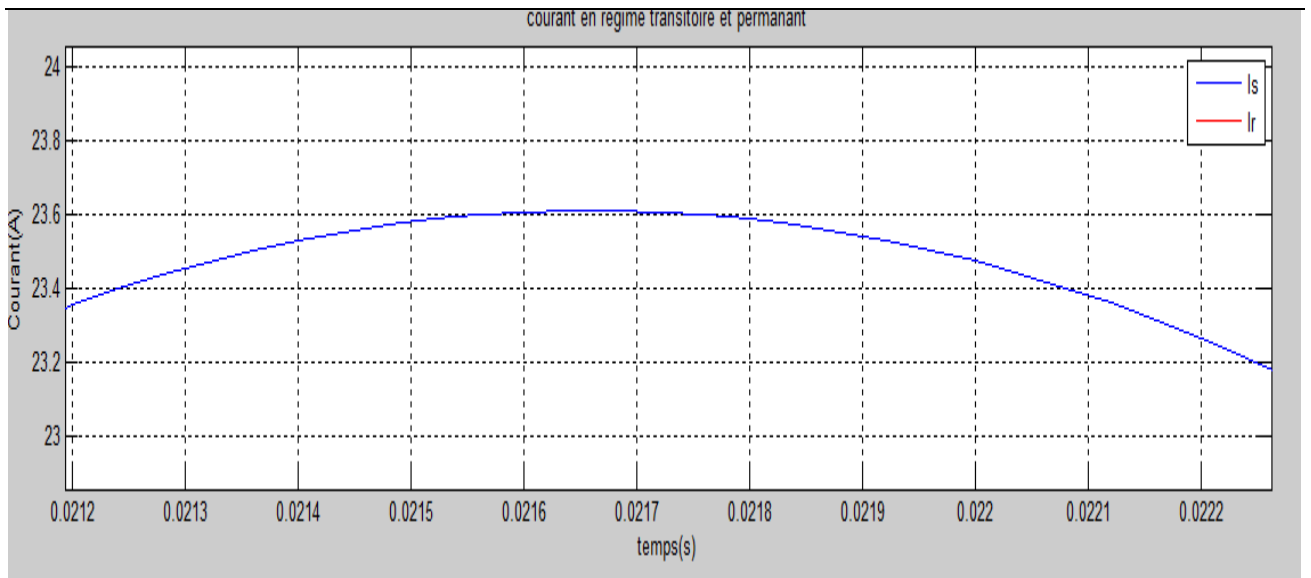
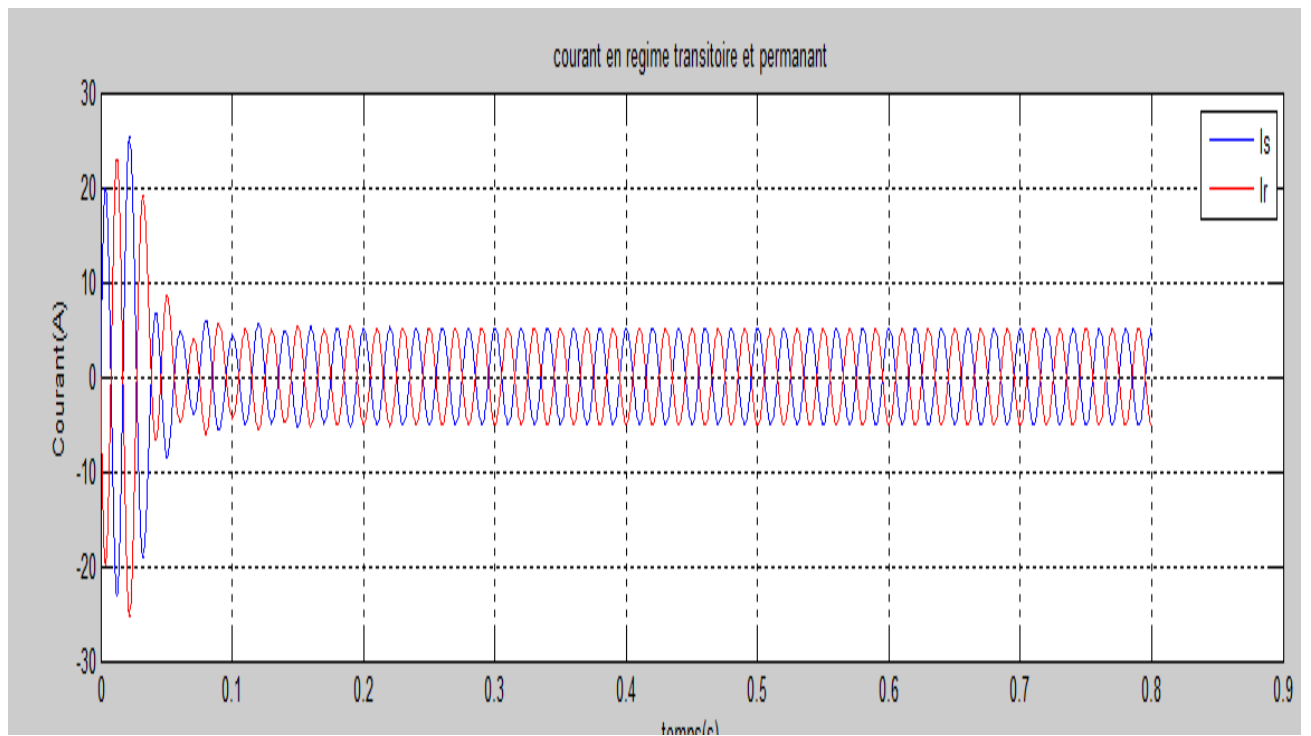


Figure 3.6 Courant statorique maximale fonction du temps (à vide)

Deuxièmes, nous simulons d'essai en charge. Nous prenons un profil du couple de charge, les courants sont augmentés à presque de 5.12A



Chapitre 3: Etude expérimentale et simulation de MAS

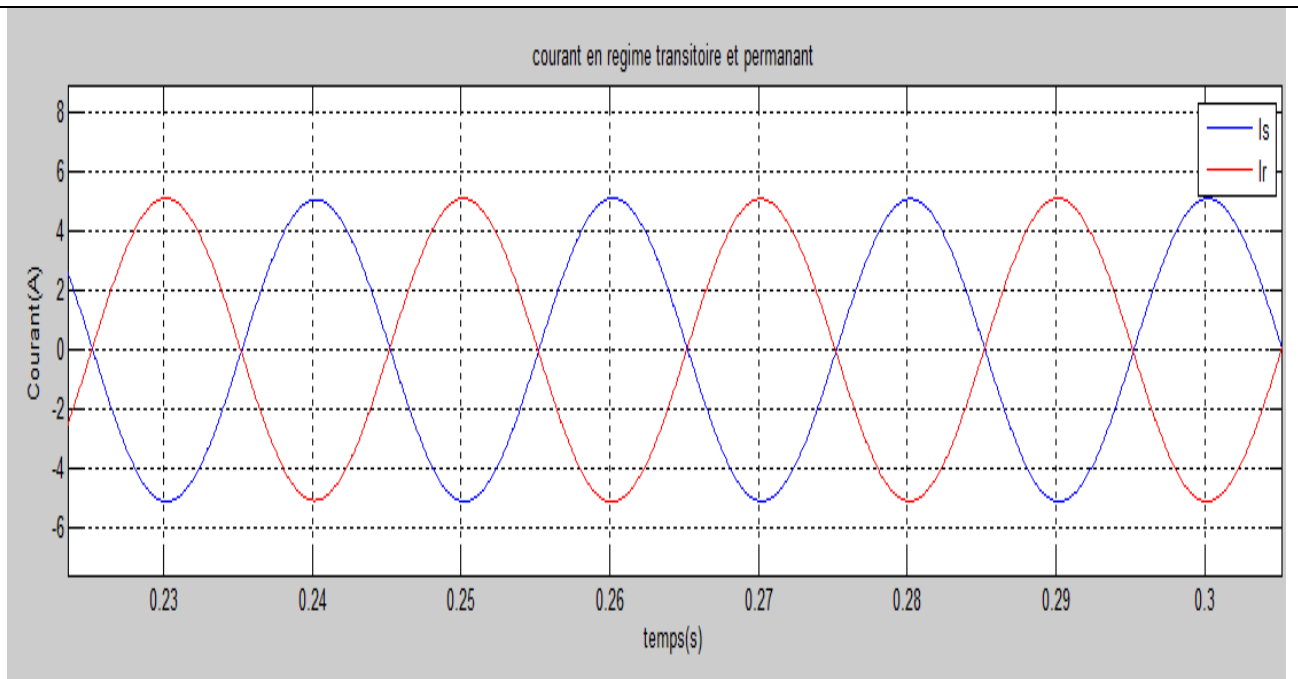


Figure 3.7 Courant statorique et rotorique en fonction du temps (en charge)

3.4 Simulation des Comportements mécanique de MAS :

Cette partie consiste en la simulation des modèles d'essais des machines étudiées en introduisant les paramètres issus des différentes méthodes exposées précédemment dans le but de valider l'identification développée.

La machine asynchrone est normalement alimentée directement à partir du réseau industriel par un système de tensions triphasées équilibrées.

Dans certaines applications pour lesquelles la variation de la vitesse est nécessaire, le moteur sera alimenté par un système de tensions triphasées ou par un système de courants triphasés (injectés) dans les enroulements du stator, par l'intermédiaire d'un convertisseur électronique de puissance placé entre le moteur et le réseau industriel électrique.

Chapitre 3: Etude expérimentale et simulation de MAS

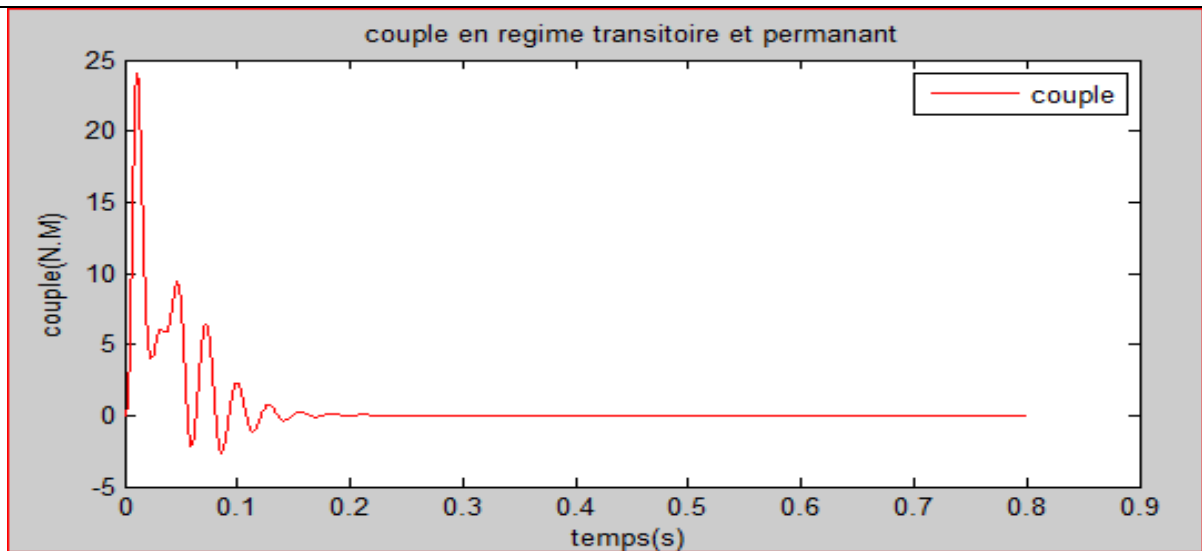


Figure 3 8. Couple en régime transitoire et permanent (à vide)

En première étape on va simuler numériquement le fonctionnement de la machine asynchrone alimenté directement par le réseau standard 220/380V, 50Hz et sans l'application de perturbation ($C_r=0$). L'examen des courbes de la (figure 3.4) permet de constater que le démarrage à vide avec une tension nominale permet d'avoir..

Pendant le régime transitoire, le couple est fortement pulsatoire, présentes aux premiers instants de démarrage des battements importants suivi d'un nombre d'oscillations avant de se stabiliser à zéro.

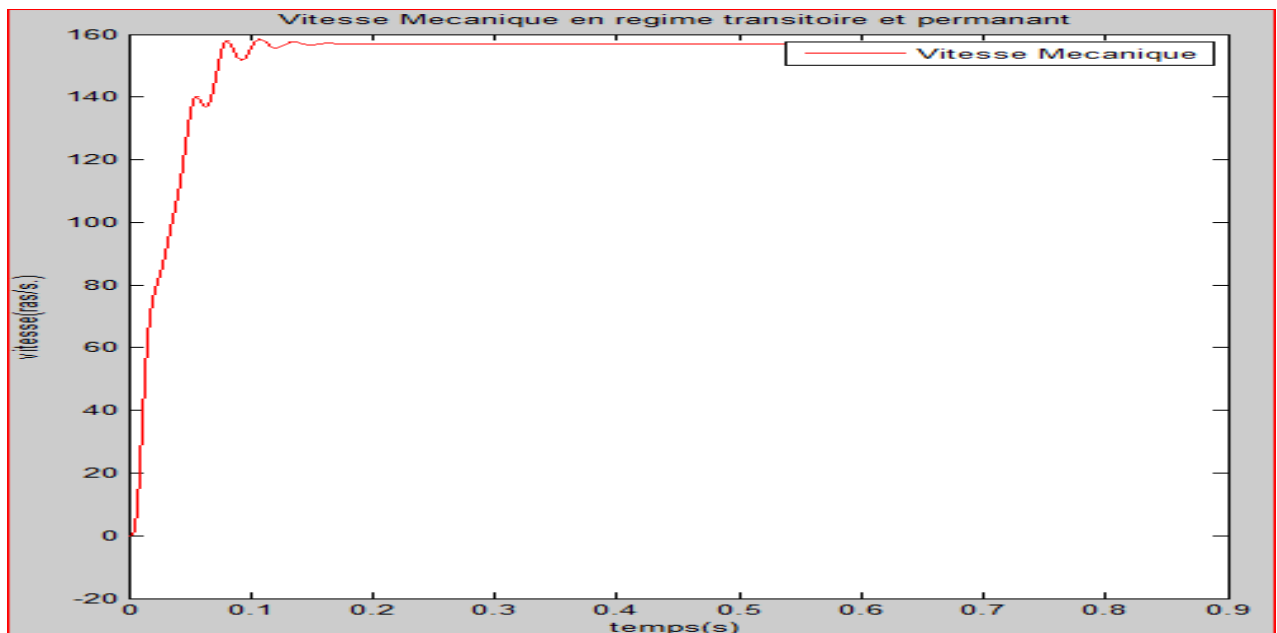


Figure 3,9 Vitesse mécanique en régime transitoire et permanent (à vide)

En deuxième étape, une perturbation du couple ($C_r = 8 \text{ N.m}$) est appliquée à l'arbre du moteur à l'instant ($t = 0.2\text{s}$) et les résultats de simulation sont regroupés dans la figure (3.9):

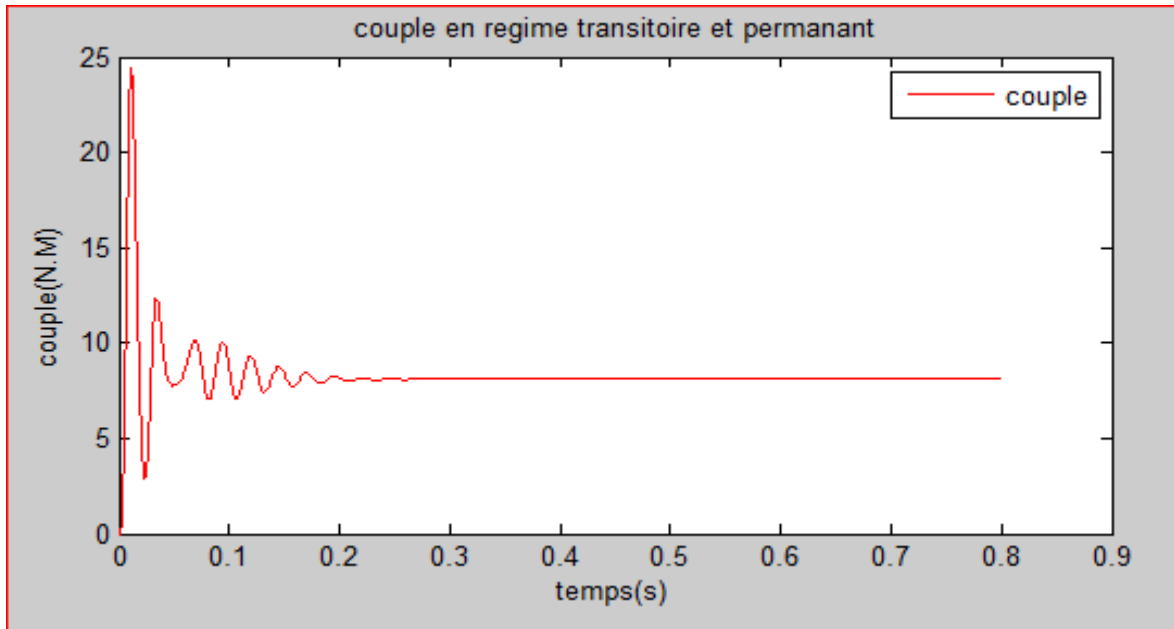


Figure 3,10 Couple en régime transitoire et permanent (en charge)

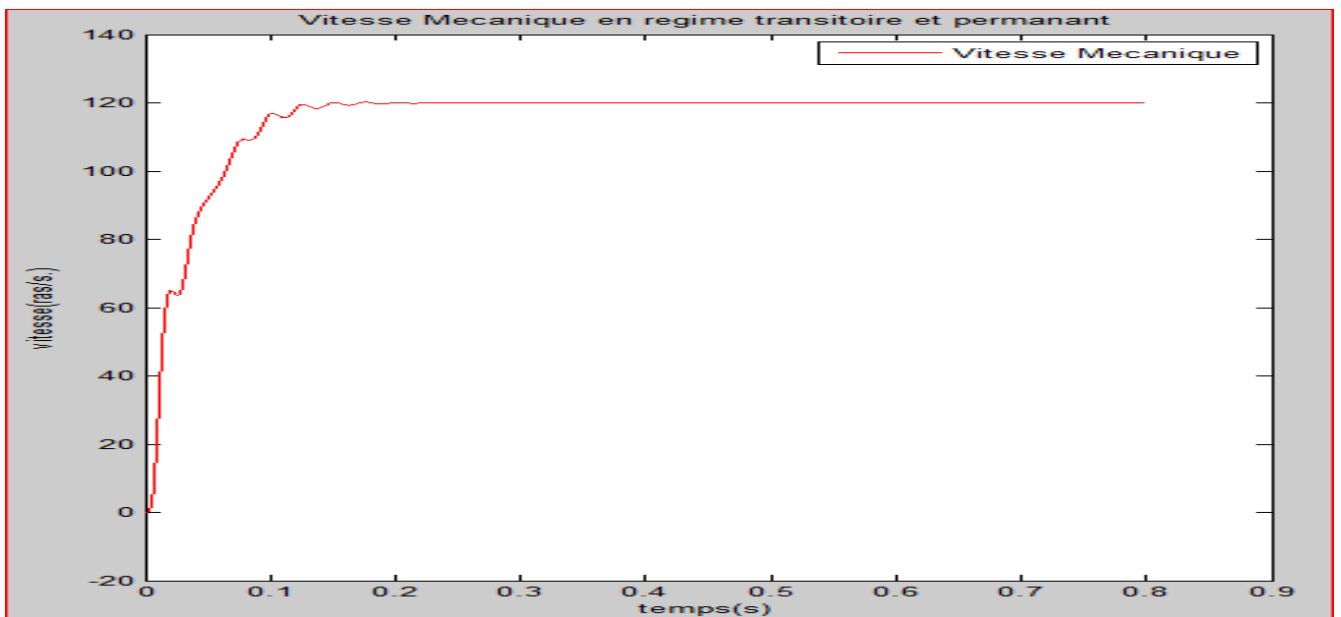


Figure 3,11 Vitesse mécanique en régime transitoire et permanent (en .charge)

Chapitre 3: Etude expérimentale et simulation de MAS

Quand nous sommes à vide, en régime permanent, le couple qui ne s'annule théoriquement pas car il existe un couple résistant (Figure 3.11) et la vitesse finale (Figure 3.2) qui correspond à la valeur nominale sur la plaque, soit 120 rad/s.

3.5 Bilan de puissance en service continu :

Dans ce service, les paramètres finissent par se stabiliser, c'est pourquoi nous nous intéressons au bilan de puissance. Les paramètres que nous utilisons sont les valeurs efficaces en régime permanent, donc des constantes. Après la simulation, nous pouvons déduire que le régime transitoire est presque 0,15s avec une faible inertie. (Dans le programme du service continu, nous simulons avec une faible inertie, soit $J=0,0033$). Donc les puissances en régime permanent ont été calculées à partir de 0,2s. Pour calculer les puissances, nous avons:

$$\text{Donc le couple de charge :} \quad C_{ch} = k\Omega \quad (3.10)$$

la puissance nominale :

$$P_n = C_{ch} \Omega = k \Omega^2 \quad (3.11)$$

$$k = P_n / \Omega^2 = \frac{1500}{(1462)^2} = 0.064 \text{ w/rad/s} \quad (3.12)$$

Tableau 3.6 Résultats des pertes

Les pertes joules du stator	104.72
Les pertes joules du rotor	5.082
Les pertes fer	59.53

Nous trouvons, après simulation, que le rendement de puissance est de 0,75 ce qui semble faible par rapport au rendement nominal. Le glissement diminue rapidement dans le régime transitoire et se stabilise en régime permanent car dans ce régime nous avons des valeurs de couple très importantes (Voir Figure 3.6). Nous pouvons aussi voir les pertes varier dans le régime transitoire et se stabilisent (sinusoïdale) en régime permanent. (Voir Figures 3.8 3.9 3.10). En pratique ce sont des valeurs efficaces, donc des constantes.

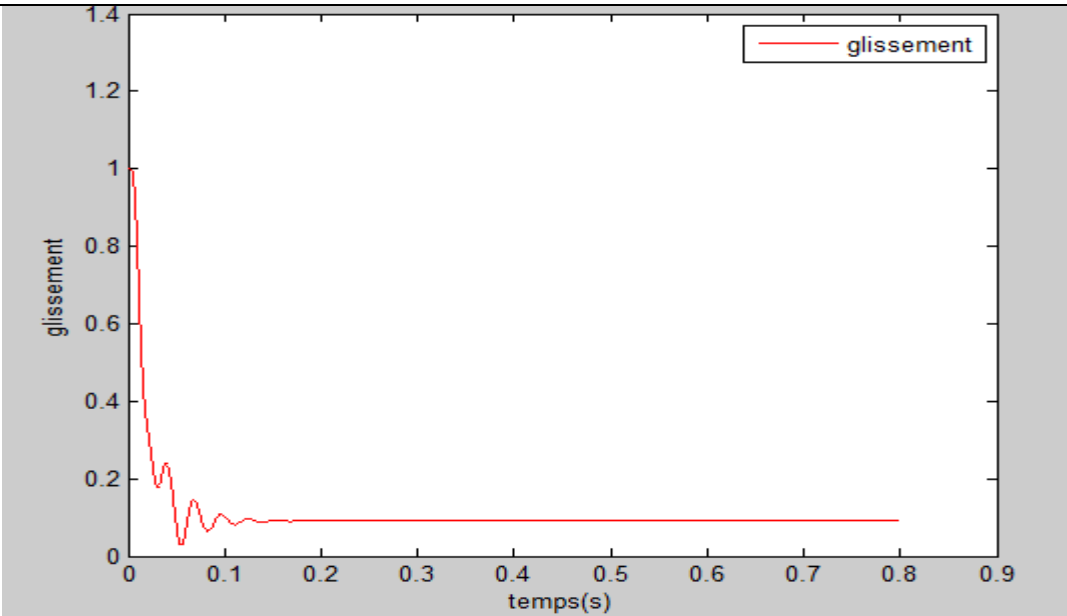


Figure 3.12. Evolution du glissement en fonction du temps

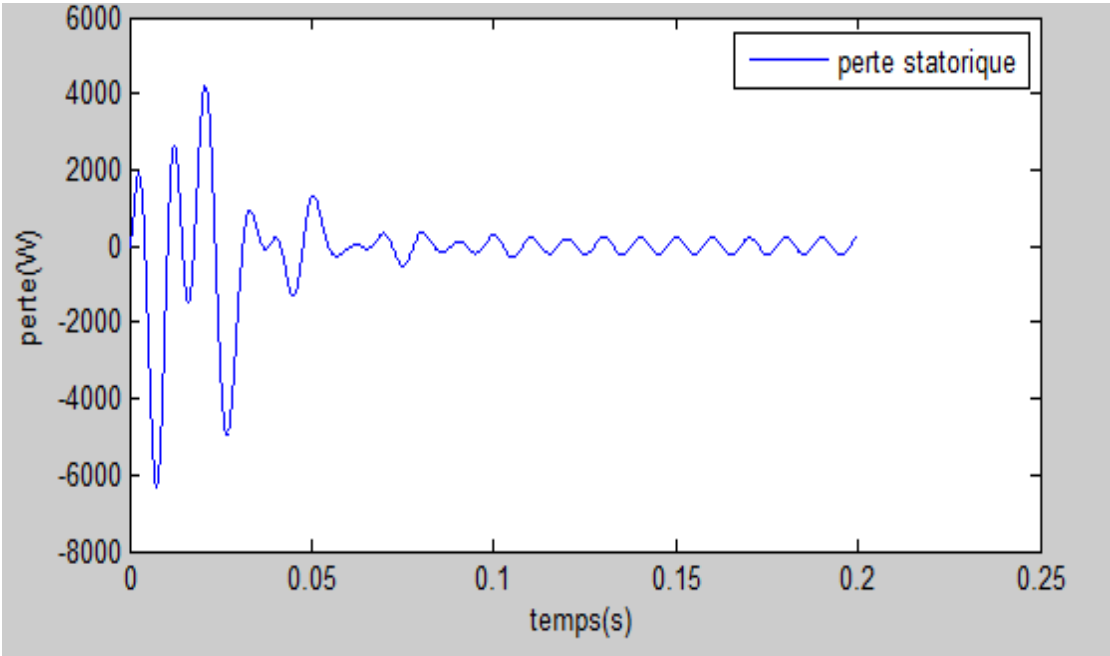


Figure 3.13 Evolution de la perte statorique en fonction du temps

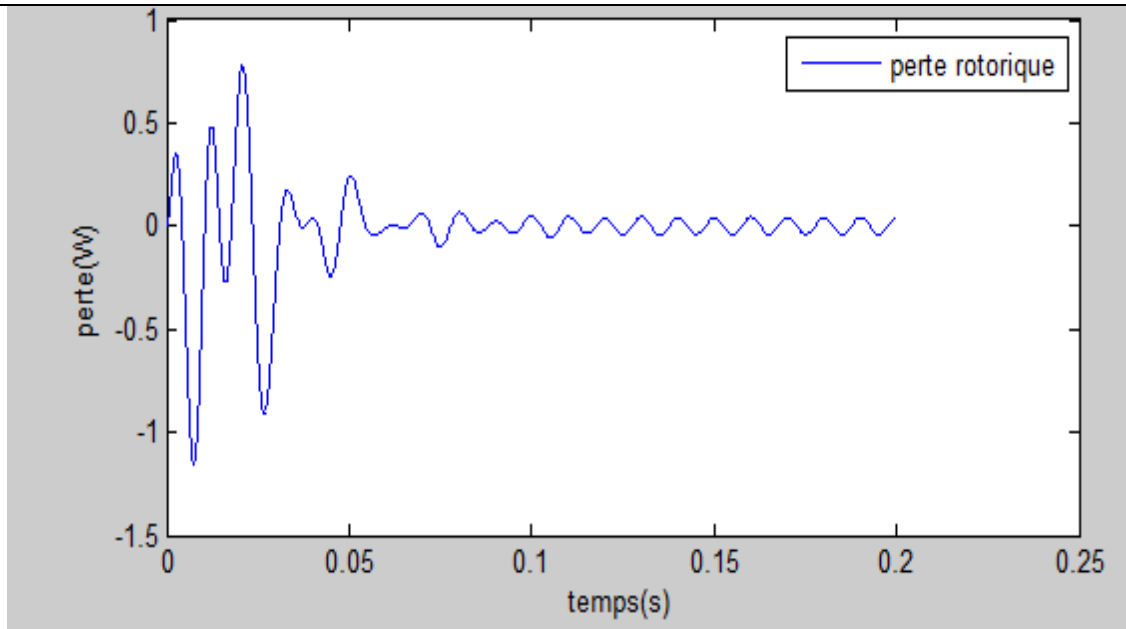


Figure 3.14 Evolution de la perte rotorique en fonction du temps

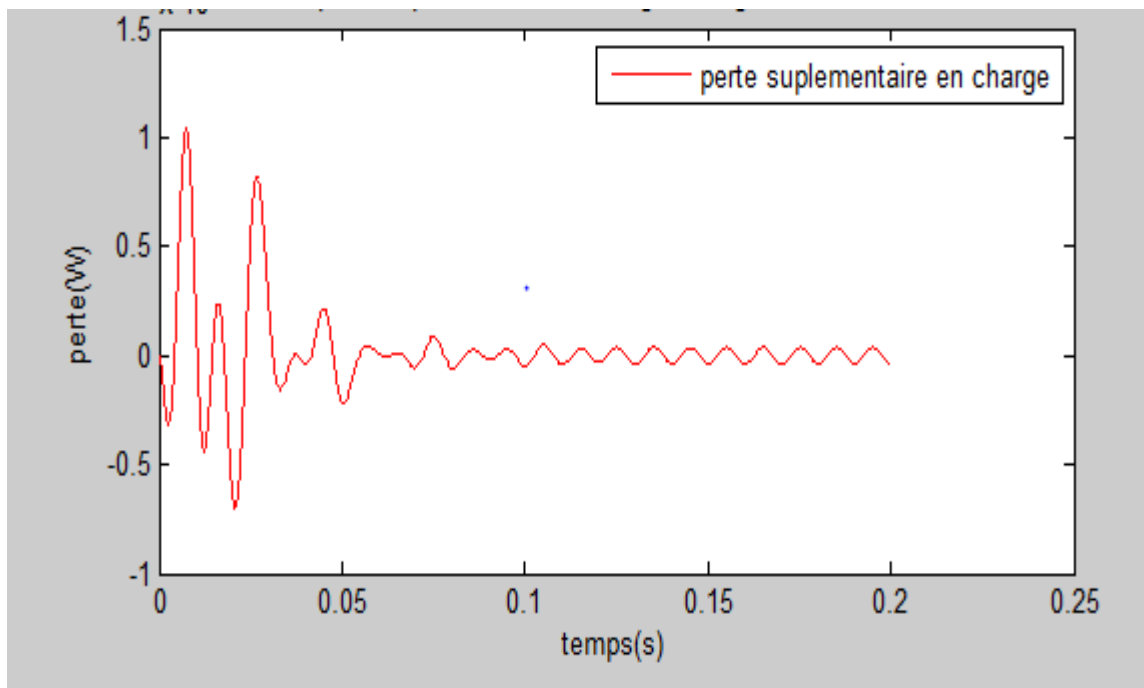


Figure 3.15 Evolution de perte supplémentaire en charge en fonction du temps

Nous pouvons aussi voir les pertes varient dans le régime transitoire et se stabilisent (sinusoïdale) en régime permanent. (Voir Figures 3.13 3.14 3.15). En pratique ce sont des valeurs efficaces, donc des constantes

3.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons fait la simulation du moteur asynchrone Langlois-MAT20-C1 en se basant sur le modèle vecteur espace et son schéma équivalent monophasé. Les résultats obtenus par simulation montrent la validité du modèle de vecteur espace pour la machine asynchrone, cette dernière répond bien pour décrire l'évolution d'un démarrage direct sur un réseau standard.

Conclusion générale et perspective

Conclusion générale et perspective :

Le travail réalisé dans ce mémoire présente une étude sur l'approche du modèle vecteur espace et son schéma équivalent du moteur asynchrone Langlois-MAT20-C1. Le but de commander la machine asynchrone avec le maximum de dynamique selon un modèle bien spécifique, au régime transitoire, Ce modèle est testé par simulation dont les différents résultats ont prouvé la justesse du modèle utilisé.

Premièrement, nous avons vu que les comportements physiques sont importants en vue de commander une machine asynchrone. Une fois les simulations sont faites, nous pouvons aussi diminuer les pertes dans le fonctionnement de la machine concrète. Les deux aspects sont importants dans l'utilisation industrielle de la machine asynchrone.

Deuxièmement, nous avons travaillé sur le théorème du vecteur espace. Cela simplifie beaucoup les équations qui réagissent les comportements physiques de la machine. Cette méthode est très utile au niveau de la modélisation de machines électriques triphasées.

Troisièmement, nous avons retrouvé que pour simuler les différentes conditions de travail dans un cas réel, il est nécessaire d'introduire les différents types de service. Le moteur asynchrone est très utilisé dans notre vie quotidienne. Selon l'environnement où la machine est implantée, nous pouvons choisir un type de service continu qui simule le plus proche au cas.

En ce qui concerne de déroulement de notre projet, il a été à la fois enrichissant au niveau des méthodes de travail acquises, mais aussi sur l'apprentissage de logiciels ainsi que la compréhension des principes mis en jeu. Lors de l'étude du moteur asynchrone à rotor bobiné nous avons ainsi acquis de nouvelles connaissances scientifiques telles que les méthodes d'identification des paramètres d'un modèle et leur implémentation en logiciel Matlab ainsi que la simulation.

Nous avons fait la modélisation par le modèle vecteur espace et la simulation par la programmation Nous pouvons utiliser Matlab/Simulink par les blocs de Simulink et la modélisation par plusieurs méthode tel que la Modélisation par éléments finis.....

Bibliographie

Bibliographie

- [01] Babak V. Contribution à l'étude des machines électriques en présence de défaut entre-spires modélisation –réduction du courant de défaut. Thèse de doctorat. L'institut national polytechnique de lorraine 3 décembre 2009.
- [02] Rezguisa L. Commande de machine électrique en environnement Matlab/Simulink et temps réel. Mémoire de magister en électrotechnique. Université mentouri de Constantine. 2009.
- [03] Djouadi A. khetal. I .Commande d'une machine asynchrone alimentée par un convertisseur matriciel indirect. Mémoire de master en électrotechnique Université Abderrahmane Mira de Bejaia. 2015.
- [04] Feroura H .Commande de fréquence constante des machines asynchrones. Mémoire de master d'électrotechnique. Université Ferhat Abbas Sétif. 26/06/2013.
- [05] Cours Modélisation de l'ensemble MAS -convertisseur statique. Université de Biskra. 2012.
- [06] Djidjekh I. Etude comparative des différents types de bobinage d'un moteur asynchrone triphasé à cage. Mémoire de master. Université Mohamed khider de Biskra. samedi 23 juin 2018.
- [07] Alia.S .Guedda.S .Commande vectorielle d'une machine à induction. Mémoire de master. Université el oued. Mai 2018.
- [08] Guy.S Eddie S. « modélisation et commande des moteurs triphasés » ellipses Edition marketing S.A. 2000.
- [09] Belatel M. étude des machines électriques par CAO .Thèse doctorat en électrotechnique. Université mentouri Constantine.
- [10] Toufouti. R .Contribution à la commande directe du couple de la machine asynchrone. Thèse de doctorat en sciences en électrotechnique. Université mentouri Constantine. 02/06/2008.
- [11] Benmiloud. T .Commande du moteur asynchrone avec Compensation des effets des variations paramétriques. Thèse de doctorat en électrotechnique. Université d'Oran. 13 décembre 2012
- [12] Benaissa M. Minimisation des pulsations du couple dans une commande directe du couple (dte) d'une machine asynchrone. Mémoire de magister en électrotechnique. Université de Batna.
- [13] .Baghli.I .Modélisation et commande de la machine asynchrone. [En ligne] iufm de lorraine-uhp. cours.p22. 2005.

Bibliographie

[14] Belgacem, B .Identification des paramètres d'un moteur asynchrone à cage," ed: université Mohamed khider Biskra, 2013.

[15] Chergui, R. Identification des paramètres d'une machine asynchrone triphasée. Université de Batna, 2015.

ANNEXE

Annexe A : Paramètres de Machine testée

Machine asynchrone à rotor bobiné

Paramètres électriques et mécaniques du Machine asynchrone à rotor bobiné :
Plaque signalétique :

1.5KW; 230/400V - 50Hz; 6.4/3.7A; 1340tr/min; $\cos\varphi = 0.8$

Algorithme 1 : calcul du coefficient de perte supplémentaire en charge ;

1- Faire entrer les paramètres identifiés de la machine

Résistance du rotor

Résistance du stator

L'inductance du stator

L'inductance du rotor

Mutuelle

Courant de stator

2-introduction les paramètres :

Puissance utile=1500

le rendement de la machine n=0.75

Calculer les Pertes totales $= (\frac{1}{n} - 1) \times \text{puissance utile}$

Calculer le glissement $g = (1500 - 1462) / 1500$;

L'impédance rotorique $Z_r = \sqrt{(\frac{R_r}{g})^2 + X_{rp}^2}$

$$X = \frac{R_r}{(g \times Z_r^2) + \frac{1}{R_u}}$$

calcul de l'admittance $Y_{ur} = \sqrt{X^2 + (\frac{X_{rp}}{Z_r^2} + \frac{1}{X_u^2})}$

Courant statorique initial

Courant rotorique = $I_s/Z_r/Y_{ur}$;

Calculer les pertes de la machine

Perte joule en rotor = $3 \times I_r^2 \times R_r$

Perte joule statorique = $3 \times I_s^2 \times R_s$

Perte fer = 57.430;

Perte mécanique = 9.2

Perte supplémentaire = Perte totale – perte joule statorique – perte joule rotorique – perte fer – perte mécanique

3-calculer le coefficient de la perte supplémentaire en charge ;

$$a = P_{11} / I_s^2 - I_{s0}^2$$

Algorithme 2 : Dans l'essai à vide

1- Faire entrer les paramètres identifiés de la machine

2- Période de simulation **temps maximaux = 0.8 s**

Choix du pas d'approximation dans notre, période est de **20ms**, on a besoins minimum **10** points dans une période pour tracer la courbe

Pour avoir une forme plus proche du sinus, nous avons choisi un pas de **40us**

3-Introduire les paramètres :

Tension de stator maximaux = $220\sqrt{2}$

La fréquence **f=50**

Le nombre de paires **P=2**

Inertie de la machine **J=0.0033**

Perte mécanique = 9.2;

ANNEXE

Pas de charge $\mathbf{K=0}$ (essai à vide)

Couple résistive **Couple résistive =Perte mécanique / $(2 \times \pi \times F)$** ;

3- Calculer les paramètres utilisés dans le modèle du vecteur

Mutuelle stator rotor = $M/1.5$; matrice des inductances $\mathbf{L} = [\mathbf{L}_s \ \mathbf{M}; \mathbf{M} \ \mathbf{L}_r]$

4- Initialisation des variables à simuler des vecteurs dans le modèle le vecteur espace

5- calculer le vecteur de courant par la méthode d'itération

$$\mathbf{R} = [\mathbf{R}_s, \mathbf{0}; -\mathbf{1j} \times \omega \times \mathbf{M}, \mathbf{R}_r - \mathbf{1j} \times \omega \times \mathbf{L}_r];$$

$$d\mathbf{I} = \text{inv}(\mathbf{L}) \times ([\mathbf{V}_1(i); \mathbf{0}] - \mathbf{R} \times \mathbf{I}) \times dt;$$

Si t est inférieur tmax alors

Incrémenter le courant

le courant = courant+ di

$$\mathbf{I}_t = [\mathbf{I}_t \ \mathbf{I}];$$

6- Calcul du couple électromagnétique

$$\mathbf{C} = \mathbf{p} \times \mathbf{M} \times (\text{isq} \times \mathbf{i}_{rd} - \text{isd} \times \mathbf{i}_{rq}) \text{ avec } \mathbf{M} = \text{msr} \times 3/2$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{p} \times \mathbf{M} \times (\text{imag}(\mathbf{I}_t(1, i)) \times \text{real}(\mathbf{I}_t(2, i)) - \text{imag}(\mathbf{I}_t(2, i)) \times \text{real}(\mathbf{I}_t(1, i)));$$

$$\mathbf{C}_{\text{vect}} = [\text{Couple vecter} \ \text{Couple}];$$

7- Calculer la vitesse au rotor

$$\text{Couple de charge} = \mathbf{K} \times \omega_e;$$

$$d\omega_e = (\mathbf{C} - \mathbf{C}_{\text{ch}} - \mathbf{C}_{\text{res}}) dt / \mathbf{J};$$

$$\omega_e = \omega_e + d\omega_e;$$

$$\mathbf{W}_{\text{vect}} = [\mathbf{W}_{\text{vect}} \ \omega_e];$$

Incrémenter le temps

$$\text{Le temps} = \text{temps} + dt$$

fin

8-Tracer les courbes

-des trois tensions

-des courants statoriques et rotoriques

-du couple électromagnétique en régime transitoire et permanent

-de la vitesse mécanique

Algorithme 3 :Dans l'essai en charge

Dans ce cas de charge $K=0.0015$ si le pas de charge.