

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : **Machines électriques**

Présenté par

Saliha BENOUARAB
Lynda HABCHI

Thème

Modélisation, identification et simulation d'une machine asynchrone à double stator

Mémoire soutenu publiquement le 08/07/2018 devant le jury composé de :

M^{me} MEGHERBI- BITAM Ferroudja

Professeur, UMMTO, Présidente

M HADDAD Salah

Professeur, UMMTO, Encadreur

M^{elle} KACHENOURA Rahma

MCB, UMMTO, Examinatrice

M SI BRAHIM Madjid

MCB, UMMTO, Examineur

Remerciements

Nous remercions Dieu pour le courage, la patience et la santé qui nous ont été utiles tout au long de notre parcours.

Nous tenons à adresser nos vifs remerciements à Mr. HADDAD Salah, professeur au département d'électrotechnique, qui nous a proposé ce sujet, nous a orientées le long de la réalisation de ce mémoire, nous à prodigué les précieux conseils, qu'il trouve ici l'expression de notre profonde gratitude.

Nous tenons à remercier vivement M^{me} LOUNIS Fatma, Mr Si BRAHIM Madjid et ROUAS Rabah pour leurs entière disponibilité, leurs aides et leurs précieux conseils.

Nous tenons également à remercier le personnel d'unité moteurs de l'Entreprise Nationale des Industries Electrotechniques (ELECTRO-INDUSTRIES), en l'occurrence, Mr B.IGUER Directeur d'unité moteurs, M^{lle} N.KICHOU assistante qualité et M^{me} N.HACHICHE chargée des études, notamment pour leur disponibilité et leur contribution à la conception et la réalisation de la Machine asynchrone à double stator, qui a fait l'objet de notre étude.

Notre sincère gratitude va aussi aux membres du jury qui ont bien accepté de juger ce présent travail.

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants du département d'électrotechnique qui ont contribué à notre formation.

Enfin, que toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, trouve ici l'expression de nos sincères remerciements.

Dédicace

C'est avec un grand honneur que je dédie ce mémoire

- *À mes chers parents, à qui je dois tout.*
- *À mes chères petites sœurs Aldjia et Koukou.*
- *À mes grandes sœurs ainsi que leurs enfants.*
- *À ma collègue et ma trésor copine Lynda.*
- *À tous mes amis (es) en particulier Samir.*
- *À tous les étudiants de l'électrotechnique.*
- *À toute ma famille.*

Salîha

Dédicace

C'est avec un grand honneur que je dédie ce mémoire

- *À ma très chère mère à qui je dois tout.*
- *À mes deux tantes Aziza et Mazhoura.*
- *À mes deux grands parents Fatima et Mouhend-Oussaid*
- *À ma collègue et ma très chère amie Salîha*
- *À mon frère et mon ami Gaya.*
- *À tous mes amis (es).*
- *À tous les étudiants de l'électrotechnique.*

Lynda

Liste des figures

Figure I.1 : Disposition des enroulements d'une machine asynchrone à un stator et à double stator.....	4
Figure I.2 : Schéma électrique des enroulements d'une machine asynchrone à double stator.....	4
Figure I.3 : Génératrice asynchrone à double stator auto-excitée	6
Figure I.4 : Génératrice asynchrone à cage reliée directement au réseau	6
Figure I.5 : Génératrice asynchrone auto-excitée par banc de condensateurs.....	7
Figure I.6 : Génératrice asynchrone à double alimentation.....	8
Figure I.7 : Cascade de GADAs.....	9
Figure I.8 : Génératrice asynchrone à double stator.....	10
Figure II .1 : Machine asynchrone à double stator, représentation dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation	11
Figure II.2 : Modèle de la MASDS sur Matlab-Simulink.....	24
Figure III.1 : Schéma équivalent ramené au stator.....	25
Figure III.2 : Schéma de mesure de la résistance statorique en courant continu	26
Figure III.3 : Schéma équivalent à rotor bloqué.....	27
Figure III.4 : Schéma équivalent approché à vide.....	29
Figure III.5 : Caractéristique de la somme des pertes fer et mécanique en fonction de V_0^2	30
Figure III.6 : Courbe de ralentissement de la MASDS	31
Figure IV.1 : Photographie du dispositif expérimental (essai en pleine tension)	36
Figure IV.2.1 : Courant expérimental de la MASDS pour une tension de 50V.....	36
Figure IV.2.2 : Vitesse expérimentale de la MASDS pour une tension de 50V	36
Figure IV.3.1 : Courant expérimental de la MASDS pour une tension de 80V.....	37
Figure IV.3.2 : Vitesse expérimentale de la MASDS pour une tension de 80V	37
Figure IV.4.1 : Courant expérimental de la MASDS pour une tension de 120V.....	37
Figure IV.4.2 : Vitesse expérimentale de la MASDS pour une tension de 120V.....	37
Figure IV.5 : Résultats expérimentaux et de simulation de la vitesse et du courant pour une tension de 50V	39

Figure IV.6 : Résultats expérimentaux et de simulation de la vitesse et du courant pour une tension de 80V.....	41
Figure IV.7 : Résultats expérimentaux et de simulation de la vitesse et du courant pour une tension de 120V.....	43

Table des tableaux

Tableau III.1 Résultat de mesure de la résistance statorique	26
Tableau III.2 Résultat de l'essai à rotor bloqué	26
Tableau III.3 Résultat de l'essai à vide.....	28
Tableau III.4 Résultats de l'identification des paramètres de la MASDS	33

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Description et domaines d'utilisation de la machine asynchrone à double stator

I.1 Introduction	3
I.2 Description	3
I.3 Domaines d'utilisation	5
I.3.1 Fonctionnement en moteur	5
I.3.2 Fonctionnement en générateur	5
I.3.2.1 Génératrices asynchrones à double stator auto-excitées	5
I.3.2.2 Génératrices asynchrones à double alimentation sans balais	6
I.4 conclusion.....	10

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone à double stator

II.1 Introduction.....	11
II.2 Description.....	11
II.3 Equations électriques dans les axes a,b,c.....	12
II.4 Equations magnétiques dans les axes a,b,c.....	12
II.5 Transformation de Park	14
II.6 Equations magnétiques dans les axes d et q	15

II.7 Equations électriques dans les axes d et q	17
II.7.1 Equations électriques au stator S_1	17
II.7.2 Equations électriques au stator S_2	18
II.7.3 Equations électriques au rotor	18
II.8 Expression de la puissance dans les axes d et q	19
II.9 Expression du couple électromagnétique dans les axes d et q	20
II.10. Modèle de Parke du moteur asynchrone à double stator (Dual Stator Induction Motor DSIM).....	20
II.11. Conclusion	24

Chapitre III : Identification des paramètres de la machine asynchrone à double stator

III.1 Introduction	25
III.2 Schéma équivalent.....	25
III.3 Identification des paramètres électriques	26
III.3.1 Mesure de la résistance R_s	26
III.3.2 L'essai à rotor bloqué.....	26
a) Calcul de R'_r	27
b) Calcul de L_s et L_r	27
III.3.3 Essai à vide 28	
a) Détermination des pertes fer et mécaniques.....	29
b) Détermination de R_m et L_m	30

III.4 Identification des paramètres mécanique	31
III.4.1 L'essai de ralentissement	31
a) Méthode 1	32
b) Méthode 2	32
III.5 Conclusion.....	34

Chapitre IV : Exploitation du modèle et validation expérimentale

IV.1 Introduction	35
IV.2 Description du procédé expérimental.....	35
IV.3 Présentation des résultats expérimentaux.....	36
IV.3.1 Essai pour une tension de 50V	36
IV.3.2 Essai pour une tension de 80V	37
IV.3.3 Essai pour une tension de 120V	37
IV.4 Comparaison des résultats	38
IV.4.1 Résultats de l'essai en pleine tension pour 50V	38
IV.4.2 Résultats de l'essai en pleine tension pour 80V	40
IV.4.3 Résultats de l'essai en pleine tension pour 120V	41
IV.5 Conclusion.....	44

Conclusion générale.....	45
--------------------------	----

Bibliographie

Annexes

Introduction générale

Après la révolution de l'industrie à partir de 1800, des inventions ont pu voir le jour. Les machines électriques à leurs tours ont connu d'importantes améliorations et la première machine à être utilisée a été la machine à courant continu. Cette machine a été réalisée en génératrice par la collaboration entre André-Marie Ampère et le constructeur français Hyppolyte Pixi en 1832 [1].

En 1836, l'Anglais Hyde Clarke réalise une machine dont la structure est inversée par rapport à celle de Pixi et Ampère qui améliorait le commutateur redresseur [1]. Après cette date, plusieurs inventions et améliorations ont été faites jusqu'à 1888. Nikola Tesla inventa la première machine à courant alternatif qui sera la base de l'invention de la machine asynchrone triphasée en 1889 par l'Allemand Michael Dolivo-Dobrowolski [2].

La machine asynchrone triphasée a été principalement utilisée dans tous les domaines de l'industrie après qu'elle a remplacé la machine à courant continu grâce à sa robustesse, son bon rendement et son coût faible lors de sa conception.

Le problème de déséquilibre que subissent les machines asynchrones triphasées lorsqu'une phase est soumise à une rupture ou un défaut, poussa les ingénieurs à réaliser d'autres types de machines à plusieurs phases afin que ces dernières poursuivent leurs fonctionnements malgré l'existence d'un défaut. Le principe des machines multiphasées donna naissance à la machine asynchrone à double stator qui a été conçue dans le but d'avoir une puissance supérieure à celle des machines asynchrones simples. L'idée est de disposer de deux stators pour une machine au lieu d'un seul, l'un est conçu pour la commande et l'autre pour récupérer de la puissance. Cette machine peut donc être utilisée comme génératrice, par exemple dans la production de l'énergie éolienne.

De plus, la machine asynchrone à double stator représente un avantage majeur puisqu'elle peut réduire les ondulations du couple et éliminer certains harmoniques du courant, ce qui améliore les performances de cette dernière et garantit une bonne fiabilité [3]. C'est cette machine qui fera l'objet de notre étude.

Le travail que nous allons présenter consiste à modéliser, identifier et simuler une machine asynchrone à double stator. Nous séparons ce travail en quatre chapitres.

Nous allons présenter dans le premier chapitre les différents domaines d'utilisation de cette machine après avoir décrit sa constitution physique, qui nous permettra d'aboutir au schéma électrique équivalent.

Le second chapitre sera consacré à la modélisation de la machine asynchrone à double stator.

Par la suite, le troisième chapitre se focalisera sur l'identification des paramètres de la MASDS par la méthode classique. En outre, nous allons utiliser ces derniers pour faire fonctionner le programme que nous avons établi.

En fin, nous allons comparer les résultats de simulation avec ceux expérimentaux dans un dernier chapitre, et finir notre travail par une conclusion générale et des perspectives.

I.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons décrire la constitution physique de la machine asynchrone à double stator, pour aboutir à son schéma électrique représentant la disposition géométrique des enroulements. Ceci nous permettra d'entamer dans le chapitre suivant sa modélisation. Nous allons également présenter dans ce chapitre, les principaux domaines d'utilisation de la machine asynchrone à double stator, en se focalisant essentiellement à son fonctionnement en tant que génératrice entraînée par une turbine éolienne.

I.2 Description

L'appellation machine asynchrone à double stator (en anglais : twin stator induction machine) est dû au fait que le stator contient un double enroulement triphasé. On l'appelle également machine asynchrone à double étoile quand les deux enroulements triphasés sont connectés chacun en étoile.

Le rotor est par contre à cage d'écureuil identiquement à la machine asynchrone à un seul stator.

Du point de vue bobinage, les deux enroulements triphasés au stator peuvent être décalés d'un angle γ . Cet angle de décalage entre les deux stators prend communément les valeurs suivant : 0° , 30° ou 60° . La valeur 60° est particulière puisqu'elle permet d'obtenir une machine à double usage : machine à double stator et machine hexaphasée (à six phases).

Les deux enroulements triphasés au stator peuvent être identiques, du point de vue de la puissance, comme ils peuvent être de puissances différentes. C'est l'usage que l'on veut en faire qui décidera. Si par exemple, on désire utiliser cette machine comme moteur hexaphasé, on doit alors construire les deux stators de façon identique. Si par contre, on désire l'utiliser comme génératrice asynchrone, pour la conversion de l'énergie éolienne par exemple, on doit alors construire les deux stators de façons différentes. Dans ce cas précis, un stator est dit de commande et l'autre est dit de puissance. Le stator de commande est de plus faible puissance que le stator de puissance (le rapport des deux puissances est généralement de 3).

Le schéma de la figure (I.1) montre la disposition géométrique des enroulements d'une machine asynchrone à un stator et ceux d'une machine asynchrone à double stator. Pour simplifier la schématisation ; dans une machine à 36 encoches, chaque phase occupera 12 encoches (6 d'un côté et 6 du côté diamétralement opposé), quand il s'agit d'un seul stator. Par contre dans une machine à double stator, chaque phase d'un stator occupera 6 encoches si les deux stators sont identiques. Si les deux stators sont différents, alors le stator de grande

puissance occupera plus d'espace que le stator de commande. Généralement, le stator de puissance occupera les deux tiers (soit 8 encoches) et le stator de commande occupera le tiers restant (soit 4 encoches).

Le schéma de la figure I.2 montre le schéma électrique équivalent de la machine asynchrone à double stator (cas d'un montage étoile). Il s'agit de deux étoiles décalées géométriquement d'un angle γ .

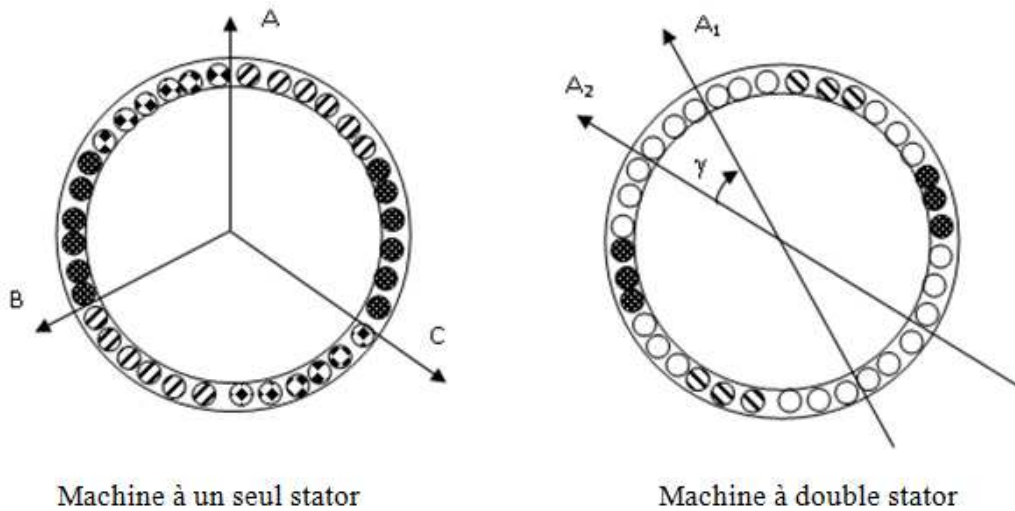


Figure I.1 Disposition des enroulements d'une machine asynchrone à un stator et à double stator

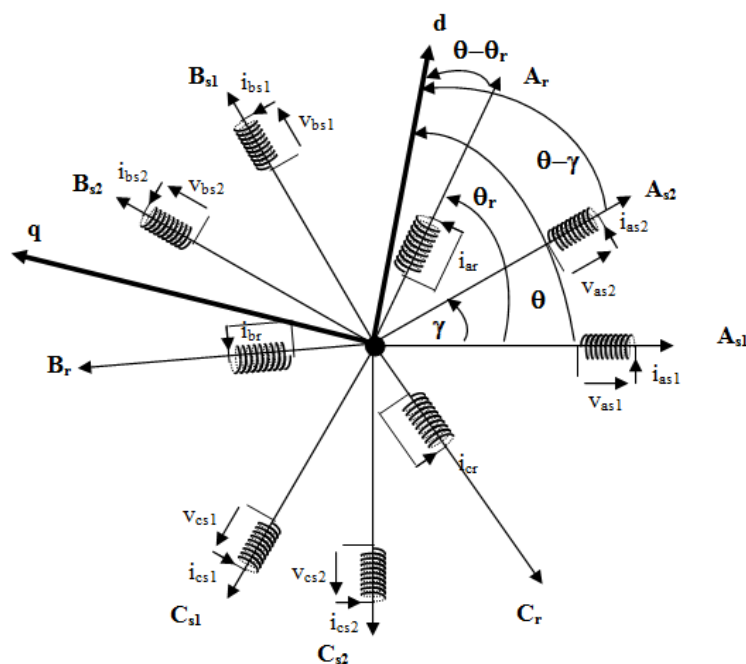


Figure I.2 Schéma électrique des enroulements d'une machine asynchrone à double stator

I.3 Domaines d'utilisation

I.3.1 Fonctionnement en moteur [2]

La machine asynchrone à double stator peut être utilisée comme moteur ou en génératrice. Elle est utilisée en moteur dans le cas des applications de grande puissance. La machine asynchrone est souvent alimentée par un onduleur pour réaliser des stratégies de commande visant à atteindre de hautes performances dynamiques. La machine asynchrone à double stator est justement conçue pour atteindre de fortes puissances avec des onduleurs dimensionnés pour la moitié de la puissance. On appelle ça segmentation de la puissance, c'est-à-dire atteindre une grande puissance avec la concurrence de plusieurs petites puissances.

La machine asynchrone à double stator est également utilisée quand on désire assurer une continuité de fonctionnement. En effet quand un stator est en panne, la machine peut toujours continuer à fonctionner avec un seul stator, avec des performances amoindries.

I.3.2 Fonctionnement en générateur [4]

Le domaine où le fonctionnement en mode génératrice de la machine asynchrone est le plus répandu est celui de l'énergie éolienne. En effet, c'est dans ce domaine que la génératrice asynchrone a connu le plus d'avancées. Les nombreux de travaux rapportés dans la littérature technique témoignent de l'intérêt porté à ce genre de génératrice. Les cas sont tellement variés que nous ne citerons que les applications concernant la génératrice asynchrone à double stator.

I.3.2.1 Génératrices asynchrones à double stator auto-excitées

Elles sont appelées en anglais (TSSEIG : Twin Stator Self Excited Induction Generator). Elles sont entraînées par des turbines éoliennes à vitesse fixe, c'est-à-dire celles qui sont dotées de dispositifs d'orientation des pâles de façon à assurer une vitesse de rotation constante. Elles sont excitées par des bancs de condensateurs assurant la magnétisation de la machine. Il y a des valeurs minimales pour la vitesse de rotation et pour les capacités des condensateurs au-dessous desquelles l'auto-amorçage des génératrices asynchrones ne peut avoir lieu. Une fois amorcée, la génératrice asynchrone à double stator, peut fournir de la puissance à partir des deux stators (Figure I.3).

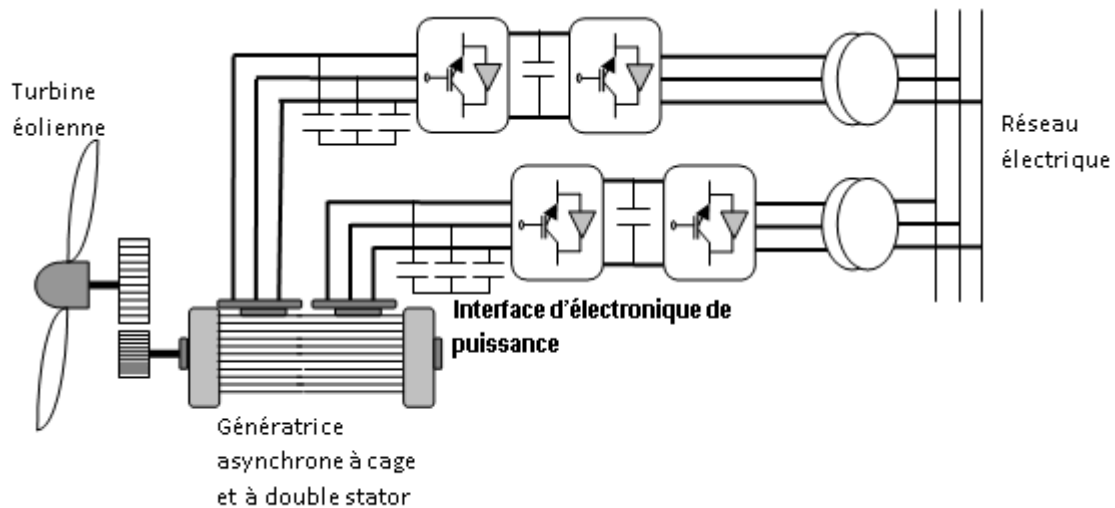


Figure I.3 Génératrice asynchrone à double stator auto-excitée

I.3.2.2 Génératrices asynchrones à double alimentation sans balais

Elles sont appelées en anglais (BLDFIG : Brush Less Double Fed Induction Generator). Cette appellation provient du fait que la machine à double stator est équivalente à une cascade de deux machines asynchrones à double alimentation.

Pour mieux expliquer le principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double stator, il faut remonter l'histoire et citer les différentes évolutions qu'a connues la machine asynchrone en tant que génératrice.

a) Génératrice asynchrone à cage reliée au réseau

Cette génératrice puise son énergie réactive nécessaire à sa magnétisation, du réseau électrique. Par contre cette génératrice doit être entraînée au-delà de la vitesse de synchronisme ($g < 0$) (Figure I.4).

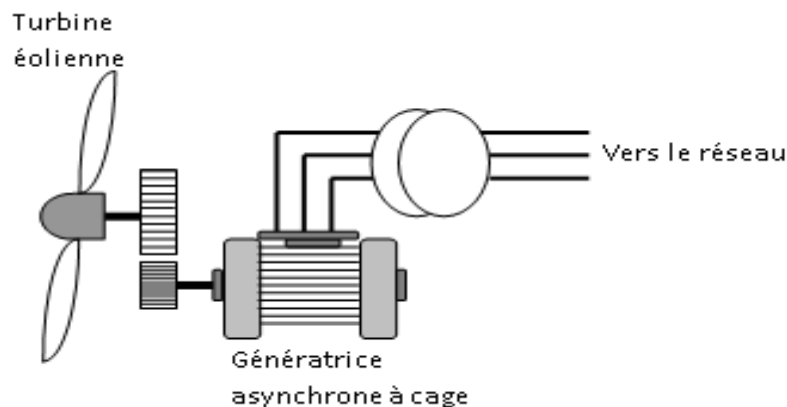


Figure I.4 Génératrice asynchrone à cage reliée directement au réseau

b) Génératrice asynchrone à cage auto-excitée

Elle est appelée en anglais SEIG : Self Excited Induction Generator. Cette génératrice puise son énergie réactive à partir d'un banc de condensateurs. Elle peut débiter sur le réseau électrique comme elle peut fonctionner en mode isolé et autonome [5] [6]. Cette génératrice ne nécessite pas d'être entraînée au delà du synchronisme, elle fixe elle-même sa fréquence de travail et donc sa vitesse de synchronisme. Le problème est que cette fréquence dépend de la vitesse de rotation et également de la charge alimentée. Pour pallier à cet inconvénient, elle est souvent associée à un convertisseur statique (un système redresseur-onduleur relié par un étage à courant continu) (Figure I.5).

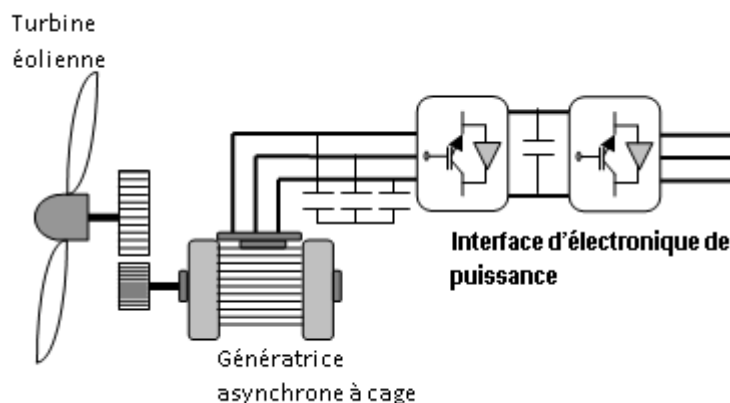


Figure I.5 Génératrice asynchrone auto-excitée par banc de condensateurs

c) Génératrice asynchrone à double alimentation GADA [7]

Elle est appelée en anglais DFIG : Double Fed Induction Generator. Cette génératrice est à rotor bobiné, elle est souvent utilisée dans les applications de fortes puissances. Elle est également appelée génératrice à excitation alternative. En effet, son rotor est alimenté via le système balais-bagues par un système de tensions triphasé équilibré, assuré par un système redresseur-onduleur. Ce système de tension triphasé crée un champ tournant rotorique à la fréquence imposée par l'onduleur. De plus, le rotor tourne, entraînée par une turbine éolienne ou autre. La fréquence des tensions induites au stator est donc la somme de la fréquence de l'onduleur et la fréquence de rotation mécanique du rotor. L'idée est justement d'asservir la fréquence d'alimentation des phases rotoriques à la vitesse de rotation du rotor. Si le rotor accélère on diminue la fréquence d'alimentation et s'il ralentit on l'augmente et ceci de façon à garder toujours la fréquence des tensions statoriques constante et égale à 50Hz (Figure I.6).

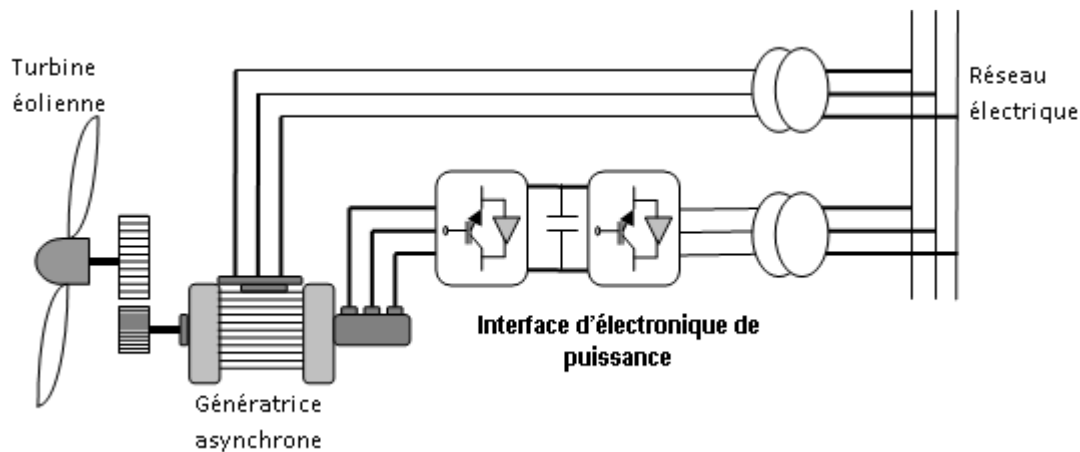


Figure I.6 Génératrice asynchrone à double alimentation

Ce système a un grand avantage, le convertisseur côté rotor est dimensionné au tiers de la puissance que peut fournir la génératrice par son stator, car on tolère dans ce genre d'application un glissement d'au plus égal à un tiers.

Ce système présente malheureusement un gros inconvénient, c'est le système balais-bagues qui limite la puissance d'utilisation et impose un entretien régulier. C'est ainsi qu'est née l'idée d'une cascade de deux machines asynchrones à double alimentation.

d) Cascade de deux génératrices asynchrones à double alimentation

Pour pallier à l'inconvénient de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA), l'idée trouvée est de relier en cascade deux GADAs (en anglais Cascaded Double Fed Induction Generator). En effet, en reliant mécaniquement et électriquement les deux rotors de deux machines asynchrones à rotors bobinés, on peut supprimer le système balais-bagues et réaliser une GADA sans balais [8] [9]. Nous disposons maintenant de deux machines entraînées à la même vitesse, ayant deux stators distincts et deux rotors reliés électriquement et mécaniquement. Tout se passe comme s'il n'y avait qu'un seul rotor. A présent, un stator sert de commande et un stator sert de puissance. Les deux stators peuvent être de puissances différentes et ayant des nombres de paires de pôles différents. La figure (I.7) montre une structure d'une cascade de GADAs.

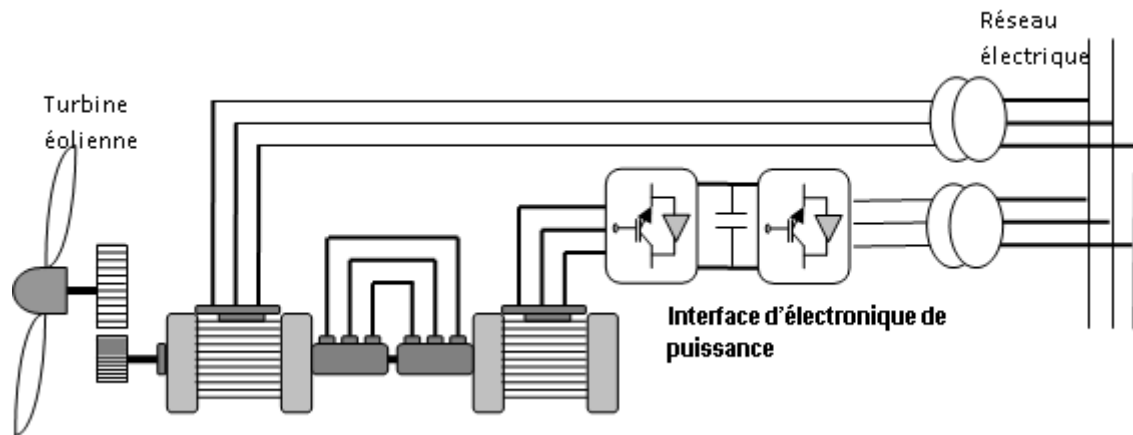


Figure I.7 Cascade de GADAs

L'inconvénient de cette machine est son poids et son encombrement, ce qui pose un sérieux problème pour son utilisation comme éolienne. Cet inconvénient a conduit à la dernière trouvaille à l'heure actuelle, en ce qui concerne la génératrice asynchrone de forte puissance : c'est la génératrice asynchrone à double stator.

e) **Génératrice asynchrone à double stator**

Cette machine regroupe tous les avantages de la cascade de MADA, sans en présenter son inconvénient. Cette machine a en effet un seul rotor et deux stators. Il s'agit au fait d'un seul stator physique, dans lequel sont logés deux systèmes d'enroulements triphasés. On parle ainsi, par abus de langage, de deux stators.

Ce genre de génératrice peut fonctionner en auto-excitée, on parlera alors de génératrice asynchrone doublement auto-excitée (figure I.8). Elle peut également fonctionner en génératrice à double alimentation. Dans ce cas, un stator sert de commande et un autre sert de puissance. On l'appelle alors en anglais: Twin Stator Induction Generator, Double Star Induction Generator ou Brush Less Double Fed Induction Generator.

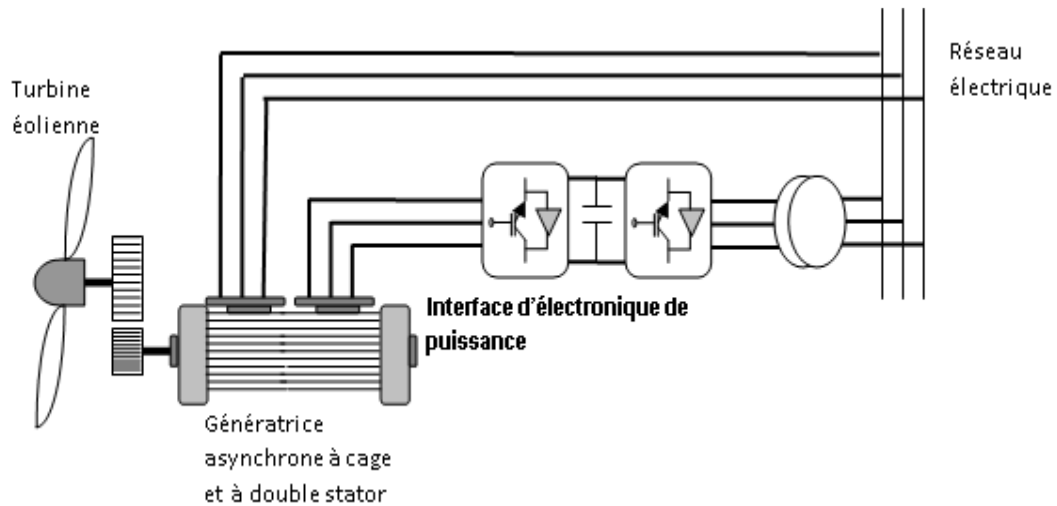


Figure I.8 Génératrice asynchrone à double stator

I.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit la machine asynchrone à double stator du point de vue de la construction et nous avons dressé une liste de ses domaines d'application. Nous avons mis l'accent sur son utilisation dans la conversion de l'énergie éolienne. Pour mieux expliquer le fonctionnement de cette machine, nous avons préféré tracer son évolution chronologique.

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons décrire le modèle de la machine asynchrone à double stator. Nous commençons par donner la description de la machine à savoir les différents enroulements et leurs dispositions dans l'espace. Nous poserons ensuite les hypothèses simplificatrices qui se résument en une liste de phénomènes que nous ne prendront pas en compte. Nous définirons les différents angles qui interviennent dans les équations pour établir les équations magnétique, électrique et mécanique dans le système d'axes naturels a,b,c. Nous développerons enfin ces dernières équations dans le repère de Park qui va nous permettre de construire le programme Matlab-Simulink de la machine asynchrone à double stator.

II.2 Description

Les armatures du stator et du rotor sont toutes deux cylindriques (entrefer constant).

Le stator porte deux enroulements triphasés (deux étoiles) décalés entre eux d'un angle γ .

Les enroulements statoriques et rotoriques sont représentés aux droites de leurs axes magnétiques.

La machine est représentée dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation (figure II.1)

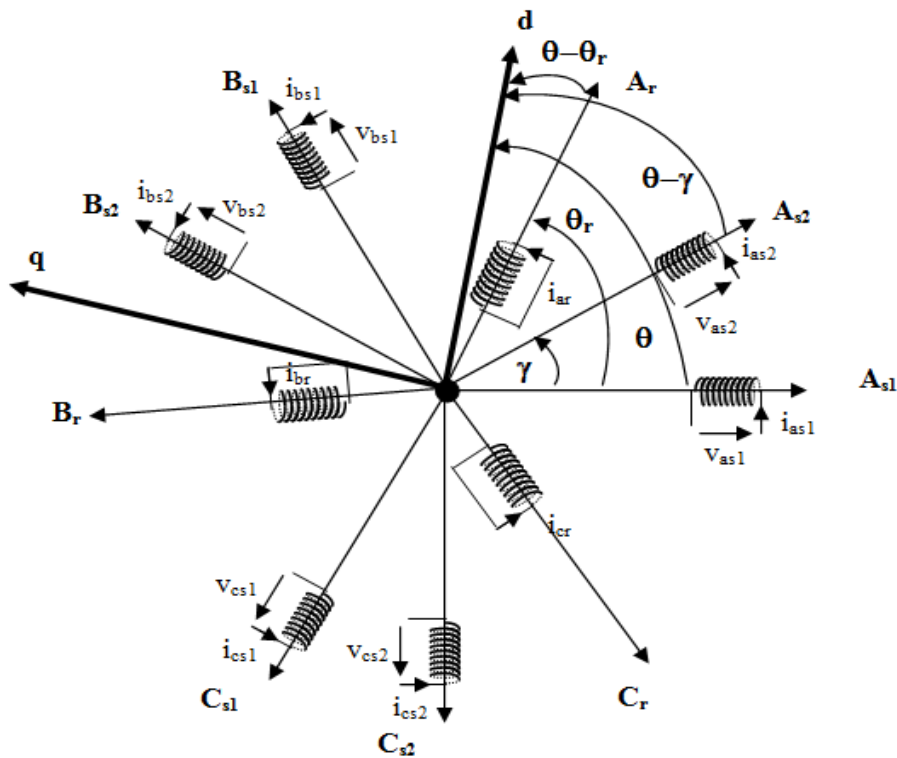


Figure II.1 Machine asynchrone à double stator, représentation dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation

Définition des angles

$$(oA_{s1}, oA_{s2}) = \gamma \quad ; \quad (oA_{s1}, oA_r) = \theta_r \quad ; \quad (oA_{s2}, oA_r) = \theta_r - \gamma \quad (\text{II-1})$$

Angles de Park

$$(oA_{s1}, od) = \theta \quad ; \quad (oA_{s2}, od) = \theta - \gamma \quad ; \quad (oA_r, od) = \theta - \theta_r \quad (\text{II-2})$$

II.3 Equations électriques dans les axes a,b,c

$$\begin{aligned} (v_{s1}) &= \frac{d(\varphi_{s1})}{dt} + [R_{s1}] \cdot (i_{s1}) \quad (v_{s1}) = (v_{as1}, v_{bs1}, v_{cs1}) \quad (i_{s1}) = (i_{as1}, i_{bs1}, i_{cs1}) \quad (\varphi_{s1}) = (\varphi_{as1}, \varphi_{bs1}, \varphi_{cs1}) \\ (v_{s2}) &= \frac{d(\varphi_{s2})}{dt} + [R_{s2}] \cdot (i_{s2}) \quad (v_{s2}) = (v_{as2}, v_{bs2}, v_{cs2}) \quad (i_{s2}) = (i_{as2}, i_{bs2}, i_{cs2}) \quad (\varphi_{s2}) = (\varphi_{as2}, \varphi_{bs2}, \varphi_{cs2}) \quad (\text{II-3}) \\ (v_r) &= 0 = \frac{d(\varphi_r)}{dt} + [R_r] \cdot (i_r) \quad (v_r) = (0, 0, 0) \quad (i_r) = (i_{ar}, i_{br}, i_{cr}) \quad (\varphi_r) = (\varphi_{ar}, \varphi_{br}, \varphi_{cr}) \end{aligned}$$

Avec :

$$[R_{s1}] = r_{s1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [R_{s2}] = r_{s2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [R_r] = r_r \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

R_{s1}, R_{s2}, R_r : Les résistances des stators et du rotor

II.4 Equations magnétiques dans les axes a,b,c

$$\begin{aligned} (\varphi_{s1}) &= [L_{ss1}] \cdot (i_{s1}) + [L_{s1s2}] \cdot (i_{s2}) + [L_{s1r}] \cdot (i_r) \\ (\varphi_{s2}) &= [L_{s2s1}] \cdot (i_{s1}) + [L_{ss2}] \cdot (i_{s2}) + [L_{s2r}] \cdot (i_r) \\ (\varphi_r) &= [L_{rs1}] \cdot (i_{s1}) + [L_{rs2}] \cdot (i_{s2}) + [L_{rr}] \cdot (i_r) \end{aligned} \quad (\text{II-4})$$

Avec : $[L_{s1s1}]$: Matrice inductances propres et mutuelles du stator S1 seul

$[L_{s2s2}]$: Matrice inductances propres et mutuelles du stator S2 seul

$$[L_{s1s1}] = [L_{s2s2}] = \begin{bmatrix} L_{as} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{as} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{as} + L_{ms} \end{bmatrix} = (L_{as} + L_{ms}) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \frac{1}{2}L_{ms} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$[L_{s1s2}] = [L_{s2s1}]^t$: Matrice inductances mutuelles entre les deux stators S1 et S2 :

$$[L_{s1s2}] = [L_{s2s1}]^t = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos \gamma & \cos(\gamma - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3}) & \cos \gamma & \cos(\gamma - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\gamma - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3}) & \cos \gamma \end{bmatrix}$$

$[L_{s1r}] = [L_{rs1}]^t$ Matrice inductances mutuelles entre le stator S1 et le rotor :

$$[L_{s1r}] = [L_{rs1}]^t = L_{msr} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r & \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r \end{bmatrix}$$

$[L_{s2r}] = [L_{rs2}]^t$: Matrice inductances mutuelles entre le stator S2 et le rotor :

$$[L_{s2r}] = [L_{rs2}]^t = L_{msr} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_r - \gamma) & \cos(\theta_r - \gamma - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \gamma - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \gamma - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \gamma) & \cos(\theta_r - \gamma - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \gamma - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \gamma - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \gamma) \end{bmatrix}$$

$[L_{rr}]$: Matrice inductances propres et mutuelles du rotor seul

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_{ar} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{ar} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{ar} + L_{mr} \end{bmatrix} = (L_{ar} + L_{mr}) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \frac{1}{2}L_{mr} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Avec :

L_{as} : Inductance propre d'une phase statorique

L_{ar} : Inductance propre d'une phase rotorique

L_{ms} : Inductance mutuelle maximale entre deux phases statoriques

L_{mr} : Inductance mutuelle maximale entre deux phases rotoriques

L_{msr} : Inductance mutuelle maximale entre une phase statorique et une autre rotorique

NB : Nous considérons que les deux stators sont identiques

II.5 Transformation de Park

Elle consiste à appliquer aux courants, tensions et flux, un changement de variables faisant intervenir l'angle entre les axes des phases et les axes d et q.

Dans la matrice de Park, c'est l'angle θ_{s1} qui intervient pour stator 1, θ_{s2} pour le stator 2 et θ_r pour les grandeurs rotoriques.

On définit donc les matrices de Park et matrices inverses suivantes :

$$P(\theta_{s1}) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}; P(\theta_{s1})^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II-5})$$

$$P(\theta_{s2}) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \gamma) & \cos(\theta - \gamma - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \gamma - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta - \gamma) & -\sin(\theta - \gamma - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \gamma - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}; P(\theta_{s2})^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \gamma) & -\sin(\theta - \gamma) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \gamma - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \gamma - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \gamma - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \gamma - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II-6})$$

$$P(\theta_r) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & \cos(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \theta_r - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta - \theta_r) & -\sin(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \theta_r - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}; P(\theta_r)^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & -\sin(\theta - \theta_r) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \theta_r - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \theta_r - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II-7})$$

Tel que :

$P(\theta_{s1})$: Matrice de transformation de Park du premier enroulement statorique.

$P(\theta_{s2})$: Matrice de transformation de Park du deuxième enroulement statorique.

$P(\theta_r)$: Matrice de transformation de Park de l'enroulement rotorique.

La transformation de Park pour les courants des deux stators se présente comme suit :

$$(i_{ps1}) = P(\theta_{s1}) \cdot (i_{s1}) \quad \Rightarrow \quad (i_{s1}) = P(\theta_{s1})^{-1} \cdot (i_{ps1}) \quad (\text{II-8})$$

$$(i_{ps2}) = P(\theta_{s2}) \cdot (i_{s2}) \quad \Rightarrow \quad (i_{s2}) = P(\theta_{s2})^{-1} \cdot (i_{ps2}) \quad (\text{II-9})$$

avec :

$(i_{ps1}) = (i_{ds1} \quad i_{qs1} \quad i_{0s1})^t$ composantes de Park ($d_{s1}, q_{s1}, 0_{s1}$) du courant au stator S_1 .

$(i_{ps2}) = (i_{ds2} \quad i_{qs2} \quad i_{0s2})^t$ composantes de Park ($d_{s2}, q_{s2}, 0_{s2}$) du courant au stator S_2 .

$(i_{s1}) = (i_{as1} \quad i_{bs1} \quad i_{cs1})^t$ composantes a_{s1}, b_{s1}, c_{s1} du courant au stator S_1 .

$(i_{s2}) = (i_{as2} \quad i_{bs2} \quad i_{cs2})^t$ composantes a_{s2}, b_{s2}, c_{s2} du courant au stator S_2 .

Cette transformation est valable aussi pour les tensions et les flux des deux stators.

Pour les grandeurs rotoriques, il suffit de remplacer l'indice « s_1 ou s_2 » par l'indice « r ».

$$(i_{pr}) = P(\theta_r) \cdot (i_r) \quad \Rightarrow \quad (i_r) = P(\theta_r)^{-1} \cdot (i_{pr}) \quad (\text{II-10})$$

Cette même transformation s'applique aussi pour les flux et les tensions du rotor.

II.6 Equations magnétiques dans les axes d et q

Flux du Stator S_1 :

$$(\varphi_{s1}) = [L_{ss1}] \cdot (i_{s1}) + [L_{s1s2}] \cdot (i_{s2}) + [L_{s1r}] \cdot (i_r)$$

$$P(\theta_{s1})^{-1} \cdot (\varphi_{ps1}) = [L_{ss1}] \cdot P(\theta_{s1})^{-1} \cdot (i_{ps1}) + [L_{s1s2}] \cdot P(\theta_{s2})^{-1} \cdot (i_{ps2}) + [L_{s1r}] \cdot P(\theta_r)^{-1} \cdot (i_{pr})$$

On multiplie à gauche par $P(\theta_{s1})$:

$$(\varphi_{ps1}) = P(\theta_{s1}) [L_{ss1}] \cdot P(\theta_{s1})^{-1} \cdot (i_{ps1}) + P(\theta_{s1}) [L_{s1s2}] \cdot P(\theta_{s2})^{-1} \cdot (i_{ps2}) + P(\theta_{s1}) [L_{s1r}] \cdot P(\theta_r)^{-1} \cdot (i_{pr}) \quad (\text{II-11})$$

Flux du Stator S_2 :

$$(\varphi_{s2}) = [L_{s2s1}] \cdot (i_{s1}) + [L_{ss2}] \cdot (i_{s2}) + [L_{s2r}] \cdot (i_r)$$

$$P(\theta_{s2})^{-1} \cdot (\varphi_{ps2}) = [L_{s2s1}] \cdot P(\theta_{s1})^{-1} \cdot (i_{ps1}) + [L_{ss2}] \cdot P(\theta_{s2})^{-1} \cdot (i_{ps2}) + [L_{s2r}] \cdot P(\theta_r)^{-1} \cdot (i_{pr})$$

On multiplie à gauche par $P(\theta_{s2})$:

$$(\varphi_{ps2}) = P(\theta_{s2})[L_{s2s1}] \cdot P(\theta_{s1})^{-1} \cdot (i_{ps1}) + P(\theta_{s2})[L_{ss2}] \cdot P(\theta_{s2})^{-1} \cdot (i_{ps2}) + P(\theta_{s2})[L_{s2r}] \cdot P(\theta_r)^{-1} \cdot (i_{pr}) \quad (\text{II-12})$$

Flux du Rotor :

$$(\varphi_r) = [L_{rs1}] \cdot (i_{s1}) + [L_{rs2}] \cdot (i_{s2}) + [L_{rr}] \cdot (i_r)$$

$$P(\theta_r)^{-1} \cdot (\varphi_{pr}) = [L_{rs1}] \cdot P(\theta_{s1})^{-1} \cdot (i_{ps1}) + [L_{rs2}] \cdot P(\theta_{s2})^{-1} \cdot (i_{ps2}) + [L_{rr}] \cdot P(\theta_r)^{-1} \cdot (i_{pr})$$

On multiplie à gauche par $P(\theta_r)$:

$$(\varphi_{pr}) = P(\theta_r)[L_{rs1}]P(\theta_{s1})^{-1} \cdot (i_{ps1}) + P(\theta_r)[L_{rs2}]P(\theta_{s2})^{-1} \cdot (i_{ps2}) + P(\theta_r)[L_{rr}]P(\theta_r)^{-1} \cdot (i_{pr}) \quad (\text{II-13})$$

Il faut donc effectuer les 9 produits matriciels suivants :

$$P(\theta_{s1})[L_{ss1}] \cdot P(\theta_{s1})^{-1} \quad ; \quad P(\theta_{s1})[L_{s1s2}] \cdot P(\theta_{s2})^{-1} \quad ; \quad P(\theta_{s1})[L_{s1r}] \cdot P(\theta_r)^{-1}$$

$$P(\theta_{s2})[L_{s2s1}] \cdot P(\theta_{s1})^{-1} \quad ; \quad P(\theta_{s2})[L_{ss2}] \cdot P(\theta_{s2})^{-1} \quad ; \quad P(\theta_{s2})[L_{s2r}] \cdot P(\theta_r)^{-1}$$

$$P(\theta_r)[L_{rs1}]P(\theta_{s1})^{-1} \quad ; \quad P(\theta_r)[L_{rs2}]P(\theta_{s2})^{-1} \quad ; \quad P(\theta_r)[L_{rr}]P(\theta_r)^{-1}$$

Ci-dessous sont représentés les résultats des équations magnétiques dans les axes d et q de la machine asynchrone à double stator. Les détails des calculs sont fournis en annexes A.

$$\begin{pmatrix} \varphi_{ds1} \\ \varphi_{qs1} \\ \varphi_{ds2} \\ \varphi_{qs2} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \\ \varphi_{or} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{as} + \frac{3}{2}L_{ms} & 0 & 0 & \frac{3}{2}L_{ms} & 0 & 0 & \frac{3}{2}L_{msr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{as} + \frac{3}{2}L_{ms} & 0 & 0 & \frac{3}{2}L_{ms} & 0 & 0 & \frac{3}{2}L_{msr} & 0 \\ 0 & 0 & L_{as} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{3}{2}L_{ms} & 0 & 0 & L_{as} + \frac{3}{2}L_{ms} & 0 & 0 & \frac{3}{2}L_{msr} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}L_{ms} & 0 & 0 & L_{as} + \frac{3}{2}L_{ms} & 0 & 0 & \frac{3}{2}L_{msr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{as} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{3}{2}L_{msr} & 0 & 0 & \frac{3}{2}L_{msr} & 0 & 0 & L_{ar} + \frac{3}{2}L_{mr} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}L_{msr} & 0 & 0 & \frac{3}{2}L_{msr} & 0 & 0 & L_{ar} + \frac{3}{2}L_{mr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{or} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_{ds1} \\ i_{qs1} \\ i_{ds2} \\ i_{qs2} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_{or} \end{pmatrix} \quad (\text{II-14})$$

On pose :

$$L_{mcs} = \frac{3}{2}L_{ms} \quad ; \quad L_s = L_{as} + \frac{3}{2}L_{ms} \quad ; \quad L_r = L_{ar} + \frac{3}{2}L_{mr} \quad ; \quad L_{mc} = \frac{3}{2}L_{msr}$$

$$L_s = L_{as} + \frac{3}{2}L_{ms} : \text{Inductance propre cyclique statorique}$$

$$L_r = L_{ar} + \frac{3}{2}L_{mr} : \text{Inductance propre cyclique rotorique}$$

$$L_{mcs} = \frac{3}{2}L_{ms} : \text{Inductance mutuelle cyclique statorique}$$

$$L_{mc} = \frac{3}{2}L_{msr} : \text{Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor}$$

$$L_{os}, L_{or} : \text{Inductances homopolaires statorique et rotorique}$$

En ne tenant pas compte des composantes homopolaires des flux, on obtient :

$$\begin{pmatrix} \varphi_{ds1} \\ \varphi_{qs1} \\ \varphi_{ds2} \\ \varphi_{qs2} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_s & 0 & L_{mcs} & 0 & L_{mc} & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_{mcs} & 0 & L_{mc} \\ L_{mcs} & 0 & L_s & 0 & L_{mc} & 0 \\ 0 & L_{mcs} & 0 & L_s & 0 & L_{mc} \\ L_{mc} & 0 & L_{mc} & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_{mc} & 0 & L_{mc} & 0 & L_r \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_{ds1} \\ i_{qs1} \\ i_{ds2} \\ i_{qs2} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{pmatrix} \quad (\text{II-15})$$

Ce système matriciel est décomposable en deux sous systèmes :

$$\begin{pmatrix} \varphi_{ds1} \\ \varphi_{ds2} \\ \varphi_{dr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_s & L_{mcs} & L_{mc} \\ L_{mcs} & L_s & L_{mc} \\ L_{mc} & L_{mc} & L_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{ds1} \\ i_{ds2} \\ i_{dr} \end{pmatrix} \quad (\text{II-16})$$

$$\begin{pmatrix} \varphi_{qs1} \\ \varphi_{qs2} \\ \varphi_{qr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_s & L_{mcs} & L_{mc} \\ L_{mcs} & L_s & L_{mc} \\ L_{mc} & L_{mc} & L_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{qs1} \\ i_{qs2} \\ i_{qr} \end{pmatrix}$$

II.7 Equations électriques dans les axes d et q

II.7.1 Equations électriques au stator S₁

$$(v_{s1}) = \frac{d(\varphi_{s1})}{dt} + [\mathcal{R}_{s1}] \cdot (i_{s1})$$

$$P(\theta_{s1})^{-1} \cdot (v_{ps1}) = \frac{d(P(\theta_{s1})^{-1} \cdot \varphi_{ps1})}{dt} + [\mathcal{R}_{s1}] \cdot P(\theta_{s1})^{-1} \cdot (i_{ps1})$$

$$P(\theta_{s1})^{-1} \cdot (v_{ps1}) = P(\theta_{s1})^{-1} \frac{d\varphi_{ps1}}{dt} + \frac{d(P(\theta_{s1})^{-1})}{d\theta_{s1}} \cdot \frac{d\theta_{s1}}{dt} \cdot \varphi_{ps1} + [\mathcal{R}_{s1}] \cdot P(\theta_{s1})^{-1} \cdot (i_{ps1})$$

On multiplie à gauche par $P(\theta_{s1})$:

$$(v_{ps1}) = \frac{d(\varphi_{ps1})}{dt} + \left\{ p(\theta_{s1}) \cdot \frac{d(p(\theta_{s1})^{-1})}{d\theta_{s1}} \right\} \cdot \frac{d\theta_{s1}}{dt} \cdot \varphi_{ps1} + [\mathcal{R}_{s1}] \cdot (i_{ps1}) \quad (\text{II-17})$$

II.7.2 Equations électriques au stator S₂ :

$$(v_{s2}) = \frac{d(\varphi_{s2})}{dt} + [\mathcal{R}_{s2}] \cdot (i_{s2})$$

$$P(\theta_{s2})^{-1} \cdot (v_{ps2}) = \frac{d(P(\theta_{s2})^{-1} \cdot \varphi_{ps2})}{dt} + [\mathcal{R}_{s2}] \cdot P(\theta_{s2})^{-1} \cdot (i_{ps2})$$

$$P(\theta_{s2})^{-1} \cdot (v_{ps2}) = P(\theta_{s2})^{-1} \frac{d\varphi_{ps2}}{dt} + \frac{d(P(\theta_{s2})^{-1})}{d\theta_{s2}} \cdot \frac{d\theta_{s2}}{dt} \cdot \varphi_{ps2} + [\mathcal{R}_{s2}] \cdot P(\theta_{s2})^{-1} \cdot (i_{ps2})$$

On multiplie à gauche par $P(\theta_{s2})$:

$$(v_{ps2}) = \frac{d(\varphi_{ps2})}{dt} + \left\{ p(\theta_{s2}) \cdot \frac{d(p(\theta_{s2})^{-1})}{d\theta_{s2}} \right\} \cdot \frac{d\theta_{s2}}{dt} \cdot \varphi_{ps2} + [\mathcal{R}_{s2}] \cdot (i_{ps2}) \quad (\text{II-18})$$

II.7.3 Equations électriques au rotor

$$(v_r) = \frac{d(\varphi_r)}{dt} + [\mathcal{R}_r] \cdot (i_r)$$

$$P(\theta_r)^{-1} \cdot (v_{pr}) = \frac{d(P(\theta_r)^{-1} \cdot \varphi_{pr})}{dt} + [\mathcal{R}_r] \cdot P(\theta_r)^{-1} \cdot (i_{pr})$$

$$P(\theta_r)^{-1} \cdot (v_{pr}) = P(\theta_r)^{-1} \frac{d\varphi_{pr}}{dt} + \frac{dP(\theta_r)^{-1}}{d\theta_r} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} \cdot \varphi_{pr} + [\mathcal{R}_r] \cdot P(\theta_r)^{-1} \cdot (i_{pr})$$

On multiplie à gauche par $P(\theta_r)$:

$$(v_{pr}) = \frac{d(\varphi_{pr})}{dt} + \left\{ p(\theta_r) \cdot \frac{d(p(\theta_r)^{-1})}{d\theta_r} \right\} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} \cdot \varphi_{pr} + [\mathcal{R}_r] \cdot (i_{pr}) \quad (\text{II-19})$$

On effectue les produits matriciels (entre accolades) :

$$p(\theta_{s1}) \cdot \frac{d(p(\theta_{s1})^{-1})}{d\theta_{s1}} = p(\theta_{s2}) \cdot \frac{d(p(\theta_{s2})^{-1})}{d\theta_{s2}} = p(\theta_r) \cdot \frac{d(p(\theta_r)^{-1})}{d\theta_r} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Nous obtenons finalement le système d'équations ci-dessous représentant les équations électriques dans les axes fictifs de Park de la machine asynchrone à double stator. Ces équations font abstraction du choix du référentiel de travail.

$$\begin{aligned}
v_{ds1} &= \frac{d\varphi_{ds1}}{dt} - \varphi_{qs1} \cdot \frac{d\theta_{s1}}{dt} + R_{s1} \cdot i_{ds1} & ; & \quad v_{ds2} = \frac{d\varphi_{ds2}}{dt} - \varphi_{qs2} \cdot \frac{d\theta_{s2}}{dt} + R_{s2} \cdot i_{ds2} & ; & \quad v_{dr} = \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \varphi_{qr} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} + R_r \cdot i_{dr} \\
v_{qs1} &= \frac{d\varphi_{qs1}}{dt} + \varphi_{ds1} \cdot \frac{d\theta_{s1}}{dt} + R_{s1} \cdot i_{qs1} & ; & \quad v_{qs2} = \frac{d\varphi_{qs2}}{dt} + \varphi_{ds2} \cdot \frac{d\theta_{s2}}{dt} + R_{s2} \cdot i_{qs2} & ; & \quad v_{qr} = \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \varphi_{dr} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} + R_r \cdot i_{qr} \\
v_{0s1} &= \frac{d\varphi_{0s1}}{dt} + R_{s1} \cdot i_{0s1} & ; & \quad v_{0s2} = \frac{d\varphi_{0s2}}{dt} + R_{s2} \cdot i_{0s2} & ; & \quad v_{0r} = \frac{d\varphi_{0r}}{dt} + R_r \cdot i_{0r}
\end{aligned} \tag{II-20}$$

II.8 Expression de la puissance dans les axes d et q

$$P_e = v_{as1} \cdot i_{as1} + v_{bs1} \cdot i_{bs1} + v_{cs1} \cdot i_{cs1} + v_{as2} \cdot i_{as2} + v_{bs2} \cdot i_{bs2} + v_{cs2} \cdot i_{cs2} + v_{ar} \cdot i_{ar} + v_{br} \cdot i_{br} + v_{cr} \cdot i_{cr}$$

$$P_e = i_{s1}^t \cdot v_{s1} + i_{s2}^t \cdot v_{s2} + i_r^t \cdot v_r$$

$$P_e = (P(\theta_{s1})^{-1} \cdot i_{ps1})^t \cdot P(\theta_{s1})^{-1} \cdot v_{ps1} + (P(\theta_{s2})^{-1} \cdot i_{ps2})^t \cdot P(\theta_{s2})^{-1} \cdot v_{ps2} + (P(\theta_r)^{-1} \cdot i_{pr})^t \cdot P(\theta_r)^{-1} \cdot v_{pr}$$

$$P_e = (i_{ps1})^t (P(\theta_{s1})^{-1})^t \cdot P(\theta_{s1})^{-1} \cdot v_{ps1} + (i_{ps2})^t (P(\theta_{s2})^{-1})^t \cdot P(\theta_{s2})^{-1} \cdot v_{ps2} + (i_{pr})^t (P(\theta_r)^{-1})^t \cdot P(\theta_r)^{-1} \cdot v_{pr}$$

Les produits matriciels suivants donnent :

$$(P(\theta_{s1})^{-1})^t \cdot P(\theta_{s1})^{-1} = (P(\theta_{s2})^{-1})^t \cdot P(\theta_{s2})^{-1} = (P(\theta_r)^{-1})^t \cdot P(\theta_r)^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$P_e = (v_{ds1} \cdot i_{ds1} + v_{qs1} \cdot i_{qs1} + v_{0s1} \cdot i_{0s1} + v_{ds2} \cdot i_{ds2} + v_{qs2} \cdot i_{qs2} + v_{0s2} \cdot i_{0s2} + v_{dr} \cdot i_{dr} + v_{qr} \cdot i_{qr} + v_{0r} \cdot i_{0r})$$

$$\begin{aligned}
P_e &= \left\{ \left(\frac{d\varphi_{ds1}}{dt} - \varphi_{qs1} \cdot \frac{d\theta_{s1}}{dt} + R_{s1} \cdot i_{ds1} \right) \cdot i_{ds1} + \left(\frac{d\varphi_{qs1}}{dt} + \varphi_{ds1} \cdot \frac{d\theta_{s1}}{dt} + R_{s1} \cdot i_{qs1} \right) \cdot i_{qs1} + \left(\frac{d\varphi_{0s1}}{dt} + R_{s1} \cdot i_{0s1} \right) \cdot i_{0s1} \right\} \\
&+ \left\{ \left(\frac{d\varphi_{ds2}}{dt} - \varphi_{qs2} \cdot \frac{d\theta_{s2}}{dt} + R_{s2} \cdot i_{ds2} \right) \cdot i_{ds2} + \left(\frac{d\varphi_{qs2}}{dt} + \varphi_{ds2} \cdot \frac{d\theta_{s2}}{dt} + R_{s2} \cdot i_{qs2} \right) \cdot i_{qs2} + \left(\frac{d\varphi_{0s2}}{dt} + R_{s2} \cdot i_{0s2} \right) \cdot i_{0s2} \right\} \\
&+ \left\{ \left(\frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \varphi_{qr} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} + R_r \cdot i_{dr} \right) \cdot i_{dr} + \left(\frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \varphi_{dr} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} + R_r \cdot i_{qr} \right) \cdot i_{qr} + \left(\frac{d\varphi_{0r}}{dt} + R_r \cdot i_{0r} \right) \cdot i_{0r} \right\}
\end{aligned}$$

$$P_e = \left\{ \frac{d\varphi_{ds1}}{dt} \cdot i_{ds1} + \frac{d\varphi_{qs1}}{dt} \cdot i_{qs1} + \frac{d\varphi_{0s1}}{dt} \cdot i_{0s1} + \frac{d\varphi_{ds2}}{dt} \cdot i_{ds2} + \frac{d\varphi_{qs2}}{dt} \cdot i_{qs2} + \frac{d\varphi_{0s2}}{dt} \cdot i_{0s2} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} \cdot i_{dr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} \cdot i_{qr} + \frac{d\varphi_{0r}}{dt} \cdot i_{0r} \right\}$$

$$+ \left\{ \left(\varphi_{ds1} \cdot i_{qs1} - \varphi_{qs1} \cdot i_{ds1} \right) \cdot \frac{d\theta_{s1}}{dt} + \left(\varphi_{ds2} \cdot i_{qs2} - \varphi_{qs2} \cdot i_{ds2} \right) \cdot \frac{d\theta_{s2}}{dt} + \left(\varphi_{dr} \cdot i_{qr} - \varphi_{qr} \cdot i_{dr} \right) \cdot \frac{d\theta_r}{dt} \right\} \tag{II-21}$$

$$+ \left\{ R_{s1} \cdot (i_{ds1}^2 + i_{qs1}^2 + i_{0s1}^2) + R_{s2} \cdot (i_{ds2}^2 + i_{qs2}^2 + i_{0s2}^2) + R_r \cdot (i_{dr}^2 + i_{qr}^2 + i_{0r}^2) \right\}$$

II.9 Expression du couple électromagnétique dans les axes d et q

Le deuxième terme de la puissance est la puissance électromagnétique ou la puissance électrique transformée en puissance mécanique :

$$P_{em} = \left\{ \left(\varphi_{ds1} \cdot i_{qs1} - \varphi_{qs1} \cdot i_{ds1} \right) \cdot \frac{d\theta_{s1}}{dt} + \left(\varphi_{ds2} \cdot i_{qs2} - \varphi_{qs2} \cdot i_{ds2} \right) \cdot \frac{d\theta_{s2}}{dt} + \left(\varphi_{dr} \cdot i_{qr} - \varphi_{qr} \cdot i_{dr} \right) \cdot \frac{d\theta_r}{dt} \right\} \quad (\text{II-22})$$

Le couple électromagnétique est égal au rapport de ce second terme sur la vitesse de rotation ω_r .

II.10. Modèle de Park du moteur asynchrone à double stator (Dual Stator Induction Motor DSIM)

Equations électriques :

$$\begin{aligned} v_{ds1} &= \frac{d\varphi_{ds1}}{dt} - \varphi_{qs1} \cdot \frac{d\theta_{s1}}{dt} + R_{s1} \cdot i_{ds1} & ; & \quad v_{ds2} = \frac{d\varphi_{ds2}}{dt} - \varphi_{qs2} \cdot \frac{d\theta_{s2}}{dt} + R_{s2} \cdot i_{ds2} & ; & \quad v_{dr} = \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \varphi_{qr} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} + R_r \cdot i_{dr} \\ v_{qs1} &= \frac{d\varphi_{qs1}}{dt} + \varphi_{ds1} \cdot \frac{d\theta_{s1}}{dt} + R_{s1} \cdot i_{qs1} & ; & \quad v_{qs2} = \frac{d\varphi_{qs2}}{dt} + \varphi_{ds2} \cdot \frac{d\theta_{s2}}{dt} + R_{s2} \cdot i_{qs2} & ; & \quad v_{qr} = \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \varphi_{dr} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} + R_r \cdot i_{qr} \end{aligned} \quad (\text{II-23})$$

Equations magnétiques :

$$\begin{pmatrix} \varphi_{ds1} \\ \varphi_{qs1} \\ \varphi_{ds2} \\ \varphi_{qs2} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{as} + \frac{3}{2}L_{mcs} & 0 & \frac{3}{2}L_{mcs} & 0 & \frac{3}{2}L_{mc} & 0 \\ 0 & L_{as} + \frac{3}{2}L_{mcs} & 0 & \frac{3}{2}L_{mcs} & 0 & \frac{3}{2}L_{mc} \\ \frac{3}{2}L_{mcs} & 0 & L_{as} + \frac{3}{2}L_{mcs} & 0 & \frac{3}{2}L_{mc} & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}L_{mcs} & 0 & L_{as} + \frac{3}{2}L_{mcs} & 0 & \frac{3}{2}L_{mc} \\ \frac{3}{2}L_{mc} & 0 & \frac{3}{2}L_{mc} & 0 & L_{ar} + \frac{3}{2}L_{mcr} & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}L_{mc} & 0 & \frac{3}{2}L_{mc} & 0 & L_{ar} + \frac{3}{2}L_{mcr} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_{ds1} \\ i_{qs1} \\ i_{ds2} \\ i_{qs2} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{pmatrix} \quad (\text{II-24})$$

Dans le but de simplifier le modèle on suppose les simplifications suivantes :

$$\frac{3}{2}L_{mcs} = \frac{3}{2}L_{mcr} = \frac{3}{2}L_{mc} = L_m$$

On choisit d'éliminer les courants rotoriques en exprimant les flux en fonction des courants statoriques et des courants magnétisants :

$$i_{dm} = i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr} \quad ; \quad i_{qm} = i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}$$

Les équations magnétiques se simplifient comme suit :

$$\begin{pmatrix} \varphi_{ds1} \\ \varphi_{qs1} \\ \varphi_{ds2} \\ \varphi_{qs2} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_s & 0 & 0 & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & 0 & 0 & L_m \\ 0 & 0 & L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_s & 0 & L_m \\ -L_r & 0 & -L_r & 0 & L_r + L_m & 0 \\ 0 & -L_r & 0 & -L_r & 0 & L_r + L_m \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_{ds1} \\ i_{qs1} \\ i_{ds2} \\ i_{qs2} \\ i_{dm} \\ i_{qm} \end{pmatrix} \quad (\text{II-25})$$

Ce système peut être réécrit comme suit, dans le but de simplifier l'inversion de la matrice inductance

$$\begin{pmatrix} \varphi_{ds1} \\ \varphi_{ds2} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qs1} \\ \varphi_{qs2} \\ \varphi_{qr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_s & L_m & 0 & 0 & 0 \\ -L_r & -L_r & L_r + L_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_s & 0 & L_m \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_s & L_m \\ 0 & 0 & 0 & -L_r & -L_r & L_r + L_m \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_{ds1} \\ i_{ds2} \\ i_{dr} \\ i_{qs1} \\ i_{qs2} \\ i_{qr} \end{pmatrix} \quad (\text{II-26})$$

Écriture matricielle des équations électriques :

$$\begin{pmatrix} v_{ds1} \\ v_{ds2} \\ v_{dr} \\ v_{qs1} \\ v_{qs2} \\ v_{qr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_s & L_m & 0 & 0 & 0 \\ -L_r & -L_r & L_r + L_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_s & 0 & L_m \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_s & L_m \\ 0 & 0 & 0 & -L_r & -L_r & L_r + L_m \end{pmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{ds1} \\ i_{ds2} \\ i_{dm} \\ i_{qs1} \\ i_{qs2} \\ i_{qm} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 & -L_s \cdot \frac{d\theta_{s1}}{dt} & 0 & -L_m \cdot \frac{d\theta_{s1}}{dt} \\ 0 & R_s & 0 & 0 & -L_s \cdot \frac{d\theta_{s2}}{dt} & -L_m \cdot \frac{d\theta_{s2}}{dt} \\ -R_r & -R_r & R_r & L_r \cdot \frac{d\theta_r}{dt} & L_r \cdot \frac{d\theta_r}{dt} & -(L_r + L_m) \cdot \frac{d\theta_r}{dt} \\ L_s \cdot \frac{d\theta_{s1}}{dt} & 0 & L_m \cdot \frac{d\theta_{s1}}{dt} & R_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s \cdot \frac{d\theta_{s2}}{dt} & L_m \cdot \frac{d\theta_{s2}}{dt} & 0 & R_s & 0 \\ -L_r \cdot \frac{d\theta_r}{dt} & -L_r \cdot \frac{d\theta_r}{dt} & (L_r + L_m) \cdot \frac{d\theta_r}{dt} & -R_r & -R_r & R_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{ds1} \\ i_{ds2} \\ i_{dm} \\ i_{qs1} \\ i_{qs2} \\ i_{qm} \end{pmatrix} \quad (\text{II-27})$$

Ce système peut être réécrit plus facilement comme suit :

$$\begin{pmatrix} v_{ds1} \\ v_{ds2} \\ v_{dr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_s & 0 & L_m \\ 0 & L_s & L_m \\ -L_r & -L_r & L_r + L_m \end{pmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{ds1} \\ i_{ds2} \\ i_{dm} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ -R_r & -R_r & R_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{ds1} \\ i_{ds2} \\ i_{dm} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -L_s \cdot \frac{d\theta_{s1}}{dt} & 0 & -L_m \cdot \frac{d\theta_{s1}}{dt} \\ 0 & -L_s \cdot \frac{d\theta_{s2}}{dt} & -L_m \cdot \frac{d\theta_{s2}}{dt} \\ L_r \cdot \frac{d\theta_r}{dt} & L_r \cdot \frac{d\theta_r}{dt} & -(L_r + L_m) \cdot \frac{d\theta_r}{dt} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{qs1} \\ i_{qs2} \\ i_{qm} \end{pmatrix} \quad (\text{II-28})$$

$$\begin{pmatrix} v_{qs1} \\ v_{qs2} \\ v_{qr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_s & 0 & L_m \\ 0 & L_s & L_m \\ -L_r & -L_r & L_r + L_m \end{pmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{qs1} \\ i_{qs2} \\ i_{qm} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L_s \cdot \frac{d\theta_{s1}}{dt} & 0 & L_m \cdot \frac{d\theta_{s1}}{dt} \\ 0 & L_s \cdot \frac{d\theta_{s2}}{dt} & L_m \cdot \frac{d\theta_{s2}}{dt} \\ -L_r \cdot \frac{d\theta_r}{dt} & -L_r \cdot \frac{d\theta_r}{dt} & (L_r + L_m) \cdot \frac{d\theta_r}{dt} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{ds1} \\ i_{ds2} \\ i_{dm} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ -R_r & -R_r & R_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{qs1} \\ i_{qs2} \\ i_{qm} \end{pmatrix} \quad (\text{II-29})$$

Calcul de la matrice inductance inverse :

$$\begin{pmatrix} L_s & 0 & L_m \\ 0 & L_s & L_m \\ -L_r & -L_r & L_r + L_m \end{pmatrix}^{-1} = \frac{1}{2 \cdot L_r \cdot L_m + (L_m + L_r) \cdot L_s} \begin{pmatrix} \frac{L_r \cdot L_m + (L_m + L_r) \cdot L_s}{L_s} & -\frac{L_r \cdot L_m}{L_s} & -L_m \\ -\frac{L_r \cdot L_m}{L_s} & \frac{L_r \cdot L_m + (L_m + L_r) \cdot L_s}{L_s} & -L_m \\ L_r & L_r & L_s \end{pmatrix} \quad (\text{II-30})$$

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{ds1} \\ i_{ds2} \\ i_{dm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_s & 0 & L_m \\ 0 & L_s & L_m \\ -L_r & -L_r & L_r + L_m \end{pmatrix}^{-1} \left\{ \begin{pmatrix} v_{ds1} \\ v_{ds2} \\ v_{dr} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ -R_r & -R_r & R_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{ds1} \\ i_{ds2} \\ i_{dm} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -L_s \cdot \frac{d\theta_{s1}}{dt} & 0 & -L_m \cdot \frac{d\theta_{s1}}{dt} \\ 0 & -L_s \cdot \frac{d\theta_{s2}}{dt} & -L_m \cdot \frac{d\theta_{s2}}{dt} \\ L_r \cdot \frac{d\theta_r}{dt} & L_r \cdot \frac{d\theta_r}{dt} & -(L_r + L_m) \cdot \frac{d\theta_r}{dt} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{qs1} \\ i_{qs2} \\ i_{qm} \end{pmatrix} \right\} \quad (\text{II-31})$$

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{qs1} \\ i_{qs2} \\ i_{qm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_s & 0 & L_m \\ 0 & L_s & L_m \\ -L_r & -L_r & L_r + L_m \end{pmatrix}^{-1} \left\{ \begin{pmatrix} v_{qs1} \\ v_{qs2} \\ v_{qr} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} L_s \cdot \frac{d\theta_{s1}}{dt} & 0 & L_m \cdot \frac{d\theta_{s1}}{dt} \\ 0 & L_s \cdot \frac{d\theta_{s2}}{dt} & L_m \cdot \frac{d\theta_{s2}}{dt} \\ -L_r \cdot \frac{d\theta_r}{dt} & -L_r \cdot \frac{d\theta_r}{dt} & (L_r + L_m) \cdot \frac{d\theta_r}{dt} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{ds1} \\ i_{ds2} \\ i_{dm} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ -R_r & -R_r & R_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{qs1} \\ i_{qs2} \\ i_{qm} \end{pmatrix} \right\} \quad (\text{II-32})$$

Si nous développons les deux systèmes d'équations ci-dessus, nous obtenons les dérivées des courants qui nous permettront de construire le schéma Matlab-simulink de la machine asynchrone à double stator.

$$\begin{aligned}
\frac{di_{ds1}}{dt} &= x_{11} * \left\{ v_{ds1} - R_s \cdot i_{ds1} + L_s \cdot \frac{d\theta_{s1}}{dt} \cdot i_{qs1} + L_m \cdot \frac{d\theta_{s1}}{dt} \cdot i_{qm} \right\} + \\
x_{12} * &\left\{ v_{ds2} - R_s \cdot i_{ds2} + L_s \cdot \frac{d\theta_{s2}}{dt} \cdot i_{qs2} + L_m \cdot \frac{d\theta_{s1}}{dt} \cdot i_{qm} \right\} + \\
x_{13} * &\left\{ v_{dr} + R_r \cdot i_{ds1} + R_r \cdot i_{ds2} - R_r \cdot i_{dm} - L_r \cdot \frac{d\theta_r}{dt} \cdot i_{qs1} - L_r \cdot \frac{d\theta_r}{dt} \cdot i_{qs2} + L_{mr} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} \cdot i_{qm} \right\}
\end{aligned} \tag{II-33}$$

i_{ds2} et i_{dm} se déduisent de l'expression de i_{ds1} ci-dessus en remplaçant x_{11}, x_{12}, x_{13} par x_{21}, x_{22}, x_{23} et par x_{31}, x_{32}, x_{33} respectivement.

$$\begin{aligned}
\frac{di_{qs1}}{dt} &= x_{11} * \left\{ v_{qs1} - R_s \cdot i_{qs1} - L_s \cdot \frac{d\theta_{s1}}{dt} \cdot i_{ds1} - L_m \cdot \frac{d\theta_{s1}}{dt} \cdot i_{dm} \right\} + \\
x_{12} * &\left\{ v_{qs2} - R_s \cdot i_{qs2} - L_s \cdot \frac{d\theta_{s2}}{dt} \cdot i_{ds2} - L_m \cdot \frac{d\theta_{s2}}{dt} \cdot i_{dm} \right\} + \\
x_{13} * &\left\{ v_{qr} + R_r \cdot i_{qs1} + R_r \cdot i_{qs2} - R_r \cdot i_{qm} + L_r \cdot \frac{d\theta_r}{dt} \cdot i_{ds1} + L_r \cdot \frac{d\theta_r}{dt} \cdot i_{ds2} - L_{mr} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} \cdot i_{dm} \right\}
\end{aligned} \tag{II-34}$$

i_{qs2} et i_{qm} se déduisent de l'expression de i_{qs1} ci-dessus en remplaçant x_{11}, x_{12}, x_{13} par x_{21}, x_{22}, x_{23} et par x_{31}, x_{32}, x_{33} respectivement.

Il ne reste pour compléter le modèle Simulink de la machine asynchrone à double stator que l'expression du couple électromagnétique et l'équation du mouvement.

Le couple électromagnétique s'exprime comme suit quelque soit le référentiel choisi (voir annexes B) :

$$C_{em} = p \cdot L_m \cdot \{ i_{dr} \cdot (i_{qs1} + i_{qs2}) - i_{qr} \cdot (i_{ds1} + i_{ds2}) \} \tag{II-35}$$

L'équation du mouvement s'exprime par : $\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{P}{J} \left(C_{em} - C_r - k_f \cdot \frac{\omega_r}{p} \right)$

Basé sur les équations électriques et mécaniques ci-dessus, nous construisons le schéma Matlab-simulink de la machine asynchrone à double stator.

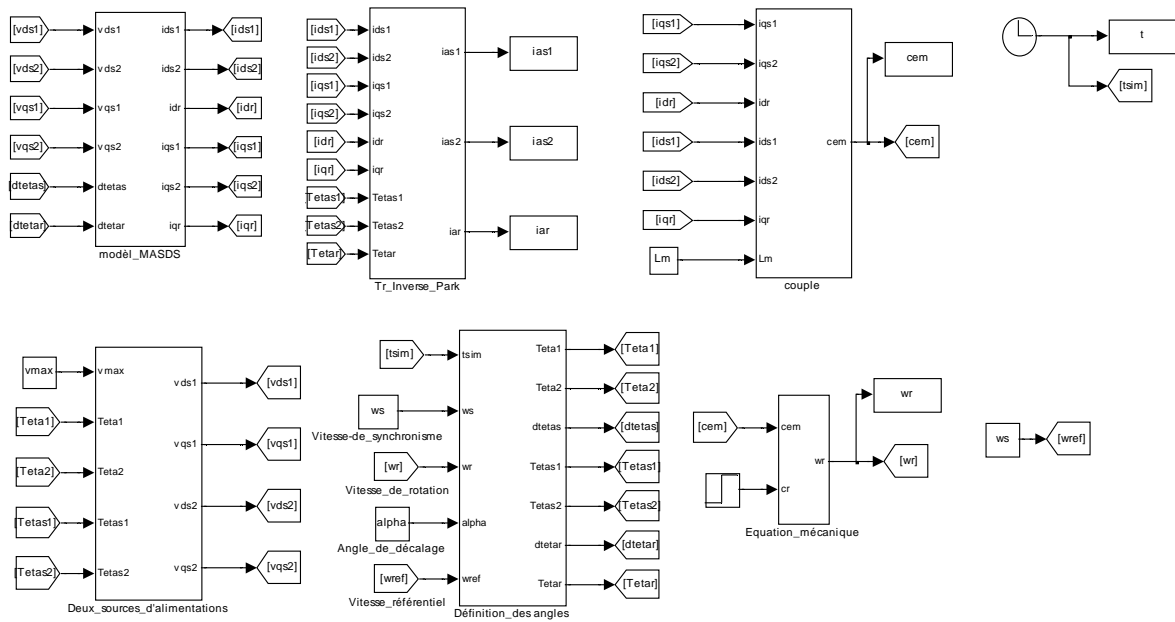


Figure II.2 Modèle de la MASDS sur Matlab-Simulink

Ce schéma est construit de façon à être utilisé soit en mode moteur, comme dans le cas de cette figure, soit en mode génératrice auto-excitée. Dans le cas du mode générateur auto-excité, il faut remplacer l'équation mécanique par un bloc d'auto-amorçage et la vitesse devient une entrée.

II.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit la machine asynchrone à double stator et nous avons établi les équations permettant de prédire son comportement dynamique. Nous avons commencé par établir ces équations dans le repère naturel avant de leur appliquer la transformation de Park pour construire un modèle sous Matlab-simulink.

Le modèle construit fait appel à un ensemble de paramètres dits électriques et mécaniques. Dans le chapitre suivant, nous allons décrire et appliquer les méthodes d'identification de ces paramètres. Les valeurs de ces paramètres nous permettront d'exploiter le modèle construit.

III.1 Introduction

Le modèle du chapitre précédent fait appel à des paramètres électriques et mécanique. Dans ce chapitre nous allons procéder à leur identification en utilisant les méthodes classiques.

Ces méthodes sont issues du schéma équivalent de la figure III.1 et exploite deux essais : un essai à vide et un essai à rotor bloqué appelé aussi en court-circuit.

III.2 Schéma équivalent

Le schéma de la figure ci-dessous représente le schéma équivalent en monophasé d'une machine asynchrone à cage dont les paramètres d'une phase rotorique sont ramenés au stator.

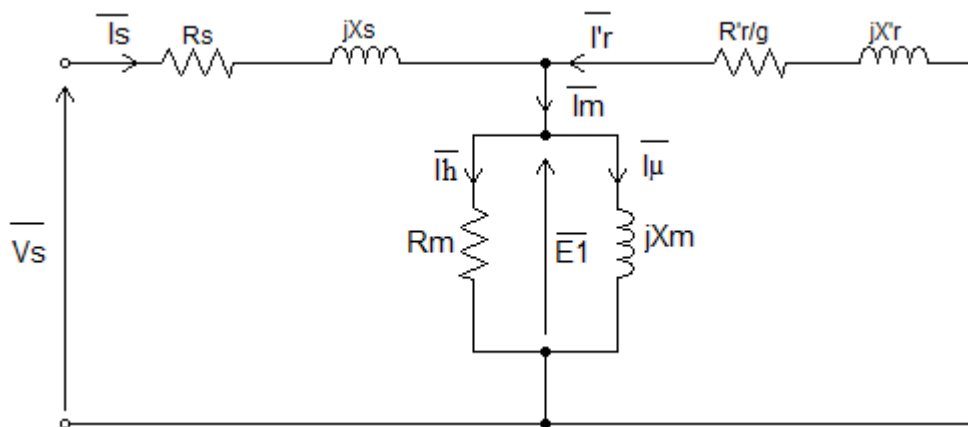


Figure III.1 Schéma équivalent ramené au stator

\bar{V}_s : Tension simple d'une phase statorique [V].

R_s : Résistance statorique par phase [Ω].

X_s : Réactance de fuites d'une phase statorique [Ω].

R'_r : Résistance d'une phase rotorique ramenée au stator [Ω].

X_r : Réactance de fuites d'une phase rotorique ramenée au stator [Ω].

\bar{E}_1 : F.e.m magnétisante d'une phase du stator [V].

R_m : Résistance représentant les pertes fer [Ω].

X_m : Réactance de magnétisation [Ω].

III.3 Identification des paramètres électriques

III.3.1 Mesure de la résistance R_s

La mesure de la résistance statorique est faite par la méthode voltampère-métrique où on alimente l'enroulement d'une phase statorique par une source de courant continu.

Cet essai nécessite un voltmètre et un ampèremètre pour relever les différentes mesures de tension et de courant qui caractérisent la résistance suivant la loi d'ohm :

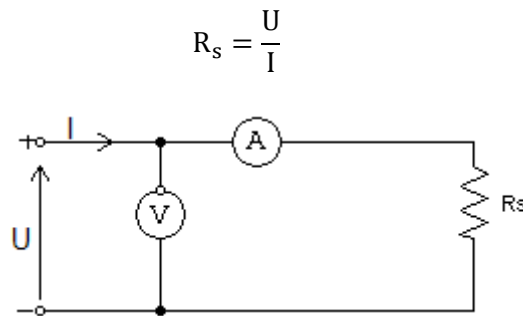


Figure III.2 Schéma de mesure de la résistance statorique en courant continu

Les résultats de cet essai sont donnés dans le tableau (III.1)

V (V)	57,5	40,5	21
I (A)	2,5	1,74	0,9
R_s [Ω]	7.73		

Tableau III.1 Résultat de mesure de la résistance statorique

Il faut prendre plusieurs mesures pour différentes valeurs de la tension. La résistance statorique sera la moyenne de ces résistances mesurées.

III.3.2 L'essai à rotor bloqué

Dans cet essai, on bloque mécaniquement le rotor afin d'empêcher sa rotation ($g=1$). On alimente les trois phases du moteur avec une tension alternative réduite de façon à ne pas dépasser le courant nominal et on mesure :

- La tension d'alimentation.
- Le courant statorique.
- La puissance absorbée.

L'essai à rotor bloqué a donné les résultats du tableau (III.2) :

Vcc (V)	40
Icc (A)	2,65
Pcc (W)	247,5

Tableau III.2 Résultat de l'essai à rotor bloqué

L'élimination de la branche magnétisante est dû au fait que l'impédance de la branche rotorique est très faible devant l'impédance magnétisante ($g=1$). De ce fait le courant parcourant la branche magnétisante est négligeable devant le courant rotorique et l'on peut donc considérer la branche magnétisante comme un circuit ouvert (figure III.3).

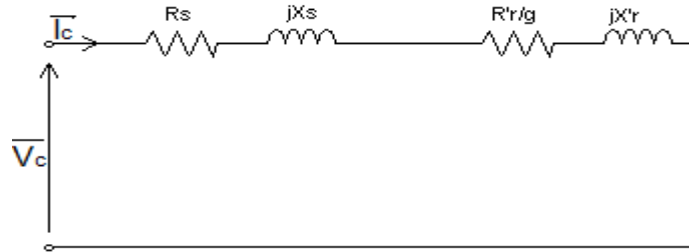


Figure III.3 Schéma équivalent à rotor bloqué

a) Calcul de R'_r

La puissance électrique absorbée à rotor bloqué P_{cc} correspond à la somme des pertes par effet joule dans le stator P_{js} et des pertes par effet joule dans le rotor P_{jr} .

On a

$$P_{cc} = 3R_s * I_{cc}^2 + 3R'_r * I_{cc}^2$$

$$P_{cc} = 3I_{cc}^2 * (R_s + R'_r)$$

Donc

$$R'_r = \frac{P_{cc}}{3I_{cc}^2} - R_s \quad (III.1)$$

b) Calcul de L_s et L_r

L'impédance équivalente est :

Donc

$$Z_{cc} = \frac{\overline{V_{cc}}}{I_{cc}}$$

Avec

$$Z_{cc} = (R_s + R'_r) + j(X_s + X'_r)$$

On notera

$$R_{cc} = R_s + R'_r$$

$$X_{cc} = X_s + X'_r$$

$$V_{cc} = \sqrt{(R_s + R'_r)^2 + (X_s + X'_r)^2} * I_{cc}$$

Donc

$$X_{cc} = \sqrt{\left(\frac{V_{cc}}{I_{cc}}\right)^2 - R_{cc}^2}$$

Pour les moteurs de petite puissance on suppose que:

$$X_s = X_r' = \frac{1}{2} * X_{cc}$$

On a :

$$\begin{aligned} X_s &= L_s * \omega \\ X_r' &= L_r' * \omega \end{aligned} \quad (III.2)$$

Nous déterminons les inductances de fuites comme suite:

$$\begin{aligned} L_s &= \frac{X_s}{\omega} \\ L_r' &= \frac{X_r'}{\omega} \end{aligned} \quad (III.3)$$

III.3.3 Essai à vide

Cet essai se fait lorsque la charge est nulle, donc la machine tourne à une vitesse de rotation constante est proche de celle du synchronisme.

Cet essai nous permet de mesurer les pertes à vide de la machine, pour cela, nous devons mesurer :

- La tension d'alimentation à vide V_0 .
- Le courant absorbé à vide I_0 .
- La puissance absorbée à vide P_0 .

Et de déduire les pertes fer et les pertes mécaniques.

Les résultats de l'essai à vide sont résumés dans le tableau (III.3) :

$I_0(\text{A})$	0.4	0.5	0.6	0.9	1.2	1.65
$P_0(\text{w})$	30	36	45	75	120	174
$V_0(\text{V})$	60	80	100	140	180	220

Tableau III.3 Résultat de l'essai à vide

Le glissement g_0 obtenu à vide est généralement très faible. Cependant, la résistance fictive $\frac{R_r'}{g}$ est très grande devant les autres impédances et donc le courant I_r' est négligeable devant le courant I_0 [10], [11]. La branche rotorique peut être assimilée à un circuit ouvert, ce qui donne le schéma de la figure (III.4).

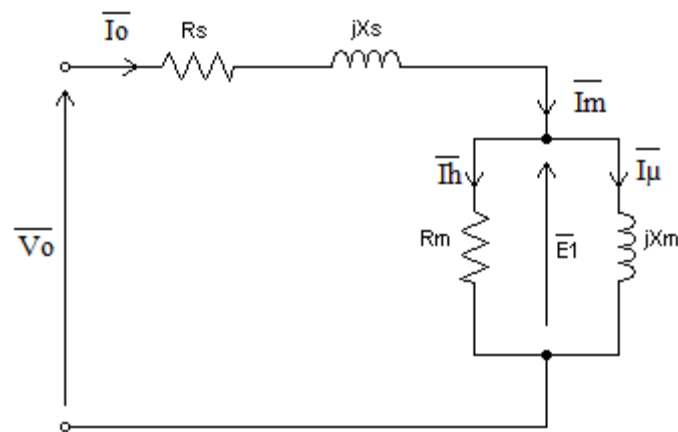


Figure III.4 Schéma équivalent approché à vide

a) Détermination des pertes fer et mécaniques

La puissance électrique absorbée à vide P_0 correspond à la somme des pertes joules et des pertes fer du stator et des pertes mécaniques tel que :

$$P_0 = 3R_s * I_0^2 + P_{fs} + P_{méc} \quad (\text{III.4})$$

Dans cet essai, nous démarrons le moteur en augmentant la tension de 0 jusqu'à sa valeur nominale (220V). Nous notons la valeur de la vitesse de rotation.

Nous diminuons la tension et nous relevons à chaque fois la tension, le courant et la puissance tout en surveillant la vitesse et en s'assurant que celle-ci n'a pas diminué.

Nous continuons à diminuer la tension jusqu'à ce que la vitesse de rotation diminue sensiblement.

Nous traçons alors $P_0 - 3R_s * I_0^2$ en fonction de V_0^2 qui devrait être une droite. L'extrapolation de cette droite à l'origine donne la valeur des pertes mécaniques qui sont supposées constantes quand la vitesse est maintenue constante.

Les pertes fer sont déduites au point nominal comme suit :

$$P_{fs} = P_0 - 3R_s I_0^2 - P_{méc} \text{ Au point nominal } (V_s = 220V).$$

Ces pertes sont considérées constantes pour le fonctionnement nominal. Les pertes fer sont la différence au point nominal de $P_0 - 3R_s I_{s0}^2$ et des pertes mécaniques (voir figure III.5).

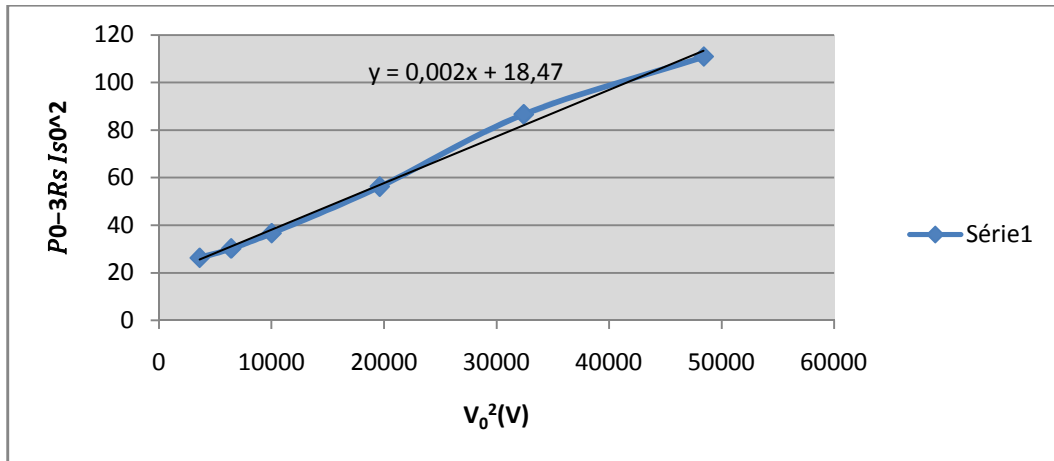


Figure III.50 Caractéristique de la somme des pertes fer et mécaniques en fonction de V_0^2

Après extrapolation à l'origine, on trouve la valeur des pertes mécaniques (18.47 W), les pertes fer sont déduites par soustraction, au point $V=220V$, donc $P_{\text{fer}}=61.65W$

b) Détermination de R_m et L_m

A partir du schéma équivalent à vide on peut tirer l'équation électrique suivante :

On a

$$\overline{V}_0 = (R_s + jX_s)\overline{I}_0 + \overline{E}_1$$

D'où

$$\overline{E}_1 = \overline{V}_0 - (R_s + jX_s)\overline{I}_0$$

Avec

$$\begin{aligned} \overline{E}_1 &= R_m \overline{I}_h = X_m \overline{I}_\mu \\ P_0 &= 3.V_0.I_0.\cos(\varphi_0) \\ \cos(\varphi_0) &= \frac{P_0}{3V_0I_0} \\ \sin(\varphi_0) &= \sqrt{1 - \cos(\varphi_0)^2} \end{aligned}$$

Avec

$$\begin{aligned} \overline{I}_h &= \overline{I}_0 * \cos(\varphi_0) \\ \overline{I}_\mu &= \overline{I}_0 * \sin(\varphi_0) \end{aligned}$$

- **Détermination de la résistance de magnétisation**

$$R_m = \frac{\overline{E}_1}{\overline{I}_h} \quad (\text{III.5})$$

- **Détermination de l'inductance de magnétisation**

$$X_m = \frac{\overline{E_1}}{I_\mu}$$

$$X_m = L_m * \omega \quad (III.6)$$

D'après l'équation (III.6), on aura :

$$L_m = \frac{X_m}{\omega} \quad (III.7)$$

III.4 Identification des paramètres mécanique

L'identification des paramètres électriques seuls, ne sont pas suffisants afin d'effectuer une étude correcte pour la machine électrique, pour cette raison, une identification des paramètres mécanique est nécessaire. Les équations électriques et mécaniques sont en effet liées par la position angulaire du rotor qui intervient dans l'expression des inductances mutuelles stator-rotor.

La connaissance des paramètres mécaniques permet de déterminer la dynamique de la vitesse de rotation selon l'équation de mouvement suivante :

$$C_e - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + K_f \Omega \quad (III.8)$$

La constante de temps mécanique est identifiée par la méthode de l'essai de ralentissement.

III.4.1 L'essai de ralentissement

L'essai de ralentissement consiste à alimenter la machine à vide à la tension nominale, couper brusquement l'alimentation et enregistrer l'évolution de la vitesse de rotation à l'oscilloscope à mémoire (voir figure III.6).

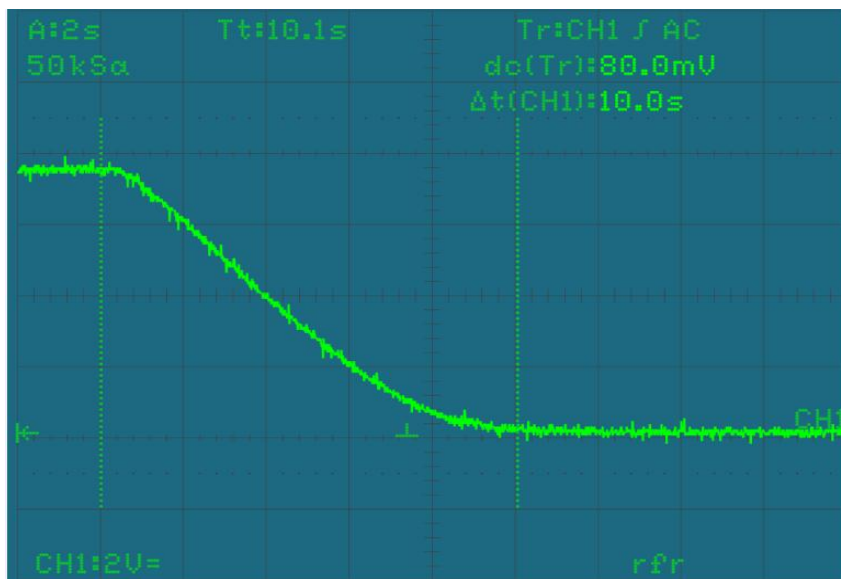


Figure III.6 Courbe de ralentissement de la MASDS

On peut distinguer deux méthodes pour identifier les paramètres mécaniques :

a) Méthode 1 [12]

$$J \frac{d\Omega}{dt} = -K_f \Omega$$

a-1) Détermination du moment d'inertie

Les pertes mécaniques étant identifiées lors de l'essai à vide, nous supposons qu'elles sont proportionnelles au carré de la vitesse de rotation comme suit:

$$P_{méc} = K_f \Omega_{r0}^2 = J \Omega_{r0} \frac{d\Omega}{dt}$$

Nous identifions l'inertie J en vertu de l'équation suivante :

$$J = \frac{P_{méc}}{\Omega_{r0} \frac{\Delta\Omega}{\Delta t}} \quad (III.9)$$

Avec

Ω_{r0} : Est la vitesse de rotation initiale

$\frac{\Delta\Omega}{\Delta t}$: Est la pente caractérisant la courbe tracée

a-2) Détermination du coefficient de frottements :

En vertu de la relation suivante :

$$\Delta T = \frac{J}{K_f}$$

On déduit le coefficient de frottements comme suit :

$$K_f = \frac{J}{\Delta T} \quad (III.10)$$

b) Méthode 2[13]

b-1) Mesure du coefficient de frottement

A partir de l'équation (III.4), on peut tirer les pertes mécaniques

$$P_{méc} = P_{abs} - P_{js} - P_f \quad (III.11)$$

$$K_f = \frac{P_{méc}}{\Omega^2} \quad (III.12)$$

b-2) Mesure du moment d'inertie

La solution de l'équation du mouvement en coupant brusquement l'alimentation est :

$$\Omega(t) = \Omega_{r0} * \exp\left(-\frac{t}{\tau_m}\right)$$

Avec :

$$\tau_m = \frac{J}{K_f}$$

τ_m : Constante de temps mécanique

On aura alors :

$$J = K_f * \tau_m \quad (\text{III.13})$$

Les essais d'identification ont été réalisés sur un seul stator de notre MASDS en supposant que deux stators sont identiques. Quelques essais complémentaires ont confirmé que les deux stators sont réellement identiques. Les résultats de l'identification des paramètres de la MASDS sont présentés dans le tableau (III.4) ci-dessous.

Résistance statorique du stator	$R_{s1} = 7.73 \text{ } [\Omega]$
Résistance rotorique ramenée au stator	$R'_r = 4.01 \text{ } [\Omega]$
Inductance statorique du stator	$L_{s1} = 0.015 \text{ } [H]$
Inductance de magnétisation	$L_m = 0.4 \text{ } [H]$
Résistance de magnétisation	$R_m = 777.76 \text{ } [\Omega]$
Inductance rotorique ramenée au stator	$L'_r = 0.015 \text{ } [H]$
Coefficient de frottements (Méthode 1)	$K_f = 0.00078 \text{ } [Nm.s/rad]$
Coefficient de frottements (Méthode 2)	$K_f = 0.00075 \text{ } [Nm.s/rad]$
Moment d'inertie (Méthode 1)	$J = 0.0078 \text{ } [Kg.m^2]$
Moment d'inertie (Méthode 2)	$J = 0.0075 \text{ } [Kg.m^2]$

Tableau III.4 Résultats de l'identification des paramètres de la MASDS

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons identifié les paramètres électriques et mécaniques de la machine asynchrone à double stator par les méthodes classiques.

Dans le chapitre suivant, nous injecterons les valeurs des paramètres dans le modèle développé au chapitre II.

La comparaison des résultats de simulation et des résultats expérimentaux d'un test de démarrage en pleine tension nous permettra de valider le modèle et les paramètres.

IV.1 Introduction

Dans le deuxième chapitre, nous avons développé un modèle sous Matlab-Simulink pour le moteur asynchrone à double stator. Ce modèle fait appel à des paramètres électriques et mécaniques. Dans le chapitre trois, nous avons identifié ces paramètres par des méthodes classiques (essais à vide et à rotor bloqué).

Dans ce chapitre nous allons procéder à l'exploitation du modèle et à sa validation. A cet effet, nous allons effectuer des essais expérimentaux et nous allons comparer les résultats théoriques et expérimentaux. Nous allons en premier lieu décrire le procédé expérimental réalisé et tracer les courbes expérimentales. Dans un second lieu, nous allons effectuer des tests par simulation dans les mêmes conditions que l'expérience afin de faire la comparaison.

IV.2 Description du procédé expérimental

Les deux stators sont identiques, on alimente un seul stator de la MASDS en pleine tension. Le procédé expérimental représenté dans la figure IV.1 que nous avons utilisé, se compose d'une machine asynchrone à double stator de 1,1 kW, d'une source de tension alternative triphasée, d'un oscilloscope pour relever les courbes de courant et de la vitesse, d'un interrupteur triphasé et d'un transformateur triphasé qui a été ajouté dans le but d'assurer l'isolation galvanique (isoler la masse de la source de tension et celle de l'oscilloscope).

Après avoir fixé la tension à différentes valeurs respectivement de 50V, 80V et 120V à interrupteur ouvert, nous les avons soudainement injectés sur la MASDS en fermant brusquement l'interrupteur. Nous avons enregistré à l'oscilloscope à mémoire les courbes en régime transitoire du courant d'une phase statorique et de la vitesse de rotation.

Par la suite les données numériques des courbes enregistrées sont transférées vers un ordinateur branché à notre oscilloscope via une interface. Ces données peuvent par la suite être traitées sous format Excel ou sous Matlab. Ceci nous permettra de reconstituer les courbes obtenues par l'oscilloscope sous environnement Matlab –Simulink afin de pouvoir les comparer avec les résultats de simulation.

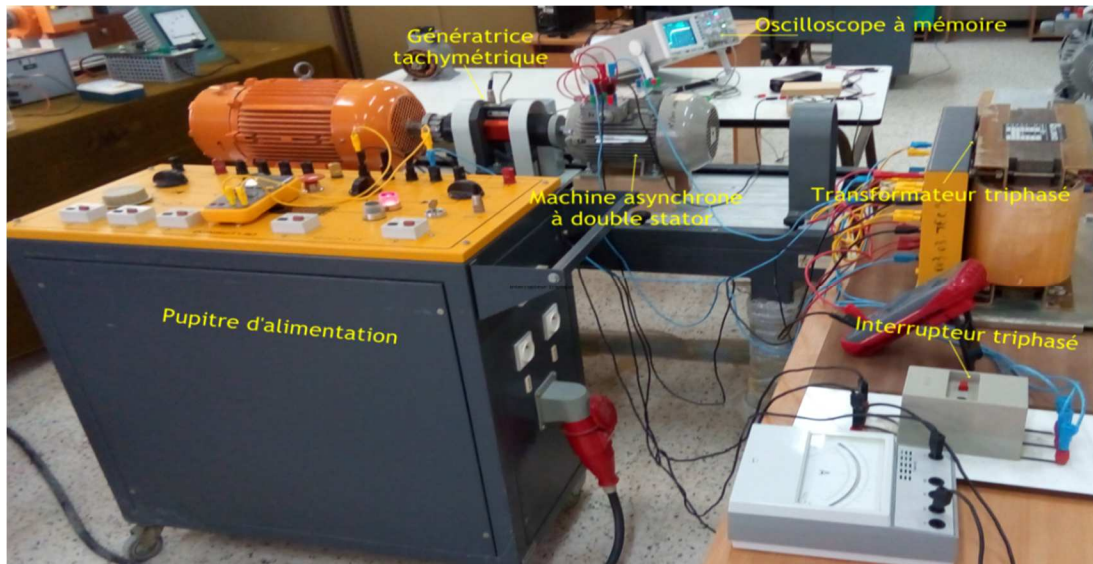


Figure IV.1 Photographie du dispositif expérimental (essai en pleine tension)

IV.3 Présentation des résultats expérimentaux

Les résultats expérimentaux de la vitesse et du courant pour trois valeurs de la tension d'alimentation sont présentés dans les figures(IV.2), (IV.3) et (IV.4), où nous avons représenté les courbes obtenues sur oscilloscope.

IV.3.1 Essai pour une tension de 50V

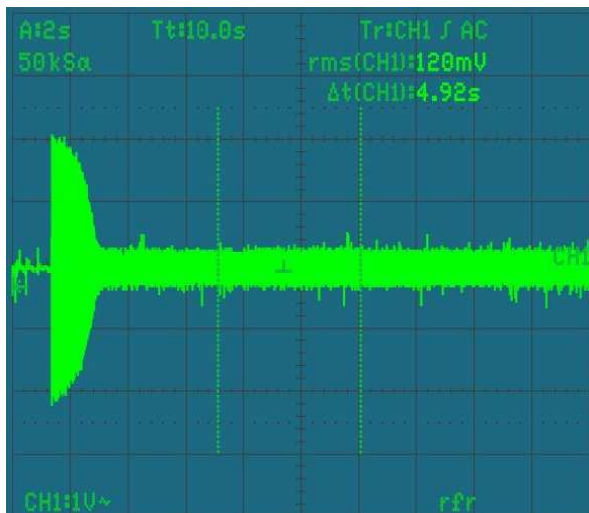


Figure IV.2.1 Image du courant expérimental de la MASDS pour une tension de 50V

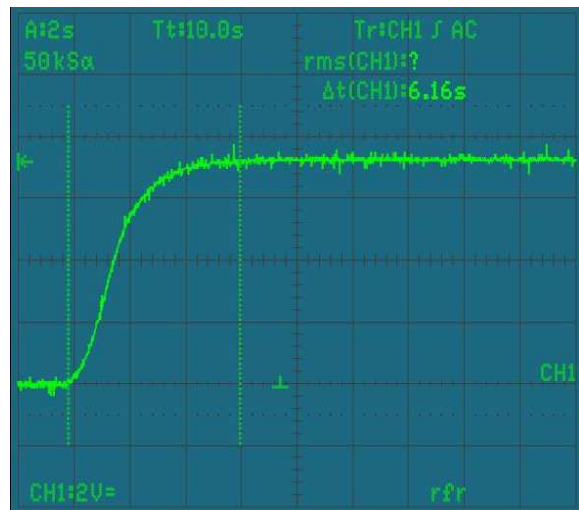


Figure IV.2.2 Image de la Vitesse expérimentale de la MASDS pour une tension de 50V

IV.3.2 Essai pour une tension de 80V

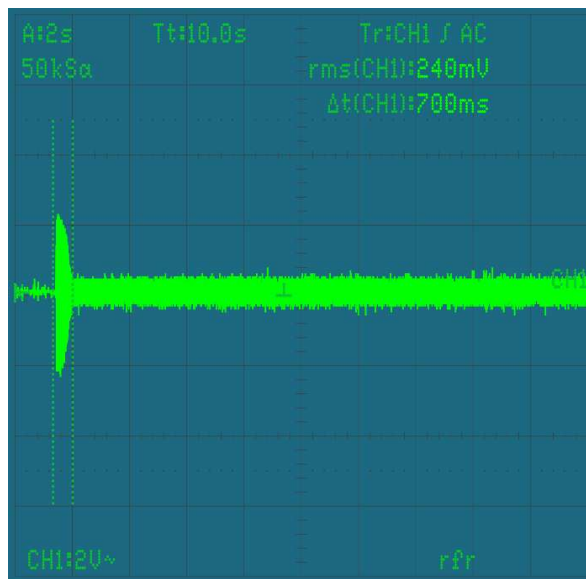


Figure IV.3.1 Image du Courant expérimental de la MASDS pour une tension de 80V

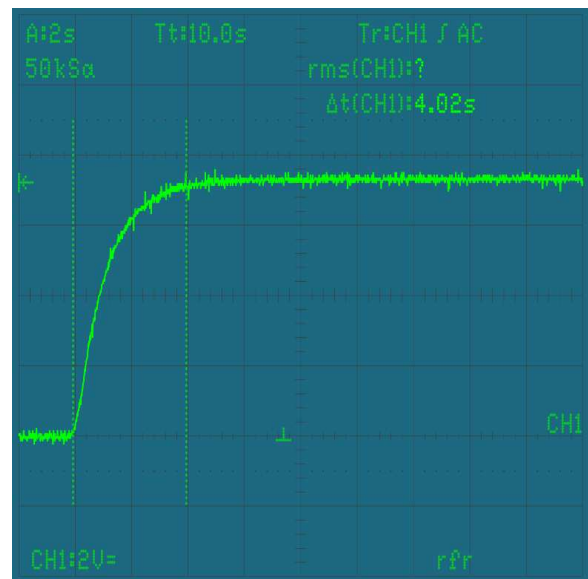


Figure IV.3.2 Image de la Vitesse Expérimentale de la MASDS pour une tension de 80V

IV.3.3 Essai expérimental pour une tension de 120V

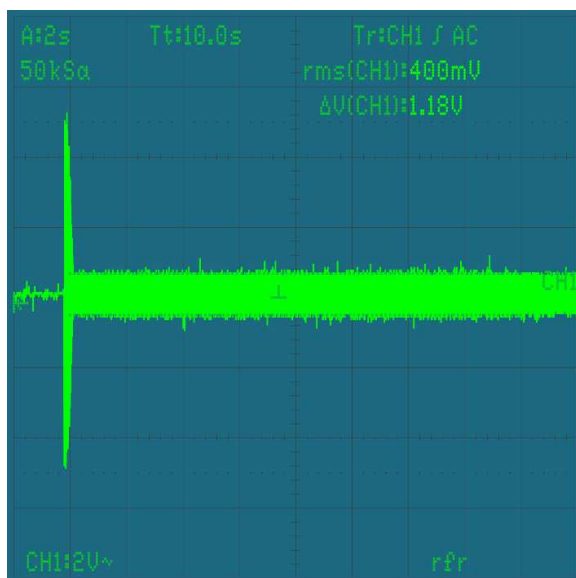


Figure IV.4.1 Image du Courant expérimental de la MASDS pour une tension de 120V

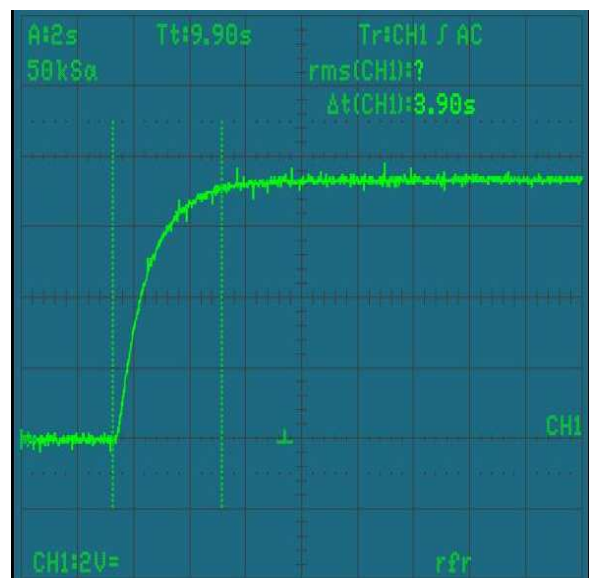


Figure IV.4.2 Image de la Vitesse expérimentale de la MASDS pour une tension de 120V

IV.4 Comparaison des résultats

Après avoir transféré les données numériques enregistrées sur oscilloscope vers l'ordinateur via une interface, nous avons pu tracer ces figures à l'aide de Matlab-Simulink dans le but de le comparer avec les résultats théoriques.

Les figures qui suivent regroupent les résultats expérimentaux et de simulation des régimes transitoires de la vitesse de rotation et du courant d'une phase statorique et ce pour les trois valeurs suivantes de la tension : 50V, 80V et 120V. Afin d'effectuer au mieux la comparaison, nous avons présenté les courbes expérimentales et théoriques de deux manières : deux courbes côte à côte pour apprécier les allures en régime transitoire et une courbe qui représente les deux grandeurs superposées pour apprécier la différence.

IV.4.1 Résultats de l'essai en pleine tension pour 50V

Le premier test montré sur la figure (IV.5), représente le démarrage en pleine tension de la MASDS en lui appliquant brusquement une tension de 50V.

Dans cette figure, nous avons illustré les courbes de simulation et expérimentale pour le courant statorique et la vitesse de rotation de la machine asynchrone à double stator.

La figure (IV.5) montre que durant le régime transitoire, les courbes de simulation et celles expérimentales atteignent des valeurs proches les unes des autres.

La vitesse simulée et expérimentale démarrent toutes les deux avec une pente nulle (c'est une caractéristique d'un système de 2^{ème} ordre ou plus). La courbe expérimentale de la vitesse atteint son régime permanent pendant une durée de 6s, alors que la courbe de simulation l'atteint au bout de 5s. Au-delà, les deux vitesses se stabilisent pour atteindre une même valeur de $\omega_r=156$ rad/s sans aucun dépassement.

D'un autre part, le courant statorique lui aussi atteint des pics au démarrage de 4.3A pour l'expérimental et de 5A pour la simulation, par la suite il se stabilise en régime permanent à une amplitude de 0.5A.

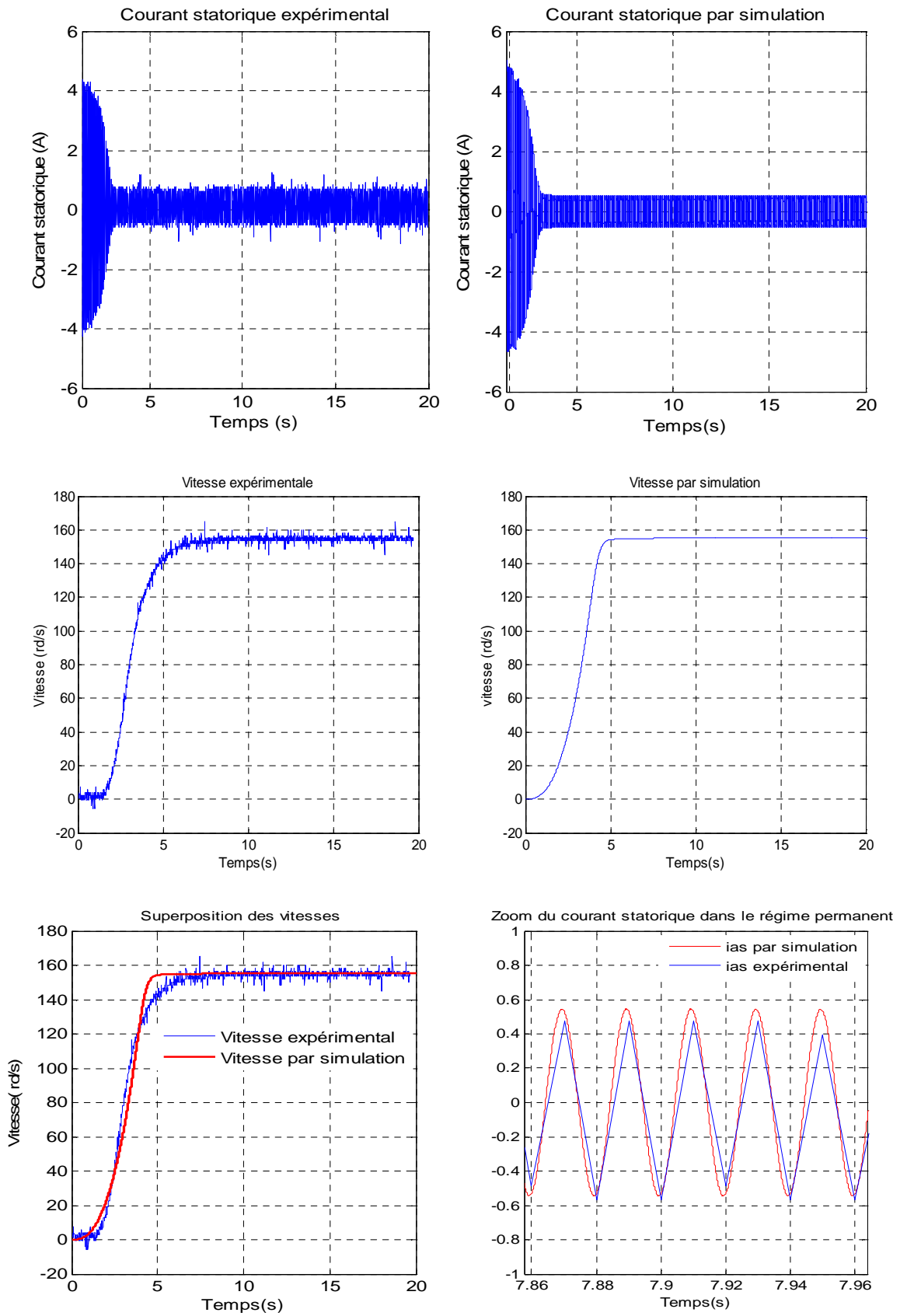


Figure IV.5 Résultats expérimentaux et de simulation de la vitesse et du courant pour une tension de 50V

IV.4.2 Résultats de l'essai en pleine tension pour 80V

La figure (IV.6) montre les résultats du démarrage en pleine tension la MASDS, avec une tension de 80V. Cette fois, la courbe expérimentale de la vitesse atteint son régime permanent au bout de 5.5s alors que la courbe de simulation l'atteint durant 4.5s. Nous remarquons que l'augmentation de la tension a une influence sur la durée du régime transitoire, par contre, la valeur du régime permanent reste pratiquement inchangée.

Nous remarquons qu'une augmentation de la tension, induit une augmentation du pic du courant statorique. On remarque une bonne similitude en régime permanent entre les résultats expérimentaux et de simulation. Dans les deux cas, le courant statorique atteint en régime permanent une amplitude de 0.9A. Par contre, nous constatons une différence entre les valeurs des pics de simulation et expérimental. Nous pensons que cela est dû à la différence des tensions à l'instant de la fermeture de l'interrupteur (une petite surtension à cet instant peut donner cette différence).

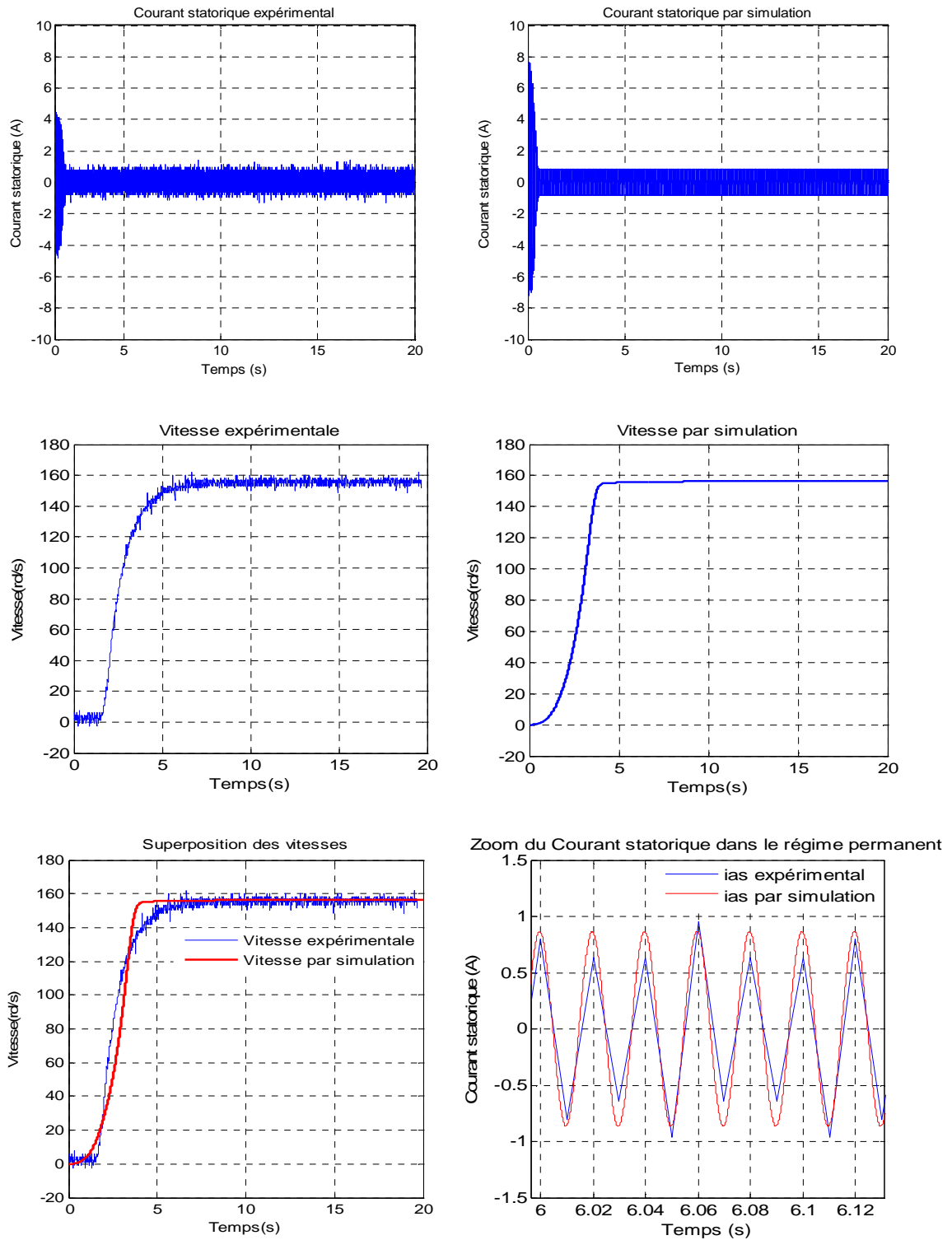


Figure IV.6 Résultats expérimentaux et de simulation de la vitesse et du courant pour une tension de 80V

IV.4.3 Résultats de l'essai en pleine tension pour 120V

Les résultats du troisième test effectué sont représentés dans la figure (IV.7). Il concerne un démarrage en pleine tension avec une amplitude de 120V.

Nous constatons une diminution de la durée du régime transitoire de la vitesse et du courant, par rapport aux deux essais précédents.

Nous remarquons aussi, une augmentation du pic de courant (10.4 A) et de son amplitude en régime permanent (1.29 A).

Afin d'expliquer la différence entre les résultats expérimentaux et de simulation, nous donnons une liste des causes probables :

- L'imperfection de la tension d'alimentation : en effet, la tension du réseau n'a pas toujours une amplitude constante comme supposé en simulation, elle varie constamment (par exemple les flickers).
- La présence du transformateur n'est pas prise en compte dans la simulation, alors qu'il peut causer des surtensions aux instants du déclenchement de l'interrupteur.
- L'interrupteur peut causer un retard (ce n'est pas un échelon parfait). C'est pour ça qu'il y a une différence entre la durée du transitoire de la vitesse expérimentale et simulée.
- Le programme développé sous l'environnement Matlab n'a pas pris en considération les imperfections dans les roulements, qui induisent des couples résistants statiques.

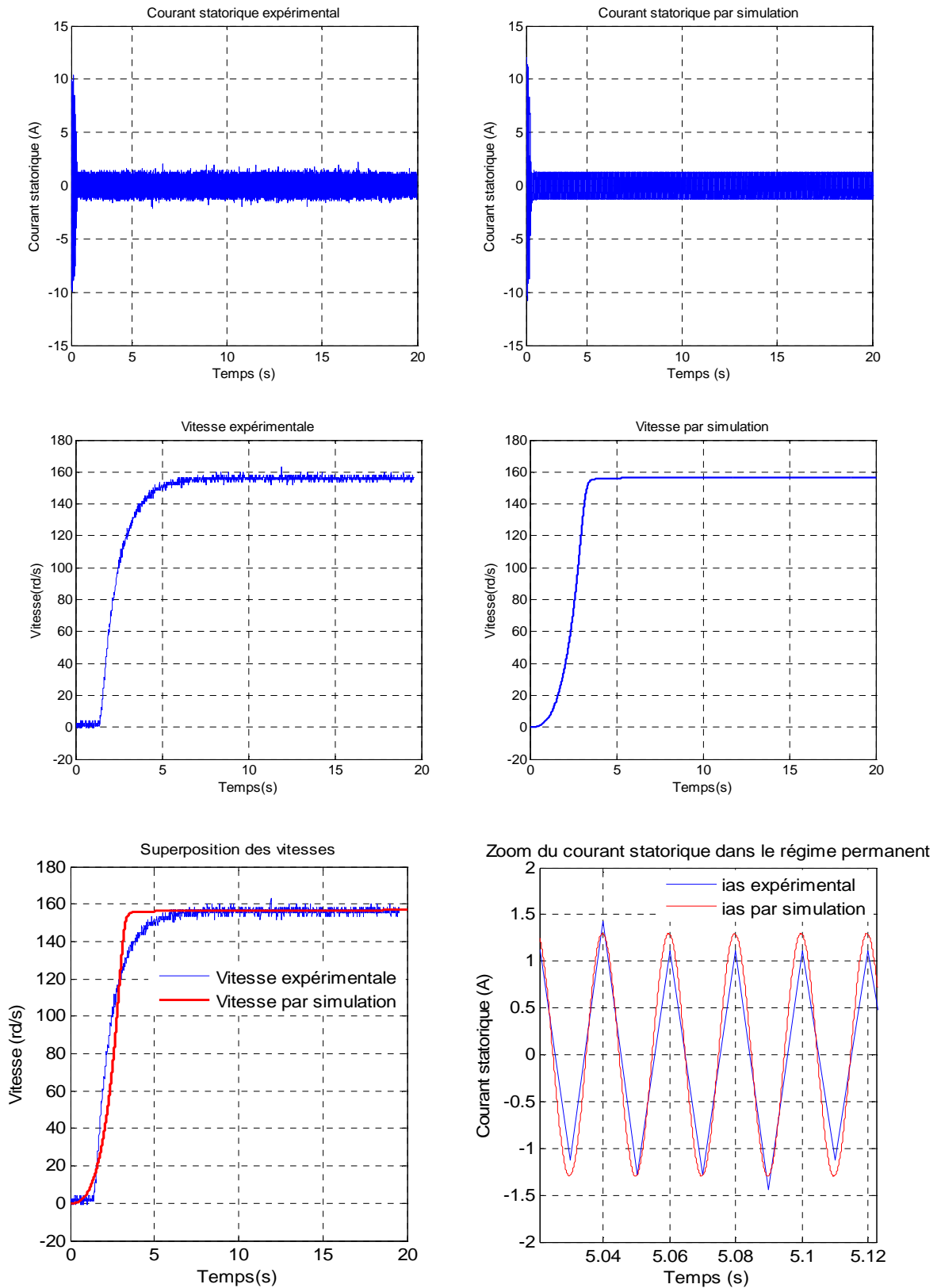


Figure IV.7 Résultats expérimentaux et de simulation de la vitesse et du courant pour une tension de 120V

IV.5 Conclusion

Ce dernier chapitre a été consacré à l'exploitation et la validation du modèle de la MASDS. D'abord nous avons décrit le procédé expérimental réalisé, puis nous avons présenté les résultats expérimentaux obtenus sur oscilloscope.

Les données numériques de ces résultats expérimentaux sont transférées au micro-ordinateur via une interface pour être chargés sur Matlab. Ceci nous a permis de faire une bonne comparaison.

Cette comparaison, nous a permis de conclure que nous avons une similarité acceptable entre les résultats des deux essais (expérimental et simulation). Nous avons constaté que la ressemblance entre la simulation et l'expérience est meilleure avec l'augmentation de la tension.

Conclusion générale

Notre mémoire de fin d'étude a été consacré à l'étude d'une machine asynchrone à double stator. Notre étude a consisté en la modélisation, l'identification des paramètres puis la validation expérimentale à travers des essais de démarrage direct.

Nous avons consacré le premier chapitre à donner une description pour la machine asynchrone à double stator. Cette dernière nous a permis d'aboutir au schéma électrique de la MASDS représentant la disposition géométrique des enroulements. Nous avons également présenté dans ce chapitre les principaux domaines d'utilisation de notre machine, tout en se basant sur son rôle principal consacré au fonctionnement en génératrice dans les éoliennes.

Dans le deuxième chapitre, nos efforts ont été concentrés sur la modélisation de la MASDS après que nous avons posé certaines hypothèses simplificatrices. Le modèle de notre machine a été développé en écrivant les équations électriques et mécaniques de la MASDS dans le référentiel naturel abc . Le système d'équations obtenu est ensuite réécrit dans un système d'axes orthogonaux (d,q) , grâce à la matrice de transformation de Park. Le modèle de Park développé se prête facilement à la construction de programmes sous Matlab-Simulink destinés à l'étude par simulation numérique des régimes dynamiques. Il faut préciser que le modèle développé a été simplifié de façon à ne faire apparaître que des paramètres identifiables par les deux essais classiques : à vide et à rotor bloqué.

L'objectif du troisième chapitre a été l'identification des paramètres de la MASDS par la méthode classique. Nous avons effectué une série d'essais tels que l'essai à rotor bloqué et l'essai à vide. Les résultats que nous avons obtenus ont été injectés dans le programme que nous avons élaboré sous Matlab-Simulink.

Le quatrième chapitre a été consacré à la comparaison des résultats expérimentaux et de simulation pour la validation du modèle et des paramètres identifiés. Les essais expérimentaux que nous avons effectués sont des essais de démarrage direct avec trois valeurs différentes de la tension d'alimentation. Nous avons enregistré l'évolution en régime transitoire de la vitesse de rotation et du courant d'une phase statorique.

La comparaison effectuée a montré une bonne concordance entre les résultats expérimentaux et ceux du modèle développé. Cette validation ouvre des voies à d'autres travaux à effectuer en perspectives, parmi lesquels nous citons :

- La commande en puissance de la MASDS fonctionnant en génératrice entraînée par une turbine éolienne.
- Le fonctionnement en génératrice auto-excitée de la MASDS.
- La commande vectorielle de la MASDS fonctionnant en moteur.
- La commande directe du couple de la MASDS.
- La commande directe de puissance de la MASDS fonctionnant en génératrice auto-excitée.

-
- [1] Bernard Multon, « Historique des machines électriques et plus particulièrement des machines à réluctance variable ». Revue 3EI, 1995, pp.3-8. <hal-00674038>.
- [2] H.AMIMEUR, “Contribution à la commande d’une machine asynchrone double étoile par Mode de glissement” Mémoire de Magister, Université El Hadj Lakhdar, Batna2008.
- [3] Rachid ABDESSEMED, « modélisation et simulation des machines électriques », Edition Ellipses, Paris 2009, ISBN : 9782729864958.
- [4] S.CHEKKAL, « Intégration des génératrices asynchrones à double étoile dans un système éolien », Thèse de Doctorat, Université Abderrahmane Mira, Bejaïa, 2015.
- [5] F.POITIERS, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l’utilisation de l’énergie éolienne », Thèse de Doctorat en Electronique et Génie Electrique, Ecole Polytechnique de l’Université de Nantes, France 2003.
- [6] K.IDJEDARENE, « Contribution à l’étude et la commande de génératrices asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques éolienne autonomes », Thèse de Doctorat, Université Abderahmane Mira, Béjaïa 2010.
- [7] M. SI BRAHIM, « Etude d’un systeme de conversion de l’énergie éolienne à base de la machine asynchrone », Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou 2015.
- [8] A. MAAFA, “Etude d’un Generateur Eolien Basé sur la Cascade de deux Machines Asynchrones Piloté par un Convertisseur de Fréquence” Mémoire de Magister, Batna - 2011.
- [9] M. ADAMOWICZ, R. STRZELECKI, “Cascaded Doubly Fed Induction Generator for Mini and Micro Power Plants Connected to Grid”, 13th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC 2008). 978-1-4244-1742-1/08/\$25.00 C2008 IEEE.
- [10] R.PERRET « Entraînement électrique 2, machines électriques industrielles». Edition paris : Hermès science : Lavoisier 2007, ISBN 978-2-7462-1557-3.
- [11] T.WILID, G.SYBILLE, « Electrotechnique » ,4^{ème} édition. Edition de Boeck 2005, ISBN PUL 2-7637-8185-3.
- [12] B.BERREHAIL,« identification des paramètres d’un moteur asynchrone à cage »,Mémoire de Fin d'Etudes, Université Mohamed Khider Biskra, Juin 2013.

- [13] CHEKKAL Samira et HAMITOUCHE Kamel, « Etude, Identification, Modélisation et commande de la Machine Asynchrone Double Etoile » Thème d'ingénieur d'état, Université A. Mira BEJAIA 2007-2008

Détails des équations magnétiques :

$$\left(\varphi_{ps1} \right) = P(\theta_{s1}) [L_{ss1}] \cdot P(\theta_{s1})^{-1} \cdot (i_{ps1}) + P(\theta_{s1}) [L_{s1s2}] \cdot P(\theta_{s2})^{-1} \cdot (i_{ps2}) + P(\theta_{s1}) [L_{s1r}] \cdot P(\theta_r)^{-1} \cdot (i_{pr})$$

$$P(\theta_{s1}) [L_{ss1}] \cdot P(\theta_{s1})^{-1} =$$

$$\frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_s + L_{ms} & -\frac{1}{2} L_{ms} & -\frac{1}{2} L_{ms} \\ -\frac{1}{2} L_{ms} & L_s + L_{ms} & -\frac{1}{2} L_{ms} \\ -\frac{1}{2} L_{ms} & -\frac{1}{2} L_{ms} & L_s + L_{ms} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

$$P(\theta_{s1}) [L_{s1s2}] \cdot P(\theta_{s2})^{-1} =$$

$$\frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} L_{ms} \begin{bmatrix} \cos \gamma & \cos(\gamma - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3}) & \cos \gamma & \cos(\gamma - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\gamma - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3}) & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \gamma) & -\sin(\theta - \gamma) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \gamma - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \gamma - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \gamma - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \gamma - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

$$P(\theta_{s1}) [L_{s1r}] \cdot P(\theta_r)^{-1} =$$

$$\frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} L_m \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r & \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & -\sin(\theta - \theta_r) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \theta_r - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \theta_r - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

$$\left(\varphi_{ps2} \right) = P(\theta_{s2}) [L_{s2s1}] \cdot P(\theta_{s1})^{-1} \cdot (i_{ps1}) + P(\theta_{s2}) [L_{ss2}] \cdot P(\theta_{s2})^{-1} \cdot (i_{ps2}) + P(\theta_{s2}) [L_{s2r}] \cdot P(\theta_r)^{-1} \cdot (i_{pr})$$

$$P(\theta_{s2}) [L_{s2s1}] \cdot P(\theta_{s1})^{-1} =$$

$$\frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \gamma) & \cos(\theta - \gamma - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \gamma - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta - \gamma) & -\sin(\theta - \gamma - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \gamma - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} L_{ms} \begin{bmatrix} \cos \gamma & \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\gamma - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\gamma - \frac{4\pi}{3}) & \cos \gamma & \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\gamma - \frac{4\pi}{3}) & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

$$\underline{P(\theta_{s2})[L_{ss2}] \cdot P(\theta_{s2})^{-1} =}$$

$$\frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta - \gamma & \cos(\theta - \gamma - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \gamma - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta - \gamma & -\sin(\theta - \gamma - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \gamma - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_s + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_s + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_s + L_{ms} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta - \gamma & -\sin \theta - \gamma & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \gamma - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \gamma - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \gamma - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \gamma - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

$$\underline{P(\theta_{s2})[L_{s2r}] \cdot P(\theta_r)^{-1} =}$$

$$\frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta - \gamma & \cos(\theta - \gamma - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \gamma - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta - \gamma & -\sin(\theta - \gamma - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \gamma - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} L_m \begin{bmatrix} \cos(\theta_r - \gamma) & \cos(\theta_r - \gamma - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \gamma - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \gamma - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \gamma) & \cos(\theta_r - \gamma - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \gamma - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \gamma - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta - \theta_r & -\sin \theta - \theta_r & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \theta_r - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \theta_r - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

$$\boxed{\underline{(\varphi_{pr}) = P(\theta_r)[L_{rs1}]P(\theta_{s1})^{-1} \cdot (i_{ps1}) + P(\theta_r)[L_{rs2}]P(\theta_{s2})^{-1} \cdot (i_{ps2}) + P(\theta_r)[L_{rr}]P(\theta_r)^{-1} \cdot (i_{pr})}$$

$$\underline{P(\theta_r)[L_{rs1}]P(\theta_{s1})^{-1} =}$$

$$\frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta - \theta_r & \cos(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \theta_r - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta - \theta_r & -\sin(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \theta_r - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} L_m \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) & \cos \theta_r & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) & \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

$$\underline{P(\theta_r)[L_{rs2}]P(\theta_{s2})^{-1} =}$$

$$\frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta - \theta_r & \cos(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \theta_r - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta - \theta_r & -\sin(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \theta_r - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} L_m \begin{bmatrix} \cos(\theta_r - \gamma) & \cos(\theta_r - \gamma - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \gamma - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \gamma - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \gamma) & \cos(\theta_r - \gamma - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \gamma - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \gamma - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta - \gamma & -\sin \theta - \gamma & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \gamma - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \gamma - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \gamma - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \gamma - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

$$P(\theta_r)[L_{rr}]P(\theta_r)^{-1} =$$

$$\frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta - \theta_r & \cos(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \theta_r - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta - \theta_r & -\sin(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \theta_r - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_r + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & L_r + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & L_r + L_{mr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta - \theta_r & -\sin \theta - \theta_r & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \theta_r - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \theta_r - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Quelques relations trigonométriques utiles au calcul :

$$\cos \theta + \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) = 0$$

$$\sin \theta + \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) + \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) = 0$$

$$\cos^2 \theta = \frac{1 + \cos 2\theta}{2}$$

$$\sin^2 \theta = \frac{1 - \cos 2\theta}{2}$$

$$\cos^2 \theta + \cos^2(\theta - \frac{2\pi}{3}) + \cos^2(\theta - \frac{4\pi}{3}) = \frac{3}{2}$$

$$\sin^2 \theta + \sin^2(\theta - \frac{2\pi}{3}) + \sin^2(\theta - \frac{4\pi}{3}) = \frac{3}{2}$$

$$\cos(\theta_1 + \theta_2) = \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 - \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \quad ; \quad \cos(\theta_1 - \theta_2) = \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 + \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2$$

$$\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 = \frac{\cos(\theta_1 + \theta_2) + \cos(\theta_1 - \theta_2)}{2} \quad ; \quad \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2 = \frac{\cos(\theta_1 - \theta_2) - \cos(\theta_1 + \theta_2)}{2}$$

$$\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 + \cos(\theta_1 - \frac{2\pi}{3}) \cdot \cos(\theta_2 - \frac{2\pi}{3}) + \cos(\theta_1 - \frac{4\pi}{3}) \cdot \cos(\theta_2 - \frac{4\pi}{3}) =$$

$$\frac{\cos(\theta_1 + \theta_2) + \cos(\theta_1 - \theta_2)}{2} + \frac{\cos(\theta_1 + \theta_2 - \frac{4\pi}{3}) + \cos(\theta_1 - \theta_2)}{2} + \frac{\cos(\theta_1 + \theta_2 - \frac{8\pi}{3}) + \cos(\theta_1 - \theta_2)}{2} = \frac{3}{2} \cos(\theta_1 - \theta_2)$$

$$\sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2 + \sin(\theta_1 - \frac{2\pi}{3}) \cdot \sin(\theta_2 - \frac{2\pi}{3}) + \sin(\theta_1 - \frac{4\pi}{3}) \cdot \sin(\theta_2 - \frac{4\pi}{3}) =$$

$$\frac{\cos(\theta_1 - \theta_2) - \cos(\theta_1 + \theta_2)}{2} + \frac{\cos(\theta_1 - \theta_2) - \cos(\theta_1 + \theta_2 - \frac{4\pi}{3})}{2} + \frac{\cos(\theta_1 - \theta_2) - \cos(\theta_1 + \theta_2 - \frac{8\pi}{3})}{2} = \frac{3}{2} \cos(\theta_1 - \theta_2)$$

$$\sin \theta_1 \cdot \cos \theta_2 = \frac{\sin(\theta_1 + \theta_2) + \sin(\theta_1 - \theta_2)}{2} \quad ; \quad \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 = \frac{\sin(\theta_1 + \theta_2) - \sin(\theta_1 - \theta_2)}{2}$$

$$\sin \theta_1 \cdot \cos \theta_2 + \sin(\theta_1 - \frac{2\pi}{3}) \cdot \cos(\theta_2 - \frac{2\pi}{3}) + \sin(\theta_1 - \frac{4\pi}{3}) \cdot \cos(\theta_2 - \frac{4\pi}{3}) =$$

$$\frac{\sin(\theta_1 - \theta_2) + \sin(\theta_1 + \theta_2)}{2} + \frac{\sin(\theta_1 - \theta_2) + \sin(\theta_1 + \theta_2 - \frac{4\pi}{3})}{2} + \frac{\sin(\theta_1 - \theta_2) + \sin(\theta_1 + \theta_2 - \frac{8\pi}{3})}{2} = \frac{3}{2} \sin(\theta_1 - \theta_2)$$

$$\cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 + \cos(\theta_1 - \frac{2\pi}{3}) \cdot \sin(\theta_2 - \frac{2\pi}{3}) + \cos(\theta_1 - \frac{4\pi}{3}) \cdot \sin(\theta_2 - \frac{4\pi}{3}) =$$

$$\frac{\sin(\theta_1 + \theta_2) - \sin(\theta_1 - \theta_2)}{2} + \frac{\sin(\theta_1 + \theta_2 - \frac{4\pi}{3}) - \sin(\theta_1 - \theta_2)}{2} + \frac{\sin(\theta_1 + \theta_2 - \frac{8\pi}{3}) - \sin(\theta_1 - \theta_2)}{2} = -\frac{3}{2} \sin(\theta_1 - \theta_2)$$

$$P(\theta_{s1})[L_{ss1}].P(\theta_{s1})^{-1} = P(\theta_{s2})[L_{ss2}].P(\theta_{s2})^{-1} = \begin{pmatrix} L_s + \frac{3}{2}L_{ms} & 0 & 0 \\ 0 & L_s + \frac{3}{2}L_{ms} & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{pmatrix}$$

$$P(\theta_r)[L_r].P(\theta_r)^{-1} = \begin{pmatrix} L_r + \frac{3}{2}L_{mr} & 0 & 0 \\ 0 & L_r + \frac{3}{2}L_{mr} & 0 \\ 0 & 0 & L_r \end{pmatrix}$$

$$P(\theta_{s1})[L_{s1s2}].P(\theta_{s2})^{-1} = (P(\theta_{s2})[L_{s2s1}].P(\theta_{s1})^{-1})^t = \begin{pmatrix} \frac{3}{2}L_{ms} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}L_{ms} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$P(\theta_{s1})[L_{s1r}].P(\theta_r)^{-1} = (P(\theta_{s2})[L_{s2r}].P(\theta_r)^{-1})^t = \begin{pmatrix} \frac{3}{2}L_{msr} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}L_{msr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$P(\theta_r)[L_{rs1}].P(\theta_{s1})^{-1} = (P(\theta_r)[L_{rs2}].P(\theta_{s2})^{-1})^t = \begin{pmatrix} \frac{3}{2}L_{msr} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}L_{msr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Détails du calcul du produit : $P(\theta_{s1})[L_{s1r}].P(\theta_r)^{-1} =$

$$\frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} L_m \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r & \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta - \theta_r & -\sin \theta - \theta_r & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \theta_r - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \theta_r - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Calculons d'abord le produit :

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r & \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta - \theta_r & -\sin \theta - \theta_r & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \theta_r - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \theta_r - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

$$A_{11} = \cos \theta_r \cdot \cos \theta - \theta_r + \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) \cdot \cos(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) + \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \cdot \cos(\theta - \theta_r - \frac{4\pi}{3})$$

$$A_{11} = \frac{\cos \theta + \cos(2\theta_r - \theta) + \cos(\theta - \frac{6\pi}{3}) + \cos(2\theta_r - \theta - \frac{2\pi}{3}) + \cos(\theta - \frac{6\pi}{3}) + \cos(2\theta_r - \theta + \frac{2\pi}{3})}{2}$$

$$A_{11} = \frac{3}{2} \cdot \cos \theta$$

$$A_{12} = - \left\{ \cos \theta_r \cdot \sin \theta - \theta_r + \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) \cdot \sin(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) + \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \cdot \sin(\theta - \theta_r - \frac{4\pi}{3}) \right\}$$

$$A_{12} = - \frac{\sin \theta - \sin(2\theta_r - \theta) + \sin(\theta - \frac{6\pi}{3}) - \sin(2\theta_r - \theta - \frac{2\pi}{3}) + \sin(\theta - \frac{6\pi}{3}) - \sin(2\theta_r - \theta + \frac{2\pi}{3})}{2}$$

$$A_{12} = - \frac{3}{2} \cdot \sin \theta$$

$$A_{13} = 0$$

$$A_{21} = \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \cdot \cos \theta - \theta_r + \cos(\theta_r) \cdot \cos(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) + \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) \cdot \cos(\theta - \theta_r - \frac{4\pi}{3})$$

$$A_{21} = \frac{\cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + \cos(2\theta_r - \theta - \frac{2\pi}{3}) + \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + \cos(2\theta_r - \theta + \frac{2\pi}{3}) + \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + \cos(2\theta_r - \theta)}{2}$$

$$A_{21} = \frac{3}{2} \cdot \cos(\theta - \frac{2\pi}{3})$$

$$A_{22} = - \left\{ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \cdot \sin \theta - \theta_r + \cos(\theta_r) \cdot \sin(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) + \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) \cdot \sin(\theta - \theta_r - \frac{4\pi}{3}) \right\}$$

$$A_{22} = - \frac{\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) - \sin(2\theta_r - \theta - \frac{2\pi}{3}) + \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) - \sin(2\theta_r - \theta + \frac{2\pi}{3}) + \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) - \sin(2\theta_r - \theta)}{2}$$

$$A_{22} = - \frac{3}{2} \cdot \sin(\theta - \frac{2\pi}{3})$$

$$A_{23} = 0$$

$$A_{31} = \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) \cdot \cos \theta - \theta_r + \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \cdot \cos(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) + \cos(\theta_r) \cdot \cos(\theta - \theta_r - \frac{4\pi}{3})$$

$$A_{31} = \frac{\cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) + \cos(2\theta_r - \theta - \frac{4\pi}{3}) + \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) + \cos(2\theta_r - \theta) + \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) + \cos(2\theta_r - \theta + \frac{4\pi}{3})}{2}$$

$$A_{31} = \frac{3}{2} \cdot \cos(\theta - \frac{4\pi}{3})$$

$$A_{32} = - \left\{ \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) \cdot \sin\theta - \theta_r + \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \sin\left(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(\theta_r\right) \cdot \sin\left(\theta - \theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) \right\}$$

$$A_{32} = - \frac{\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) - \sin\left(2\theta_r - \theta - \frac{4\pi}{3}\right) + \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) - \sin\left(2\theta_r - \theta\right) + \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) - \sin\left(2\theta_r - \theta + \frac{4\pi}{3}\right)}{2}$$

$$A_{32} = - \frac{3}{2} \cdot \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right)$$

$$A_{33} = 0$$

$$\frac{2}{3} L_m \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \frac{3}{2} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 0 \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & 0 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{3}{2} L_m & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$P(\theta_{s1}) [L_{s1r}] \cdot P(\theta_r)^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{3}{2} L_m & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Détails du calcul du produit : $P(\theta_{s2}) [L_{s2r}] \cdot P(\theta_r)^{-1} =$

$$\frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta - \gamma & \cos\left(\theta - \gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \gamma - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta - \gamma & -\sin\left(\theta - \gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \gamma - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} L_m \begin{bmatrix} \cos(\theta_r - \gamma) & \cos\left(\theta_r - \gamma - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r - \gamma) & \cos\left(\theta_r - \gamma - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \gamma - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r - \gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta - \theta_r & -\sin\theta - \theta_r & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Calculons d'abord le produit :

$$\begin{bmatrix} \cos(\theta_r - \gamma) & \cos\left(\theta_r - \gamma - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r - \gamma) & \cos\left(\theta_r - \gamma - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \gamma - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r - \gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta - \theta_r & -\sin\theta - \theta_r & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

$$A_{11} = \cos(\theta_r - \gamma) \cdot \cos(\theta - \theta_r) + \cos\left(\theta_r - \gamma - \frac{4\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(\theta_r - \gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(\theta - \theta_r - \frac{4\pi}{3}\right)$$

$$A_{11} = \frac{\cos\theta - \gamma + \cos\left(2\theta_r - \theta - \gamma\right) + \cos\left(\theta - \gamma - \frac{6\pi}{3}\right) + \cos\left(2\theta_r - \theta - \gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(\theta - \gamma - \frac{6\pi}{3}\right) + \cos\left(2\theta_r - \gamma - \theta + \frac{2\pi}{3}\right)}{2}$$

$$A_{11} = \frac{3}{2} \cdot \cos(\theta - \gamma)$$

Le même calcul que précédemment donne :

$$A_{12} = -\frac{3}{2} \cdot \sin(\theta - \gamma)$$

$$A_{13} = 0$$

$$A_{21} = \frac{3}{2} \cdot \cos(\theta - \gamma - \frac{2\pi}{3})$$

$$A_{22} = -\frac{3}{2} \cdot \sin(\theta - \gamma - \frac{2\pi}{3})$$

$$A_{23} = 0$$

$$A_{31} = \frac{3}{2} \cdot \cos(\theta - \gamma - \frac{4\pi}{3})$$

$$A_{32} = -\frac{3}{2} \cdot \sin(\theta - \gamma - \frac{4\pi}{3})$$

$$A_{33} = 0$$

$$\frac{2}{3} L_m \begin{bmatrix} \cos \theta - \gamma & \cos(\theta - \gamma - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \gamma - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta - \gamma & -\sin(\theta - \gamma - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \gamma - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \frac{3}{2} \begin{bmatrix} \cos \theta - \gamma & -\sin \theta - \gamma & 0 \\ \cos(\theta - \gamma - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \gamma - \frac{2\pi}{3}) & 0 \\ \cos(\theta - \gamma - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \gamma - \frac{4\pi}{3}) & 0 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{3}{2} L_m & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$P(\theta_{s2}) [L_{s2r}] \cdot P(\theta_r)^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{3}{2} L_m & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$(P(\theta_{s2}) \cdot [L_{s2r}] \cdot P(\theta_r)^{-1})^t = (P(\theta_r)^{-1})^t \cdot [L_{s2r}]^t \cdot P(\theta_{s2})^t$$

$$(P(\theta_r)^{-1})^t = P(\theta_r) \quad ; \quad [L_{s2r}]^t = [L_{rs2}] \quad ; \quad P(\theta_{s2})^t = P(\theta_{s2})^{-1}$$

$$\Rightarrow (P(\theta_{s2}) \cdot [L_{s2r}] \cdot P(\theta_r)^{-1})^t = P(\theta_r) \cdot [L_{rs2}] \cdot P(\theta_{s2})^{-1}$$

$$P(\theta_r) \cdot [L_{rs2}] \cdot P(\theta_{s2})^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{3}{2} L_m & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Expression du couple électromagnétique dans les axes d et q dans les trois référentiels :

On définit d'abord les angles : $\theta = \theta_{S1} = \theta_{S2} + \gamma = \theta_R + \theta_{gl} \Rightarrow \frac{d\theta_{S1}}{dt} = \frac{d\theta_{S2}}{dt} = \frac{d\theta_R}{dt} + \frac{d\theta_{gl}}{dt}$

La vitesse électrique du rotor est définie comme suit :

$$\omega_r = \frac{d\theta_{gl}}{dt} = \frac{d\theta_{S1}}{dt} - \frac{d\theta_R}{dt}$$

La puissance électromagnétique : c'est le deuxième terme de la puissance instantanée

$$P_{em} = \left\{ \left(\varphi_{ds1} \cdot i_{qs1} - \varphi_{qs1} \cdot i_{ds1} \right) \cdot \frac{d\theta_{s1}}{dt} + \left(\varphi_{ds2} \cdot i_{qs2} - \varphi_{qs2} \cdot i_{ds2} \right) \cdot \frac{d\theta_{s2}}{dt} + \left(\varphi_{dr} \cdot i_{qr} - \varphi_{qr} \cdot i_{dr} \right) \cdot \frac{d\theta_r}{dt} \right\}$$

$$\varphi_{ds1} = L_{s1} \cdot i_{ds1} + L_m \cdot (i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr})$$

$$\varphi_{qs1} = L_{s1} \cdot i_{qs1} + L_m \cdot (i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr})$$

$$\varphi_{ds2} = L_{s2} \cdot i_{ds2} + L_m \cdot (i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr})$$

$$\varphi_{qs2} = L_{s2} \cdot i_{qs2} + L_m \cdot (i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr})$$

$$\varphi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + L_m \cdot (i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr})$$

$$\varphi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + L_m \cdot (i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr})$$

1. Référentiel immobile par rapport au stator :

$$\frac{d\theta_{S1}}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_{gl}}{dt} = \omega_r = 0 - \frac{d\theta_R}{dt} \Rightarrow \frac{d\theta_R}{dt} = -\omega_r$$

$$P_{em} = -\omega_r (\varphi_{dr} \cdot i_{qr} - \varphi_{qr} \cdot i_{dr})$$

$$C_{em} = -(\varphi_{dr} \cdot i_{qr} - \varphi_{qr} \cdot i_{dr})$$

$$C_{em} = -\left\{ \left[L_r \cdot i_{dr} + L_m \cdot (i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \right] \cdot i_{qr} - \left[L_r \cdot i_{qr} + L_m \cdot (i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \right] \cdot i_{dr} \right\}$$

$$C_{em} = -L_m \cdot \left\{ (i_{ds1} + i_{ds2}) \cdot i_{qr} - (i_{qs1} + i_{qs2}) \cdot i_{dr} \right\}$$

$$\boxed{C_{em} = L_m \cdot \left\{ (i_{qs1} + i_{qs2}) \cdot i_{dr} - (i_{ds1} + i_{ds2}) \cdot i_{qr} \right\}}$$

2. Référentiel immobile par rapport au rotor :

$$\frac{d\theta_R}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_{S1}}{dt} = \frac{d\theta_{gl}}{dt} = \omega_r$$

$$P_{em} = \omega_r \cdot \left\{ \left(\varphi_{ds1} \cdot i_{qs1} - \varphi_{qs1} \cdot i_{ds1} \right) + \left(\varphi_{ds2} \cdot i_{qs2} - \varphi_{qs2} \cdot i_{ds2} \right) \right\}$$

$$C_{em} = \left\{ \left[L_{s1} \cdot i_{ds1} + L_m \cdot (i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \right] \cdot i_{qs1} - \left[L_{s1} \cdot i_{qs1} + L_m \cdot (i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \right] \cdot i_{ds1} \right\}$$

$$+ \left\{ \left[L_{s2} \cdot i_{ds2} + L_m \cdot (i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \right] \cdot i_{qs2} - \left[L_{s2} \cdot i_{qs2} + L_m \cdot (i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \right] \cdot i_{ds2} \right\}$$

$$C_{em} = L_m \cdot \left\{ i_{dr} \cdot (i_{qs1} + i_{qs2}) - i_{qr} \cdot (i_{ds1} + i_{ds2}) \right\} + L_m \left\{ (i_{ds1} + i_{ds2}) \cdot i_{qs1} - (i_{qs1} + i_{qs2}) \cdot i_{ds1} + (i_{ds1} + i_{ds2}) \cdot i_{qs2} - (i_{qs1} + i_{qs2}) \cdot i_{ds2} \right\}$$

$$\boxed{C_{em} = L_m \cdot \left\{ i_{dr} \cdot (i_{qs1} + i_{qs2}) - i_{qr} \cdot (i_{ds1} + i_{ds2}) \right\}}$$

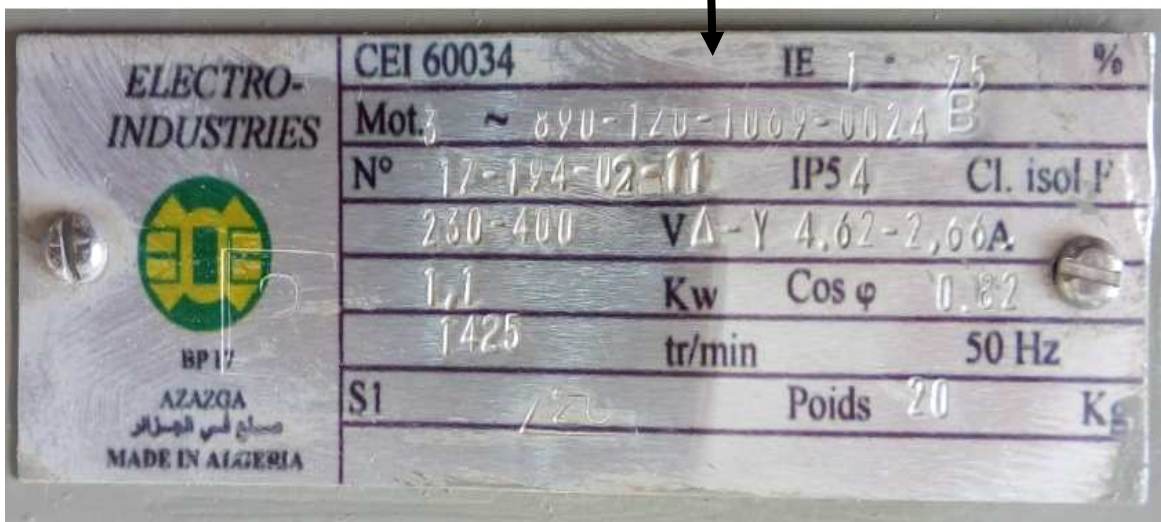
3. Référentiel immobile par rapport au champ tournant :

$$\frac{d\theta_{S1}}{dt} = \omega_s \Rightarrow \frac{d\theta_{gl}}{dt} = \omega_r = \omega_s - \frac{d\theta_R}{dt} \Rightarrow \frac{d\theta_R}{dt} = \omega_s - \omega_r$$

$$P_{em} = \left(\varphi_{ds1} \cdot i_{qs1} - \varphi_{qs1} \cdot i_{ds1} \right) \cdot \omega_s + \left(\varphi_{ds2} \cdot i_{qs2} - \varphi_{qs2} \cdot i_{ds2} \right) \cdot \omega_s + \left(\varphi_{dr} \cdot i_{qr} - \varphi_{qr} \cdot i_{dr} \right) \cdot (\omega_s - \omega_r)$$

$$\begin{aligned}
C_{em} &= \left(\{L_{s1} \cdot i_{ds1} + L_m \cdot (i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr})\} \cdot i_{qs1} - \{L_{s1} \cdot i_{q1} + L_m \cdot (i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr})\} \cdot i_{ds1} \right) \cdot \omega_s \\
&+ \left(\{L_{s2} \cdot i_{ds2} + L_m \cdot (i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr})\} \cdot i_{qs2} - \{L_{s2} \cdot i_{qs2} + L_m \cdot (i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr})\} \cdot i_{ds2} \right) \cdot \omega_s \\
&+ \left(\{L_r \cdot i_{dr} + L_m \cdot (i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr})\} \cdot i_{qr} - \{L_r \cdot i_{qr} + L_m \cdot (i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr})\} \cdot i_{dr} \right) \cdot (\omega_s - \omega_r) \\
C_{em} &= \left(\{L_m \cdot (i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr})\} \cdot i_{qs1} - \{L_m \cdot (i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr})\} \cdot i_{ds1} \right) \cdot \omega_s \\
&+ \left(\{L_m \cdot (i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr})\} \cdot i_{qs2} - \{L_m \cdot (i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr})\} \cdot i_{ds2} \right) \cdot \omega_s \\
&+ \left(\{L_m \cdot (i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr})\} \cdot i_{qr} - \{L_m \cdot (i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr})\} \cdot i_{dr} \right) \cdot (\omega_s - \omega_r) \\
C_{em} &= L_m \cdot \omega_s \cdot \left\{ \begin{aligned} &(i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \cdot i_{qs1} + (i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \cdot i_{qs2} - (i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \cdot i_{ds1} - (i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \cdot i_{ds2} + \\ &(i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \cdot i_{qr} - (i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \cdot i_{dr} \end{aligned} \right\} \\
&- L_m \cdot \omega_r \cdot \left\{ (i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \cdot i_{qr} - (i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \cdot i_{dr} \right\} \\
C_{em} &= -L_m \cdot \omega_r \cdot \left\{ (i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \cdot i_{qr} - (i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \cdot i_{dr} \right\} \\
\boxed{C_{em} = L_m \cdot \left\{ (i_{qs1} + i_{qs2}) \cdot i_{dr} - (i_{ds1} + i_{ds2}) \cdot i_{qr} \right\}}
\end{aligned}$$

Plaque signalétique :



- Puissance nominale $P_n = 1.1 \text{ Kw}$,
- Tension nominale $V_n = 230/400V - \Delta/Y$;
- Courant nominale $I_n = 4.62/2.66A - \Delta/Y$;
- Vitesse nominale $N_n = 1425 \text{tr/min}$;
- Fréquence nominale $f_n = 50 \text{Hz}$;
- Nombre de pair de pôle $P=2$;
- Décalage électrique $\gamma = 60^\circ$;
- Facteur de puissance $\text{Cos } \varphi = 0.82$;

Modélisation, identification et simulation d'une machine asynchrone à double stator

Mots-clés : Machine asynchrone à double stator, Modélisation, identification, Génératrice asynchrone auto-excitée à double stator.

Résumé :

Face à la perspective d'épuisement des énergies fossiles, la recherche de nouveaux dispositifs utilisant les énergies renouvelables est en plein essor. Le travail que nous nous proposons de développer se situe dans ce cadre et se fixe comme objectif d'étudier la machine asynchrone à double stator (MASDE) et son insertion dans une chaîne de conversion de l'énergie éolienne. La machine asynchrone à double stator, est une très bonne candidate pour le remplacement de la machine asynchrone à double alimentation (MADA). En effet, elle présente tous les avantages de la MADA sans présenter son principal inconvénient qui est le système balais-bagues.

Au lieu de commander la machine asynchrone par son rotor dans le cas de la MADA, on peut la commander par l'un de ses deux stators dans le cas de la MASDE, qui devient le stator de commande et le deuxième sert de stator de puissance.