

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلبان بليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Mention Électrotechnique
Spécialité Machines électriques

présenté par

ABDOU HABIBOULLAH BRAHIM

&

MOHAMED LEMINE AHMED MAALOUM

Modélisation d'une Machine Asynchrone double Etoile(MASDE)

Proposé par : R. HACHELAF

Année Universitaire 2017-2018

Remerciements

En premier lieu, nous remercions Dieu le tout puissant qui a guidé nos pas et éclairé notre esprit pour atteindre ce succès.

Notre gratitude s'adresse particulièrement et sincèrement à notre promoteur Mr. R. HACHELAF de nous avoir pleinement suivi et encadré tout au long de ce mémoire, pour ses conseils judicieux, ses encouragements et sa disponibilité.

Nous remercions les membres de jury pour nous avoir fait l'honneur d'accepter de juger ce travail.

Nous remercions en leur étant très reconnaissant tous ceux qui nous ont aidés, encouragés et soutenus de près ou de loin pour la réalisation de ce travail.

Brahim et Med lemine

ملخص: تقدم هذه الأطروحة دراسة لنمذجة ومحاكاة الآلات غير المتزامنة ذات النجم المزدوج. هدفنا هو وضع نموذج للآلة من خلال طريقة الدوائر المترابطة مغناطيسيا ثم قمنا بمحاكاة الآلة بمساعدة برنامج Matlab بعد ذلك قمنا بتصميم الآلة بطريقة طريقة العناصر المنتهية باستخدام برنامج flux2d، والذي يسمح للمغناطيسي العابر بمحاكاة لدراسة الجهاز. ثم قمنا بمقارنة هذه النتائج التي تم الحصول عليها من خلال نتيجة المحاكاة لطريقة الدوائر الكهربائية المتقاربة مغناطيسيا.

كلمات المفاتيح: الآلات غير المتزامنة ذات النجم المزدوج FLUX 2D;; التصميم.

Résumé : ce mémoire présente une étude de la modélisation et de la simulation de machine asynchrone double étoile.

L'objectif de notre travail est l'élaboration d'un modèle de la machine par la méthode des circuits magnétiquement couplés. Par la suite nous avons simulés la machine à l'aide du logiciel Matlab puis nous avons modélisés la machine par la méthode des éléments finis à l'aide de logiciel flux 2d, qui permet de simuler le fonctionnement de la machine en magnéto-transitoire en vue de son étude. Finalement, nous avons comparés les résultats obtenus par simulation avec la méthode des éléments finis et ceux obtenus par la méthode des circuits électriques magnétiquement couplés.

Mots clés : machine asynchrone double étoile(MASDE); FLUX 2d; modélisation.

Abstract : this thesis presents a study of modeling and simulation of dual star asynchronous machines.

The objective of our is the elaboration of a model of the machine by the method of magnetically coupled circuits then we simulated the machine with the help of the software Matlab thereafter we modeled the machine by the method of the finite elements using software flux 2d, which allows simulated magneto-transient for the study of the machine. Then we compared these results obtained by the simulation result of the method of magnetically coupled electrical circuits.

Keywords: dual star asynchronous machines; FLUX 2d; modeling .

Listes des acronymes et abréviations

M_{sr} Inductance mutuelle stator-rotor.

C_{em} Couple électromagnétique.

C_r Couple résistant.

K_f Coefficient de frottement.

J Moment d'inertie.

d, q Axes directs et quadratiques du repère de Park.

u, v Système d'axes généraux.

ω_{coor} Vitesse angulaire des axes (d, q) .

ω_{gl} Pulsation électrique de glissement.

$[\Phi_{S1}]$, $[\Phi_{S2}]$, $[\Phi_r]$ Vecteurs des flux statoriques et rotoriques

$[V_{S1}]$, $[V_{S2}]$, $[V_r]$ Vecteurs des tensions statoriques et rotoriques.

$[I_{S1}]$, $[I_{S2}]$, $[I_r]$ Vecteurs des courants statoriques et rotoriques.

$[R_{S1}]$ $[R_{S2}]$ $[R_r]$ Matrices des résistances statoriques (étoile 1 et 2) et rotoriques

Φ_m Flux magnétisant.

Φ_{md} , Φ_{mq} Flux magnétisants direct et quadrature.

Φ_r Flux rotorique.

Φ_{dS} , Φ_{qS} Flux statoriques selon (d, q) .

Φ_{dr} , Φ_{qr} Flux rotoriques selon (d, q) .

\vec{H} Vecteur champ magnétique.

\vec{E} Vecteur champ électrique.

\vec{B} Vecteur induction magnétique.

Listes des acronymes et abréviations

S_{a1}, S_{b1}, S_{c1} Phases de la première étoile.

S_{a2}, S_{b2}, S_{c2} Phases de la deuxième étoile.

r_a, r_b, r_c Phases rotoriques.

Ω_m Vitesse mécanique du rotor.

ω_s Pulsation électrique statorique.

ω_r Pulsation électrique rotorique.

ω Pulsation mécanique.

P Nombre de pair de pôle.

S_1, S_2, S_r Indices correspondants à l'étoile 1, l'étoile 2 et au rotor.

R_{s1}, R_{s2}, R_r Résistances statoriques et rotoriques.

L_m Inductance mutuelle cyclique stator-rotor.

l_{s1}, l_{s2}, l_r Inductances de fuite statorique et rotorique.

l_m Inductance de fuite mutuelle commune aux deux étoiles.

L_{ms} Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle statorique.

L_{mr} Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle rotorique.

MASDE Machine Asynchrone Double Etoile.

σ Conductivité électrique.

ν Réflectivité magnétique.

\vec{A} Vecteur potentiel magnétique.

A_e Potentiel magnétique dans un élément.

W Nombre de tours par phase.

P_{em} Puissance électromagnétique.

α Angle électrique de décalage.

α_m Angle réel de décalage ou l'angle mécanique de décalage.

\vec{J} Vecteur de densité de courant total.

\vec{B}_r Induction rémanente des aimants.

μ Perméabilité magnétique.

Tableau de matière

Introduction générale-----	Erreur ! Signet non défini.
Chapitre 1 : Généralités sur les machines polyphasées : -----	Erreur ! Signet non défini.
1.1. Introduction :-----	Erreur ! Signet non défini.
1.2. Histoire des machines électriques-----	Erreur ! Signet non défini.
1.3 Structure des machines polyphasées : -----	Erreur ! Signet non défini.
1.3.1 Machines polyphasées de type 1 : -----	Erreur ! Signet non défini.
1.3.2 Machines polyphasées de type 2 : -----	Erreur ! Signet non défini.
1.4 Applications des Machines Polyphasées : -----	Erreur ! Signet non défini.
1.5 Avantages des Machines Polyphasées -----	Erreur ! Signet non défini.
1.5.1 Minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques :---	Erreur ! Signet non défini.
1.5.2 Segmentation de puissance :-----	Erreur ! Signet non défini.
1.5.3 Fiabilité : -----	Erreur ! Signet non défini.
1.6 Inconvénients des machines polyphasées :-----	Erreur ! Signet non défini.
1.7 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone double étoile : ---	Erreur ! Signet non défini.
Conclusion : -----	Erreur ! Signet non défini.
Chapitre2 : Modélisation et simulation de la MASDE -----	Erreur ! Signet non défini.
2.1 Introduction -----	Erreur ! Signet non défini.
2.2 Description de la machine asynchrone double étiole-----	Erreur ! Signet non défini.
2.3 Hypothèse simplificatrice -----	Erreur ! Signet non défini.
2.4 Modèle naturel de la MASDE-----	Erreur ! Signet non défini.
2.4.1 Equations des tensions -----	Erreur ! Signet non défini.
2.4.2 Equations des flux -----	Erreur ! Signet non défini.
2.4.3 Equation mécanique -----	Erreur ! Signet non défini.

Table des matières

2.4.4 Couple électromagnétique -----	Erreur ! Signet non défini.
2.4.5 Principe de transformation de Park -----	Erreur ! Signet non défini.
2.4.6 Modèle de la MASDE selon le système d'axes « d, q »-----	Erreur ! Signet non défini.
2.4.7 Application de la transformation de Park à la MASDE -----	Erreur ! Signet non défini.
2.5. Choix du Référentiel -----	Erreur ! Signet non défini.
2.5.1 Référentiel lié au stator -----	Erreur ! Signet non défini.
2.5.2 Référentiel lié au rotor -----	Erreur ! Signet non défini.
2.5.3 Référentiel lié au champ tournant-----	Erreur ! Signet non défini.
2.6 Modèle de la machine -----	Erreur ! Signet non défini.
2.6.1 Mise sous forme d'équation d'état-----	Erreur ! Signet non défini.
2.7 Résultats de simulation -----	Erreur ! Signet non défini.
Conclusion -----	Erreur ! Signet non défini.
Chapitre 3: simulation de la Machine asynchrone double étoilé Et analyse par la méthode des éléments finis-----	Erreur ! Signet non défini.
3.1 Introduction : -----	Erreur ! Signet non défini.
3.2 Méthode des éléments finis : -----	Erreur ! Signet non défini.
3.3. Modélisation électromagnétique : -----	Erreur ! Signet non défini.
3.3.1. Mode employé :-----	Erreur ! Signet non défini.
3.3.5 Principe de la méthode des éléments finis :-----	Erreur ! Signet non défini.
3.4 Logiciel de résolution-----	Erreur ! Signet non défini.
3.5 Logiciel flux 2D : -----	Erreur ! Signet non défini.
3.6. Domaine d'Application : -----	Erreur ! Signet non défini.
3.7. Enchaînement des Programmes de FLUX2D : -----	Erreur ! Signet non défini.
3.7.1 Module pré-processeur :-----	Erreur ! Signet non défini.
3.7.2 Module processeur : -----	Erreur ! Signet non défini.

Table des matières

3.7.3 Module post-processeur de Flux-2D (PostPro_2D) :-----	Erreur ! Signet non défini.
3.8 Simulation de la MASDE : -----	Erreur ! Signet non défini.
3.8.1 Présentation dimensionnel de la machine étudiée -----	Erreur ! Signet non défini.
3.8.2 Matériaux conducteurs :-----	Erreur ! Signet non défini.
3.8.3 Matériaux magnétiques : -----	Erreur ! Signet non défini.
3.8.4 Couplage avec les équations de circuit :-----	Erreur ! Signet non défini.
3.9 Résultats de simulation par la magnéto transitoire -----	Erreur ! Signet non défini.
3.9.1 Introduction-----	Erreur ! Signet non défini.
3.9.2 Simulations des comportements dynamiques de la MASDE-----	Erreur ! Signet non défini.
3.9.3 Comparaison des résultats de simulation : -----	Erreur ! Signet non défini.
Conclusion : -----	Erreur ! Signet non défini.
Conclusion Générale -----	Erreur ! Signet non défini.
Annexes -----	Erreur ! Signet non défini.
Bibliographie -----	Erreur ! Signet non défini.

Listes des figures

- Fig. 1.1** Machines asynchrone multiphasées pour la voiture électrique. Trolleybus **Erreur ! Signet non défini.**
- Fig. 1. 2 :** Exemple d'application d'une machine asynchrone de 6 phases dans la marine ... **Erreur ! Signet non défini.**
- Fig.1.3** Exemple d'application d'une machine asynchrone de 6 phases**Erreur ! Signet non défini.**
- Fig. 1.4 :** Modes de fonctionnement suivant le glissement**Erreur ! Signet non défini.**
- Fig. 2.1 :** Représentation schématique des enroulements de la MASDE.**Erreur ! Signet non défini.**
- Fig.2.2** Représentation du modèle généralisé de la MASDE selon l'axe « u, v »...**Erreur ! Signet non défini.**
- Fig.2.3** caractéristiques des courants i_{as1} , i_{bs1} et i_{cs1} **Erreur ! Signet non défini.**
- Fig.2.4** déphasage entre les deux étoiles.....**Erreur ! Signet non défini.**
- Fig.2.5** les caractéristique des courants i_{qs} et i_{ds} **Erreur ! Signet non défini.**
- Fig.2.6** les caractéristique des flux ϕ_{dr} et ϕ_{qr} **Erreur ! Signet non défini.**
- Fig.2.7** la caractéristique de vitesse.....**Erreur ! Signet non défini.**
- Fig.2.8** la caractéristique de couple**Erreur ! Signet non défini.**
- Fig.2.9** caractéristiques des courants i_{as1} , i_{bs1} et i_{cs1} **Erreur ! Signet non défini.**
- Fig.2.10** caractéristique des courants i_{qs} et i_{ds}**Erreur ! Signet non défini.**
- Fig. 2.11** les caractéristiques des flux ϕ_{dr} et ϕ_{qr}**Erreur ! Signet non défini.**
- Fig.2.12** caractéristiques de vitesse**Erreur ! Signet non défini.**
- Fig.2.13** la caractéristique de couple**Erreur ! Signet non défini.**
- Fig.3.1** Fonction d'interpolation d'un élément.....**Erreur ! Signet non défini.**
- Fig.3.2** Schéma des différents modules du logiciel Flux-2D.....**Erreur ! Signet non défini.**
- Fig.3.3** grossière section du stator et de l'induit du rotor.....**Erreur ! Signet non défini.**
- Fig.3.4.** Dimension des encoches, **a)** l'encoche statorique, **b)** l'encoche rotorique. **Erreur ! Signet non défini.**

Liste des figures

Fig.3.5 Régions du domaine de calcul du champ électromagnétique.....	Erreur ! Signet non défini.
Fig.3.6 Répartition du maillage.....	Erreur ! Signet non défini.
Fig. 3.7 Caractéristiques B(H) du matériau magnétique STEEL_NLIN.	Erreur ! Signet non défini.
Fig.3.8 Circuit représentant les effets d'extrémités liés à la géométrie.....	Erreur ! Signet non défini.
Fig.3.9 Circuit équivalent de la cage d'écureuil.	Erreur ! Signet non défini.
Fig.3.10 Lignes du champ magnétique à vide.....	Erreur ! Signet non défini.
Fig. 3.11 L'induction du champ magnétique à vide.....	Erreur ! Signet non défini.
Fig. 3.12 Courants statoriques à vide.	Erreur ! Signet non défini.
Fig.3.13 déphasage électriques entre les deux étoiles.....	Erreur ! Signet non défini.
Fig. 3.14 vitesse de rotation.....	Erreur ! Signet non défini.
Fig. 3.15 couple électromagnétique	Erreur ! Signet non défini.
Fig. 3.16 courant rotorique à vide	Erreur ! Signet non défini.
Fig.3.17 Lignes du champ magnétique en charge	Erreur ! Signet non défini.
Fig. 3.18 L'induction du champ magnétique en charge.....	Erreur ! Signet non défini.
Fig. 3.19 Courants statoriques en charge.	Erreur ! Signet non défini.
Fig. 3.20 vitesse de rotation.....	Erreur ! Signet non défini.
Fig. 3.21 couple électromagnétique	Erreur ! Signet non défini.
Fig. 3.22 courant rotoriques en charge	Erreur ! Signet non défini.
Fig.3.23 comparaison des résultats des vitesses	Erreur ! Signet non défini.
Fig.3.24 comparaison des résultats des courants	Erreur ! Signet non défini.
Fig.3.25 comparaison des résultats des vitesses	Erreur ! Signet non défini.

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Machines polyphasées de Type 1 Erreur ! Signet non défini.

Tableau1.2 Machines polyphasées de Type2 Erreur ! Signet non défini.

Tableau 3.1 Caractéristique de la MASDE. Erreur ! Signet non défini.

Tableau 3.2 Caractéristiques statoriques et rotoriques de la MASDE. Erreur ! Signet non défini.

Tableau 3.3B(H) du matériau magnétique STEEL_NLIN Erreur ! Signet non défini.

Tableau de matière

Tableau de matière

1.1. Introduction :-----	3
1.2. Histoire des machines électriques-----	3
1.3 Structure des machines polyphasées :-----	4
1.3.1 Machines polyphasées de type 1 :-----	4
1.3.2 Machines polyphasées de type 2 :-----	6
1.4 Applications des Machines Polyphasées :-----	7
1.5 Avantages des Machines Polyphasées -----	9
1.5.1 Minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques :-----	9
1.5.2 Segmentation de puissance :-----	10
1.5.3 Fiabilité :-----	10
1.6 Inconvénients des machines polyphasées :-----	10
1.7 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone double étoile :-----	11
Conclusion :-----	12
2.1 Introduction-----	13
2.2 Description de la machine asynchrone double étoile-----	13
2.3 Hypothèse simplificatrice -----	14
2.4 Modèle naturel de la MASDE-----	15
2.4.1 Equations des tensions -----	15
2.4.2 Equations des flux -----	16
2.4.3 Equation mécanique -----	18
2.4.4 Couple électromagnétique -----	18
2.4.5 Principe de transformation de Park -----	19

Tableau de matière

2.4.6	Modèle de la MASDE selon le système d'axes « d, q »	20
2.4.7	Application de la transformation de Park à la MASDE	21
2.5.	Choix du Référentiel	25
2.5.1	Référentiel lié au stator	25
2.5.2	Référentiel lié au rotor	25
2.5.3	Référentiel lié au champ tournant	26
2.6	Modèle de la machine	26
2.6.1	Mise sous forme d'équation d'état	26
2.7	Résultats de simulation	30
	Conclusion	37
3.1	Introduction :	38
3.2	Méthode des éléments finis :	38
3.3.	Modélisation électromagnétique :	38
3.3.1.	Mode employé :	39
3.3.5	Principe de la méthode des éléments finis :	41
3.4	Logiciel de résolution	42
3.5	Logiciel flux 2D :	43
3.6.	Domaine d'Application :	43
3.7.	Enchaînement des Programmes de FLUX2D :	43
3.7.1	Module pré-processeur :	44
3.7.2	Module processeur :	44
3.7.3	Module post-processeur de Flux-2D (PostPro_2D) :	44
3.8	Simulation de la MASDE :	45
3.8.1	Présentation dimensionnel de la machine étudiée	45

Tableau de matière

3.8.2 Matériaux conducteurs :-----	50
3.8.3 Matériaux magnétiques :-----	50
3.8.4 Couplage avec les équations de circuit :-----	51
3.9 Résultats de simulation par la magnéto transitoire-----	53
3.9.1 Introduction-----	53
3.9.2 Simulations des comportements dynamiques de la MASDE-----	53
3.9.3 Comparaison des résultats de simulation :-----	60
Conclusion :-----	63
Annexes-----	66
Bibliographie-----	70

Liste des figures

Fig. 1.1 Machines asynchrone multiphasées pour la voiture électrique. Trolleybus	8
Fig. 1. 2 : Exemple d'application d'une machine asynchrone de 6 phases dans la marine.....	8
Fig.1.3 Exemple d'application d'une machine asynchrone de 6 phases	9
Fig. 1.4 : Modes de fonctionnement suivant le glissement.....	11
Fig. 2.1 : Représentation schématique des enroulements de la MASDE.	14
Fig.2.2 Représentation du modèle généralisé de la MASDE selon l'axe « u, v ».....	19
Fig.2.3 caractéristiques des courants i_{as1} , i_{bs1} et i_{cs1}	30
Fig.2.4 déphasage entre les deux étoiles.....	30
Fig.2.5 les caractéristique des courants i_{qs} et i_{ds}	31
Fig.2.6 les caractéristique des flux ϕ_{dr} et ϕ_{qr}	31
Fig.2.7 la caractéristique de vitesse.....	32
Fig.2.8 la caractéristique de couple	32
Fig.2.9 caractéristiques des courants i_{as1} , i_{bs1} et i_{cs1}	34
Fig.2.10 caractéristique des courants i_{qs} et i_{ds}	34
Fig. 2.11 les caractéristiques des flux ϕ_{dr} et ϕ_{qr}	35
Fig.2.12 caractéristiques de vitesse	35
Fig.2.13 la caractéristique de couple	36
Fig.3.1 Fonction d'interpolation d'un élément.....	42
Fig.3.2 Schéma des différents modules du logiciel Flux-2D.....	44
Fig.3.3 grossière section du stator et de l'induit du rotor	46
Fig.3.4. Dimension des encoches, a) l'encoche statorique, b) l'encoche rotorique.	47
Fig.3.5 Régions du domaine de calcul du champ électromagnétique.....	48
Fig.3.6 Répartition du maillage.....	49
Fig. 3.7 Caractéristiques $B(H)$ du matériau magnétique STEEL_NLIN.	51

Liste des figures

Fig.3.8 Circuit représentant les effets d'extrémités liés à la géométrie.....	52
Fig.3.9 Circuit équivalent de la cage d'écureuil.....	52
Fig.3.10 Lignes du champ magnétique à vide.....	53
Fig. 3.11 L'induction du champ magnétique à vide.....	54
Fig. 3.12 Courants statoriques à vide.	54
Fig.3.13 déphasage électriques entre les deux étoiles.....	55
Fig. 3.14 vitesse de rotation.....	55
Fig. 3.15 couple électromagnétique	56
Fig. 3.16 courant rotorique à vide	56
Fig.3.17 Lignes du champ magnétique en charge	57
Fig. 3.18 L'induction du champ magnétique en charge.....	58
Fig. 3.19 Courants statoriques en charge.	58
Fig. 3.20 vitesse de rotation.....	59
Fig. 3.21 couple électromagnétique	59
Fig. 3.22 courant rotoriques en charge	60
Fig.3.23 comparaison des résultats des vitesses	61
Fig.3.24 comparaison des résultats des courants	61
Fig.3.25 comparaison des résultats des vitesses	62

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Machines polyphasées de Type 1.	6
Tableau1.2 Machines polyphasées de Type2.....	7
Tableau 3.1 Caractéristique de la MASDE.	45
Tableau 3.2 Caractéristiques statoriques et rotoriques de la MASDE.	46
Tableau 3.3B(H) du matériau magnétique STEEL_NLIN.....	50

Les machines électrique triphasés sont de loin les mieux connues et restent les plus utilisées. Cependant pour les applications électriques de forte puissance, des problèmes apparaissent tant au niveau de l'alimentation que de la machine. Ce qui impose d'autre exigence dans leurs performances et leurs caractéristiques, d'où le besoin de faire évoluer leurs structures.[1]

Les machines polyphasées offrent une alternative intéressante à la réduction des contraintes appliquées aux interrupteurs comme aux bobinages. En effet la multiplication dunombre de phase permet de réduire l'amplitude et d'augmenter la fréquence des ondulations de couple, plus facilement a filtré par la charge mécanique. De plus ces machines permettent en fractionnement de la puissance et de ce fait une réduction des tensions commutéesà courant donné. En plus la multiplication du nombre de phasesoffre une fiabilité accrue en permettant de fonctionner avec une ou plusieurs phases en défaut. Les machines polyphasées sont présentes dans les domaines de la marine, la traction, l'industrie l'automobile...etc.[2]

Un des exemples les plus courants de machines multi-phraséeset la Machine Asynchrone Double Etoile(MASDE). Dans la configuration classique, deuxenroulements triphasés identiques, les deux étoiles, se partagent le même stator et sont décalés d'un angle électrique de 30 degré. Ces enroulements ont le même nombre de pôle et sont alimentés à la même fréquence. La structure du rotor reste identique à celle d'une machine triphasée, il peut donc être soit à cage d'écureuil, soit bobiné pour former un enroulement triphasé. Une telle machine a l'avantage, outre la segmentation de puissance et la redondance intéressante qu'elle introduit, de réduire de manieur significative les ondulations du couple électromagnétique et les pertes rotoriques [2].

Notre travail s'articule autour de trois chapitres :

Le premier chapitre présente une vue globale sur les machines polyphasées (caractéristiques ; exploitation ; les avantages et les inconvénients), et particulièrement la MASDE où on a donné un aperçu sur son fonctionnement.

Dans le deuxième chapitre nous intéressons à la simulation de MASDE sous l'environnement du logiciel Matlab, qui aura lieu après la modélisation par la méthode des circuits électriques magnétiquement couplés.

L'objectif du troisième chapitre sera la simulation de MASDE par la méthode des éléments finis bidimensionnel (MEF-2d). Où, nous déterminons les performances de la machine en régime transitoire avec la considération de la géométrie réelle et la non linéarité des matériaux. Afin de faire une comparaison avec les résultats obtenus par la méthode des circuits électriques magnétiquement couplés.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale et quelques perspectives.

Chapitre 1 Généralités sur les machines polyphasées

1.1.Introduction :

Les machines triphasées à courant alternatif dominent assez largement le domaine des machines électriques. Mais depuis longtemps déjà on s'intéresse aux machines ayant un nombre de phases supérieur à trois. Ces machines sont souvent appelées "machines à grand nombre de phases" ou "machines polyphasées" qui offrent une alternative intéressante à la réduction des contraintes appliquées aux interrupteurs et aux bobinages [3], [4].

Dans ce premier chapitre, nous allons commencer par une présentation des différentes structures des machines asynchrones multi-phases. Après, nous parlerons brièvement de l'application des machines multi-phases tout en citant leurs avantages et leur inconvénient. En fin on donne un aperçu sur le fonctionnement de MASDE.

1.2. Histoire des machines électriques

En 1821 l'Anglais Michael Faraday réalise le premier moteur électromagnétique, et en 1822 Peter Barlow lui adjoint une roue dentée.

En 1831 Faraday énonce les principes de l'induction électromagnétique. En parallèle, le Russe Friedrich Emil Lenz et l'Américain Joseph Henry ont de leur côté effectué des travaux similaires contribuant ainsi à la découverte et à la compréhension de ce phénomène.

L'année suivante Ampère en collaboration avec le constructeur français Hippolyte Pixii, ont réalisé la génératrice à courant continu.

En 1836 l'Anglais Hyde Clarke réalise une machine dont la structure est inversée par rapport à celle de Pixii/Ampère qui améliorait le commutateur redresseur.

En 1842 Davidson utilise un des premiers moteurs tournant à réactance variable.

En 1848 apparaissent les moteurs de Froment dont le couple atteignait 500 N.m. Ces moteurs furent utilisés pour les applications industrielles.

En 1860 la compagnie "l'Alliance" fabriquait industriellement des génératrices de structures complexes.

En 1865 l'Italien Antonio Pacinotti construit un prototype de machine à courant continu à induit en anneau et collecteur radial dont le fonctionnement est très amélioré.

Chapitre 1 Généralités sur les machines polyphasées

En 1888 Nikola Tesla a inventé le premier moteur à courant alternatif, qui a eu un rôle majeur dans le développement de l'industrie électrique.

en 1889 l'Allemand Michael Dolivo Dobrowolski réalise la première machine asynchrone triphasée cette dernière domine assez largement le domaine des machines électriques, grâce à plusieurs avantages qu'elle présente par rapport aux autres types. Elle est la plus simple à fabriquer, la moins coûteuse, la moins exigeante en termes d'entretien, présente un taux de défaillance très peu élevé, fabriquée en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances ...etc.

Depuis la fin des années 1920, les machines à deux enroulements triphasés au stator avaient été introduites pour accroître la puissance des alternateurs synchrones de très forte puissance.

1.3 Structure des machines polyphasées :

Plusieurs configurations sont possibles pour les deux types des machines multiphasées; celles dont le nombre de phases sont multiples de trois et celles dont le décalage angulaire α entre deux phases adjacentes est réguliers. [7], [8]

1.3.1 Machines polyphasées de type 1 :

Ce type de machines, appelées aussi machines multi-étoile, sont des machines dont le nombre de phase statorique q est un multiple de trois, de sorte que l'on puisse les grouper en n étoiles triphasées [9] :

$$q = 3n \quad (n = 1, 2, 3, 4, 5, \dots).$$

Pour un nombre donné de phases, il peut y avoir plusieurs configurations suivant le décalage angulaire entre deux bobines adjacentes.

En effet, une machine double étoile dont le nombre de phases statoriques $q=6$ et les étoiles

Sont décalées de $\alpha = \pi/6$ a des caractéristiques différentes de celles d'une machine dont les étoiles sont décalées de $\alpha = \pi/3$.

Pour différencier les configurations possibles, on peut introduire un nombre équivalent de phases, noté q_α , dont la définition est comme suit : $q_\alpha = \pi/\alpha$.

Chapitre 1 Généralités sur les machines polyphasées

Le tableau 1.1 donne le détail de quelques exemples des machines multi-étoile.

Nombre de Phase (q)	Nombre Equivalent de phase (q_α)	Décalage angulaire (α)	Représentation schématique, position des bobines.
3	3	$\pi/3$	
6	3	$\pi/3$	
6	6	$\pi/6$	
9	9	$\pi/9$	
12	6	$\pi/6$	

Chapitre 1 Généralités sur les machines polyphasées

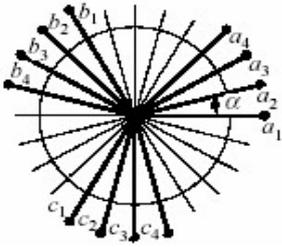
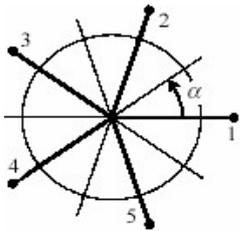
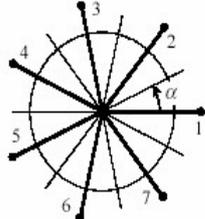
12	12	$\pi/12$	
----	----	----------	---

Tableau 1.1 Machines polyphasées de Type 1.

1.3.2 Machines polyphasées de type 2 :

Les machines polyphasées de type 2 sont des machines dont le nombre de phases statoriques q est un nombre impair. Si α représente le décalage angulaire entre deux bobines adjacentes, les phases sont alors régulièrement décalées de $\frac{2\pi}{q} = 2\alpha$. On a donc toujours : $q = q_\alpha = \frac{\pi}{\alpha}$.

Le tableau 1.2 donne le détail de quelques exemples des machines polyphasées de type 2.

Nombre de Phase (q)	Nombre Equivalent de phase (q_α)	Décalage angulaire (α)	Représentation schématique, position des bobines.
5	5	$\pi/5$	
7	7	$\pi/7$	

Chapitre 1 Généralités sur les machines polyphasées

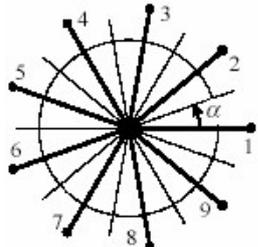
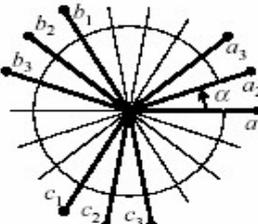
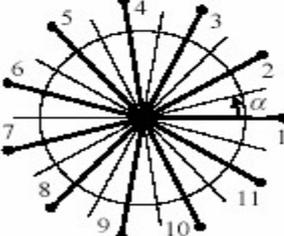
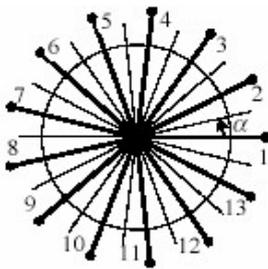
9	9	$\pi/9$	
9	9	$\pi/9$	
11	11	$\pi/11$	
13	13	$\pi/13$	

Tableau1.2 Machines polyphasées de Type2.

1.4 Applications des Machines Polyphasées :

Les machines polyphasées sont utilisées beaucoup plus dans les applications de puissances élevées. Parmi ces applications on a lavoiture électrique (Fig.1.1), la marine (les bateaux, etc....) (Fig.1.2), la traction ferroviaire, l’industrie pétrochimique, l’avionique, etc...[8].

Chapitre 1 Généralités sur les machines polyphasées



Fig. 1.1 Machines asynchrone multiphasées pour la voiture électrique. Trolleybus



Fig. 1.2 : Exemple d'application d'une machine asynchrone de 6 phases dans la marine.

Une autre application concerne l'utilisation des machines polyphasées dans les systèmes de production de l'énergie éolienne : la machine double étoile génère de l'énergie à travers deux systèmes triphasés

Chapitre 1 Généralités sur les machines polyphasées

connectés à un transformateur pour adapter les tensions des six phases aux tensions des réseaux (Fig.1.3).

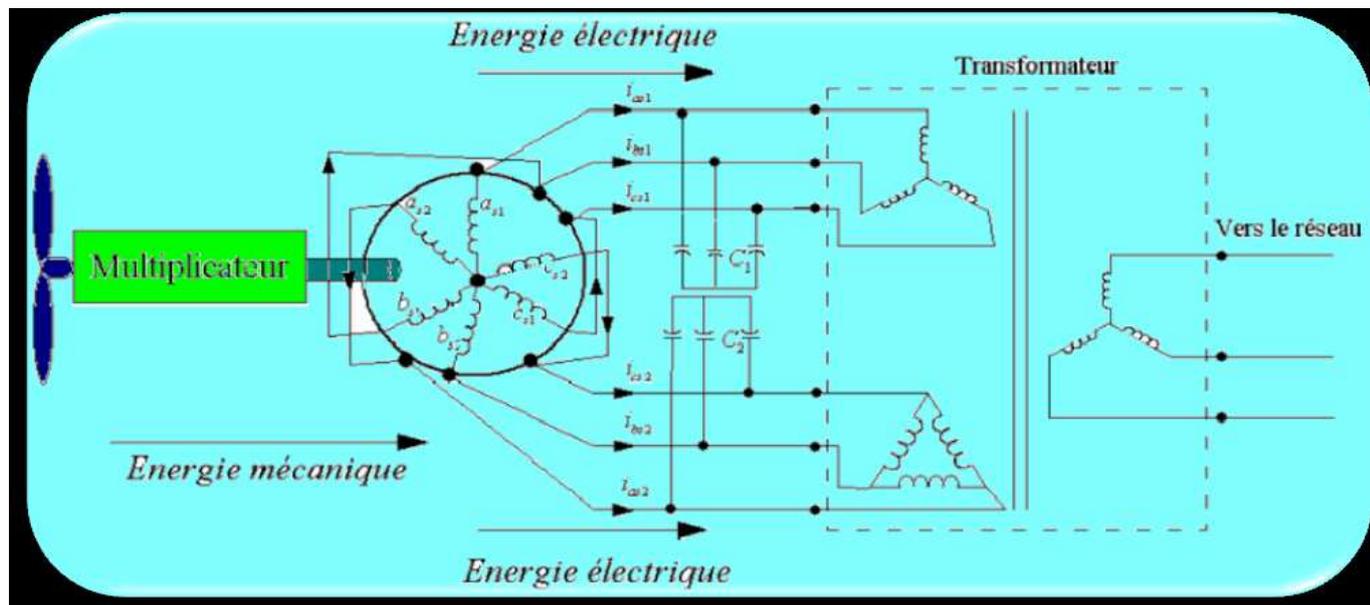


Fig.1.3 Exemple d'application d'une machine asynchrone de 6 phases.

1.5 Avantages des Machines Polyphasées

Les machines polyphasées sont plus avantageuses que celles conventionnelles parmi ces avantages on peut citer :

- La minimisation des ondulations du couple électromagnétiques lorsque la machine est alimentée par des convertisseurs statiques (onduleur) et la minimisation des pertes rotoriques.
- La segmentation de puissance.
- La fiabilité [8].

1.5.1 Minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques :

Les machines polyphasées permettent la réduction des ondulations de couple (période et amplitude) parce que les harmoniques cinq et sept sont naturellement minimisés dans ces machines [10], [8]. En plus, pratiquement, une machine multi-phasée a des pertes rotoriques moindres qu'une machine triphasée.

Chapitre 1 Généralités sur les machines polyphasées

1.5.2 Segmentation de puissance :

Par l'augmentation du nombre de phases, la puissance est automatiquement augmentée. L'une des solutions pour réduire les courants de phases sans réduire les tensions d'alimentations, est d'augmenter le nombre de phases statoriques. La puissance totale demandée par une machine est alors réduite dans chaque phase. Avec cette puissance, on peut alimenter la machine par un onduleur dont les composants semi-conducteurs de calibre inférieur peuvent fonctionner à des fréquences de commutation plus élevées. Cela permet de minimiser les ondulations des courants et du couple. La segmentation de puissance est l'avantage principal des machines polyphasées, que l'on met le plus en avant de nos jours.

1.5.3 Fiabilité :

Le régime dégradé (par la perte de l'une des phases par la défection des éléments de semi-conducteurs dont est constitué l'onduleur alimentant la machine) engendre une perte de contrôle de la machine, ainsi que des ondulations du couple de fortes amplitudes. L'une des solutions pour pouvoir commandé la machine dans ce régime consiste à relier le neutre de la machine au point milieu de la source de tension continue. Néanmoins, avec les machines ayant une structure polyphasées, les contraintes susmentionnées peuvent être réduites tant qu'au moins trois phases de l'ensemble machine-convertisseur restent saines.

Plus le nombre de phases augmente, plus on a de degrés de liberté pour commander la machine.

1.6 Inconvénients des machines polyphasées :

L'inconvénient majeur des machines polyphasées est l'apparition des courants harmoniques de circulation lors d'une alimentation par onduleur de tension. La multiplication du nombre des semi-conducteurs avec la structure dynamique est fortement non linéaire et l'existence d'un fort couplage entre le couple et le flux, ce qui complique évidemment sa commande.

Le coût : le nombre d'éléments semi-conducteurs dont est constitué le convertisseur statique augmente avec l'augmentation du nombre de phases statoriques de la machine, ce qui augmente le coût de l'ensemble convertisseur-machine. [8]

Il est nécessaire de développer des techniques de commande rapprochée pour les convertisseurs statiques spécifiés et adapté pour les machines polyphasées de type 2, puisque les méthodes élaborées

Chapitre 1 Généralités sur les machines polyphasées

pour les systèmes triphasés ne peuvent pas directement être appliquées aux systèmes à nombre de phases impaires tel que (5 phases, 7 phases, etc.).

1.7 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone double étoile :

Les courants statoriques de la machine asynchrone double Etoile créent un champ magnétique tournant dans les deux stators (l'étoile 1 alimenté par des courants triphasés et l'étoile 2 alimenté par les mêmes courants triphasés mais décalé d'un angle $\alpha=30^\circ$). La fréquence de rotation de ce champ est imposée par la fréquence des courants statoriques « f_s » c'est-à-dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation électrique, la vitesse de ce champ tournant est appelée vitesse de synchronisme « ω_s ». Elle définit comme suite, [7].

$$\omega_s = \frac{f_s}{p} [\text{rad/s}] \quad (1.1)$$

Ces deux Champs tournants produits par les deux enroulements statoriques vont induire des courants dans les barres du rotor. Ainsi générant des forces électromotrices qui feront tourner le rotor à une vitesse inférieure à celui du synchronisme ($\omega < \omega_s$), ainsi les effets de l'induction statoriques sur les courants induits rotoriques manifestent par l'élaboration d'un couple de force électromagnétique sur le rotor tel que l'écart des vitesses soit réduit. La différence de vitesse entre le rotor et le champ statorique est dite vitesse de glissement : $= \omega_s - \omega_r$. [11]. On dira alors que ces deux champs glissent par rapport au rotor et on définit ce glissement par le rapport :

$$g = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (1.2)$$

Les différents modes de fonctionnement dépendent de la valeur du glissement :

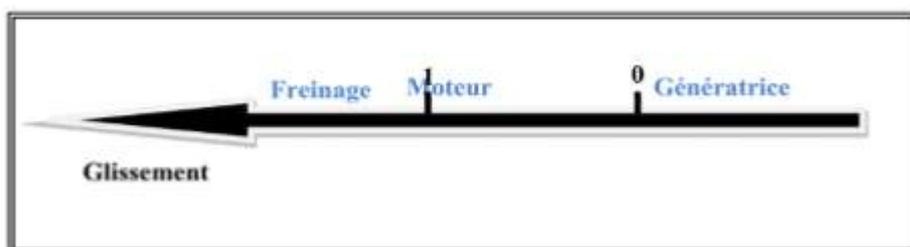


Fig. 1.4 : Modes de fonctionnement suivant le glissement.

Chapitre 1 Généralités sur les machines polyphasées

Conclusion :

Ce premier chapitre a eu pour objectif de présenter un ensemble d'information des généralités sur les machines polyphasées relative aux caractéristiques, aux exploitations, aux avantages et aux inconvénients.

La machine double étoile est la machine polyphasées la plus courante, sans doute parce qu'elle constitue un bon compromis entre la segmentation de puissance suffisante et un ensemble convertisseur-machine pas trop compliqué et de prix acceptable.

Après s'être familiarisé avec les machines polyphasées, nous pouvons dès lors passer à la modélisation de la machine double étoiles Ses, l'objectif du deuxième chapitre.

Chapitre 2 Modélisation et simulation de la MASDE

2.1 Introduction

Comme tout système l'étude de machine électrique s'appuie sur un modèle de représentation. Cette modélisation est très importante pour la conception, l'étude de la commande et des performances de ces machines.

La modélisation MASDE fait appel à des équations en général très complexes. En effet, la répartition des enroulements et la géométrie propre de cette machine rendent sont modèle difficile à mettre en œuvre. Cependant, l'adoption de certaines hypothèses simplificatrices permet de contourner cette difficulté.

Après la description et la modélisation de la machine basée sur la théorie unifiée des machines électriques classiques, dites encore théorie généralisée, cette dernière est basée sur la transformation de Park qui rapporte les équations électriques statoriques et rotoriques à des axes perpendiculaires électriquement (direct et en quadrature) [12].

Dans ce chapitre, nous allons faire aussi la simulation de la MASDE par Matlab.

2.2 Description de la machine asynchrone double étoile

La MASDE se compose d'un stator portant deux enroulements triphasés identiques et décalés entre eux d'un angle électrique $\alpha = 30^\circ$ et d'un rotor {cage d'écureuil}. La Fig. 2.3 représente schématiquement les enroulements de la MASDE. Les angles θ_1 et $(\theta_1 - \alpha)$ représentent respectivement la position du rotor (phase a_r) par rapport à l'étoile 1 (phase a_{s1}) et à l'étoile 2 (phase a_{s2}). Les grandeurs relatives aux deux étoiles (1 et 2) seront notées respectivement par les indices 1 et 2, [7].

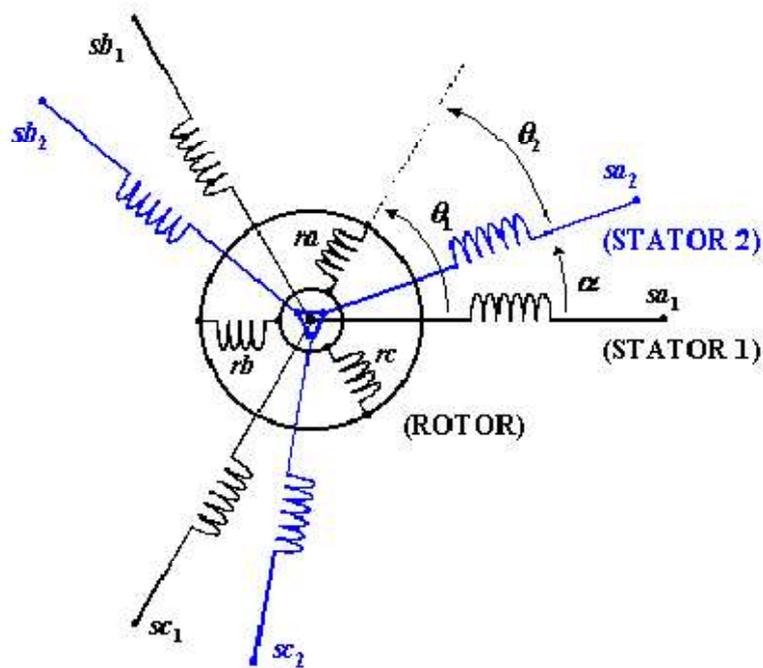


Fig. 2.1 :Représentation schématique des enroulements de la MASDE.

2.3Hypothèse simplificatrice

Avant de commencer la modélisation de la machine, on prend quelques hypothèses simplificatrices pour faciliter quelques difficultés concernant le comportement de la machine à étudier. Ces hypothèses sont données par [14] [15]:

- Le fonctionnement de la machine est supposé sans saturation du circuit magnétique et on néglige l'effet d'hystérésis.
- La construction de la machine est supposée homogène c'est-à-dire ; la longueur de l'entrefer est constante ;
- Nous admettons de plus que la force magnétomotrice créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale.
- Les résistances ne varient pas avec la température ;
- On admettra que les deux enroulements triphasés statoriques sont équilibrés et identiques ;
- Effet de peau négligé.

Chapitre 2 Modélisation et simulation de la MASDE

2.4 Modèle naturel de la MASDE

En tenant compte des hypothèses simplificatrices citées ci-dessus, et la notation des vecteurs des grandeurs tension, courant et flux, on peut écrire pour, [16].

Les vecteurs des tensions, courants et flux statoriques sont :

Pour l'étoile 1 :

$$\begin{cases} [V_{s1}] = [v_{sa1} v_{sb1} v_{sc1}]^T \\ [I_{s1}] = [i_{sa1} i_{sb1} i_{sc1}]^T \\ [\varphi_{s1}] = [\varphi_{sa1} \varphi_{sb1} \varphi_{sc}]^T \end{cases} \quad (2.1)$$

Pour l'étoile 2 :

$$\begin{cases} [V_{s2}] = [v_{sa2} v_{sb2} v_{sc2}]^T \\ [I_{s2}] = [i_{sa} i_{sb} i_{sc2}]^T \\ [\varphi_{s2}] = [\varphi_{sa} \varphi_{sb} \varphi_{sc}]^T \end{cases} \quad (2.2)$$

Les vecteurs des tensions, des courants et des flux rotoriques sont :

$$\begin{cases} [V_r] = [v_{ra} v_{rb} v_{rc}]^T \\ [I_r] = [i_{ra} i_{rb} i_{rc}]^T \\ [\varphi_r] = [\varphi_{ra} \varphi_{rb} \varphi_{rc}]^T \end{cases} \quad (2.3)$$

2.4.1 Equations des tensions

La combinaison de la loi d'Ohm et de la loi de Lenz permet d'écrire les relations suivant

$$[V_{s1}] = [R_{s1}][I_{s1}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{s1}] \quad (2.4)$$

$$[V_{s2}] = [R_{s2}][I_{s2}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{s2}] \quad (2.5)$$

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \quad (2.6)$$

Chapitre 2 Modélisation et simulation de la MASDE

Où :

$[R_{s1}]$, $[R_{s2}]$, $[R_r]$: Les matrices des résistances statoriques (étoile 1 et 2) et rotoriques respectivement

$$\begin{cases} [R_{s1}] = R_{s1}[ID]_{3*3} \\ [R_{s2}] = R_{s2}[ID]_{3*3} \\ [R_r] = R_r[ID]_{3*3} \end{cases} \quad (2.7)$$

Avec :

$[ID]_{3*3}$: La matrice identité d'ordre 3.

R_{s1} : La résistance d'une phase de la 1^{ère} étoile.

R_{s2} : La résistance d'une phase de la 2^{ème} étoile.

R_r : La résistance d'une phase du rotor.

2.4.2 Equations des flux

Les flux statoriques et rotoriques en fonction des courants, des inductances propres et des inductances mutuelles, sont exprimés par les équations suivantes :

$$[\Phi_{s1}] = [L_{s1,s1}][I_{s1}] + [M_{s1,s2}][I_{s2}] + [M_{s1,r}][I_r] \quad (2.8)$$

$$[\Phi_{s2}] = [M_{s2,s1}][I_{s1}] + [L_{s2,s2}][I_{s2}] + [M_{s2,r}][I_r] \quad (2.9)$$

$$[\Phi_r] = [M_{r,s1}][I_{s1}] + [M_{r,s2}][I_{s2}] + [L_{r,r}][I_r] \quad (2.10)$$

Les sous matrices des inductances dans les équations sont exprimés comme suit :

$$[L_{s1,s1}] = \begin{bmatrix} L_{s1} + L_{ms} \cos(0) & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & L_{s1} + L_{ms} \cos(0) & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & L_{s1} + L_{ms} \cos(0) \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Chapitre 2 Modélisation et simulation de la MASDE

$$[L_{s2,s2}] = \begin{bmatrix} L_{s2} + L_{ms} \cos(0) L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) L_{s2} + L_{ms} \cos(0) L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) L_{s2} + L_{ms} \cos(0) \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$[L_{r,r}] = \begin{bmatrix} L_r + L_{mr} \cos(0) L_{mr} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) L_{mr} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{mr} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) L_r + L_{mr} \cos(0) L_{mr} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{mr} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) L_{mr} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) L_r + L_{mr} \cos(0) \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$[M_{s1,s2}] = \begin{bmatrix} L_{ms} \cos(\alpha) L_{ms} \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) L_{ms} \cos\left(\alpha + \frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\alpha + \frac{4\pi}{3}\right) L_{ms} \cos(\alpha) L_{ms} \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) L_{ms} \cos\left(\alpha + \frac{4\pi}{3}\right) L_{ms} \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$[M_{s1,r}] = \begin{bmatrix} \cos(\theta_m) \cos\left(\theta_m + \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\theta_m + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_m + \frac{4\pi}{3}\right) L_{ms} \cos(\theta_m) \cos\left(\theta_m + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_m + \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\theta_m + \frac{4\pi}{3}\right) \cos(\theta_m) \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$[M_{s2,r}] = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) \cos\left(\theta_2 + \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\theta_2 + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_2 + \frac{4\pi}{3}\right) L_{ms} \cos(\theta_2) \cos\left(\theta_2 + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_2 + \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\theta_2 + \frac{4\pi}{3}\right) \cos(\theta_2) \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$[M_{s2,s1}] = [M_{s1,s2}]^T, [M_{r,s1}] = [M_{s1,r}]^T, [M_{r,s2}] = [M_{s2,r}]^T$$

Avec :

L_{s1} : L'inductance propre de la 1^{ère} étoile.

L_{s2} : L'inductance propre de la 2^{ème} étoile.

L_r : L'inductance propre d'une phase du rotor.

L_{ms} : La valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle statorique.

L_{mr} : La valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle rotorique.

Chapitre 2 Modélisation et simulation de la MASDE

M_{sr} : La valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle entre une étoile et le rotor.

2.4.3 Equation mécanique

L'équation fondamentale de rotation du rotor est d'écrire par les deux relations suivantes :

$$\frac{d}{dt} \Omega_m = \frac{1}{J} (C_{em} - C_r - K_f \Omega_m) \quad (2.17)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_m = \Omega_m \quad (2.18)$$

Avec :

J : Le moment d'inertie de la machine.

C_{em} : Le couple électromagnétique.

C_r : Le couple résistant (couple de la charge).

K_f : Le coefficient de frottement.

2.4.4 Couple électromagnétique

L'expression du couple électromagnétique est obtenue par la dérivation de la Co-énergie:

$$C_{em} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} [I_{s1}]^T \\ [I_{s2}]^T \\ [I_{s3}]^T \end{bmatrix} \left\{ \frac{\delta}{\delta \theta_m} \begin{bmatrix} [I_{s1,s1}] [M_{s1,s2}] [M_{s1,r}] \\ [M_{s2,s1}] [I_{s2,s2}] [M_{s2,r}] \\ [M_{r,s1}] [M_{r,s2}] [I_{r,r}] \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} [I_{s1}] \\ [I_{s2}] \\ [I_r] \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

D'après les sous matrices des inductances, on trouve que les sous matrices suivantes

$[M_{s1,r}]$ et $[M_{s2,r}]$ dépendent de θ_m ce qui donné une expression du couple électromagnétique plus simple que l'équation (2.19).

$$C_{em} = [I_{s1}]^T \frac{d}{d\theta_m} \{ |M_{s1,r} | [I_r] \} + [I_{s2}]^T \frac{d}{d\theta_m} \{ |M_{s2,r} | [I_r] \} \quad (2.20)$$

Chapitre 2 Modélisation et simulation de la MASDE

Les équations (2.4), (2.5), (2.6), (2.7), (2.8), (2.9), (2.17), (2.18) et (2.20), forment le modèle électromagnétique complet de la MASDE dans le système réel, en tenant compte des hypothèses simplificatrices précitées.

2.4.5 Principe de transformation de Park

Le modèle de Park est basé sur la transformation d'un système triphasé d'axes (a, b, c) à un système équivalent biphasé d'axes (d, q) créant la même force magnétomotrice. Une seconde transformation de Park est appelée la transformation de Park modifiée. Cette modification permet de conserver la puissance lors de passage du système triphasé celui du biphasé ou inversement.

Elle s'appelle souvent la transformation des deux axes qui fait correspondre aux variables réelles de la machine (flux, courants et tensions) leurs composantes relatives d'axe direct « d », d'axe en quadrature « q » et homopolaire « o ».

Ceci permet d'obtenir des inductances mutuelles constantes entre les différents enroulements. Ce passage est illustré sur la figure ci-dessous qui donne le modèle générale de la MASDE selon le système d'axes générale « u, v ».

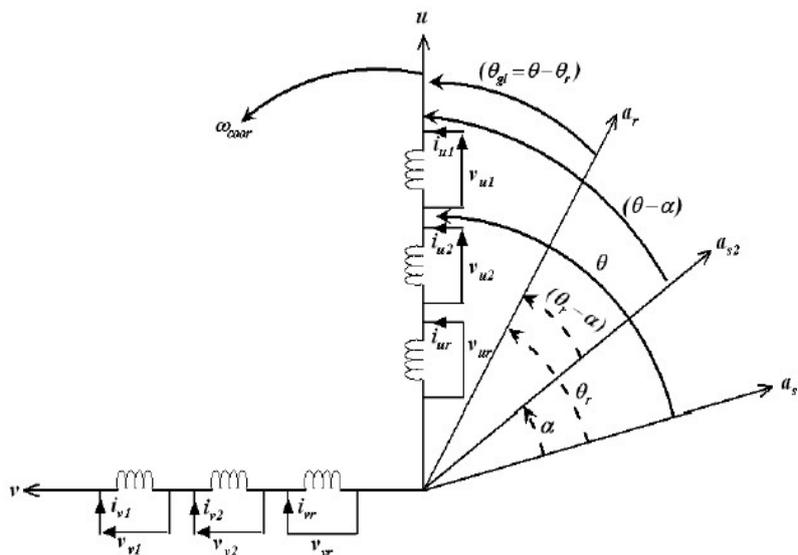


Fig.2.2 Représentation du modèle généralisé de la MASDE selon l'axe « u, v ».

Les systèmes d'équations différentielles de la MASDE selon l'axe « u, v » tournant à la vitesse ω_{coor} .

Chapitre 2 Modélisation et simulation de la MASDE

2.4.6 Modèle de la MASDE selon le système d'axes « d, q »

Ce système d'axes « d, q » est fixé par rapport au champ électromagnétique créé par les enroulements statoriques, d'où $w_{\text{coor}} = w_s$, $\theta = \int_0^t w_s dt$. L'expression générale de la transformation de Park est obtenue par la projection des grandeurs triphasées de la machine sur deux axes perpendiculaires d et q .

$$[G_{dqo}] = [A_p(\theta)][G_{abc}] \quad (2.21)$$

La transformation de PARK est définie comme suit :

Pour l'étoile 1 :

$$[A_p(\theta_{s1})] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Pour l'étoile 2 :

$$[A_p(\theta_{s2})] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \alpha) & \cos\left(\theta - \alpha + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta - \alpha) & -\sin\left(\theta - \alpha + \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Pour le rotor :

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

Avec :

$[A_p(\theta_{s1})]$: Matrice de transformation du premier enroulement statorique (étoile 1).

Chapitre 2 Modélisation et simulation de la MASDE

$[A_p(\theta_{s2})]$: Matrice de transformation du deuxième enroulement statorique (étoile 2).

$[A_p(\theta_r)]$: Matrice de transformation d'enroulement rotorique.

$[G_{abc}]$: Est le vecteur assemblé des grandeurs du système triphasé équilibré.

$[G_{dq0}]$: Le vecteur assemblé des grandeurs du système biphasé.

2.4.7 Application de la transformation de Park à la MASDE

a. Equations des tensions

Appliquons la transformation de PARK

$$\begin{cases} [A_p(\theta_{s1})]^{-1}[V_{s1}] = [R_{s1}][A_p(\theta_{s1})]^{-1}[I_{s1}] + \frac{d}{dt}([A_p(\theta_{s1})]^{-1}[\varphi_{s1}]) \\ [A_p(\theta_{s2})]^{-1}[V_{s2}] = [R_{s2}][A_p(\theta_{s2})]^{-1}[I_{s2}] + \frac{d}{dt}([A_p(\theta_{s2})]^{-1}[\varphi_{s2}]) \\ [A_p(\theta_r)]^{-1}[V_r] = [R_r][A_p(\theta_r)]^{-1}[I_r] + \frac{d}{dt}([A_p(\theta_r)]^{-1}[\varphi_r]) \end{cases} \quad (2.25)$$

La matrice de PARK c'est une matrice orthogonale, c'est-à-dire $[A_p(\theta)]^{-1} = [A_p(\theta)]^T$.

La transformation de PARK peut être appliquée sur les tensions, les courants et les flux.

Multiplication l'équation (2.25) par $[A_p(\theta_{s1})]$ pour la tension $[V_{s1}]$ on obtient :

$$[V_{sdq,1}] = [R_{s1}][i_{dq,s1}] + [A_p(\theta_{s1})] \frac{d}{dt}([A_p(\theta_{s1})]^{-1}[\varphi_{dq,s1}]) \quad (2.26)$$

$$[V_{sdq,1}] = [R_{s1}][i_{dq,s1}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{dq,s1}] + [A_p(\theta_{s1})]^{-1} \frac{d\theta}{dt} \frac{d}{dt} + [A_p(\theta_{s1})][\varphi_{dq,s1}] \quad (2.27)$$

On démontre que :

$$[A_p(\theta_{s1})] \left(\frac{d}{dt}([A_p(\theta_{s1})]^{-1}) \right) = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{d\theta}{dt}$$

On pose : $\frac{d\theta_{s1}}{dt} = \frac{d\theta_{s2}}{dt} = \omega_s$ d'où le résultat final donné par :

$$\begin{bmatrix} V_{as1} \\ V_{ds1} \\ V_{qs1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{s1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s1} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as1} \\ i_{ds1} \\ i_{qs1} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as1} \\ \varphi_{ds1} \\ \varphi_{qs1} \end{bmatrix} + W_{coord} \begin{bmatrix} 0 \\ -\varphi_{ds1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Chapitre 2 Modélisation et simulation de la MASDE

Encore en développant la matrice avec la composante homopolaire nulle, nous obtenons le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} V_{ds1} = R_{s1}i_{ds1} + \frac{d}{dt}\varphi_{ds1} - W_{coor}\varphi_{qs1} \\ V_{qs1} = R_{s1}i_{qs1} + \frac{d}{dt}\varphi_{ds1} + W_{coor}\varphi_{ds1} \end{cases} \quad (2.29)$$

Du même raisonnement, l'étoile 2 aura les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{ds2} = R_{s2}i_{ds2} + \frac{d}{dt}\varphi_{ds2} - W_{coor}\varphi_{qs2} \\ V_{qs2} = R_{s2}i_{qs2} + \frac{d}{dt}\varphi_{ds2} + W_{coor}\varphi_{ds2} \end{cases} \quad (2.30)$$

De la même façon pour le rotor, on obtient les équations suivantes :

$$\begin{cases} 0 = R_r i_r + \frac{d}{dt}\varphi_r - (W_{coor} - W_r)\varphi_{qs1} \\ 0 = R_r i_r + \frac{d}{dt}\varphi_r + (W_{coor} - W_r)\varphi_{ds1} \end{cases} \quad (2.31)$$

Finalement on peut écrire les équations qui définissent les tensions pour les deux

Étoiles et le rotor à court-circuit dans la MASDE comme suit :

$$\begin{cases} V_{ds1} = R_{s1}i_{ds1} + \frac{d}{dt}\varphi_{ds1} - W_{coor}\varphi_{qs1} \\ V_{qs1} = R_{s1}i_{qs1} + \frac{d}{dt}\varphi_{ds1} + W_{coor}\varphi_{ds1} \\ V_{ds2} = R_{s2}i_{ds2} + \frac{d}{dt}\varphi_{ds2} - W_{coor}\varphi_{qs2} \\ V_{qs2} = R_{s2}i_{qs2} + \frac{d}{dt}\varphi_{ds2} + W_{coor}\varphi_{ds2} \\ 0 = R_r i_r + \frac{d}{dt}\varphi_r - (W_{coor} - W_r)\varphi_{qs1} \\ 0 = R_r i_r + \frac{d}{dt}\varphi_r + (W_{coor} - W_r)\varphi_{ds1} \end{cases} \quad (2.32)$$

On constate que ces équations sont plus simples par rapport aux équations originales.

Elles sont exprimées en fonction des courants et des flux totaux.

b. Equations des flux

On applique la transformation de Park sur le système d'équations (2.8), (2.9), (2.10), on obtient :

Chapitre 2 Modélisation et simulation de la MASDE

$$\begin{cases} [\varphi_{s1}] = [L_{s1,s1}][A_p(\theta_{s1})]^{-1}[I_{s1}] + [M_{s1,s2}][A_p(\theta_{s1})]^{-1}[I_{s2}] + [M_{s1,r}][A_p(\theta_{s1})]^{-1}[I_r] \\ [\varphi_{s2}] = [M_{s2,s1}][A_p(\theta_{s1})]^{-1}[I_{s1}] + [L_{s2,s2}][A_p(\theta_{s2})]^{-1}[I_{s2}] + [M_{s2,r}][A_p(\theta_r)]^{-1}[I_r] \\ [\varphi_r] = [M_{r,s1}][A_p(\theta_{s1})]^{-1}[I_{s1}] + [L_{r,s2}][A_p(\theta_{s2})]^{-1}[I_{s2}] + [M_{r,r}][A_p(\theta_r)]^{-1}[I_r] \end{cases} \quad (2.33)$$

$$\begin{cases} [\varphi_{dqs1}] = [L_{s1,s1}][I_{dqs1}] + [M_{s1,s2}][I_{dqs2}] + [M_{s1,r}][I_{dqr}] \\ [\varphi_{dqs2}] = [M_{s2,s1}][I_{dqs1}] + [L_{s2,s2}][I_{dqs2}] + [M_{s2,r}][I_{dqr}] \\ [\varphi_r] = [M_{r,s1}][I_{dqs1}] + [L_{r,s2}][I_{dqs2}] + [M_{r,r}][I_{dqr}] \end{cases} \quad (2.34)$$

$$\begin{cases} \varphi_{ds1} = L_{s1}I_{ds1} + \frac{3}{2}L_{ms}I_{ds1} + \frac{3}{2}L_{ms}I_{ds2} + \frac{3}{2}L_{sr}I_{dr} \\ \varphi_{qs1} = L_{s1}I_{qs1} + \frac{3}{2}L_{ms}I_{qs1} + \frac{3}{2}L_{ms}I_{qs2} + \frac{3}{2}L_{sr}I_{qr} \\ \varphi_{ds2} = L_{s2}I_{ds2} + \frac{3}{2}L_{ms}I_{ds2} + \frac{3}{2}L_{ms}I_{ds1} + \frac{3}{2}L_{sr}I_{dr} \\ \varphi_{qs2} = L_{s2}I_{qs2} + \frac{3}{2}L_{ms}I_{qs2} + \frac{3}{2}L_{ms}I_{qs1} + \frac{3}{2}L_{sr}I_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_{s1}I_{dr} + \frac{3}{2}L_{ms}I_{dr} + \frac{3}{2}L_{ms}I_{ds1} + \frac{3}{2}L_{sr}I_{ds2} \\ \varphi_{qr} = L_{s1}I_{qr} + \frac{3}{2}L_{ms}I_{qr} + \frac{3}{2}L_{ms}I_{qs1} + \frac{3}{2}L_{sr}I_{qs2} \end{cases} \quad (2.35)$$

On pose : $\frac{3}{2}L_{ms} = \frac{3}{2}L_{sr} = \frac{3}{2}L_{mr} = L_m$

L_m : Inductance mutuelle cyclique entre l'étoile 1, l'étoile 2 et le rotor.

Donc le système d'équations (2.35) est écrire comme suit :

$$\begin{cases} \varphi_{ds1} = L_{s1}I_{ds1} + L_m(I_{ds1} + I_{ds2} + I_{dr}) \\ \varphi_{qs1} = L_{s1}I_{qs1} + L_m(I_{qs1} + I_{qs2} + I_{qr}) \\ \varphi_{ds2} = L_{s2}I_{ds2} + L_m(I_{ds2} + I_{ds1} + I_{dr}) \\ \varphi_{qs2} = L_{s2}I_{qs2} + L_m(I_{qs2} + I_{qs1} + I_{qr}) \\ \varphi_{dr} = L_{s1}I_{dr} + L_m(I_{dr} + I_{ds1} + I_{ds2}) \\ \varphi_{qr} = L_{s1}I_{qr} + L_m(I_{qr} + I_{qs1} + I_{qs2}) \end{cases} \quad (2.36)$$

C. Equation mécanique

Lors de changement du repère, il faut trouver l'expression du couple électromagnétique dans le nouveau repère.

Pour calculer l'expression du couple instantané, il est nécessaire de déterminer la puissance instantanée. La puissance instantanée absorbée par la machine asynchrone double étoile est donnée par l'expression suivante :

$$P_{abc} = [v_{s1}]^T [I_{s1}] + [v_{s2}]^T [I_{s2}] \quad (2.37)$$

Chapitre 2 Modélisation et simulation de la MASDE

Ce qui donne :

$$p_{abc} = v_{as1}i_{as1} + v_{bs1}i_{bs1} + v_{cs1}i_{cs1} + v_{as2}i_{as2} + v_{bs2}i_{bs2} + v_{cs2}i_{cs2} \quad (2.38)$$

Comme nous l'avons indiqué précédemment, la transformation de Park permet de conserver la puissance, on peut écrire alors :

$$p_{abc} = v_{ds1}i_{ds1} + v_{qs1}i_{qs1} + v_{ds2}i_{ds2} + v_{qs2}i_{qs2} \quad (2.39)$$

On remplace les tensions et les courants d'axes (d, q) dans le système d'équations (2.38) par leurs expressions dans l'équation (2.32), on trouve l'expression de la puissance absorbée instantanée suivantes :

$$P_{abs} = R_{s1}i_{ds1}^2 + R_{s1}i_{qs1}^2 + R_{s2}i_{ds2}^2 + R_{s2}i_{qs2}^2 + W_{coor}(\varphi_{ds} i_{qs1} - \varphi_{qs1}i_{ds1} + \varphi_{ds2}i_{qs2} - \varphi_{qs2}i_{ds2} + d\varphi_{ds1}dti_{ds1} + d\varphi_{qs1}dti_{qs1} + d\varphi_{ds2}dti_{ds2} + d\varphi_{qs2}dti_{qs2}) \quad (2.40)$$

On constate que la puissance instantanée développée se compose de trois termes :

- Le premier terme est identifiable aux pertes Joules.
- Le second terme correspond à la puissance électromagnétique emmagasinée.
- Le troisième terme représente la puissance électrique transformée en puissance mécanique (les pertes fer sont supposées négligeables).

La puissance et le couple électromagnétique peuvent s'écrire sous la forme universelle:

$$P_{em} = \Omega C_{em} \quad (2.41)$$

Ω : La vitesse de rotation mécanique du rotor.

C_{em} : Le couple électromagnétique développé.

Chapitre 2 Modélisation et simulation de la MASDE

On a dans l'expression de la puissance absorbée (2.40) le deuxième terme qui représente la puissance électromagnétique.

$$P_{em} = \omega_{coor} (\phi_{ds1} i_{qs1} - \phi_{qs1} i_{ds1} + \phi_{ds2} i_{qs2} - \phi_{qs2} i_{ds2}) \quad (2.42)$$

D'après l'équation (2.42) il est clair que le couple électromagnétique est de la forme suivante :

$$C_{em} = p (\phi_{ds1} i_{qs1} + \phi_{qs1} i_{ds1} - \phi_{ds2} i_{qs2} - \phi_{qs2} i_{ds2}) \quad (2.43)$$

Avec : p est le nombre de paires de pôles de la machine.

2.5. Choix du Référentiel

Pour étudier la théorie des régimes transitoires de la machine asynchrone double étoile, on peut utiliser trois systèmes d'axes de coordonnées du plan d'axes (d, q) .

2.5.1 Référentiel lié au stator

Dans ce référentiel, les axes (d, q) sont immobiles par rapport au stator ($\omega_{coor}=0$).

Dans ce cas, la phase $As1$ et d coïncident. Ce référentiel est le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées et dont l'avantage ne nécessite pas une transformation vers le système réel.

L'utilisation de ce système permet d'étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines à courant alternatif.

2.5.2 Référentiel lié au rotor

Dans ce référentiel, les axes (d, q) sont immobiles par rapport au rotor tournant à une vitesse ω_r donc ($\omega_{coor}=\omega_r$).

Chapitre 2 Modélisation et simulation de la MASDE

L'utilisation de ce référentiel permet d'étudier les régimes transitoires dans les machines alternatives synchrones et asynchrones avec une connexion non symétrique des circuits du rotor.

2.5.3 Référentiel lié au champ tournant

Dans ce référentiel, les axes (d, q) sont immobiles par rapport au champ électromagnétique créé par les deux étoiles du stator ($\omega_{\text{coor}} = \omega_s$).

Ce référentiel est généralement utilisé dans le but de pouvoir appliquer une commande de vitesse, de couple, etc. puisque les grandeurs dans ce référentiel sont de forme continue.

2.6 Modèle de la machine

Dans notre travail, on utilise le référentiel lié au champ tournant pour la modélisation de la MASDE. Dans ce cas, le modèle de la MASDE devient :

$$\begin{cases} V_{ds1} = R_{s1}i_{ds1} + \frac{d}{dt}\varphi_{ds1} - \omega_s\varphi_{qs1} \\ V_{qs1} = R_{s1}i_{qs1} + \frac{d}{dt}\varphi_{ds1} + \omega_s\varphi_{ds1} \\ V_{ds2} = R_{s2}i_{ds2} + \frac{d}{dt}\varphi_{ds2} - \omega_s\varphi_{qs2} \\ V_{qs2} = R_{s2}i_{qs2} + \frac{d}{dt}\varphi_{ds2} + \omega_s\varphi_{ds2} \\ 0 = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt}\varphi_r - (\omega_s - \omega_r)\varphi_{qr} \\ 0 = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt}\varphi_r + (\omega_s - \omega_r)\varphi_{dr} \end{cases} \quad (2.44)$$

2.6.1 Mise sous forme d'équation d'état

Le flux magnétisant ϕ_m est la somme des deux flux magnétisants direct ϕ_{md} et quadrature ϕ_{mq}

D'où :

Chapitre 2 Modélisation et simulation de la MASDE

$$\phi_m = \sqrt{\phi_{md}^2 + \phi_{mq}^2} \quad (2.45)$$

Les deux expressions des flux magnétisants en fonction des courants statoriques et rotoriques sont

$$\begin{cases} \phi_{md} = L_m(i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \\ \phi_{mq} = L_m(i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \end{cases} \quad (2.46)$$

En introduisant les expressions des flux magnétisants (2.46) dans le système d'équations (2.36), on obtient :

$$\begin{cases} \phi_{ds1} = L_{s1}I_{ds1} + \phi_{md} \\ \phi_{qs1} = L_{s1}I_{qs1} + \phi_{mq} \\ \phi_{ds2} = L_{s2}I_{ds2} + \phi_{md} \\ \phi_{qs2} = L_{s1}I_{qs1} + \phi_{mq} \\ \phi_{dr} = L_{s1}I_{dr} + \phi_{md} \\ \phi_{qr} = L_{s1}I_{qr} + \phi_{mq} \end{cases} \quad (2.47)$$

A partir de l'équation (2.47) on tire :

$$\begin{cases} i_{ds1} = \frac{(\phi_{ds1} - \phi_{md})}{L_{s1}} \\ i_{qs1} = \frac{(\phi_{qs1} - \phi_{mq})}{L_{s1}} \\ i_{ds} = \frac{(\phi_{ds2} - \phi_{md})}{L_{s1}} \\ i_{ds1} = \frac{(\phi_{qs2} - \phi_{mq})}{L_{s1}} \\ i_{dr} = \frac{(\phi_{dr} - \phi_{md})}{L_{s1}} \\ i_{qr} = \frac{(\phi_{qr} - \phi_{mq})}{L_{s1}} \end{cases} \quad (2.48)$$

Chapitre 2 Modélisation et simulation de la MASDE

En remplaçant les courants du système d'équations (2.48) par leur expression dans le système d'équations (2.44), on aura

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt}\phi_{ds1} &= v_{ds1} - \frac{R_{s1}}{L_{s1}}(\phi_{ds1} - \phi_{md}) + \omega_s \phi_{qs1} \\
 \frac{d}{dt}\phi_{qs1} &= v_{ds1} - \frac{R_{s1}}{L_{s1}}(\phi_{qs1} - \phi_{mq}) - \omega_s \phi_{ds1} \\
 \frac{d}{dt}\phi_{ds2} &= v_{ds2} - \frac{R_{s2}}{L_{s2}}(\phi_{ds2} - \phi_{md}) + \omega_s \phi_{qs2} \\
 \frac{d}{dt}\phi_{qs2} &= v_{ds2} - \frac{R_{s2}}{L_{s2}}(\phi_{qs2} - \phi_{mq}) - \omega_s \phi_{ds2} \\
 \frac{d}{dt}\phi_{dr} &= -\frac{R_r}{L_r}(\phi_{dr} - \phi_{md}) + \omega_{gl} \phi_{qr} \\
 \frac{d}{dt}\phi_{qr} &= -\frac{R_r}{L_r}(\phi_{qr} - \phi_{mq}) - \omega_{gl} \phi_{dr}
 \end{aligned} \tag{2.49}$$

Avec : $\omega_{gl} = \omega_s - \omega$

Avec :

ω : La pulsation mécanique

A partir de l'équation (2.36), les expressions des flux magnétisants auront les expressions suivantes :

$$\begin{cases} \phi_{md} = L_a \left(\frac{\phi_{ds1}}{L_{s1}} + \frac{\phi_{ds2}}{L_{s2}} + \frac{\phi_{dr}}{L_r} \right) \\ \phi_{mq} = L_a \left(\frac{\phi_{qs1}}{L_{s1}} + \frac{\phi_{qs2}}{L_{s2}} + \frac{\phi_{qr}}{L_r} \right) \end{cases} \tag{2.50}$$

Ou :

$$L_a = \frac{1}{\left(\frac{1}{L_{s1}}\right) + \left(\frac{1}{L_{s2}}\right) + \left(\frac{1}{L_r}\right) + \left(\frac{1}{L_m}\right)} \tag{2.51}$$

Il est possible d'obtenir d'autres expressions du couple instantané en utilisant les expressions des flux statoriques et en remplaçant (2.36) dans (2.43), on obtient :

$$C_{em} = p L_m [(i_{qs1} + i_{qs2}) i_{dr} - (i_{ds1} + i_{ds2}) i_{qr}] \tag{2.52}$$

Chapitre 2 Modélisation et simulation de la MASDE

Une autre expression du couple peut être déduite à partir du flux rotorique dans le système d'équations (2.36). On considère les flux rotoriques suivants :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m (i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m (i_{qs1} + i_{qs2} + i_{dr}) \end{cases} \quad (2.53)$$

Les courants rotoriques sont :

$$\begin{cases} i_{dr} = \frac{1}{L_m + L_r} [\varphi_{dr} - L_m (i_{ds1} + i_{ds2})] \\ i_{qr} = \frac{1}{L_m + L_r} [\varphi_{qr} - L_m (i_{qs1} + i_{qs2})] \end{cases} \quad (2.54)$$

En introduisant i_{dr} et i_{qr} dans l'expression (2.52), on aura :

$$C_{em} = p \frac{L_m}{L_m + L_r} [(i_{qs1} + i_{qs2}) \varphi_{dr} - (i_{ds1} + i_{ds2}) \varphi_{qr}] \quad (2.54)$$

D'après le remplacement des expressions des flux magnétisants (ϕ_{md}, ϕ_{mq}) dans (2.49) et après la simplification, on trouve le nouveau système d'équations :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \phi_{ds1} = V_{ds1} - \left(\frac{R_{s1}}{L_{s1}} - \frac{R_{s1} L_a}{L_{s1}^2} \right) \phi_{ds1} + \frac{R_{s1} L_a}{L_{s1} L_{s2}} \phi_{ds2} + \omega_s \phi_{qs1} + \frac{R_{s1} L_a}{L_{s1} L_r} \phi_{dr} \\ \frac{d}{dt} \phi_{qs1} = V_{qs1} - \left(\frac{R_{s1}}{L_{s1}} - \frac{R_{s1} L_a}{L_{s1}^2} \right) \phi_{qs1} + \frac{R_{s1} L_a}{L_{s1} L_{s2}} \phi_{qs2} - \omega_s \phi_{ds1} + \frac{R_{s1} L_a}{L_{s1} L_r} \phi_{qr} \\ \frac{d}{dt} \phi_{ds2} = V_{ds2} - \left(\frac{R_{s2}}{L_{s2}} - \frac{R_{s2} L_a}{L_{s2}^2} \right) \phi_{ds2} + \frac{R_{s2} L_a}{L_{s1} L_{s2}} \phi_{ds1} + \omega_s \phi_{qs2} + \frac{R_{s2} L_a}{L_{s2} L_r} \phi_{dr} \\ \frac{d}{dt} \phi_{qs2} = V_{qs2} - \left(\frac{R_{s2}}{L_{s2}} - \frac{R_{s2} L_a}{L_{s2}^2} \right) \phi_{qs2} + \frac{R_{s2} L_a}{L_{s1} L_{s2}} \phi_{qs1} - \omega_s \phi_{ds2} + \frac{R_{s2} L_a}{L_{s2} L_r} \phi_{qr} \\ \frac{d}{dt} \phi_{dr} = - \left(\frac{R_r}{L_r} - \frac{R_r L_a}{L_r^2} \right) \phi_{dr} + \frac{R_r L_a}{L_{s1} L_r} \phi_{ds1} + (\omega_s - \omega) \phi_{qr} + \frac{R_r L_a}{L_{s2} L_r} \phi_{ds} \\ \frac{d}{dt} \phi_{qr} = - \left(\frac{R_r}{L_r} - \frac{R_r L_a}{L_r^2} \right) \phi_{qr} + \frac{R_r L_a}{L_{s1} L_r} \phi_{qs1} - (\omega_s - \omega) \phi_{dr} + \frac{R_r L_a}{L_{s2} L_r} \phi_{qs} \\ \frac{dw}{dt} = \frac{p}{j} \left(c_e - c_r - k_f * \frac{w}{p} \right) \end{cases} \quad (2.56)$$

Avec :

$[\phi_{ds1} \ \phi_{qs1} \ \phi_{ds2} \ \phi_{qs2} \ \phi_{dr} \ \phi_{qr} \ \omega]^T$: Vecteur d'état

$[V_{ds1} \ V_{qs1} \ V_{ds2} \ V_{qs2} \ 0 \ 0]^T$: Vecteur de commande (vecteur d'entrée).

2.7 Résultats de simulation

Dans ce paragraphe nous représentons les résultats de simulation obtenue par la modèle de Park :

a. fonctionnement à vide

Les figures ci-dessous montrent les résultats de simulation d'un démarrage à vide de MASDE alimentée par deux systèmes triphasés de tensions (220V_50Hz) déphasés d'un angle de 30°.

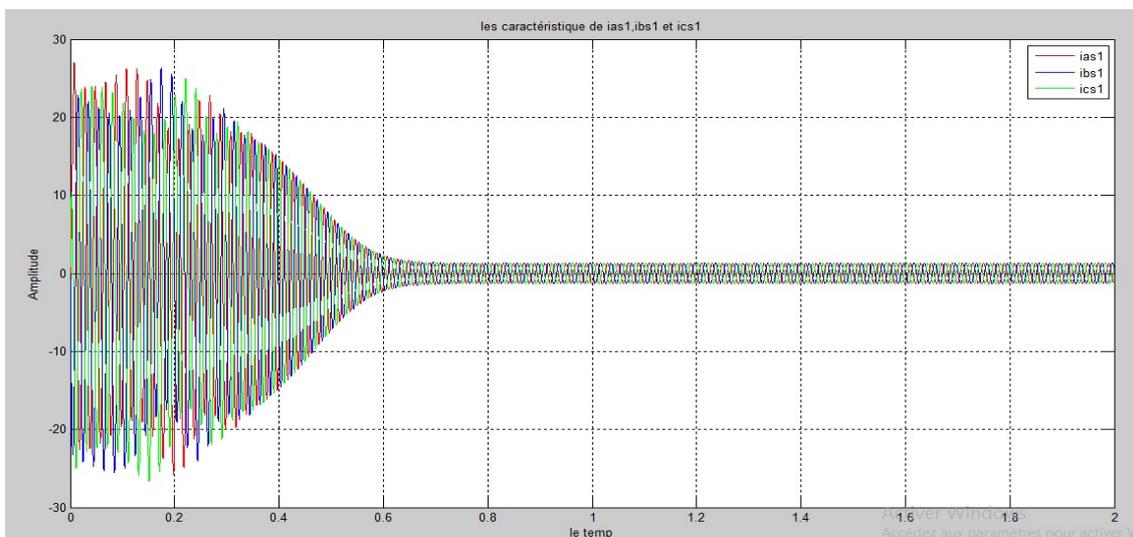


Fig.2.3caractéristiques des courants i_{as1} , i_{bs1} et i_{cs1}

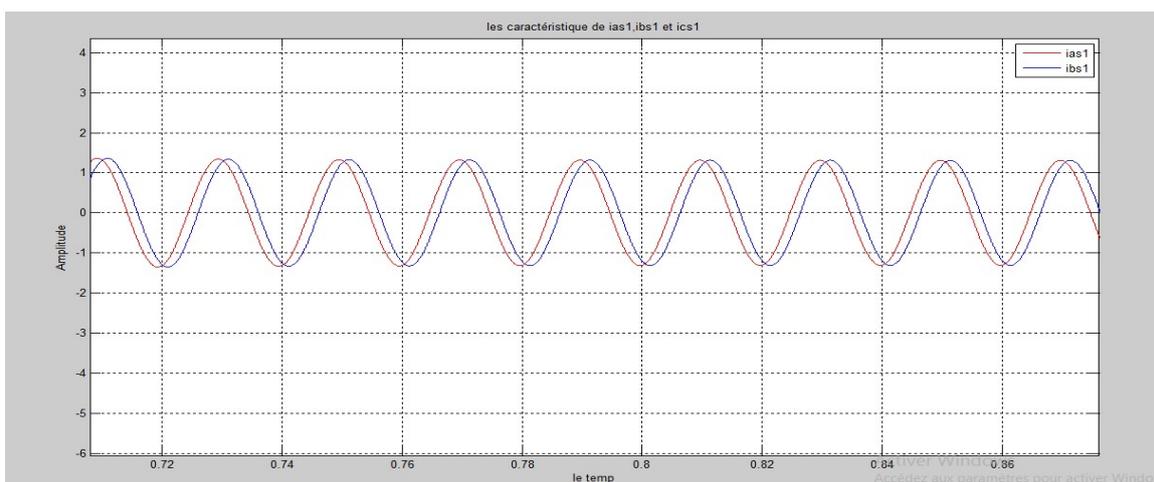


Fig.2.4 déphasage entre les deux étoiles

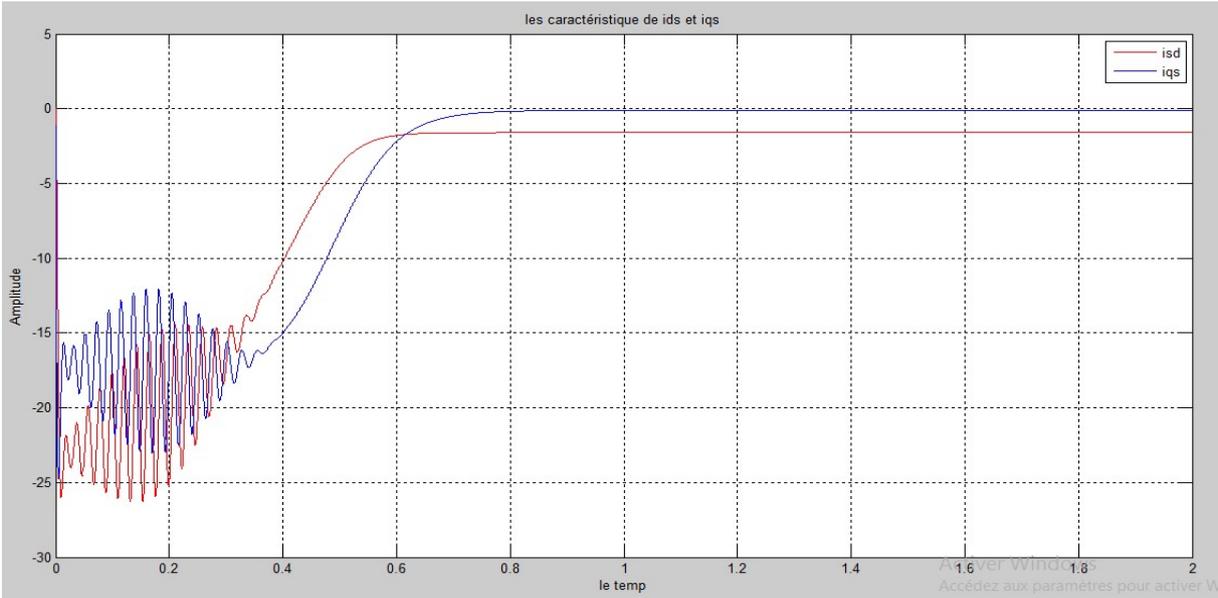


Fig.2.5 les caractéristique des courants iqs et ids

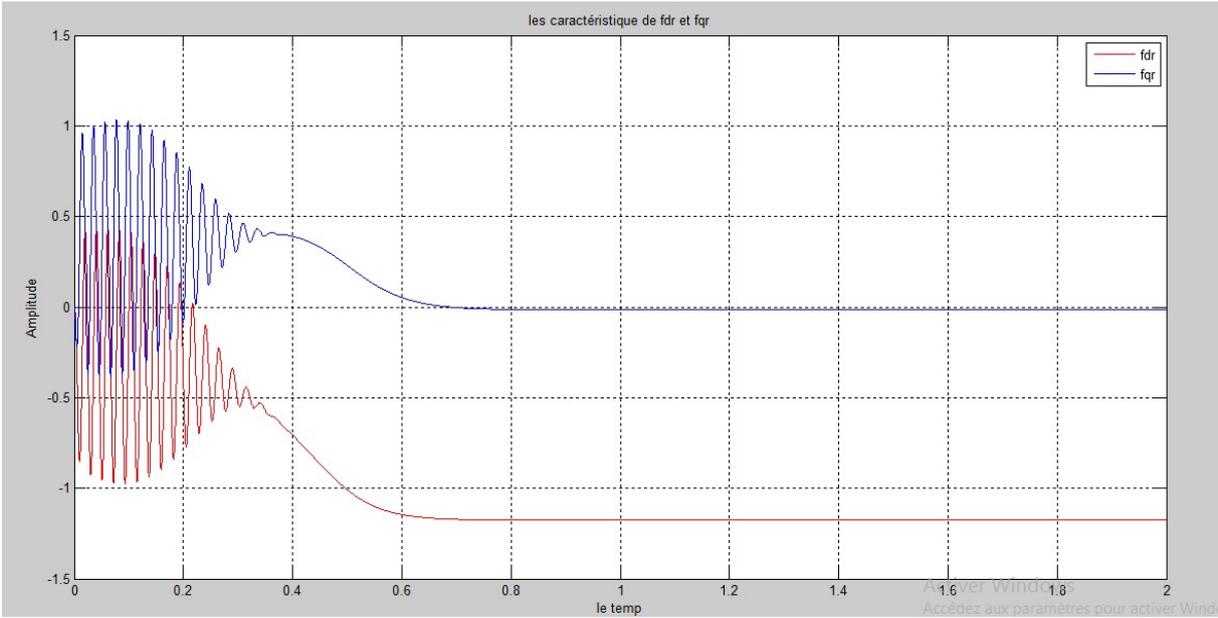


Fig.2.6 les caractéristique des flux fdr et fqr

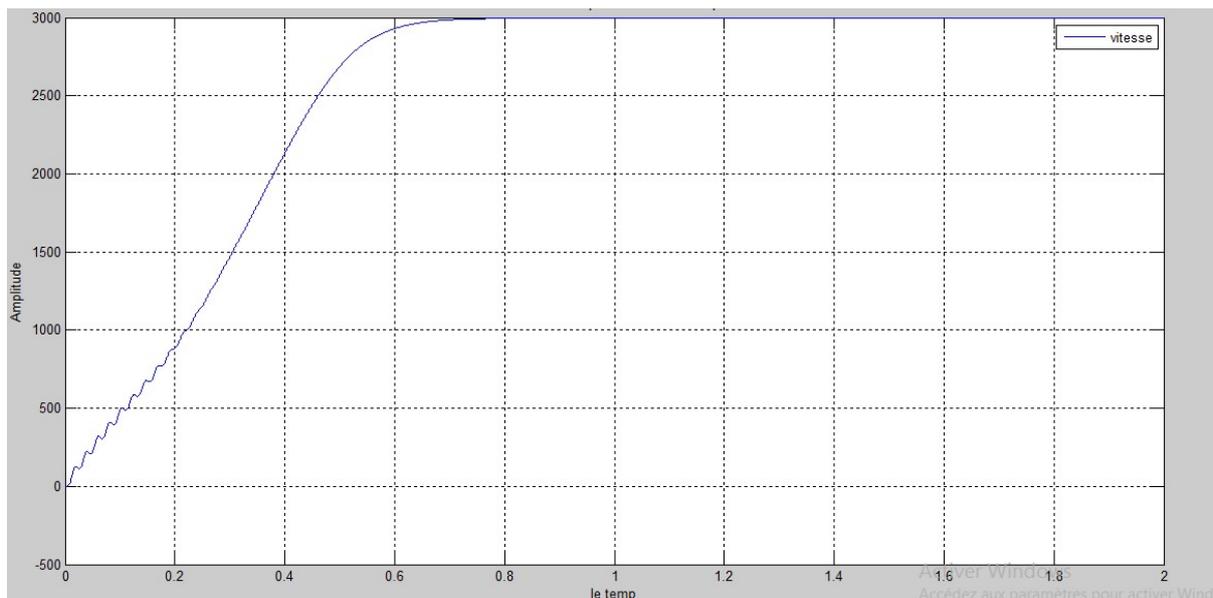


Fig.2.7 la caractéristique de vitesse

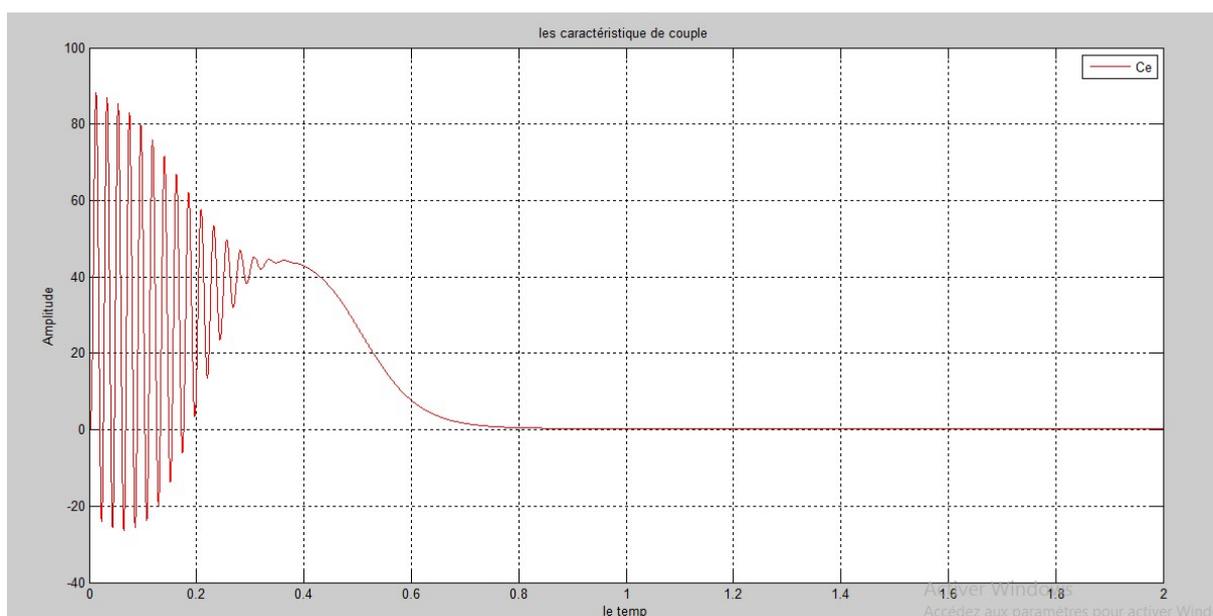


Fig.2.8 la caractéristique de couple

Lors du démarrage à vide, le couple électromagnétique passe par un régime transitoire. Il présente des oscillations qui atteignent une valeur maximale de 85N.m. Cela est nécessaire pour vaincre l'inertie du moteur, après il revient à une valeur nulle.

La vitesse passe aussi par un régime transitoire d'une durée de 0.7s qui représente le temps de réponse de la machine, puis elle se stabilise au voisinage de la vitesse du synchronisme.

Chapitre 2 Modélisations et simulation de la MASDE

Les courants statoriques des étoiles 1 et 2 passent par un régime transitoire dont les valeurs chocssont 5 à 6 fois le courant nominal de la machine. Leurs valeurs sont de l'ordre de 30A pour permettre au couple électromagnétique de compensé l'inertie de la machine. Puis ils diminuent et prennent une forme sinusoïdale au régime permanent pour atteindre la valeur de 1.5A. A noter que les deux étoiles ont les mêmes paramètres.

Les flux rotoriques direct et en quadrature passent aussi par un régime transitoire oscillatoire et puis se stabilisent. Le flux f_{dr} oscille dans la zone négative et se stabilise à la valeur -1.3wb, par contre le flux f_{qr} oscille dans la zone positive et tend vers une valeur nulle.

Pour les deux courants statoriques d'axe d, ils ont la même forme, sont de signe négatif et se stabilise à la valeur -2A. Sur l'axe q, on constate qu'ils ont la même forme et que les valeurs de ces courants en régime établis sont presque nulles.

La figure (2.4) montre que les deux systèmes des courants sont déphasés entre eux de 30° électriquement, donc, nous retrouvons bien le comportement équilibré de la machine.

b. fonctionnement en charge

Les figures ci-dessous montrent les résultats de simulation du démarrage en charge de MASDE.

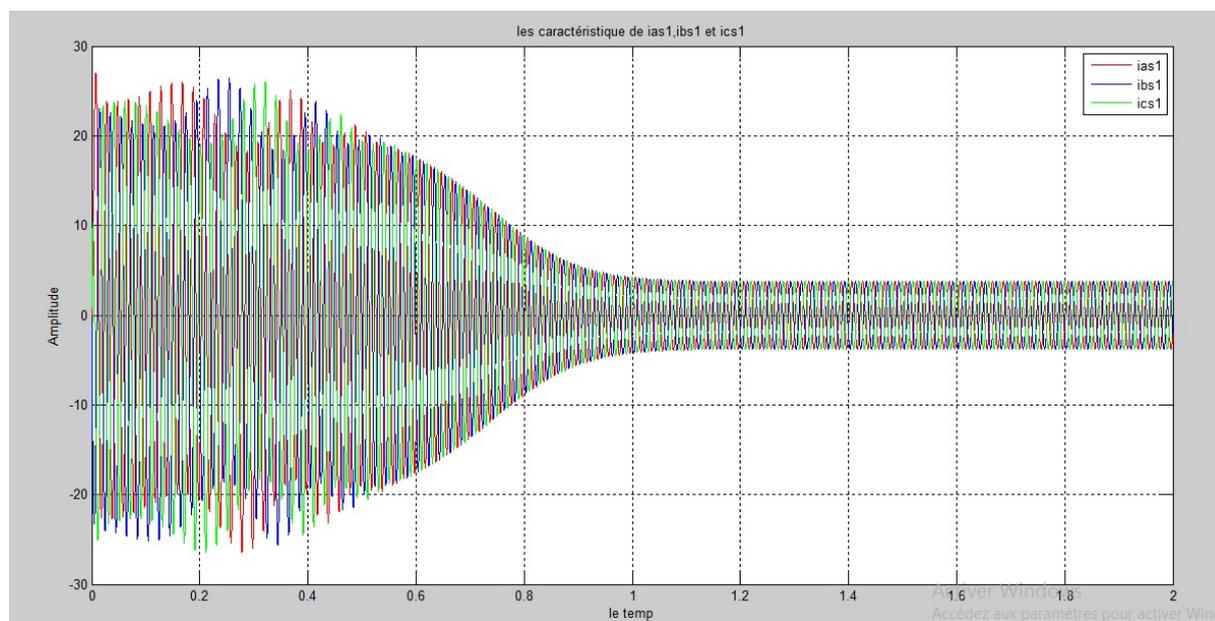


Fig.2.9 caractéristiques des courants ias1,ibs1et ics1

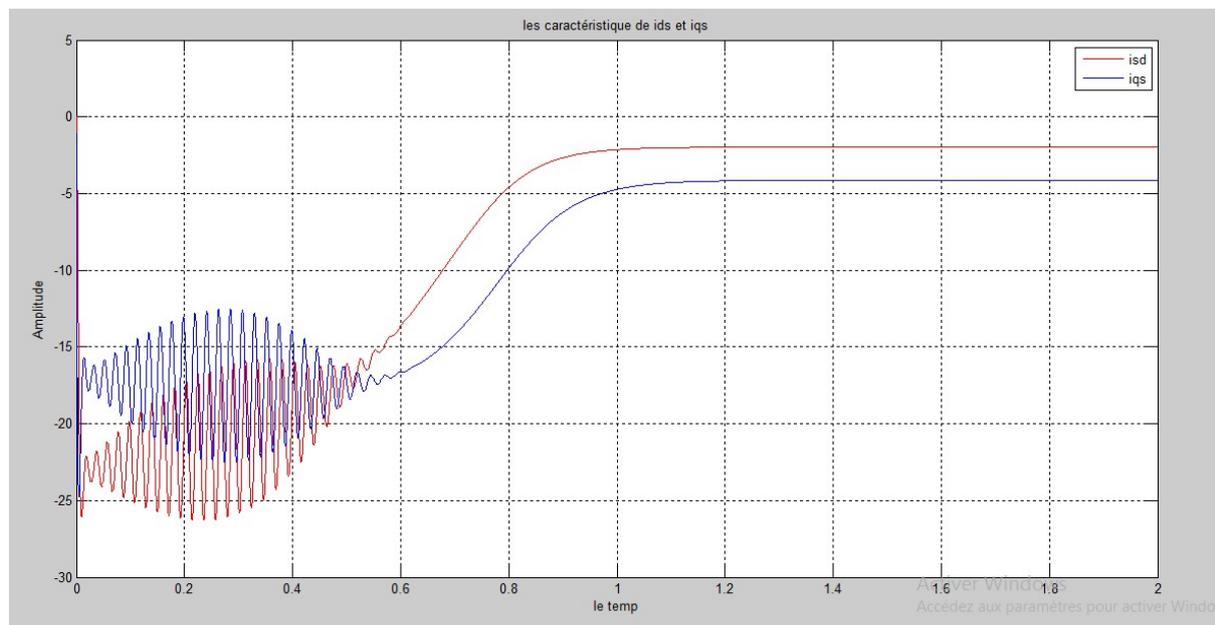


Fig.2.10 caractéristique des courants iqs et ids

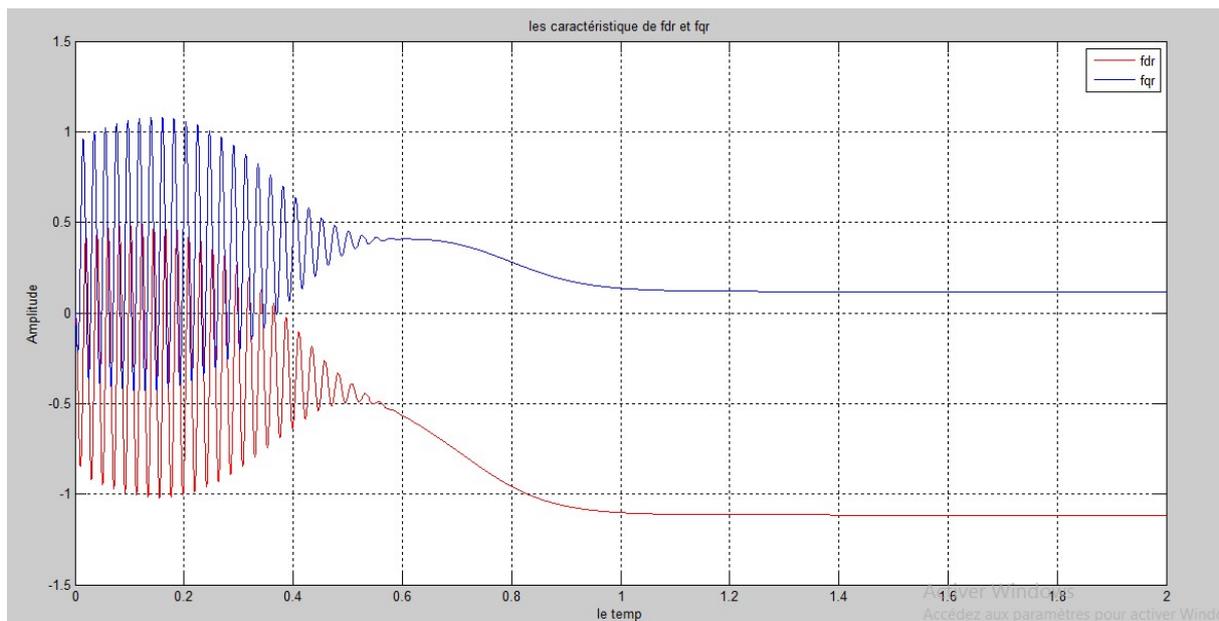


Fig. 2.11 les caractéristiques des flux fdr et fqr

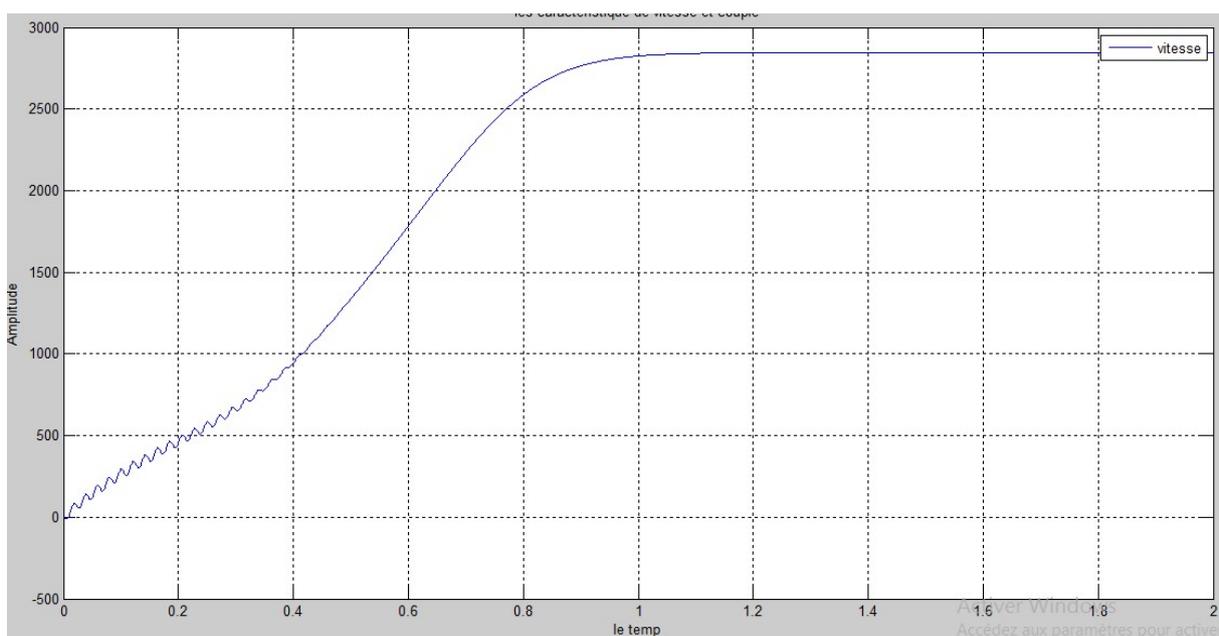


Fig.2.12 caractéristiques de vitesse

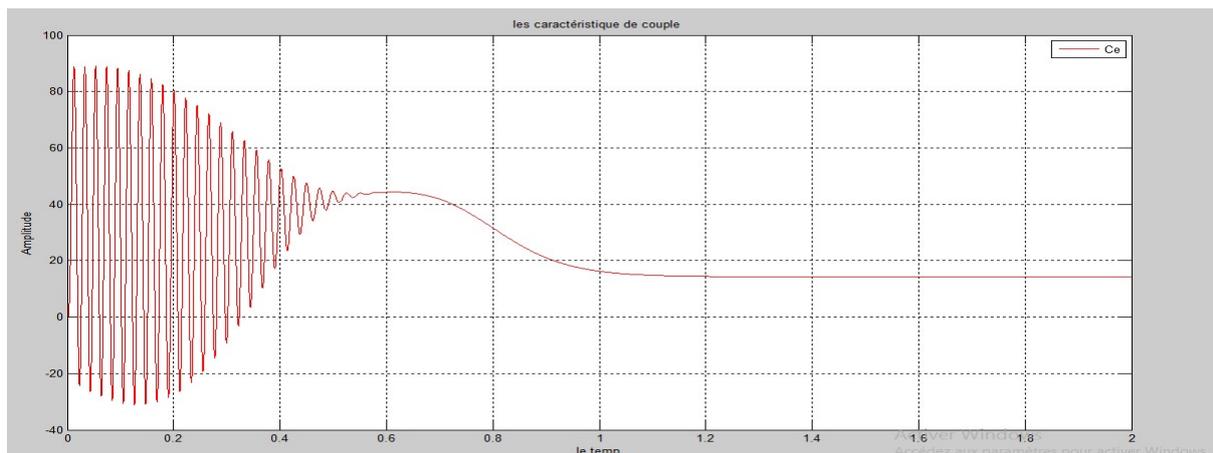


Fig.2.13 la caractéristique de couple

Lors du démarrage en charge, le couple électromagnétique passe par un régime transitoire. Il présente des oscillations qui atteignent une valeur maximale de 85N.m. Cela est nécessaire pour vaincre l'inertie du moteur, après il revient à une valeur nominale de 14 Nm. La vitesse passe aussi par un régime transitoire d'une durée de 0.9s qui représente le temps de réponse de la machine, puis elle se stabilise au voisinage de la vitesse nominale 2898 tours/min.

Les courants statoriques des étoiles 1 et 2 passent par un régime transitoire dont les valeurs chocs sont 5 à 6 fois le courant nominal de la machine. Leurs valeurs sont de l'ordre de 30A pour permettre au couple électromagnétique de compenser l'inertie de la machine. Puis ils diminuent et prennent une forme sinusoïdale au régime permanent pour atteindre la valeur nominale 6A.

Les flux rotoriques direct et en quadrature passent aussi par un régime transitoire oscillatoire et puis se stabilisent. Le flux f_{dr} oscille dans la zone négative et se stabilise à la valeur -1.2wb, par contre le flux f_{qr} oscille dans la zone positive et tend vers une valeur 0.2wb.

Pour les deux courants statoriques d'axe d, ils ont la même forme, sont de signe négatif et se stabilise à la valeur -2.8A. Sur l'axe q, on constate qu'ils ont la même forme et que les valeurs de ces courants en régime établis sont presque -4A.

Ce qui traduit le fort couplage entre le couple et la vitesse d'une part et les flux rotoriques d'autre part.

Chapitre 2 Modélisations et simulation de la MASDE

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la machine asynchrone double étoile en mode moteur. Cette modélisation nous a permis d'établir un modèle mathématique de cette machine dont la complexité a été réduite moyennant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. Ainsi, nous avons utilisé la transformation de Park et le système d'équation d'état de la machine que nous avons validée à travers une simulation numérique. Puis nous avons interprété les résultats obtenus.

Chapitre 3 simulations de la MASDE Par la méthode des éléments finis

3.1 Introduction :

La modélisation électromagnétique des machines électriques offre la possibilité d'estimer les conditions de fonctionnement de la machine sans avoir recours aux essais expérimentaux.

La modélisation et la simulation de la machine asynchrone double étoile a fait l'objet de nombreux travaux, que ce soit dans le but de conception, de la commande ou le diagnostic. On distingue souvent deux méthodes: analytique et par éléments finis.

Dans ce chapitre, nous intéressons, alors, à l'élaboration d'un modèle qui tient compte de la topologie, des dimensions ainsi que de la composition de la machine asynchrone double étoile, basée sur la méthode des éléments finis.

3.2 Méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis est basée sur une résolution numérique des équations de Maxwell. Les informations fournies par ce type de simulation sont d'une grande précision et elles nous apportent la prise en compte de la géométrie de la machine, l'effet de saturation des matériaux magnétiques, les effets d'harmoniques de l'espace ainsi que l'effet de peau dans les barres rotoriques, lorsque le problème est correctement posé (géométrie, physique, lien avec les équations de circuit...) et que l'on utilise le mode de résolution adéquate (magnétostatique, magnétodynamique, magnétique évolutif). D'autre part, d'un point de vue pratique, il est très facile de faire varier les conditions de fonctionnement de la machine (fréquence et flux magnétisant), en modifiant, directement, les paramètres dans le programme du calcul (Logiciel) d'où une grande souplesse d'utilisation [17], [18].

3.3. Modélisation électromagnétique :

Dans les machines électriques les équations qui régissent le champ électromagnétique sont les équations de Maxwell associées aux relations constitutives du milieu considéré.

On les définit comme suit [19] :

- Les relations de couplage électromagnétique.

$$\overline{\text{rot}}\vec{H} = \vec{j} \quad (3.1)$$

Chapitre 3 simulations de la MASDE Par la méthode des éléments finis

$$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{E} = \frac{d\vec{B}}{dt} \quad (3.2)$$

- Les relations de la conservation des flux.

$$\text{div}\vec{B} = 0 \quad (3.3)$$

$$\text{div}\vec{E} = 0 \quad (3.4)$$

- La relation régissant les propriétés des matériaux magnétiques

$$\vec{B} = \mu\vec{H} + \vec{B}_r \quad (2.5)$$

- La relation de la loi d'Ohm

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (3.6)$$

\vec{H} : Champ magnétique (A/m)

\vec{E} : Champ électrique (V/m)

\vec{B} : Induction magnétique (T)

\vec{B}_r : Induction rémanente des aimants (T)

\vec{j} : Densité de courant totale (A/m²)

μ : Perméabilité magnétique (H/m)

σ : Conductibilité électrique ($\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$)

3.3.1. Mode employé :

Selon les résultats escomptés et le temps de simulation dont on dispose, trois modes de résolutions peuvent être employé [17] :

a. Mode magnétostatique :

Ce mode ne pourra donc être utilisé que pour simuler un instant donné d'un fonctionnement essentiellement à vide (sans courant induits) de la machine car il impose de connaître les valeurs des courants dans les différentes barres du rotor. On s'en servira essentiellement pour la détermination de l'inductance magnétisante du moteur. Dans ce mode les sources sont indépendantes du temps.

Le terme $\frac{\partial B}{\partial t} = 0$

Par conséquent, les équations du modèle deviennent :

Chapitre 3 simulations de la MASDE Par la méthode des éléments finis

$$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{H} = \vec{j} \quad (3.7)$$

$$\text{div}\vec{B} = 0 \quad (3.8)$$

$$\vec{B} = \mu\vec{H} + \vec{B}_r \quad (3.9)$$

La condition (3.8) permet de définir une fonction en vecteur potentiel **A** telle que:

$$\vec{B} = \overrightarrow{\text{rot}}\vec{A} \quad (3.10)$$

Pour que A soit totalement définit, il faut également fixer la valeur de sa divergence. On ajoute alors la condition $\text{div}(A) = 0$ appelée jauge de Coulomb. Qui vérifiée automatiquement L'unicité de la solution.

Par la substitution de (3.10) et (3.9) dans (3.7) nous obtenons l'équation électromagnétique en magnétostatique, exprimée par le système d'équations suivant :

$$\overrightarrow{\text{rot}}(v.\overrightarrow{\text{rot}}\vec{A}) = \vec{j} + \overrightarrow{\text{rot}}(v.\vec{B}_r) \quad (3.11)$$

Où

$v = \frac{1}{\mu}$: est la réflectivité magnétique.

b.Mode magnétodynamique :

Ce modèle s'applique aux dispositifs qui ont des sources du courant ou de la tension varient en fonction du temps.

Le terme $\frac{\partial B}{\partial t}$ n'est pas nul. Et qui suppose la densité de courant sinusoïdale, et simuler en régime permanent. Ce qui permet d'obtenir des valeurs convenables du courant efficace. Ce mode pourra être utilisé pour étudier un schéma équivalent de la machine.

Le système à résoudre est le suivant :

$$\overrightarrow{\text{rot}}(v.\overrightarrow{\text{rot}}\vec{A}) + \vec{j}\omega\sigma\vec{A} = \vec{j} \quad (3.12)$$

$\omega = 2\pi f$: pulsation électrique (rad.s^{-1}), j : unité imaginaire ($j^2 = -1$).

Chapitre 3 simulations de la MASDE Par la méthode des éléments finis

c.Mode magnétique transitoire :

Est le plus complet. Il traduit fidèlement la rotation du moteur. Dans ce cas l'alimentation est en courant transitoire, le traitement du système précédent des équations caractéristiques, nécessite une discrétisation pas à pas dans le temps.

Donc le système à résoudre est le suivant :

$$\overrightarrow{rot}(v.\overrightarrow{rot}\vec{A}) + \sigma \partial\vec{A}/\partial t - \overrightarrow{rot}\vec{B}_r + \sigma \overrightarrow{grad}V = 0 \quad (3.13)$$

3.3.5 Principe de la méthode des éléments finis :

Le principe fondamental de la méthode des éléments finis réside dans le découpage du domaine d'étude en domaines élémentaires de dimension finie. Sur chaque domaine appelé élément fini, Le vecteur potentiel, dans un élément de découpage peut être approchée par des fonctions d'approximations (dites fonctions de formes), dont l'expression varie d'un type à un autre. Ces fonctions d'approximations doivent assurer la continuité du potentiel aux interfaces des éléments. La majorité des formes d'approximations du potentiel dans un élément sont des approximations polynomiales [20].

Pour élément triangulaire on a :

$$Ae (X, y) = a + bx + cy \quad (3.14)$$

Pour les éléments quadrilatéraux on a :

$$Ae (X, y) = a + bX + cy + dXy \quad (3.15)$$

Les constantes a b c et d sont à déterminer. Le potentiel Ae est en générale non nul dans l'élément et nul ailleurs.

La valeur approchée du potentiel dans un point du domaine (Ω) de résolution est donnée par:

$$A(x,y) = \sum_{e=1}^{ne} Ae (X, y) \quad (3.16)$$

e : Numéro d'élément.

ne : Le nombre totale des éléments du domaine (Ω).

Le potentiel en tous points d'un élément ainsi que la densité de courant sont parfaitement définis par les valeurs des potentiels de ses trois sommets (Fig.3.1).

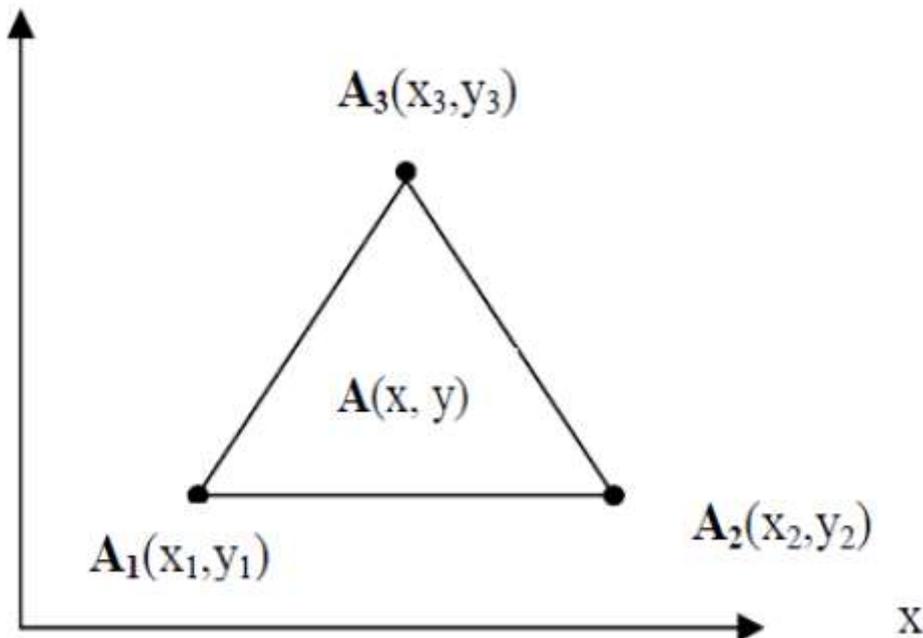


Fig.3.1 Fonction d'interpolation d'un élément.

3.4 Logiciel de résolution

Les logiciels à éléments finis modernes sont souvent à structure modulaire où les différentes étapes de résolution [20]:

- introduction des données géométriques et des propriétés physiques.
- maillage.
- résolution.
- exploitation des résultats.

Sont séquentiellement exécutées.

Les modules associés à ces tâches doivent pouvoir être séparément accessibles. Ainsi, une géométrie discrétisée pourra servir à traiter plusieurs cas où seules les sources d'excitation ou les conditions aux limites sont modifiées. Lors d'une optimisation de formes, l'utilisateur doit également pouvoir faire varier un paramètre géométrique sans devoir refaire le maillage ou réintroduire les conditions aux limites.

Toutefois, en utilisant une Méthode des Eléments Finis conventionnelle, il serait difficile de calculer les performances de la machine tenant compte à la fois des courants de Foucault

Chapitre 3 simulations de la MASDE Par la méthode des éléments finis

induits dans les conducteurs massifs, des non-linéarités des matériaux magnétiques et des sources externes.

C'est dans cette perspective que nous avons opté pour une nouvelle formulation, mieux adaptée pour notre problème : il s'agit d'une méthode dite directe permettant de résoudre simultanément les équations couplées du champ magnétique et des circuits électriques. Cette formulation est implantée dans le logiciel d'éléments finis Flux-2D.

3.5 Logiciel flux 2D :

Le logiciel FLUX2D est un logiciel de modélisation assisté par ordinateur, basé sur la méthode des éléments finis, il calcule sur des sections planes (problèmes plans, ou problèmes à symétrie de révolution) les états magnétiques, électriques, ou thermiques des dispositifs. Ces états permettent d'accéder à de nombreuses grandeurs globales ou locales: Champ, Potentiel, Flux, Énergie, Force ... et

Les grandeurs obtenues seront difficiles à déterminer par d'autres méthodes (calcul analytique, prototype, mesure, essais) et, en tout état de cause, elles sont obtenues avec des coûts et des délais très inférieurs à ceux des autres méthodes.

3.6. Domaine d'Application :

Les phénomènes qui interviennent dans les dispositifs électrotechniques sont décrits par différentes équations, Équations de MAXWELL, Équation de la chaleur, loi de comportement des matériaux. La résolution simultanée de ces équations est difficilement réalisable, en raison de sa complexité, et de la quantité de calculs à effectuer, c'est pour cette raison que « FLUX2D » dispose d'un certain nombre de modules d'applications physiques qui permettent à chacun de résoudre un type de problème donné (Calcul du champ, chaleur, etc.), décrit par une équation et des hypothèses (hypothèses de fonctionnement, hypothèses de comportement des matériaux). En général le logiciel FLUX2D est utilisé dans la conception des dispositifs électromagnétiques, thermiques ou le couplage entre les deux dispositifs.

3.7. Enchaînement des Programmes de FLUX2D :

FLUX2D est partagé en sous programmes chacun à sa propre fonction. La figure (3.2) représenté l'enchaînement du logiciel.

Chapitre 3 simulations de la MASDE Par la méthode des éléments finis

Nous allons expliquer brièvement les différentes étapes du Logiciel :

3.7.1 Module pré-processeur :

Permet, à travers plusieurs modules, de définir la géométrie du dispositif à étudier (PREFLU), de choisir et/ou de construire une banque de matériaux (CLSMAT), d'affecter les propriétés physiques aux différentes régions géométriques prédéfinies (PROPHY) et de définir le schéma et/ou les données du circuit électrique (CIRFLU). Il permet également un maillage automatique d'une géométrie 2D prédéfinie (PREFLU).

3.7.2 Module processeur :

Constitué principalement d'un module de résolution 2D (SOLVER_2D) des différents modèles usuels de l'électromagnétisme et des problèmes thermiques.

3.7.3 Module post-processeur de Flux-2D (PostPro_2D) :

Permet, entre autres, de tracer les équipotentielles ou les lignes de flux, le maillage, la géométrie et les courbes 2D ou 1D selon un chemin prédéfini. Il permet aussi de calculer des grandeurs globales telles que le couple ou la force appliqués à un contour fermé, les inductions, les flux, les inductances, etc.

De façon générale, l'enchaînement des programmes de Flux-2D, doté d'une interface de Windows est schématisé par la figure (3.2).

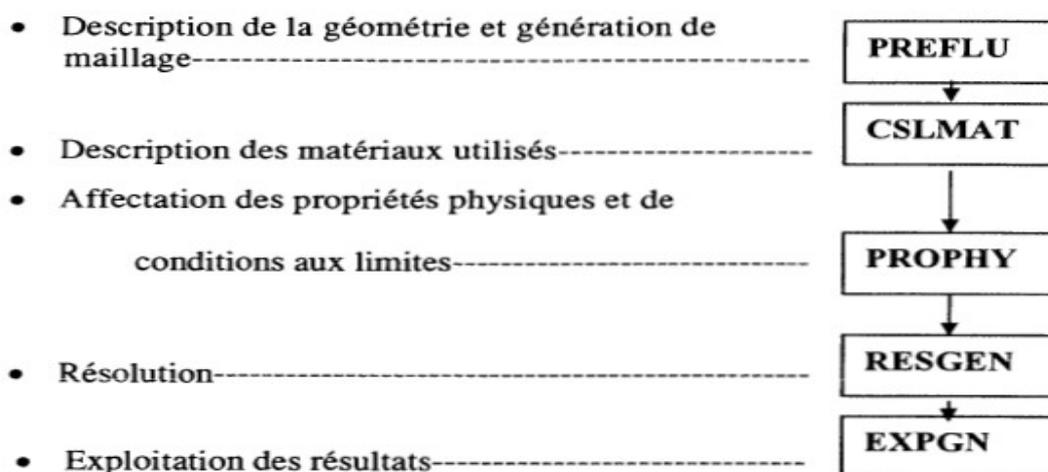


Fig.3.2 Schéma des différents modules du logiciel Flux-2D.

Chapitre 3 simulations de la MASDE Par la méthode des éléments finis

On utilisera le logiciel flux sous sa forme 2D bien que l'inclinaison des encoches ainsi que les effets d'extrémités nécessiteraient pour une étude précise une présentation 3D. Les raisons de ce choix sont simples [21]:

- Le temps de simulation est bien plus long encore en 3D qu'en 2D.
- L'influence de l'inclinaison des encoches n'est pas le but principal de notre étude.
- Les effets d'extrémités sont modélisés par des inductances et résistances calculées de façon analytique. Cette méthode semble relativement précise si l'on la compare à des simulations sous Flux3D.

3.8 Simulation de la MASDE :

3.8.1 Présentation dimensionnel de la machine étudiée

Partie	Paramètre	Valeur	Unité
Machine	Puissance nominale	4.5	kW
	Tension nominale	220	V
	Vitesse nominale	2898	tr/min
	Nombre de pôles	2	
	Fréquence	50	Hz
	Longueur active	125	Mm

Tableau 3.1Caractéristique de la MASDE.

Partie	Paramètre	Valeur	Unité
	Nombre de phases	6	
	Type de connexion	Y	

Chapitre 3 simulations de la MASDE Par la méthode des éléments finis

Stator	Nombre d'encoches	24	
	Diamètre interne	120	Mm
	Diamètre externe	212	Mm
Rotor	Diamètre externe	119	Mm
	Diamètre interne	40	Mm
	L'épaisseur de l'entrefer	0.5	Mm
	Nombre de barres	20	

Tableau 3.2Caractéristiques statoriques et rotoriques de la MASDE.

La figure 3.3 représenté la géométrie de la machine asynchrone [22].

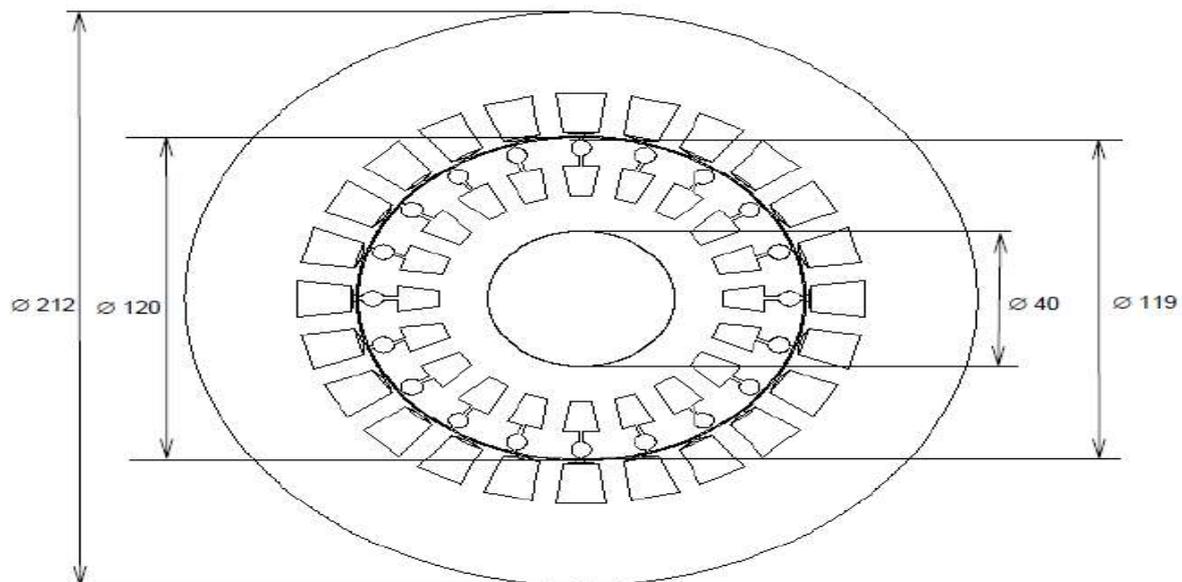


Fig.3.3 grossière section du stator et de l'induit du rotor

Chapitre 3 simulations de la MASDE Par la méthode des éléments finis

La forme et les dimensions des encoches de stator et de rotor sont montrées sur la figure (3.4).

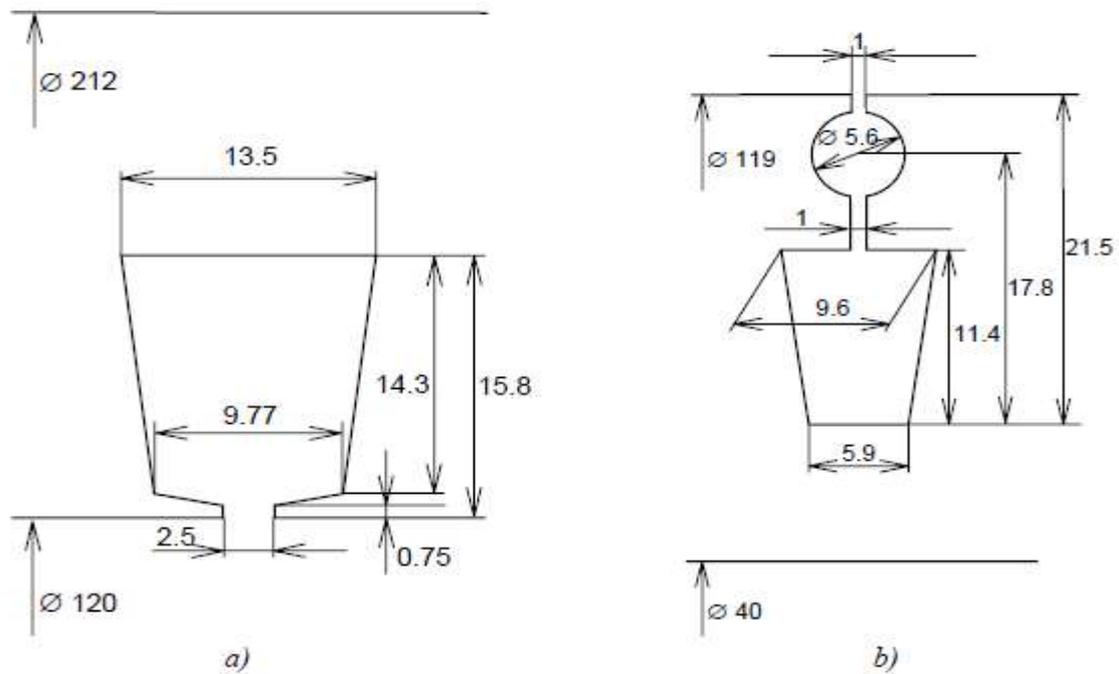


Fig.3.4. Dimension des encoches, **a)** l'encoche statorique, **b)** l'encoche rotorique.

L'enroulement du stator est un enroulement en cuivre à deux couches, avec un pas raccourci de 8/12 et $W_{MASDE}=104$ tours par phase.

$V_n = 220V$.

La figure 3.5 définir le domaine de calcul du champ électromagnétique dans la machine.

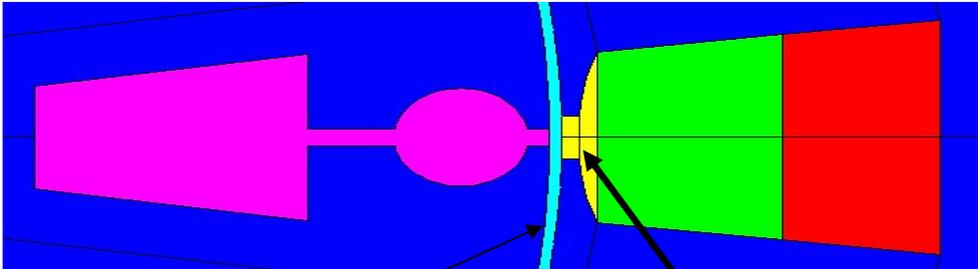
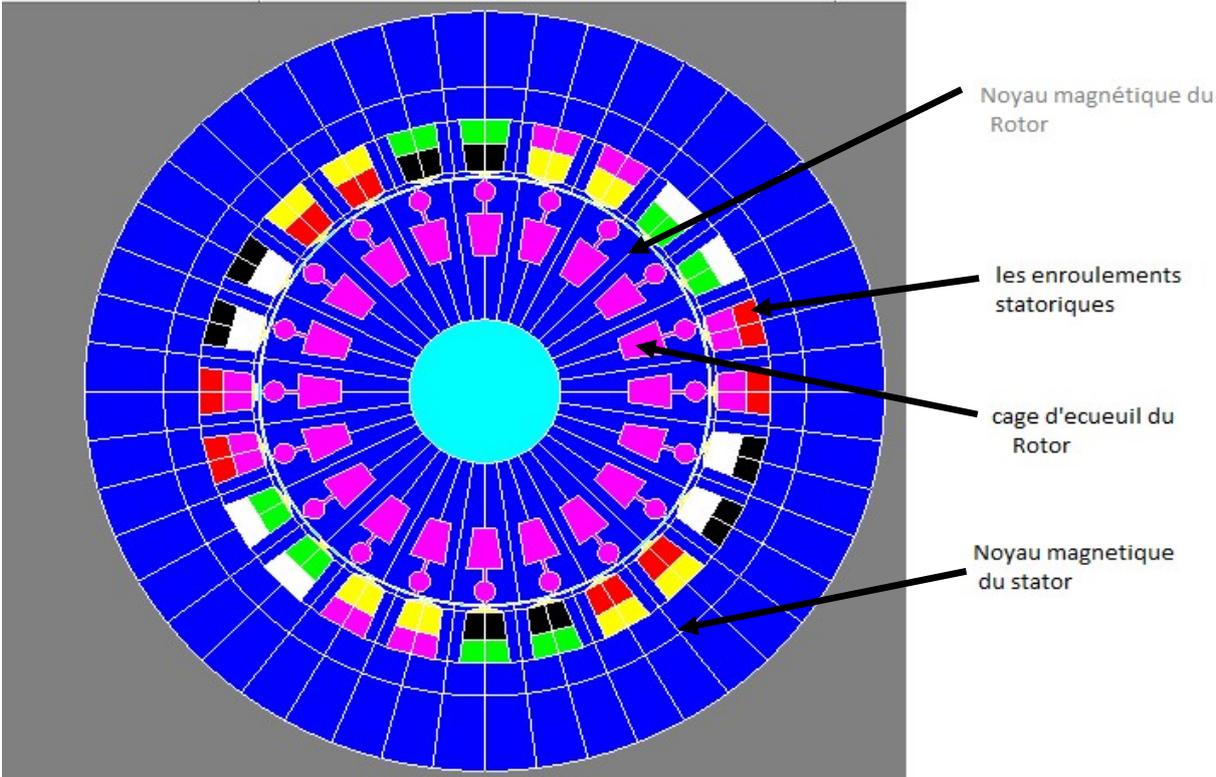


Fig.3.5Régions du domaine de calcul du champ électromagnétique.

La figure 3.6 le maillage effectué sur le circuit magnétique de la machine.

conpatre

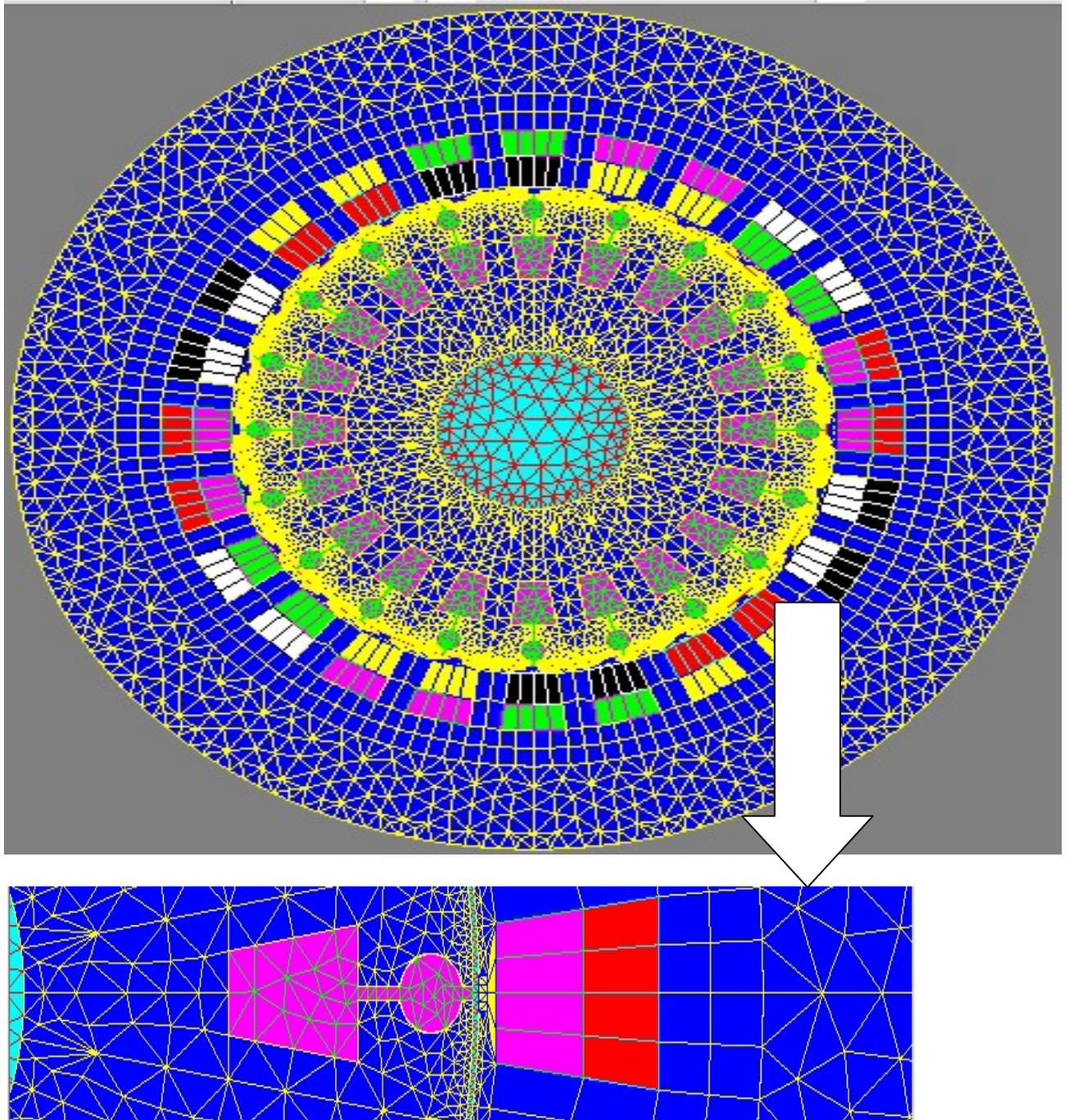


Fig.3.6Répartition du maillage.

Le maillage est plus dense au voisinage de l'entrefer puisque dans cette région se développe l'énergie électromagnétique. Par contre le maillage est plus grossier vers l'arbre et vers l'extérieur de la culasse pour alléger les temps de calcul sans perte sensible d'information. La carcasse externe de la machine étant conductrice et généralement reliée à la terre.

Chapitre 3 simulations de la MASDE Par la méthode des éléments finis

3.8.2 Matériaux conducteurs :

Pour les conducteurs statoriques, on supposera qu'ils se répartissent de façon uniforme dans les encoches, on affectera à cette région la résistivité du cuivre pour une température donnée des enroulements, le foisonnement et le nombre de spires par encoche. Au niveau de rotor, nous utiliserons la résistivité de l'aluminium à température fixe.

3.8.3 Matériaux magnétiques :

Le modèle scalaire définit le B (H) courbe à partir des valeurs expérimentales de B et H

H [A/m]	B [T]						
0.	0.	2000	1.61	7000	1.83	40000	2.14
300	0.66	3000	1.69	8000	1.85	50000	2.16
500	1.09	4000	1.73	10000	1.89	60000	2.18
1000	1.45	5000	1.76	20000	2.04	70000	2.1925
1500	1.56	6000	1.79	30000	2.11		

Tableau 3.3B(H) du matériau magnétique STEEL_NLIN

Cette courbe représente l'interpolation des valeurs présentées au tableau **3.3**. pour la valeur de saturation $J_s = 2,1$ T

Chapitre 3 simulations de la MASDE Par la méthode des éléments finis

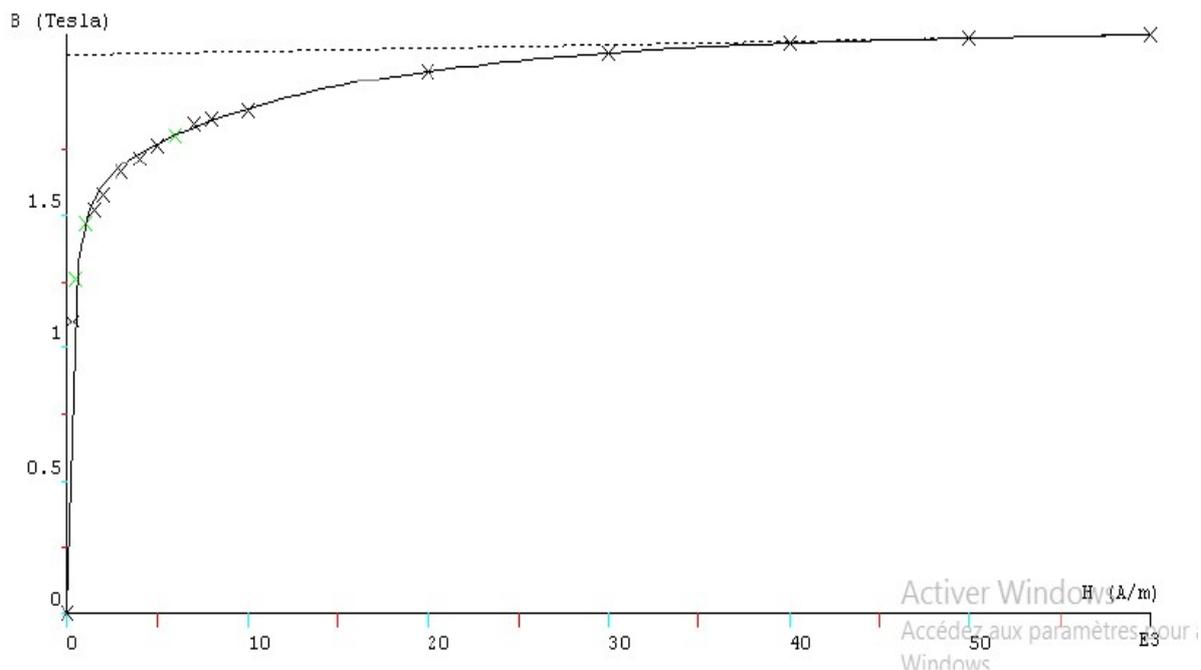


Fig. 3.7 Caractéristiques $B(H)$ du matériau magnétique STEEL_NLIN.

3.8.4 Couplage avec les équations de circuit :

Pour représenter fidèlement le moteur, il faut tenir compte des effets d'extrémités (inductance, résistance de tête de bobine et d'anneau de court-circuit).

Le circuit électrique, (Fig.3.8), représentant : les sources de tension d'alimentation (V_U , V_V , V_W , V_{U1} , V_{V1} , V_{W1}), Les bobinages statoriques (B_U , B_V , B_W , B_{U1} , B_{V1} , B_{W1}), les Inductances de fuite, (L_U , L_V , L_W , L_{U1} , L_{V1} , L_{W1}), les résistances de chute de tension dans le réseaux (R_U , R_V , R_W , R_{U1} , R_{V1} , R_{W1}), les résistances des voltmètres pour mesurer les tensions statoriques ($R1$, $R2$, $R3$, $R4$, $R5$, $R6$).

Q1 : est un macro-circuit (un dispositif du logiciel Flux 2D®) utilisé pour modéliser la cage d'écuréuil de la machine, c'est un circuit fermé contient des barres rotoriques.

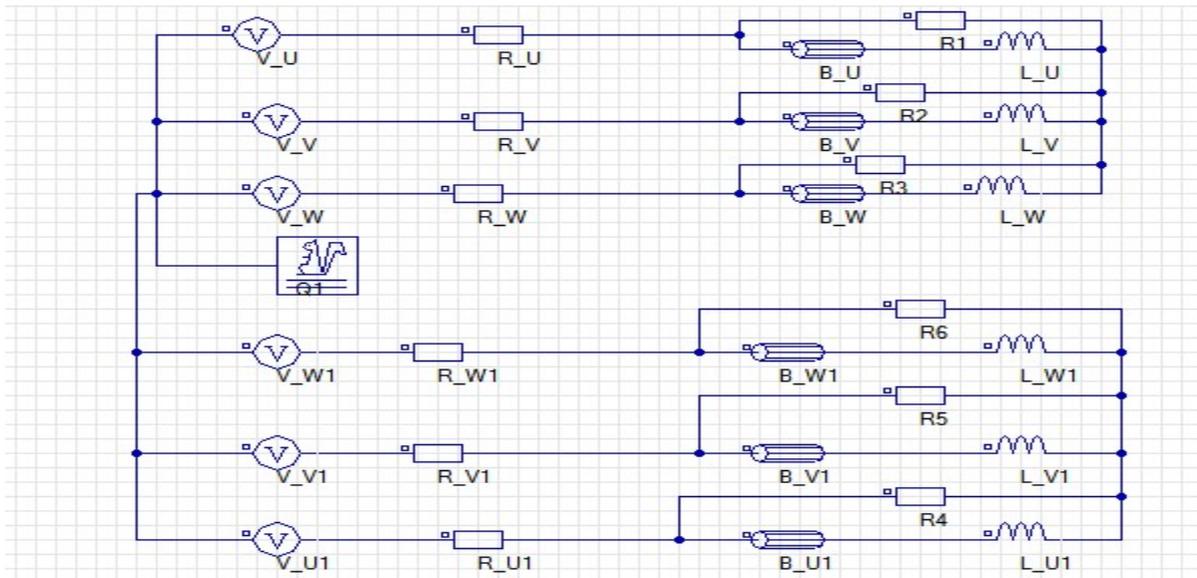


Fig.3.8 Circuit représentant les effets d’extrémités liés à la géométrie.

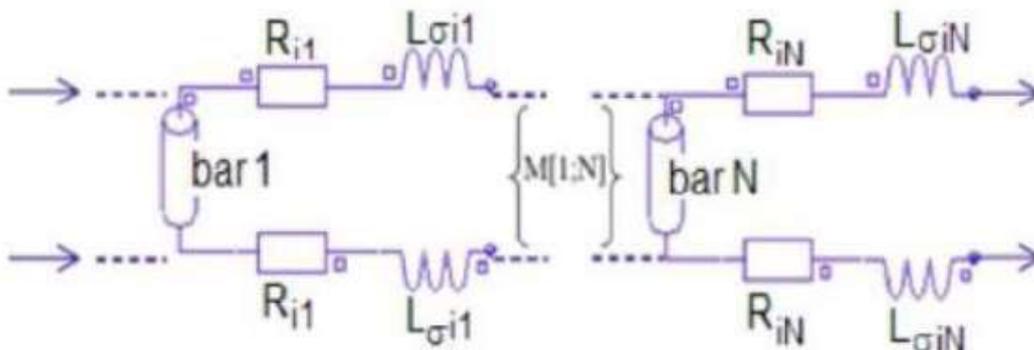


Fig.3.9 Circuit équivalent de la cage d’écureuil.

(Fig.3.9) : Barre (bark), résistances (R_{ik}), inductances de fuite ($L_{\sigma ik}$), correspondent aux régions d’inter-barre d’anneaux de court-circuit (arcs entre deux barres adjacentes).

On utilise ce lien parce que les simulations envisagées reproduisent les variations du moteur lors de fonctionnement en charge. Nous ne pouvons pas donc négliger les courants induit au rotor comme c’était le cas à vide, il est donc obligatoire de modélisé les courts-circuits de la cage. Finalement, cette méthode permet d’alimenter directement le moteur en tension et non pas en courant comme il faudrait le faire sans ce couplage [20]

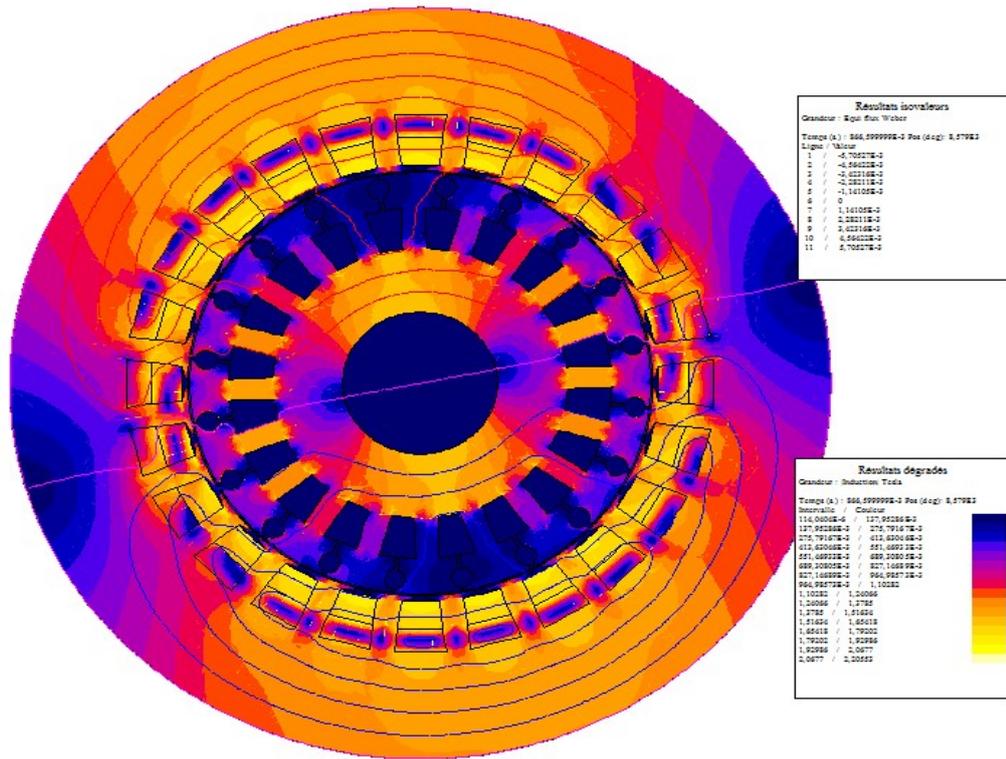


Fig. 3.11 L'induction du champ magnétique à vide

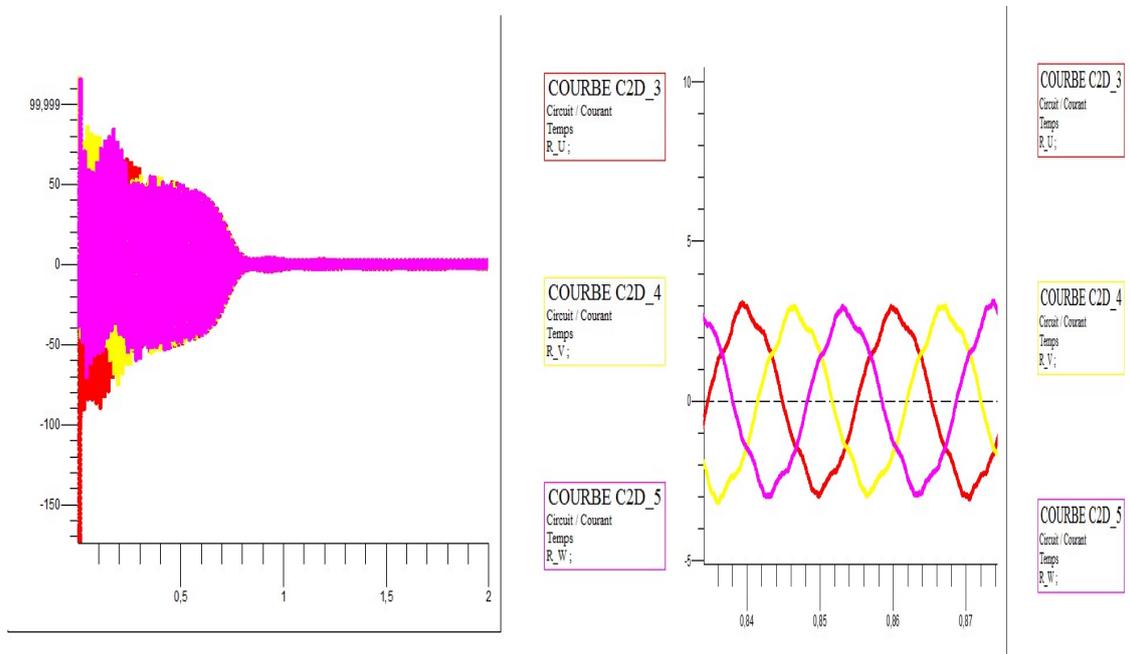


Fig. 3.12 Courants statoriques à vide.

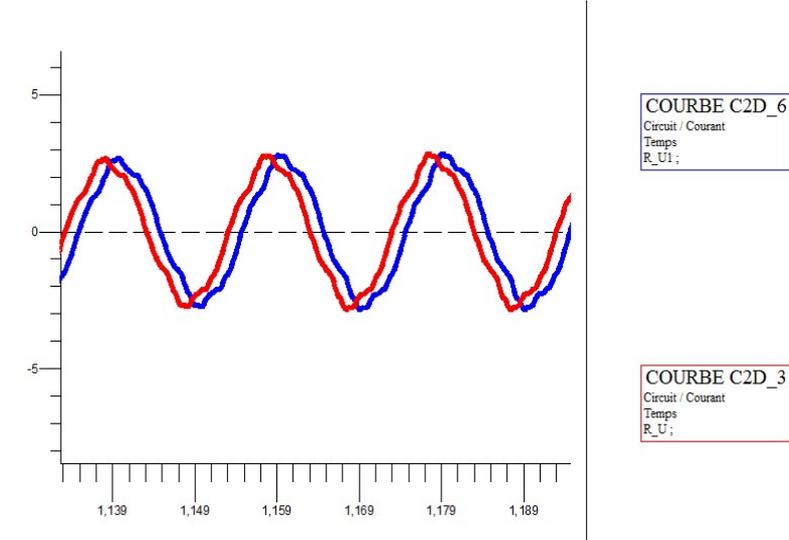


Fig.3.13 déphasageélectriques entre les deux étoiles

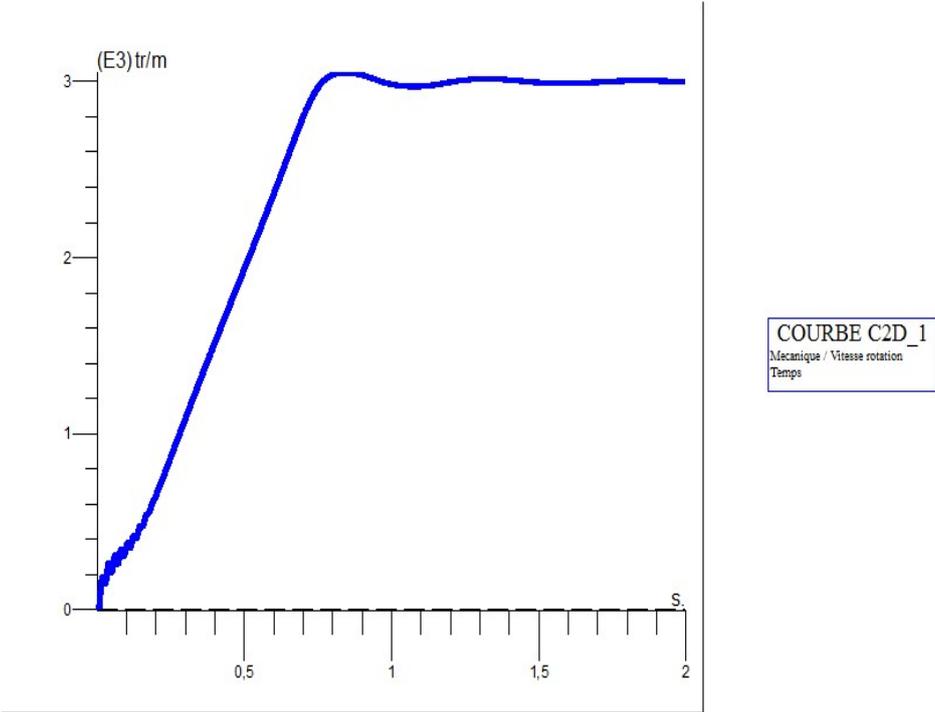


Fig. 3.14vitesse de rotation

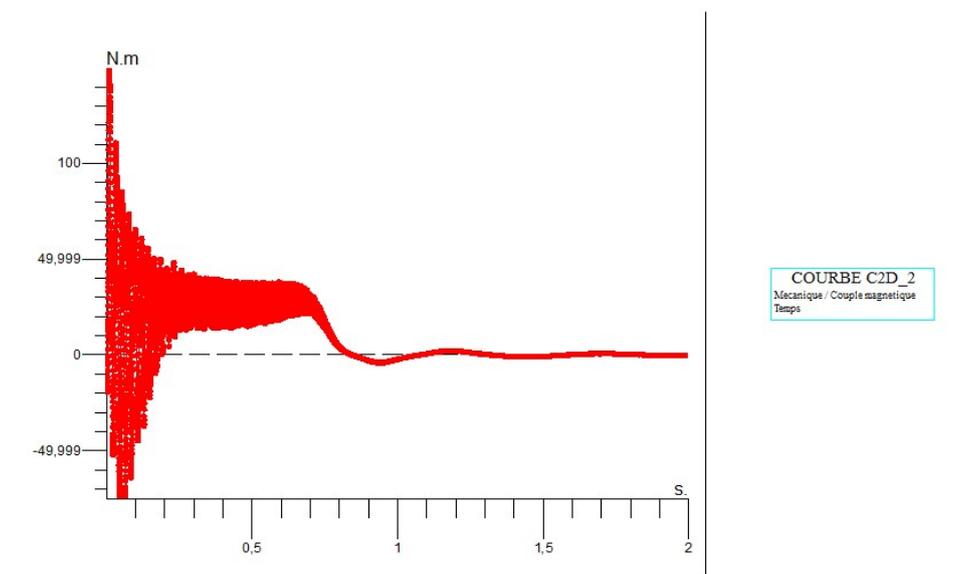


Fig. 3.15 couple électromagnétique

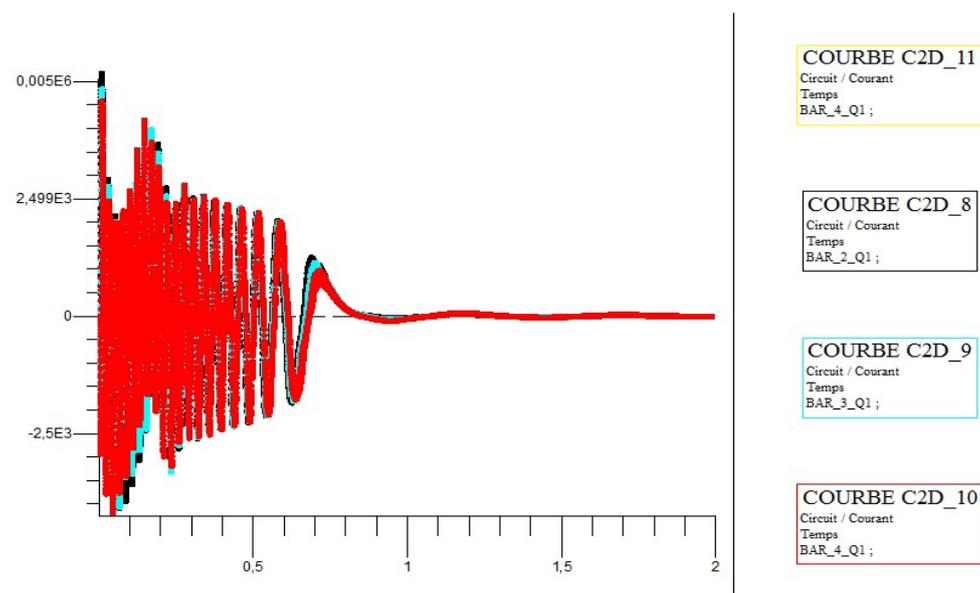


Fig. 3.16 courant rotorique à vide

Après un régime transitoire d'environ 0.7s, (Fig. 3.12), durant lequel la machine se magnétise, les courants au stator atteignent le régime permanent avec une valeur efficace de 2.15A. Les trois courants d'une étoile sont bien déphasés entre eux de 120° électriquement et les deux systèmes des courants sont déphasés entre eux de 30° électriquement, donc, nous retrouvons bien le comportement équilibré de la machine, Mais à une forme d'onde qui n'est pas tout à fait sinusoïdale. Cela est dû essentiellement à l'effet

Chapitre 3 simulations de la MASDE Par la méthode des éléments finis

de la saturation de la machine et l'effet d'encoche. Le couple électromagnétique, à vide, est pratiquement nul en régime permanent, (Fig.3.15). Les lignes du champ magnétique et l'induction à $t = 0.875$, (Fig.3.11), montre le couplage des lignes du champ au niveau de l'entrefer.

b. fonctionnement en charge

Sous la même tension, nous avons présenté sur les Figures 3.17 à 3.22, les caractéristiques de la machine en régime nominal.

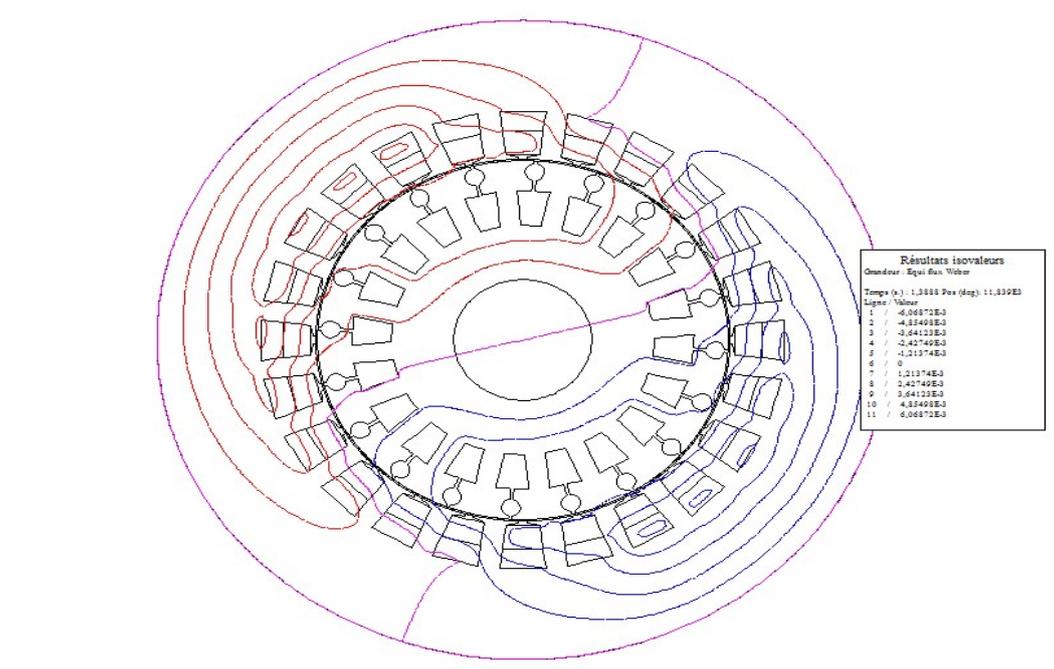
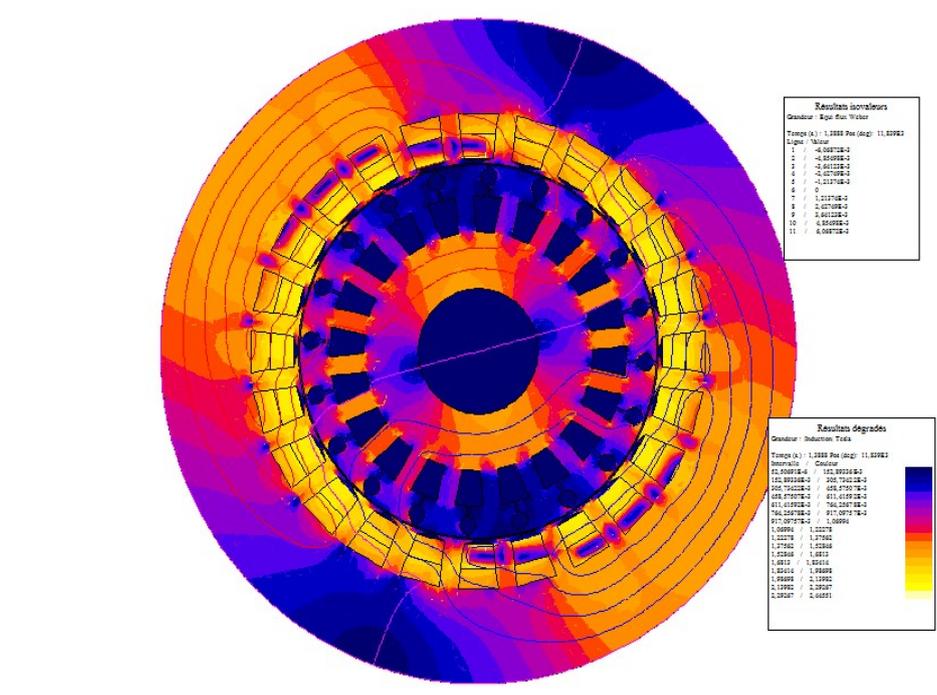


Fig.3.17 Lignes du champ magnétique en charge



Chapitre 3 simulations de la MASDE Par la méthode des éléments finis

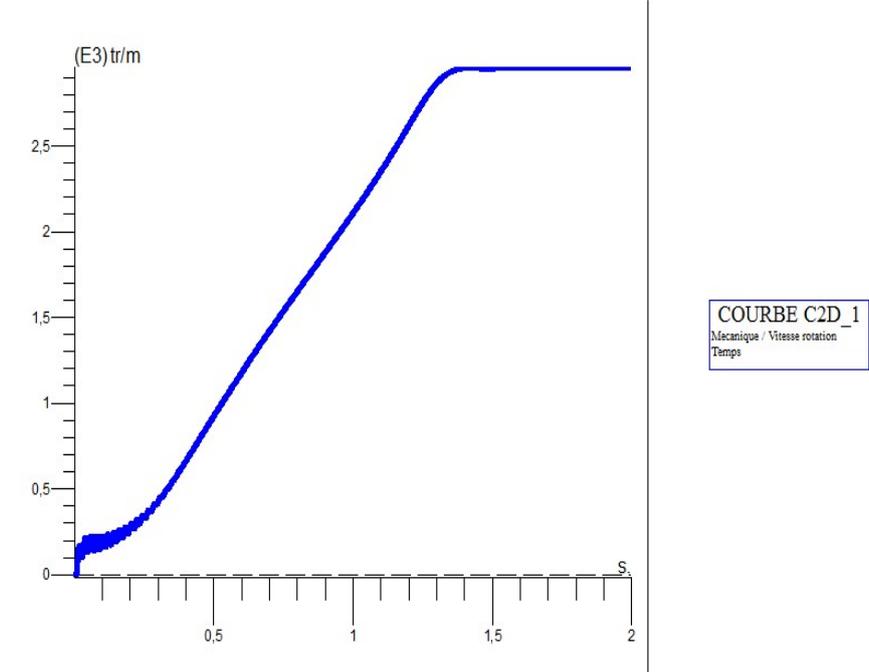


Fig. 3.20 vitesse de rotation

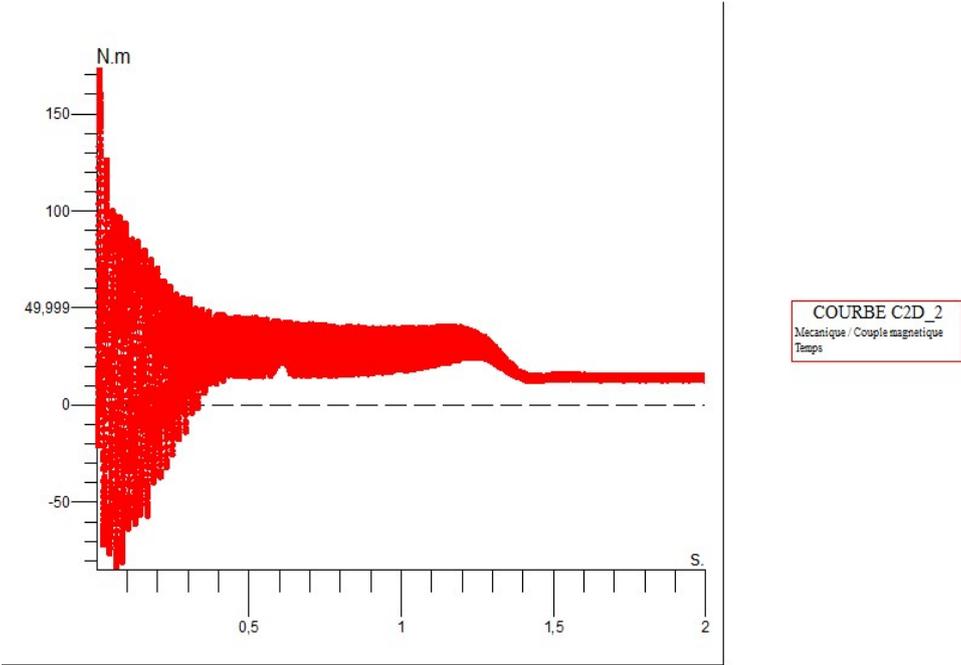


Fig. 3.21 couple électromagnétique

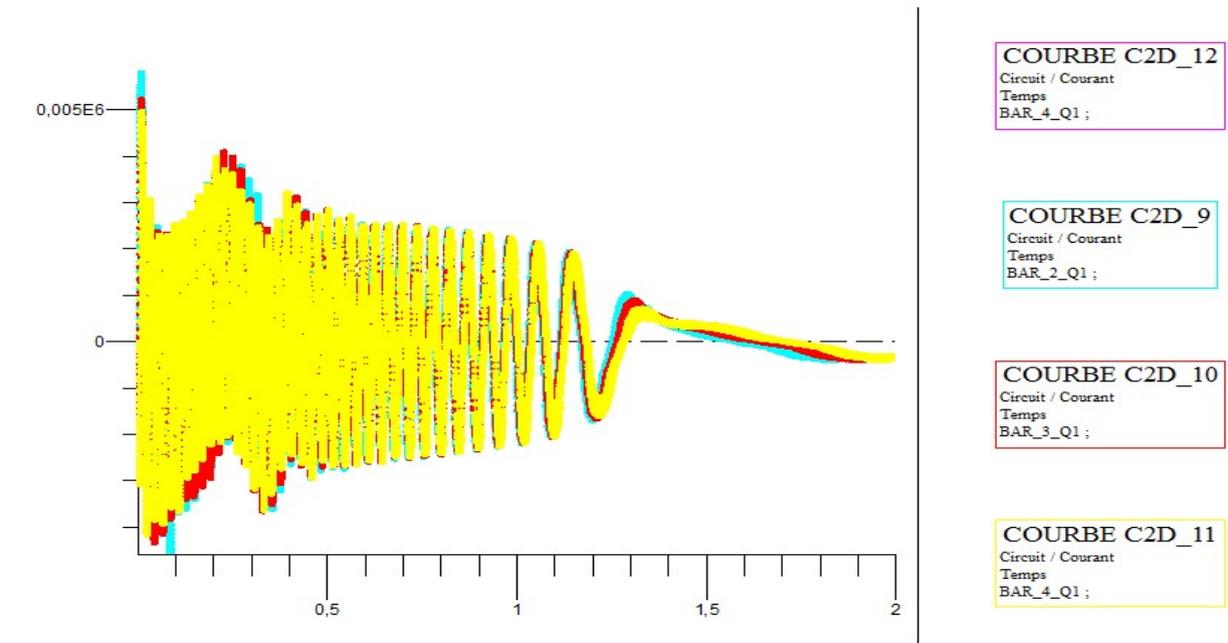


Fig. 3.22 courant rotoriques en charge

L'effet de la saturation sur le courant absorbé par la machine est moins accentué en régime nominal (Fig.3.19).

Pendant le régime transitoire du calcul, le couple (Fig.3.21) part de zéro et arrive à la valeur nominale de 14 N.m. Durant le régime nominal, le couple se stabilise autour de la valeur nominale avec de présence des ondulations.

3.9.3 Comparaison des résultats de simulation :

Dans cette paragraphe nous intéressons à la comparaison entre les résultats de simulation obtenus par la méthode des éléments finis et ceux obtenus par le modèle de Park.

a. à vide

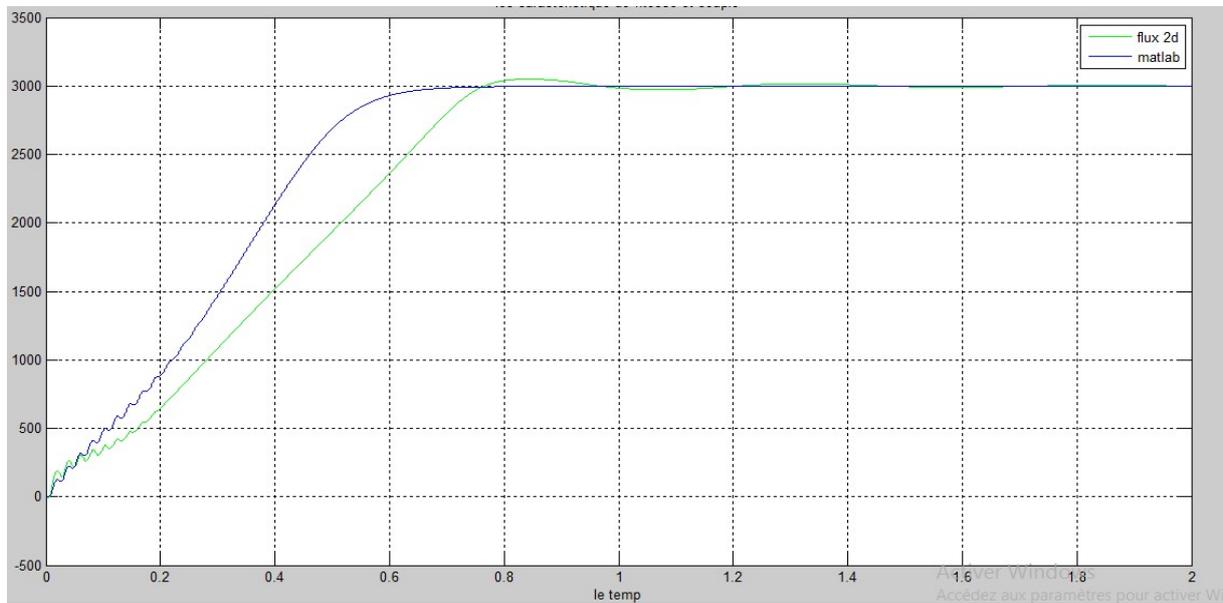


Fig.3.23 comparaison des résultats des vitesses

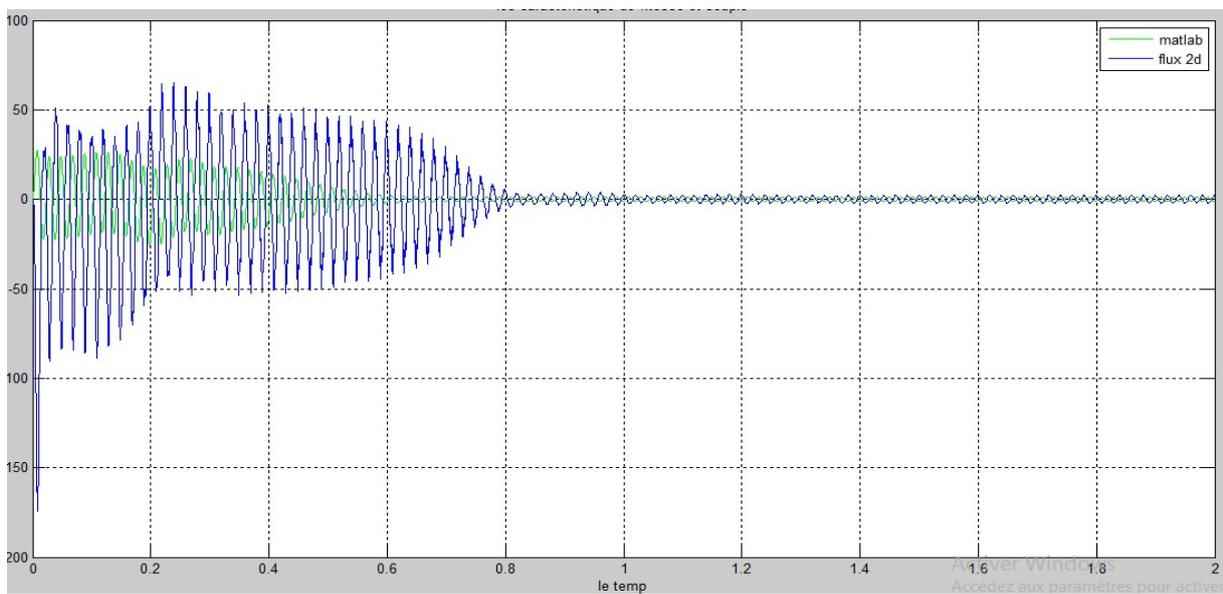


Fig.3.24 comparaison des résultats des courants

Chapitre 3 simulations de la MASDE Par la méthode des éléments finis

b.en charge :

On applique une charge de 14 N.m à $t = 0$.

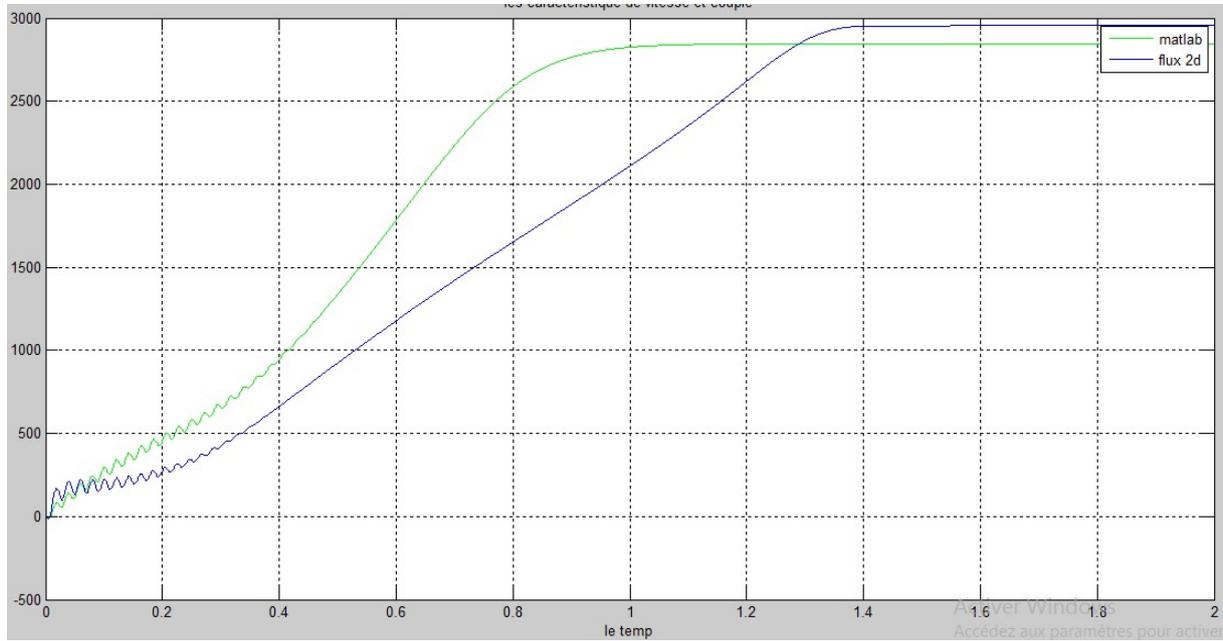


Fig.3.25 comparaison des résultats des vitesses

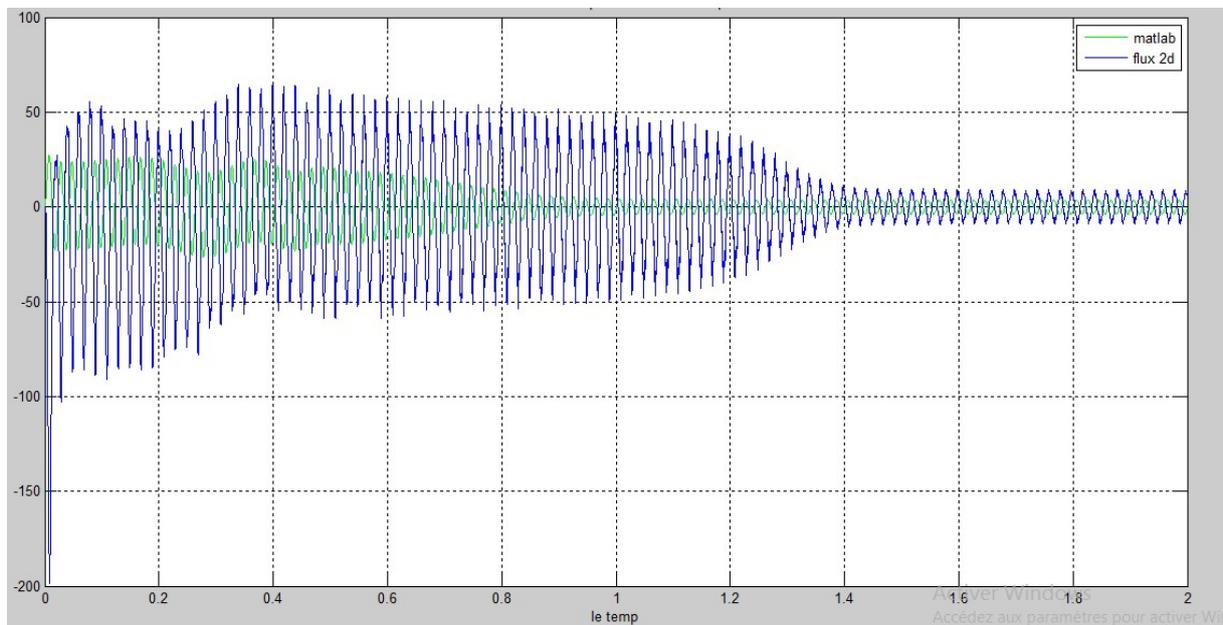


Fig.3.26 comparaison des résultats des courants

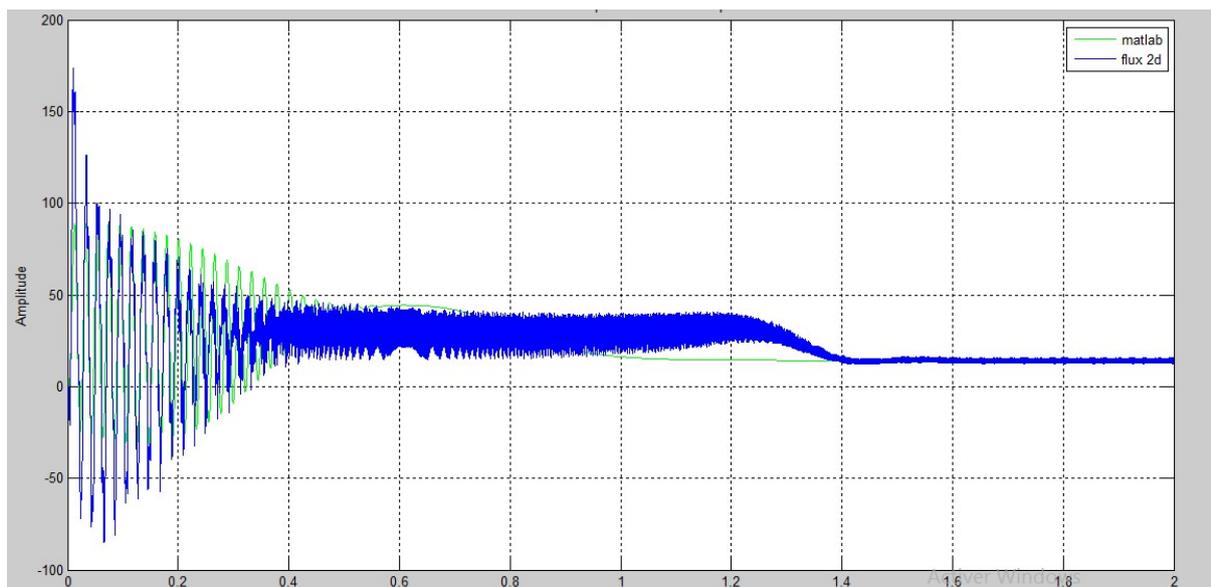


Fig.3.27 comparaison des couples

On remarque que :

- Le temps de réponse présenté dans la simulation par le logiciel Matlab est mieux et rapide que ce présenté dans la simulation par le logiciel Flux-2D.
- Dans la simulation par le logiciel Flux-2D, dans le régime permanent, il ya des ondulations au niveau du couple électromagnétique autour la valeur nominale.
- Il y a une petite différence dans les deux valeurs de la vitesse nominale et dans les deux valeurs du courant nominal (variation de 3.4% pour la vitesse et 6.06% pour le courant nominal).

Conclusion :

Ce chapitre a fait l'objet de l'établissement d'un modèle numérique de MASDE basé sur la méthode des éléments finis, sous l'environnement de logiciel Flux 2D®.

Nous avons simulé la MASDE en 2 dimensions (2D). Et nous avons visualisé la répartition des lignes du champ magnétique et l'induction magnétique. Egalement nous avons simulé la machine en régime transitoire, nous avons abordé à la simulation des comportements dynamiques de la MASDE (simulation de fonctionnement à vide et en charge).

Chapitre 3 simulations de la MASDE Par la méthode des éléments finis

Par la suite, nous avons passé à la comparaison des résultats obtenus avec les résultats de simulation par le logiciel Matlab. On conclue que les résultats de simulation par flux2-D sont proches à la réalité à cause de l'absence des hypothèses simplificatrices

Dans notre mémoire nous avons commencé par la mise en évidence des principes fondamentaux des machines polyphasées. La machine le plus courant est la machine asynchrone double étoile présente un bon compromis techno-économique.

Dans ce mémoire nous avons fait la modélisation de la MASDE à partir des équations mathématique dans le repère de Park pour obtenir un modèle simple qui traduit fidèlement le fonctionnement de la machine asynchrone. Les résultats de simulation que nous avons développé sous matlab nous ont permis de voir l'évolution des caractéristiques de la MASDE pour différents modes de fonctionnement ces résultats ont montré l'effet de démarrage en charge.

Par la suite, nous avons implémenté le modèle numérique de la MASDE sous l'environnement Flux-2d ce modèle est adapté bien pour calculer le potentiel vecteur magnétique sur des structures avec des caractéristiques des matériaux magnétiques non-linéaire et avec une géométrie complexe. Ce modèle nous a permis de faire une simulation en magnéto-transitoire de la machine en fonctionnement à vide et en charge. Ensuite nous avons fait une comparaison avec les résultats de simulation par Matlab.

On conclut que les résultats obtenus par flux 2d sont proches à la réalité à cause de l'absence des hypothèses simplificatrices.

En perspective, ce mémoire ouvre des axes de travail tels que la réalisation pratique, l'étude de l'alimentation, l'étude de défaut, fonctionnement dégradé, ...etc.

Annexes

Annexes

Paramètre de la MASDE

$$V_s = 220 \cdot \sqrt{2} \text{ (v) ;}$$

$$f_s = 50 \text{ (Hz);}$$

$$\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot f_s \text{ (rd/s);}$$

$$R_{s1} = 3.72 \Omega;$$

$$R_{s2} = R_{s1} \Omega;$$

$$R_r = 2.12 \Omega;$$

$$L_{s1} = 0.022 \text{ (h);}$$

$$L_{s2} = L_{s1} \text{ (h);}$$

$$L_r = 0.06 \text{ (h);}$$

$$L_m = 0.3672 \text{ (h);}$$

$$l = 1 / (1/L_{s2} + 1/L_{s1} + 1/L_r + 1/L_m) \text{ (h);}$$

$$l_a = 1/l \text{ (h);}$$

$$\alpha = 30^\circ;$$

$$j = 0.0625;$$

$$f = 0.001 \text{ s;}$$

$$p = 1 ;$$

Nom du problème	Magnéto-transitoire
Type de problème	Magnétique transitoire 2D
fréquence	50Hz
Type du domaine	2D plan
Profondeur du domaine	125mm
Symétrie et périodicité=>coefficient calcul	Coefficient automatique (symétrie et

Annexes

flux bobines	périodicité prises en compte)
--------------	-------------------------------

Nom de Matériel	Type	isotrope valeur	Saturation isotopique des splines	Courbe équivalent B(H)
STEEL_NLIN	B(H) : Isotrope spline saturation		(0,0) ;(300,0.66) ;(500,1.09) ;(1000,1.45) ;(1500,1.56) ;(2000,1.61) ;(3000,1.69) ;(4000,1.73) ;(5000,1.76) ;(6000,1.79) ;(7000,1.83) ;(8000,1.85) ;(10000,1.89) ;(20000,2.04) ;(30000,2.11) ;(40000,2.14) ;(50000,2.16) ;(60000,2.18) ;(70000,2.1925)	Sine Wave flux densité
ALU_COLD	B(H) : Linéaire isotrope	1		
ALU_COLD	J(E) : isotrope résistivité	3.12e-8Ωm		

Ensemble mécanique	Commentaire	type	Cord.Système	Pivot Point	Charge couplée
Rotor	Rotor	Rotation suivant un axe parallèle à oz	Rotor	(0 ; 0 ; 0)	Moment d'inertie : 0.0625 kg.m ² Friction coefficient : 0.001N.m.S Drag Torque : 0.0N.m Vecteur initiale : 0.0 rpm
Stator	Stator	fixe	—	--	--
Air-gap	Air-gap	COMPRESSIBLE	—	--	--

Annexes

Nom de la région de face (type d'air ou de vide)	Ensemble mécanique
INSULATION	Stator
SHAFT	Rotor
Air-gap	Air-gap

circuit	CIR_VOLTAGE
commente	Valeur
R1; R2; R3; R4; R5; R6	1e+6Ω
R_U; R_V; R_W ; R_U1; R_V1; R_W1	0.9Ω
L_U ; L_V ; R_W	4.04 mH
Nombre de barres pour cage d'écureuil	20
R_cage_d'écureuil	0.904e-6 Ω
L_cage_d'écureuil	1.06e-8 H
V_U	$220 \cdot \text{SQRT}(2) \cdot \text{SIN}(2 \cdot \text{PI} \cdot 50 \cdot \text{TIME})$
V_V	$220 \cdot \text{SQRT}(2) \cdot \text{SIN}(2 \cdot \text{PI} \cdot 50 \cdot \text{TIME} - 2 \cdot \text{pi} / 3)$
V_W	$220 \cdot \text{SQRT}(2) \cdot \text{SIN}(2 \cdot \text{PI} \cdot 50 \cdot \text{TIME} + 2 \cdot \text{pi} / 3)$
B_U, B_V, B_W	0.992 Ω
V_U1	$380 \cdot \text{Sqrt}(2) \cdot \text{Sin}(2 \cdot \text{Pi} () \cdot 50 \cdot \text{TIME} - \text{Pi} () / 6)$
V_V1	$220 \cdot \text{Sqrt}(2) \cdot \text{Sin} (2 \cdot \text{Pi} () \cdot 50 \cdot \text{TIME} - 2 \cdot \text{Pi} () / 3 - \text{Pi} () / 6)$
V_W1	$220 \cdot \text{Sqrt}(2) \cdot \text{Sin}(2 \cdot \text{Pi} () \cdot 50 \cdot \text{TIME} + 2 \cdot \text{Pi} () / 3 - \text{Pi} () / 6)$

Annexes

Nom de la région de visage (région de conducteur de bobine type)	Nombre de tour	Composant Associé Bobine	orientation	Symétries et périodicités	Ensemble mécanique
U1, U4	104	B_U	Positive	Tous les conducteurs sont en série	Stator
U2, U3	104	B_U	Négative	Tous les conducteurs sont en série	Stator
V1, V4	104	B_V	Positive	Tous les conducteurs sont en série	Stator
V2, V3	104	B_V	Négative	Tous les conducteurs sont en série	Stator
W1, W4	104	B_W	Positive	Tous les conducteurs sont en série	Stator
W2, W3	104	B_W	Négative	Tous les conducteurs sont en série	Stator

Nom de la région de visage (région de conducteur de bobine type)	Matériel	Type de conducteur	Conducteur solide Associé	orientation	Ensemble mécanique
BAR_1	ALU_COLD	Circuit	BAR_1_Q1	Positive	ROTOR
BAR_2	ALU_COLD	Circuit	BAR_1_Q1	Positive	ROTOR
BAR_3	ALU_COLD	Circuit	BAR_1_Q1	Positive	ROTOR
...
BAR_19	ALU_COLD	Circuit	BAR_1_Q1	Positive	ROTOR
BAR_20	ALU_COLD	Circuit	BAR_1_Q1	Positive	ROTOR

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Mr. OUNOUCHE TOUFIK, Mr. BOURAHLA MOHAMED AMINE : 'Calcul par éléments finis et réalisation expérimentale d'une machine asynchrone à cage double étoile', Mémoire de Master de l'université HOUARI BOUMEDIENE, Algérie, juin 2010.
- [2] HAMMACHE HAKIM : 'Etude et réalisation d'une machine asynchrone double étoile : conception, alimentation et commande ', Mémoire de Magister de L'Ecole militaire polytechnique, Algérie, 15/1/2007.
- [3] ABED KEBAIRI, YOUCEF BELATTAR : 'Etude et réalisation d'une machine asynchrone double étoile ', Mémoire d'ingénieur d'état, Algérie, 2006.
- [4] K. Xavier : 'Modélisation vectorielle multi machines pour la commande de ensembles convertisseurs-machines polyphasés ', Thèse de doctorat, Université de Lille1, 2003.
- [5] M. Bernard : 'Historique des machines électromagnétiques et plus particulièrement des machines à réluctance variable ', Revue 3E. In°3. pp. 3–8, Juin 1995.
- [6] L. A. Philip, E. A. Robert : 'The history of induction motors in america', Proceedings of the *IEEE.*, vol. 64, no. 9, pp. 1380–1383, Sept 1976.
- [7] D. HADIOUCHE : 'Contribution à l'étude de la machine asynchrone double étoile : modélisation, alimentation et structure ', Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Vandœuvre-lès-Nancy, 20 Décembre 2001.
- [8] E. MERABET : 'Commande Floue Adaptative d'une Machine Asynchrone Double Etoile ', thèse de Magister de l'université de Batna, 2008.
- [9] L. Benalia : 'Commande en tension des moteurs à induction double alimentés ', Thèse de doctorat de l'Université de Batna, 02 juin 2010.
- [10] A. Bruyere : ' Modélisation et commande d'un alterno-démarrreur heptaphasé pour application automobile micro-hybride ', Thèse de doctorat, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 6 mai 2009.
- [11] Kercha Safia, Goubi Wissam : 'Etude et modélisation des machines électriques double étoile' Thème Master académique Université kasdi merbah ouargla, 27/06/2013.

Bibliographie

- [12] G. Crelllet, G. Clerc : 'Actionneurs électriques', Editions Eyrolles Paris, France, 1997.
- [13] Khoudir Marouani : 'contribution à la commande d'un entraînement électrique à base de moteur asynchrone double étoile '. Thèse DE. Doctorat. Ecole Militaire Polytechnique France, 17 juin 2010.
- [14] D. Hadiouche, H. Razik, A. Rezzoug : ' Study and simulation of space vector PWM control of double-star induction motors', *IEEE-CIEP*, Acapulco, Mexico., pp. 42–47, October 2000.
- [15] H. Razik : 'Modeling of double star induction motor for diagnosis purpose', *In IEEE*, pp. 907–912, 2003.
- [16] RACHIDE ABDE ESSEMED : 'Modélisation des machines électriques', Ellipses édition marketing, 2011.
- [17] A. Assam : 'Identification des Machines Asynchrones en Vue de Leurs diagnostics ', Thèse de magister de l'Université de Sétif, soutenue 2010.
- [18] B. Vaseghi : ' Contribution à l'étude des machines électriques en présence de défaut entre-spires : Modélisation – Réduction du courant de défaut ', Thèse de doctorat de l'Université de Nancy, 3 décembre 2009.
- [19] H. Radjeai : 'Contribution à l'amélioration des modèles mathématiques des machines synchrones', Thèse de Doctorat, Université de Sétif, 2007.
- [20] LAKHDARI Meftah: 'SIMULATION ET COMMANDE DE LA MACHINE ASYNCHRONE DOUBLE ETOILE POUR AEROGENERATION', thèse de magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIF-1 université ferhat abbas setif_1, 2014.
- [21] D. Bendittis : 'étude et modèle électromagnétique de machine asynchrone pour l'alternateur-démarrreur', Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, 2002.
- [22] FLUX2D® : 'application induction motor technical paper ', Cedrat, May 2006.