

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'ELECTROTECHNIQUE

Laboratoire de Recherche en Électrotechnique

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Électrotechnique

Intitulé :

Machine asynchrone pentaphasée alimentée par un transformateur asymétrique pentaphasé

Présenté par :

LAHMAR Sara et AMEZIANE Mohamed Reda

Sous la direction de : **TOUHAMI Omar Professeur ENP**

Présenté le **08/07/2021**

Composition du Jury

Président **Pr. IBTIOUEN Rachid**

Promoteur **Pr. TOUHAMI Omar**

Examineur **Pr. MAHMOUDI Med Oulhadj**

ENP 2021

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'ELECTROTECHNIQUE

Laboratoire de Recherche en Électrotechnique

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Électrotechnique

Intitulé :

Machine asynchrone pentaphasée alimentée par un transformateur asymétrique pentaphasé

Présenté par :

LAHMAR Sara et AMEZIANE Mohamed Reda

Sous la direction de : **TOUHAMI Omar Professeur ENP**

Présenté le **08/07/2021**

Composition du Jury

Président **Pr. IBTIOUEN Rachid**

Promoteur **Pr. TOUHAMI Omar**

Examineur **Pr. MAHMOUDI Med Oulhadj**

ENP 2021

الملخص

يتم الاستناد بالآلات متعددة الأطوار لأكثر تطور لأنها تقدم أداءً مثيراً للاهتمام من حيث عزم الدوران ، والتيار المنخفض وكفاءة أعلى من الآلات ثلاثية الطور. تتناول أطروحة نهاية الدراسات هذه التحديد المعياري والهيكلية لآلة غير المتزامنة خماسية الأطوار ذات القفص بالإضافة إلى تشخيص أعطال الجزء الثابت. بدأ العمل بعد إنشاء نموذج الآلة في الإطار المرجعي خماسي الطور ثم في الإطار المرجعي ثم في مرجع بارك

يتيح هذا النموذج إمكانية الوصول إلى دارة مكافئة لطور ، والتي يتم حساب معالماتها من الاختبارات القياسية ، والتي تم إحضارها لاحقاً لاستخدامها في النموذج المحاكي للجهاز. تتم بعدها معالجة التحديد الهيكلي للآلة. الغرض منه هو القياس والتحكم. يتناول هذا الموضوع أيضاً دراسة سلوك الآلة في حالة حدوث خلل في فتح طور أو طورين للجزء الثابت .

الكلمات المفتاحية: آلة غير متزامنة خماسية الطور, مطابقة الخصائص, مطابقة الهيكل, التوافقيات, التحليل الطيفي.

Abstract

Multiphase machines are called to the greatest development because they present interesting performances in terms of torque, current per phase, less important and a higher efficiency than the three-phase machines. This thesis deals with the parametric and structural identification of the five-phase asynchronous machine with cage as well as the diagnosis of faults in the stator. The work is started after having established the model of the machine in the 5-phase reference frame and then in the Park reference frame; this model allows obtaining an equivalent circuit per phase whose parameters are calculated from the standard tests, which are used then in the simulated model of the machine. A structural identification of the machine is processed. It is intended for control purposes. The subject also deals with the study of the behavior of the machine in the case of an opening fault of one or two phases in the stator.

Key words: 5-phase machine, harmonics, parameter identification, structural identification, fault analysis

Résumé

Les machines polyphasées sont appelées au plus grand développement car elles présentent des performances intéressantes en termes de couple, courant par phase moins important et un rendement supérieur à celui des machines triphasées. Ce mémoire de fin d'études traite de l'identification paramétrique et structurale de la machine asynchrone pentaphasée à cage ainsi que le diagnostic de défauts au stator. Le travail est entamé après avoir établi le modèle de la machine dans le référentiel pentaphasé puis dans le référentiel de Park ; ce modèle permet d'aboutir à un circuit équivalent par phase dont les paramètres sont calculés à partir des tests standards, amenés par la suite à être utilisés dans le modèle simulé de la machine. Une identification structurale de la machine est traitée. Elle est destinée à des fins de contrôle-commande. Le sujet aborde aussi l'étude du comportement de la machine dans le cas de défaut d'ouverture d'une ou de deux phases au stator.

Mots clé : Machine pentaphasée, Harmoniques, Identification paramétrique, Identification structurale, Diagnostic de défauts

Remerciement

Ce mémoire a été réalisé au Laboratoire de Recherche en Électrotechnique LRE de l'Ecole Nationale Polytechnique sous la direction de **Mr Omar TOUHAMI**, professeur à l'ENP.

Nous tenons tout d'abord à lui témoigner notre reconnaissance pour son suivi rigoureux et sa grande disponibilité. Nous lui présentons également nos remerciements pour ses judicieux conseils et orientations.

Nous remercions particulièrement **Mr Rachid IBTIOUEN** professeur à l'ENP, qui nous a fait l'honneur de présider ce jury, ainsi que **Mr Oulhadj Mahmoudi** professeur à l'ENP d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Nous présentons notre profonde gratitude et reconnaissance à nos chers parents pour leurs chaleureux encouragements, leurs sacrifices inestimables et leur grande confiance.

Finalement, nos vifs remerciements vont à l'ensemble de nos enseignants et à toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail

*A ma mère et mon père qui m'ont soutenu et encouragé durant ces années d'étude,
qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.*

*A mon frère et ma sœur et ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion
lors de la réalisation de ce travail, ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout
au long de mon parcours.*

*A ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.
A mon ami Taibi Badr Eddine avec qui j'ai passé des bons moments et à mon cher
cousin Yacine Amani et mon ami d'enfance Taki Kezai*

Merci.

MOHAMED

Dédicaces

A la mémoire de mon grand-père, que Dieu l'accueille dans ses vastes paradis

Je dédie ce modeste travail

*A mes chers parents pour tout leur amour, leur soutien et leurs prières tout au long de
mes études*

A mon frère Mohamed et ma sœur Mimi

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire

*A mes très chers amis Toumia, Amine, Meriem, Rania, Hadjer, Nassim, Chahinez,
Darine, Dalila, Fares*

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre
soutien infaillible*

Merci d'être toujours là pour moi

Sara

Table des matières

Chapitre 1

Table des figures

Liste des tableaux

Liste de notations et symboles

Introduction générale	16
1.1 Introduction	19
1.2 Classification des machines asynchrones polyphasées	19
1.2.1 Machines de type 1	19
1.2.2 Machines de type 2	20
1.3 Caractéristiques des machines polyphasées.....	20
1.4 Domaines d'application des machines polyphasées.....	20
1.5 Machine asynchrone pentaphasée	20
1.5.1 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone pentaphasée	21
1.5.2 Choix de la machine asynchrone pentaphasée	21
1.5.3 Construction de la machine asynchrone pentaphasée étudiée	21
1.5.4 Types de couplage de la machine asynchrone pentaphasée	22
1.5.5 Injection de l'harmonique 3 dans la machine asynchrone pentaphasée	23
1.6 Modélisation de la machine asynchrone pentaphasée	24
1.6.1 Hypothèses simplificatrices	25
1.6.2 Modélisation dans le référentiel pentaphasé	25
1.6.2.1 Équations en tension au stator et au rotor	25
1.6.2.2 Expressions des flux et des inductances	26
1.6.2.3 Équations mécaniques.....	27
1.6.3 Modèle de la machine asynchrone pentaphasée dans le repère (d, q)	28
1.6.3.1 Transformation de Park	28
1.6.3.2 Au Stator	29
1.6.3.3 Au Rotor	29
1.6.3.4 Expressions des flux	29
1.7 Modélisation des enroulements statoriques	30
1.7.1 Configuration étoile	31
1.7.2 Configuration pentacle	31

1.7.3 Configuration pentagone	32
1.8 Schéma équivalent par phase de la machine asynchrone pentaphasée.....	32
1.8.1 Modèle de la machine asynchrone pentaphasée en régime transitoire	32
1.8.2 Modèle de la machine asynchrone pentaphasée en régime permanent	33
1.9 Conclusion.....	34

Chapitre 2

2.1 Introduction	36
2.1.1 Identification paramétrique d'une machine asynchrone pentaphasée à cage d'écureuil	36
2.1.1.1 Schéma de la machine asynchrone pentaphasée à cage d'écureuil en régime permanent	36
2.1.1.2 Détermination des paramètres électriques et mécaniques	37
2.1.1.2.1 Test à courant continu (mesure de la résistance d'une phase statorique)	37
2.1.1.2.2 Test à vide	39
2.1.1.2.3 Test à rotor bloqué	40
2.1.1.2.4 Test de ralentissement	41
2.2 Identification structurale ou non paramétrique,	43
2.2.1 L'identification des systèmes en utilisant les structures de modèles	44
2.2.1.1 Étapes de base de l'identification des systèmes	44
2.2.1.2 Problème d'identification du système	45
2.2.1.2.1 Modèle ARX (Auto Regressive model with eXternal input)	45
2.2.1.2.2 Le modèle ARMAX (Auto Regressive Moving Average with eXternal input)	46
2.2.1.2.3 Le modèle BJ (Box Jenkins).....	46
2.2.1.2.4 IV4 (Instrumental Variable)	47
2.3 Tests expérimentaux.....	47
2.4 Résultats d'identification.....	48
2.4.2 Modèle ARMAX	49
2.4.3 Structure de Modèle Variable Instrumentale (IV4)	50
2.4.4 Structure de modèle BJ	51
2.5 Comparaison des résultats obtenus pour cette identification	52
2.6 Conclusion.....	52

Chapitre 3

3.1 Introduction	55
3.2 Banc d'essais expérimental	55
3.3 Configuration étoile	56
3.3.1 Fonctionnement de la machine saine	57
3.3.2 Ouverture d'une phase statorique	58
3.3.3 Ouverture de deux phases	59

3.4 Configuration pentagone	61
3.4.1 Fonctionnement de la machine saine	61
3.4.2 Ouverture d'une phase au stator	63
3.4.3 Ouverture de deux phases statoriques	64
3.5 Configuration pentacle	65
3.5.1 Fonctionnement de la machine saine	66
3.5.2 Ouverture d'une phase	67
3.5.3 Ouverture de deux phases statoriques	68
3.6 Simulation par MATLAB/SIMULINK	69
3.6.1 Configuration étoile	71
3.6.1.1 Fonctionnement de la machine saine	71
3.6.1.2 Ouverture d'une phase	72
3.6.1.3 Ouverture de deux phases au stator	73
3.6.2 Configuration pentagone	74
3.6.2.1 Fonctionnement de la machine saine	74
3.6.2.2 Ouverture d'une phase au stator	75
3.6.2.3 Ouverture de deux phases au stator	76
3.6.3 Configuration pentacle	77
3.6.3.1 Fonctionnement de la machine saine	77
3.6.3.2 Ouverture d'une phase	78
3.6.3.3 Ouverture de deux phases au stator	79
3.7 Résultats et Discussions	80
3.8 Conclusion	81
Conclusion générale	82
Bibliographie	83

Table des figures

Chapitre 1

Figure 1. 1 : Différentes configurations d'enroulements pour une machine électrique pentaphasée,....	22
Figure 1. 2: Couplage pour l'isolation de la séquence 3 dans le stator de la machine asynchrone pentaphasée.	24
Figure 1. 3: Modèle de la machine asynchrone pentaphasée avec les séquences 1 et 3	25
Figure 1. 4: Tensions de phases pour la connexion pentacle.....	31
Figure 1. 5: Tensions de phases pour la connexion pentagone.....	32
Figure 1. 6 : Circuit équivalent par phase de la machine à l'arrêt pour la séquence k.....	33

Chapitre 2

Figure - 2. 1: Schéma équivalent en régime permanent pour la séquence k	37
Figure - 2. 2: Couplage étoile de la machine asynchrone pentaphasée	38
Figure - 2. 3: Couplage du transformateur avec le stator de la machine pour l'injection de l'harmonique 3.....	38
Figure - 2. 4: Schéma équivalent à vide	39
Figure - 2. 5: Schéma équivalent à rotor bloqué.....	40
Figure - 2. 6: Vitesse de ralentissement de la machine jusqu'à l'arrêt complet	42
Figure - 2. 7: Représentation d'une structure de modèle ARX	46
Figure - 2. 8: Représentation d'une structure de modèle ARMAX	46
Figure - 2. 9: Représentation d'une structure de modèle Box-Jenkins	47
Figure - 2. 10: Représentation d'une structure de modèle IV.....	47
Figure - 2. 11: Signal de la tension d'entrée.....	47
Figure - 2. 12: Le signal du courant (signal de sortie)	48
Figure - 2. 13: Comparaison entre la sortie expérimentale et la sortie simulée pour le modèle ARX ...	49
Figure - 2. 14: Comparaison entre la sortie expérimentale et celle simulée pour le modèle ARMAX ..	50
Figure - 2. 15: Comparaison entre la sortie expérimentale et la sortie simulée pour le modèle IV4	51
Figure - 2. 16: Comparaison entre la sortie expérimentale et la sortie simulée pour le modèle BJ	52

Chapitre 3

Figure - 3. 1 : Banc d'essais expérimental.....	56
Figure - 3. 2 : transformateur asymétrique 3 vers 5 phases.....	56
Figure - 3. 3: Connexion étoile sur la plaque à bornes d'une machine asynchrone pentaphasée	56
Figure - 3. 4: Configuration de connexion étoile de l'enroulement statorique d'une machine asynchrone pentaphasée	57
Figure - 3. 5: vitesse expérimentale de la machine saine	57
Figure - 3. 6: Courants statoriques expérimentaux des phases a, b et c pour un régime sain.....	57
Figure - 3. 7: Spectre de raies du courant statorique.....	58
Figure - 3. 8: vitesse de la machine après ouverture d'une phase au stator (tests expérimentaux).....	58
Figure - 3. 9: Courants statoriques des phases a, b et c après ouverture d'une phase au stator (tests expérimentaux).....	59
Figure - 3. 10: Spectre de raies du courant statorique avec ouverture d'une phase.....	59
Figure - 3. 11: Vitesse de la machine avec ouverture de deux phases au stator (tests expérimentaux) .	60

Figure - 3. 12: Courants statoriques des phases a, b et c avec ouverture de deux phases au stator (tests expérimentaux).....	60
Figure - 3. 13: Spectre de raies du courant statorique avec ouverture de deux phases au stator	60
Figure - 3. 14: Connexion pentagone sur la plaque à bornes d'une machine asynchrone pentaphasée .	61
Figure - 3. 15: Configuration pentagone de l'enroulement statorique d'une machine asynchrone pentaphasée	61
Figure - 3. 16: vitesse de la machine saine (tests expérimentaux).....	62
Figure - 3. 17: Courants statoriques des phases a, b et c (tests expérimentaux).....	62
Figure - 3. 18: Spectre de raies du courant statorique (tests expérimentaux).....	62
Figure - 3. 19: vitesse de la machine (tests expérimentaux).....	63
Figure - 3. 20: Courants statoriques des phases a, b et c avec ouverture d'une phase au stator (tests expérimentaux).....	63
Figure - 3. 21: Spectre de raies du courant statorique après ouverture d'une phase	63
Figure - 3. 22: Vitesse de la machine avec ouverture de deux phases au stator (tests expérimentaux) .	64
Figure - 3. 23: Courants statoriques des phases a, b et c avec ouverture de deux phases au stator (tests expérimentaux).....	64
Figure - 3. 24: Spectre de raies du courant statorique après ouverture de deux phases	65
Figure - 3. 25: Connexion pentacle sur la plaque à bornes d'une machine asynchrone pentaphasée	65
Figure - 3. 26: Configuration de connexion pentacle de l'enroulement statorique d'une machine asynchrone pentaphasée	65
Figure - 3. 27: Vitesse de la machine après ouverture de deux phases au stator (tests expérimentaux)	66
Figure - 3. 28: Courants statoriques des phases a, b et c pour un fonctionnement sain (tests expérimentaux).....	66
Figure - 3. 29: Spectre de raies du courant statorique pour un fonctionnement sain (tests expérimentaux).....	66
Figure - 3. 30: vitesse de la machine après ouverture d'une phase au stator (tests expérimentaux).....	67
Figure - 3. 31: Courants statoriques des phases a, b et c après ouverture d'une phase au stator (tests expérimentaux).....	67
Figure - 3. 32: Spectre de raies du courant statorique après ouverture d'une phase	68
Figure 3. 33: vitesse de la machine après ouverture de deux phases au stator (tests expérimentaux) ...	68
Figure - 3. 34: Courants statoriques des phases a, b et c après ouverture de deux phases au stator (tests expérimentaux).....	69
Figure - 3. 35: Spectre de raies du courant statorique après ouverture de deux phases au stator	69
Figure 3. 36: Schéma block de simulation sur Matlab/SIMULINK.	70
Figure 3. 37: Schéma block de la machine sur SIMULINK.	70
Figure 3. 38: Tensions d'alimentation simulées de la machine pentaphasée	70
Figure - 3. 39: vitesse de la machine simulée pour un fonctionnement sain	71
Figure - 3. 40: Couple électromagnétique simulé pour un fonctionnement sain	71
Figure - 3. 41: Courants statoriques simulés pour un fonctionnement sain	71
Figure - 3. 42: vitesse de la machine simulée avec ouverture d'une phase au stator.	72
Figure - 3. 43: Couple électromagnétique simulé avec ouverture d'une phase au stator	72
Figure - 3. 44: Courants statoriques simulés avec ouverture d'une phase au stator	72
Figure - 3. 45: vitesse de la machine simulée après ouverture de deux phases au stator	73
Figure - 3. 46: Couple électromagnétique simulé, après ouverture de deux phases au stator	73
Figure - 3. 47: Courants statoriques simulés après ouverture de deux phases au stator.....	73
Figure - 3. 48: vitesse de la machine simulée pour un fonctionnement sain	74
Figure - 3. 49: Couple électromagnétique simulé pour un fonctionnement sain	74
Figure - 3. 50: Courants statoriques simulés pour un fonctionnement sain	74
Figure - 3. 51: vitesse de la machine simulée après ouverture d'une phase au stator.....	75
Figure - 3. 52: Couple électromagnétique simulé, après ouverture d'une phase au stator.....	75
Figure - 3. 53: Courants statoriques simulés après ouverture d'une phase au stator	75

Figure - 3. 54: vitesse de la machine simulée après ouverture de deux phases au stator	76
Figure - 3. 55: Couple électromagnétique simulé, après ouverture de deux phases au stator	76
Figure - 3. 56: Courants statoriques simulés après ouverture de deux phases au stator.....	76
Figure - 3. 57: Vitesse de la machine simulée pour un fonctionnement sain	77
Figure - 3. 58: Couple électromagnétique simulé pour un fonctionnement sain	77
Figure - 3. 59: Courants statoriques simulés de la machine saine	77
Figure - 3. 60: vitesse de la machine simulée après ouverture d'une phase au stator	78
Figure - 3. 61: Couple électromagnétique simulé, après ouverture d'une phase au stator	78
Figure - 3. 62: Courants statoriques simulés après ouverture d'une phase au stator	78
Figure - 3. 63: vitesse de la machine simulée après ouverture de deux phases au stator	79
Figure - 3. 64: Couple électromagnétique simulé, après ouverture de deux phases au stator	79
Figure - 3. 65: Courants statoriques simulés après ouverture de deux phases.....	79

Liste des tableaux

Tableau 2. 1: Courant et tension continus.	37
Tableau 2. 2 : Résultats de l'essai à vide pour la séquence 1	39
Tableau 2. 3: Résultats de l'essai à vide pour la séquence 3	39
Tableau 2. 4: Résultats de l'essai à rotor bloqué pour la séquence 1	40
Tableau 2. 5: Résultats de l'essai à rotor bloqué pour la séquence 3	40
Tableau 2. 6: Paramètres électriques identifiés pour la séquence1	41
Tableau 2. 7: Paramètres électriques identifiés pour la séquence3	41
Tableau 2. 8: Tableau comparatif des résultats de l'identification.	52

Liste de notations et symboles

a, b, c, d, e : Indices des phases statoriques dans le repère pentaphasé.

d, q : Indices des axes d et q de la transformation de Park.

R_s : Résistance statorique.

R_r : Résistance rotorique.

L_m : Inductance de magnétisation.

L_s : Inductance propre de l'enroulement statorique.

L_r : Inductance propre de l'enroulement rotorique.

l_s : inductance de fuite statorique

l_r : inductance de fuite rotorique

[V_s] : Vecteur des tensions statoriques dans le repère pentaphasé.

[V_r] : Vecteur des tensions rotoriques dans le repère pentaphasé.

[I_s] : Vecteur des courants statoriques dans le repère pentaphasé.

[I_r] : Vecteur des courants rotoriques dans le repère pentaphasé.

[Ψ_s] : Vecteur des flux statoriques dans le repère pentaphasé.

[Ψ_r] : Vecteur des flux rotoriques dans le repère pentaphasé.

[R_s] : Matrice résistance statorique.

[R_r] : Matrice résistance rotorique.

[L_{ss}] : Matrice inductance statorique.

[L_{rr}] : Matrice inductance rotorique.

[M_{sr}] : Matrice inductance mutuelle rotor-stator.

[M_{rs}] : Matrice inductance mutuelle stator- rotor.

[T(θ)] : matrice de park

[F_{abcde}] : Vecteur de la base naturelle.

[F_{dq1dq30}] : Vecteur de la base de découplage

p : Nombre de paires de pôles.

n : Nombre de phases de la machine.

v : Déphasage entre deux phases statoriques.

θ : La position angulaire du rotor par rapport au stator.

Ω : Vitesse de rotation mécanique.

J: Moment d'inertie de la machine

C_{em} : Couple électromagnétique

C_r : Couple résistant (couple de charge)

Ω : Vitesse angulaire de rotation

F : Coefficient de frottements visqueux

g : Glissement.

X_s : Réactance statorique.

X_r : Réactance rotorique.

X_m : Réactance magnétisante.

I_m : Courant magnétisant.

Z : impédance équivalente

P : Puissance active.

Q : Puissance réactive.

S : Puissance apparente.

$\cos \varphi$: Facteur de puissance.

Z : Impédance statorique.

I_n : courant nominal

I_{cc} : courant de court-circuit

I_s : courant statorique.

I_r : courant rotorique

P : l'opérateur de Laplace

z : l'opérateur de Laplace discontinu

q : opérateur retard

FPE-AKAIKE's : l'erreur de prédiction finale

MSE : l'erreur quadratique moyenne

na, nb, nc, nf, no, nk : l'ordre des polynômes A, B, C, F, O, retard

Introduction générale

Le moteur asynchrone représente un élément fondamental dans les systèmes d'entraînements électriques à vitesse variable dans sa position actuelle dominante. De par, sa simplicité de conception et d'entretien, il demeure le moteur électrique le plus utilisé dans l'industrie. Cette simplicité s'accompagne toutefois d'une grande complexité physique, liée aux interactions électromagnétiques entre le stator et le rotor. Même si les moteurs à induction, monophasé et triphasé, dominent respectivement les utilisations domestiques et industrielles actuelles, les moteurs à un nombre de phases supérieures à trois, dit "Polyphasés" sont de plus en plus étudiés par les chercheurs académiques, [1]. Les premiers travaux consacrés à ce type de machines remontent à 1969, [2] et sont également l'objet de plusieurs recherches de la part des industriels. Ces moteurs polyphasés ont plusieurs avantages parmi lesquelles on peut citer : [3]

- Leurs utilisations dans un domaine d'application donné avec réduction de la puissance totale par phase ;
- La réduction de l'amplitude du courant de démarrage ;
- La possibilité de réduire les ondulations du couple, comparées au cas des machines conventionnelles ;
- La diminution de la fréquence de pulsation du couple;
- La réduction des courants harmoniques du rotor ;
- L'obtention d'une fiabilité plus élevée et d'une puissance accrue dans le même ordre ;
- Les possibilités de conditionnement de l'énergie électrique, qu'offre l'électronique de puissance, ont non seulement permis de modifier considérablement les conditions de fonctionnement des machines électriques classiques, mais également ont conduit au développement des machines polyphasées visant à satisfaire les besoins de plusieurs applications spécifiques. En effet, la multiplication du nombre de phases permet un fractionnement de la puissance et donc, une réduction des tensions commutées à un courant donné ;
- La possibilité d'utiliser la machine polyphasée avec défauts au stator ou au rotor.

Le système polyphasé est susceptible de rester limité aux applications spécialisées exigeant une grande fiabilité, telles que les véhicules électriques / hybrides, les applications aérospatiales, la propulsion navale et les applications à forte puissance où la combinaison de plusieurs dispositifs à semi-conducteurs constitue un des piliers de l'entraînement électrique à vitesse variable. Le système polyphasé peut également profiter de la possibilité de poursuivre le fonctionnement dans des conditions de défauts, cependant, ceci requiert une bonne connaissance des paramètres électriques et mécaniques de la machine pour éviter toute détérioration de leur fonctionnement et assurer un comportement de hautes performances dynamiques.

Ce mémoire de fin d'études traite de l'identification paramétrique et structurale de la machine asynchrone pentaphasée à cage ainsi que le diagnostic de défauts au stator.

Après avoir effectué une identification par des tests standards, nous développons un modèle de la machine et validons ces résultats par des simulations sous environnement Matlab/Simulink. Notre mémoire de fin d'études comporte trois chapitres répartis comme suit :

Dans le premier chapitre, nous avons écrit les équations électriques et mécaniques de fonctionnement de la machine dans un référentiel pentaphasé (a, b, c, d, e) puis dans le référentiel de Park. Ensuite, ce modèle élaboré nous a permis d'aboutir à un circuit équivalent par phase.

Dans le deuxième chapitre, nous avons déterminé les différents paramètres du circuit équivalent grâce aux tests expérimentaux standards effectués sur la machine du Laboratoire de Recherche en Électrotechnique de l'ENP. Ensuite, nous avons traité une méthode d'identification non paramétrique dite structurale (par les structures de modèle) sur la machine fonctionnant en régime permanent en charge. Cette identification est destinée à des fins de contrôle-commande.

Enfin, dans le troisième chapitre, nous avons analysé le comportement de la machine sous défaut d'ouverture d'une ou de deux phases au stator. Des résultats expérimentaux validés par la simulation sont présentés pour montrer le comportement de la machine dans les cas sains ou avec défauts.

Chapitre 1

Modélisation de la machine asynchrone pentaphasée

1.1 Introduction

Hormis les machines électriques triphasées, qui sont de loin les mieux connues (fabrication, techniques de bobinage, alimentation, commande, etc.) et restent les plus utilisées, il existe des machines à plusieurs phases appelées "machines polyphasées". Ces dernières offrent une alternative intéressante à la réduction des contraintes appliquées aux interrupteurs comme aux bobinages. En effet, la multiplication du nombre de phases permet un fractionnement de la puissance et, de ce fait une réduction des tensions commutées à courant donné. De plus, ces machines offrent la réduction de l'amplitude et l'augmentation de la fréquence des ondulations du couple, permettant ainsi à la charge mécanique de les filtrer aisément. Aussi, la multiplication du nombre de phases offre la possibilité de faire fonctionner la machine avec une ou plusieurs phases en défaut. Les machines polyphasées sont présentes dans les domaines de la propulsion navale, la traction ferroviaire, l'industrie pétrochimique, l'avionique, l'automobile, etc.

Les machines polyphasées sont traitées sous plusieurs aspects dans plusieurs articles scientifiques depuis les dernières décennies, [4].

Dans ce chapitre, nous présentons des généralités sur les machines asynchrones polyphasées ainsi que leurs usages dans différents domaines d'application. Ensuite, nous nous intéressons particulièrement à la machine asynchrone pentaphasée.

1.2 Classification des machines asynchrones polyphasées

Selon la parité du nombre de phases des machines asynchrones polyphasées, on distingue deux catégories que nous mentionnons ci-après. Cette classification permet d'avoir plusieurs configurations pour un nombre donné de phases suivant le décalage angulaire entre deux bobines adjacentes. Ceci permet de définir le nombre de phases équivalent donner comme suit, [5]:

$$n\varphi_{\alpha} = 2\pi\alpha$$

1.2.1 Machines de type 1

Dans ce type de machines, appelées aussi machines multi-étoiles, le nombre de phases statoriques est un multiple de trois, de sorte que l'on puisse les grouper en plusieurs étoiles triphasées.

C'est-à-dire:

$$n\varphi_{\alpha} = 3n \quad \text{Avec } n = 1, 2, 3 \dots$$

1.2.2 Machines de type 2

Dans ce type de machines, le nombre de phases statoriques est un nombre impair, d'où:

$$n\varphi_{\alpha} = 2n + 1 \text{ avec } n = 1, 2, 3 \dots$$

1.3 Caractéristiques des machines polyphasées

Même si les moteurs à induction, monophasé et triphasé, dominent respectivement les utilisations domestiques et industrielles actuelles, les moteurs à un nombre de phases supérieures à trois, dit "Polyphasés" sont de plus en plus utilisés par la communauté scientifique et industrielle. En effet, les machines polyphasées présentent des caractéristiques particulièrement attractives et une meilleure fiabilité pour l'ensemble convertisseur-machine. Elles permettent l'augmentation du nombre de phases, offrant ainsi une réduction des ondulations du couple électromagnétique et un fractionnement de la puissance; ce qui diminue les contraintes de dimensionnement sur les composants d'électronique de puissance alimentant chaque phase. De plus, elles présentent une solution intéressante pour des applications exigeantes en termes de discrétion vibratoire ou acoustique et accroissent la possibilité de fonctionnement en marche dégradé tout en préservant une qualité de couple acceptable qui représente une caractéristique fondamentale pour les applications devant garantir une excellente continuité de service, [6],[7].

1.4 Domaines d'application des machines polyphasées

Le système polyphasé est susceptible de rester limité aux applications spécialisées exigeant une grande fiabilité, telles que les véhicules électriques / hybrides, les applications aérospatiales, la propulsion navale et les applications à forte puissance où la combinaison de plusieurs dispositifs à semi-conducteurs constitue un des piliers de l'entraînement électrique à vitesse variable. Le système polyphasé peut également profiter de la possibilité de poursuivre le fonctionnement dans des conditions de défauts, [5].

1.5 Machine asynchrone pentaphasée

La machine asynchrone pentaphasée représente une bonne alternative aux machines asynchrones conventionnelles dont le nombre de phases est de trois, et ce, spécialement dans les applications industrielles nécessitant une plus grande densité de couple, [8]. La machine asynchrone pentaphasée présente également d'autres avantages dont la capacité de démarrer et de fonctionner même dans le cas d'ouverture ou de court-circuit d'une ou deux phases statoriques, la diminution des courants par phase sans augmentation de la tension par phase et l'amélioration de la fiabilité. Cependant, l'utilisation des machines asynchrones pentaphasées reste limitée à cause de la nécessité d'employer des circuits d'électronique de puissance plus complexes ou des transformateurs spéciaux pour leur alimentation, tandis qu'en contrepartie, les machines asynchrones triphasées sont directement alimentées par le réseau.

1.5.1 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone pentaphasée

Le fonctionnement de la machine asynchrone pentaphasée est similaire à celui de la machine à induction triphasée qui fonctionne selon la loi d'induction électromagnétique de Faraday. La seule différence est qu'elle a besoin d'une tension alternative d'entrée à cinq phases et le stator est constitué d'un enroulement à cinq phases. Dans un moteur à induction équilibré à cinq phases, les Cinq groupes d'enroulements statoriques sont répartis avec un espacement de 72° . Ce déphasage qui est inférieur à celui du moteur à induction triphasé, contribue à une densité de puissance plus élevée, [8].

Lors de l'alimentation des phases statoriques, les courants créent un champ magnétique tournant dans l'entrefer. La fréquence de rotation de ce champ est imposée par la fréquence de ces courants, c'est-à-dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation électrique. La vitesse du champ tournant est appelée "vitesse de synchronisme". L'enroulement au rotor est donc, soumis à des variations de flux. Par conséquent, une force électromotrice induite apparaît aux bornes de l'enroulement rotorique qui crée des courants rotoriques. Un couple qui tend à mettre le rotor en mouvement apparaît, [4].

1.5.2 Choix de la machine asynchrone pentaphasée

Le choix d'un nombre de phases approprié est un facteur crucial qui dépend de l'application. Des compromis doivent être pris en considération entre les performances du système en cas de défaut et la complexité des convertisseurs de puissance employés. Le choix des machines asynchrones pentaphasées ou hexaphasées dans plusieurs applications industrielles permet de satisfaire ces deux contraintes.

Même si les machines asynchrones hexaphasées adhèrent à l'utilisation des convertisseurs triphasés standards, les machines à bobinage pentaphasé présentent des performances plus considérables en cas de défauts. En outre, elles permettent une amélioration d'environ 10% de la densité de couple avec injection du troisième harmonique sans la nécessité d'ajout d'un convertisseur (onduleur) comme pour le cas hexaphasé. De plus, un nombre impair de phases permet de choisir entre différentes alternatives de connexion du stator, ce qui affecte fortement les performances de la machine particulièrement dans des conditions de défaut, [9].

1.5.3 Construction de la machine asynchrone pentaphasée étudiée

La machine pentaphasée étudiée est une machine bipolaire constituée de 156 spires connectées en série par phase et de 28 barres rotoriques. Le diamètre interne du rotor est de 106 mm et la longueur utiles égale à 120 mm. L'entrefer est d'une épaisseur de 0.7 mm. L'alimentation est assurée par un transformateur triphasé au primaire et pentaphasée au secondaire réalisé par le Laboratoire de Recherche en Électrotechnique de l'École Nationale Polytechnique. Le nombre d'encoques par phase ainsi que l'ouverture d'encoche doivent être

convenablement déterminés afin d'assurer la génération d'une force électromotrice radiale équilibrée.

1.5.4 Types de couplage de la machine asynchrone pentaphasée

Le couplage des enroulements statoriques permet de faire fonctionner la machine asynchrone à la tension assignée. Ce couplage est fonction de la tension que peuvent supporter les enroulements. Il est réalisé par une connexion sur la plaque à bornes. Pour trouver le nombre de couplages possibles pour une machine asynchrone à n-phases, on applique la relation suivante :

$$N_{couplage} = (N + 1)/2$$

Avec N le nombre de phases. Dans notre cas, trois alternatives de connexions au stator sont possibles pour la machine pentaphasée, Figure 1.1, ce qui affecte fortement les performances de la machine spécialement en cas de défauts.

- Couplage des enroulements en étoile: Il offre de meilleures performances pour un stator sain
- Couplage des enroulements en pentagone : Il peut s'avérer plus simple et efficace pour le cas d'ouverture de phase résultant d'une défaillance d'un bras du convertisseur
- Couplage des enroulements en pentacle : Il permet une augmentation de 90% du gain en tension de phase par enroulement comparé à celui obtenu lors de la connexion en étoile. Par conséquent, cette connexion est utilisée pour les applications à grande vitesse, [2], [9].

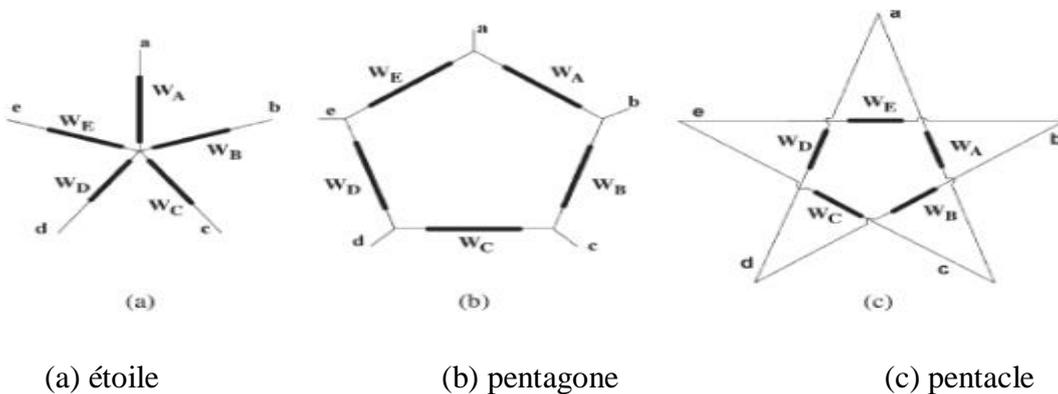


Figure 1. 1 : Différentes configurations d'enroulements pour une machine électrique pentaphasée,

La source de la machine à cinq phases, qui est soit la sortie d'un générateur à cinq phases soit un onduleur à cinq phases, est désigné par '1 2 3 4 5'. Cet ordre est considéré comme un ordre de référence.

Habituellement, les bornes de la source sont connectées aux bornes de la machine où la borne "1" de la source est connectée à la borne "a" de l'enroulement du stator, et ainsi de suite. La tension est égale à la tension de la source en phase, lorsqu'elle est connectée en étoile, Figure.1.1a. Les autres phases sont décalées de 72° entre elles.

Si les enroulements sont connectés en pentagone, Figure.1.1b, la tension du stator est la différence entre deux tensions de phases adjacentes. Les tensions de ligne pour les phases adjacentes ont une amplitude de $1,1756 V_{\max}$.

$$\begin{aligned} v_{ab} = v_{an} - v_{bn} &= V_m \cos(\theta) - V_m \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{5}\right) = 2 \cdot V_m \sin\left(\frac{\pi}{5}\right) \cdot \cos\left(\theta + \frac{3\pi}{10}\right) \\ &= 1.1756 V_m \cos\left(\theta + \frac{3\pi}{10}\right) \end{aligned}$$

Les autres tensions sont toutes décalées de 72° dans le cas de la séquence de référence.

Dans la connexion pentacle, Figure.1.1.c, les tensions des enroulements du stator sont égales à la différence entre deux phases non adjacentes. Les tensions de ligne pour les phases non adjacentes ont une amplitude de $1,902 V_{\max}$

$$\begin{aligned} v_{ab} = v_{an} - v_{cn} &= V_m \cos(\theta) - V_m \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{5}\right) = 2 \cdot V_m \sin\left(\frac{2\pi}{5}\right) \cdot \cos\left(\theta + \frac{\pi}{10}\right) \\ &= 1.902 V_m \cos\left(\theta + \frac{\pi}{10}\right) \end{aligned}$$

Les autres tensions sont décalées de 72° par rapport à cette tension dans le cas de la séquence de référence.

Remarque

La transposition de phase peut être calculée à partir des permutations de cinq phases qui donnent 120 connexions alternatives.

Sur les 120 séquences, seules 20 séquences permettent à la machine d'avoir un champ tournant équilibré.

Ces 20 séquences comprennent 10 séquences pour la vitesse du moteur en marche avant et 10 séquences pour la vitesse inverse du moteur. Cinq des 10 séquences du moteur en marche avant tournent à la vitesse nominale en raison de la séquence fondamentale uniquement, et les 5 autres tournent au tiers de la vitesse nominale grâce à l'efficacité de la troisième séquence, [10].

1.5.5 Injection de l'harmonique 3 dans la machine asynchrone pentaphasée

L'une des caractéristiques les plus importantes d'une machine polyphasée est la possibilité d'améliorer sa densité de couple par l'injection d'harmoniques, et donc la densité de puissance. En effet, l'augmentation de la densité du couple total dans une machine asynchrone polyphasée avec un nombre de phases m impair, est permise grâce à l'utilisation de

l'harmonique fondamental du champ en plus des harmoniques d'ordre supérieur (inférieur à m). Par conséquent, elle est modélisée par $(m-1)/2$ séquences. Le troisième harmonique n'entre pas en interaction avec l'harmonique fondamental dans l'espace et dans le temps. Pour les machines asynchrones pentaphasées, le troisième harmonique peut être injecté et contribue ainsi à la production du couple. Ainsi, deux plans de séquence $d_1 - q_1$ et $d_3 - q_3$ sont utilisés pour modéliser la machine. Un rapport adéquat entre le courant fondamental magnétisant et celui du troisième harmonique injecté, permet d'obtenir une densité de flux quasi-rectangulaire sans dépasser le niveau de saturation. Par conséquent, une distribution quasi-uniforme du flux est obtenue dans l'entrefer, réduisant ainsi la saturation locale des dents, ce qui améliore le rendement, [9].

L'isolation de la séquence 3 est réalisée par un couplage spécifique des phases statoriques avec le transformateur pentaphasé au secondaire comme illustré à la Figure 1.2 :

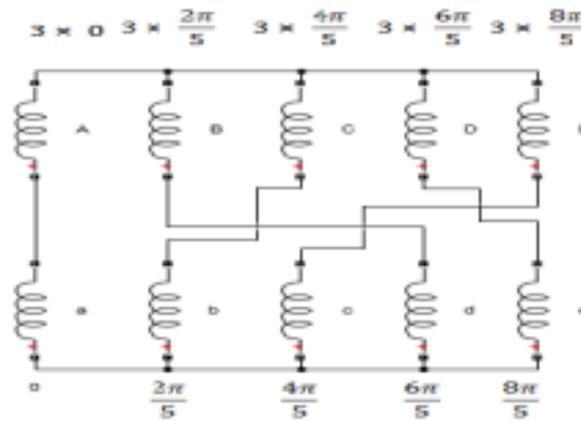


Figure 1. 2: Couplage pour l'isolation de la séquence 3 dans le stator de la machine asynchrone pentaphasée.

1.6 Modélisation de la machine asynchrone pentaphasée

La machine asynchrone pentaphasée, constituée de cinq enroulements statoriques déphasés de $2\pi/5$ dans l'espace et cinq enroulements rotatifs fictifs identiques en court-circuit décalés également de $2\pi/5$ peut être représentée par un système d'équations électriques et mécaniques. Les effets de la séquence 1 et 3 peuvent être directement imposés comme deux composantes de fréquence similaires. Par conséquent, la machine asynchrone pentaphasée en présence des composantes de la séquence 1 et de la séquence 3, est considérée comme deux modèles pentaphasés indépendants comme le montre la Figure 1.3, [11].

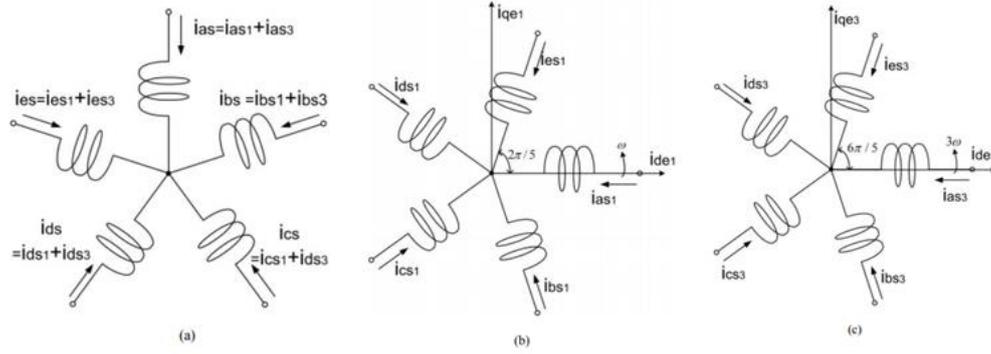


Figure 1. 3: Modèle de la machine asynchrone pentaphasée avec les séquences 1 et 3

1.6.1 Hypothèses simplificatrices

Pour étudier le comportement de la machine asynchrone pentaphasée en régime dynamique et permanent, il est nécessaire d'adopter certaines hypothèses simplificatrices:

La force magnétomotrice créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale, avec :

- L'entrefer uniforme
- La machine est de constitution symétrique
- La saturation du circuit magnétique, l'effet de l'hystérésis et les courants de Foucault sont tous négligés

1.6.2 Modélisation dans le référentiel pentaphasé

Dans ce qui suit, nous élaborons le modèle de la machine asynchrone pentaphasée comme suit :

1.6.2.1 Équations en tension au stator et au rotor

Les équations en tension sont sous la forme matricielle suivante :

Au stator :

$$V_s = [R_s][I_s] + \frac{d[\Psi_s]}{dt} \quad (1.1)$$

$$V_s = [v_{sa} \quad v_{sb} \quad v_{sc} \quad v_{sd} \quad v_{se}]^t \quad (1.2)$$

$$I_s = [i_{sa} \quad i_{sb} \quad i_{sc} \quad i_{sd} \quad i_{se}]^t \quad (1.3)$$

$$\Psi_s = [\Psi_{sa} \quad \Psi_{sb} \quad \Psi_{sc} \quad \Psi_{sd} \quad \Psi_{se}]^t \quad (1.4)$$

De même pour les enroulements rotoriques, on écrit :

$$V_r = [R_r][I_r] + \frac{d[\Psi_r]}{dt} \quad (1.5)$$

$$V_r = [v_{ra} \ v_{rb} \ v_{rc} \ v_{rd} \ v_{re}]^t \quad (1.6)$$

$$I_r = [i_{ra} \ i_{rb} \ i_{rc} \ i_{rd} \ i_{re}]^t \quad (1.7)$$

$$\Psi_r = [\Psi_{ra} \ \Psi_{rb} \ \Psi_{rc} \ \Psi_{rd} \ \Psi_{re}]^t \quad (1.8)$$

Les enroulements rotoriques sont court-circuités, ce qui conduit à:

$$[0] = [R_r][I_r] + \frac{d[\Psi_r]}{dt} \quad (1.9)$$

Les matrices de résistances statoriques et rotoriques sont des matrices diagonales de forme :

$$[R_s] = R_s[I_5] \quad (1.10)$$

$$[R_r] = R_r[I_5] \quad (1.11)$$

Avec $[I_5]$ la matrice identité d'ordre 5.

1.6.2.2 Expressions des flux et des inductances

La relation entre les flux et les courants est :

$$\Psi_s = [L_{ss}]I_s + [M_{sr}]I_r \quad (1.12)$$

et

$$\Psi_r = [L_{rr}]I_r + [M_{sr}]I_s \quad (1.13)$$

Avec :

$$[L_{ss}] = L_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + L_{ms} \begin{bmatrix} 1 & \cos(v) & \cos(2v) & \cos(3v) & \cos(4v) \\ \cos(4v) & 1 & \cos(v) & \cos(2v) & \cos(3v) \\ \cos(3v) & \cos(4v) & 1 & \cos(v) & \cos(2v) \\ \cos(2v) & \cos(3v) & \cos(4v) & 1 & \cos(v) \\ \cos(v) & \cos(2v) & \cos(3v) & \cos(4v) & 1 \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

Et,

$$[L_{rr}] = L_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + L_{mr} \begin{bmatrix} 1 & \cos(v) & \cos(2v) & \cos(3v) & \cos(4v) \\ \cos(4v) & 1 & \cos(v) & \cos(2v) & \cos(3v) \\ \cos(3v) & \cos(4v) & 1 & \cos(v) & \cos(2v) \\ \cos(2v) & \cos(3v) & \cos(4v) & 1 & \cos(v) \\ \cos(v) & \cos(2v) & \cos(3v) & \cos(4v) & 1 \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

$$[M_{sr}] = M \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + v) & \cos(\theta_r + 2v) & \cos(\theta_r + 3v) & \cos(\theta_r + 4v) \\ \cos(\theta_r + 4v) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + v) & \cos(\theta_r + 2v) & \cos(\theta_r + 3v) \\ \cos(\theta_r + 3v) & \cos(\theta_r + 4v) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + v) & \cos(\theta_r + 2v) \\ \cos(\theta_r + 2v) & \cos(\theta_r + 3v) & \cos(\theta_r + 4v) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + v) \\ \cos(\theta_r + v) & \cos(\theta_r + 2v) & \cos(\theta_r + 3v) & \cos(\theta_r + 4v) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

Tel que : $v = \frac{2\pi}{5}$

$[L_{ss}]$ et $[L_{rr}]$ sont respectivement les matrices statoriques et rotoriques tandis que $[M_{sr}]$ est la matrice des inductances mutuelles entre le stator et le rotor.

En remplaçant les expressions des flux totaux dans les équations électriques du stator et du rotor, on obtient :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + [L_{ss}] \frac{d[I_s]}{dt} + \frac{d}{dt} ([M_{sr}][I_r]) & (1.17) \\ [0] = [R_r][I_r] + [L_{rr}] \frac{d[I_r]}{dt} + \frac{d}{dt} ([M_{sr}][I_s]) & (1.18) \end{cases}$$

Avec : $[M_{sr}] = [M_{sr}]^t$

1.6.2.3 Équations mécaniques

Afin de concevoir le modèle complet, il faut ajouter nécessairement l'équation mécanique caractérisant le mode lent de la machine.

Le Couple électromagnétique fourni par la machine est obtenu par dérivation de la coénergie:

$$C_e = \frac{p}{2} [I_s^t \quad I_r^t] \frac{d}{d\theta_e} \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{sr}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} \quad (1.19)$$

Les matrices $[L_{ss}]$ et $[L_{rr}]$ sont indépendantes de la position et, par suite:

$$\frac{d[L_{ss}]}{d\theta} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{d[L_{rr}]}{d\theta} = 0 \quad (1.20)$$

De plus, nous tenons compte de l'égalité suivante :

$$[I_s]^t \frac{d[M_{sr}]}{d\theta} [I_r] = [I_r]^t \frac{d[M_{sr}]^t}{d\theta} [I_s] \quad (1.21)$$

Ce qui donne :

$$C_e = p [I_s]^t \frac{d[M_{sr}]}{d\theta} [I_r] \quad (1.22)$$

L'expression mécanique est la suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - F\Omega \quad (1.23)$$

Avec,

J: Moment d'inertie de la machine

C_{em} : Couple électromagnétique

C_r : Couple résistant (couple de charge)

Ω : Vitesse angulaire de rotation

F : Coefficient de frottements visqueux

1.6.3 Modèle de la machine asynchrone pentaphasée dans le repère (d, q)

Les équations de tension et du couple décrivent le comportement dynamique du moteur asynchrone variant avec le temps. De telles équations conduisent à la complexité lors de la résolution des équations différentielles. Un changement de variable dépendant du temps et invariant peut être utilisé pour minimiser la complexité des équations de tension de la machine en raison du mouvement du circuit électrique. Grâce à cette technique, un enroulement polyphasé peut être réduit à un ensemble d'enroulements biphasés(d-q) qui sont en quadrature l'un par rapport à l'autre. En d'autres termes, les variables du stator et du rotor (liaisons de tension, de courant et de flux) d'un moteur asynchrone sont transférées à un référentiel arbitraire.

1.6.3.1 Transformation de Park [11]

La résolution analytique des équations précédentes est très difficile car le système d'équations de la machine pentaphasée possède des coefficients variables en fonction du temps. Afin de résoudre cela, on doit passer par un système biphasé équivalent d'axes d et q. Dans le but de simplifier le modèle par élimination des paramètres variant dans le temps en prenant en considération les paramètres du troisième harmonique tel que :

$$F_{q1d1q3d30} = T(\theta) \cdot F_{abcde} \quad (1.24)$$

Avec,

$$[T(\theta)] = \frac{2}{5} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \nu) & \cos(\theta - 2\nu) & \cos(\theta - 3\nu) & \cos(\theta - 4\nu) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \nu) & \sin(\theta - 2\nu) & \sin(\theta - 3\nu) & \sin(\theta - 4\nu) \\ \cos(3\theta) & \cos(3\theta - 3\nu) & \cos(3\theta - 6\nu) & \cos(3\theta - 9\nu) & \cos(3\theta - 12\nu) \\ \sin(3\theta) & \sin(3\theta - 3\nu) & \sin(3\theta - 6\nu) & \sin(3\theta - 9\nu) & \sin(3\theta - 12\nu) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

On choisit un référentiel lié au champ tournant et en appliquant la transformation de Park aux équations des tensions, et aux équations de flux, nous obtenons le système d'équations suivant :

1.6.3.2 Au Stator

- Pour la Séquence 1

$$\begin{cases} v_{ds1} = R_s i_{ds1} + \frac{d}{dt} \Psi_{ds1} - \omega_e \Psi_{qs1} \\ v_{qs1} = R_s i_{qs1} + \frac{d}{dt} \Psi_{qs1} + \omega_e \Psi_{ds1} \end{cases} \quad (1.26)$$

$$\begin{cases} v_{ds1} = R_s i_{ds1} + \frac{d}{dt} \Psi_{ds1} - \omega_e \Psi_{qs1} \\ v_{qs1} = R_s i_{qs1} + \frac{d}{dt} \Psi_{qs1} + \omega_e \Psi_{ds1} \end{cases} \quad (1.27)$$

- Pour la Séquence 3

$$\begin{cases} v_{ds3} = R_s i_{ds3} + \frac{d}{dt} \Psi_{ds3} - 3\omega_e \Psi_{qs3} \\ v_{qs3} = R_s i_{qs3} + \frac{d}{dt} \Psi_{qs3} + 3\omega_e \Psi_{ds3} \end{cases} \quad (1.28)$$

$$\begin{cases} v_{ds3} = R_s i_{ds3} + \frac{d}{dt} \Psi_{ds3} - 3\omega_e \Psi_{qs3} \\ v_{qs3} = R_s i_{qs3} + \frac{d}{dt} \Psi_{qs3} + 3\omega_e \Psi_{ds3} \end{cases} \quad (1.29)$$

- Pour la Séquence homopolaire

$$v_0 = R_s i_0 + \frac{d}{dt} \Psi_0$$

1.6.3.3 Au Rotor

$$\begin{cases} 0 = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \Psi_{dr} - (\omega_e - \omega_r) \Psi_{qr} \\ 0 = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \Psi_{qr} + (\omega_e - \omega_r) \Psi_{dr} \end{cases} \quad (1.30)$$

$$\begin{cases} 0 = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \Psi_{dr} - (\omega_e - \omega_r) \Psi_{qr} \\ 0 = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \Psi_{qr} + (\omega_e - \omega_r) \Psi_{dr} \end{cases} \quad (1.31)$$

1.6.3.4 Expressions des flux

Les expressions des Flux statoriques sont :

- Pour la Séquence 1

$$\begin{cases} \Psi_{ds1} = L_s i_{ds1} + L_{m1} i_{dr} \\ \Psi_{qs1} = L_s i_{qs1} + L_{m1} i_{qr} \end{cases} \quad (1.32)$$

$$\begin{cases} \Psi_{ds1} = L_s i_{ds1} + L_{m1} i_{dr} \\ \Psi_{qs1} = L_s i_{qs1} + L_{m1} i_{qr} \end{cases} \quad (1.33)$$

- Pour la Séquence 3

$$\begin{cases} \Psi_{ds3} = L_s i_{ds3} + 3L_{m3} i_{dr} \\ \Psi_{qs3} = L_s i_{qs3} + 3L_{m3} i_{qr} \end{cases} \quad (1.34)$$

$$\begin{cases} \Psi_{ds3} = L_s i_{ds3} + 3L_{m3} i_{dr} \\ \Psi_{qs3} = L_s i_{qs3} + 3L_{m3} i_{qr} \end{cases} \quad (1.35)$$

Les expressions des Flux rotoriques sont :

$$\begin{cases} \Psi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \Psi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \end{cases} \quad (1.36)$$

$$\quad (1.37)$$

L'expression du couple électromagnétique est :

$$C_e = p I_s^t \frac{d[M_{sr}]}{d\theta} I_r = p I_{s,d,q}^t [T(\theta)^{-1}]^t \left(\frac{d[M_{sr}]}{d\theta} \right) T(\theta)^{-1} I_{r,d,q} \quad (1.38)$$

Ce qui donne comme couple électromagnétique pour les séquences 1 et 3:

- Pour la séquence 1

$$C_e = p(\Psi_{ds1} i_{qs1} - \Psi_{qs1} i_{ds1}) = pM_1(i_{dr1} i_{qs1} - i_{qr1} i_{ds1}) \quad (1.39)$$

- Pour la séquence 3

$$C_e = p(\Psi_{ds3} i_{qs3} - \Psi_{qs3} i_{ds3}) = 3pM_3(i_{dr3} i_{qs3} - i_{qr3} i_{ds3}) \quad (1.40)$$

Avec :

$$M_k = \frac{5L_{mk}}{2} \quad (1.41)$$

1.7 Modélisation des enroulements statoriques

Soit les tensions pentaphasées d'alimentation $u_{01}, u_{02}, u_{03}, u_{04}, u_{05}$ et les tensions de phases statoriques u_1, u_2, u_3, u_4, u_5 . Les composantes de la tension alternative pentaphasée sont décalées graduellement de $\frac{2\pi}{5}$.

Ce décalage est exprimé mathématiquement par le facteur de décalage complexe $a = e^{j\frac{2\pi}{5}}$

D'où :

$$\begin{aligned} u_{02} &= a u_{01} \\ u_{03} &= a^2 u_{01} \\ u_{04} &= a^3 u_{01} \\ u_{05} &= a^4 u_{01} \end{aligned} \quad (1.42)$$

1.7.1 Configuration étoile

Les tensions de phase du moteur de l'enroulement connecté en étoile dans le stator sont données directement par une phase d'alimentation comme suit, :

$$\begin{aligned}
 u_1 &= u_{01} \\
 u_2 &= u_{02} = au_{01} \\
 u_3 &= u_{03} = a^2u_{01} \\
 u_4 &= u_{04} = a^3u_{01} \\
 u_5 &= u_{05} = a^4u_{01}
 \end{aligned} \tag{1.43}$$

1.7.2 Configuration pentacle

Les tensions de phase du moteur de l'enroulement connecté en pentacle dans le stator sont données par une différence entre les tensions de deux phases d'alimentations non adjacentes comme suit, [12] :

$$\begin{aligned}
 u_1 &= u_c - u_a = u_{03} - u_{01} = (a^2 - 1)u_{01} \\
 u_2 &= u_e - u_c = u_{05} - u_{03} = (a^4 - a^2)u_{01} \\
 u_3 &= u_b - u_e = u_{02} - u_{05} = (a - a^4)u_{01} \\
 u_4 &= u_d - u_b = u_{04} - u_{02} = (a^3 - a^2)u_{01} \\
 u_5 &= u_a - u_d = u_{01} - u_{04} = (1 - a^3)u_{01}
 \end{aligned} \tag{1.44}$$

La représentation des vecteurs de tension pour cette configuration est présentée dans la Figure I.4 :

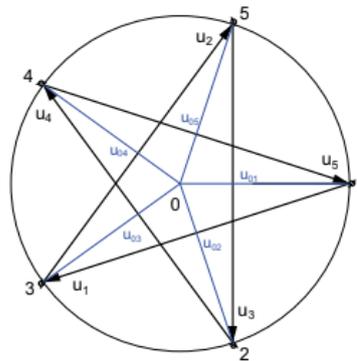


Figure 1. 4: Tensions de phases pour la connexion pentacle.

1.7.3 Configuration pentagone

Les tensions de phase du moteur de l'enroulement connecté en pentagone dans le stator sont données par une différence entre les tensions de deux phases d'alimentations adjacentes comme suit, [13] :

$$\begin{aligned}
 u_1 &= u_b - u_a = u_{02} - u_{01} = (a - 1)u_{01} \\
 u_2 &= u_c - u_b = u_{03} - u_{02} = (a^2 - a)u_{01} \\
 u_3 &= u_d - u_c = u_{04} - u_{03} = (a^3 - a^2)u_{01} \\
 u_4 &= u_e - u_d = u_{05} - u_{04} = (a^4 - a^3)u_{01} \\
 u_5 &= u_a - u_e = u_{01} - u_{05} = (1 - a^4)u_{01}
 \end{aligned} \tag{1.45}$$

La représentation des vecteurs de tension pour cette configuration est présentée dans la Figure I.5:

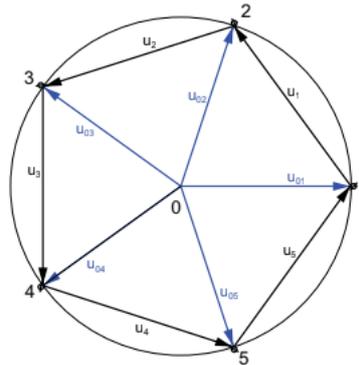


Figure 1. 5: Tensions de phases pour la connexion pentagone.

1.8 Schéma équivalent par phase de la machine asynchrone pentaphasée

La machine asynchrone pentaphasée munie d'enroulements concentriques et d'un nombre impair de phases N , est généralement modélisée en utilisant $(N - 1)/2$ sous-espaces orthogonaux et une séquence 0 (homopolaire). La séquence fondamentale est la productrice du flux/couple. La production du couple due aux autres séquences de l'espace est minimale car le glissement de la machine correspondant à ces séquences sera relativement élevé. Néanmoins, elles ont un effet négatif sur la distribution du flux de l'entrefer en cas de fonctionnement déséquilibré. Pour un bobinage distribué avec une distribution sinusoïdale du flux, ces composantes de flux peuvent être simplement négligées. Dans ce paragraphe, le modèle de machine en régime transitoire est d'abord donné, puis le modèle de régime permanent correspondant est déduit, [14].

1.8.1 Modèle de la machine asynchrone pentaphasée en régime transitoire

Les équations en tension de la machine pour toute séquence k représentées dans un référentiel lié au stator sont données comme suit :

$$V_{sk} = R_s i_{sk} + \frac{d\psi_{sk}}{dt} \quad (1.46)$$

$$0 = R_r i_{rk} + \frac{d\psi_{rk}}{dt} - jk\omega_r \psi_{rk} \quad (1.47)$$

Où : $k = 1$ et 3 pour les circuits de la séquence fondamentale et respectivement ceux de la troisième séquence. Pour le circuit homopolaire, l'équation en tension est donnée par :

$$v_{s0} = R_s i_{s0} + l_{s0} \frac{di_{s0}}{dt} \quad (1.48)$$

Ce qui conduit au schéma équivalent suivant :

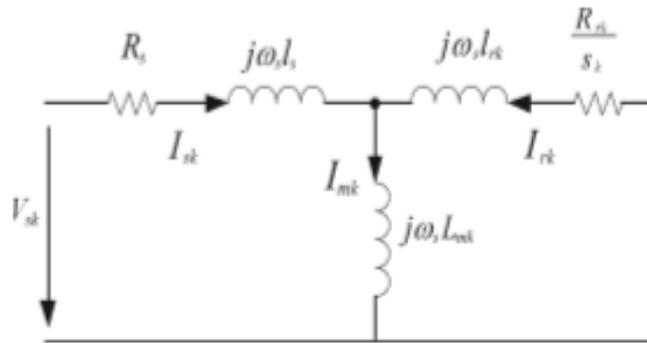


Figure 1. 6 : Circuit équivalent par phase de la machine à l'arrêt pour la séquence k

Les équations de flux pour toute séquence k sont données par :

$$\Psi_{sk} = l_s i_{sk} + L_{mk}(i_{sk} + i_{rk}) \quad (1.49)$$

$$\Psi_{rk} = l_{rk} i_{rk} + L_{mk}(i_{sk} + i_{rk}) \quad (1.50)$$

Dans ce modèle, l'inductance de fuite du stator, est supposée être la même pour le fondamental et la troisième séquence. De plus, l'effet des courants rotoriques induits dus à la troisième séquence est pris en compte en incluant l'impédance équivalente du circuit rotorique pour cette séquence dans le modèle mathématique.

1.8.2 Modèle de la machine asynchrone pentaphasée en régime permanent

Le modèle de la machine asynchrone pentaphasée en régime permanent est donné par :

$$v_{sk} = (R_s + j\omega_s l_s) I_{sk} + j\omega_s L_{mk}(I_{sk} + I_{rk}) \quad (1.51)$$

$$0 = [R_{rk} + j(\omega_s - k\omega_r)l_{rk}]I_{rk} + j(\omega_s - k\omega_r)L_{mk}(I_{sk} + I_{rk}) \quad (1.52)$$

L'équation de tension homopolaire est donnée par :

$$V_{s0} = (R_s + j\omega_s l_s)I_{s0} \quad (1.53)$$

Le circuit équivalent en régime permanent de la machine pour toute séquence k est présenté à la Figure – I.6. Le glissement g_k est défini par :

$$g_k = \begin{cases} 1 - \frac{k\omega_r}{\omega_s}, & k = 1,3 \\ 1 - \frac{(k-5)\omega_r}{\omega_s} & k = 2,4 \end{cases} \quad (1.54)$$

Où, k = 1 et 4 sont, respectivement, les séquences avant et arrière de la séquence fondamentale pour une machine à cinq phases ; et k = 3 et 2 sont les séquences avant et arrière du circuit fondamental pour la troisième séquence respectivement, [14].

1.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté globalement les machines asynchrones polyphasées avec un nombre de phases supérieur à trois qui présentent une meilleure alternative par rapport aux machines asynchrones conventionnelles dont le nombre de phases est égal à trois. Ensuite, nous nous sommes intéressés à l'étude de la machine asynchrone pentaphasée. Pour ce faire, nous avons établi son modèle mathématique dans le référentiel pentaphasé puis dans le référentiel de Park. Ce qui nous a permis d'élaborer son schéma équivalent par phase.

Chapitre 2

Identification paramétrique et structurale d'une machine asynchrone pentaphasée

2.1 Introduction

L'association de machines à des convertisseurs statiques offre de nombreuses possibilités de fonctionnement. Le dimensionnement du convertisseur statique et de sa commande nécessite une phase d'identification paramétrique de la machine, les méthodes d'identification classiques sont basées sur trois essais, à savoir : l'essai à vide (sans charge), l'essai à rotor bloqué et la méthode voltampère métrique pour la mesure de la résistance des enroulements statoriques. Ces méthodes utilisent les hypothèses simplificatrices. Les paramètres obtenus sont souvent éloignés de ceux correspondants aux conditions de fonctionnement de la machine.

Le problème posé consiste donc à identifier un modèle (ses paramètres dans le cas des méthodes d'identification paramétriques) à partir des données expérimentales. Préalablement, il faut mettre au point un banc d'essai muni d'un système de mesures de précision donnant le maximum d'informations. Ensuite, on procède au choix des algorithmes d'identification qui permettent, à partir des données, de préciser les paramètres du modèle candidat. Le choix d'un modèle candidat peut se faire à partir des lois physiques régissant le fonctionnement du système. Ce dernier, peut-être du type représentation d'état ou représentation entrée / sortie.

Les méthodes d'identification paramétrique sont utilisées dans le cas où l'on suppose la structure du modèle du processus à identifier (tel est le cas des machines électriques). Ces méthodes ont pour objectif de déterminer les valeurs inconnues des paramètres du modèle à partir des relevés expérimentaux mesurés sur le processus.

Par contre, si la procédure d'identification du modèle est du type structural, destinée à des fins de contrôle, il faudrait obtenir le meilleur modèle qui s'adapte aux données recueillis, pour satisfaire pour les performances de la boucle fermée. Cette approche est appelée identification non paramétrique pour le contrôle du système.

Dans ce chapitre, nous avons effectué une série de tests dits standards sur la machine asynchrone pentaphasée pour rendre possible le calcul des paramètres du schéma équivalent. Les différents tests ont été réalisés en considérant la séquence 01 d'espace puis la séquence 03.

Ensuite, nous avons effectué une identification non paramétrique en considérant un fonctionnement en régime permanent en charge de la machine à des fins de contrôle. Ceci est possible grâce à l'utilisation des structures de modèles d'identification telles que (ARX, ARMAX, etc.

2.1.1 Identification paramétrique d'une machine asynchrone pentaphasée à cage d'écureuil

Nous allons déterminer les paramètres à partir du schéma équivalent représenté à la Figure 2.1.

2.1.1.1 Schéma de la machine asynchrone pentaphasée à cage d'écureuil en régime permanent

Les équations en tension de la machine, pour toute séquence "k" représentée dans le référentiel stator, [7] :

$$V_{sk} = (R_s + j\omega_s L_s) I_{sk} + j\omega_s L_{mk} (I_{rk} + I_{sk}) \quad (2.1)$$

$$0 = [R_{rk} + j(\omega_s + k\omega_r) I_{rk}] + j(\omega_s + k\omega_r) L_{mk} (I_{sk} + I_{rk}) \quad (2.2)$$

Où $k = 1$ et 3 représente l'harmonique fondamental et respectivement l'harmonique trois du circuit équivalent.

Le glissement g_k est défini par :

$$g_k = 1 - \left(\frac{\omega_{rk}}{\omega_{sk}}\right) \quad k=1, 3 \quad (2.3)$$

Le schéma équivalent en régime permanent pour la séquence k est représenté à la Figure 2.1 :

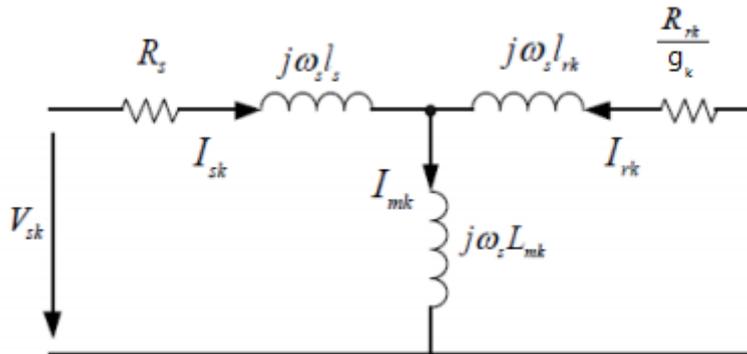


Figure - 2. 1: Schéma équivalent en régime permanent pour la séquence k

2.1.1.2 Détermination des paramètres électriques et mécaniques

La technique d'identification proposée est basée sur des tests conventionnels de rotor bloqué et à vide. Le test à rotor bloqué peut être efficacement utilisé pour donner une estimation approximative de l'impédance totale de la machine, tandis que l'inductance à vide obtenue à partir du test à vide représente la somme de l'inductance de magnétisation de la machine et l'inductance de fuite du stator, [14].

R_s, R_r : Résistances statorique et rotorique,

X, X_r : Réactances statorique et rotorique

$X_{mk} = \omega_s L_{mk}$: Réactance magnétisante

2.1.1.2.1 Test à courant continu (mesure de la résistance d'une phase statorique)

Ce test permet de calculer la résistance d'un enroulement R_s . On met les 5 bobines du stator en parallèle puis on alimente par un courant continu variable afin de prendre quelques mesures. Les valeurs sont indiquées dans le tableau 1 :

V_{ab}	0.4	1.05	1.5	1.85	2.1
I_a	1.2	3.6	5	6	7

Tableau 2. 1: Courant et tension continus.

La valeur de la résistance statorique ainsi obtenue est:

$$V_{ab} = \frac{R_s}{5} I_a \quad (2.4)$$

$$\text{D'où : } R_s = 5 \frac{V_{ab}}{I_a} \quad (2.5)$$

Après calcul de la valeur moyenne de la résistance, on trouve : $R_s = 1.53\Omega$.

Séquence 1

On réalise une étoile à 5 branches avec les 5 enroulements de la machine Figure 2.2. Le point milieu forme ainsi un point neutre artificiel. Chaque point est alimenté sous une tension simple V (phase-neutre), [14]

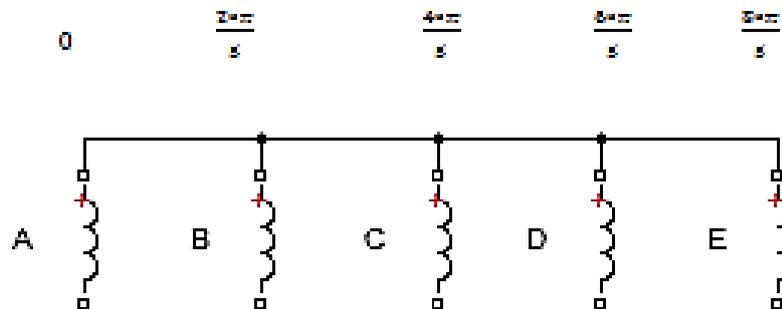


Figure - 2. 2: Couplage étoile de la machine asynchrone pentaphasée

Séquence 3

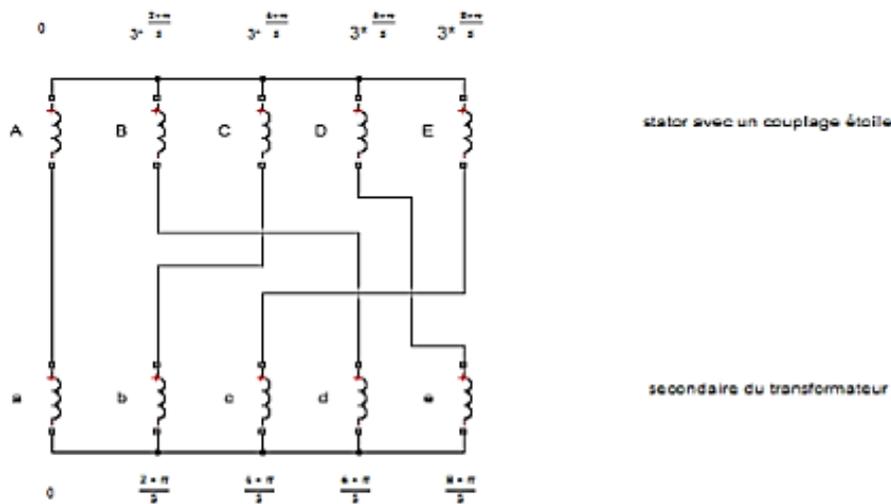


Figure - 2. 3: Couplage du transformateur avec le stator de la machine pour l'injection de l'harmonique 3

On réalise le montage de la Figure 2.3, afin de séparer la séquence 3 de la séquence fondamentale, puis on alimente la machine avec un transformateur pentaphasé asymétrique [2], [7].

2.1.1.2.2 Test à vide

Pour ce cas, la machine est alimentée à la tension assignée et de fréquence nominale, fonctionnant à vide. Il existe cependant un couple résistant de très faible valeur équivalent aux pertes mécaniques dues aux frottements et la ventilation.

Le glissement n'est pas tout à fait nul, les courants rotoriques sont négligeables et le flux dans l'entrefer est créé par le stator seul. On peut écrire alors que :

$$g_k=0, \text{ et } V_s = V_0, I_r \cong 0, I_s = I_{s0} \cong I_m$$

A partir du schéma équivalent de la Fig. 2.1 et de l'expression $I_r \cong 0$, nous obtenons le nouveau schéma équivalent suivant :

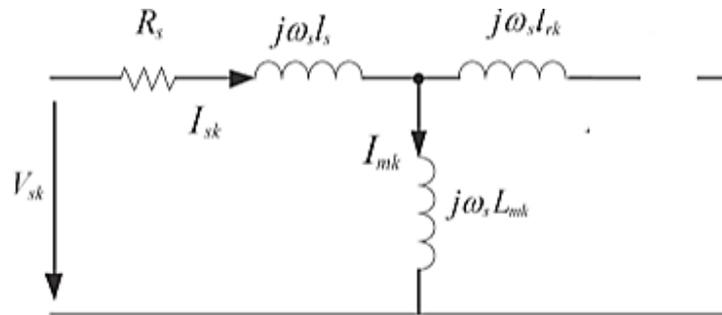


Figure - 2. 4: Schéma équivalent à vide

Les résultats issus des tests sont présentés dans les tableaux suivants:

Séquence 1

V_a (V)	213	214	213.7	215	213.6
I_a (A)	2.3	2.2	2.4	2.7	2.4
P_a (W)	80	50	100	60	120

Tableau 2. 2 : Résultats de l'essai à vide pour la séquence 1

Séquence 3

V_a (V)	51	51.6	53	52	51
I_a (A)	5.3	5.5	5.8	5.7	5.3
P_a (W)	55	50	60	55	50

Tableau 2. 3: Résultats de l'essai à vide pour la séquence 3

D'après le schéma équivalent à vide, on peut écrire :

$$Z_{0k} = R_s + j(\omega_s l_s + \omega_s l_{mk}) = \frac{V_a}{I_a} \quad (2.6)$$

L'inductance à vide pour chaque plan de séquence peut être alors estimée en utilisant la relation :

$$L_{s1} = \frac{1}{\omega_s} \sqrt{Z_{01} - R_s} = l_s + l_{m1} \quad (2.7)$$

$$L_{s3} = \frac{1}{\omega_s} \sqrt{Z_{03} - R_s} = l_s + l_{m3} \quad (2.8)$$

Cette inductance à vide se rapproche de la somme de l'inductance magnétisante et de l'inductance de fuite statorique.

$$\text{D'où : } \begin{cases} L_{s1} = 0.2849H \\ L_{s3} = 0.0294H \end{cases}$$

2.1.1.2.3 Test à rotor bloqué

On effectue ce test à tension réduite et à fréquence nominale pour le cas de cette machine. Le rotor étant bloqué (vitesse nulle) $g_k=1$, on alimente le moteur progressivement (à partir d'une tension initiale nulle) jusqu'à $I \cong I_n$, et on relève les grandeurs mesurées :

La tension V_{cc} , le courant absorbé I_{cc} , la puissance active P_{cc} .

Dans ce test, où les courants rotoriques sont importants, la branche de magnétisation est négligée. On obtient le schéma de la Figure 2.5:

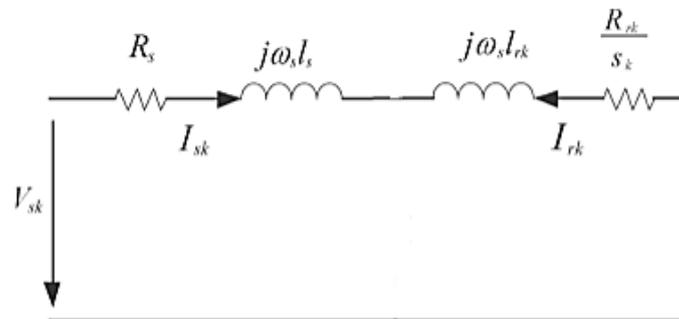


Figure - 2. 5: Schéma équivalent à rotor bloqué

Les résultats obtenus sont présentés aux tableaux suivants pour la séquence 1 et 3.

Séquence 1

V_{cc} (V)	39	38	38.9	39	38
I_{cc} (A)	8	8	8	8	8
P_{cc} (W)	160	160	158	140	158

Tableau 2. 4: Résultats de l'essai à rotor bloqué pour la séquence 1

Séquence 3

V_{cc} (V)	28	27	27	26	27
I_{cc} (A)	8	8	8	8	8
P_{cc} (W)	100	100	100	100	100

Tableau 2. 5: Résultats de l'essai à rotor bloqué pour la séquence 3

D'après le schéma équivalent par phase, on trouve :

$$\begin{cases} P_{cc} = (R_s + R_{rk})I_{cc}^2 \\ Q_{cc} = (\omega_s l_s + \omega_{rk} l_{rk})I_{cc}^2 \end{cases} \quad (2.9)$$

$$(2.10)$$

On considère les réactances de fuites stator et rotor comme égales (Hypothèse de P.L. Alger), c'est-à-dire $X_s = X_r \Rightarrow l_s = l_r$.

D'où :

$$l_s = l_r = \frac{1}{2\omega_s} \sqrt{Z_{cc}^2 - (R_s + R_{rk})^2} \quad (2.11)$$

Et

$$R_{rk} = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2} - R_s \quad (2.12)$$

Avec :

$$Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \quad (2.13)$$

Ce qui conduit aux résultats de l'identification des paramètres électriques que nous présentons :

Séquence 1

Tableau 2. 6: Paramètres électriques identifiés pour la séquence1

$R_s(\Omega)$	$R_r(\Omega)$	$L_s(H)$	$L_r(H)$	$l_s(H)$	$l_r(H)$	$l_m(H)$
1.53	0.895	0.2849	0.2849	0.00663	0.00663	0.02782

Séquence 3

$R_s(\Omega)$	$R_r(\Omega)$	$L_s(H)$	$L_r(H)$	$l_s(H)$	$l_r(H)$	$l_m(H)$
1.53	0.0325	0.0294	0.0294	0.0048	0.0048	0.0246

Tableau 2. 7: Paramètres électriques identifiés pour la séquence3

2.1.1.2.4 Test de ralentissement

Le principe de la méthode de ralentissement utilisée consiste à lancer la machine à sa vitesse nominale puis à couper l'alimentation et à laisser la machine ralentir sous l'effet des frottements. La vitesse diminue progressivement sous l'effet des pertes mécaniques.

La machine fonctionne initialement à vide, puis à un instant t , on coupe brusquement l'alimentation de la machine. Ce qui permet d'observer une diminution progressive de la vitesse de ralentissement sous l'effet des efforts mécaniques. Ce test permet de déterminer la constante de temps mécanique de la machine qui représente également le rapport entre le moment d'inertie J des masses tournantes et le coefficient de frottements visqueux f_r .

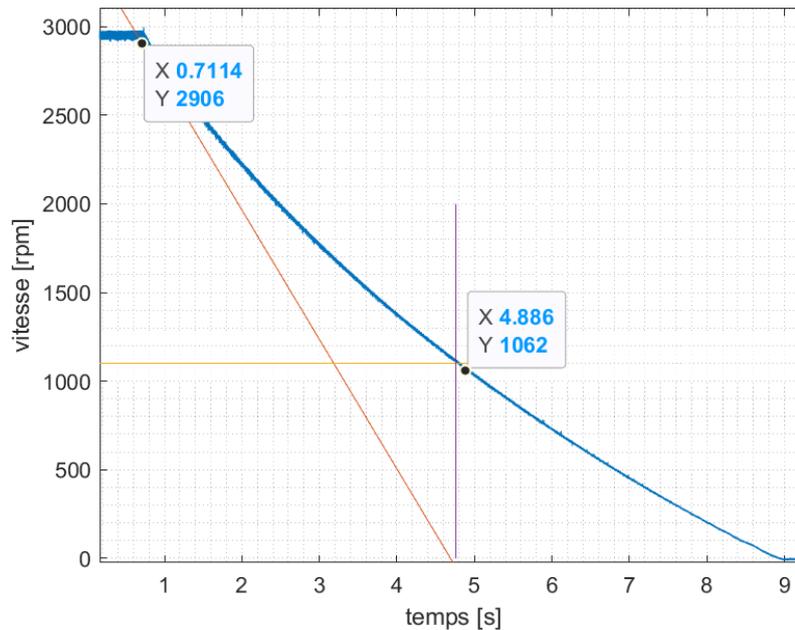


Figure - 2. 6: Vitesse de ralentissement de la machine jusqu'à l'arrêt complet

On a d'après l'équation mécanique à vide ($C_r = 0$) et la machine à l'arrêt ($C_e = 0$)

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

Après intégration, nous obtenons:

$$\ln(\Omega_1) - \ln(\Omega_2) = \frac{f_r}{J} (t_1 - t_2)$$

D'où

$$\ln\left(\frac{\Omega_1}{\Omega_2}\right) = \frac{f_r}{J} (t_1 - t_2)$$

La constante de temps mécanique $T_m = \frac{J}{f_r}$ est déduite de la courbe de ralentissement de la machine (Figure 2.6).

$$\text{On aura : } J = 0.08 \text{ kg. m}^2 \quad \text{et} \quad f_r = 0.0065 \text{ (N. m. rad/s)}$$

2.2 Identification structurale ou non paramétrique, [15]

Dans les applications des systèmes de contrôle, l'objectif de l'ingénieur est d'obtenir de bonnes performances du système en boucle fermée, qui est celui qui comprend le système physique, la boucle de rétroaction et le contrôleur. Ces performances sont généralement obtenues en concevant la loi de commande sur la base d'un modèle du système, qui doit être identifié à partir de données expérimentales.

Si la procédure d'identification du modèle est destinée à des fins de contrôle, l'important n'est pas d'obtenir le meilleur modèle possible qui s'adapte aux données, comme dans l'approche classique d'identification du système, mais d'obtenir un modèle suffisamment satisfaisant pour la performance de la boucle fermée. Cette approche plus récente est appelée identification pour le contrôle.

Le domaine de l'identification de systèmes utilise des méthodes statistiques pour construire des modèles mathématiques des systèmes dynamiques à partir de données mesurées ; elle consiste à appliquer ou observer des signaux à l'entrée d'un système (par exemple, pour un système électronique, ceux-ci peuvent être de type binaire aléatoire ou pseudo-aléatoire, sinus à fréquences multiples...) et en analyser la sortie dans le but d'obtenir un modèle purement mathématique. Les différents paramètres du modèle ne correspondent à aucune réalité physique dans ce cas. L'identification peut se faire soit dans le temps (espace temporel), soit en fréquence (espace de Laplace).

Pour éviter les modèles purement théoriques à partir des équations physiques (en général des équations différentielles), qui sont longs à obtenir et souvent trop complexes pour le temps de développement donné, est donc possible avec cette technique.

Pour identifier les paramètres d'une machine fonctionnant en rotation, il faut déterminer les paramètres électriques lors d'un fonctionnement en statique c'est-à-dire machine à l'arrêt.

Le principe d'une identification paramétrique est d'extraire d'un modèle mathématique des paramètres à partir de l'observation des entrées-sorties d'un système. Le modèle doit permettre de calculer la sortie du procédé y à n'importe quel instant t si les conditions initiales du système sont connues. Pour cela, on peut se servir des valeurs des entrées aux instants présents et précédents ($u(t)$, $u(t-1)$, ...) et des valeurs précédentes de la sortie ($y(t-1)$, $y(t-2)$, ...) dans le cas d'un modèle régressif.

Il est tout de même important d'avoir des connaissances simples du système pour choisir un type de modèle adapté.

- Modèle possédant une entrée/une sortie SISO ou plusieurs entrées et plusieurs sorties MIMO.
- Modèle linéaire ou non linéaire
- Modèle continu ou discret
- Modèle régressif ou indépendant: pour un modèle régressif, la sortie à un instant t , $y(t)$, dépend des instants précédents ($y(t-i)$)
- Modèle stochastique ou déterministe.

En général, le modèle est représenté sous forme de fonction de transfert utilisant la transformée en z . L'identification nécessite une structure de modèle connue, a priori, pour identifier dans cette structure différents paramètres.

2.2.1 L'identification des systèmes en utilisant les structures de modèles

L'identification d'un système est la détermination des paramètres effectuée sur la base des entrées sorties.

Le traitement mathématique des réponses graphiques du système est appelé "Identification". Le modèle ainsi obtenu est dit de conduite ou de représentation.

2.2.1.1 Étapes de base de l'identification des systèmes

Le problème de l'identification du système consiste à estimer un modèle d'un système basé sur les données d'entrée-sortie observées.

Il existe plusieurs manières de décrire un système et d'estimer de telles descriptions, et ce paragraphe donne un bref aperçu des approches les plus importantes.

Un traitement complet est donné dans L. Ljung (1987). Il décrit les étapes de base impliquées dans l'identification du système. La section suivante traite des approches les plus courantes pour décrire des systèmes dynamiques et comment estimer de telles descriptions.

Le protocole pour déterminer un modèle d'un système dynamique à partir des données d'entrées-sorties implique trois données de base :

- les entrées-sorties du système
- un ensemble de modèles candidats (la structure de modèle)
- un critère pour sélectionner un modèle particulier dans l'ensemble, basé sur l'information contenue dans les données (la méthode d'identification)

Le processus d'identification revient à sélectionner à plusieurs reprises une structure de modèle, à calculer le meilleur modèle dans la structure et à évaluer les propriétés de ce modèle pour voir si elles sont satisfaisantes. Le cycle peut être détaillé comme suit :

1. Concevoir une expérience et collecter les données entrées-sorties du système,
2. Déterminer une plage de fonctionnement et filtrer pour améliorer les plages de fréquences importantes,
3. Sélectionner et définir une structure de modèle et un ensemble de descriptions du système candidat dans lesquelles vous pouvez trouver un modèle,
4. Évaluer le meilleur modèle pour la structure du modèle en fonction des données d'entrée-sortie et d'un critère d'ajustement donné,
5. Examiner les propriétés du modèle ainsi obtenu.
6. Si le modèle est assez bon, arrêtez ; sinon, retourner à l'étape 3 pour essayer un autre ensemble de modèles. Essayer éventuellement d'autres méthodes d'estimation (étape 4) ou travailler davantage sur les données d'entrée-sortie (étapes 1 et 2).

La boîte à outils d'identification du système offre plusieurs fonctions pour chacune de ces étapes, à l'exception de la première.

Pour l'étape 2, il existe des routines pour tracer les données, filtrer les données et supprimer les tendances des données.

Pour l'étape 3, la boîte à outils d'identification du système propose une variété de modèles non paramétriques, ainsi que toutes les structures d'entrée-sorties de type boîte noire les plus courantes, ainsi que des modèles généraux d'espace d'état linéaires sur mesure en temps discret et continu.

Pour l'étape 4, des méthodes d'erreur de prédiction finale (maximum de vraisemblance) ainsi que des méthodes de variables instrumentales sont proposées pour les modèles paramétriques, tandis que des méthodes de corrélation de base et d'analyse spectrale sont utilisées pour les structures de modèles non paramétriques.

Pour examiner les modèles à l'étape 5, de nombreuses fonctions permettent le calcul et la présentation des fonctions de fréquence et des pôles et des zéros, la simulation et la prédiction à l'aide du modèle, la transformation entre les descriptions de modèles à temps continu et à temps discret et les formats utilisés dans la boîte à outils du système de contrôle. La boîte à outils de traitement du signal y est également incluse.

Le reste de ce didacticiel donne les faits de base sur les descriptions du système et les méthodes d'identification qui sont implémentées dans la boîte à outils d'identification du système. Il passe ensuite en revue les commandes les plus importantes de la boîte à outils.

2.2.1.2 Problème d'identification du système

Cette section décrit les différentes manières de décrire les systèmes dynamiques linéaires ainsi que les méthodes les plus importantes pour estimer de tels modèles.

2.2.1.2.1 Modèle ARX (Auto Regressive model with eXternal input)

Le modèle ARX (*Auto Regressive model with eXternal inputs*) est un modèle auto régressif qui inclut des entrées $u(t)$ et un bruit blanc $e(t)$ de valeur moyenne nulle et de variance σ^2 . De plus, le modèle inclut un retard pur de k coups d'horloge. Si le système est échantillonné à une période d'échantillonnage T , alors le retard sera de $k*T$.

L'objectif est d'estimer les paramètres d'un modèle ARX à l'aide d'une procédure de variables instrumentales en quatre étapes approximativement optimale.

$$A(q).y(t) = \frac{B_1(q)}{A_1(q)} u_1(t - nk_1) + \dots + \frac{B_{n+1}(q)}{A_{n+1}(q)} u_{n+1}(t - nk_{n+1}) + \frac{C(q)}{D(q)} e(t)$$

$$y(t) = \frac{B(q)}{A(q)} u(t - nk) + \frac{1}{A(q)} e(t)$$

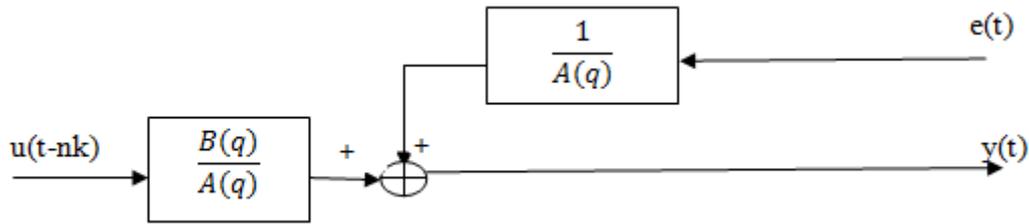


Figure - 2. 7: Représentation d'une structure de modèle ARX

2.2.1.2.2 Le modèle ARMAX (Auto Regressive Moving Average with eXternal input)

Le modèle ARMAX (*Auto Regressive Moving Average with eXternal input*) reprend les attributs du modèle ARX mais inclut une fonction de transfert avec une moyenne ajustable sur le bruit blanc. En général, le bruit blanc permet de modéliser des perturbations non mesurables dans le modèle. Or, ces perturbations non mesurables (fluctuations thermiques, vibrations du sol...) sont rarement de moyenne nulle et peuvent aussi répondre à un modèle.

$$A(q).y(t)=B(q)u(t-nk)+C(q)e(t)$$

$$y(t) = \frac{B(q)}{A(q)} u(t - nk) + \frac{C(q)}{A(q)} e(t)$$

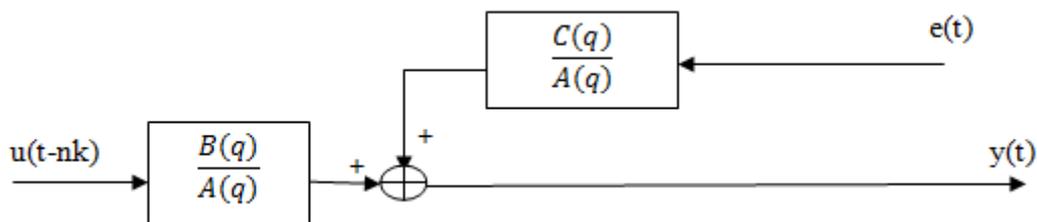


Figure - 2. 8: Représentation d'une structure de modèle ARMAX

2.2.1.2.3 Le modèle BJ (Box Jenkins)

L'algorithme BJ utilise essentiellement le même algorithme qu'ARMAX, avec des modifications du calcul des erreurs de prédiction et des gradients.

Le modèle complet par excellence, la dynamique différente pour l'entrée et le bruit en font un bon modèle.

$$Y(t) = \frac{B(q)}{F(q)} u(t - nk) + \frac{C(q)}{D(q)} e(t)$$

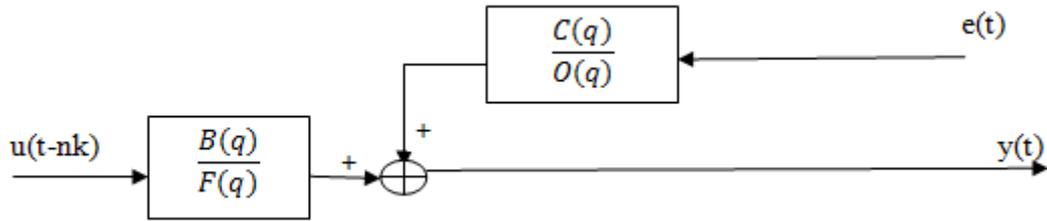


Figure - 2. 9: Représentation d'une structure de modèle Box-Jenkins

2.2.1.2.4 IV4 (Instrumental Variable)

La première étape utilise la fonction ARX. Le modèle résultant génère les instruments pour une estimation IV de deuxième étape. Les résidus obtenus à partir de ce modèle sont modélisés comme un modèle AR d'ordre élevé. À la quatrième étape, les données d'entrée-sortie sont filtrées à travers ce modèle AR puis soumises à la fonction IV avec les mêmes instruments-filtres qu'à la deuxième étape.

$$y(t) = \frac{B(q)}{A(q)}u(t - nk) + \frac{1}{A(q)}e(t)$$

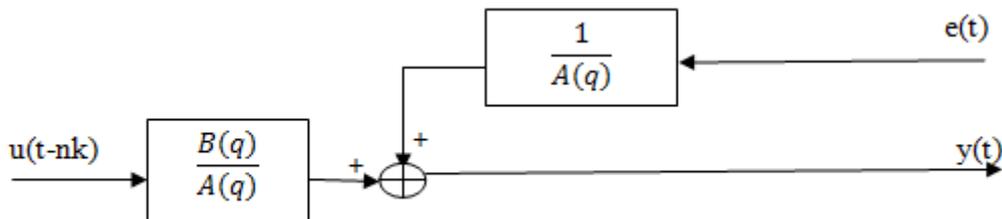


Figure - 2. 10: Représentation d'une structure de modèle IV

2.3 Tests expérimentaux

On alimente la machine asynchrone pentaphasée avec une tension de 170 V en charge (Régime permanent en charge).

Les signaux d'entrée et de sortie sont les suivants :

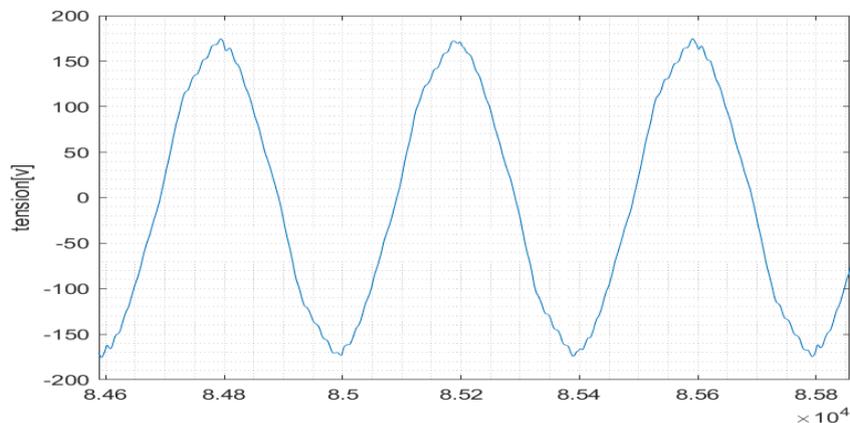


Figure - 2. 11: Signal de la tension d'entrée

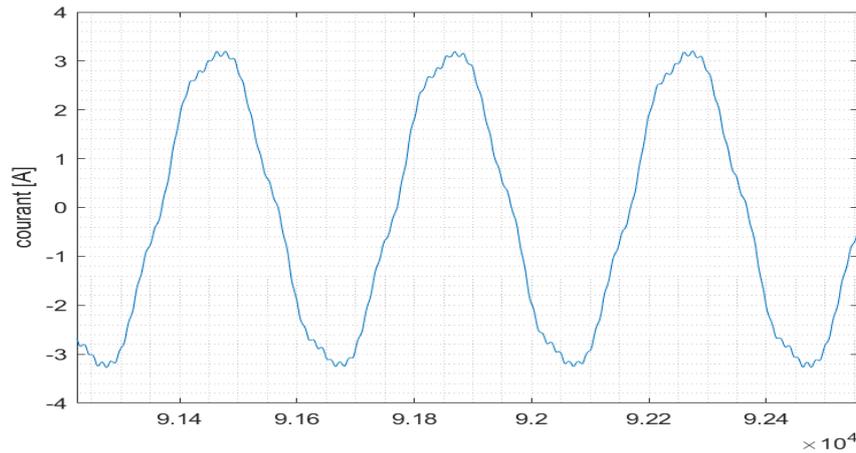


Figure - 2. 12: Le signal du courant (signal de sortie)

2.4 Résultats d'identification

Nous présentons quelques résultats obtenus par certaines structures de modèles utilisées en identification.

2.4.1 Modèle ARX

Le modèle discret obtenu à partir des entrée-sorties est le suivant:

$$A(z).y(t) = B(z).u(t) + e(t)$$

$$A(z) = 1 - 1.874 (+/- 0.00667) z^{-1} + 0.8748 (+/- 0.006632)$$

$$B(z) = -4.123.10^{-5} (+/- 2.42910^{-6}) z^{-1}$$

L'ordre polynomial considéré est : $NN=[n_a \ n_b \ n_k]$ NN est pris égal à [2 1 1]

Le nombre des coefficients libres est de 3

L'erreur de prédiction finale est : FPE-AKAIKE's : $7.938.10^{-5}$, MSE : $7.922.10^{-5}$

La fonction de transfert discrète ainsi obtenue est:

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{-4.123.10^{-5}z}{z^2 - 1.874z + 0.8748}$$

La fonction de transfert continue tirée à partir de celle discrète est :

$$H(p) = \frac{B(p)}{A(p)} = \frac{-2.154.10^{-5}p - 4.406.10^{-5}}{p^2 - 0.1337p + 0.001111}$$

Nous présentons la comparaison entre la sortie simulée et celle expérimentale à la figure 2.9

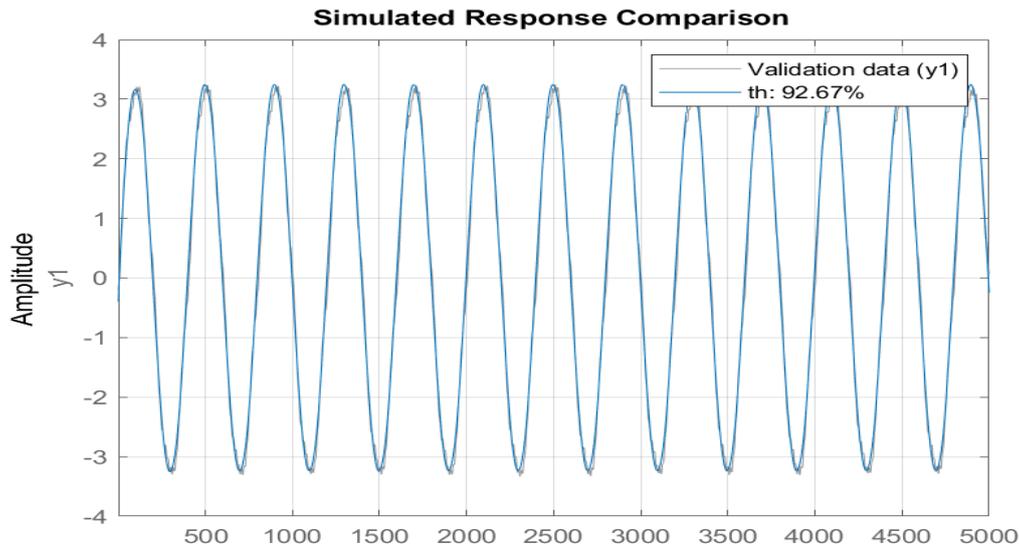


Figure - 2. 13: Comparaison entre la sortie expérimentale et la sortie simulée pour le modèle ARX

2.4. 2 Modèle ARMAX

Le modèle discret obtenu pour cette structure est:

$$A(z).y(t) = B(z).u(t) + C(z).e(t)$$

$$A(z) = 1 - 11.849 (+/- 0.008211) z^{-1} + 0.8504 (+/- 0.008162) z^{-2}$$

$$B(z) = -4.952 \cdot 10^{-5} (+/- 2.945 \cdot 10^{-6}) z^{-2}$$

$$C(z) = 1 + 0.1147 (+/- 0.01588) z^{-1}$$

L'ordre polynomial pris pour cette structure est $na=2$ $nb=1$ $nc=1$ $nk=2$

Le nombre des coefficients libres est de 4. Les coefficients d'Akaike de l'erreur de prédiction finale sont donnés par : FPE-AKAIKE's: $7.774 \cdot 10^{-5}$, MSE: $7.755 \cdot 10^{-5}$

La fonction de transfert discrète ainsi obtenue est:

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{-4.952 \cdot 10^{-5} z}{z^2 - 1.849 z + 0.8504}$$

La fonction de transfert continue déduite de celle discrète est :

$$H(p) = \frac{B(p)}{A(p)} = \frac{-2.61 \cdot 10^{-5} p - 5.365 \cdot 10^{-5}}{p^2 - 0.1621 p + 0.001327}$$

Nous présentons à la figure 2.10 la comparaison entre les sorties simulée et expérimentale.

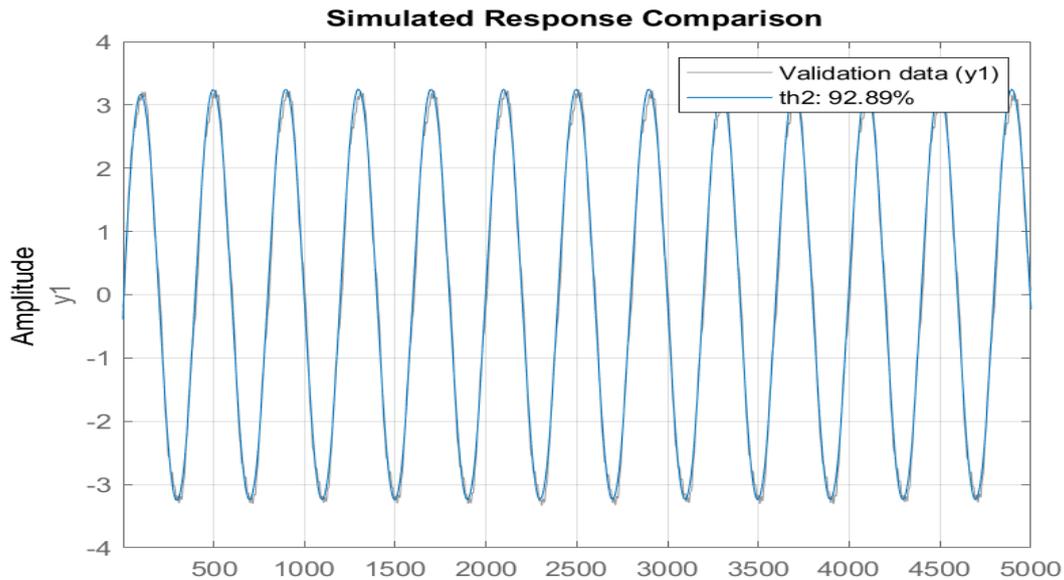


Figure - 2. 14: Comparaison entre la sortie expérimentale et celle simulée pour le modèle ARMAX

2.4.3 Structure de Modèle Variable Instrumentale (IV4)

Le modèle discret obtenu est:

$$A(z).y(t) = B(z).u(t) + e(t)$$

$$A(z) = 1 - 1.643 (+/- 0.06926) z^{-1} + 0.6452 (+/- 0.06902) z^{-2}$$

$$B(z) = -0.000605 (+/- 4.54 \cdot 10^{-5}) z^{-2} + 0.0004927 (+/- 4.602 \cdot 10^{-5}) z^{-3}$$

L'ordre polynomial considéré est: $n_a=2$ $n_b=2$ $n_k=2$

Le nombre des coefficients libres: 4. Les coefficients d'Akaike de l'erreur de prédiction finale sont donnés par : FPE-AKAIKE's: $9.977 \cdot 10^{-5}$, MSE: $9.953 \cdot 10^{-5}$

La fonction de transfert discrète identifiée est:

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{-0.000605 z + 0.0004927}{z^2 - 1.643 z + 0.6452}$$

La fonction de transfert continue tirée à partir de celle discrète est:

$$H_p = \frac{B(p)}{A(p)} = \frac{-0.0006731 p - 0.0001388}{p^2 - 0.4382 p + 0.002405}$$

Nous présentons à la figure 2.11 la comparaison entre les sorties simulée et expérimentale.

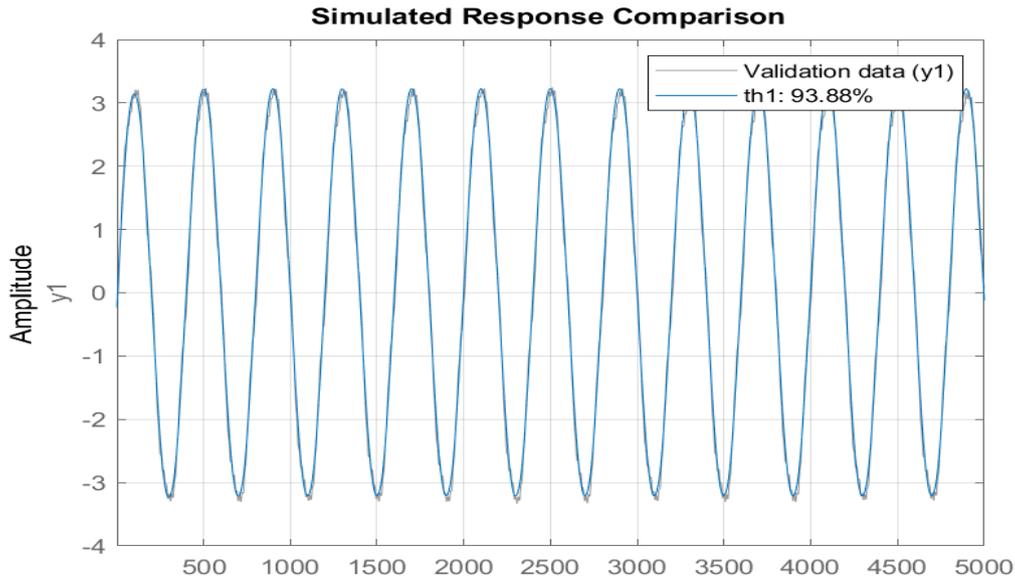


Figure - 2. 15: Comparaison entre la sortie expérimentale et la sortie simulée pour le modèle IV4

2.4.4 Structure de modèle BJ

Le modèle discret ainsi obtenu en identification est :

$$y(t) = [B(z)/F(z)] u(t) + [C(z)/D(z)] e(t)$$

Les paramètres et erreurs sont :

$$B(z) = -0.000903 (+/- 7.954 \cdot 10^{-5})z^{-1} + 0.0008832 (+/- 7.70710^{-5}) z^{-2}$$

$$C(z) = 1 + 0.6734 (+/- 0.01064) z^{-1} \quad D(z) = 1 - 0.9997 (+/- 0.0009663) z^{-1}$$

$$F(z) = 1 - 1.917 (+/- 0.01207) z^{-1} + 0.917 (+/- 0.01205) z^{-2}$$

L'ordre polynomial considéré pour cette structure est: nb=2 nc=1 nd=1 nf=2 nk=1

Le nombre des coefficients libres : 6. Les coefficients d'Akaike de l'erreur de prédiction finale sont donnés par : FPE-AKAIKE's: 0.0001765, MSE: 0.0001761

La fonction de transfert discrète ainsi obtenue est:

$$H(z) = \frac{B(z)}{F(z)} = \frac{-0.000903 z + 0.0008832}{z^2 + 1.917 z + 0.917}$$

La fonction de transfert continue est déterminée à partir de la fonction de transfert discrète

$$H(p) = \frac{B(p)}{F(p)} = \frac{-0.0009322 p - 2.075 \cdot 10^{-5}}{p^2 + 0.08668 p + 1.291 \cdot 10^{-5}}$$

Nous présentons à la figure 2.12 la comparaison entre les sorties simulée et expérimentale.

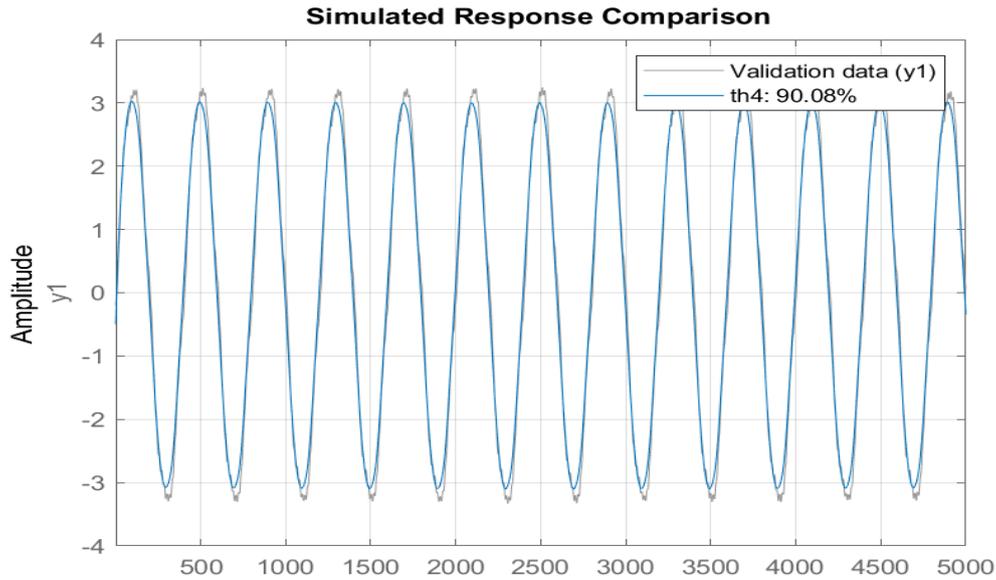


Figure - 2. 16: Comparaison entre la sortie expérimentale et la sortie simulée pour le modèle BJ

2.5 Comparaison des résultats obtenus pour cette identification

Le tableau suivant représente une comparaison entre les modèles d'identification structurale utilisés dans ce chapitre par rapport à l'erreur de prédiction finale (FPE-AKAIKE) qui décrit la qualité du modèle et à l'erreur quadratique moyenne (MSE)

	FPE-AKAIKE's	MSE
ARX	7.938 10^{-5}	7.922 10^{-5}
ARMAX	7.774 10^{-5}	7.755 10^{-5}
IV4	9.977 10^{-5}	9.953 10^{-5}
BJ	1.765 10^{-4}	1.761 10^{-4}

Tableau 2. 8: Tableau comparatif des résultats de l'identification.

2.6 Conclusion

- Dans ce chapitre, nous avons décrit une procédure d'estimation des paramètres électriques d'une machine asynchrone pentaphasée à cage d'écureuil avec bobinage simple couche.
- L'effet de la séquence 3 est généralement négligé en supposant une distribution sinusoïdale d'enroulements. Dans un bobinage simple couche, cette hypothèse peut être encore valable dans une certaine mesure dans des conditions saines. Cependant, dans d'autres conditions, l'effet de la troisième séquence d'espace ne peut être négligé. Bien que l'effet de cet harmonique sur la production du flux soit faible et négliger son effet entraîne une erreur significative dans les amplitudes des courants des phases saines.
- Ce qui nous a conduits à proposer une méthode pour estimer le circuit

équivalent du troisième harmonique et fournit ainsi une méthode pour séparer l'inductance de fuite du stator de l'inductance à rotor bloqué.

- Compte tenu des résultats obtenus pour les coefficients d'Akaike qui traitent de l'erreur de prédiction finale, nous pouvons dire que les meilleurs résultats sont obtenus pour les structures de modèles de la famille AR puis vient celle de la variable instrumentale ensuite celle de Box-Jenkins.
- Il n'y a pas de règle générale pour ces structures, cela dépend des tests prévus et des systèmes à identifier. Une structure de modèle peut fonctionner pour un système et pas pour un autre, car le système doit être alimenté par un signal d'entrée à excitation persistante, c'est-à-dire, contenant beaucoup d'harmoniques.

Chapitre 3

Diagnostic de défauts au stator de la Machine Asynchrone Pentaphasée

3.1 Introduction

Les moteurs à induction polyphasés sont fiables, ils sont soumis à plusieurs contraintes telles que les contraintes thermiques, électriques, mécaniques, environnementales, et bien d'autres raisons encore et les défaillances peuvent être d'origines diverses, électriques, mécaniques ou bien encore magnétiques.

Le diagnostic de défauts des machines électriques est, aujourd'hui, relativement développé dans le monde industriel car la volonté d'obtenir une chaîne de production de plus en plus sûre devient, pour certaines applications, indispensable. Les chaînes de production doivent être dotées de systèmes de protection fiables car une simple défaillance peut mener à un dommage matériel et/ou corporel. Pour éviter ces problèmes, les chercheurs s'emploient depuis plusieurs années à élaborer des méthodes de diagnostic et de surveillance des systèmes électriques. Ceux-ci ont pour objectif de prévenir les utilisateurs d'un risque possible pouvant apparaître en un point particulier du système, [3].

Nous nous intéressons dans notre travail aux défaillances électriques relatives à l'alimentation. Nous nous proposons d'étudier le diagnostic de défauts de la machine asynchrone pentaphasée à cage d'écureuil alimentée par un transformateur asymétrique pentaphasé. L'étude est effectuée par l'analyse du comportement de la machine asynchrone pentaphasée avec défaut d'ouverture d'une ou de deux phases. Des résultats expérimentaux contenant l'analyse spectrale sont présentés pour montrer le comportement de l'ensemble du système dans des conditions saines et défectueuses. Ensuite, nous validons les résultats obtenus par un modèle de simulation à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK afin de procéder aux essais, notamment, l'essai en régime sain et l'essai en régime dégradé. Et finalement, nous présentons les différentes caractéristiques munies d'explications.

3.2 Banc d'essais expérimental

Les essais expérimentaux ont été effectués dans le cadre de diagnostic de défaut au Laboratoire de Recherche en Électrotechnique (LRE) de l'École Nationale Polytechnique.

Le banc expérimental est constitué par :

- Alimentation triphasée équilibrée
- Un transformateur triphasé au primaire pentaphasé au secondaire.
- Une machine asynchrone pentaphasée à cage d'écureuil.
- Des capteurs de courant et de tension
- Une carte d'acquisition pour accueillir les signaux des capteurs
- Des appareils de mesures



Figure - 3. 1 : Banc d'essais expérimental

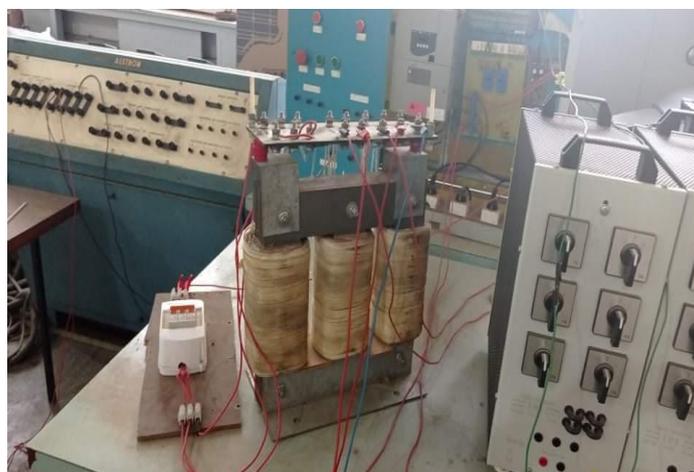


Figure - 3. 2 : transformateur asymétrique 3 vers 5 phases

3.3 Configuration étoile

On réalise une étoile à cinq branches avec les 5 enroulements du moteur pentaphasé. Le point milieu forme ainsi un point neutre artificiel. Chaque enroulement est alimenté sous une tension simple V (phase neutre).

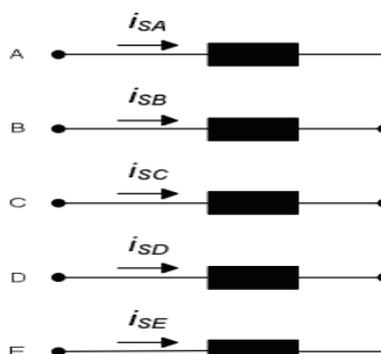


Figure - 3. 3: Connexion étoile sur la plaque à bornes d'une machine asynchrone pentaphasée [16]

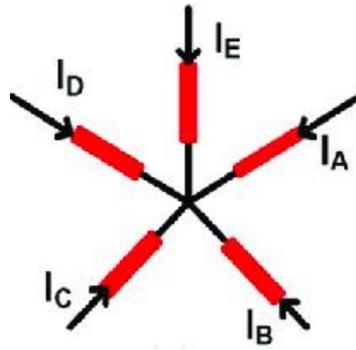


Figure - 3. 4: Configuration de connexion étoile de l'enroulement statorique d'une machine asynchrone pentaphasée [17]

3.3.1 Fonctionnement de la machine saine

Nous démarrons nos tests par le fonctionnement de la machine asynchrone pentaphasée, montage étoile sans défaut. Nous alimentons la machine avec une tension simple pentaphasée $V= 220V$ jusqu'à atteindre le régime permanent, nous relevons les signaux expérimentaux.

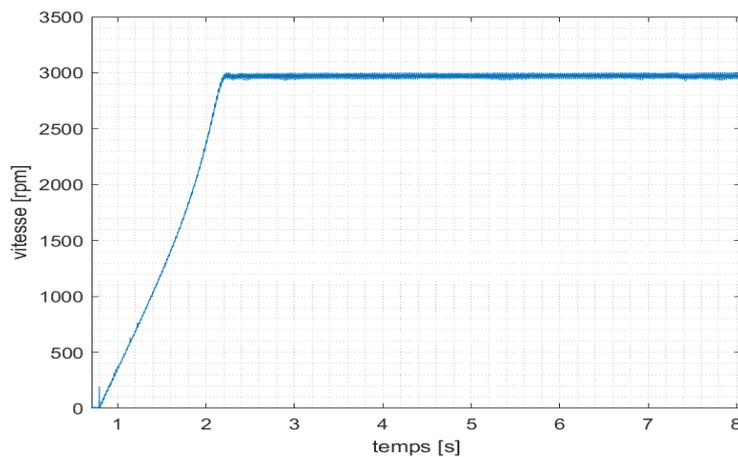


Figure - 3. 5: vitesse expérimentale de la machine saine

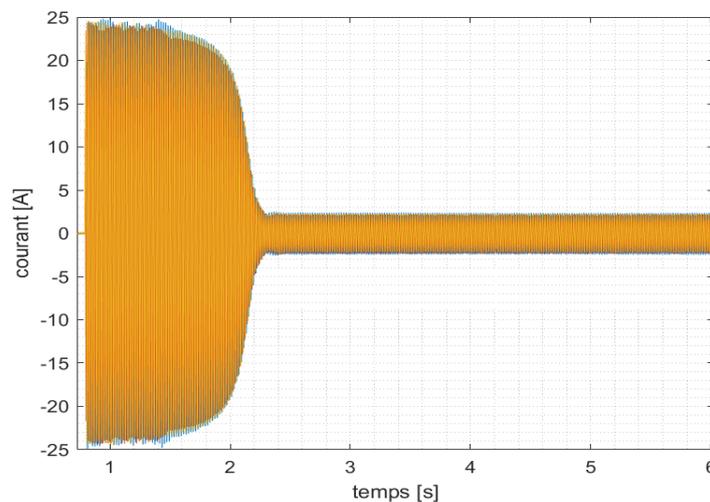


Figure - 3. 6: Courants statoriques expérimentaux des phases a, b et c pour un régime sain

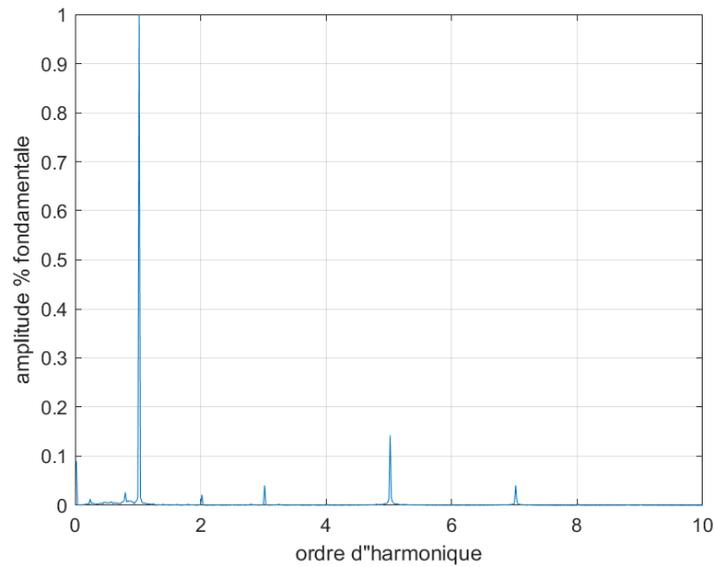


Figure - 3. 7: Spectre de raies du courant statorique

En régime transitoire un pic de courant s'établi dans le moteur, ceux sont des courants de démarrage pour vaincre l'inertie du rotor. Ces courants représentent l'un des grands problèmes de la machine asynchrone. La force contre-électromotrice qui s'oppose à la tension appliquée est nulle au démarrage, il apparait un courant intense en régime transitoire qui dure 1.54s et atteint 25A. La vitesse atteint une valeur maximale très porche du synchronisme. Le courant en régime permanent est de 2A.

3.3.2 Ouverture d'une phase statorique

Nous faisons fonctionner la machine jusqu'à atteindre le régime permanent puis on ouvre brusquement une phase et on relève les courants statoriques.

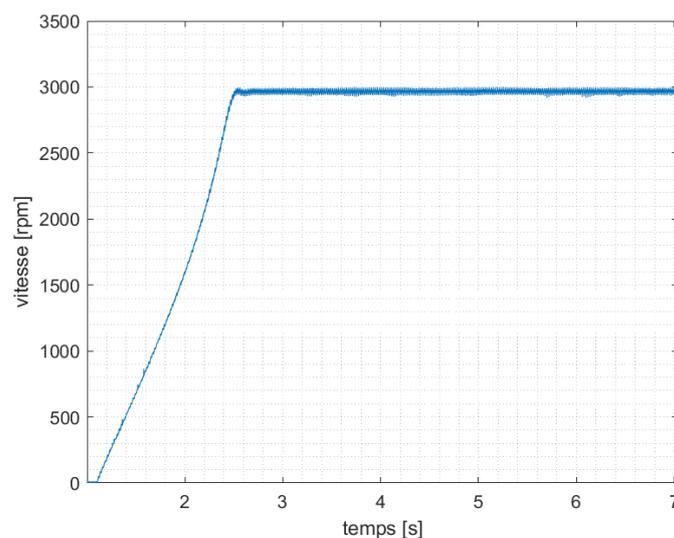


Figure - 3. 8: vitesse de la machine après ouverture d'une phase au stator (tests expérimentaux).

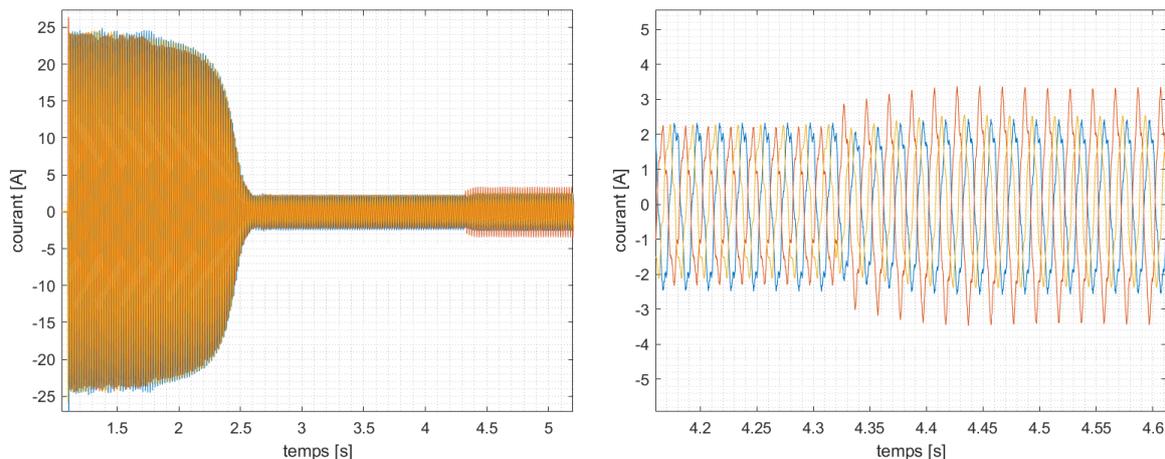


Figure - 3. 9: Courants statoriques des phases a, b et c après ouverture d'une phase au stator (tests expérimentaux).

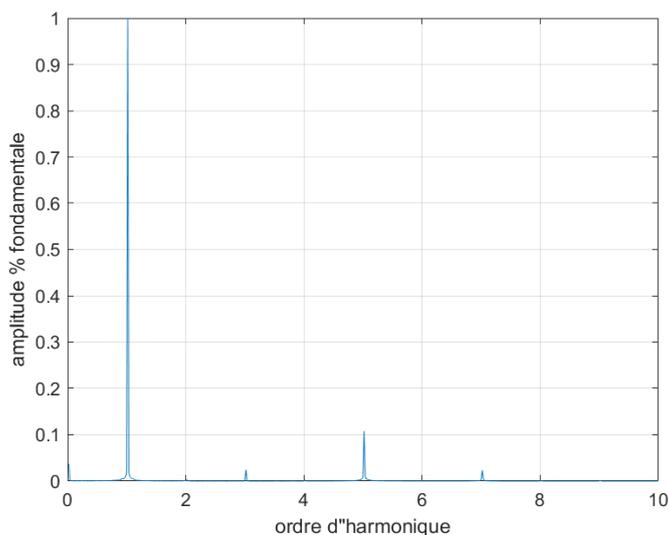


Figure - 3. 10: Spectre de raies du courant statorique avec ouverture d'une phase

Lorsque le moteur subit un défaut d'ouverture de phase, il apparaît une légère augmentation de l'amplitude du courant dans les autres phases de 2 A à 3A (avec une différence d'amplitude entre les phases).

La vitesse de la machine diminue légèrement lors de l'ouverture de la phase. Le tracé des harmoniques de courants statoriques montrent une légère diminution de l'harmonique 5 après défaut d'ouverture d'une phase au stator.

3.3.3 Ouverture de deux phases

On fait fonctionner la machine jusqu'au régime permanent puis on ouvre en même temps deux phases au stator, on relève la vitesse du moteur et les courants statoriques.

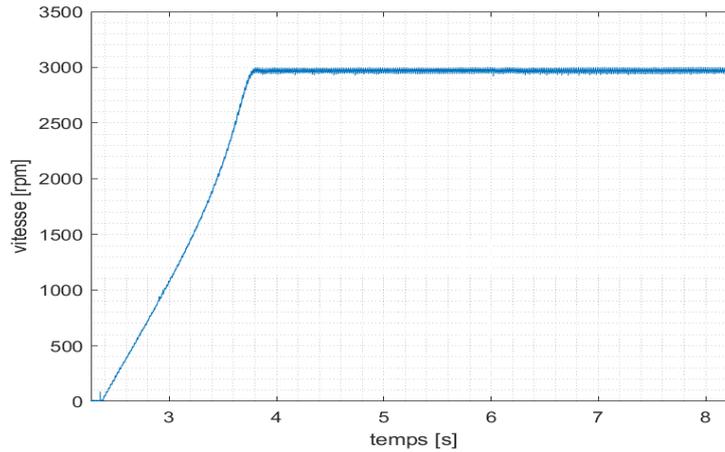


Figure - 3. 11: Vitesse de la machine avec ouverture de deux phases au stator (tests expérimentaux)

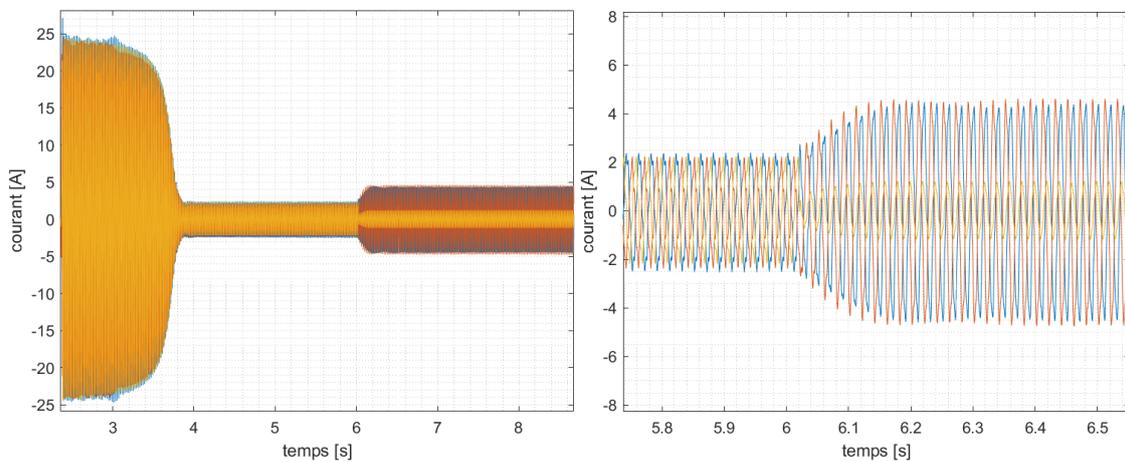


Figure - 3. 12: Courants statoriques des phases a, b et c avec ouverture de deux phases au stator (tests expérimentaux)

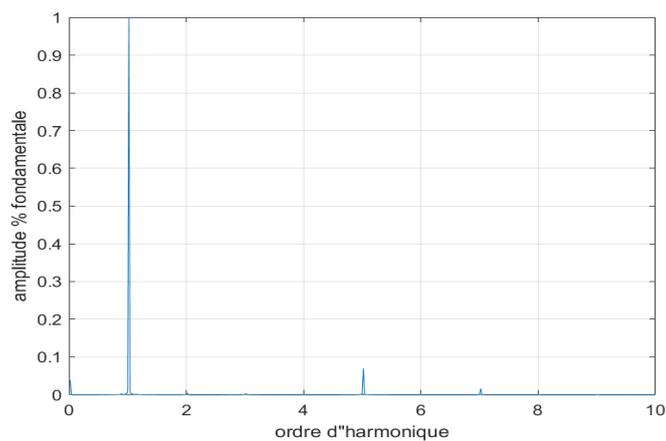


Figure - 3. 13: Spectre de raies du courant statorique avec ouverture de deux phases au stator

Dans le cas où le moteur subit un défaut d'ouverture de deux phases au stator, il apparaît une augmentation de l'amplitude du courant stator plus importante que dans le cas d'une phase

ouverte. Le courant augmente jusqu'à 4.5 A avec un déséquilibre des courants qui apparaît lors du défaut.

La vitesse de la machine diminue légèrement lors de l'ouverture des phases. Le tracé des harmoniques montre également qu'après ouverture de deux phases l'harmonique 3 disparaît comme dans le cas d'une machine asynchrone triphasée. L'harmonique 5 diminue après défaut d'ouverture de deux phases.

3.4 Configuration pentagone

On réalise la configuration pentagone avec les 5 enroulements statoriques du moteur. Chaque enroulement est alimenté sous une tension composée (entre phases).

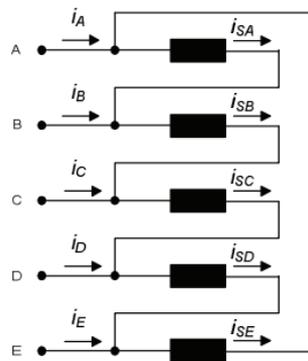


Figure - 3. 14: Connexion pentagone sur la plaque à bornes d'une machine asynchrone pentaphasée [16]

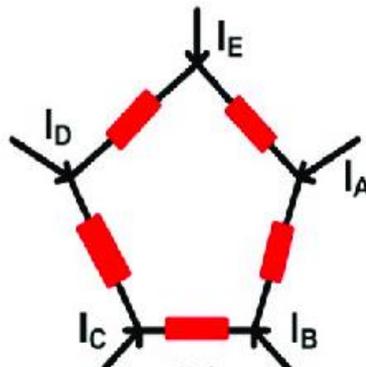


Figure - 3. 15: Configuration pentagone de l'enroulement statorique d'une machine asynchrone pentaphasée [17]

3.4.1 Fonctionnement de la machine saine

Nous alimentons la machine saine (sans défaut) avec une tension simple $V= 220V$ jusqu'à atteindre le régime permanent, puis nous relevons les signaux de courants statoriques et la vitesse.

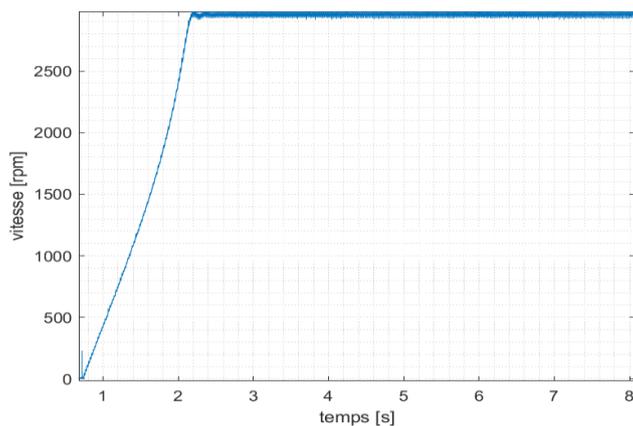


Figure - 3. 16: vitesse de la machine saine (tests expérimentaux)

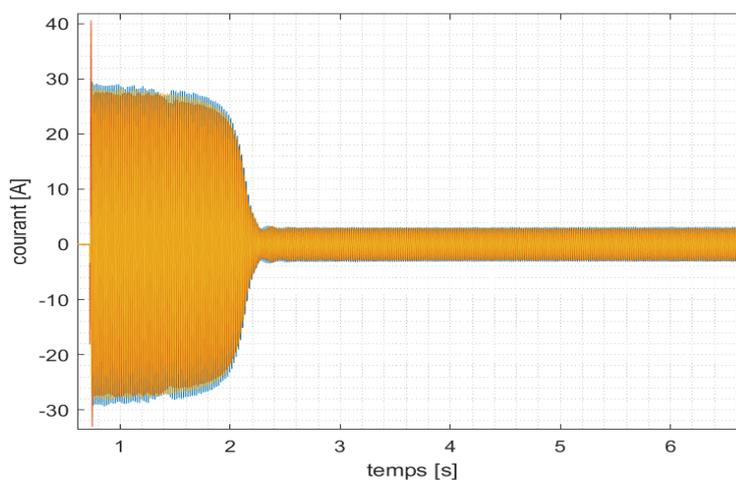


Figure - 3. 17: Courants statoriques des phases a, b et c (tests expérimentaux)

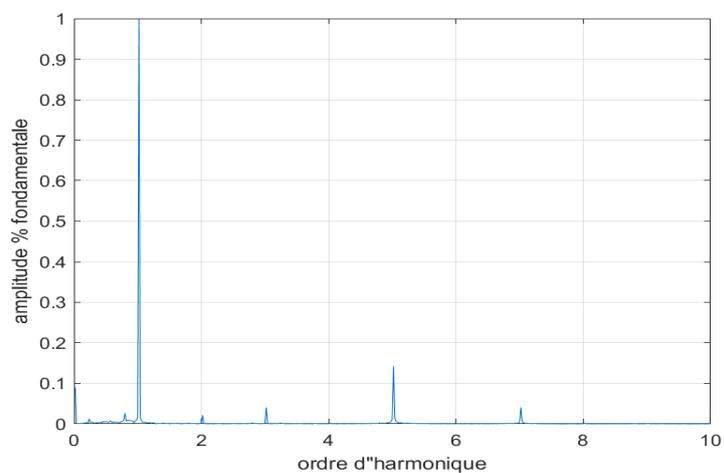


Figure - 3. 18: Spectre de raies du courant statorique (tests expérimentaux)

Nous remarquons dans ce couplage que le pic de courant en régime transitoire atteint 27A. Pour un temps de 1.4s, la machine atteint une vitesse très proche du synchronisme. Le courant en régime permanent est de 2.9A.

3.4.2 Ouverture d'une phase au stator

Nous introduisons un défaut d'ouverture d'une phase au stator pour une machine fonctionnant à vide. Et nous relevons les courants statoriques et la vitesse.

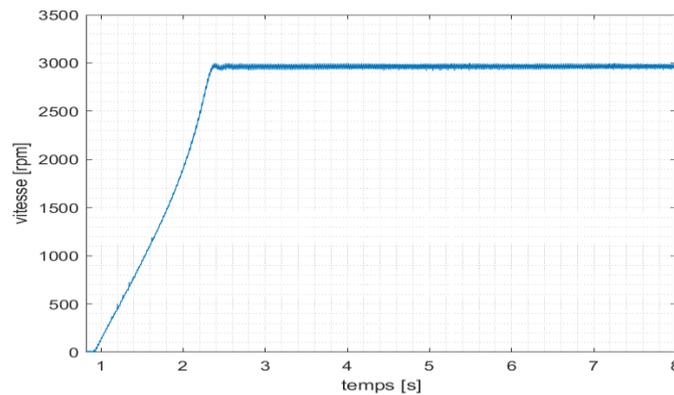


Figure - 3. 19: vitesse de la machine (tests expérimentaux)

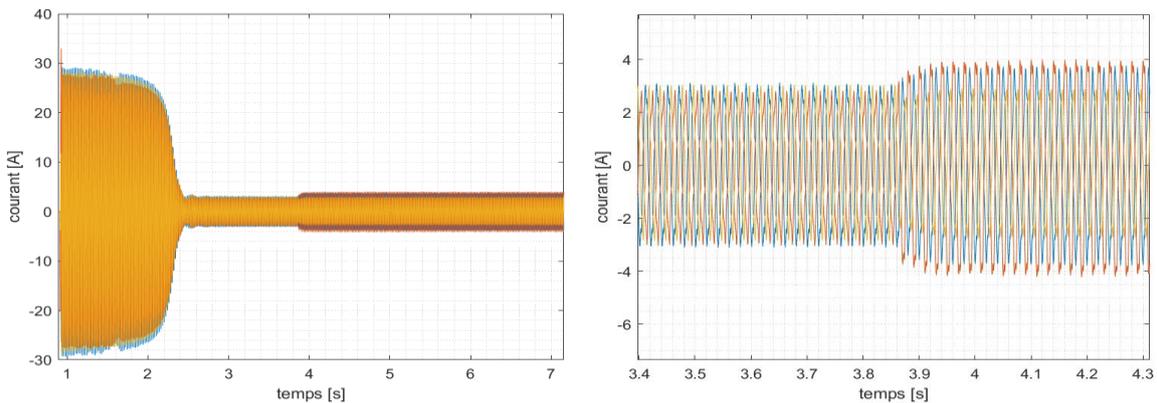


Figure - 3. 20: Courants statoriques des phases a, b et c avec ouverture d'une phase au stator (tests expérimentaux)

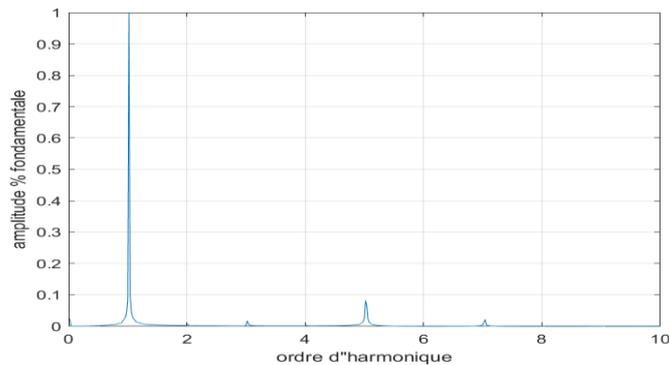


Figure - 3. 21: Spectre de raies du courant statorique après ouverture d'une phase

Le courant statorique de la machine avec défaut d'ouverture d'une phase atteint 3.8A avec un déséquilibre entre les courants des phases. La vitesse de la machine diminue légèrement lors de l'ouverture des phases. L'analyse harmonique donne une diminution en amplitude des harmoniques 3 et 5.

3.4.3 Ouverture de deux phases statoriques

Nous faisons fonctionner la machine jusqu'à atteindre le régime permanent puis on ouvre deux phases statoriques en même temps, et nous relevons les signaux des courants.

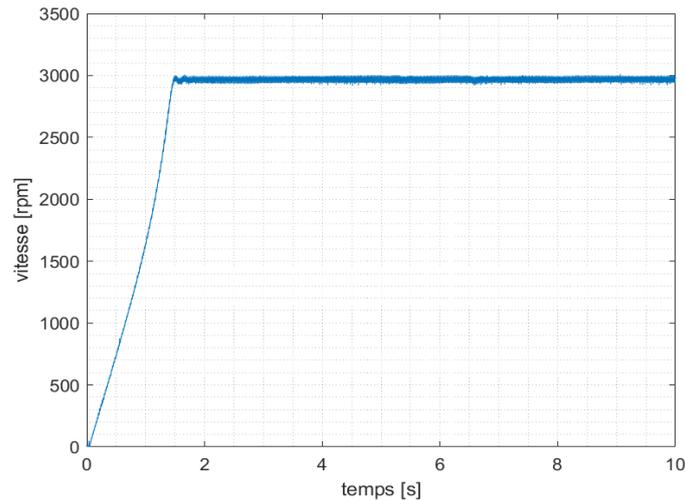


Figure - 3. 22: Vitesse de la machine avec ouverture de deux phases au stator (tests expérimentaux)

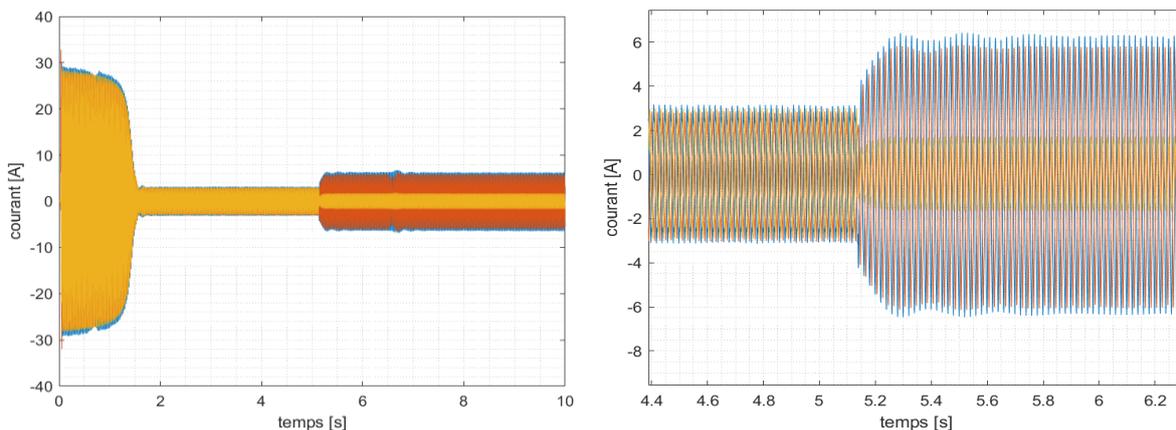


Figure - 3. 23: Courants statoriques des phases a, b et c avec ouverture de deux phases au stator (tests expérimentaux)

Le courant au moment du défaut atteint les 5.9A avec un déséquilibre entre les amplitudes des courants. La vitesse de la machine diminue légèrement lors de l'ouverture des phases. L'analyse harmonique a donné une diminution de l'amplitude de l'harmonique 5 après défaut d'ouverture de deux phases au stator. Quant à l'harmonique 3, il disparaît comme dans le cas d'une machine asynchrone triphasée.

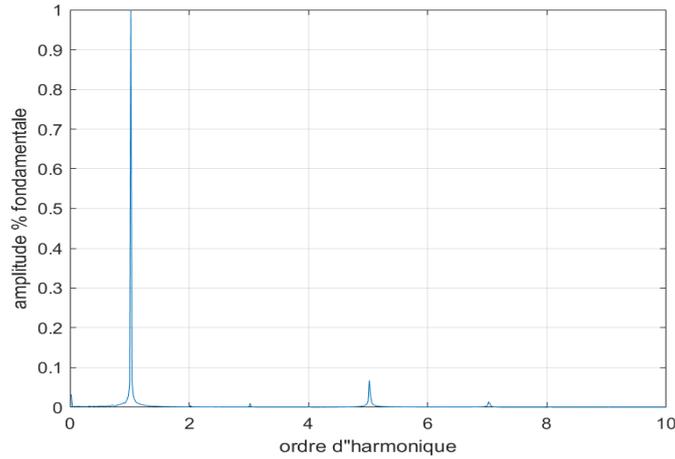


Figure - 3. 24: Spectre de raies du courant statorique après ouverture de deux phases

3.5 Configuration pentacle

En reliant chaque phase avec la phase +2 de la machine nous trouvons le couplage pentacle tel qu'il est indiqué à la Figure - III.23.

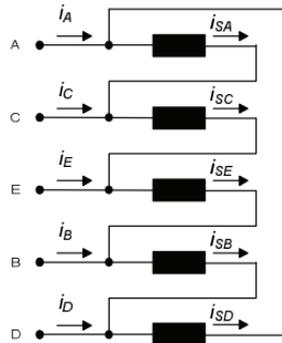


Figure - 3. 25: Connexion pentacle sur la plaque à bornes d'une machine asynchrone pentaphasée [16]

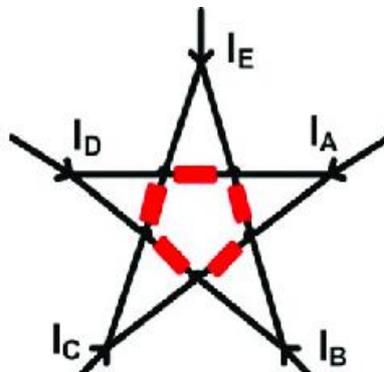


Figure - 3. 26: Configuration de connexion pentacle de l'enroulement statorique d'une machine asynchrone pentaphasée [17]

3.5.1 Fonctionnement de la machine saine

Nous alimentons la machine avec une tension simple $V= 220V$ jusqu'à atteindre le régime permanent puis nous relevons les signaux des courants statoriques

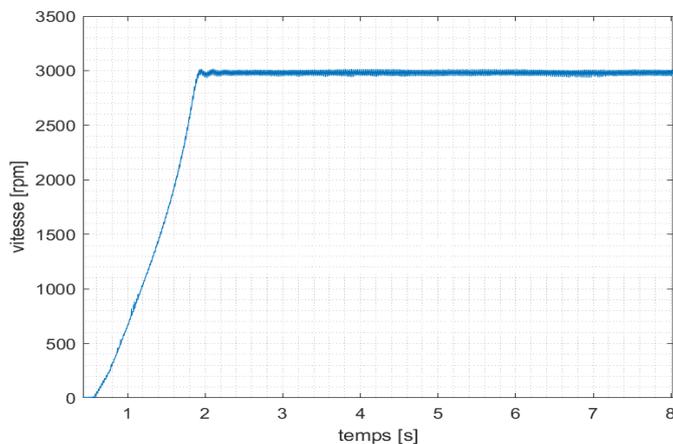


Figure - 3. 27: Vitesse de la machine après ouverture de deux phases au stator (tests expérimentaux)

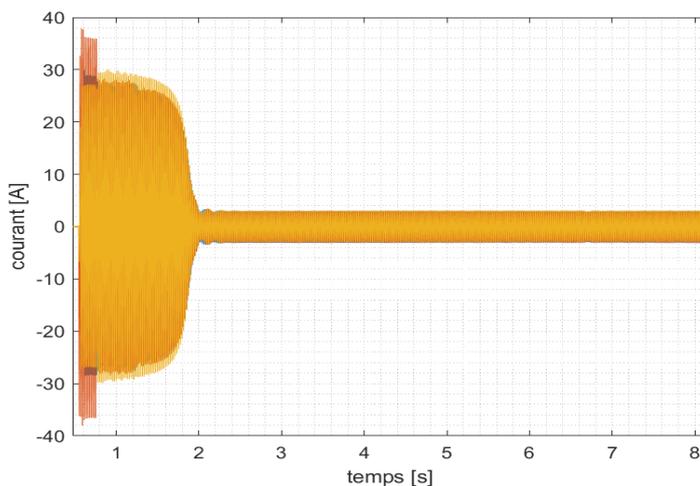


Figure - 3. 28: Courants statoriques des phases a, b et c pour un fonctionnement sain (tests expérimentaux)

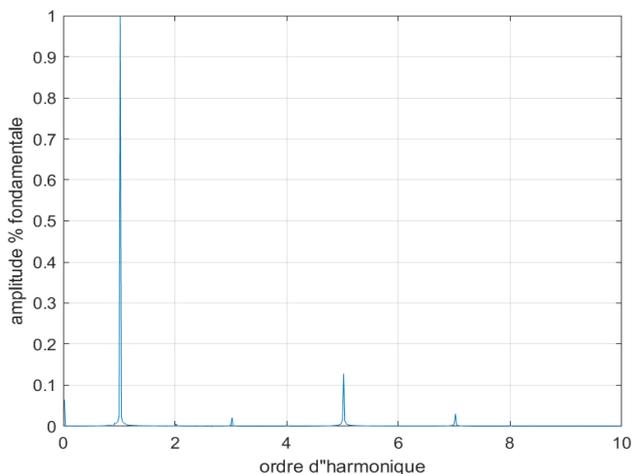


Figure - 3. 29: Spectre de raies du courant statorique pour un fonctionnement sain (tests expérimentaux)

Le couplage pentacle conduit à un courant plus élevé que celui des deux autres couplages, à savoir : l'étoile et le pentagone ; il atteint la valeur de 38A en régime transitoire. Le courant statorique en régime permanent vaut 3A.

Le régime transitoire pour ce couplage est plus rapide que pour les autres configurations, la machine atteint les 3000tr/min au bout de 1.3s.

3.5.2 Ouverture d'une phase

Nous introduisons un défaut d'ouverture d'une phase au stator pour une machine fonctionnant à vide. Puis, nous relevons les courants statoriques.

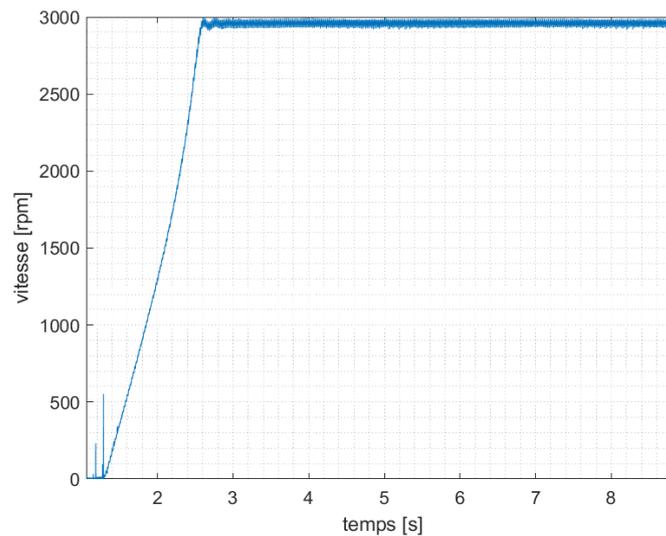


Figure - 3. 30: vitesse de la machine après ouverture d'une phase au stator (tests expérimentaux)

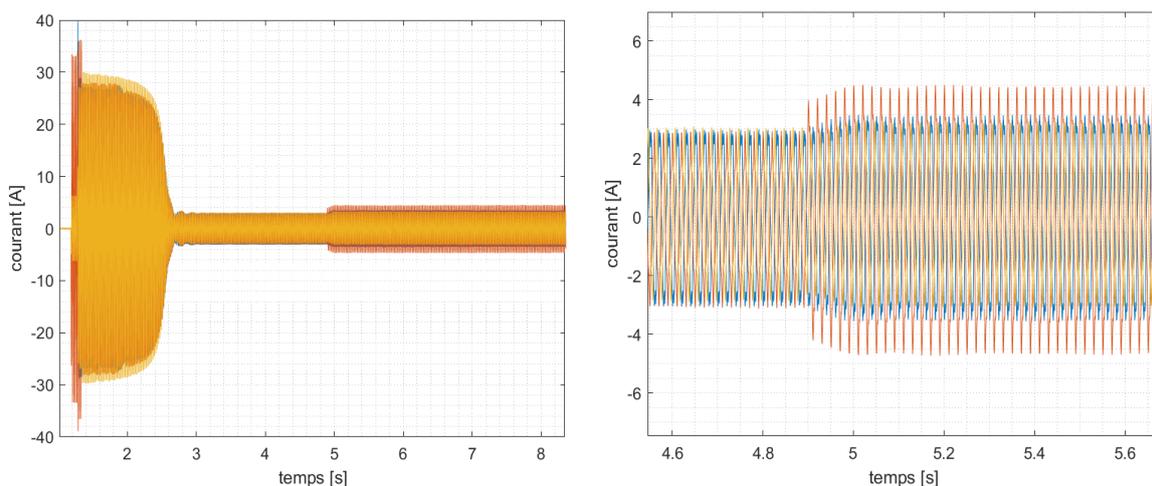


Figure - 3. 31: Courants statoriques des phases a, b et c après ouverture d'une phase au stator (tests expérimentaux)

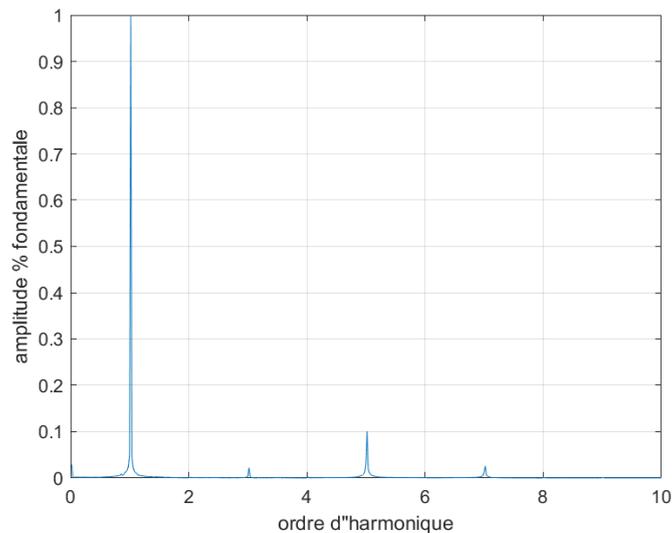


Figure - 3. 32: Spectre de raies du courant statorique après ouverture d'une phase

Le courant statorique de la machine avec défaut d'ouverture d'une phase augmente jusqu'à 4.3A avec un déséquilibre remarquable dû à l'ouverture de la phase.

La vitesse de la machine diminue légèrement lors de l'ouverture des phases. L'analyse harmonique donne une diminution en amplitude des harmoniques 3 et 5, [2].

3.5.3 Ouverture de deux phases statoriques

La machine démarre jusqu'à atteindre le régime permanent puis nous ouvrons deux phases au stator en même temps et nous relevons les courants statoriques.

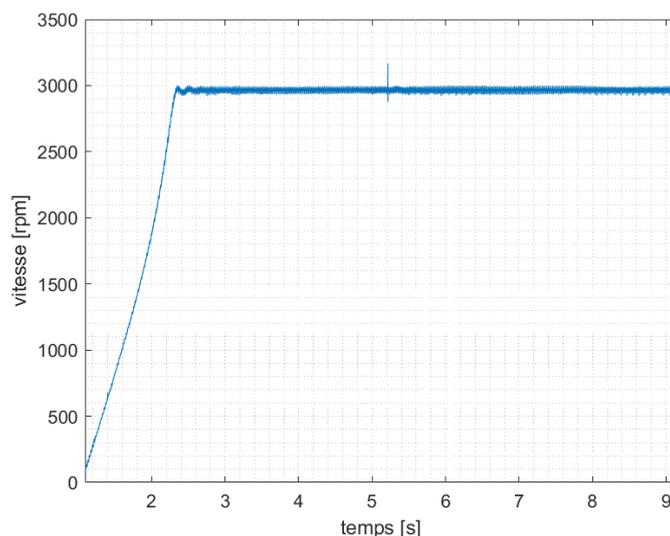


Figure 3. 33: vitesse de la machine après ouverture de deux phases au stator (tests expérimentaux)

Le courant atteint 5.6A après défaut et la vitesse de la machine diminue légèrement lors de l'ouverture des phases. L'analyse harmonique donne une diminution en amplitude des harmoniques 3 et 5 après défaut d'ouverture de deux phases au stator.

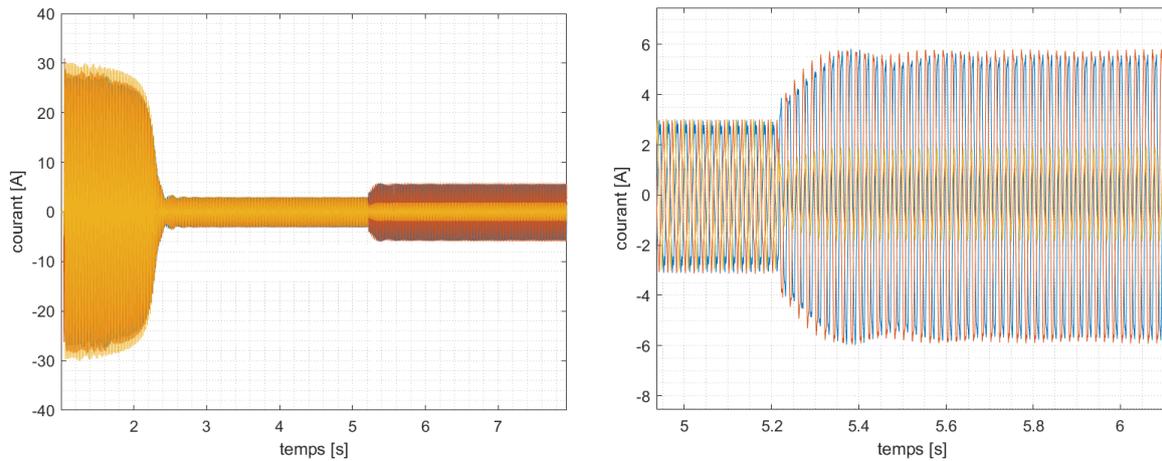


Figure - 3. 34: Courants statoriques des phases a, b et c après ouverture de deux phases au stator (tests expérimentaux)

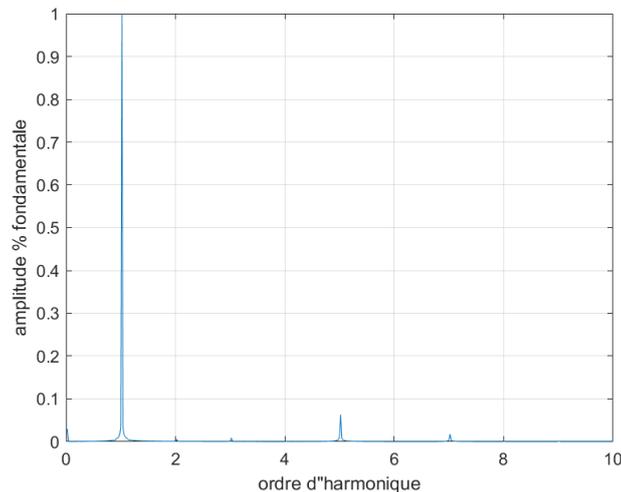


Figure - 3. 35: Spectre de raies du courant statorique après ouverture de deux phases au stator

3.6 Simulation par MATLAB/SIMULINK

Ce paragraphe présente l'évaluation des performances dans le cadre de la transposition de phase à l'aide des résultats de la simulation utilisant MATLAB/SIMULINK pour le moteur asynchrone à cinq phases lorsque son stator est connecté en étoile, en pentagone, ou en pentacle. En se basant sur le fait que la machine est alimentée par une source de tension équilibrée.

Les résultats de l'identification, calculés précédemment, sont introduits dans le modèle de la machine ce qui permet de simuler le comportement de la machine. Les résultats de la simulation sont par la suite comparés à ceux expérimentaux.

La source appliquée est de 220 V pour toutes les connexions, Figure - III.34. La machine démarre sans charge (à vide) alimentée par un transformateur asymétrique triphasé/pentaphasé présentés dans [18].

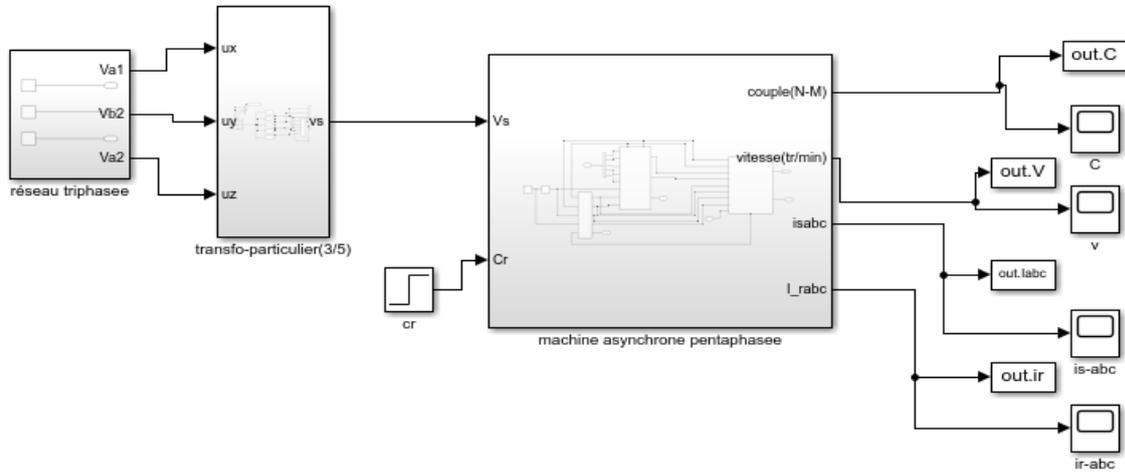


Figure - 3. 36: Schéma block de simulation sur Matlab/SIMULINK.

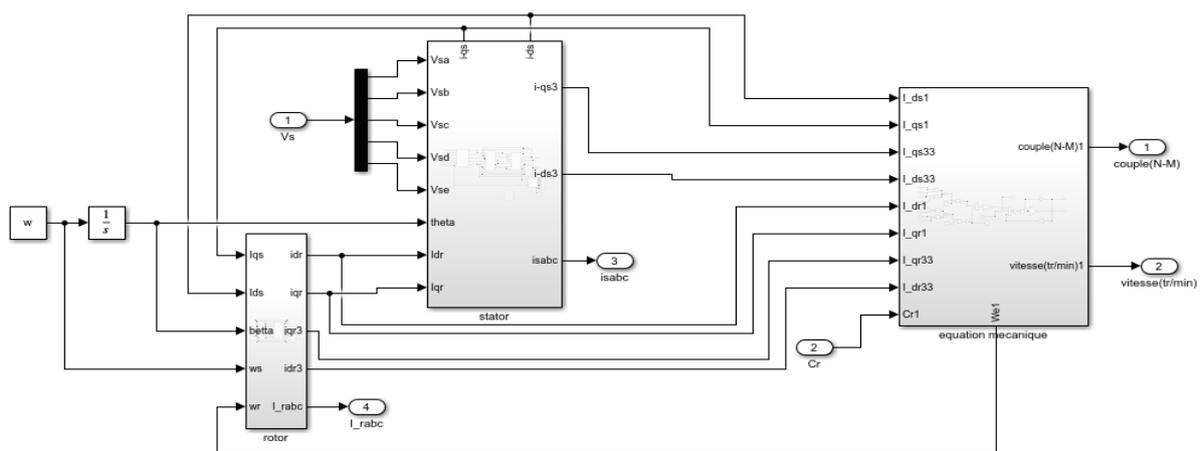


Figure - 3. 37: Schéma block de la machine sur SIMULINK.

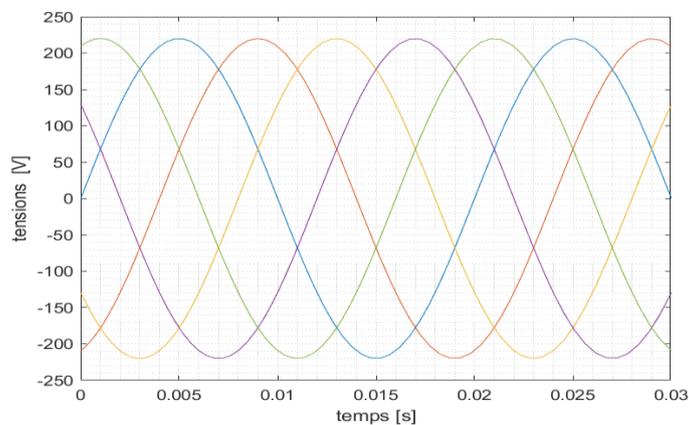


Figure 3. 38: Tensions d'alimentation simulées de la machine pentaphasée

3.6.1 Configuration étoile

Après modélisation de la machine asynchrone pentaphasée en configuration étoile on simule les performances dynamiques de la machine avec et sans défauts au stator.

3.6.1.1 Fonctionnement de la machine saine

La vitesse, le couple électromagnétique et les courants statoriques sont présentés aux Figures 3.39, 3.40 et 3.41 lors d'un fonctionnement de la machine asynchrone pentaphasée en régime sain.

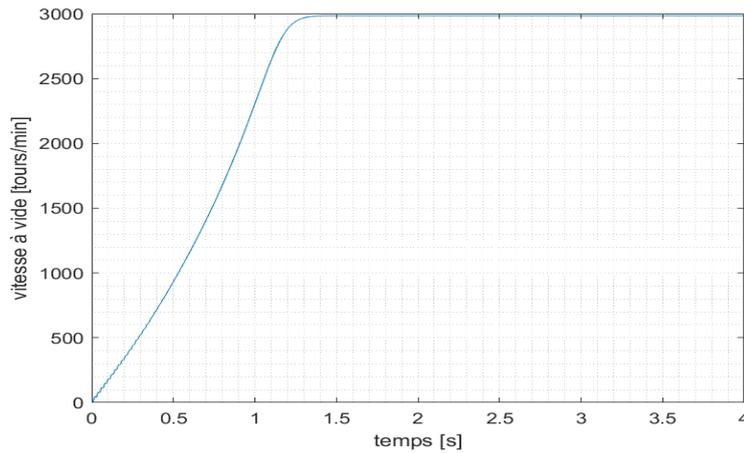


Figure - 3. 39: vitesse de la machine simulée pour un fonctionnement sain

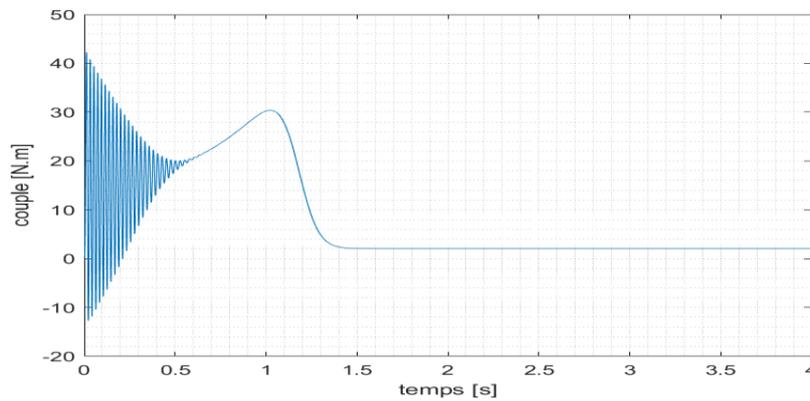


Figure - 3. 40: Couple électromagnétique simulé pour un fonctionnement sain

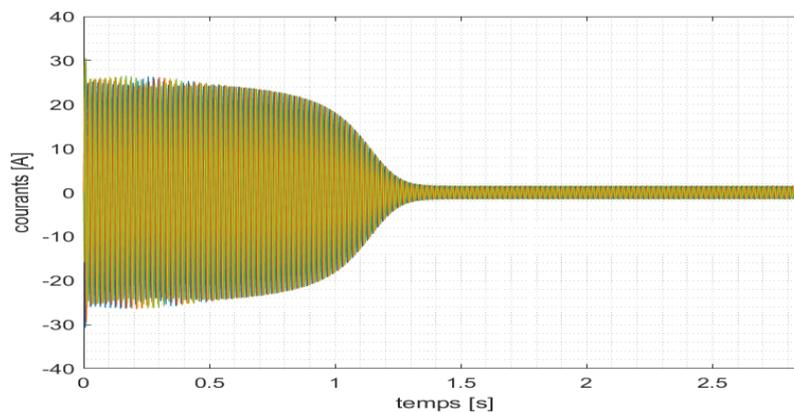


Figure - 3. 41: Courants statoriques simulés pour un fonctionnement sain

3.6.1.2 Ouverture d'une phase

Le même travail est effectué tout en ouvrant une phase au stator. Les figures 3.42, 3.43 et 3.44 présentent la vitesse de rotation, le couple électromagnétique et les courants statoriques avec ouverture d'une phase au stator.

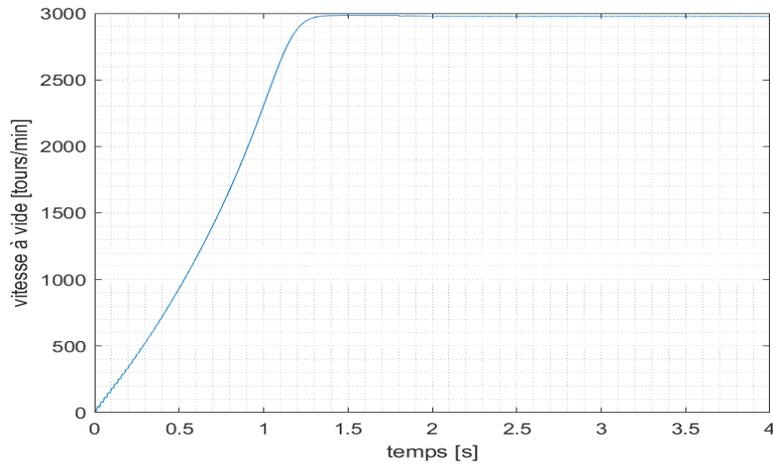


Figure - 3. 42: vitesse de la machine simulée avec ouverture d'une phase au stator.

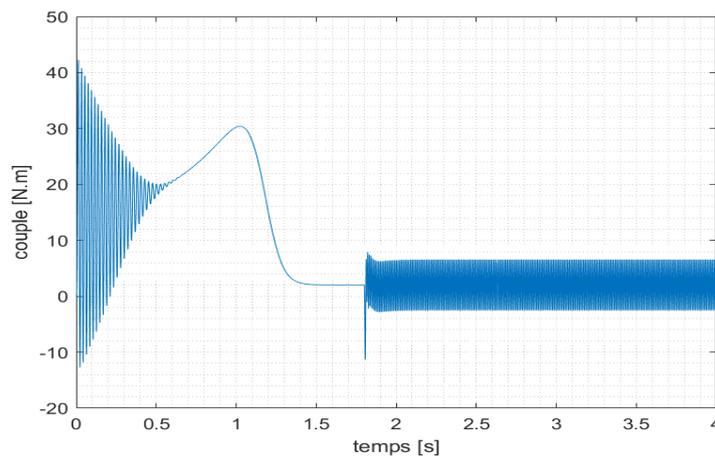


Figure - 3. 43: Couple électromagnétique simulé avec ouverture d'une phase au stator

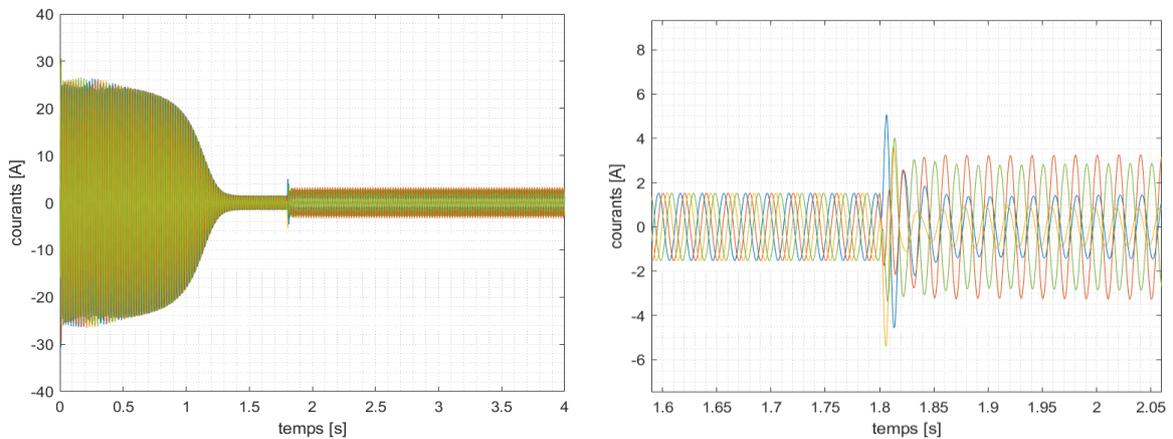


Figure - 3. 44: Courants statoriques simulés avec ouverture d'une phase au stator

3.6.1.3 Ouverture de deux phases au stator

La vitesse, le couple électromagnétique et les courants statoriques de la machine asynchrone pentaphasée, en configuration étoile, sont présentés dans les figures suivantes :

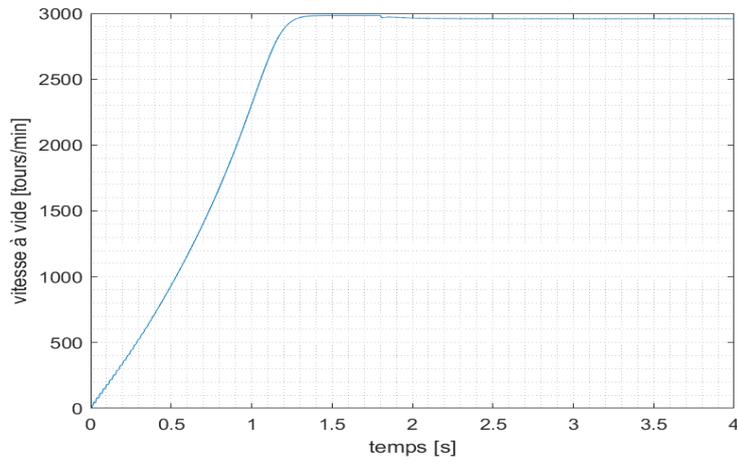


Figure - 3. 45: vitesse de la machine simulée après ouverture de deux phases au stator

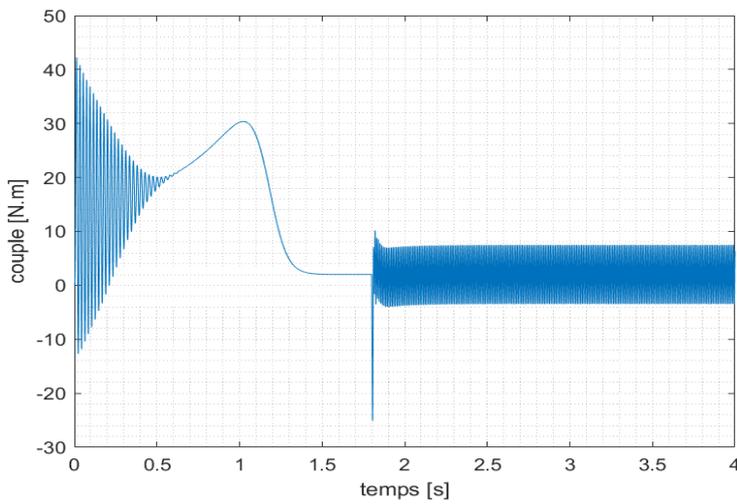


Figure - 3. 46: Couple électromagnétique simulé, après ouverture de deux phases au stator

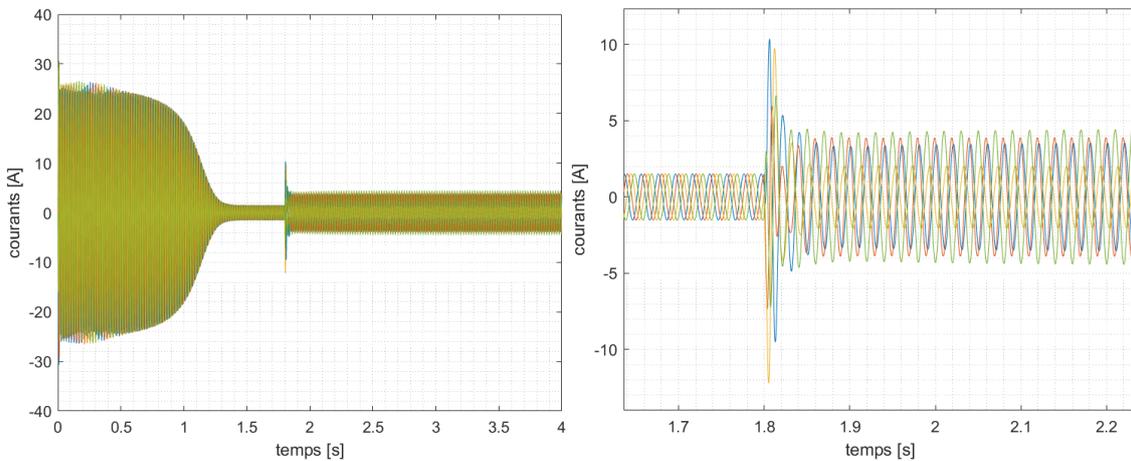


Figure - 3. 47: Courants statoriques simulés après ouverture de deux phases au stator

3.6.2 Configuration pentagone

On présentera dans cette partie la vitesse, le couple électromagnétique et les courants statoriques de la machine saine pour une configuration pentagone.

3.6.2.1 Fonctionnement de la machine saine

La vitesse de la machine asynchrone pentaphasée saine est présentée à la Fig.3.48 tandis que le couple électromagnétique et les courants statoriques sont présentés aux Figures 3.49 et 3.50.

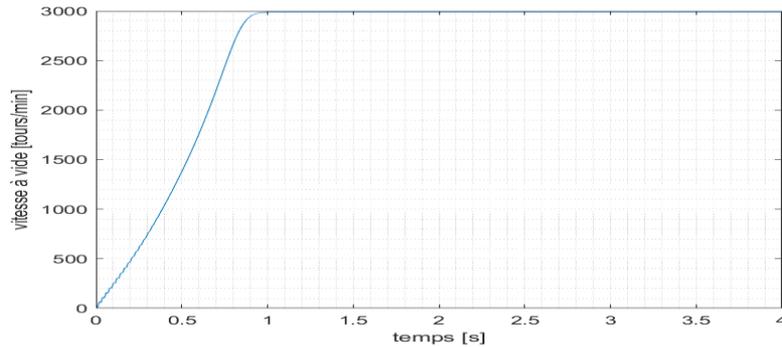


Figure - 3. 48: vitesse de la machine simulée pour un fonctionnement sain

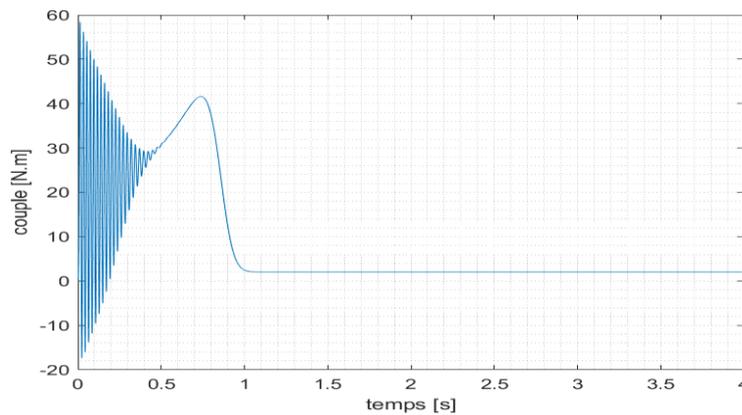


Figure - 3. 49: Couple électromagnétique simulé pour un fonctionnement sain

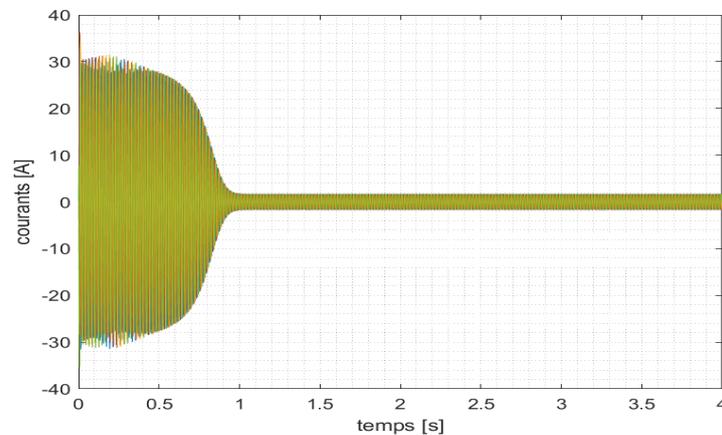


Figure - 3. 50: Courants statoriques simulés pour un fonctionnement sain

3.6.2.2 Ouverture d'une phase au stator

La vitesse, le couple électromagnétique et les courants statoriques sont présentés aux Figures respectives 3.51, 3.52 et 3.53 pour une machine asynchrone pentaphasée avec ouverture d'une phase au stator.

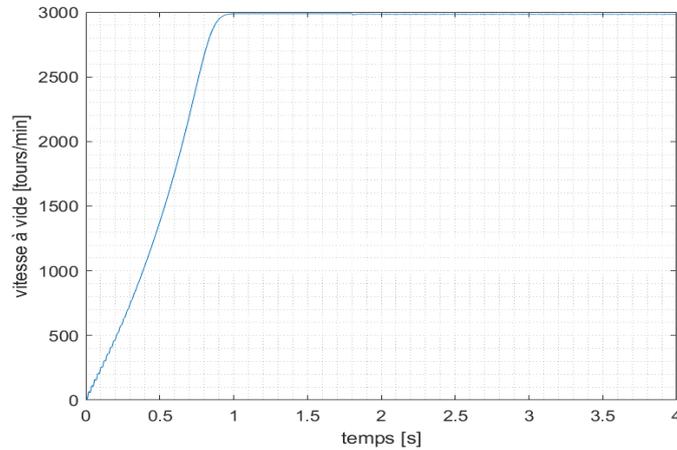


Figure - 3. 51: vitesse de la machine simulée après ouverture d'une phase au stator

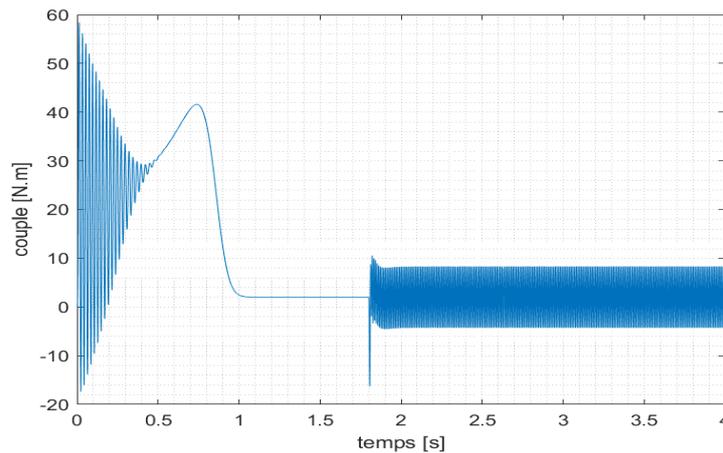


Figure - 3. 52: Couple électromagnétique simulé, après ouverture d'une phase au stator

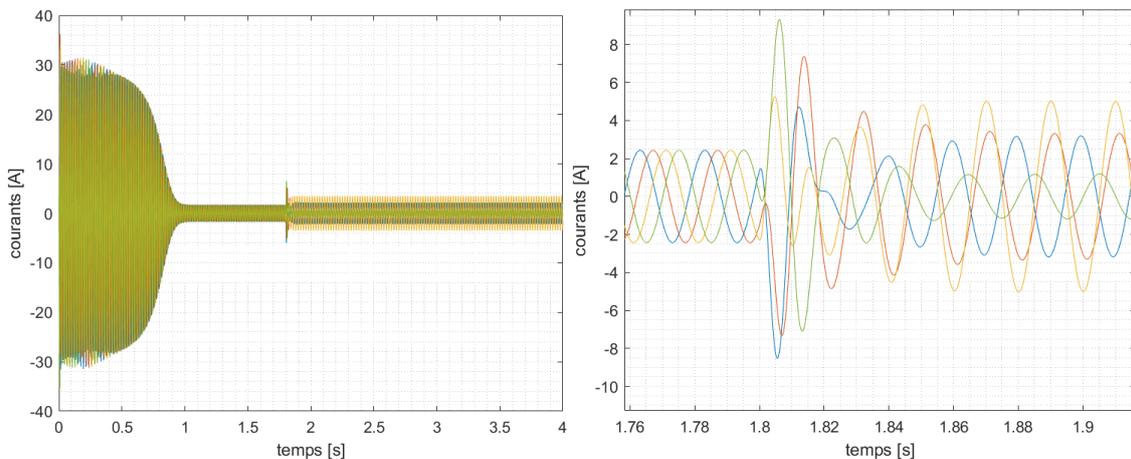


Figure - 3. 53: Courants statoriques simulés après ouverture d'une phase au stator

3.6.2.3 Ouverture de deux phases au stator

Les mêmes simulations sont reprises pour une machine asynchrone avec ouverture de deux phases. La vitesse, le couple électromagnétique et les courants stator sont présentés aux Figures respectives 3.54, 3.55 et 3.56.

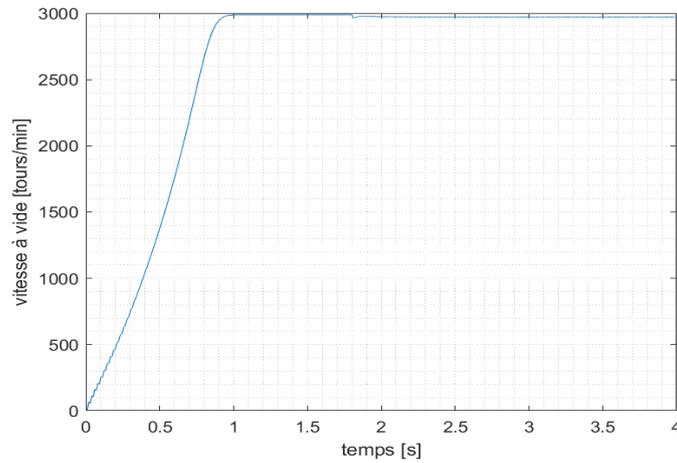


Figure - 3. 54: vitesse de la machine simulée après ouverture de deux phases au stator

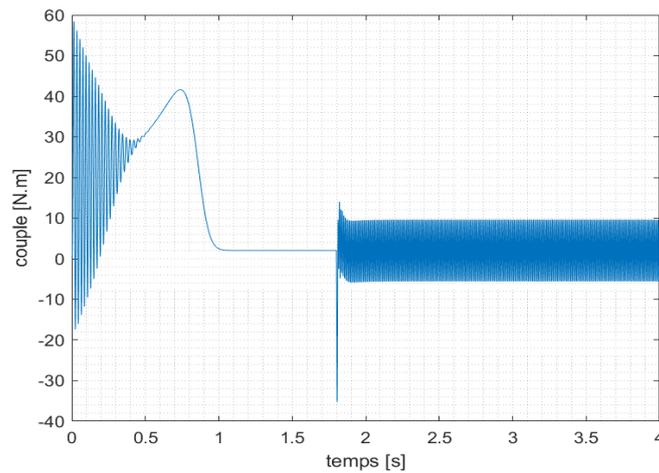


Figure - 3. 55: Couple électromagnétique simulé, après ouverture de deux phases au stator

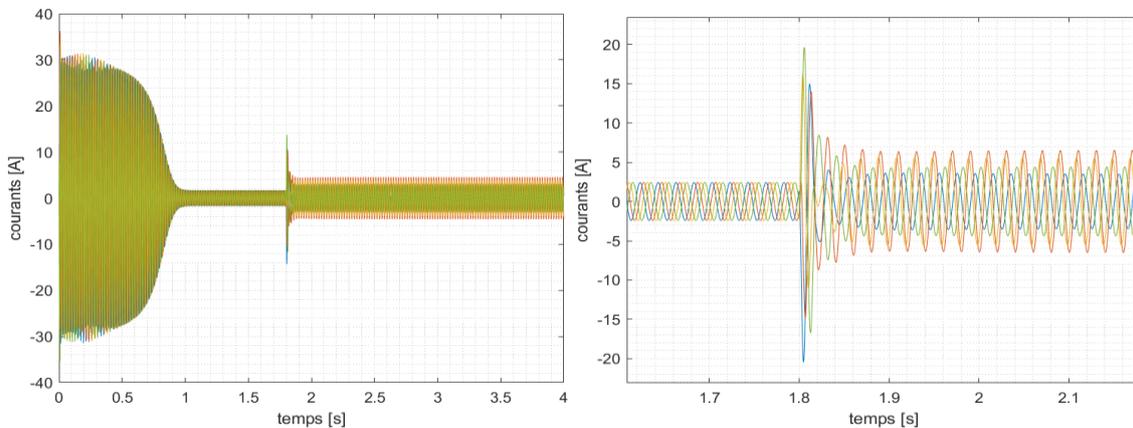


Figure - 3. 56: Courants statoriques simulés après ouverture de deux phases au stator

3.6.3 Configuration pentacle

On présentera dans cette partie la vitesse, le couple électromagnétique et les courants statoriques de la machine saine pour une configuration pentacle.

3.6.3.1 Fonctionnement de la machine saine

La vitesse de la machine asynchrone pentaphasée saine est présentée à la Fig.3.57 tandis que le couple électromagnétique et les courants statoriques sont présentés aux Figures 3.58 et 3.59.

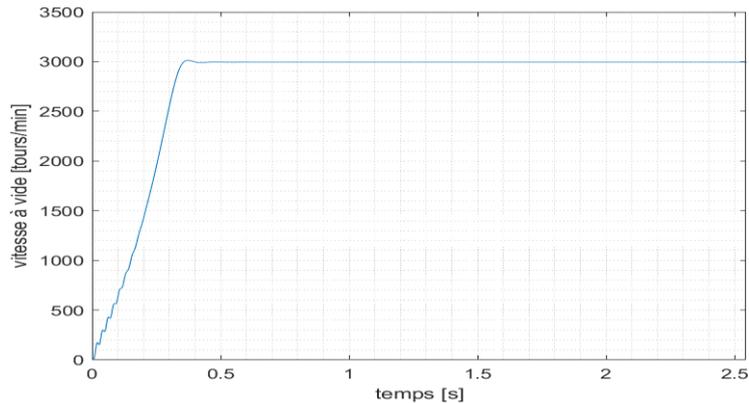


Figure - 3. 57: Vitesse de la machine simulée pour un fonctionnement sain

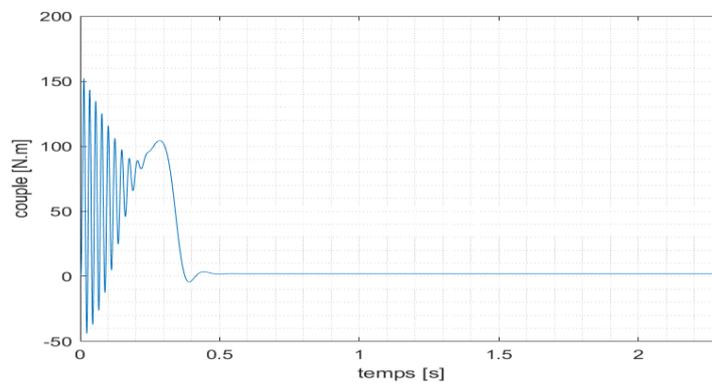


Figure - 3. 58: Couple électromagnétique simulé pour un fonctionnement sain

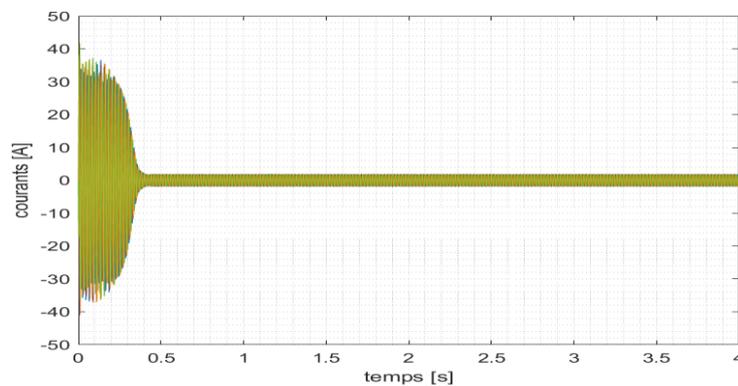


Figure - 3. 59: Courants statoriques simulés de la machine saine

3.6.3.2 Ouverture d'une phase

Les résultats de simulation obtenus après ouverture d'une phase statorique sont présentés aux figures 3.60, 3.61 et 3.62 pour la vitesse, le couple électromagnétique et les courants statoriques respectivement.

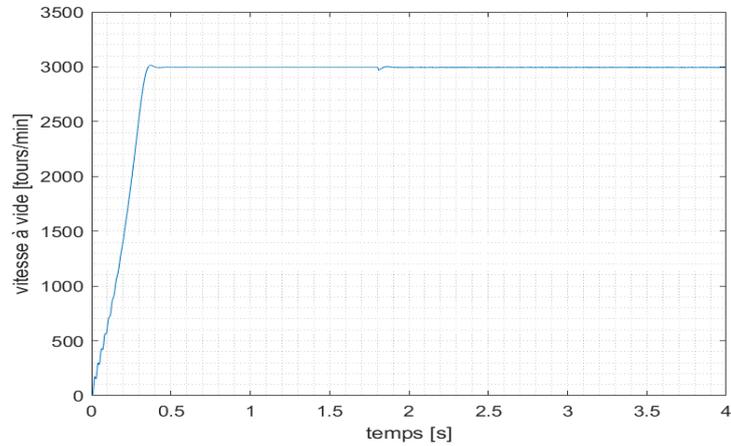


Figure - 3. 60: vitesse de la machine simulée après ouverture d'une phase au stator

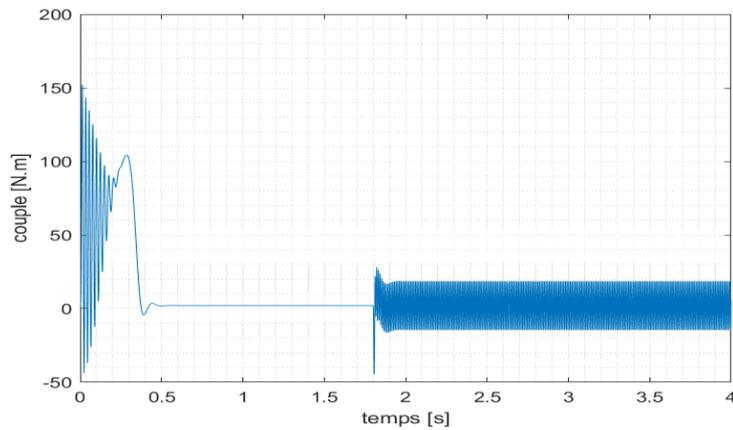


Figure - 3. 61: Couple électromagnétique simulé, après ouverture d'une phase au stator

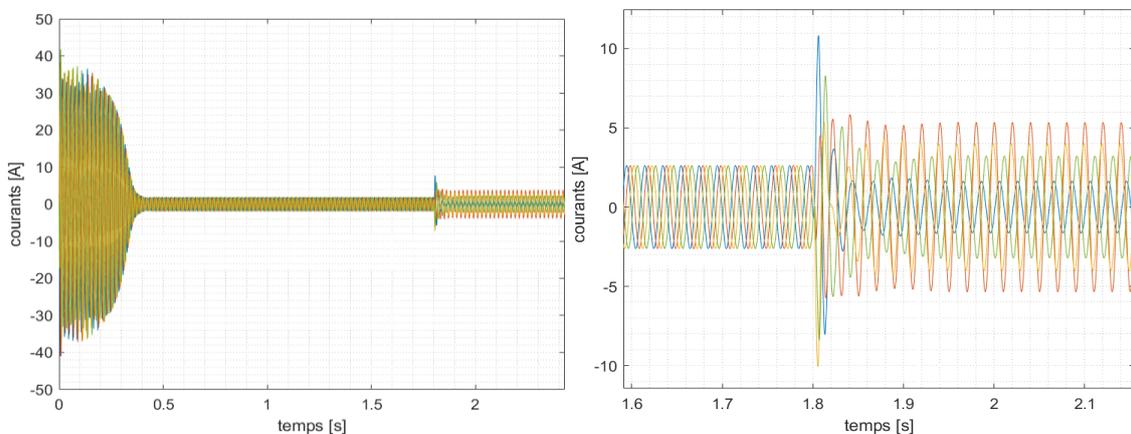


Figure - 3. 62: Courants statoriques simulés après ouverture d'une phase au stator

3.6.3.3 Ouverture de deux phases au stator

Comme précédemment, Les résultats de simulation obtenus après ouverture de deux phases statoriques sont présentés aux figures 3.63, 3.64 et 3.65 pour la vitesse, le couple électromagnétique et les courants statoriques respectivement.

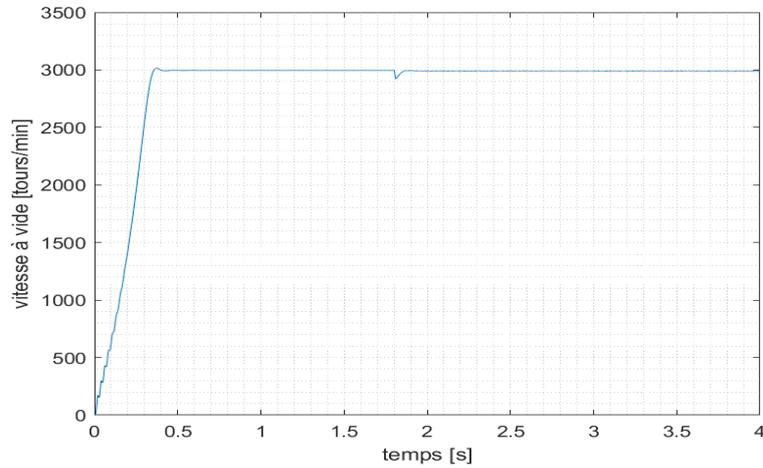


Figure - 3. 63: vitesse de la machine simulée après ouverture de deux phases au stator

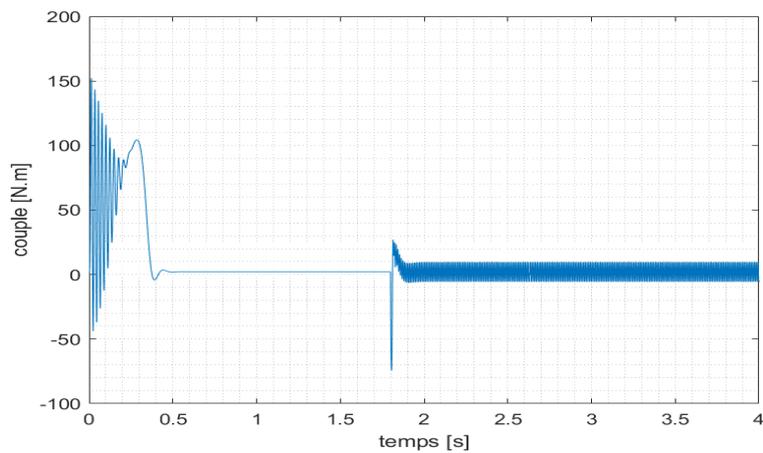


Figure - 3. 64: Couple électromagnétique simulé, après ouverture de deux phases au stator

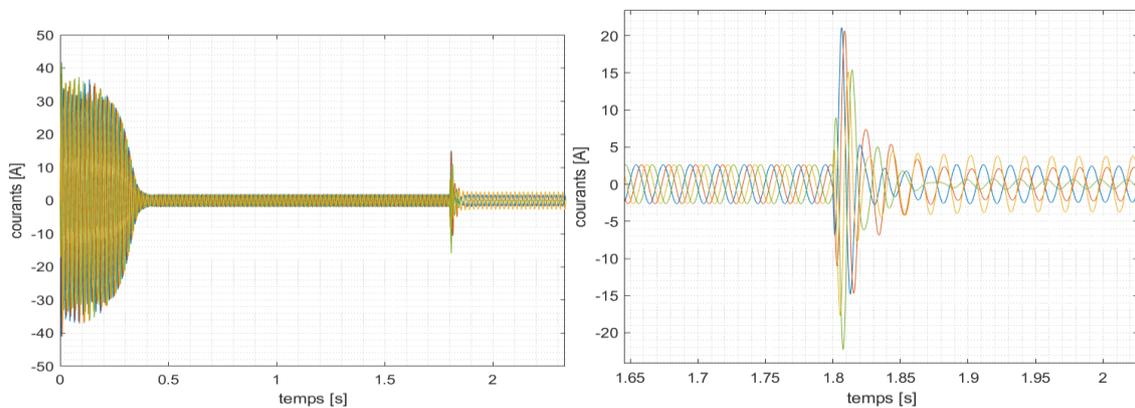


Figure - 3. 65: Courants statoriques simulés après ouverture de deux phases

Les simulations présentées dans ce chapitre ont été réalisées pour des paramètres de la machine asynchrone pentaphasée identifiée. Les résultats obtenus ont ensuite été comparés à ceux expérimentaux avec, cependant, quelques petites erreurs.

3.7 Résultats et Discussions

Le principe de base de ce travail était de découvrir comment le moteur asynchrone à cinq phases se comporte lors des défauts statoriques à savoir : ouverture d'une phase ou de deux phases au stator. Plusieurs remarques sont à citer :

- Passer à la connexion de la machine en pentagone ou en pentacle augmente la tension de phase de l'enroulement du stator ; ce qui améliore les performances de la machine par rapport à une connexion en étoile.
- Si la machine doit fonctionner avec les trois connexions, le gain significatif entre l'étoile et le pentacle doit être pris en compte dans la conception de la phase de la machine.
- Lors de l'examen des états de défauts, nous nous sommes concentrés sur la défaillance de phase pour différentes connexions d'enroulements statoriques. Nous avons constaté que si nous utilisons la même tension d'entrée pour les trois connexions (étoile, pentagone, pentacle), le couple augmente pour la connexion pentagone plus que pour l'étoile. Pour le cas pentacle, le couple est plus important que pour les deux autres configurations.
- Le modèle élaboré du moteur asynchrone pentaphasé utilisé sous l'environnement Matlab/Simulink a permis la vérification de la précision par les résultats des tests expérimentaux.
- D'après les formes d'onde mesurées et simulées dans des états de défauts, nous avons constaté que les moteurs asynchrones pentaphasés sont fiables et peuvent tourner même avec 2 phases en défaut ; ce qui est un avantage par rapport à leurs homologues triphasés.
- L'analyse des harmoniques, après défauts, donne une diminution remarquable des harmoniques 3 et 5. L'application de l'analyse spectrale sur le signal du courant statorique avec défaut d'ouverture de deux phases au stator montre la disparition du troisième harmonique vu que le signal tend vers celui d'un système triphasé.

3.8 Conclusion

Ce travail présente une évaluation du comportement d'un moteur à induction à cinq phases dans des conditions particulières, c'est-à-dire lorsqu'une ou deux phases sont ouverte. Il convient de noter que lorsqu'on utilise un moteur électrique dans n'importe quelle configuration, il est nécessaire de connaître le comportement du moteur dans des conditions de défauts, afin de connaître la connexion la plus appropriée à utiliser pour la conception d'un moteur à induction à cinq phases.

Nous avons présenté dans ce chapitre les résultats des tests expérimentaux sur un moteur réel, qui sont ensuite vérifiés sur un modèle de simulation du moteur asynchrone pentaphasé.

Conclusion générale

Les machines polyphasées présentent une meilleure alternative par rapport aux machines triphasées conventionnelles. La multiplication du nombre de phases permet un fractionnement de la puissance et donc une réduction des tensions commutées à un courant donné. De plus, elles offrent la possibilité de réduire les ondulations du couple et une meilleure fiabilité dans le cas du défaut.

Le travail que nous avons présenté dans ce mémoire de fin d'études consiste en l'identification paramétrique et structurale de la machine asynchrone pentaphasée à cage alimentée par transformateur asymétrique pentaphasé. Ensuite, nous avons analysé le comportement de cette machine dans le cas défectueux, à savoir : Ouverture d'une ou de deux phases au stator.

Pour cela, nous avons élaboré un modèle mathématique de la machine qui nous a permis d'aboutir à un circuit équivalent par phase. Les paramètres de la machine sont identifiés en effectuant des tests standards sur la machine. Les résultats obtenus nous ont permis de construire un modèle de simulation sur l'environnement Matlab/Simulink.

Nous avons ensuite effectué une identification structurale, à l'aide des structures de modèle, sur la machine asynchrone pentaphasée fonctionnant en régime permanent en charge. Cette identification permet la détermination du modèle mathématique du système sur la base des observations des entrées-sorties du système. Elle est destinée à des fins de contrôle-commande.

Ensuite, nous nous sommes consacrés à l'étude sur le diagnostic de défauts de la machine pour trois types de couplage applicables à une machine pentaphasée : étoile, pentagone et pentacle, pour les cas sain puis défectueux, à savoir : ouverture d'une ou de deux phases au stator.

Nous avons constaté qu'un défaut statorique à la machine asynchrone pentaphasée engendre un déséquilibre entre les phases, ainsi nous avons observé que les courants des autres phases tendent à donner un courant plus élevé. Quand un défaut apparaît en cas de fonctionnement en régime permanent, la machine asynchrone pentaphasée continue à tourner avec une vitesse proche du synchronisme, contrairement à la machine triphasée conventionnelle qui s'arrête si elle rencontre de tels défauts.

Nous avons conclu que le meilleur couplage de la machine pentaphasée dans le cas du défaut au stator est le couplage pentagone, car il est plus stable que les autres couplages, le déséquilibre est minimum. Par contre, le plus dangereux des couplages, dans le cas de défauts, est le couplage pentacle car il présente des courants très importants.

Notre travail pourrait être poursuivi en réalisant :

- une commande d'une machine asynchrone pentaphasée alimentée par onduleur pentaphasé pour des applications en traction ferroviaire
- une connexion particulière d'un transformateur pentaphasé à trois colonnes.

Bibliographie

- [1] Kasrul Abdul Karim, Nor Azizah Mohd Yusoff, Auzani Jidin, Fazlli Patkar, R. N. Firdaus and M. L.Mohd Jamil, Analysis of Five-Phase Induction Motor With Dynamic Load, November 2015 *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol.10, No. 20, pp.9830-9834.
- [2] Emil Levi, Martin Jones, Slobodan N. Vukosavic, and Hamid A. Toliyat, A Novel Concept of a Multiphase, Multi-motor Vector Controlled Drive System Supplied From a Single Voltage Source Inverter, 2004 *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol.19, No. 2, pp.320-321.
- [3] F. Benabida, M. Ouadah Diagnostic de défaut au stator et au rotor par estimation paramétrique de la machine asynchrone à cage d'écureuil. p1, PFE Électrotechnique Alger, École Nationale Polytechnique : juin 2006
- [4] Mohamed Zendi et Lounis Zoulim "Modélisation d'une machine asynchrone pentaphasée", Mémoire de Fin d'Études de Master académique en génie électrique : Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou : le 08 /10/ 2015.
- [5] G. Didier. Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances. Thèse doctorat. Université Henri Poincaré, Nancy-I. Octobre 2004
- [6] J.A. Riveros, F. Barrero, M.J. Durán, B.Bogado, S. Toral, "Estimation of the Electrical Parameters of a Five-Phase Induction Machine using Standstill Techniques". Part I : Theoretical Discussions, 2011 *IECON-37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Melbourne, Australia,pp.3668-3673.
- [7] Jose A. Riveros, Alejandro G. Yepes, Federico Barrero, Jesus Doval-Gandoy, Blas Bogado, Oscar Lopez, Martin Jones, and Emil Lev, " Parameter Identification of Multiphase Induction Machines with Distributed Windings"Part.2 : Time-Domain Techniques, December 2012 *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 27, No. 4, pp. 1067 - 1071.
- [8] Ayman S. Abdel-Khalik, Senior Member, IEEE, Mohamed I. Daoud, Shehab Ahmed, Senior Member, IEEE, and Ahmed M. Massoud, Senior Member, IEEE, "Steady-State Equivalent Circuit of Five- Phase Induction Machines With Different Stator Connections under Open Line Conditions' DOI 10.1109/TIE.2016.255001, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2016
- [9] Khelafi Abdelhakim, Djebli Abdelmalik, Touhami Omar and Ibtouen Rachid, "Assessment of Torque Density Improvement by Third Harmonic Injection in Five-Phase Induction Machine with Full Pitch Concentrated and Distributed Winding", 2019 *International Conference on Advanced Electrical Engineering (ICAEE)*, Algiers, Algeria, 2019,
- [10] Mahmoud I. Masoud, senior member, IEEE, "Five Phase Induction Motor: Phase Transposition Effect with Different Stator Winding Connections " , 978-1-5090-3474-1/16/2016 *IEEE*
- [11] Min-Huei Kim, Nam-Hun Kim, and Won-Sik BaikYeungnam, "A Five-Phase IM Vector Control System Including 3rd Current Harmonics Component", May 30-June 2011 *8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia*, The Shilla Jeju, Korea, pp.2519-2524.

- [12] Zaskalicky, P. (2019) "Behavior of a Five-Phase Pentagon Connected IM Operated under One-Phase Fault". 2019 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP) & 2019 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM). doi:10.1109/acemp-optim44294.2019.9007166
- [13] Zaskalicky, P. (2020). "Pentagon Connected Five-Phase Induction Machine Working under One-Phase Fault". 2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). doi:10.1109/isie45063.2020.9152419
- [14] Ayman S. Abdel-Khalik, Senior Member, IEEE, Mohamed I. Daoud, Shehab Ahmed, Senior Member, IEEE, Ahmed A. Elserougi, Senior Member, IEEE, and Ahmed M. Massoud, Senior Member, IEEE "Parameter Identification of Five-Phase Induction Machines With Single Layer Windings" IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 61, No. 10, October 2014.
- [15] Lennart Ljung, System Identification Toolbox, for use with Matlab, May 1991.
- [16] Chomat, M., Schreier, L., & Bendl, J. (2015). "Effect of stator winding configurations on operation of converter fed five-phase induction machine". 2015 International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE). doi:10.1109/edpe.2015.7325343
- [17] Tawfiq, K. B., Ibrahim, M. N., EL-Kholy, E. E., & Sergeant, P. (2020). "Performance Improvement of Existing Three phase Synchronous Reluctance Machine: Stator Upgrading to 5-phase with Combined Star-Pentagon Winding". IEEE Access, 1–1. doi:10.1109/access.2020.3014498
- [18] Sunil Kumar J1, Shalini J2, Dr. P. G. V. Suresh Kumar3, Fikadu Wakijir A4, "Development of Three phase to five phase Transformer using a novel technique", International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 4, Issue 3, March 2013 ISSN 2229-5518