

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 :

**Diagnostic de défauts au stator d'une
machine asynchrone pentaphasée**

Présenté par :

Nacer OUMELLIL et Badr Eddine TAIBI

Sous la direction de M. Omar TOUHAMI Professeur

Présenté et soutenu publiquement le (28/06/2022)

Composition du Jury :

Président	M . Mo. Mahmoudi	Professeur	ENP, Alger
Rapporteur/ Promoteur	M . O. Touhami	Professeur	ENP, Alger
Examineur	M . R. Ibtouen	Professeur	ENP, Alger

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 :

**Diagnostic de défauts au stator d'une
machine asynchrone pentaphasée**

Présenté par :

Nacer OUMELLIL et Badr Eddine TAIBI

Sous la direction de M. Omar TOUHAMI Professeur

Présenté et soutenu publiquement le (28/06/2022)

Composition du Jury :

Président	M . Mo. Mahmoudi	Professeur ENP, Alger
Rapporteur/ Promoteur	M . O. Touhami	Professeur ENP, Alger
Examineur	M . R. Ibtouen	Professeur ENP, Alger

الملخص

المحركات ذات عدد من المراحل أكبر من ثلاث، والمعروفة باسم "متعدد الأطوار" تستخدم بشكل متزايد من قبل المجتمع العلمي والصناعي بسبب الأداء الجذاب من حيث عزم الدوران، وانخفاض التيار لكل مرحلة وكفاءة أعلى من الآلات ثلاثية الطور. تم تخصيص هذا العمل لتطوير نموذج رياضي يتكيف مع الآلة غير المتزامنة ذات الخمس مراحل في الإطار المرجعي ذي الخمس مراحل ثم في الإطار المرجعي بارك، ثم استغلال هذا النموذج عن طريق المحاكاة العددية في بيئة الماتلاب لمختلف ظروف التشغيل، في الحالة الصحية والعيبة، في عملنا نحن مهتمون بالأعطال الكهربائية المتعلقة بمصدر الطاقة. ثم تحقق من هذه النتائج عن طريق التجريب.

الكلمات المفتاحية: آلة غير متزامنة خماسية الأطوار، تحليل طيفي، نمذجة رياضية، تصميم، محاكاة، تشخيص الأعطال.

Abstract

Motors with a number of phases greater than three, known as "Polyphase" are increasingly used by the scientific and industrial community Due to the attractive performance in terms of torque, lower current per phase and higher efficiency than three-phase machines. This work is devoted to developing a mathematical model adapted to the five-phase asynchronous machine in the five-phase frame of reference then in the Park frame of reference, then the exploitation of this model by numerical simulation in the MATLAB/SIMULINK environment for different operating conditions, in healthy and defective state, in our work We are interested in electrical failures relating to the power supply. Then verify these results by experimentation.

Key words: Five-phase asynchronous machine, spectral analysis, mathematical modeling, design, simulation, fault diagnosis.

Résumé

les moteurs à un nombre de phases supérieur à trois, dit "Polyphasés" sont de plus en plus utilisés par les chercheurs académiques et industriels eu égard aux performances en termes de couple, courant par phase moins important et un rendement supérieur à celui des machines triphasées. L'objet de ce travail est l'élaboration d'un modèle mathématique adapté à la machine asynchrone pentaphasée dans le référentiel pentaphasée et dans le référentiel de Park. Nous avons exploité ce modèle pour la simulation numérique dans l'environnement MATLAB/SIMULINK sous différentes conditions de fonctionnement de la machine asynchrone pentaphasée. Nous nous sommes intéressés aux défauts électriques relatifs à l'alimentation avant de comparer les résultats obtenus par simulation avec ceux expérimentaux.

Mots clé : Machine asynchrone pentaphasée, analyse spectrale, modélisation mathématique, conception, simulation, diagnostique de défaut.

Remerciements

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

Je tiens tout d'abord à lui témoigner ma reconnaissance de nous avoir proposé le sujet de notre mémoire et pour son suivi rigoureux et sa grande disponibilité. Je lui présente également mes remerciements pour ses judicieux conseils et orientations.

Nous remercions particulièrement Mr **MAHMOUDI Med Oulhadj** professeur à l'ENP, qui nous a fait l'honneur de présider ce jury, ainsi que Mr **IBTIOUEN Rachid** 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

A la mémoire de mes Grands-parents.

A la mémoire de mon ami faycal benidiri disparu trop tôt.

Que Dieu les accueille dans ses vastes paradis

Je dédie ce modeste travail

À l'homme à qui je dois ma vie, ma réussite et tout mon respect, Mon père Rabah ,

À la femme qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureux, Mon adorable mère Dehbia

Que Dieu les garde et veille sur eux,

A mon frère Amine et mes deux Sœurs Houria et Houdaqui n'ont pas cessé de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études.

A toute ma famille, mes proches pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

A tous mes amis de la promo ENP2022 Bedrou, Aymen, bakki, Imad, Wassim, Ayoub, Kfioutir, Raouf, Djamel .

A tous mes amis qui ont toujours été présents pour moi ,Rezki ,Raouf ,Abdou , ,Anis ,Saïd

Merci

Nacer

Dédicaces

*A mon très cher père **Taibi Ismail***

Tu as toujours été pour moi un exemple du père respectueux, honnête, de la personne méticuleuse, je tiens à honorer l'homme que tu es.

Grâce à toi papa j'ai appris le sens du travail et de la responsabilité. Je voudrais te remercier pour ton amour, ta générosité, ta compréhension... Ton soutien fut une lumière dans tout mon parcours. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour l'estime et le respect que j'ai toujours eu pour toi.

Ce modeste travail est le fruit de tous les sacrifices que tu as déployés pour mon éducation et ma formation. Je t'aime papa et j'implore le tout-puissant pour qu'il t'accorde une bonne santé et une vie longue et heureuse.

A ma très chère mère

Aucune dédicace très chère maman, ne pourrait exprimer la profondeur des sentiments que j'éprouve pour vous, vos sacrifices innombrables et votre dévouement firent pour moi un encouragement. Vous m'avez aidé et soutenu pendant de nombreuses années avec à chaque fois une attention renouvelée. Puisse Dieu, tout puissant vous combler de santé, de bonheur et vous procurer une longue vie.

A TOUTE MA FAMILLE Amal, Moh, Omar, Chana, Aucun langage ne saurait exprimer mon respect et ma considération pour votre soutien et encouragements. Je vous dédie ce travail en reconnaissance de l'amour que vous m'offrez quotidiennement et votre bonté exceptionnelle. Que Dieu le Tout Puissant vous garde et vous procure santé et bonheur.

*A mon cher **Mohamed reda ameziane** Tu as toujours offert soutien et réconfort, j'exprime envers toi une profonde admiration, reconnaissance et attachement inconditionnels.*

*Mes amis **Nacer, Ameziane, bakj, imad, Ghano, Atchi, Housseem, Sedouki, Lucci, Aymen.** Je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection et mes pensées, vous êtes pour moi des frères et des amis sur lesquels je peux compter. En témoignage de l'amitié qui nous unit et des souvenirs de tous les moments que nous avons passés ensemble, je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.*

Bedrou

Sommaire

1 Introduction Générale 14

Chapitre 1

2.1	Introduction.....	17
2.2	Classification des machines asynchrones polyphasées	17
2.2.1	Machines de type 1	17
2.2.2	Machines de type 2	17
2.3	Avantages des machines polyphasées	17
2.4	Domaines d'application des machines polyphasées.....	18
2.5	Machine asynchrone pentaphasée	18
2.5.1	Types de couplage de la machine asynchrone pentaphasée.....	18
2.5.2	Séquence 3 dans une machine asynchrone pentaphasée	19
2.5.3	Injection de l'harmonique 3 dans une machine asynchrone pentaphasée.....	19
2.6	Modélisation de la machine asynchrone pentaphasée	20
2.6.1	Hypothèses simplificatrices.....	20
2.6.2	Modélisation dans le référentiel pentaphasé	20
2.6.3	Modèle de la machine asynchrone pentaphasée dans le repère (d, q) :.....	22
2.7	Conclusion	23

Chapitre 2

3.1	Introduction.....	25
3.2	Simulation sous environnement Matlab/Simulink	25
3.3	Présentation de l'environnement Matlab/Simulink	25
3.4	Paramètre de la machine étudiée	26
3.5	Schéma bloc du model dans l'environnement Matlab Simulink	26
3.6	Fonctionnement sain.....	28
3.6.1	Séquence 1	28
3.6.1.1	Configuration étoile	28
3.6.1.2	Configuration pentagone.....	29
3.6.1.3	Configuration pentacle.....	30
3.6.2	Séquence 3	31
3.7	Fonctionnement de la MASP avec défauts	33
3.7.1	Ouverture d'une phase au stator	33

3.7.1.1	Couplage étoile	33
3.7.1.2	Couplage pentagone	34
3.7.1.3	Couplage pentacle	35
3.7.2	Ouverture de deux phases	36
3.7.2.1	Couplage étoile	36
3.7.2.1.1	Deux phases adjacentes	36
3.7.2.1.2	Deux phases non-adjacentes.....	37
3.7.2.2	Couplage pentagone.....	39
3.7.2.2.1	Deux phases adjacentes	39
3.7.2.2.2	Deux phases non-adjacentes.....	40
3.7.2.3	Couplage pentacle	41
3.7.2.3.1	Deux phases adjacentes	41
3.7.2.3.2	Deux phases non-adjacentes.....	42
3.7.3	Ouverture de trois phases.....	43
3.7.3.1	Couplage étoile	43
3.7.3.1.1	Trois phases adjacentes	43
3.7.3.1.2	Trois phases non-adjacentes.....	44
3.7.3.2	Couplage pentagone.....	45
3.7.3.2.1	Trois phases adjacentes	45
3.7.3.2.2	Trois phases non-adjacentes.....	46
3.7.3.3	Couplage pentacle	47
3.7.3.3.1	Trois phases adjacentes	47
3.7.3.3.2	Trois phases non-adjacentes.....	48
3.8	Discussions	50

Chapitre 3

4.1	Introduction.....	52
4.2	Analyse spectrale du courant par transformée de Fourier rapide (FFT)	52
4.3	Banc d'essais expérimental	53
4.4	Fonctionnement en régime sain	54
4.4.1	Configuration étoile	54
4.4.2	Configuration pentagone	55
4.4.3	Configuration pentacle.....	57
4.5	Ouverture d'une phase	58
4.5.1	Configuration étoile	58
4.5.2	Configuration pentagone	59
4.5.3	Couplage pentacle.....	60

4.6	Ouverture de deux phases	60
4.6.1	Configuration étoile	61
4.6.1.1	Ouverture de deux phases adjacentes	61
4.6.1.2	Ouverture de deux phases non-adjacentes	62
4.6.2	Configuration pentagone	63
4.6.2.1	Ouverture de deux phases adjacentes	63
4.6.2.2	Ouverture de deux phases non-adjacentes	63
4.6.3	Configuration pentacle.....	65
4.6.3.1	Ouverture de deux phases adjacentes	65
4.6.3.2	Ouverture deux phases non-adjacentes	66
4.7	Ouverture de trois phases.....	67
4.7.1	Configuration étoile	67
4.7.1.1	Troisphasesadjacentes	67
4.7.1.2	Ouverture de trois phases non-adjacentes	68
4.7.2	Configuration pentagone	69
4.7.2.1	Ouverture de trois phases adjacentes	69
4.7.2.2	Ouverture de trois phases non-adjacentes	70
4.7.3	Configuration pentacle.....	71
4.7.3.1	trois phases adjacentes	71
4.7.3.2	Ouverture de trois phases non-adjacentes	72
4.8	Conclusion	73
5	Conclusion générale.....	74
6	Perspectives	75
7	Bibliographie	76
8	ANNEXE	78

Table des figures

Chapitre 1

Fig 1-1: couplage étoile	18
Fig 1-2 :couplage pentagone	18
Fig 1-3: couplage pentacle.....	19
Fig 1-4 :couplage des phases statoriques avec le transformateur pentaphasée au secondaire pour l'isolation de la séquence 3	19
Fig 1-5 :Modèle de la machine pentaphasée avec les composantes et des séquences 1 et 3	20

Chapitre 2

Fig 2-1 :Schéma de l'environnement Matlab	26
Fig.2-2-2 : Schéma de simulation de la machine asynchrone pentaphasée alimentée par transformateur asymétrique pentaphasé.....	27
Fig.2-2-3 :Sous-système du schéma bloc de simulation de la machine asynchrone pentaphasée	27
Fig.2-2-4 : Courants des phases statoriques de la MASP-C Etoile.....	28
Fig. 2-5: Vitesse de rotation de la MASP -C Etoile.....	28
Fig. 2-6: Couple électromagnétique de la MASP -C Etoile.....	29
Fig. 2-7:Courants des phases statoriques de la MASP-C pentagone.....	29
Fig. 2-8: Vitesse de rotation de la MASP -C pentagone.....	29
Fig. 2-9 : Couple électromagnétique de la MASP -C pentagone	30
Fig. 2-10: Courants des phases statoriques de la MASP-C pentacle	30
Fig.2-2-11: Vitesse de rotation de la MASP -C pentacle.....	30
Fig. 2-12: Couple électromagnétique de la MASP -C pentacle.....	31
Fig. 2-13:Courants des phases statoriques de la MASP à vide dû à la séquence 3.....	31
Fig. 2-14:Vitesse de rotation de la MASP à vide dû à la séquence 3.....	32
Fig. 2-15: Couple électromagnétique de la MASP à vide dû à la séquence 3	32
Fig.2-2-16: Courants statoriques après ouverture d'une phase au stator C-Etoile	33
Fig. 2-17: Vitesse de la machine après ouverture d'une phase au stator C-Etoile	33
Fig. 2-18: Couple de la machine après ouverture d'une phase au stator C-Etoile.....	34
Fig. 2-19: Courants statoriques après ouverture d'une phase au stator C-pentagone.....	34
Fig. 2-20: Vitesse de la machine après ouverture d'une phase au stator C- pentagone	34
Fig. 2-21: Couple de la machine après ouverture d'une phase au stator C-pentagone	35
Fig 2-22:Courants statoriques après ouverture d'une phase au stator C -pentacle	35
Fig 2-23:vitesse de la machine après ouverture d'une phase au stator C- pentacle	35
Fig 2-24:Couple de la machine après ouverture d'une phase au stator C-pentacle	36
Fig 2-25: Courants statoriques avec ouverture de deux phases adjacentes au stator C-étoile.....	37
Fig. 2-26: Vitesse de la machine avec ouverture de deux phases adjacentes au stator C-étoile.....	37
Fig. 2-27: Couple de la machine avec ouverture de deux phases adjacentes au stator C-étoile.....	37
Fig. 2-28: Courants statoriques avec ouverture de deux phases non-adjacentes au stator C-étoile	38
Fi 2-29:Vitesse de la machine avec ouverture de deux phases non-adjacentes au stator C-étoile.....	38
Fig. 2-30 : Couple de la machine avec ouverture de deux phases non-adjacentes au stator C-étoile	38
Fig. 2-31: Courants statoriques avec ouverture de deux phases adjacentes au stator C-pentagone	39
Fig. 2-32: Vitesse de la machine avec ouverture de deux phases adjacentes au stator C-pentagone	39
Fig. 2-33: Couple de la machine avec ouverture de deux phases adjacentes au stator C-pentagone	40
Fig 2-34: Courants statoriques avec ouverture de deux phases non-adjacentes au stator C-pentagone	40
Fig. 2-35: Vitesse de la machine avec ouverture de deux phases adjacentes au stator C-pentagone	40
Fig. 2-36: Couple de la machine avec ouverture de deux phases adjacentes au stator C-pentagone	41
Fig. 2-37: Courants statoriques avec ouverture de deux phases adjacentes au stator C-pentacle	41
Fig 2-38 :Vitesse de la machine avec ouverture de deux phases adjacentes au stator C-pentacle.....	41
Fig 2-39 :Couple de la machine avec ouverture de deux phases adjacentes au stator C-pentacle.....	42

Fig 2-40 :Courants statoriques avec ouverture de deux phases non-adjacentes au stator C-pentacle	42
Fig 2-41 :Vitesse de la machine avec ouverture de deux phases non-adjacentes au stator C-pentacle ...	42
Fig 2-42:Couple de la machine avec ouverture de deux phases non-adjacentes au stator C-pentacle	43
Fig 2-43: Courants statoriques avec ouverture de trois phases adjacentes au stator C-etoile	44
Fig 2-44: Vitesse de la machine avec ouverture de trois phases adjacentes au stator C-etoile	44
Fig 2-45: Couple de la machine avec ouverture de trois phases adjacentes au stator C-étoile	44
Fig 2-46 :Courants statoriques avec ouverture de trois phases non-adjacentes au stator C -étoile	45
Fig 2-47 :Vitesse de la machine avec ouverture de trois phases non-adjacentes au stator C-étoile.....	45
Fig 2-48:Couple de la machine avec ouverture de trois phases non-adjacentes au stator C-étoile.....	45
Fig 2-49: Courant statorique avec ouverture de trois phases adjacentes au stator C-pentagone	45
Fig 2-50 :Vitesse de la machine avec ouverture de trois phases adjacentes au stator C-pentagone.....	45
Fig 2-51:Couple de la machine avec ouverture de trois phases adjacentes au stator C-pentagone	46
Fig 2-52: Courant statorique avec ouverture de trois phases non-adjacentes au stator C-pentagone.....	47
Fig 2-53:Vitesse de la machine avec ouverture de trois phases non-adjacentes au stator C-pentagone .	47
Fig 2-54 :Couple de la machine avec ouverture de trois phases non-adjacentes au stator C-pentagone.	47
Fig 2-55:Courant statorique avec ouverture de trois phases adjacentes au stator C-pentacle.....	48
Fig 2-56:Vitesse de la machine avec ouverture de trois phases adjacentes au stator C-pentacle	48
Fig 2-57 :Couple de la machine avec ouverture de trois phases adjacentes au stator C-pentacle.....	48
Fig 2-58 :Courant statorique avec ouverture de trois phases non-adjacentes au stator C-pentacle	49
Fig 2-59:Vitesse de la machine avec ouverture de trois phases non-adjacentes au stator C-pentacle.....	49
Fig 2-60:Couple de la machine avec ouverture de trois phases non-adjacentes au stator C-pentacle	49

Chapitre 3

Fig. 3-1: Organigramme de diagnostic des défauts par FFT	53
Fig. 3-2: Structure du banc d'essais.....	53
Fig. 3-3: Transformateur asymétrique 3 vers 5 phases.....	53
Fig. 3-4: Machine asynchrone pentaphasée	53
Fig. 3-5: Carte d'acquisition.....	54
Fig. 3-6: Connexion étoile sur la plaque à bornes d'une machine asynchrone pentaphasée [17]	54
Fig. 3-7 : Courants statoriques expérimentaux des phases b et c et d pour un régime sain	55
Fig. 3-8: Spectre de raies du courant statorique	55
Fig. 3-9 : représentation de vecteur courant	55
Fig. 3-10 : Connexion pentagone sur la plaque à bornes d'une machine asynchrone pentaphasée [17] .	55
Fig. 3-11: Courants statoriques des phases a, c et e (tests expérimentaux).....	56
Figure 3-12 : Spectre de raies du courant statorique.....	55
Figure 3-13 : représentation de vecteur courant.....	56
Fig. 3-14: Connexion pentacle sur la plaque à bornes d'une machine asynchrone pentaphasée [17]	57
Fig. 3-15 : Courants statoriques des phases a, b et c pour un fonctionnement sain (tests expérimentaux)	57
Fig. 3-16: Spectre de raies du courant statorique (tests expérimentaux)	56
Fig. 3-17 : Representation vectoriel du courant	57
Fig. 3-18 : Courants statoriques des phases a, b et c après ouverture d'une phase au stator (tests expérimentaux).	58
Fig. 3-19 : Spectre de raies du courant statorique.....	57
Fig. 3-20 : Représentation de vecteur courant.....	58
Fig. 3-21: Courants statoriques des phases a, b et c avec ouverture d'une phase au stator.....	59
Fig. 3-22: Spectre de raies du courant statorique	58
Fig. 3-23: Représentation de Vecteur courant	59
Fig. 3-24: Courants statoriques des phases a, b et c avec ouverture d'une phase au stator C-pentacle ..	60
Fig. 3-25: Spectre de raies du courant statorique courant	59
Fig. 3-26: Représentation de vecteur de courant	60

Fig.-3-27: Courants statoriques avec ouverture de deux phases adjacentes au stator étoile.....	61
Figure 3-28 : Spectre de raies du courant statorique.....	60
Figure 3-29 : représentation de vecteur courant.....	61
Fig. 3-30: Courants statoriques avec ouverture de deux phases non-adjacentes au stator étoile.....	62
Fig. 3-31 : Spectre de raies du courant statorique.....	61
Fig. 3-32 : Représentation de vecteur courant.....	62
Figure 3-33:: Courants statoriques avec ouverture de deux phases adjacentes au stator étoile.....	63
Fig. 3-34 : Spectre de raies du courant statorique.....	62
Fig. 3-35 : Représentation de vecteur courant.....	63
Fig. 3-36: Courants statoriques avec ouverture de deux phases non-adjacentes au stator C- pentagone	63
Fig. 3-37 : Spectre de raies du courant statorique.....	63
Fig. 3-38: Représentation de vecteur courant.....	64
Fig.-3-39: Courants statoriques avec ouverture de deux phases adjacentes au stator C-pentacle.....	65
Fig.-3-40: Spectre de raies du courant statorique.....	64
Fig. 3-41 : Représentation vectoriel du courant.....	65
Fig. 3-42: Courants statoriques avec ouverture de deux phases adjacentes au stator C-pentacle.....	66
Fig. 3-43: Spectre de raies du courant statorique.....	65
Fig. 3-44: représentation vectoriel du courant.....	66
Fig. 3-45: Courant statoriques avec ouverture de trois phases adjacentes au stator C-etoile.....	67
Fig 3-46: Spectre de raies du courant statorique.....	67
Fig. 3-47: Courants statoriques avec ouverture de trois phases non-adjacentes au stator C-etoile.....	68
Fig. 3-48: Spectre de raies du courant statorique.....	68
Fig. 3-49: Courant statorique après Ouverture de trois phases adjacente C-pentagone.....	69
Fig. 3-50: Spectre de raies du courant statorique.....	69
Fig. 3-51: Courant statorique après Ouverture de trois phases non-adjacente C-pentagone.....	70
Fig. 3-52: Spectre de raies du courant statorique.....	70
Fig. 3-53: Courant statorique après Ouverture de trois phases adjacente C-pentacle.....	71
Fig. 3-54: Spectre de raies du courant statorique.....	71
Fig. 3-55: courant statorique après Ouverture de trois phases non-adjacente C-pentacle.....	72
Fig. 3-56: Spectre de raies du courant statorique.....	72

Tableaux

Tableau 2-3-1:Paramètres identifiés de la machine asynchrone pentaphasée [16].....	26
Tableau 8-1 :Paramètres généraux de la machine asynchrone pentaphasée.....	78

Listes des 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 (Ω).

R_r: Résistance rotorique (Ω).

L_m : Inductance de magnétisation (H).

L_s : Inductance propre de l'enroulement statorique (H)..

L_r: Inductance propre de l'enroulement rotorique (H).

l_s: inductance de fuite statorique (H).

l_r: inductance de fuite rotorique (H).

[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

[Fabcde] : Vecteur de la base naturelle.

[Fdq1dq30] : 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 : Position angulaire du rotor par rapport au stator.

Ω : Vitesse de rotation mécanique.

J: Moment d'inertie de la machine

Cem: Couple électromagnétique (N.m)

Cr: Couple résistant (couple de charge)

Ω : Vitesse angulaire de rotation

F : Coefficient de frottements visqueux

P : Puissance active (W).

Q : Puissance réactive (W).

S : Puissance apparente (W).

I_n : courant nominal (A)

I_s : courant statorique (A).

I_r : courant rotorique (A)

P : Operateur de Laplace

Introduction Générale

Le moteur asynchrone représente un élément fondamental dans les systèmes d'entraînements électriques à vitesse variable dans sa position actuelle dominante. Il est le moteur électrique dont l'usage est le plus répandu dans l'industrie à cause de la facilité de son alimentation, de la simplicité de sa construction, de sa robustesse, de son entretien limité et de son prix relatif intéressant.

Même si les moteurs à induction, monophasés et triphasés, dominent respectivement les utilisations domestiques et industrielles actuelles, les moteurs à un nombre de phases supérieur à trois, dit "Polyphasés" sont de plus en plus utilisés en industrie. Ils représentent une proposition efficace pour les applications à grande puissance telles que la traction ferroviaire, la propulsion navale, l'automobile et l'aérospatiale [1]. Une autre application importante concerne l'utilisation des machines polyphasées dans les systèmes de production de l'énergie éolienne.

Les premières réalisations des machines polyphasées sont apparues en 1969. Dans un premier temps, l'enjeu était d'accroître la puissance en la répartissant sur un nombre de phases élevé puis d'améliorer la discrétion vibratoire et donc le confort. Elles ont été ensuite étudiées en 1980 afin d'améliorer la disponibilité des motorisations électriques [2]. Aujourd'hui, les aspects de répartition de la puissance sont assez bien maîtrisés. La conception et la commande des machines polyphasées sont de plus en plus ciblées pour leurs multiples avantages parmi lesquelles on peut citer, [3] :

La réduction de l'amplitude et l'augmentation de la fréquence des ondulations de couple, ce qui permet potentiellement la réduction du bruit et des vibrations émises par la machine.

- L'amélioration de la production de couple par injection d'harmoniques de courant. En effet, les courants peuvent être adaptés au profil des forces électromotrices qui sont riches en harmoniques dans les machines polyphasées.

- 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.

La modélisation et la simulation des machines électriques a fait l'objet de nombreux travaux de recherche, que ce soit dans le but de dimensionnement, de la commande ou du diagnostic des défauts [...]. La diversité des objectifs a fait apparaître plusieurs techniques de modélisation et d'outils de simulation, dont chaque type de modélisation est plus ou moins adapté à certains domaines par rapport aux autres. Mais ces outils sont souvent spécifiques à une topologie ou à une machine bien déterminée.

Notre mémoire de fin d'études traite du diagnostic de défauts de la machine asynchrone pentaphasée à cage d'écureuil alimentée par un transformateur asymétrique pentaphasée avec défauts d'ouverture d'une, de deux ou de trois phases adjacentes et non-adjacentes pour différents couplages. Enfin nous présentons les différentes caractéristiques obtenues par simulation et expérimentation. A cet effet, le chapitre 1 est consacré aux généralités sur les machines asynchrones polyphasées de façon générale, puis la machine pentaphasée de façon plus précise pour laquelle nous avons écrit les équations électriques et mécaniques de fonctionnement dans un référentiel pentaphasé (a, b, c, d, e) puis dans le référentiel de Park.

Dans le deuxième chapitre, nous avons exploité le modèle de la machine asynchrone pentaphasée par simulation numérique dans l'environnement MATLAB/SIMULINK. Ce qui nous a permis d'analyser le comportement de la machine sous différentes conditions de fonctionnement.

Enfin, au troisième chapitre, nous avons validé les résultats de simulation par des tests expérimentaux au Laboratoire de Recherche en Électrotechnique de l'École nationale Polytechnique (LRE). L'étude a été effectuée grâce au traitement numérique des signaux.

Chapitre 1

**Généralités et Modèles des Machines
Asynchrones Polyphasées**

2.1 Introduction

Le moteur à induction est le moteur le plus utilisé dans l'ensemble des applications industrielles du fait de son faible coût, de sa fiabilité et de sa robustesse. Il est alimenté directement par le réseau alternatif ou par convertisseur statique.

Même si les moteurs à induction, monophasés et triphasés, dominent respectivement les utilisations domestiques et industrielles actuelles, les moteurs à un nombre de phases supérieur à trois, dit "Polyphasés" attirent de plus en plus l'attention des industriels et des scientifiques. En effet, la multiplication du nombre de phases permet la possibilité d'obtenir une réduction des effets parasites dans la machine notamment les ondulations du couple avec des courants non sinusoïdaux [4]. Aussi, la multiplication du nombre de phases offre la possibilité de faire fonctionner la machine avec une ou plusieurs phases en défaut.

Dans ce chapitre, nous présentons quelques généralités de la machine asynchrone polyphasée et son domaine d'application avant de nous intéresser, particulièrement, à la machine asynchrone pentaphasée.

2.2 Classification des machines asynchrones polyphasées

Selon la parité du nombre de phases des machines asynchrones polyphasées, on peut distinguer deux catégories : la machine de type 1 et celle de type 2. Cette classification permet d'avoir plusieurs configurations pour un nombre donné de phases suivant le décalage angulaire entre deux bobines adjacentes. Ce qui permet de définir le nombre de phases équivalent donné comme suit, [5] :

2.2.1 Machines de type 1

Dans ce type de machines, appelées également 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. Dans ce cas : $n\varphi = 3$ avec $n = 1, 2, 3 \dots$

2.2.2 Machines de type 2

Dans ce type de machines, le nombre de phases statoriques est un nombre impair d'où l'on a : $n\varphi = 2n + 1$ avec $n = 1, 2, 3 \dots$

2.3 Avantages des machines polyphasées

Les moteurs à un nombre de phases supérieures à trois, dit Polyphasés sont de plus en plus utilisés pour de multiples raisons :

- les machines polyphasées présentent des caractéristiques particulièrement attractives et une meilleure fiabilité pour l'ensemble convertisseur-machine,
- l'augmentation du nombre de phases permet d'obtenir une réduction des ondulations de 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.
- elles présentent également une solution intéressante pour des applications exigeantes en termes de discrétion vibratoire ou acoustique et accroissent la possibilité de fonctionnement en marche dégradé (ouverture d'une ou de deux phases) 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].

2.4 Domaines d'application des machines polyphasées

La structure polyphasée présente une proposition efficace pour les applications de grande puissance telles que la traction ferroviaire, la propulsion navale, l'automobile et l'aérospatiale ..., [1]

Une autre application importante concerne l'utilisation des machines polyphasées dans les systèmes de production de l'énergie éolienne : La machine double étoile génère de l'énergie à travers deux systèmes triphasés connectés à un transformateur pour adapter les tensions des six phases aux tensions des réseaux.

2.5 Machine asynchrone pentaphasée

La machine asynchrone pentaphasée a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche spécialement dans les applications industrielles nécessitant une grande densité de couple, [7, 9]. Sa construction est semblable à celle de la machine asynchrone triphasée qui fonctionne selon la loi d'induction électromagnétique de Faraday. La différence réside dans le fait que le fonctionnement de la machine nécessite une alimentation pentaphasée, et que son stator est constitué de cinq enroulements. Cette augmentation du nombre de phases contribue à augmenter sa densité d'énergie. Elle présente également d'autres avantages telle que la capacité de démarrer et de fonctionner même dans le cas d'ouverture d'une ou de deux phases statoriques, la diminution des courants par phase sans augmentation de la tension et l'amélioration de la fiabilité [8].

2.5.1 Types de couplage de la machine asynchrone pentaphasée

Le couplage des enroulements statoriques permet de faire fonctionner la machine asynchrone à la tension assignée. Pour trouver le nombre de couplages possibles, pour une machine asynchrone à n- phases, on applique la relation suivante: $\frac{N+1}{2}$, N est le nombre de phases. Pour la machine pentaphasée trois alternatives de connexions au stator sont possibles, à savoir:

- Couplage étoile des enroulements, Fig.1: Les tensions de phase de la machine pour un enroulement statorique connecté en étoile sont données directement comme suit :

$$U_1 = U_{01}$$

$$U_2 = U_{02}$$

$$U_3 = U_{03}$$

$$U_4 = U_{04}$$

$$U_5 = U_{05}$$

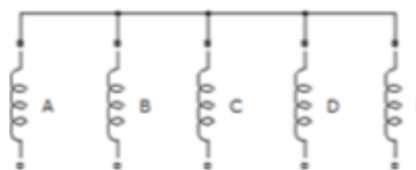


Figure 2-1: couplage étoile

- Couplage des enroulements en pentagone: Les tensions de phase de l'enroulement statorique connecté en pentagone sont données par la différence entre les tensions de deux phases d'alimentation adjacentes comme suit, [7]:

$$U_1 = U_{02} - U_{01}$$

$$U_2 = U_{03} - U_{02}$$

$$U_3 = U_{04} - U_{03}$$

$$U_4 = U_{05} - U_{04}$$

$$U_5 = U_{01} - U_{05}$$

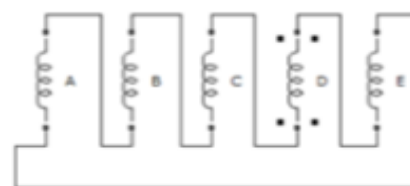


Figure 2-2 : couplage pentagone

Couplage des enroulements en pentacle : Les tensions de phase de la machine pour un enroulement statorique connecté en pentacle sont données par une différence entre les tensions de deux phases d'alimentation non adjacentes comme suit [10]

$$U_1 = U_{03} - U_{01}$$

$$U_2 = U_{05} - U_{03}$$

$$U_3 = U_{02} - U_{05}$$

$$U_4 = U_{04} - U_{02}$$

$$U_5 = U_{01} - U_{04}$$

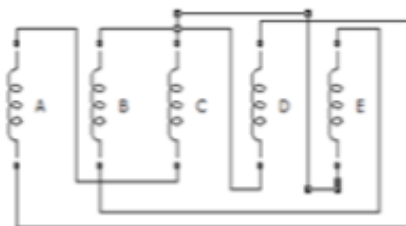


Figure 2-3: couplage pentacle

2.5.2 Séquence 3 dans une machine asynchrone pentaphasée

Dans les conditions de fonctionnement en marche dégradée, les composantes de la séquence 3 apparaissent. En effet, pour un bobinage concentrique et à une seule couche, si la distribution du flux fondamental à $2p$ -pôles, la distribution du flux correspondant à une séquence non fondamentale k aurait $2kp$ -pôles. Par exemple: dans une machine pentaphasée à deux pôles, la séquence 3 produira une distribution du flux dans l'entrefer à 6 pôles. Cette séquence se comporte comme une séquence 1 équivalente et offre la possibilité d'élaborer une structure de contrôle plus stable, [11].

L'isolation de séquence 3 est réalisée par un couplage spécifique des phases statoriques ainsi que le transformateur pentaphasé au secondaire, comme illustré à la Figure 1.4.

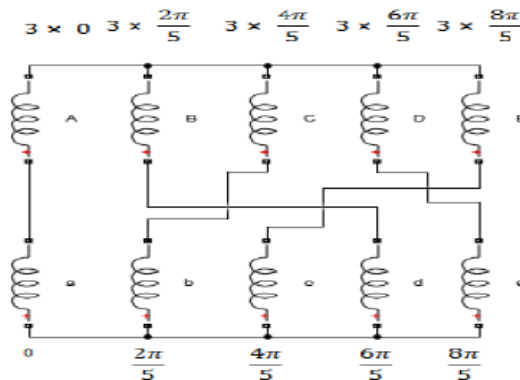


Figure 2-4 :couplage des phases statoriques avec le transformateur pentaphasée au secondaire pour l'isolation de la séquence 3

2.5.3 Injection de l'harmonique 3 dans une machine asynchrone pentaphasée

L'une des caractéristiques des machines asynchrones polyphasées avec un nombre de phase impair (m) est la capacité d'améliorer la densité de couple ainsi que la densité de puissance grâce à l'utilisation de l'harmonique fondamental du champ et des harmoniques d'ordre supérieur (inférieure à m). Elle est modélisée par $\frac{m-1}{2}$ séquences [10], Pour les machines pentaphasées l'amélioration de la densité de couple est permise grâce à l'injection du troisième harmonique, ce dernier n'entre pas en interaction avec l'harmonique fondamental dans l'espace et dans le temps. Un rapport approprié entre la composante fondamentale du courant magnétisant et celle du troisième harmonique injecté, se traduit par une densité de flux quasi-rectangulaire sans dépasser le niveau de la saturation :

$$i_{qs3} = \frac{1}{6} \frac{L_{m1}}{L_{m3}} \frac{L_{r3}}{L_{r1}} \frac{R_{r1}}{R_{r3}} i_{qs1}$$

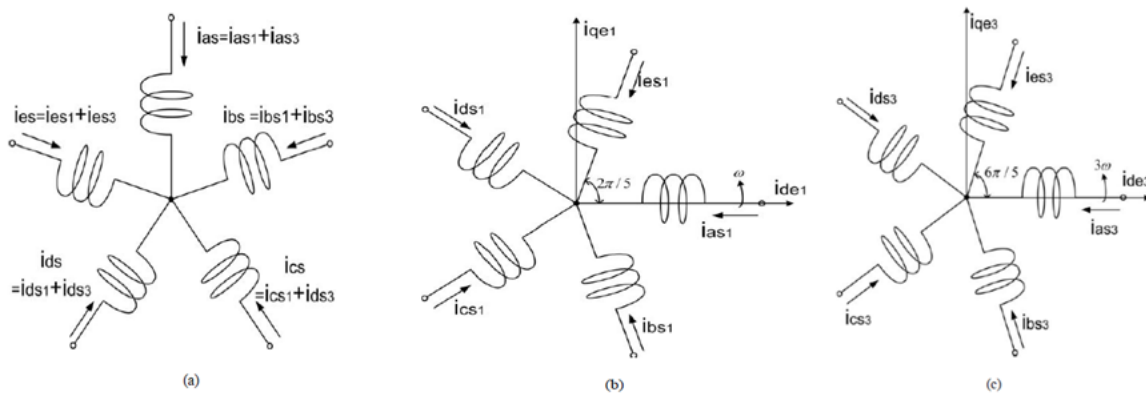
$$i_{ds3} = \frac{1}{6} \frac{L_{m1}}{L_{m3}} i_{ds1}$$

A cet effet, une distribution quasi uniforme du flux est obtenue dans l'entrefer, réduisant ainsi la saturation locale des dents, ce qui améliore l'efficacité [13-14].

2.6 Modélisation de la machine asynchrone pentaphasée

La machine asynchrone pentaphasée, constituée de cinq enroulements statoriques déphasés de $v = \frac{2\pi}{5}$ dans l'espace et un enroulement rotorique à cage d'écurueil qui peut être représenté 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 similaire. 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 1.5 [14].



Composantes globales de la machine

Composantes de la séquence 1

Composantes de la séquence 3

Figure 2-5 :Modèle de la machine pentaphasée avec les composantes et des séquences 1 et 3

2.6.1 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

2.6.2 Modélisation dans le référentiel pentaphasé

A/ Équations des tensions statoriques

$$[v_s] = [R_s] [i_s] + \frac{d}{dt} [\phi_s] \quad (1.1)$$

$$\text{Tel que } [v_s] = [v_{sa} v_{sb} v_{sc} v_{sd} v_{se}] \quad (1.2a)$$

$$[i_s] = [i_{sa} i_{sb} i_{sc} i_{sd} i_{se}] \quad (1.2b)$$

$$[R_s] = R_s [I_5] \quad (1.2c)$$

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

B/ Équations des tensions rotoriques

Les enroulements rotoriques sont court-circuités, donc :

$$[v_r] = [0] = [R_r] [i_r] + \frac{d}{dt} [\phi_r] \quad (1.3)$$

$$\text{Tel que } [v_r] = [v_{ra} v_{rb} v_{rc} v_{rd} v_{re}] \quad (1.4a)$$

$$[i_s] = [i_{ra} i_{rb} i_{rc} i_{rd} i_{re}] \quad (1.4b)$$

$$[R_r] = R_r [I_5] \quad (1.4c)$$

C/ Expressions des flux et des inductances

$$[\phi_s] = [L_{ss}] I_s + [M_{sr}] I_r \quad (1.5)$$

$$[\phi_r] = [L_{rr}] I_r + [M_{sr}] I_s \quad (1.6)$$

Avec $[L_{ss}] = L_s [I_5] + L_m [A(v)]$

$$[L_{rr}] = L_r [I_5] + L_m [A(v)]$$

et,

L_{ss} et L_{rr} sont respectivement les matrices statoriques et rotoriques

M_{sr} est la matrice des inductances mutuelles entre le stator et le rotor.

La matrice A est exprimée par :

$$[A(v)] = \begin{bmatrix} 1 & \cos(v) & \cos(2v) & \cos(3v) & \cos(4v) \\ \cos(4v) & 1 & \cos(v) & \cos(2v) & \cos(3v) \\ \cos(3v) & \cos(4v) & 1 & \cos(v) & \cos(2v) \\ \cos(2v) & \cos(3v) & \cos(4v) & 1 & \cos(v) \\ \cos(v) & \cos(2v) & \cos(3v) & \cos(4v) & 1 \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

La matrice M_{sr} est exprimée par :

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} 1 & \cos(\theta_r + v) & \cos(\theta_r + 2v) & \cos(\theta_r + 3v) & \cos(\theta_r + 4v) \\ \cos(\theta_r + 4v) & 1 & \cos(\theta_r + v) & \cos(\theta_r + 2v) & \cos(\theta_r + 3v) \\ \cos(\theta_r + 3v) & \cos(\theta_r + 4v) & 1 & \cos(\theta_r + v) & \cos(\theta_r + 2v) \\ \cos(\theta_r + 2v) & \cos(\theta_r + 3v) & \cos(\theta_r + 4v) & 1 & \cos(\theta_r + v) \\ \cos(\theta_r + v) & \cos(\theta_r + 2v) & \cos(\theta_r + 3v) & \cos(\theta_r + 4v) & 1 \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

Avec $v = \frac{2\pi}{5}$

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

$$[v_s] = [R_s] [i_s] + [L_{ss}] \frac{d}{dt} [I_s] + \frac{d}{dt} ([M_{sr}] [I_r]) \quad (1.9a)$$

$$[v_r] = [R_r] [i_r] + [L_{rr}] \frac{d}{dt} [I_r] + \frac{d}{dt} ([M_{sr}] [I_s]) \quad (1.9b)$$

D/ Équation mécanique

Elle s'exprime par :

$$j \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_r - f\Omega \quad (1.10)$$

Tel que :

J: Moment d'inertie de la machine (Kg.m²)

C_r: Couple résistant (couple de charge)

Ω : Vitesse angulaire de rotation

f: Coefficient de frottements visqueux

C_e : Couple électromagnétique fourni par la machine et qui est obtenu par la dérivée de la Co-énergie:

$$C_e = \frac{p}{2} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix}^t \frac{d}{d\vartheta} \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{sr}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

Les matrices [L_{ss}] et [L_{rr}] sont indépendantes de la position

$$\text{Donc } \frac{d[L_{ss}]}{d\vartheta} = \frac{d[L_{rr}]}{d\vartheta} = 0$$

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

$$[i_s]^t \frac{d[M_{sr}]}{d\vartheta} [I_r] = [i_r]^t \frac{d[M_{sr}]^t}{d\vartheta} [I_s] \quad (1.12)$$

Ce qui donne :

$$C_e = p [i_s]^t \frac{d[M_{sr}]}{d\vartheta} [I_r] \quad (1.13)$$

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

Le modèle de la machine asynchrone pentaphasée élaboré précédemment varie avec le temps. Il conduit à la complexité lors de la résolution des équations différentielles. Une transformation est appliquée afin de réduire l'enroulement polyphasé à un ensemble d'enroulements biphasés(d-q) qui sont en quadrature l'un par rapport à l'autre, à savoir : la transformation de Park, en prenant en considération les paramètres du troisième harmonique .

On choisit un référentiel lié au champ tournant et en appliquant la transformation de Park aux équations des tensions, et aux équations de flux, on obtient :

$$F_{d1 q1 d3 q3 0} = P(\theta) F_{abcde} \quad (1.14)$$

Avec :

$$P(\theta) = \frac{2}{5} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \nu) & \cos(\theta - 2\nu) & \cos(\theta - 3\nu) & \cos(\theta - 4\nu) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \nu) & \sin(\theta - 2\nu) & \sin(\theta - 3\nu) & \sin(\theta - 4\nu) \\ \cos(3\theta) & \cos(3\theta - 3\nu) & \cos(3\theta - 6\nu) & \cos(3\theta - 9\nu) & \cos(3\theta - 12\nu) \\ \sin(3\theta) & \sin(3\theta - 3\nu) & \sin(3\theta - 6\nu) & \sin(3\theta - 9\nu) & \sin(3\theta - 12\nu) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

1- Équations en Tension :

Au Stator :

Séquence k = 1 ,3

$$\begin{cases} v_{ds_k} = R_s I_{ds_k} + \frac{d}{dt} \phi_{ds_k} - k \omega_e \phi_{qs_k} \\ v_{qs_k} = R_s I_{qs_k} + \frac{d}{dt} \phi_{qs_k} + k \omega_e \phi_{ds_k} \end{cases} \quad (1.16)$$

Au rotor :

Séquence k=1,3

$$\begin{cases} 0 = R_r I_{dr_k} + \frac{d}{dt} \phi_{dr_k} - k(\omega_e - \omega_r) \phi_{qr_k} \\ 0 = R_r I_{qr_k} + \frac{d}{dt} \phi_{qr_k} + k(\omega_e - \omega_r) \phi_{dr_k} \end{cases} \quad (1.17)$$

Expressions des flux :

Au stator :

Séquence k=1,3

$$\begin{cases} \phi_{sd_k} = L_{s_1} I_{ds_k} + K L_{m_k} I_{dr} \\ \phi_{sq_k} = L_{s_1} I_{qs_k} + K L_{m_k} I_{qr} \end{cases} \quad (1.18)$$

Au rotor :

Séquence k=1,3

$$\begin{cases} \phi_{rd_k} = L_r I_{dr_k} + K L_{m_k} I_{ds} \\ \phi_{rq_k} = L_r I_{qr_k} + K L_{m_k} I_{qs} \end{cases} \quad (1.19)$$

Avec $L_s = L_m + L_{ls}$

$L_r = L_m + L_{lr}$

2- Expression du couple électromagnétique :

Le couple électromagnétique pour les séquences k= 1 et 3 est :

$$C_{ek} = p(\phi_{sd_k} I_{qs_k} - \phi_{sq_k} I_{ds_k}) = k p M_k (I_{dr_k} I_{qs_k} + I_{qr_k} I_{ds_k}) \quad (1.20)$$

Avec : $M_k = \frac{5 l_{mk}}{2}$

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons effectué une présentation générale de la machine asynchrone polyphasée où le nombre de phases est supérieur à trois. Ensuite, nous nous sommes surtout intéressés à l'étude de la machine asynchrone pentaphasée. Nous avons, pour cela, présenté le modèle mathématique général de la machine asynchrone pentaphasée dans le référentiel pentaphasée ainsi que dans celui de Park afin de réduire le modèle. Ce modèle servira à la simulation des performances dynamiques de la machine asynchrone pentaphasée. Les résultats théoriques, ainsi obtenus, seront présentés dans le chapitre suivant.

Chapitre 2

Simulation de la machine Asynchrone pentaphasée en fonctionnement sain et pour différents défauts au Stator

3.1 Introduction

Les progrès réalisés en matière d'électronique de puissance, de circuits de commande et en automatique ont contribué à l'utilisation grandissante des machines asynchrones dans les systèmes d'entraînements électriques à vitesse variable. Le recours aux machines asynchrones est surtout lié à leur robustesse, leur puissance massique et à leur coût de fabrication. Leur maintenance et leur surveillance permettent de rentabiliser les installations. Il est donc important de développer des outils de diagnostic pour détecter de manière précoce les défauts pouvant apparaître dans ces machines

Ce chapitre est dédié à l'exploitation du modèle de la machine asynchrone pentaphasée par la simulation numérique dans l'environnement MATLAB/SIMULINK pour différentes conditions de fonctionnement, à l'état sain et défectueux. Dans notre travail, nous nous intéressons aux défaillances électriques relatives à l'alimentation.

Nous nous proposons d'étudier le diagnostic de défauts de la machine asynchrone pentaphasée à cage d'écurie alimentée par un transformateur asymétrique pentaphasée avec défaut d'ouverture d'une, de deux ou de trois phases adjacentes et non-adjacentes pour différents couplages. Finalement, nous présentons les différentes caractéristiques munies d'explications. Nous appliquons la technique d'analyse spectrale (FFT) pour le courant statorique en fonctionnement sain et avec défauts.

3.2 Simulation sous environnement Matlab/Simulink

L'utilisation de la machine asynchrone pentaphasée dans une application quelconque requiert une bonne connaissance du modèle de la machine. La simulation représente alors une excellente méthode qui Permet d'étudier le comportement ainsi que la conception d'une application employant ce type de machine.

A cet effet, et en se basant sur le modèle mathématique élaboré précédemment (chap.1), nous avons implémenté le schéma de simulation sous l'environnement Matlab/Simulink de la machine pentaphasée.

3.3 Présentation de l'environnement Matlab/Simulink

Matlab est un logiciel de calcul matriciel à syntaxe simple. Avec ses fonctions spécialisées, Il peut également être considéré comme un langage de programmation adapté pour les problèmes scientifiques.

Simulink représente l'extension graphique de Matlab permettant de représenter les fonctions mathématiques et les systèmes sous forme de diagramme en blocs, et de simuler le fonctionnement de ces systèmes [15]. La Figure 2.6 donne une schématisation de l'environnement Matlab :

- Fenêtre Commande : Retourne les résultats aux instructions.
- Fenêtres Graphique : Tracés des graphiques Matlab.
- Fichiers M : Programmes en langage Matlab.
- Toolboxes : Collections de fichiers M développés pour des domaines d'application spécifiques (Signal Processing Toolbox, System Identification Toolbox,Control System Toolbox, u-Synthesis and Analysis Toolbox, Robust Control Toolbox, Optimization Toolbox,Neural Network Toolbox, Spline Toolbox, Chemometrics Toolbox, Fuzzy Logic Toolbox, etc.)
- Blocksets : Collections de blocs Simulink développés pour des domaines d'application spécifiques (DSP Blockset, Power System Blockset, etc.).

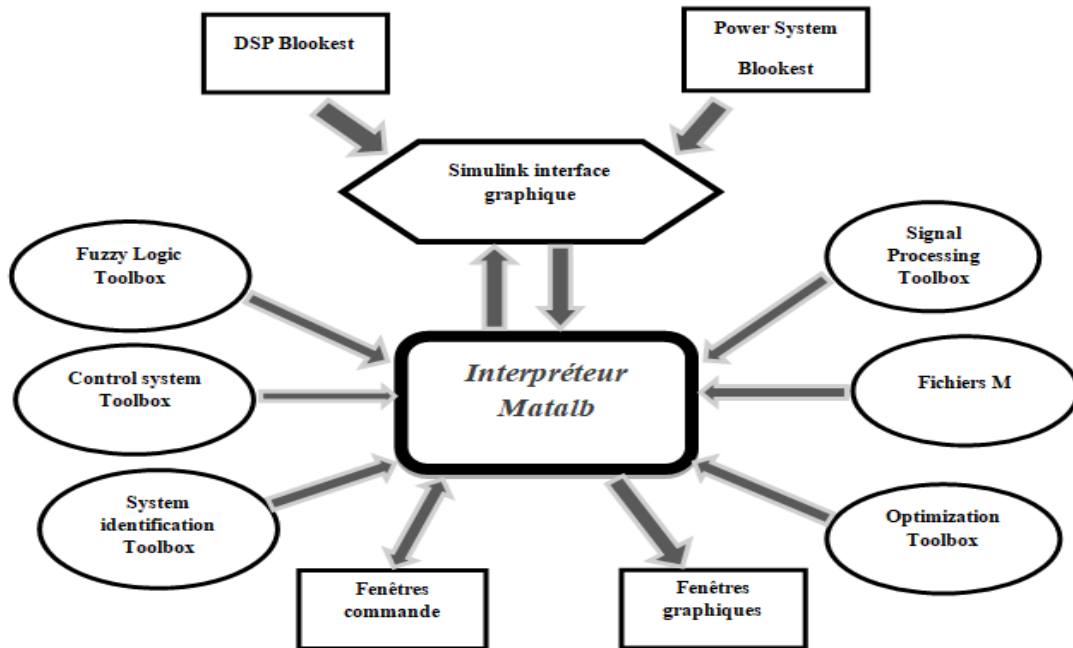


Fig3-1 : Schéma de l'environnement Matlab

3.4 Paramètre de la machine étudiée

Le Tableau 2-1 ci-dessus contient les paramètres de la machine qui sont introduits dans le modèle de celle-ci.

$R_s(\Omega)$	$L_{s1}(H)$	$L_{ls1}(H)$	$L_{m1}(H)$	$R_{r1}(\Omega)$	$L_{r1}(H)$	$l_{r1}(H)$	$f_r(N.m.rad/s)$	$J(Kg.m^2)$
1.53	0.2849	0.0067	0.2782	0.896	0.2849	0.0067	0.0065	0.08
$R_s(\Omega)$	$L_{s3}(H)$	$L_{ls3}(H)$	$L_{m3}(H)$	$R_{r3}(\Omega)$	$L_{r3}(H)$	$l_{r3}(H)$	$f_r(N.m.rad/s)$	$J(Kg.m^2)$
1.53	0.0294	0.0048	0.0246	0.033	0.0294	0.0048	0.0065	0.08

Tableau 2-3-1: Paramètres identifiés de la machine asynchrone pentaphasée [16]

3.5 Schéma bloc du model dans l'environnement Matlab Simulink

La vue d'ensemble du modèle dynamique de la machine à induction dans l'environnement Matlab Simulink est représentée sur la Fig.2.2 :

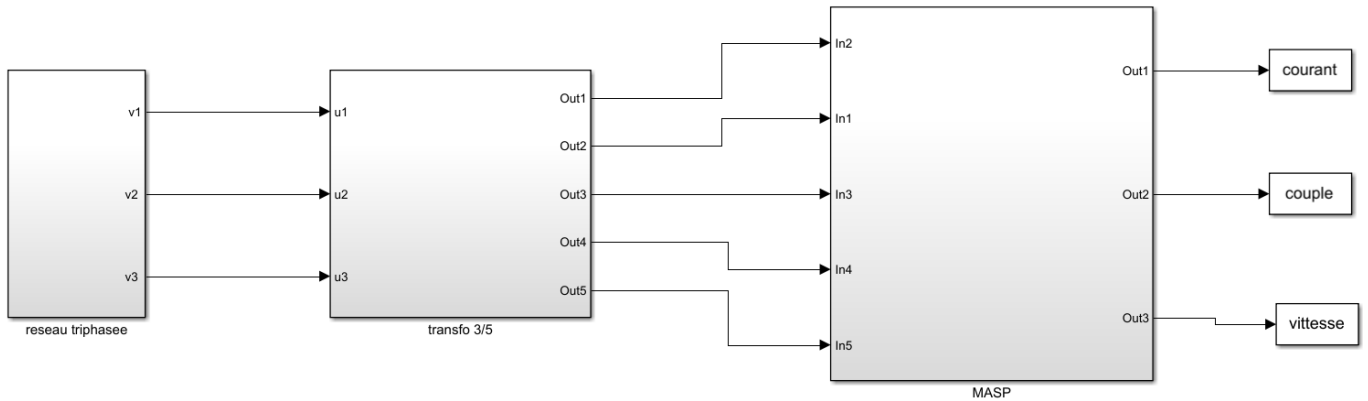


Fig.2-3-2 : Schéma de simulation de la machine asynchrone pentaphasée alimentée par transformateur asymétrique pentaphasé

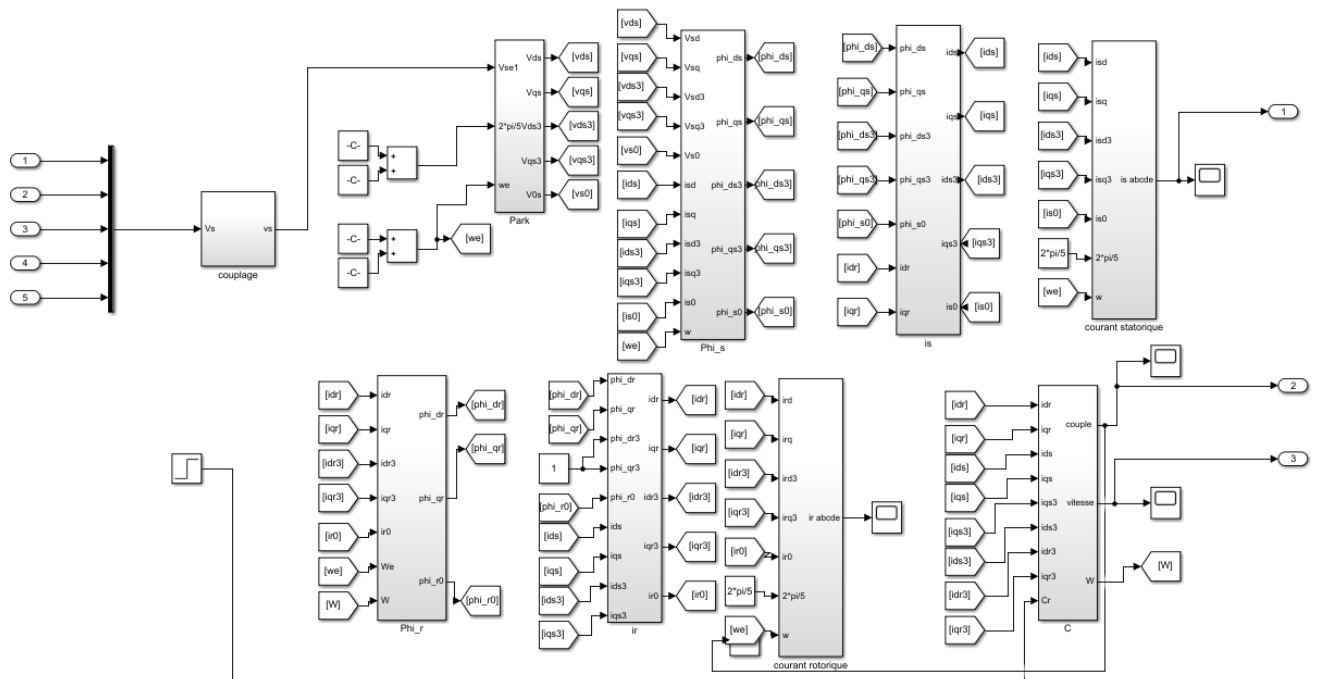


Fig.2-3-3: Sous-système du schéma bloc de simulation de la machine asynchrone pentaphasée

Le schéma bloc du modèle de moteur est composé de quatre blocs répartis de gauche à droite, Fig.2.3 :

- 1) Bloc d'alimentation en énergie électrique : La tension appliquée est de 220 V pour toutes les connexions (Alimentation triphasée équilibrée) et la machine démarre sans charge (à vide).
- 2) Transformateur triphasé au primaire pentaphasé au secondaire.
- 3) Modèle du moteur à induction composé des modules de séquence q, d et 0, qui sont les composantes de base pour le calcul des liaisons de flux, des courants et des courants dans un référentiel qd0.
- 4) Les variables de sortie (vitesse, couple et courants)

3.6 Fonctionnement sain

Nous lançons la simulation par le fonctionnement sain de la machine asynchrone pentaphasée. Nous alimentons la machine avec une tension simple pentaphasée $V= 220V$ jusqu'à atteindre le régime permanent, nous relevons les signaux expérimentaux.

3.6.1 Séquence 1

Afin de valider le modèle de la séquence 1, une simulation du fonctionnement sain pour différentes connexion a permis d'obtenir les résultats suivants :

3.6.1.1 Configuration étoile

Après modélisation de la machine asynchrone pentaphasée en configuration étoile on simule les performances dynamiques de la machine en fonctionnement sain.

Les résultats expérimentaux observés lors du démarrage de la machine pentaphasée à vide sont montrés sur les Figs. 2.4 à 2.6 :

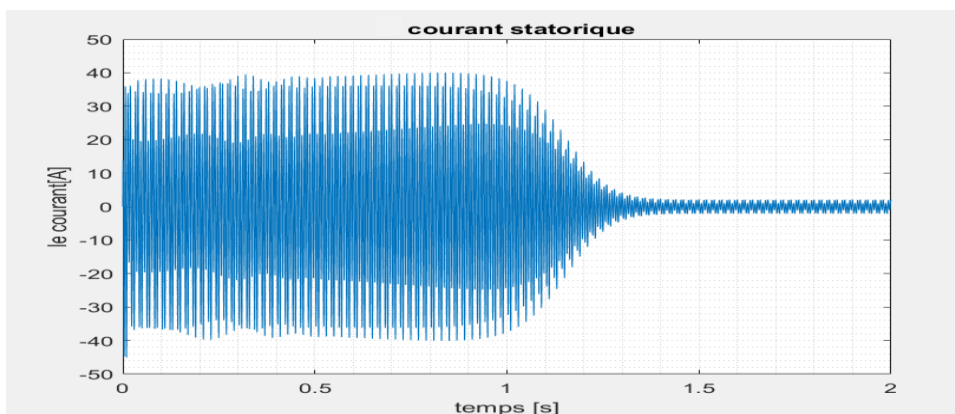


Fig.2-3-4: Courants des phases statoriques de la MASP-C Etoile

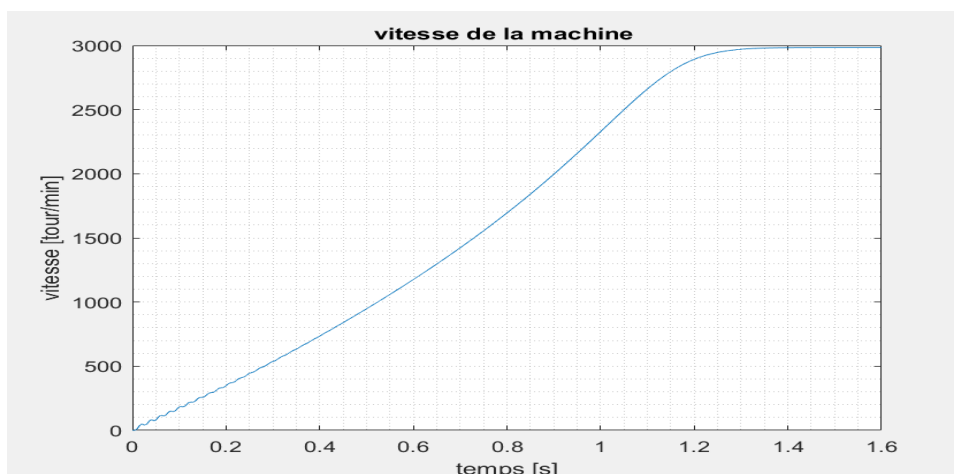


Fig.3-5: Vitesse de rotation de la MASP -C Etoile

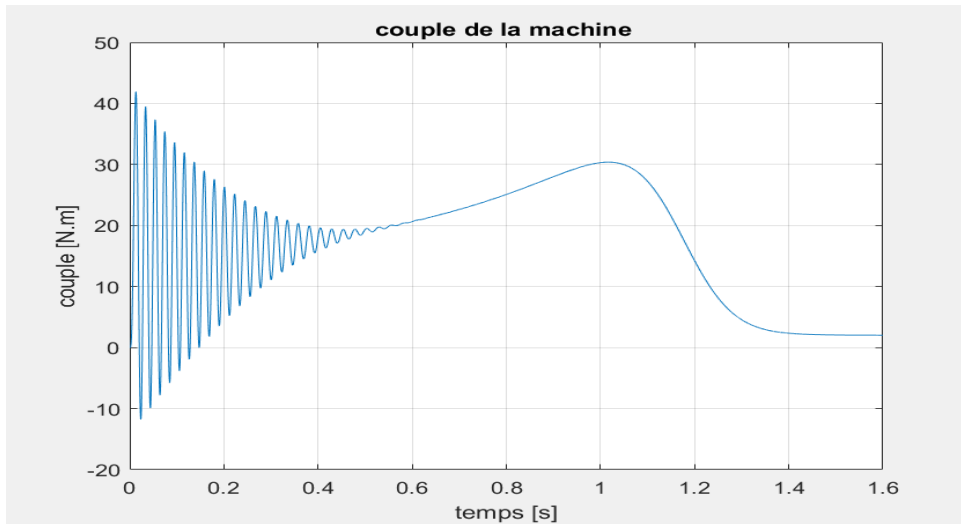


Fig.3-6:Couple électromagnétique de la MASP -C Etoile

3.6.1.2 Configuration pentagone

Après modélisation de la machine asynchrone pentaphasée en configuration pentagone, on procède de la même façon que précédemment en simulant les performances dynamiques de la machine en fonctionnement sain. Les Figs.2.7 à 2.9 sont présentées comme suit :

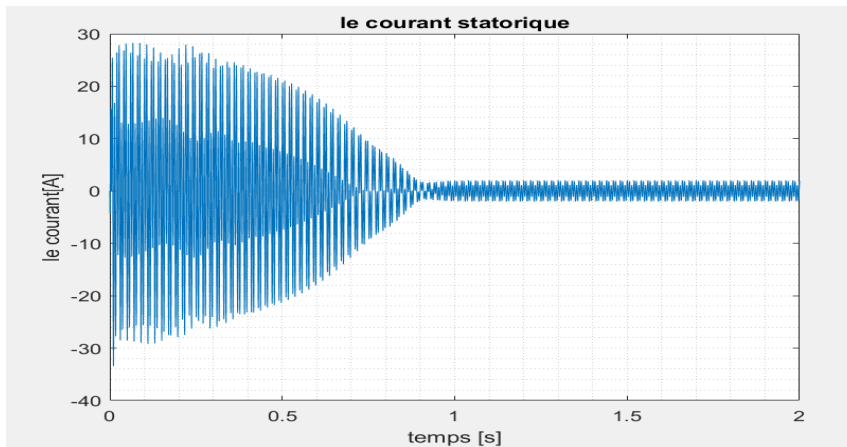


Fig.3-7:Courants des phases statoriques de la MASP-C pentagone

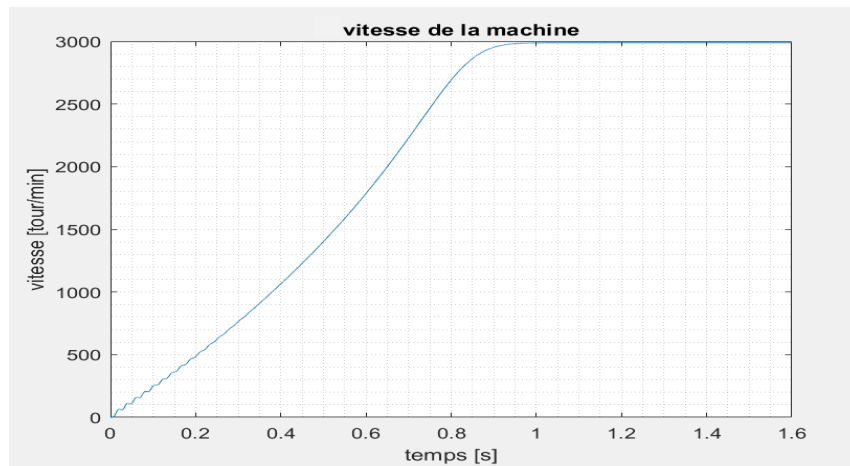


Fig.3-8:Vitesse de rotation de la MASP -C pentagone

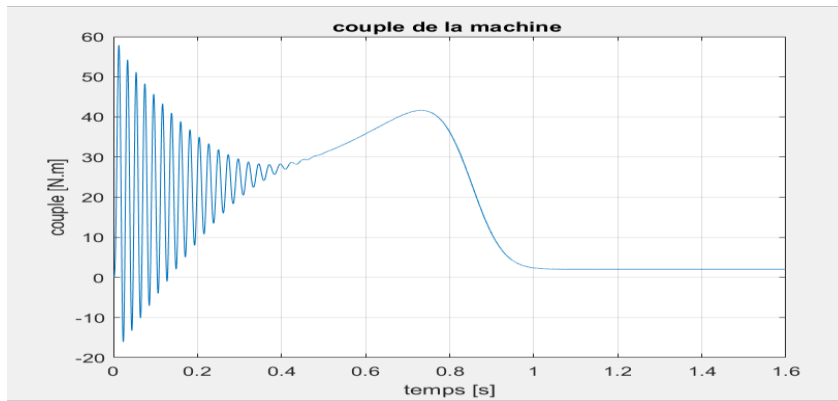


Fig.3-9:Couple électromagnétique de la MASP -C pentagone

3.6.1.3 Configuration pentacle

Après modélisation de la machine asynchrone pentaphasée en configuration pentacle on simule les performances dynamiques de la machine en régime sain. Les Figs. 2-10 à 2-12 représentent respectivement le courant stator, la vitesse et le couple.

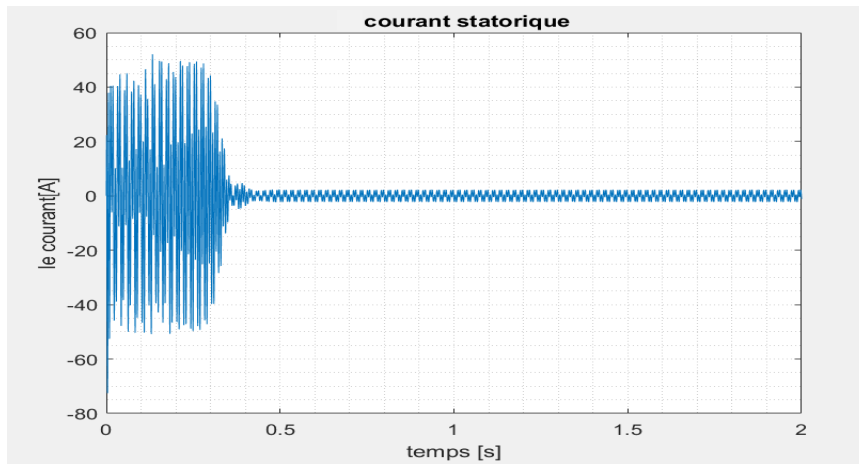


Fig.3-10:Courants des phases statoriques de la MASP-C pentacle

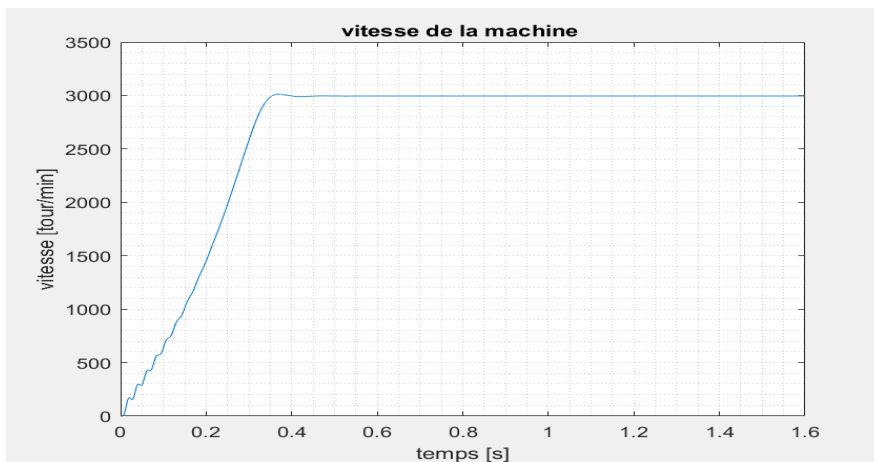


Fig.2-3-11:Vitesse de rotation de la MASP -C pentacle

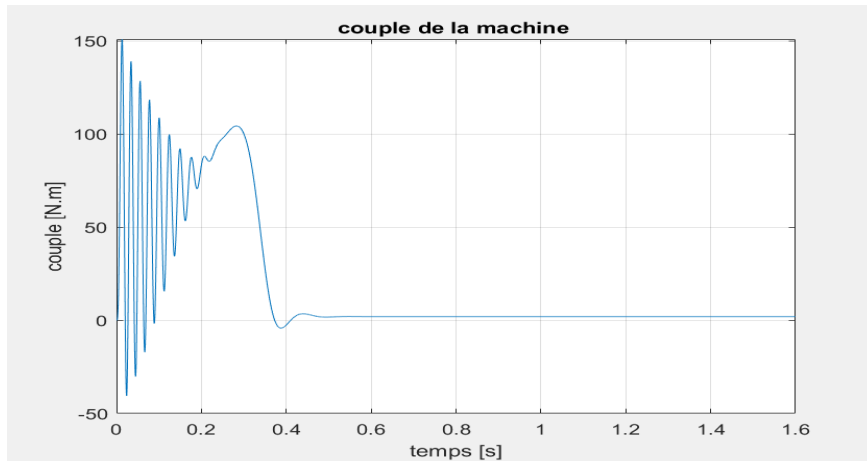


Fig.3-12:Couple électromagnétique de la MASP -C pentacle

Le courant, aux premiers instants de démarrage, présente des pulsations très importantes dues au régime transitoire qui atteint la valeur de 18A, 23A, 35A (soit 7 fois la valeur nominale) pour respectivement les couplages étoile, pentagone et pentacle. Ce sont des courants de démarrage, pour vaincre l'inertie du rotor. Dès que le couple atteint son régime permanent, il se stabilise à une valeur de 4A.

D'autre part, la vitesse atteint une valeur maximale très proche du synchronisme 3000 tr/ min. Pendant le régime transitoire et pour le couplage étoile la vitesse atteint les 3000 tour/mn au bout de 1,3 secondes. Ce qui n'est pas le cas des deux autres couplages, à savoir le pentacle et le pentagone dont les vitesses en régime permanent sont respectivement atteintes au bout de 0,4 seconde pour le couplage pentacle et 0,9 seconde pour le couplage pentagone.

Ainsi, on observe que la densité du couple électromagnétique est plus importante pour le couplage pentacle, comparée à celles des deux autres couplages. De fortes oscillations du couple de démarrage tendent à s'annuler lorsqu'elles se rapprochent du régime permanent. Ce qui s'explique par l'absence du couple résistant (fonctionnement à vide).

3.6.2 Séquence 3

Afin de valider le modèle de la séquence 3, une simulation du fonctionnement en régime sain. Ce qui permet d'obtenir pour différents cas, les résultats présentés dans les Fig.2-13 à 2-15 :

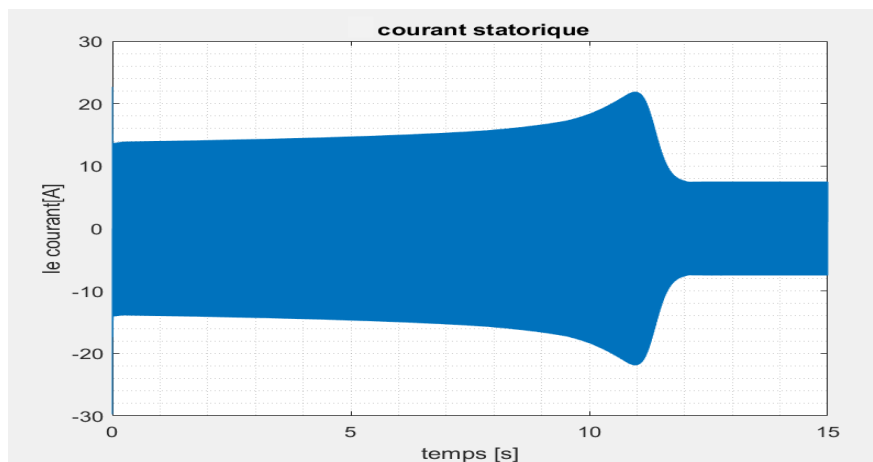


Fig.3-13:Courants des phases statoriques de la MASP à vide dû à la séquence 3

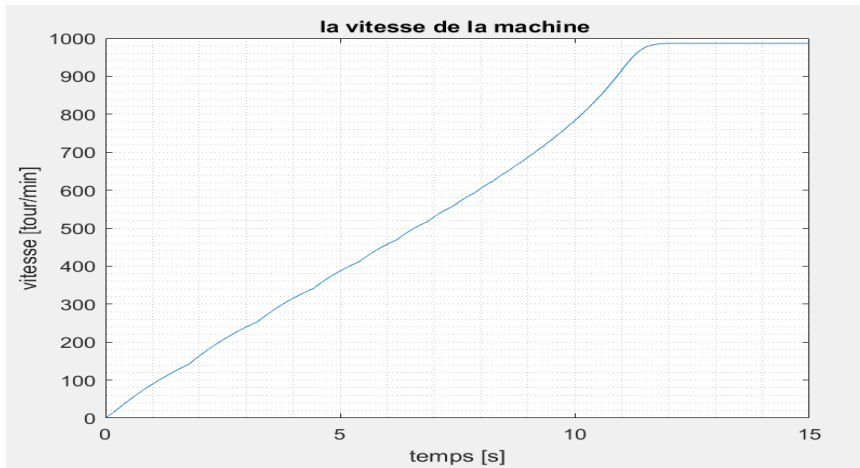


Fig.3-14:Vitesse de rotation de la MASP à vide dû à la séquence 3

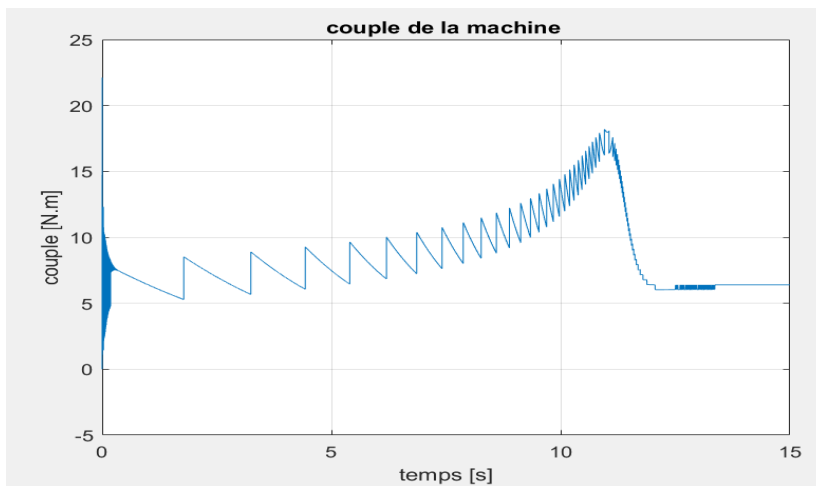


Fig.3-15:Couple électromagnétique de la MASP à vide dû à la séquence 3

Le régime transitoire de la machine dû à la séquence 3 (environ 12s) est 3 fois plus important que le régime transitoire relatif à la séquence 1.

La phase de démarrage se caractérise par un fort appel de courant, ce dernier atteint un pic de 22 A. L'amplitude du courant diminue par la suite une fois que le régime établi est atteint. Durant cette deuxième phase le courant à vide de la machine possède une valeur maximale de 7 A qui est très élevée comparée à celle de la séquence 1.

L'évolution temporelle du couple électromagnétique permet de constater que la séquence 3 possède une composante du couple importante durant le régime transitoire, puis prend des valeurs faibles une fois que le régime établi est atteint.

La composante relative due à la séquence 3 de la vitesse de rotation du moteur asynchrone augmente durant le transitoire jusqu'à atteindre une valeur proche de 1000tr/min marquant par-là le début du régime établi. Cette valeur de vitesse représente 1/3 de la vitesse de rotation à vide relative à la séquence 1. Ce qui montre que si la distribution du flux de la séquence 1 est à 2p pôles, la distribution du flux correspondant à la séquence 3 est à $3 \cdot 2p$ pôles.

3.7 Fonctionnement de la MASP avec défauts

Nous présentons dans cette partie le fonctionnement de la machine asynchrone pentaphasée en présence des défauts.

3.7.1 Ouverture d'une phase au stator

Nous alimentons la machine par le réseau triphasé via un transformateur triphasé/pentaphasée avec une tension simple pentaphasée $V = 220V$, et nous faisons fonctionner la machine jusqu'à atteindre le régime permanent puis on ouvre une phase au stator. On relève les courants au stator, la vitesse de la machine ainsi que son couple électromagnétique.

3.7.1.1 Couplage étoile

Les Figures 2-16 à 2-18 représentent le courant statorique, la vitesse et le couple électromagnétique de la machine pour une connexion étoile du stator.

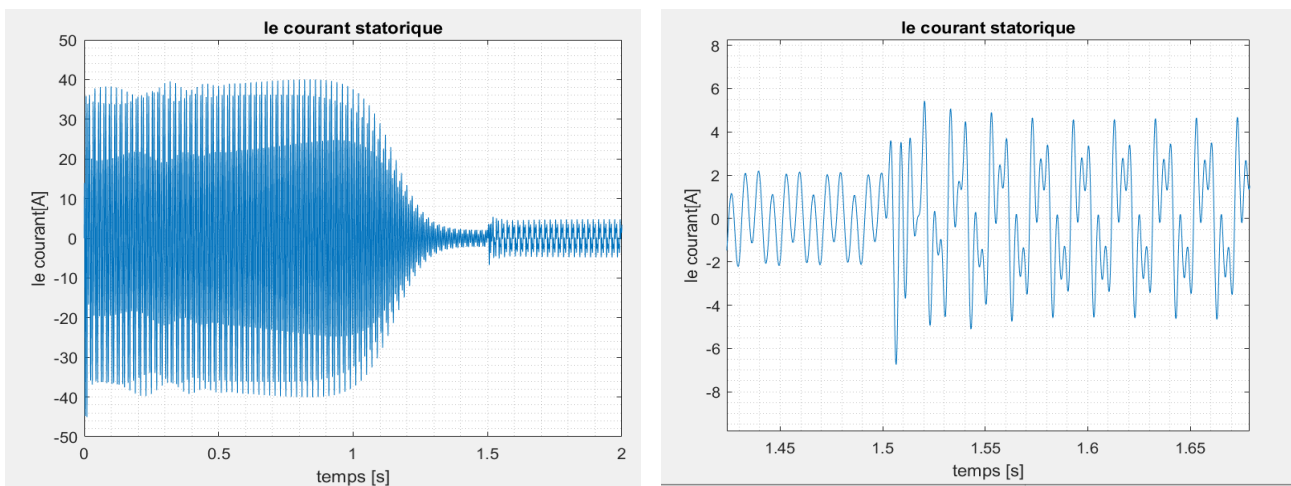


Fig.2-3-16: Courants statoriques après ouverture d'une phase au stator C-Etoile

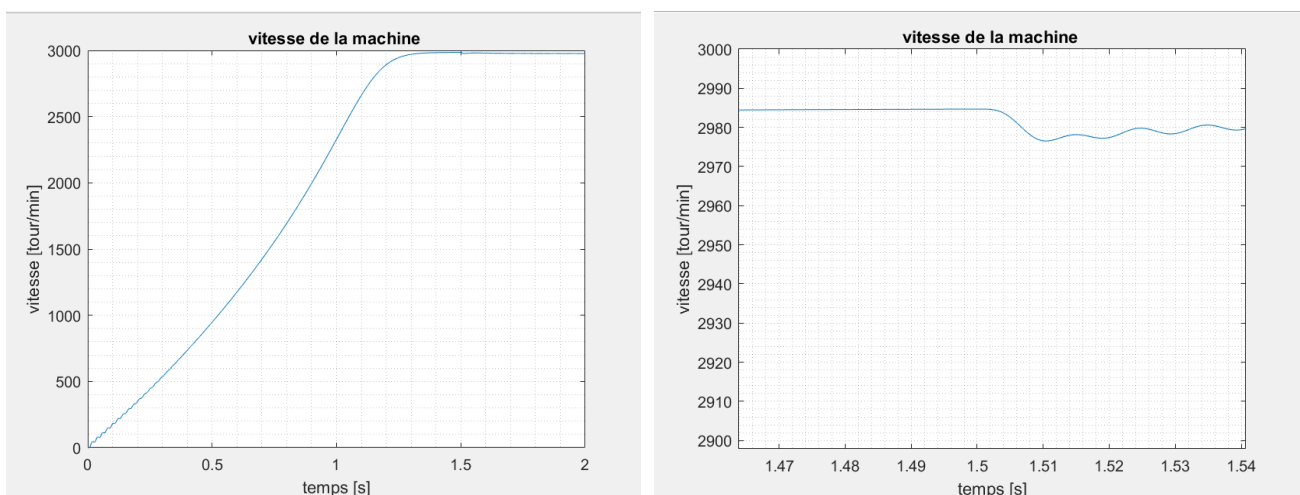


Fig.3-17: Vitesse de la machine après ouverture d'une phase au stator C-Etoile

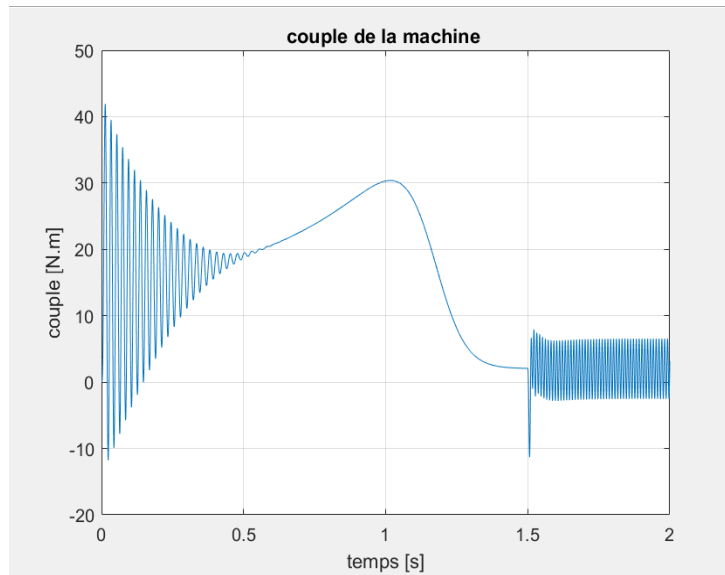


Fig.3-18:Couple de la machine après ouverture d'une phase au stator C-Etoile

3.7.1.2 *Couplage pentagone* Les Figures 2-19 à 2-21 représentent le courant statorique, la vitesse et le couple électromagnétique de la machine pour une connexion pentagone du stator.

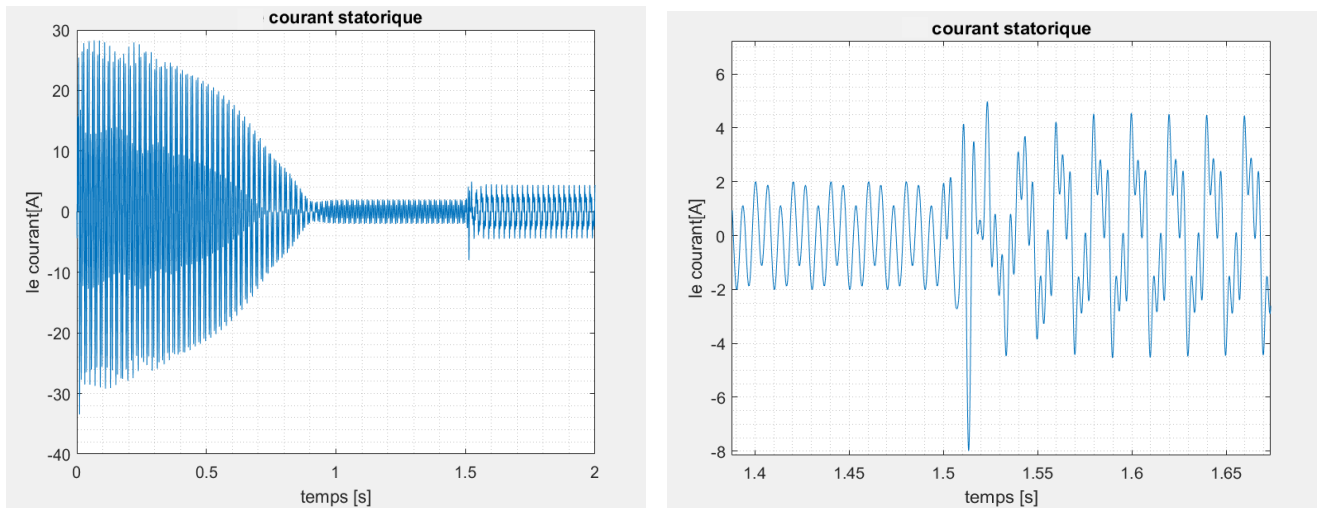


Fig.3-19:Courants statoriques après ouverture d'une phase au stator C-pentagone

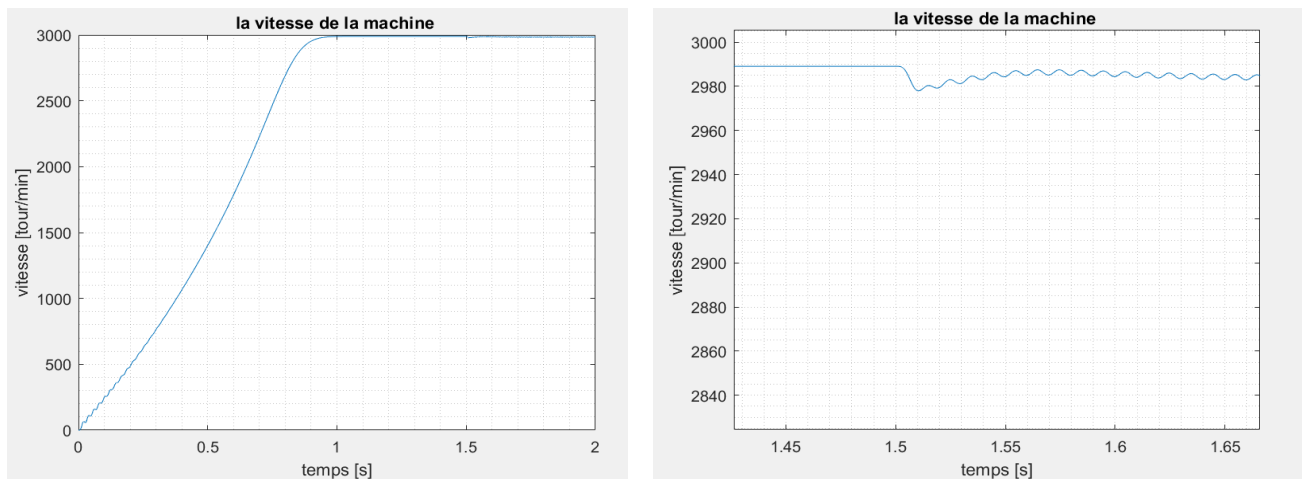


Fig.3-20: Vitesse de la machine après ouverture d'une phase au stator C- pentagone

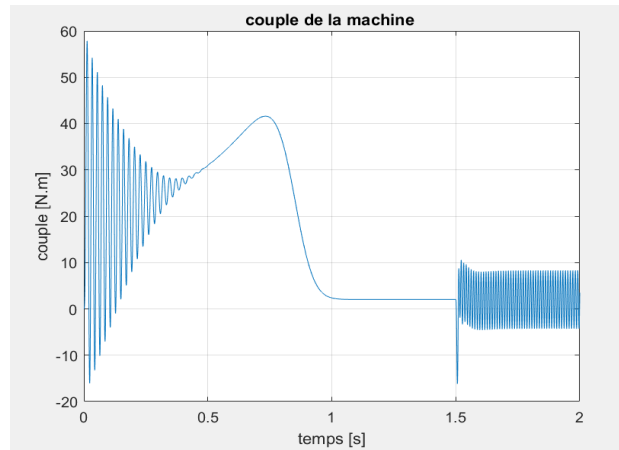


Fig.3-21:Couple de la machine après ouverture d'une phase au stator C-pentagone

3.7.1.3 Couplage pentacle

Les Figures 2-22 à 2-24 représentent le courant statorique, la vitesse et le couple électromagnétique de la machine pour une connexion pentacle du stator.

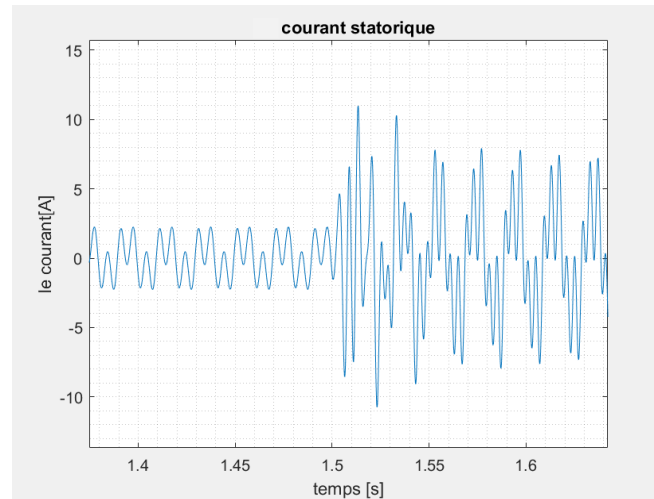
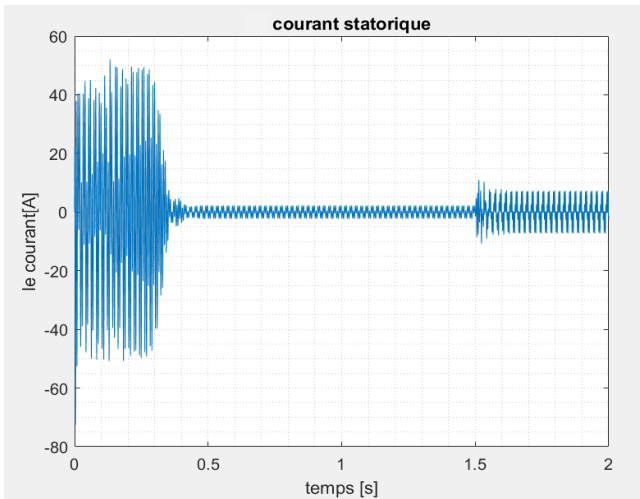


Fig3-22:Courants statoriques après ouverture d'une phase au stator C -pentacle

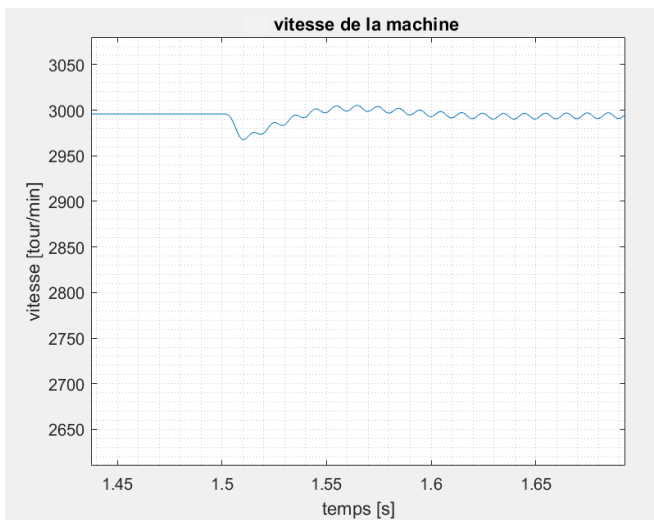
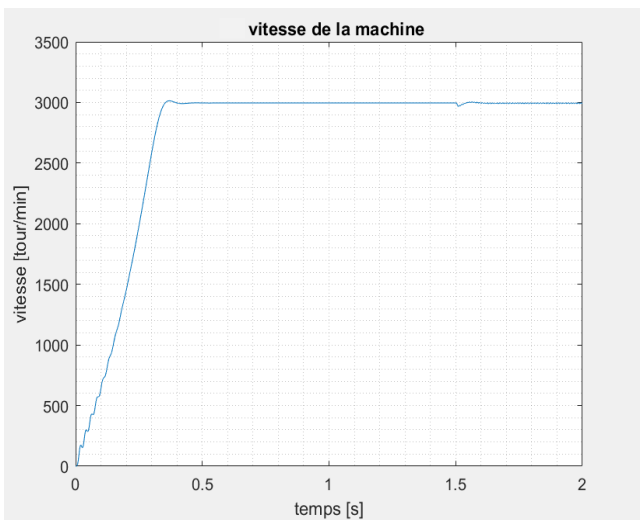


Fig3-23:vitesse de la machine après ouverture d'une phase au stator C- pentacle

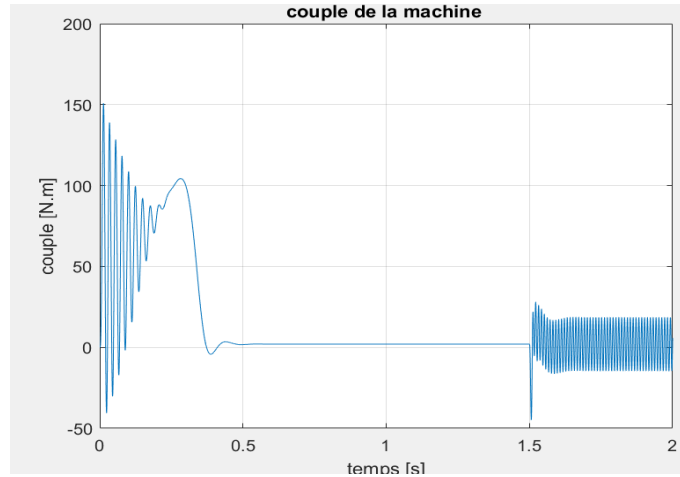


Fig3-24: Couple de la machine après ouverture d'une phase au stator C-pentacle

En fonctionnement à vide, nous observons un changement dans le comportement de la machine pendant l'intervalle de présence du défaut à $t= 1.5$ s à 2 s. Ce changement est dû au déséquilibre de tension. Il est traduit par des oscillations très rapides sur l'allure de la vitesse, du couple, et des courants statoriques.

Lors de l'ouverture d'une phase au stator, on observe en régime permanent une augmentation de l'amplitude des courants des autres phases pour atteindre une valeur de 7A, 10A, et 12A respectivement pour le couplage étoile, pentagone et pentacle avec un déséquilibre remarquable au moment de l'ouverture de la phase au stator. La vitesse diminue légèrement du 2993 tr/mn jusqu'à 2987 tr/min avec un régime instable. le couple passe de 2 N.m jusqu'à 7 N.m, 9N.m et 15N.m pour le couplage étoile, pentagone, et pentacle respectivement avec des fortes oscillations. Avec un déséquilibre remarquable au moment de l'ouverture d'une phase au stator le couple atteint une valeur de 50N.m pour le couplage pentacle.

3.7.2 Ouverture de deux phases

Nous avons alimenté la machine par le réseau triphasé via un transformateur triphasé/pentaphasée avec une tension simple pentaphasée $V= 220V$, et nous avons fait fonctionner la machine jusqu'à atteindre le régime permanent puis on ouvre deux phases au stator. On relève les courants au stator, la vitesse de la machine et le couple électromagnétique

3.7.2.1 Couplage étoile

3.7.2.1.1 Deux phases adjacentes

Nous présentons les résultats obtenus dans les Figs.2-25 à 2-27 pour le cas de deux phases adjacentes ouvertes couplage étoile

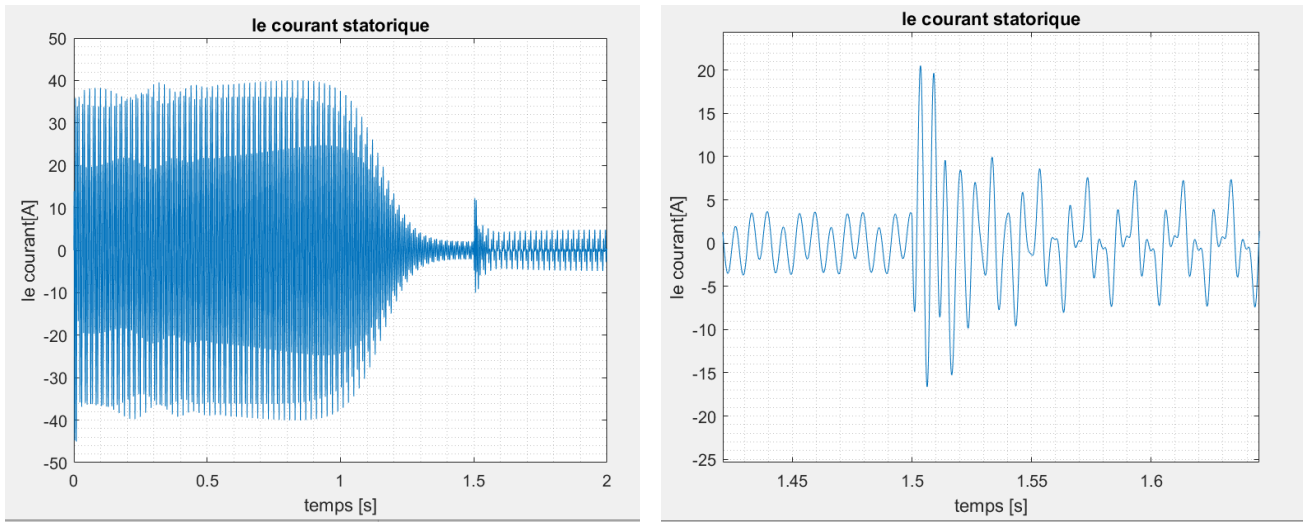


Fig3-25:Courants statoriques avec ouverture de deux phases adjacentes au stator C-étoile

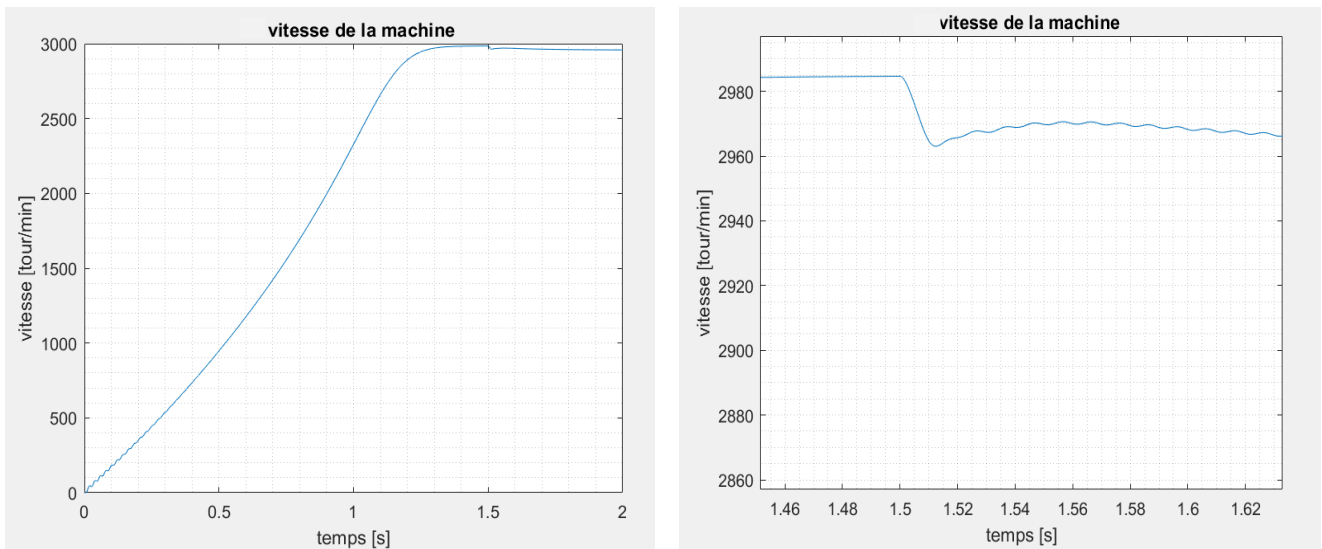


Fig.3-26:Vitesse de la machine avec ouverture de deux phases adjacentes au stator C-étoile

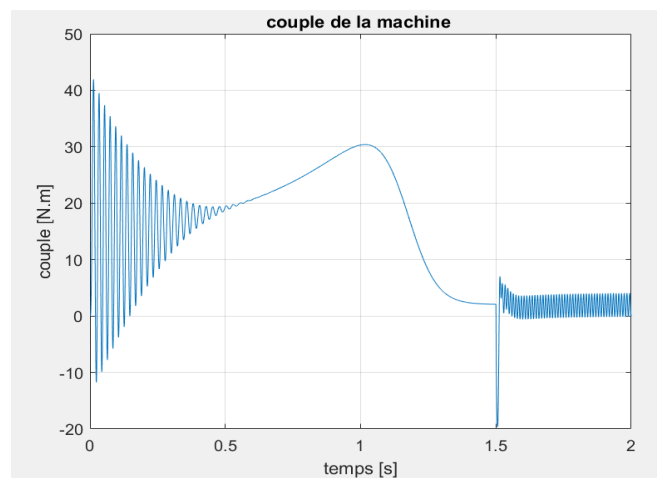


Fig.3-27:Couple de la machine avec ouverture de deux phases adjacentes au stator C-étoile

3.7.2.1.2 Deux phases non-adjacentes

Nous présentons les résultats obtenus dans les Figs.2-28 à 2-30 pour le cas de deux phases non-adjacentes ouvertes couplage étoilé

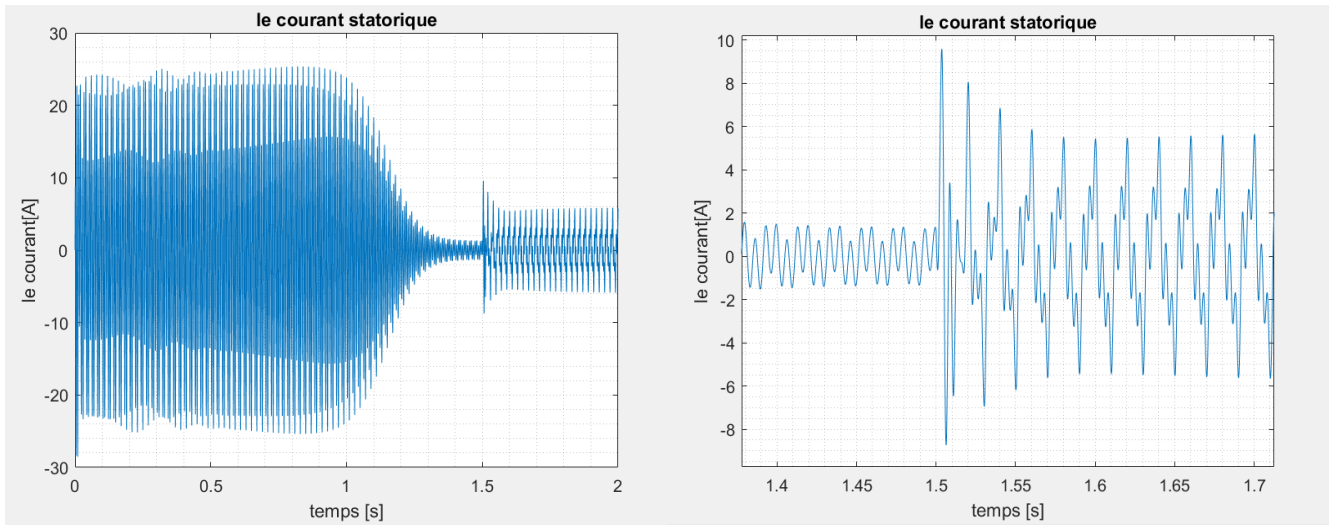


Fig.3-28:Courants statoriques avec ouverture de deux phases non-adjacentes au stator C-étoile

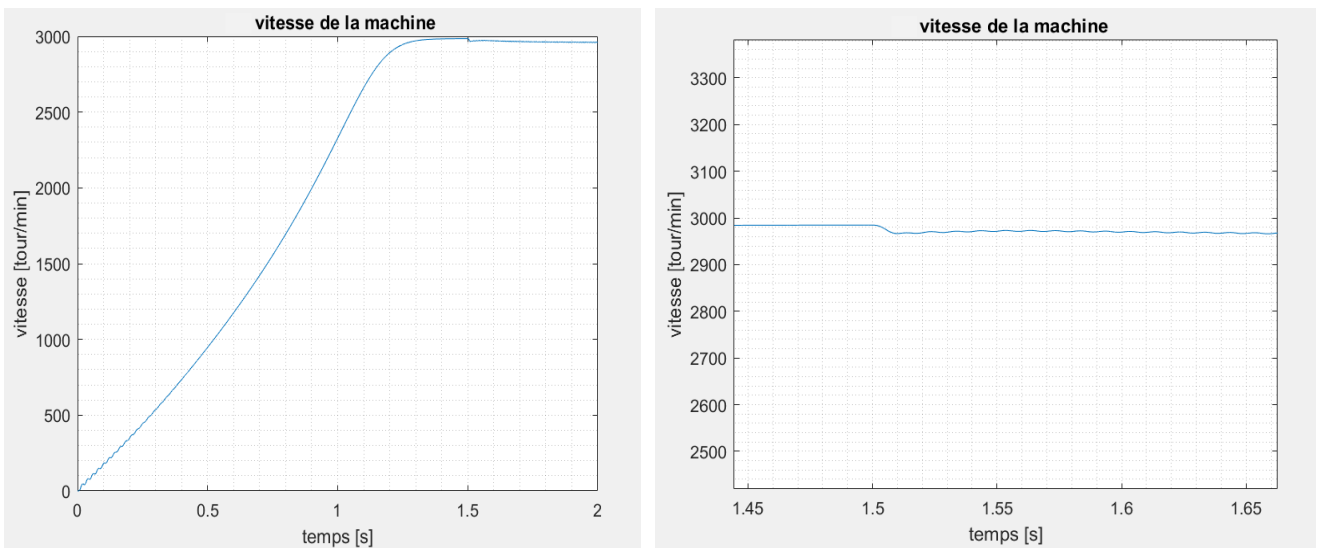


Figure 3-29:Vitesse de la machine avec ouverture de deux phases non-adjacentes au stator C-étoile

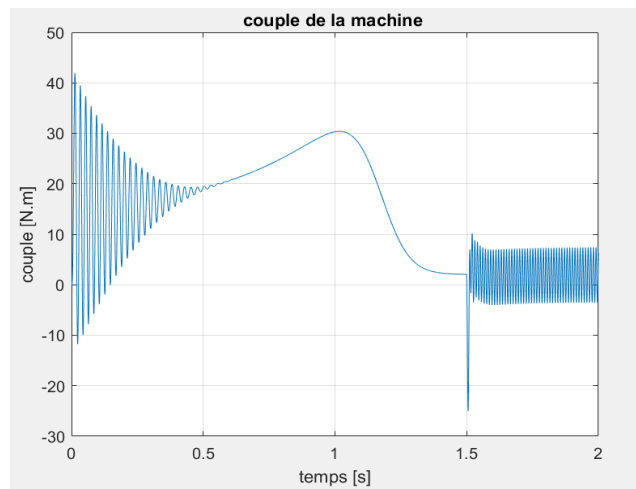


Fig.3-30:Couple de la machine avec ouverture de deux phases non-adjacentes au stator C-étoile

3.7.2.2 Couplage pentagone

3.7.2.2.1 Deux phases adjacentes

Nous présentons les résultats obtenus dans les Figs. 2-31 à 2-33 pour le cas de deux phases adjacentes ouvertes couplage pentagone

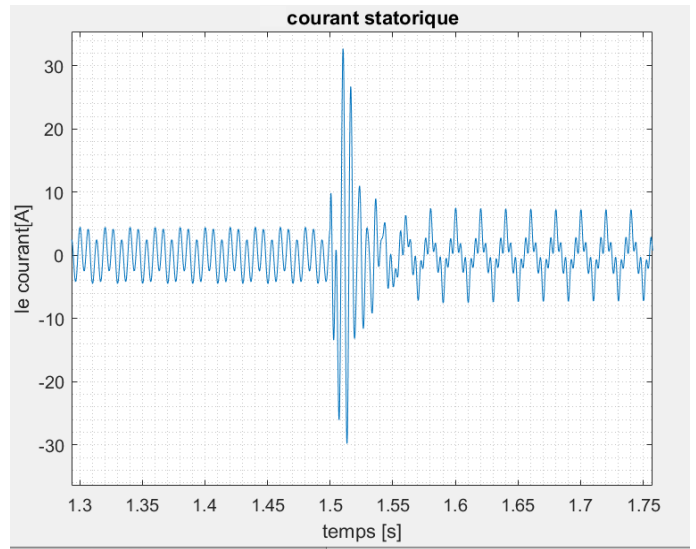
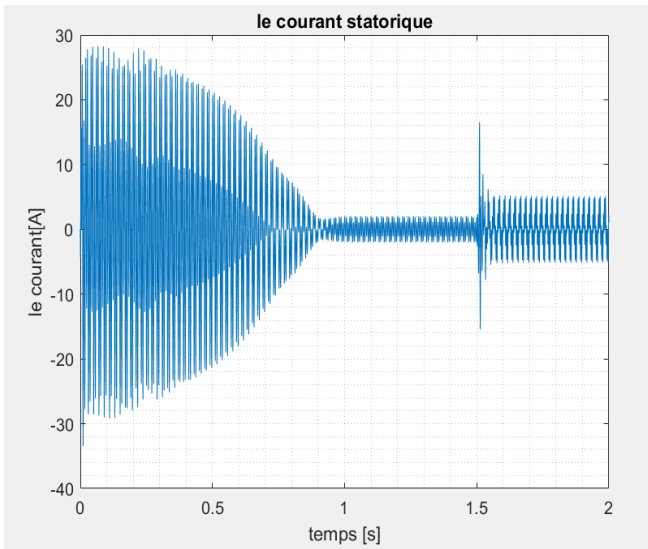


Fig. 3-31: Courants statoriques avec ouverture de deux phases adjacentes au stator C-pentagone

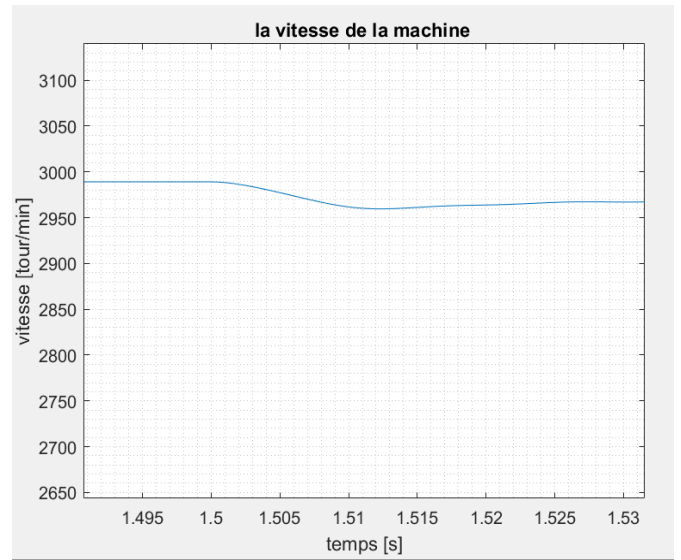
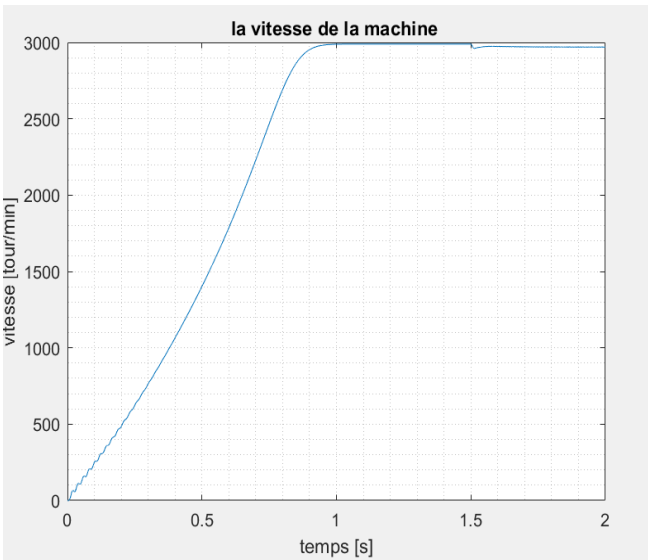


Fig. 3-32: Vitesse de la machine avec ouverture de deux phases adjacentes au stator C-pentagone

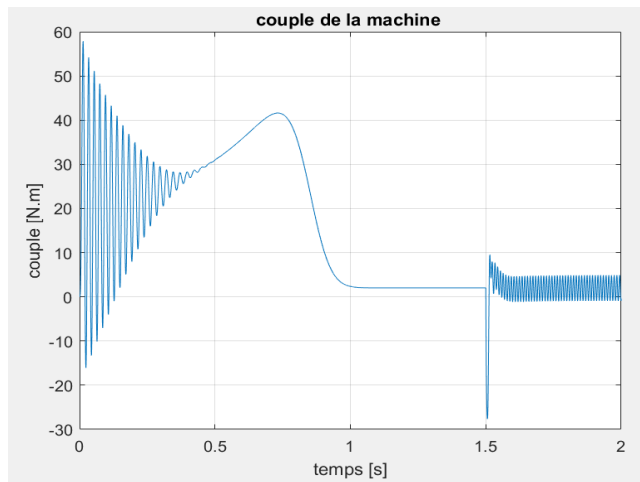


Fig.3-33: Couple de la machine avec ouverture de deux phases adjacentes au stator C-pentagone

3.7.2.2.2 Deux phases non-adjacentes

Nous présentons les résultats obtenus dans les Figs.2-34 à 2-36 pour le cas de deux phases non-adjacentes ouvertes couplage pentagone.

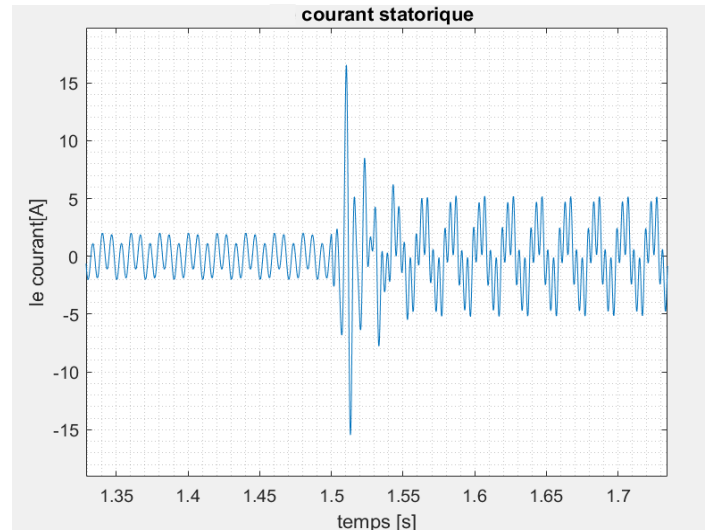
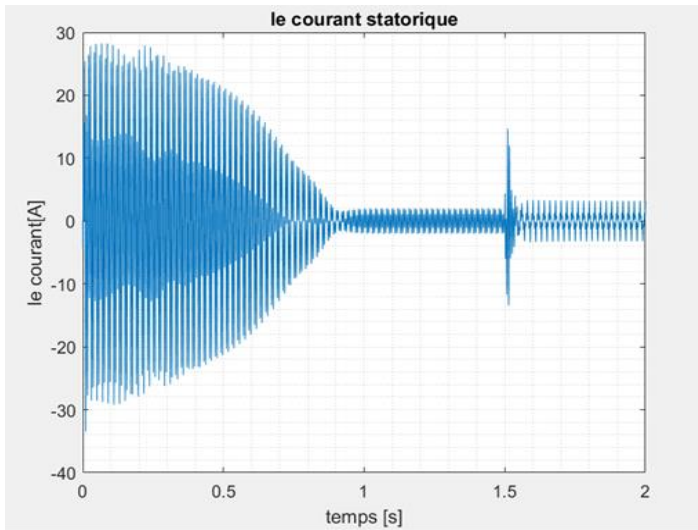


Fig3-34: Courants statoriques avec ouverture de deux phases non-adjacentes au stator C-pentagone

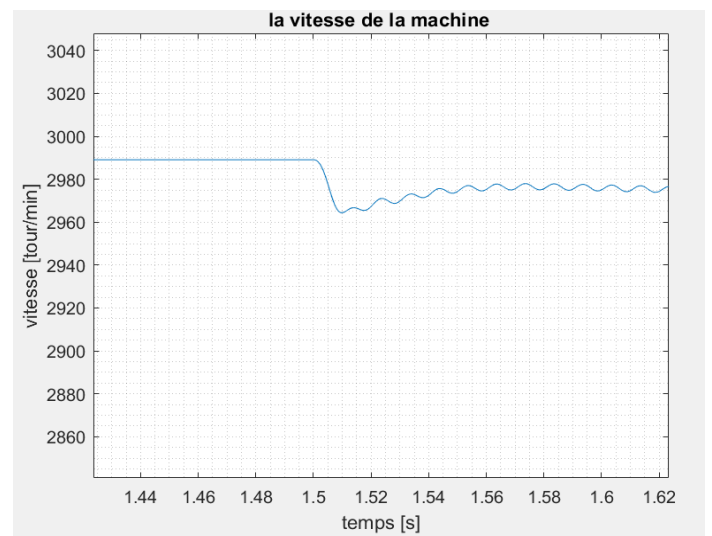
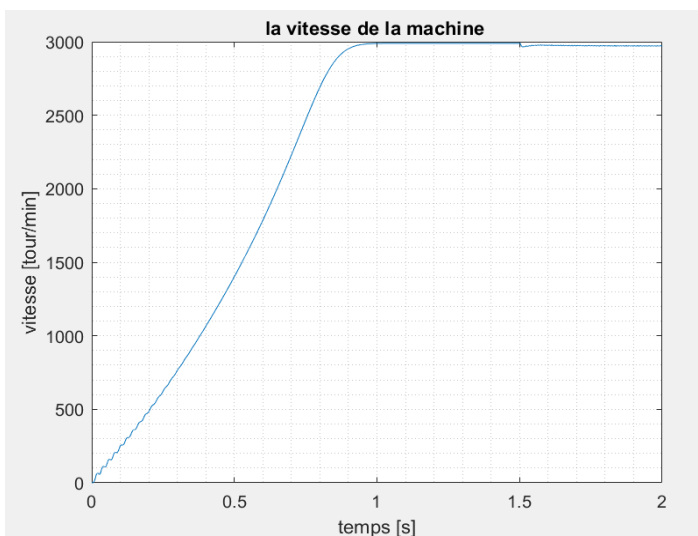


Fig.3-35:Vitesse de la machine avec ouverture de deux phases adjacentes au stator C-pentagone

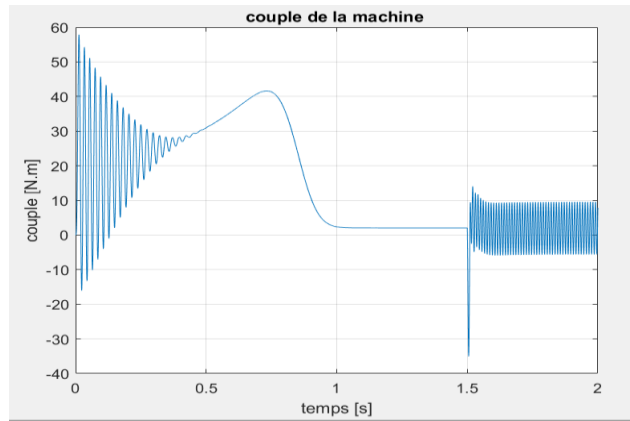


Fig.3-36:Couple de la machine avec ouverture de deux phases adjacentes au stator C-pentagone

3.7.2.3 Couplage pentacle

3.7.2.3.1 Deux phases adjacentes

Nous présentons les résultats obtenus dans les Figs.2-37à 2-39 pour le cas de deux phases adjacentes ouvertes couplage pentacle.

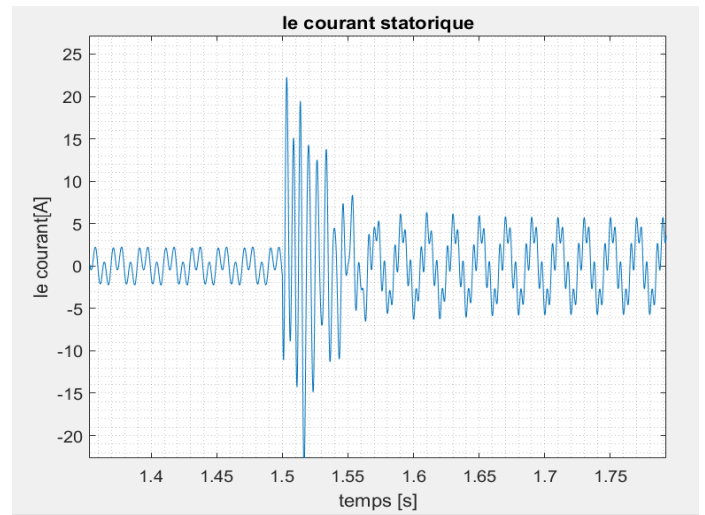
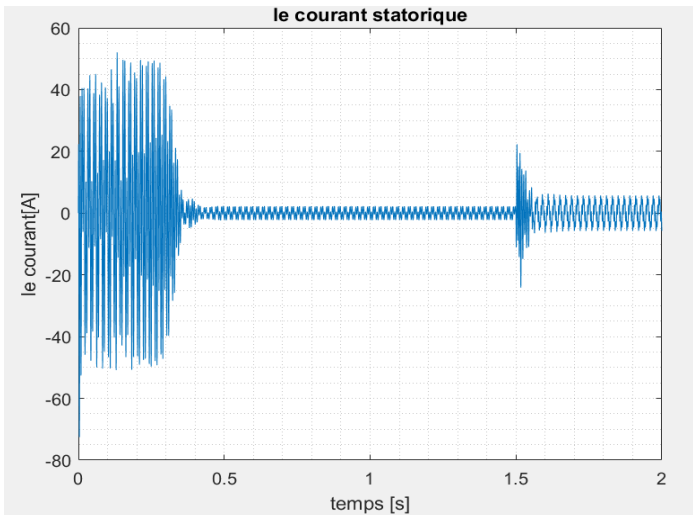


Fig. 3-37:Courants statoriques avec ouverture de deux phases adjacentes au stator C-pentacle

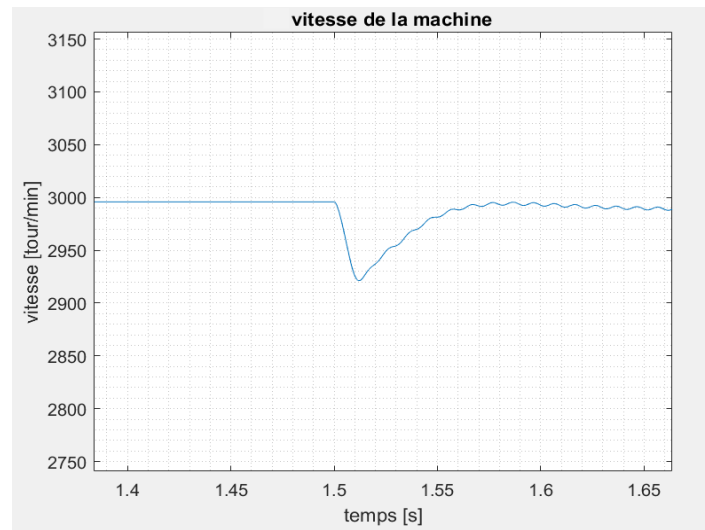
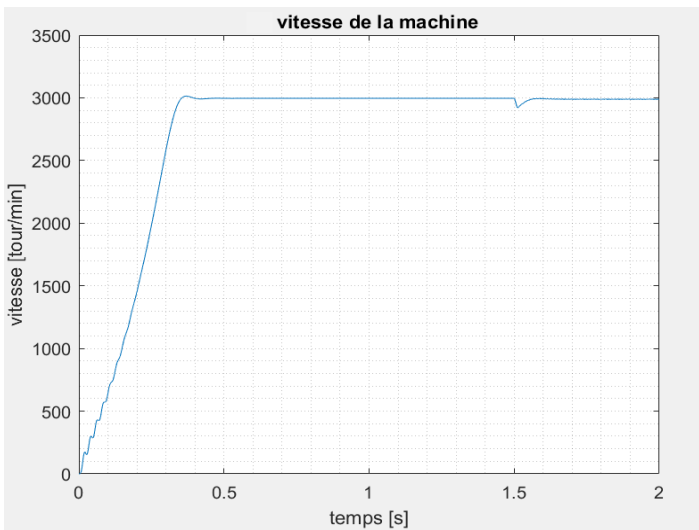


Fig3-38 :Vitesse de la machine avec ouverture de deux phases adjacentes au stator C-pentacle

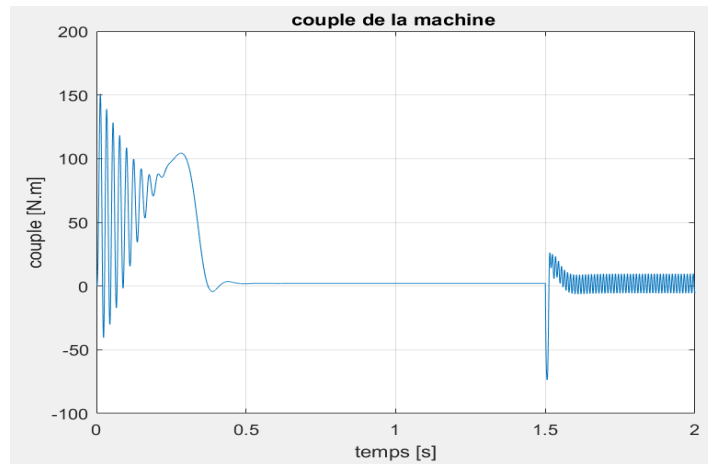


Fig3-39 :Couple de la machine avec ouverture de deux phases adjacentes au stator C-pentacle

3.7.2.3.2 Deux phases non-adjacentes

Nous présentons les résultats obtenus dans les Figs.2-40à 2-42 pour le cas de deux phases adjacentes ouvertes couplage pentacle.

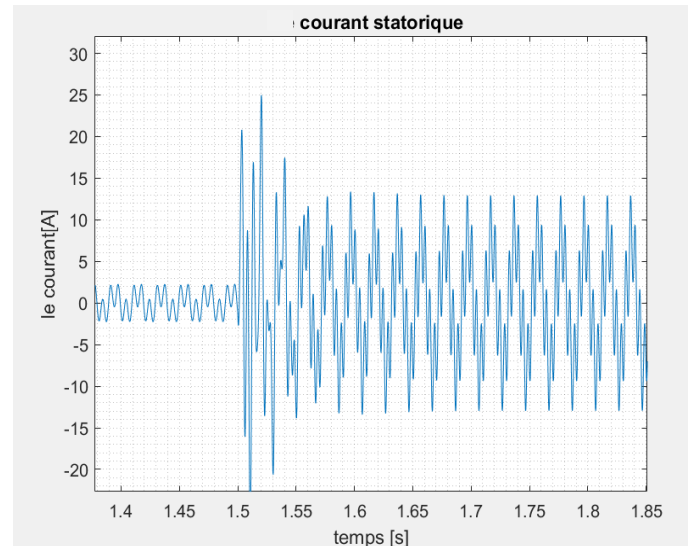
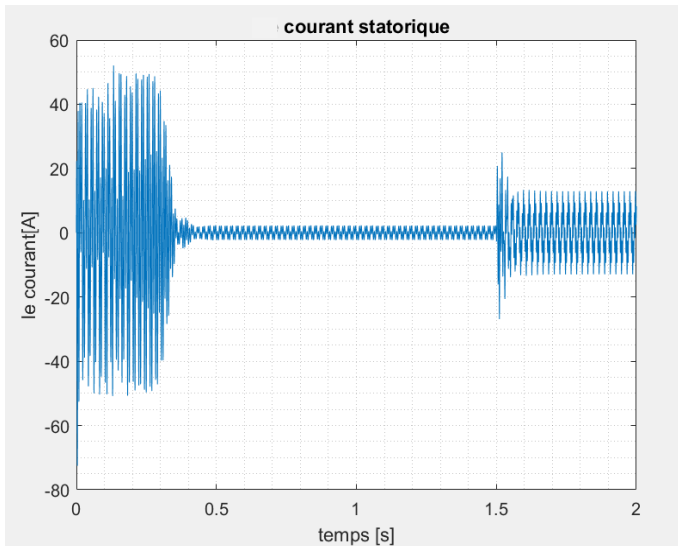


Fig3-40 :Courants statoriques avec ouverture de deux phases non-adjacentes au stator C-pentacle

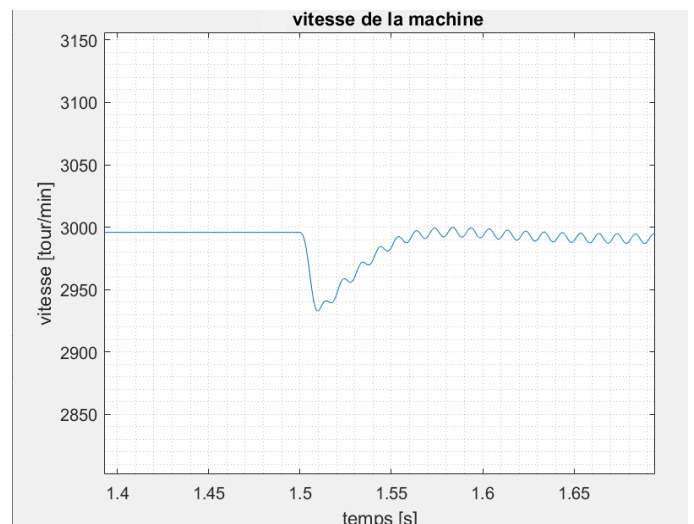
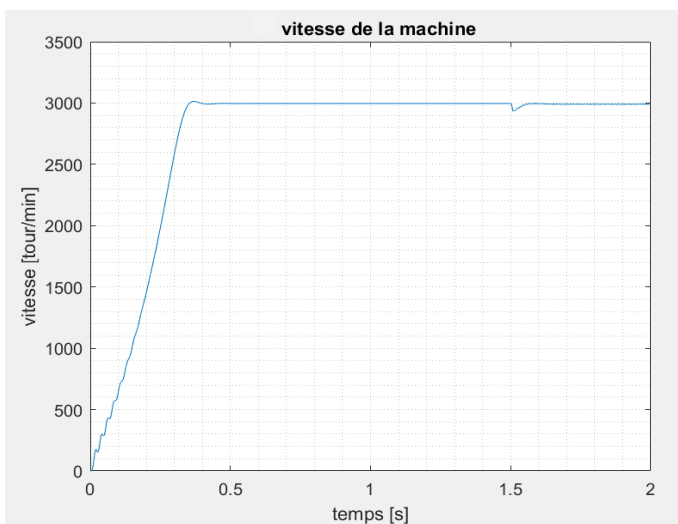


Fig3-41 :Vitesse de la machine avec ouverture de deux phases non-adjacentes au stator C-pentacle

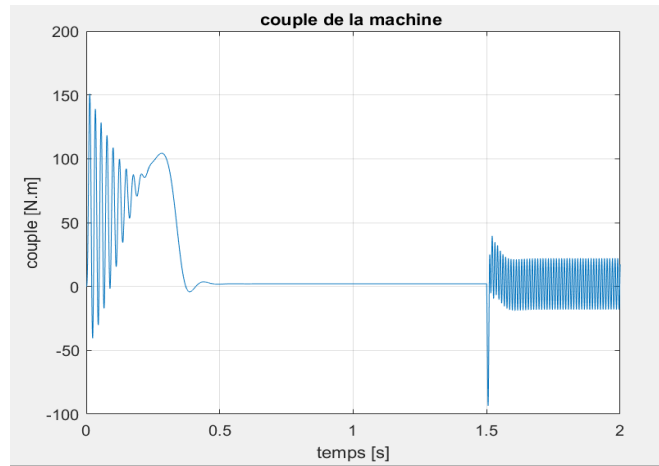


Fig3-42:Couple de la machine avec ouverture de deux phases non-adjacentes au stator C-pentacle

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 statorique plus importante que dans le cas d'une phase. Lors de défaut, le courant est plus important quand la MASP est connectée en pentacle qui atteint la valeur 13 A comparée au couplage pentagone et étoile avec les valeurs de courant de 10A, 5A respectivement.

Le courant lors de défaut d'ouverture de deux phases adjacentes est plus important que lors de défaut d'ouverture de deux phases non-adjacentes avec des oscillations très rapides sur l'allure de la vitesse et le couple, contrairement au couplage pentacle qui est plus intense lors de l'ouverture de deux phases non-adjacentes.

3.7.3 Ouverture de trois phases

Nous alimentons la machine par le réseau triphasé via un transformateur triphasé/pentaphasée avec une tension simple pentaphasée $V= 220V$, et nous faisons fonctionner la machine jusqu'à atteindre le régime permanent puis on ouvre trois phases au stator. On relève les courants au stator, la vitesse de la machine et le couple électromagnétique.

3.7.3.1 Couplage étoile

3.7.3.1.1 Trois phases adjacentes

Nous présentons les résultats obtenus dans les Figs.2-43 à 2-45 pour le cas de trois phases adjacentes ouvertes couplage étoilé

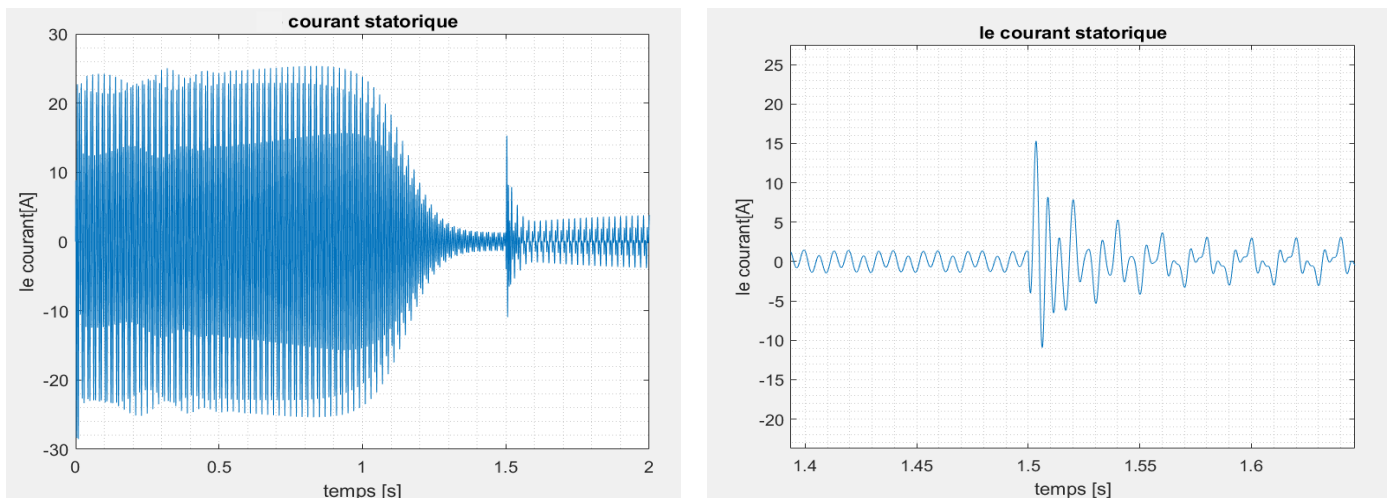


Fig3-43:Courants statoriques avec ouverture de trois phases adjacentes au stator C-étoile

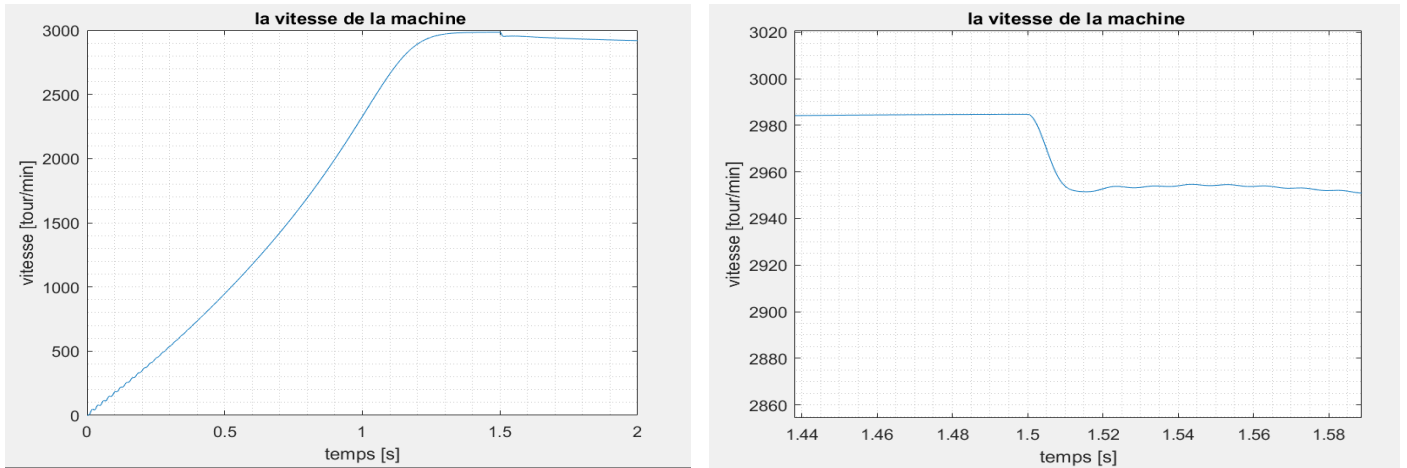


Fig3-44:Vitesse de la machine avec ouverture de trois phases adjacentes au stator C-étoile

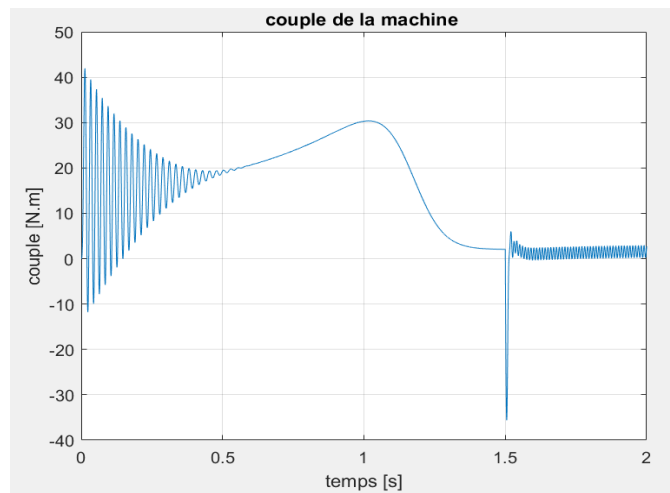


Fig3-45:Couple de la machine avec ouverture de trois phases adjacentes au stator C-étoile

3.7.3.1.2 Trois phases non-adjacentes

Nous présentons les résultats obtenus dans les Figs.2-46à 2-48 pour le cas de trois phases non-adjacentes ouvertes couplage étoilé

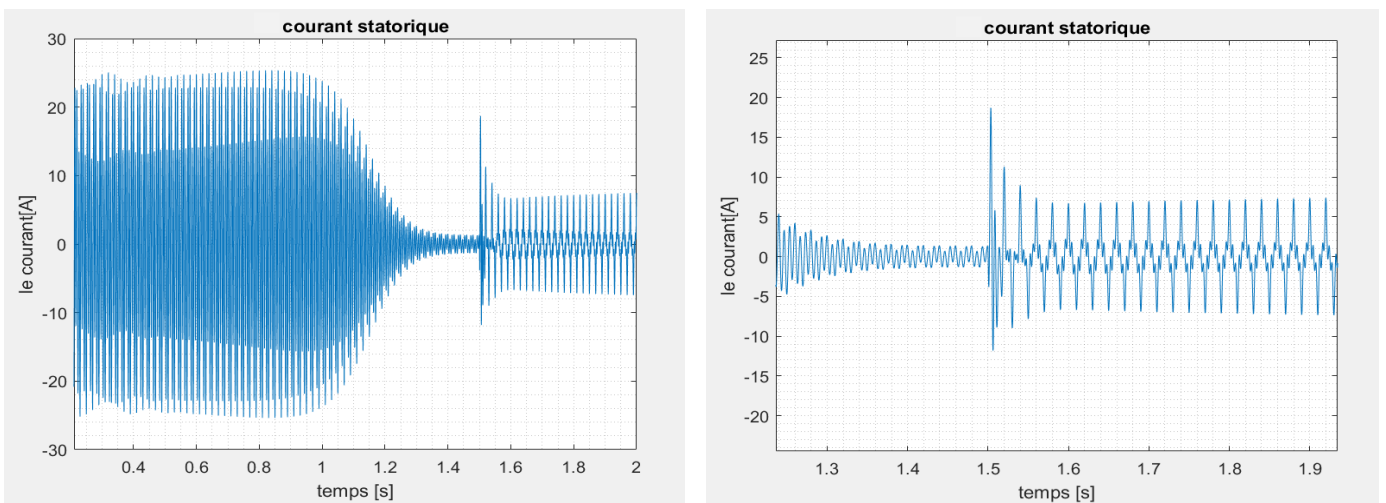


Fig3-46 :Courants statoriques avec ouverture de trois phases non-adjacentes au stator C -étoile

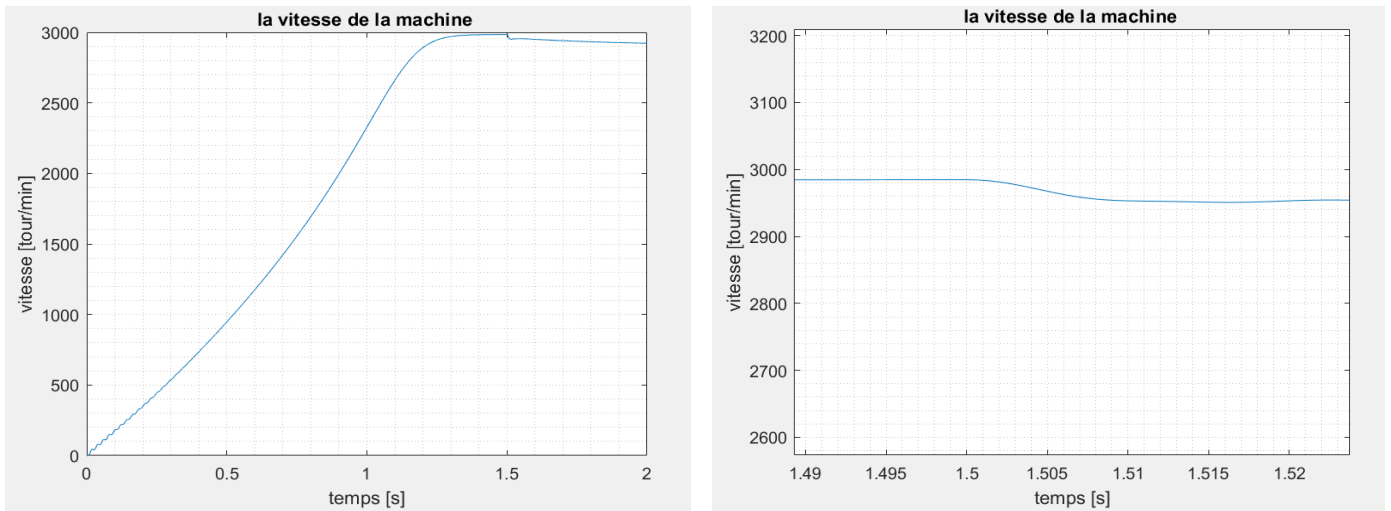


Fig3-47 :Vitesse de la machine avec ouverture de trois phases non-adjacentes au stator C-étoile

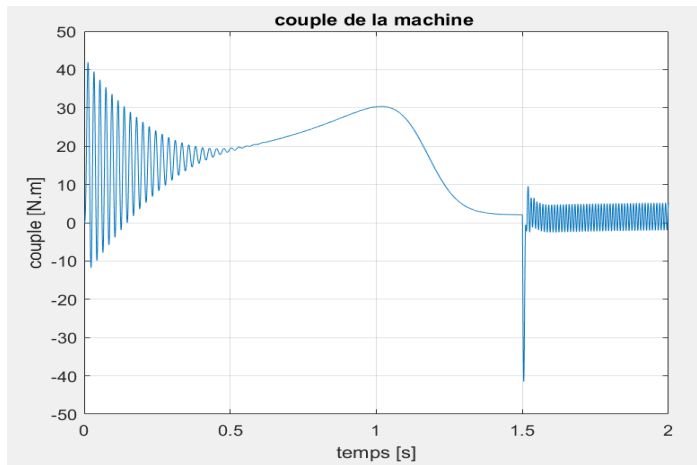


Fig3-48:Couple de la machine avec ouverture de trois phases non-adjacentes au stator C-étoile

3.7.3.2 Couplage pentagone

3.7.3.2.1 Trois phases adjacentes

Nous présentons les résultats obtenus dans les Figs.2-49 à 2-51 pour le cas de trois phases adjacentes ouvertes couplage pentagone.

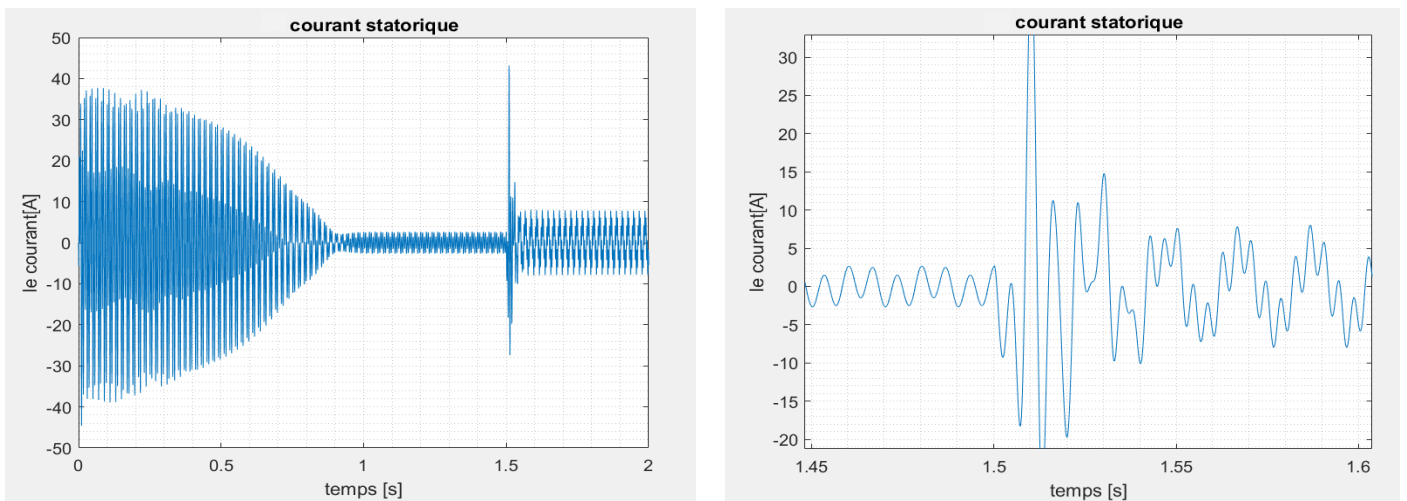


Fig3-49: Courant statorique avec ouverture de trois phases adjacentes au stator C-pentagone

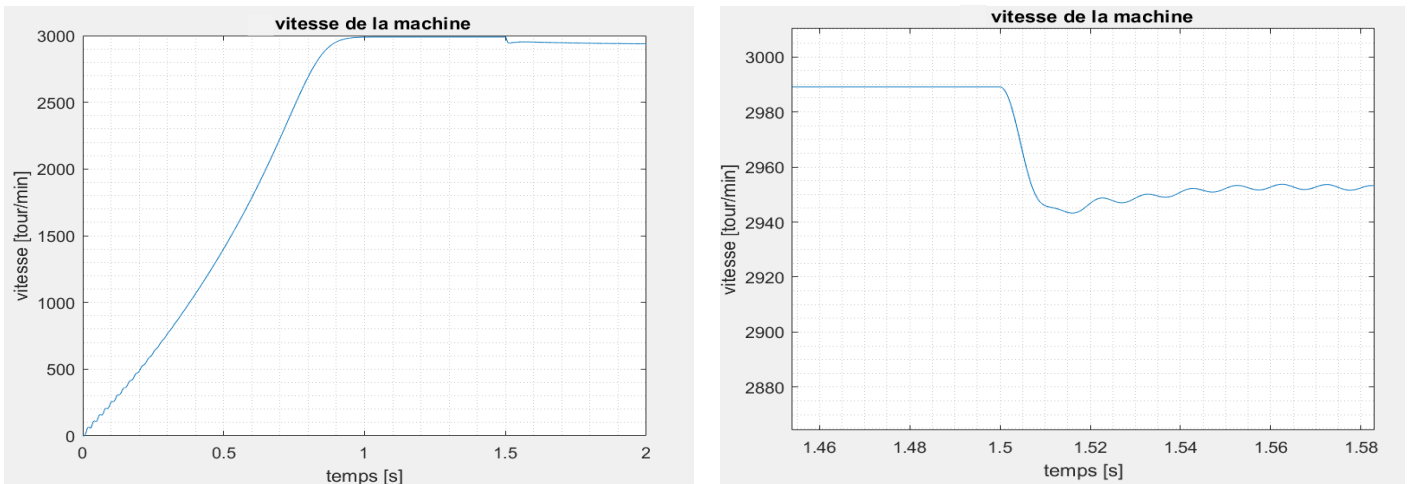


Fig3-50 :Vitesse de la machine avec ouverture de trois phases adjacentes au stator C-pentagone

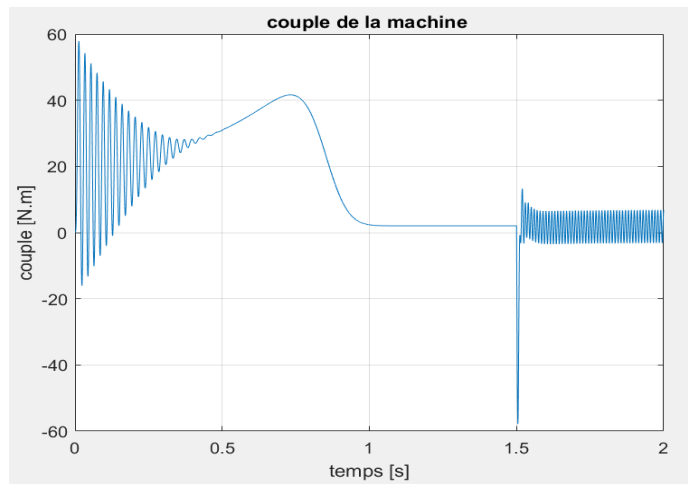


Fig3-51: Couple de la machine avec ouverture de trois phases adjacentes au stator C-pentagone

3.7.3.2.2 Trois phases non-adjacentes

Nous présentons les résultats obtenus dans les Figs.2-52à 2-54 pour le cas de trois phases non-adjacentes ouvertes couplage pentagone.

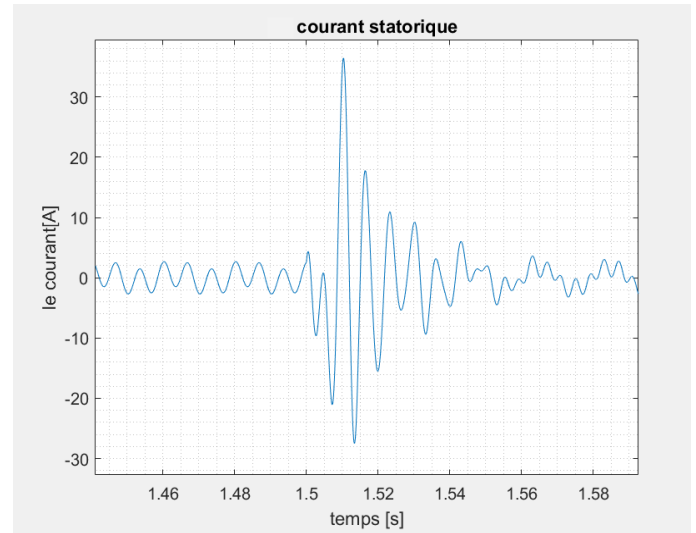
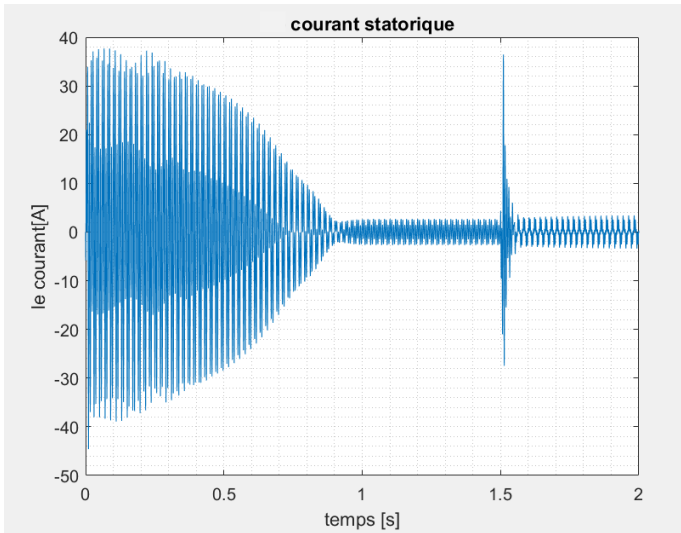


Fig3-52: Courant statorique avec ouverture de trois phases non-adjacentes au stator C-pentagone

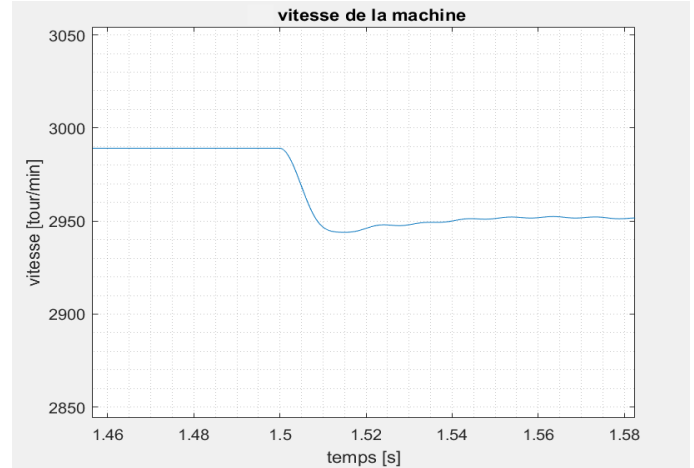
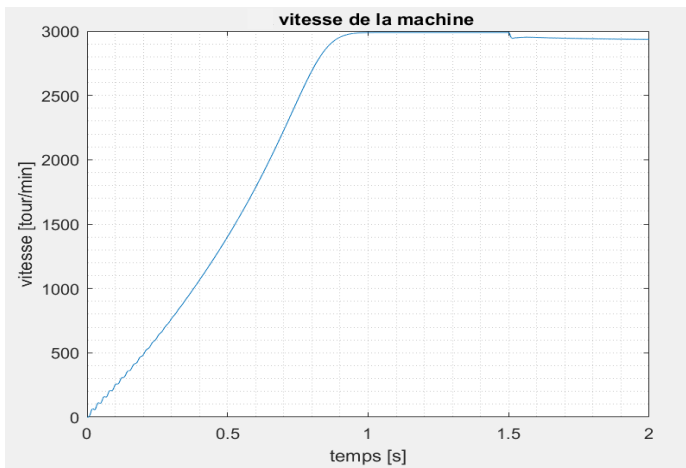


Fig3-53: Vitesse de la machine avec ouverture de trois phases non-adjacentes au stator C-pentagone

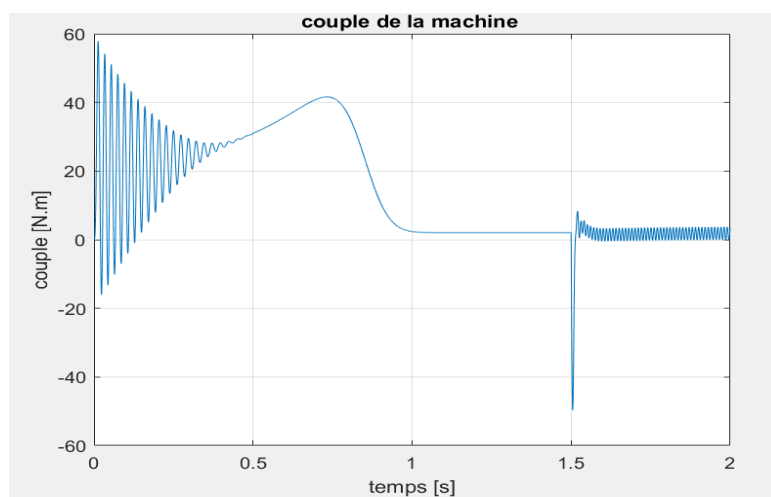


Fig3-54 :Couple de la machine avec ouverture de trois phases non-adjacentes au stator C-pentagone

3.7.3.3 Couplage pentacle

3.7.3.3.1 Trois phases adjacentes

Nous présentons les résultats obtenus dans les Figs.2-55 à 2-57 pour le cas de trois phases adjacentes ouvertes couplage pentacle

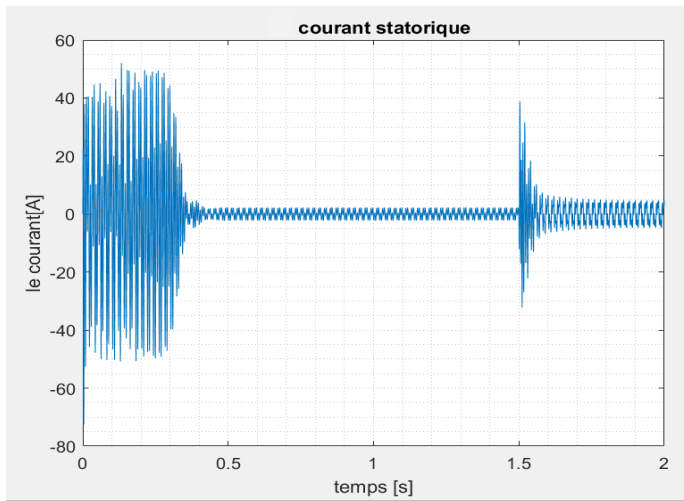


Fig3-55: Courant statorique avec ouverture de trois phases adjacentes au stator C-pentacle

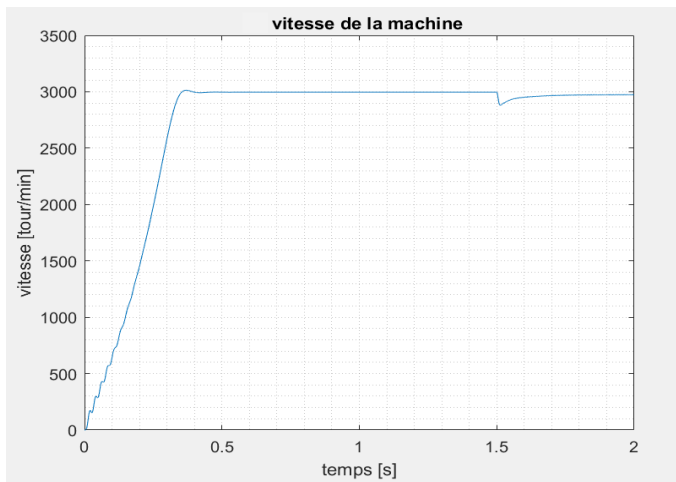
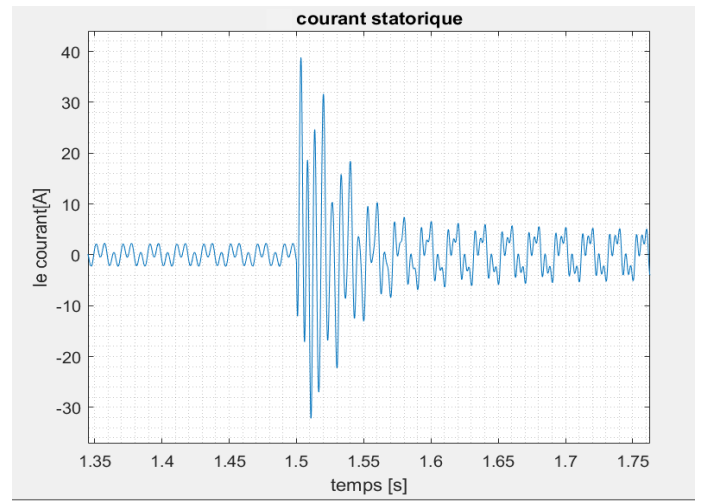


Fig3-56: Vitesse de la machine avec ouverture de trois phases adjacentes au stator C-pentacle

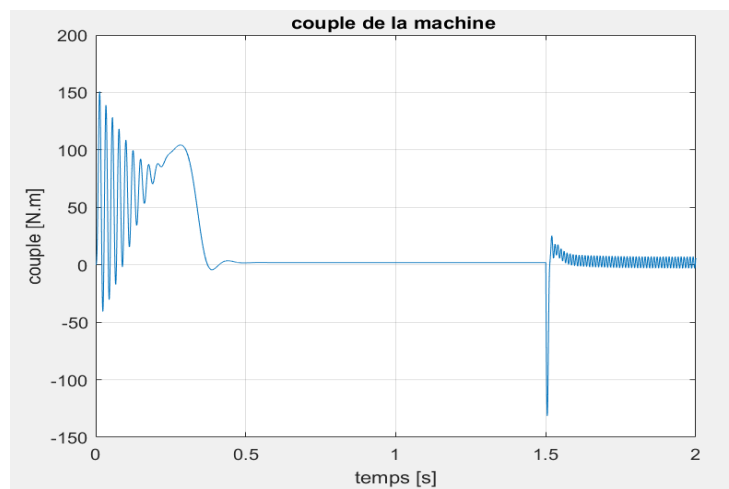
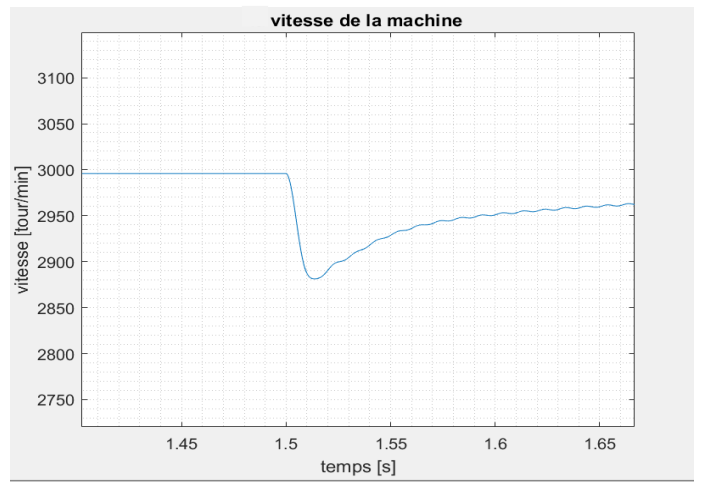


Fig3-57 : Couple de la machine avec ouverture de trois phases adjacentes au stator C-pentacle

3.7.3.3.2 Trois phases non-adjacentes

Nous présentons les résultats obtenus dans les Figs.2-58 à 2-60 pour le cas de trois phases non-adjacentes ouvertes couplage pentacle

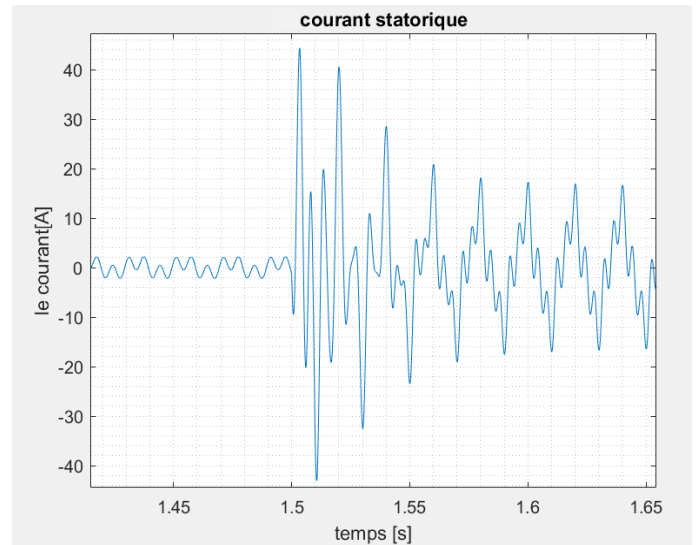
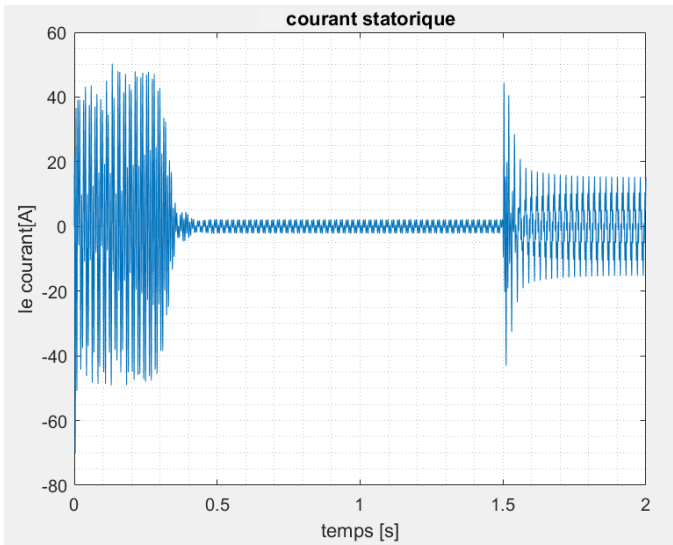


Fig3-58 :Courant statorique avec ouverture de trois phases non-adjacentes au stator C-pentacle

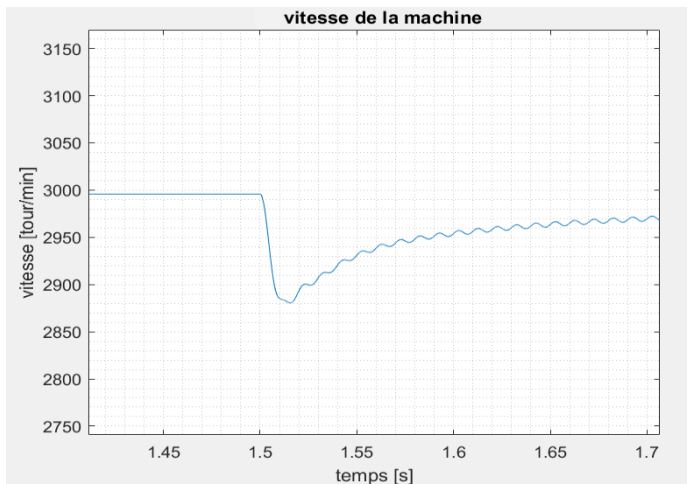
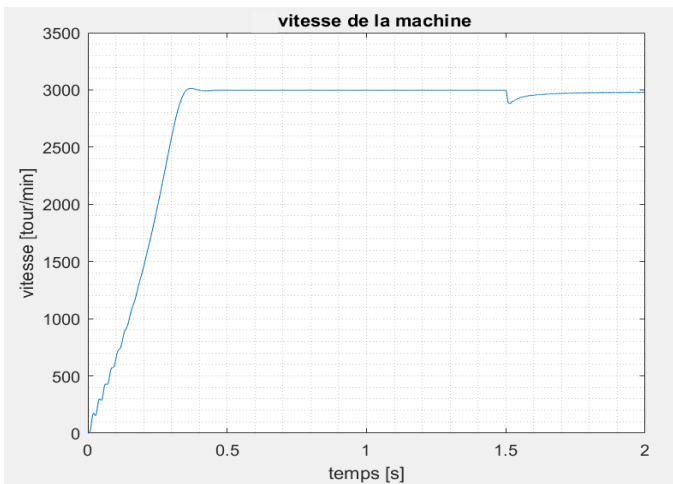


Fig3-59:Vitesse de la machine avec ouverture de trois phases non-adjacentes au stator C-pentacle

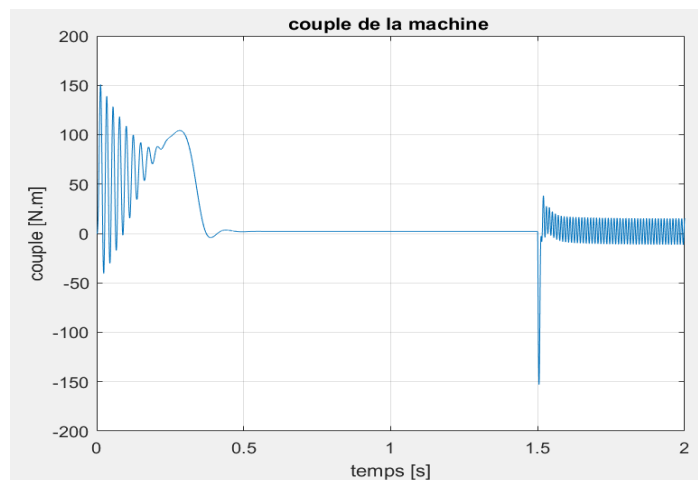


Fig3-60:Couple de la machine avec ouverture de trois phases non-adjacentes au stator C-pentacle

Dans le cas où le moteur subit un défaut d'ouverture de trois phases au stator (fonctionnement biphasé) il apparait une augmentation de l'amplitude du courant statorique plus importante que dans le cas de

deux phases ouvertes. Le courant statorique atteint la valeur 18A,7A,7A en couplage pentacle, pentagone et étoile respectivement. Avec un déséquilibre important des courants lors de l'ouverture des phases, le couple électromagnétique et le courant atteignent une valeur de 150 N.m et 70 A.

La vitesse décroît de 2993 tr/mn jusqu'à 2950 tr/min avec un régime instable et de fortes oscillations de la vitesse et du couple sont présentes lors de l'ouverture de deux phases non-adjacentes.

3.8 Discussions

Dans ce chapitre, nous avons observé le comportement de la machine asynchrone pentaphasée pendant le fonctionnement sain et avec défauts à savoir : ouverture d'une phase ou de deux, trois phases adjacentes et non adjacentes au stator.

Le modèle élaboré du moteur asynchrone pentaphasée utilisé sous l'environnement Matlab/Simulink a permis d'observer :

- le passage à la connexion de la machine en pentagone ou pentacle augmente la tension par phase de l'enroulement du stator, par rapport à une connexion en étoile, ce qui améliore les performances de la machine.

- Nous avons observé que les moteurs asynchrones à cinq phases sont fiables et peuvent fonctionner même avec trois phases défectueuses, ce qui est prouvé en se basant sur les formes d'onde mesurées et calculées dans les cas de défauts.

- Lors du défaut pour différentes connexions d'enroulements statoriques (étoile, pentagone, pentacle), le couple électromagnétique et le courant statorique augmentent pour la connexion pentagone plus que pour l'étoile. Pour le cas pentacle, ils sont plus importants que pour les deux autres configurations.

- Pour le couplage pentagone,lors de l'ouverture des phases adjacentes,les oscillations du couple sont plus intenses que dans le cas de l'ouverture des phases non-adjacentes.

- Il en est de même que pour le cas du pentacle où les oscillations sont très intenses.

Chapitre 3

Tests expérimentaux sur la machine Asynchrone pentaphasée en fonctionnement sain et pour Différents défauts au Stator

4.1 Introduction

A partir de l'environnement MATLAB/SIMULINK, on a pu, au niveau du chapitre 2, exploiter le modèle de la machine asynchrone pentaphasée qui nous a permis d'analyser le comportement de la machine pour différents défauts de fonctionnement, i.e, à l'état sain et défectueux. Pour valider ces résultats nous allons recourir à des tests expérimentaux ensuite on étudie les résultats en utilisant une méthode de traitement de signal du courant statorique à base de la FFT. Pour bien visualiser le déséquilibre entre les courants des phases statoriques, on trace le courant de la phase la plus proche du défaut en fonction du courant de la phase la plus éloignée.

4.2 Analyse spectrale du courant par transformée de Fourier rapide (FFT)

La transformée FFT (Fast Fourier Transform) est un algorithme couramment utilisé en traitement numérique du signal pour transformer des données discrètes du domaine temporel dans le domaine fréquentiel.

Lorsqu'une fonction représente un phénomène physique, comme l'état du courant statorique en un point, on l'appelle signal et sa transformée de Fourier s'appelle spectre. Cette technique permet de comparer le contenu spectral du signal choisi à l'état sain avec le contenu spectral du signal à l'état défaillant. Or, s'il y a une défaillance dans le signal en cours de traitement on observe des harmoniques avec une fréquence f_{def} tel que :

$$f_{def} = k * f_s \text{ Avec } k \in \mathbb{N}^+ \text{ et impair}$$

Cette technique du diagnostic est présentée par l'organigramme explicatif de la méthodologie de détection et du diagnostic des défauts électriques que nous avons ciblés dans le dernier paragraphe, Fig.3-1.

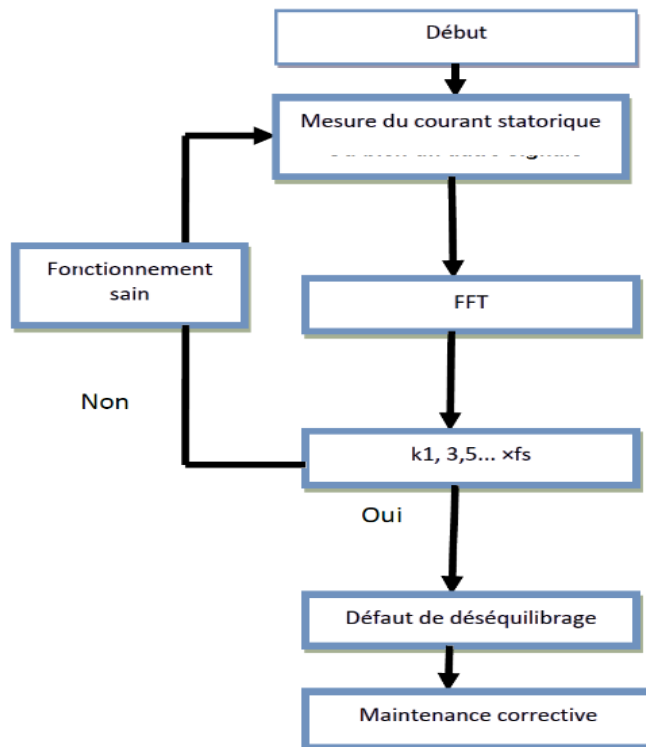


Fig.4-1: Organigramme de diagnostic des défauts par FFT

4.3 Banc d'essais expérimental

Les essais expérimentaux ont été effectués dans le cadre de diagnostic de défauts au Laboratoire de Recherche en Électrotechnique (LRE) de l'École Nationale Polytechnique. Le banc expérimental est constitué par, Fig.3-2 :

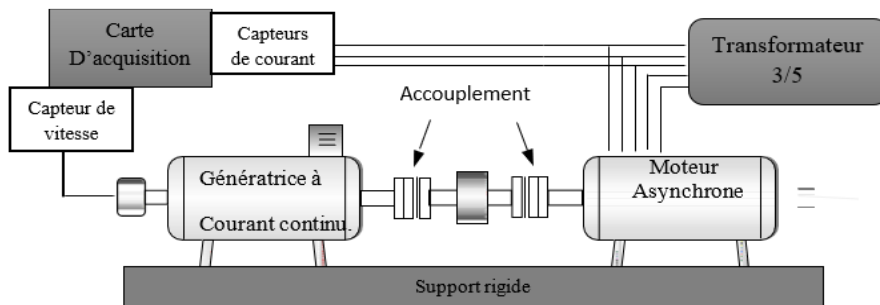


Fig.4-2: Structure du banc d'essais

- Alimentation triphasée équilibrée
- Un transformateur triphasé au primaire pentaphasé au secondaire, Fig.3-3.

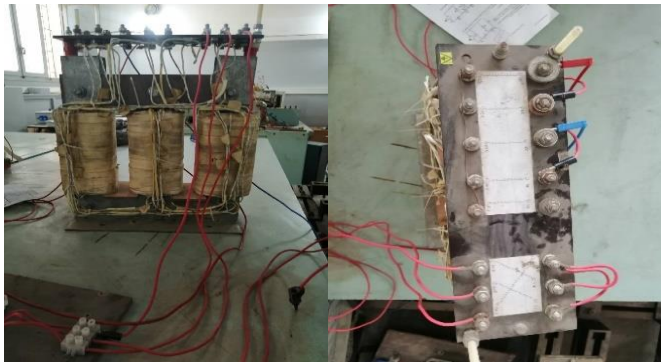


Fig.4-3: Transformateur asymétrique 3 vers 5 phases

- Une machine asynchrone pentaphasée à cage d'écureuil, Fig.3-4.



Fig.4-4: Machine asynchrone pentaphasée

— Une carte d'acquisition : Les signaux recueillis par les capteurs de la carte sont traités par le module d'acquisition de données Daqview. Ceci permet de traiter en ligne les données, les enregistrer sur le disque, et les visualiser graphiquement sans



Fig.4-5: Carte d'acquisition

4.4 Fonctionnement en régime sain

Nous démarrons l'expérimentation par le fonctionnement sain de la machine asynchrone pentaphasée. Nous alimentons la machine avec une tension simple pentaphasée $V= 220V$ jusqu'à atteindre le régime permanent, nous relevons les signaux expérimentaux.

4.4.1 Configuration étoile

On réalise une étoile à cinq branches avec les 5 enroulements du moteur pentaphasée. Le point milieu forme ainsi un point neutre artificiel. Chaque enroulement est alimenté sous une tension simple V , Fig.3-6. La Figure 3-7 représente les courants stator au démarrage.

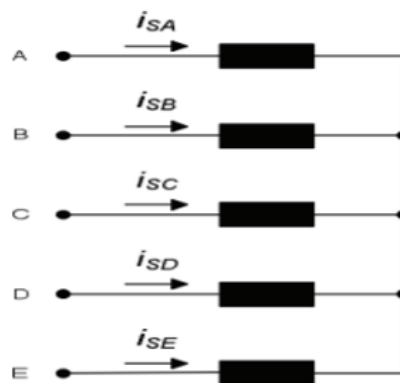


Fig.4-6:Connexion étoile sur la plaque à bornes d'une machine asynchrone pentaphasée [17]

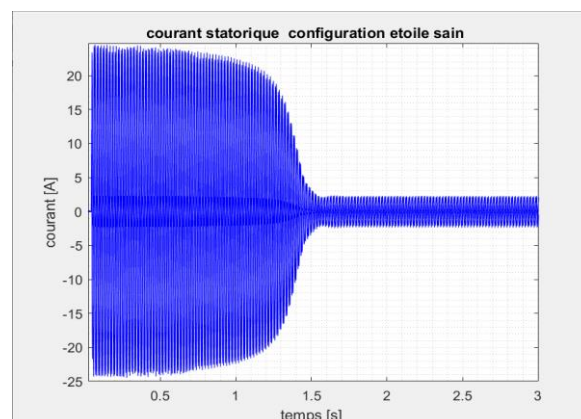


Fig.4-7 :Courants statoriques expérimentaux des phases b et c et d pour un régime sain

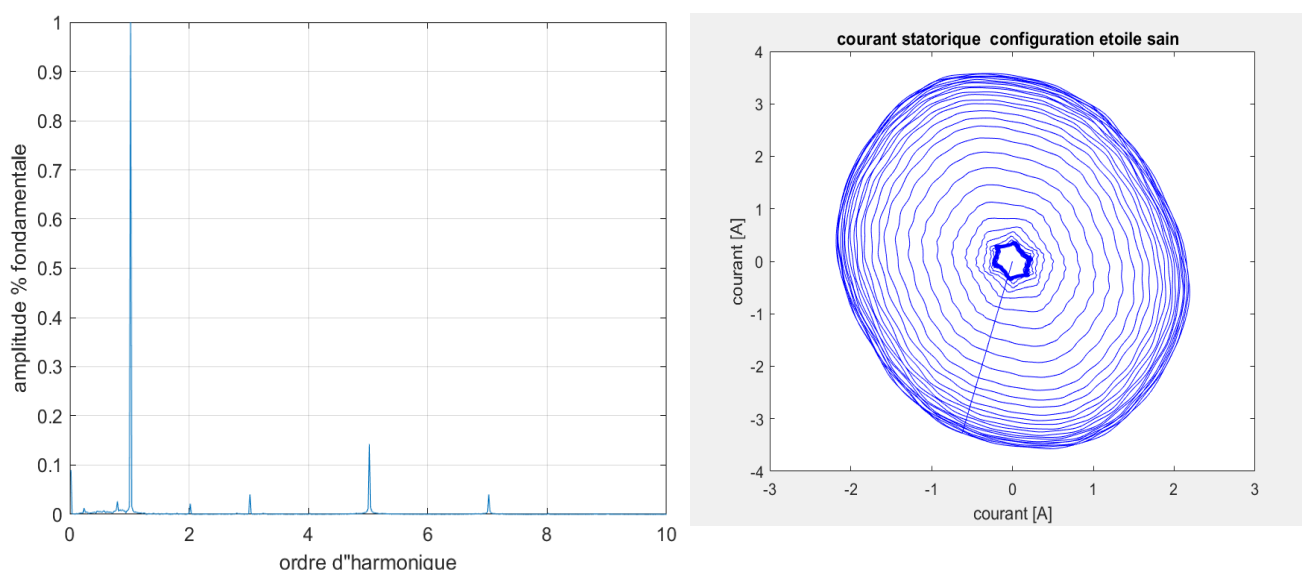


Fig.4-8: Spectre de raies du courant statorique Fig.4-9 : représentation de vecteur courant

Au démarrage, le moteur fait appel à un fort courant afin de vaincre l’inertie du rotor. Ceci représente l’un des plus grands inconvénients de la machine asynchrone. La force contre-électromotrice qui s’oppose à la tension appliquée est nulle au démarrage, il apparaît un courant intense en régime transitoire qui dure 1.34 s et atteint 25A. Le courant en régime permanent est de 2.2 A.

La Figure 3-8 représente le tracé des harmoniques de courants statoriques, on observe une apparition des harmoniques 1 et 3 dues à la machine et l’harmonique 5 qui est dû à la dissymétrie du transformateur d’alimentation ainsi que l’harmonique 7 qui est dû au raccourcissement du pas. La Fig.3-9 représente le tracé d’un courant statorique en fonction d’un autre comme notre système est équilibré (même amplitude avec un déphasage) on a un cercle qui se trace.

4.4.2 Configuration pentagone

On réalise la configuration pentagone avec les 5 enroulements statoriques du moteur. Chaque enroulement est alimenté sous une tension composée (entre phases), Fig.3-10. Les courants stator sont représentés à la Fig.3-11.

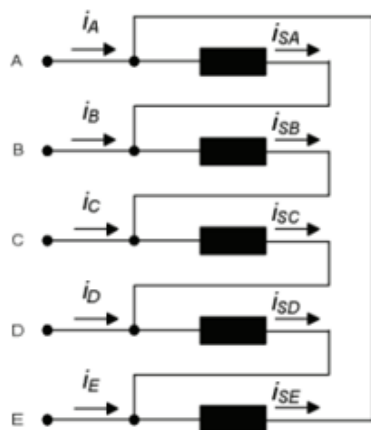


Fig.4-10: Connexion pentagone sur la plaque à bornes d’une machine asynchrone pentaphasée [17]

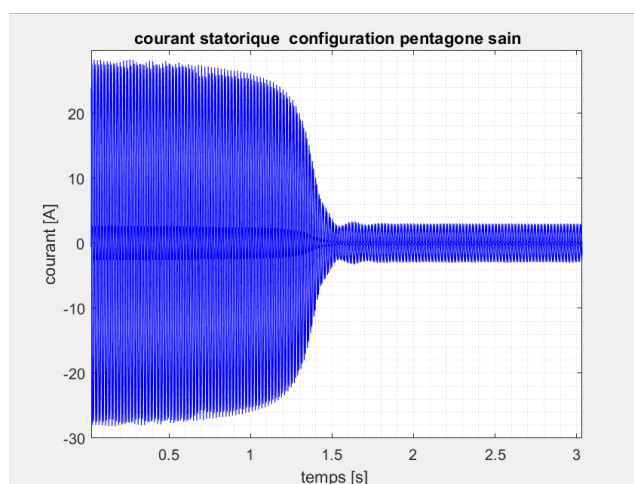


Fig.4-11:Courants statoriques des phases a, c et e (tests expérimentaux)

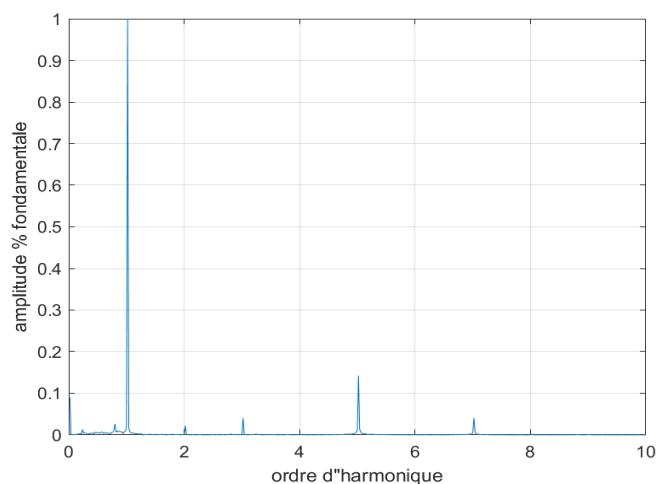


Figure 4-12 :Spectre de raies du courant statorique

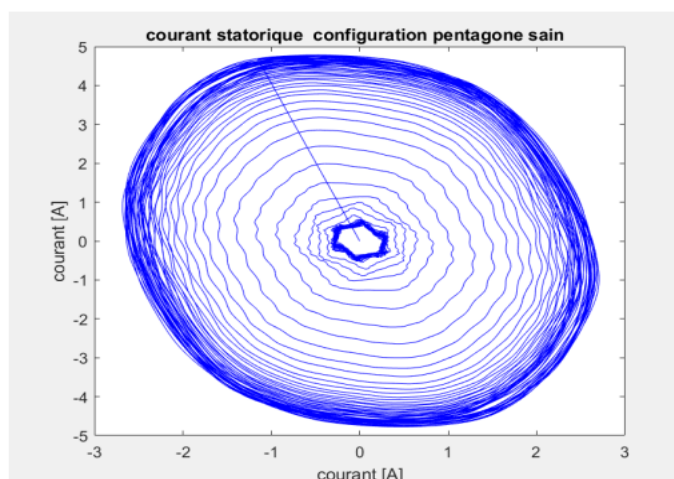


Figure 4-13 : représentation de vecteur courant

Nous remarquons dans ce couplage que le pic de courant en régime transitoire atteint 27 A. Après un temps de 1.4 s, le courant en régime permanent atteint la valeur de 2.9 A.

La Figure 3-13 représente le tracé d'un courant statorique en fonction d'un autre comme notre système est équilibré on obtient un cercle.

Le tracé des harmoniques de courants statoriques montre une apparition des harmoniques 1 et 3 de la machine et l'harmonique 5 qui est dû à la dissymétrie du transformateur d'alimentation ainsi que l'harmonique 7 qui est dû au raccourcissement du pas.

4.4.3 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 Fig.3-14.

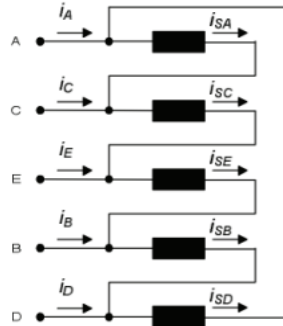


Fig.4-14: Connexion pentacle sur la plaque à bornes d'une machine asynchrone pentaphasée [17]

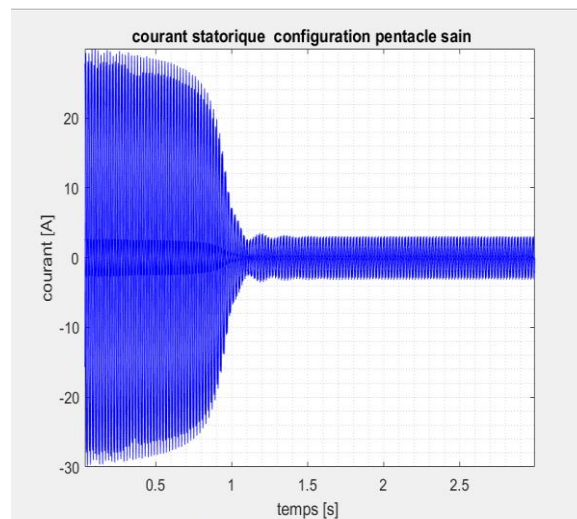


Fig.4-15 : Courants statoriques des phases a, b et c pour un fonctionnement sain (tests expérimentaux)

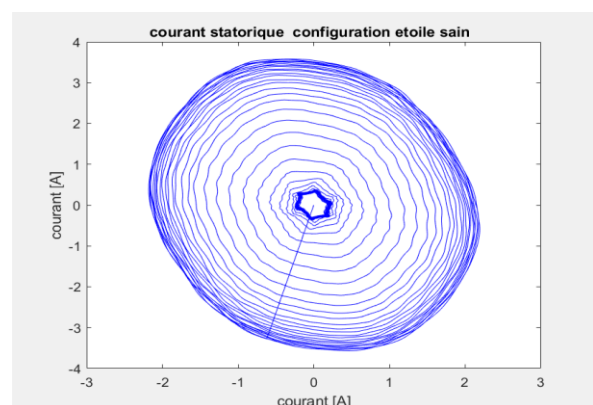
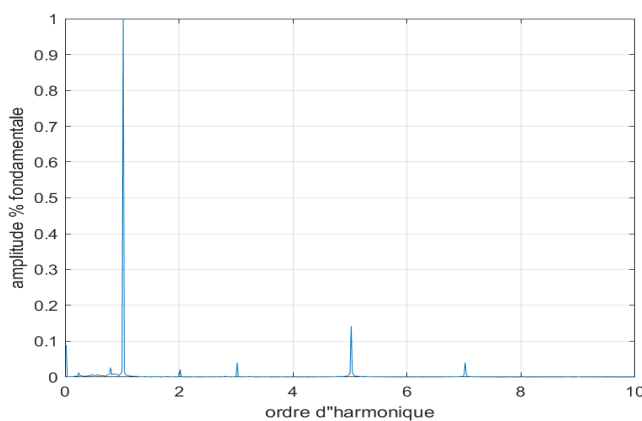


Fig.4-16: Spectre de raies du courant statorique (tests expérimentaux) Fig.4-17 : Représentation vectoriel du courant

Le couplage pentacle conduit à un courant de phase transitoire plus élevé que celui des deux autres couplages, à savoir : l'étoile et le pentagone ; il atteint la valeur de 30A 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 Fig.3-17 représente le tracé d'un courant statorique en fonction d'un autre comme notre système est équilibré on obtient un cercle.

Le tracé des harmoniques de courants statoriques montre une apparition de l'harmonique 5 qui est dû à la dissymétrie du transformateur d'alimentation.

4.5 Ouverture d'une phase

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

4.5.1 Configuration étoile

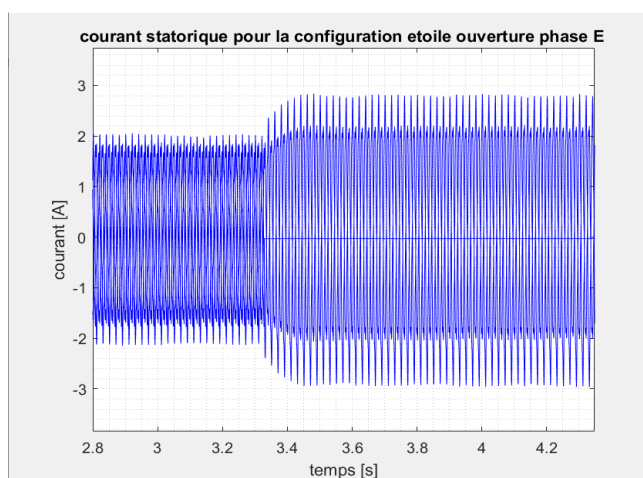
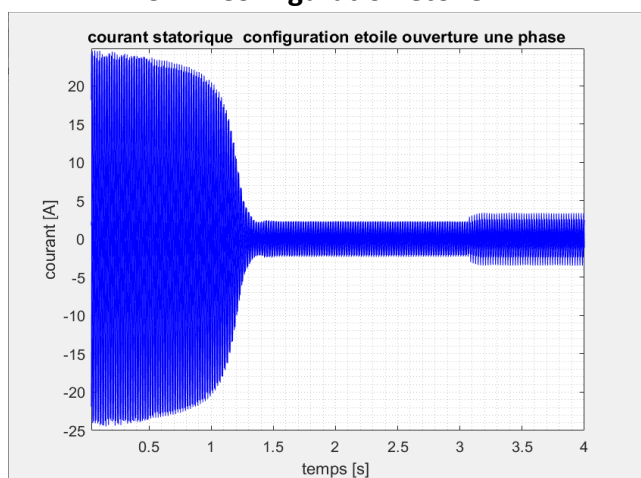


Fig.4-18 : Courants statoriques des phases a, b et c après ouverture d'une phase au stator (tests expérimentaux).

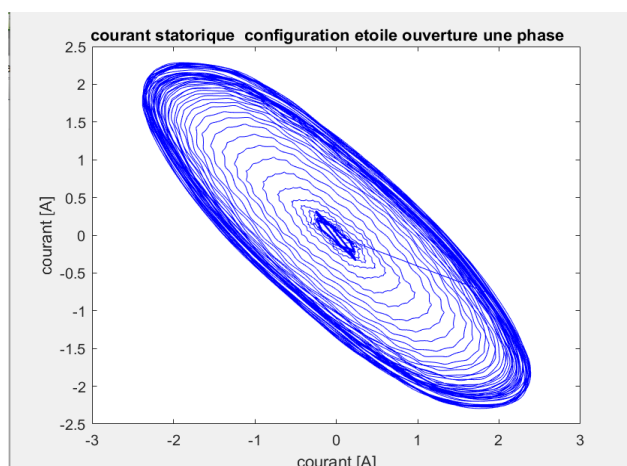
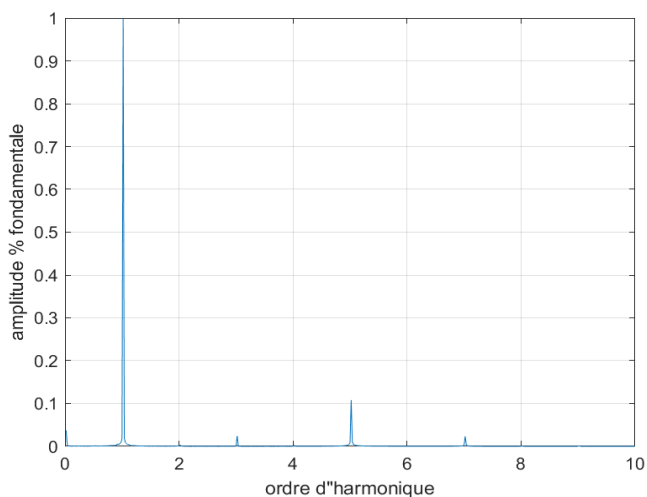


Fig.4-19 : Spectre de raies du courant statorique

Fig.4-20 : Représentation de vecteur courant

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 (les phases les plus proches du défaut seront les plus affectées) cela est dû au report de charge autrement dit la puissance de la phase qui est en défaut sera partagée sur le reste des phases saines.

La Fig. 3-20 représente le tracé du courant statorique d'une phase adjacente au défaut par rapport à une phase non adjacente au défaut, on remarque une ellipse qui se forme et cela est dû au déséquilibre entre les amplitudes des phases.

Le tracé des harmoniques de courants statoriques montre une légère diminution de l'harmonique 5 et 3 après défaut d'ouverture d'une phase au stator,

4.5.2 Configuration pentagone

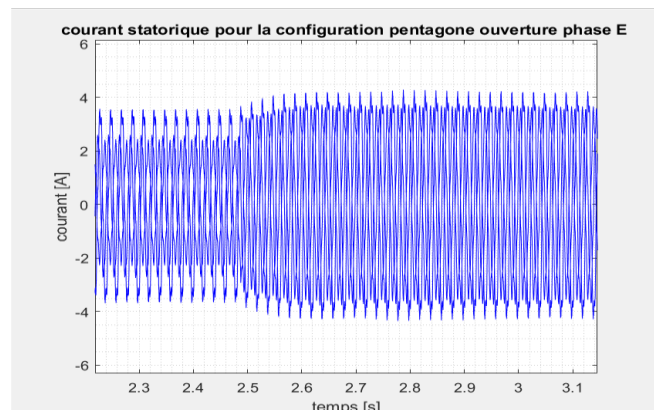
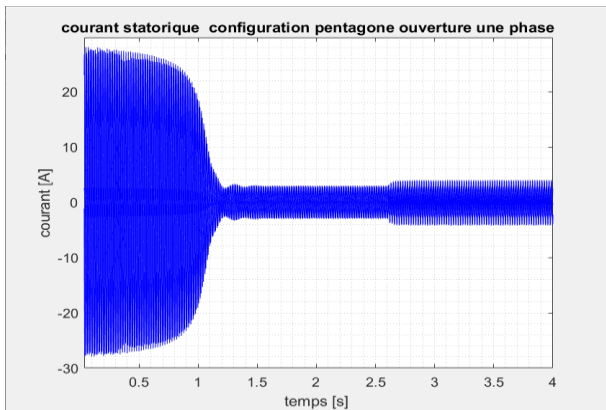


Fig. 4-21: Courants statoriques des phases a, b et c avec ouverture d'une phase au stator

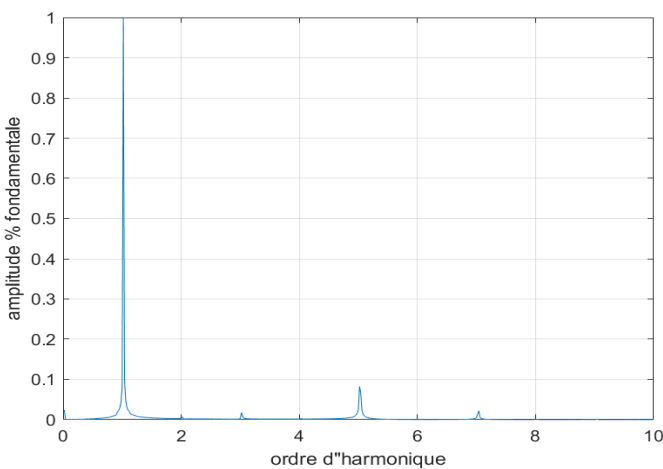


Fig. 4-22: Spectre de raies du courant statorique

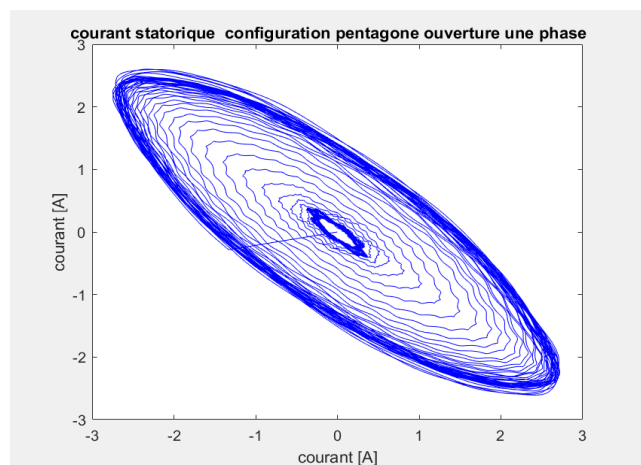


Fig. 4-23: Représentation de Vecteur courant

Le courant statorique de la machine avec défaut d'ouverture d'une phase atteint 3.8 A avec un déséquilibre entre les courants des phases.

La Figure 3-22 représente le tracé du courant statorique d'une phase adjacente au défaut par rapport à une phase non adjacente au défaut, on remarque une ellipse qui se forme et c'est dû au déséquilibre entre les amplitudes des phases.

Le tracé des harmoniques de courants statoriques montre une légère diminution des harmoniques 5 et 3 après défaut d'ouverture d'une phase au stator.

4.5.3 Couplage pentacle

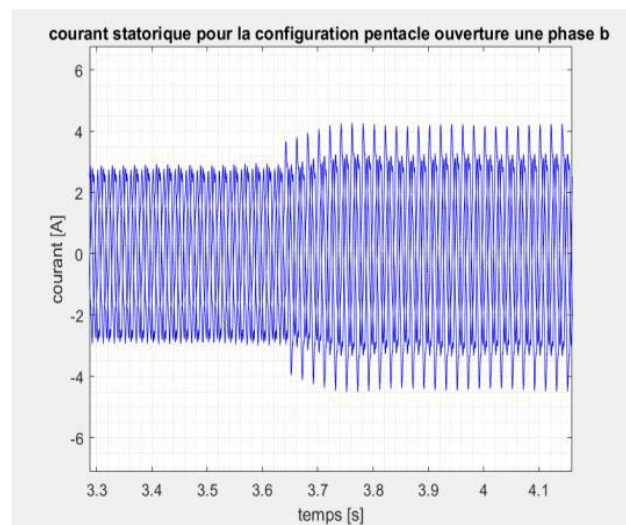
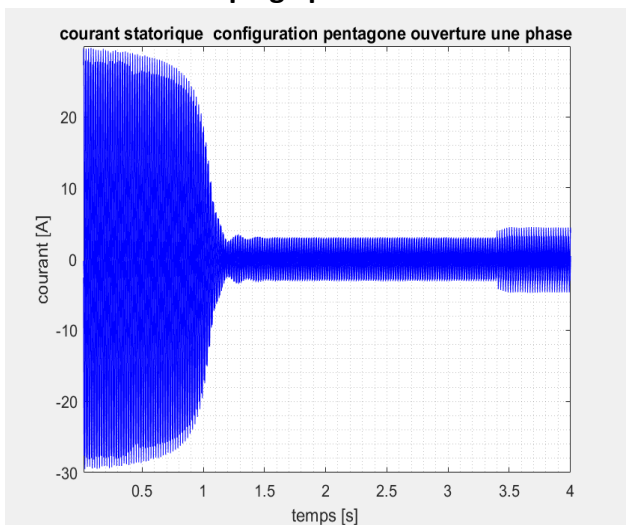


Fig.4-24: Courants statoriques des phases a, b et c avec ouverture d'une phase au stator C-pentacle

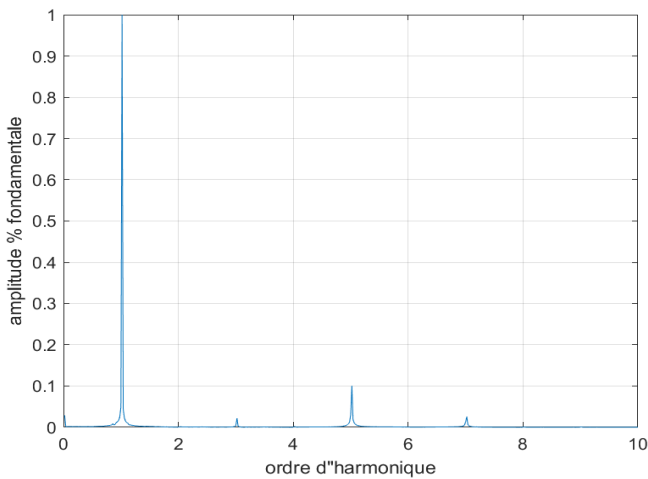


Fig.4-25: Spectre de raies du courant statorique courant

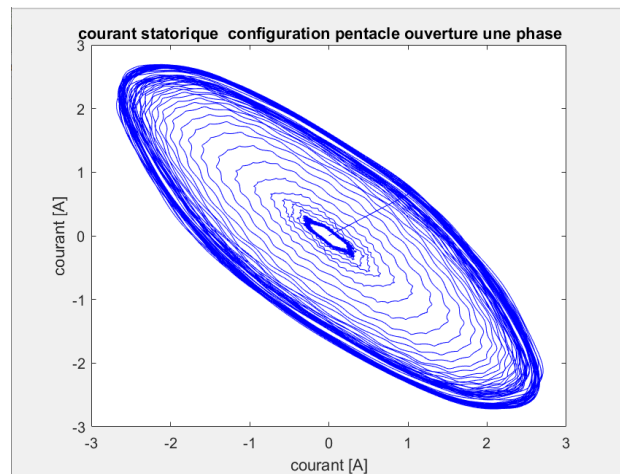


Fig.4-26: Représentation de vecteur de courant

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 3 A à 4.2A avec une différence d'amplitude entre les phases.

La Figure 3-26 représente le tracé du courant statorique d'une phase adjacente au défaut par rapport à une phase non-adjacente au défaut, on remarque une ellipse qui se forme et c'est dû au déséquilibre des phases.

Le tracé des harmoniques de courants statoriques montre une légère diminution des harmoniques 5 et 3 après défaut d'ouverture d'une phase au stator.

4.6 Ouverture de deux phases

Nous alimentons la machine par le réseau triphasé via un transformateur triphasé/pentaphasée avec une tension simple pentaphasée $V = 220V$, et nous faisons fonctionner la machine jusqu'à atteindre le régime permanent puis on ouvre deux phases au stator, et on relève les valeurs de courants au stator.

4.6.1 Configuration étoile

4.6.1.1 Ouverture de deux phases adjacentes

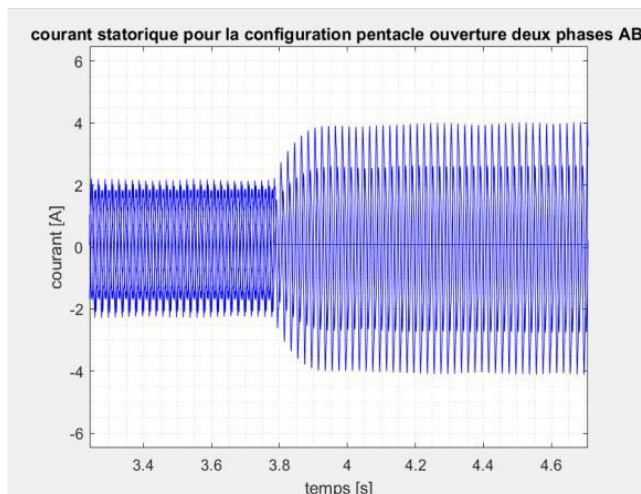
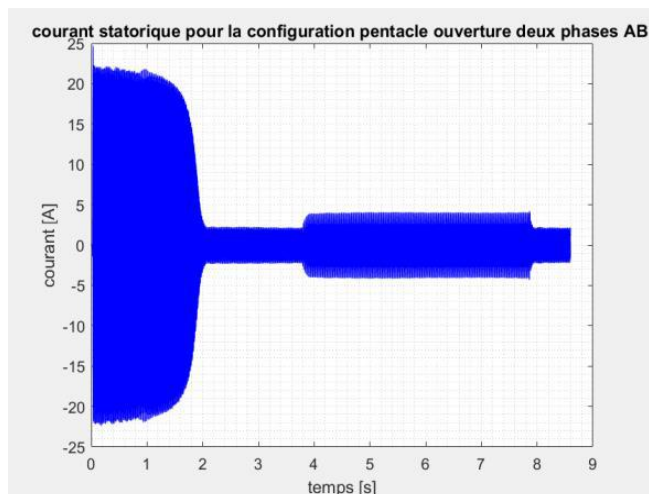


Fig-4-27: Courants statoriques avec ouverture de deux phases adjacentes au stator étoile

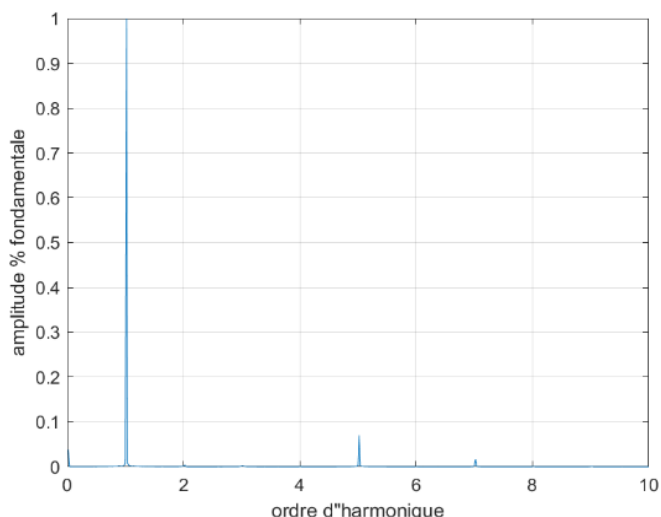


Figure 4-28 : Spectre de raies du courant statorique

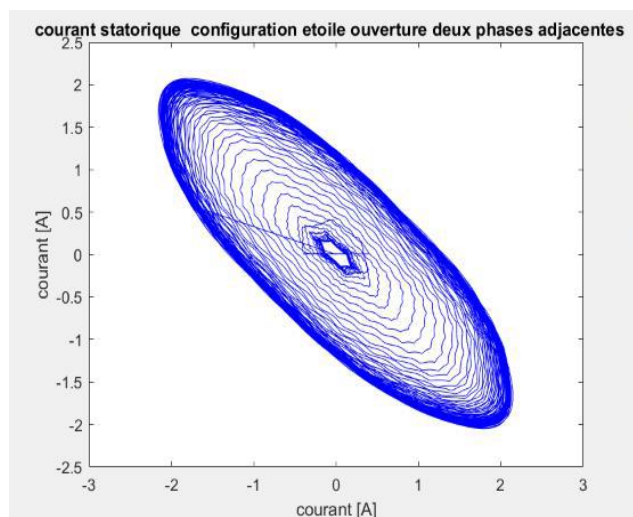


Figure 4-29 : représentation de vecteur courant

Le courant statorique monte jusqu'à ce qu'il atteigne les 4.1A dans la phase C qui est proche du défaut et jusqu'à 2.8A dans la phase D qui est loin du défaut, Fig.3-27.

Le tracé des harmoniques, Fig.3-28, 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. La représentation du vecteur courant représente une ellipse due au déséquilibre entre les phases, Fig.3-29.

4.6.1.2 Ouverture de deux phases non-adjacentes

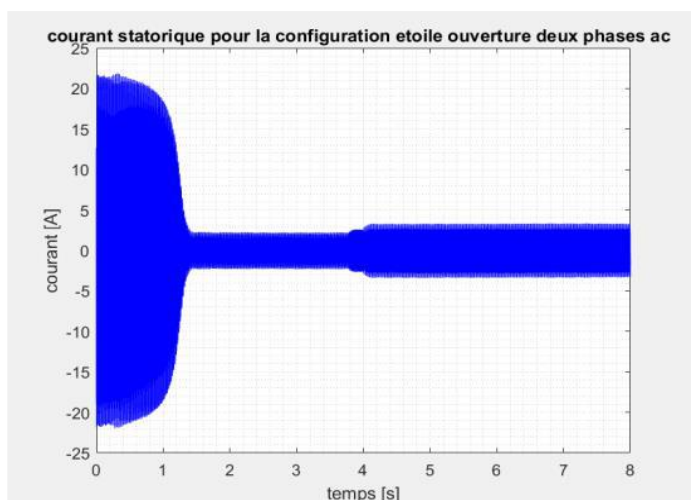


Fig.4-30: Courants statoriques avec ouverture de deux phases non-adjacentes au stator étoile

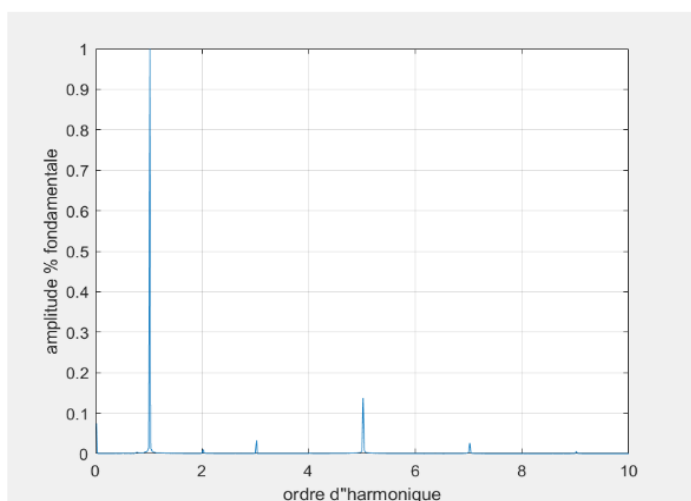
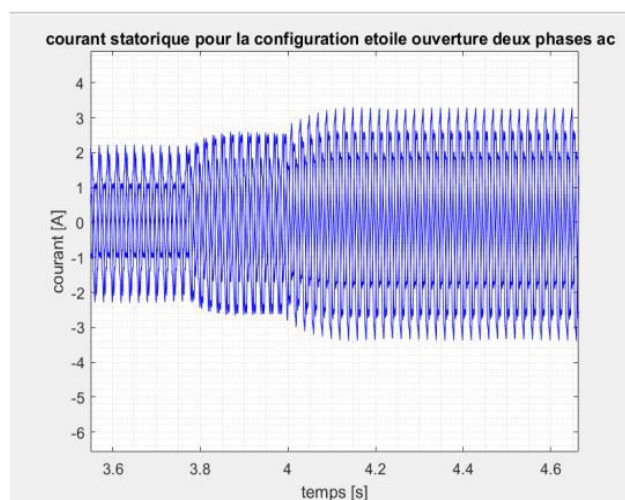


Fig.4-31 : Spectre de raies du courant statorique

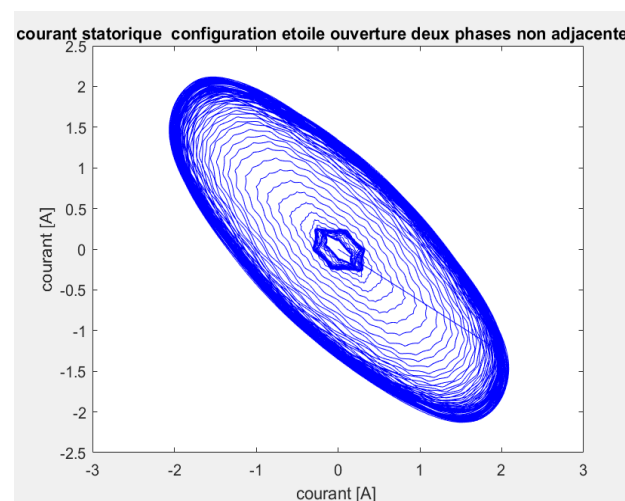


Fig.4-32 : Représentation de vecteur courant

Lorsqu'on ouvre les phases a et c, le courant statorique dans la phase b augmente jusqu'à ce qu'il atteigne 3.5A. Par contre, dans les deux phases d, e le courant stator atteint la valeur 2.6A, Fig.3-30.

On remarque que dans le cas des deux phases adjacentes on a un plus grand déséquilibre comparé au cas non adjacent.

Le tracé des harmoniques Fig.3-31 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 le défaut d'ouverture de deux phases.

4.6.2 Configuration pentagone

4.6.2.1 Ouverture de deux phases adjacentes

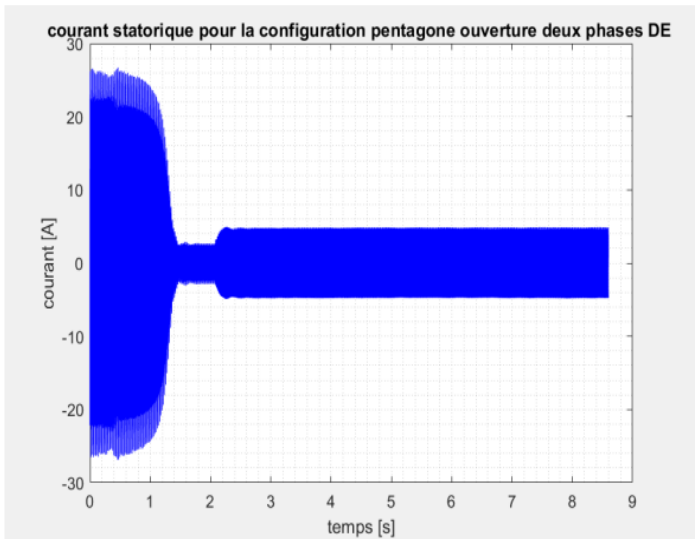


Figure 4-33:: Courants statoriques avec ouverture de deux phases adjacentes au stator étoile

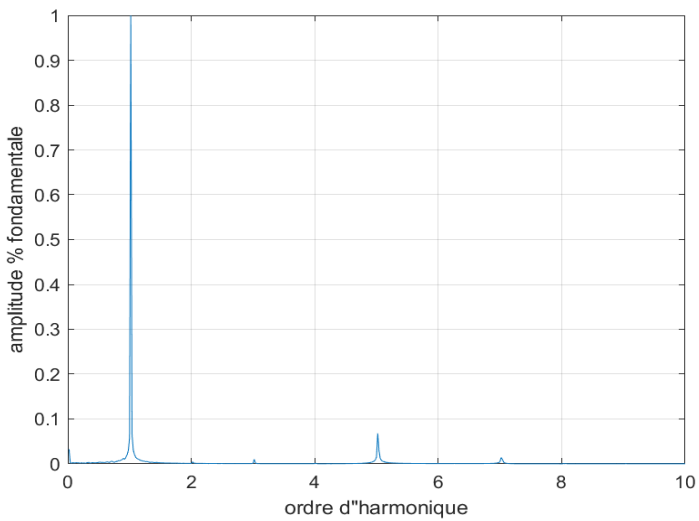
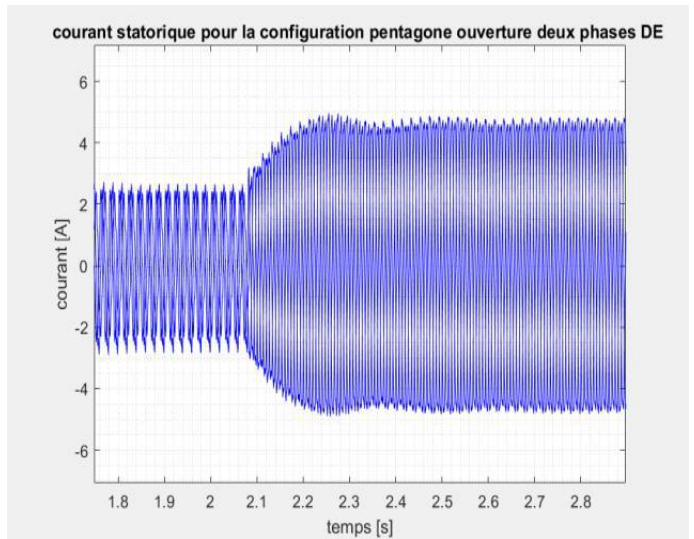


Fig.4-34 : Spectre de raies du courant statorique

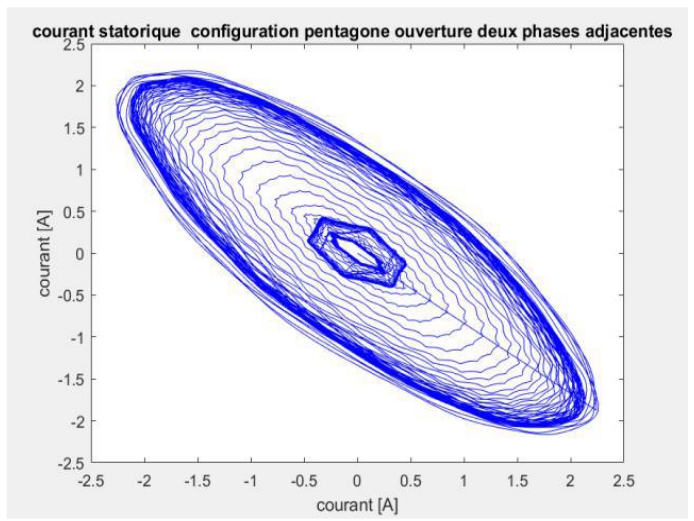


Fig.4-35 : Représentation de vecteur courant

4.6.2.2 Ouverture de deux phases non-adjacentes

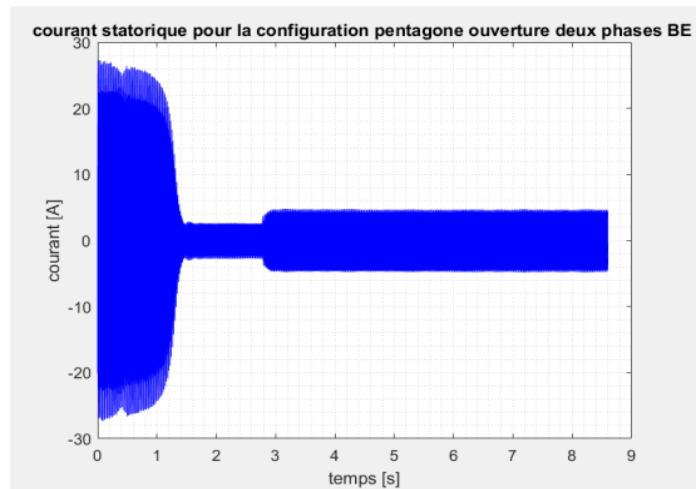
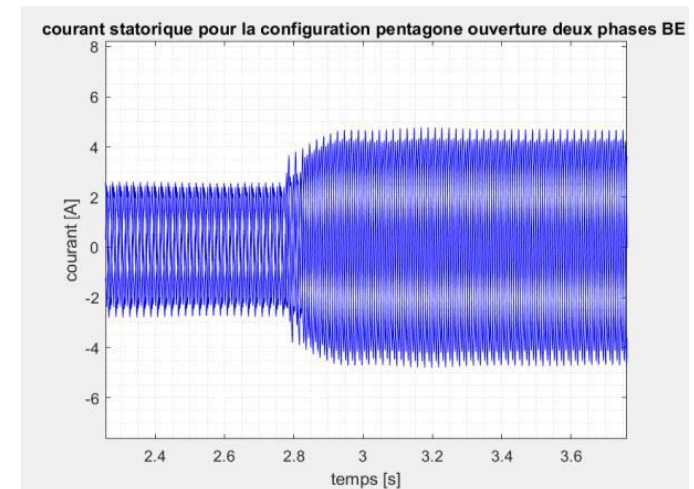


Fig.4-36: Courants statoriques avec ouverture de deux phases non-adjacentes au stator C- pentagone



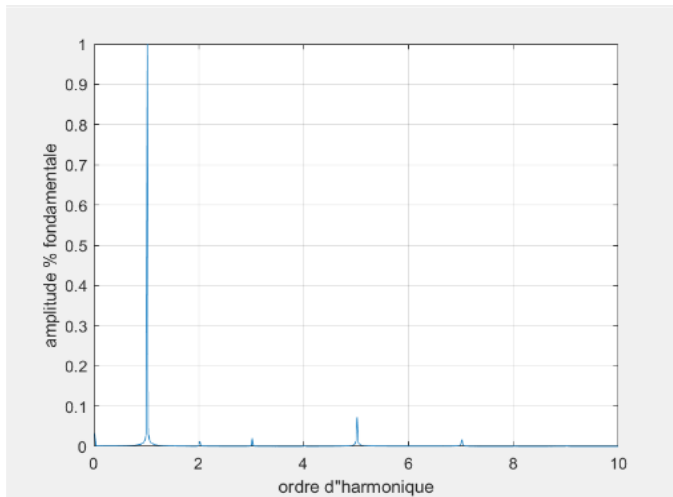


Fig.4-37 : Spectre de raies du courant statorique

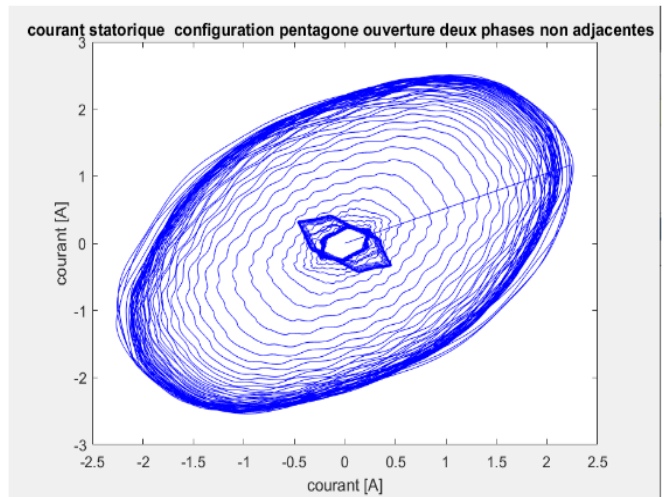


Fig.4-38: Représentation de vecteur courant

Le courant au moment du défaut atteint les 5.1A avec un déséquilibre des courants qui est représenté par la Fig. 3-36

Nous remarquons que les courants statoriques subissent un plus grand déséquilibre lorsque on provoque un défaut de deux phases adjacentes que lorsqu'on provoque un défaut de deux phases qui ne sont pas adjacentes au couplage pentagone et cela est dû aux tensions de phase du moteur de l'enroulement statorique qui sont données par une différence entre les tensions de deux phases d'alimentations adjacentes.

Pour l'ouverture de deux phases non-adjacentes on a :

$$\begin{aligned} U_1 &= U_b \\ U_2 &= U_b \\ U_3 &= U_d \\ U_4 &= U_e - U_d \\ U_5 &= -U_e \end{aligned}$$

L'ouverture de deux phases adjacentes donne:

$$\begin{aligned} U_1 &= 0 \\ U_2 &= U_c \\ U_3 &= U_d - U_c \\ U_4 &= U_e - U_d \\ U_5 &= -U_e \end{aligned}$$

Donc à l'ouverture de deux phases adjacentes, la tension composée s'annule, ce qui provoque un déséquilibre important. 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.

4.6.3 Configuration pentacle

4.6.3.1 Ouverture de deux phases adjacentes

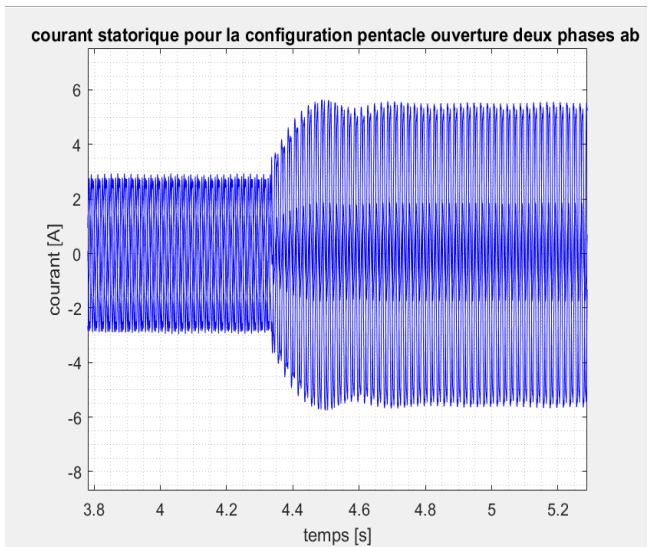
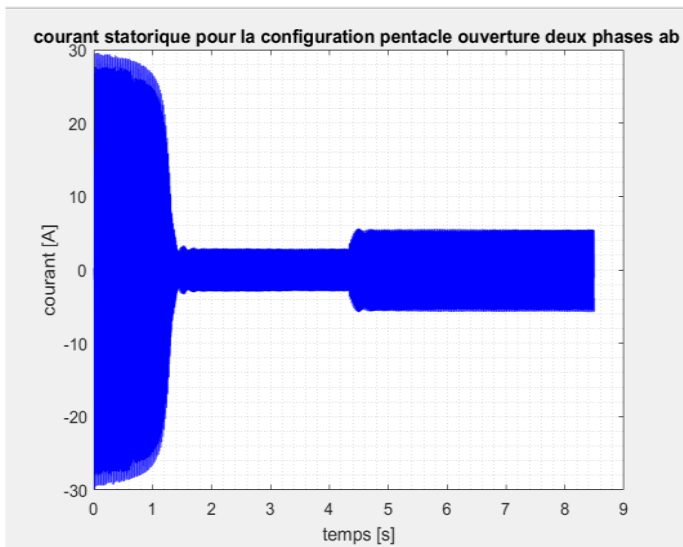


Fig.-4-39: Courants statoriques avec ouverture de deux phases adjacentes au stator C-pentacle

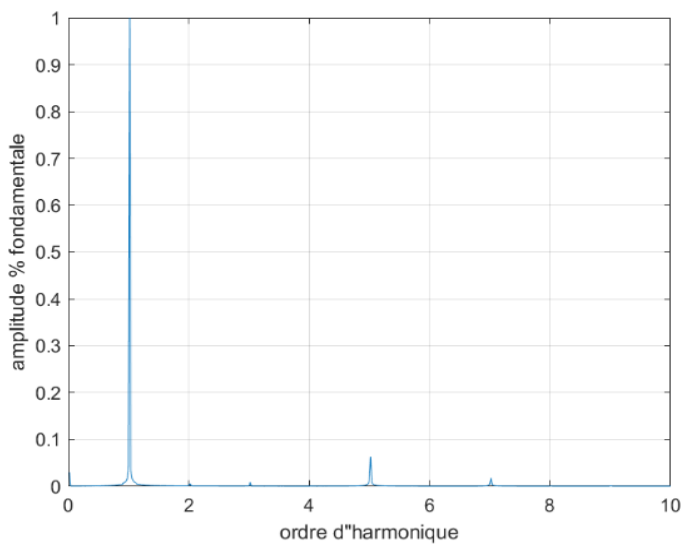


Fig.-4-40: Spectre de raies du courant statorique

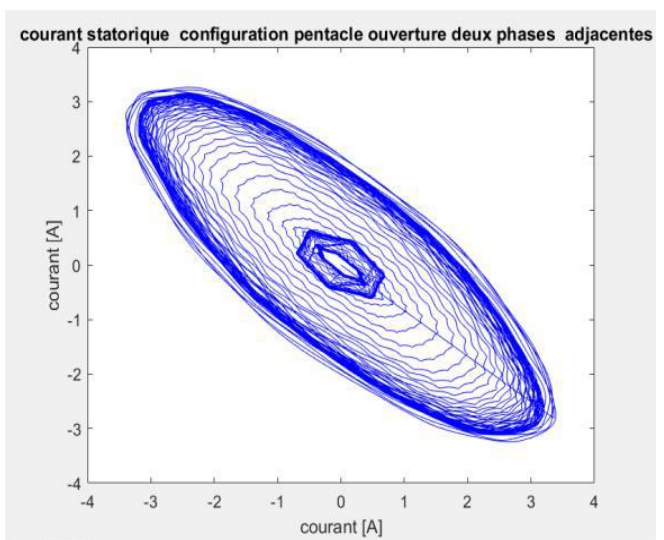


Fig.4-41 : Représentation vectoriel du courant

4.6.3.2 Ouverture deux phases non-adjacentes

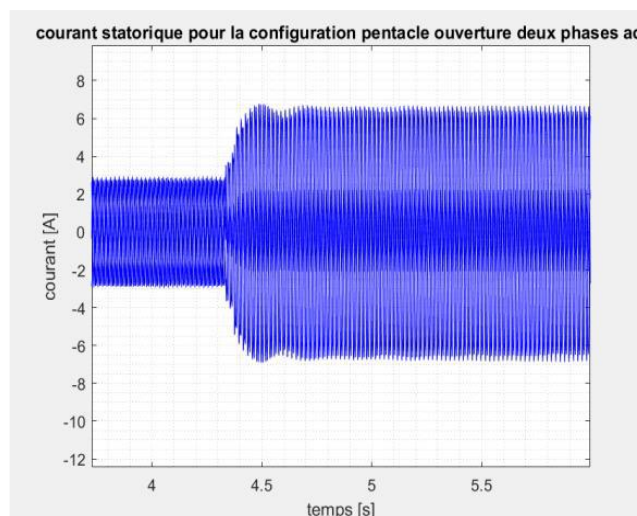
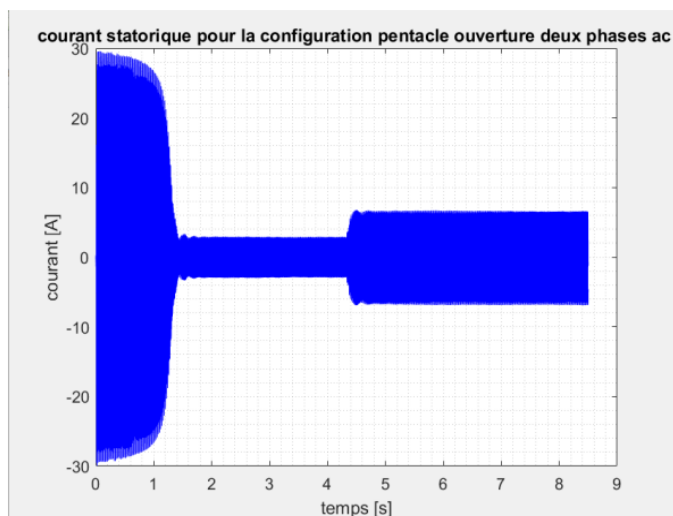


Fig.4-42: Courants statoriques avec ouverture de deux phases adjacentes au stator C-pentacle

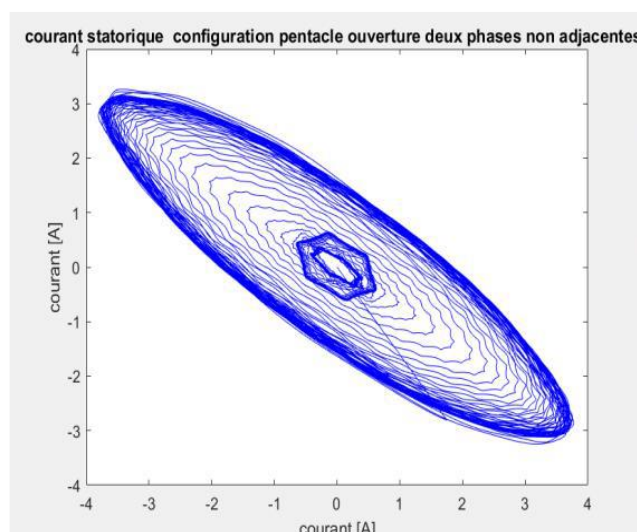
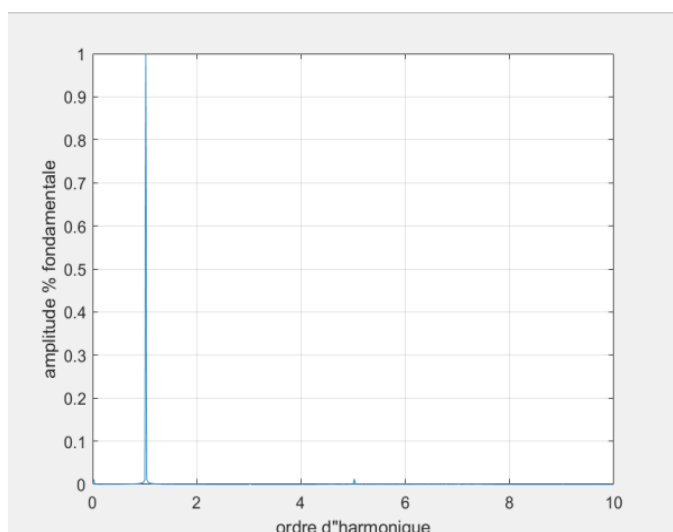


Fig.4-43: Spectre de raies du courant statorique

Fig.4-44: représentation vectoriel du courant

Le courant au moment du défaut atteint 6.3A avec un déséquilibre important entre sur les courants. En effet, les courants statoriques subissent un déséquilibre plus grand lorsqu'on provoque un défaut de deux phases non-adjacentes que lorsqu'on provoque un défaut de deux phases adjacentes. Cela est dû aux tensions des phases de l'enroulement statorique qui s'expriment par une différence entre les tensions de deux phases d'alimentations non-adjacentes.

L'ouverture de deux phases adjacentes (a et b) donne :

$$\begin{aligned} U_1 &= U_c \\ U_2 &= U_e - U_c \\ U_3 &= -U_e \\ U_4 &= U_d \\ U_5 &= -U_d \end{aligned}$$

L'ouverture de deux phases adjacentes (a et c) donne :

$$\begin{aligned} U_1 &= 0 \\ U_2 &= U_e \\ U_3 &= U_b - U_e \end{aligned}$$

$$U_4 = U_a - U_b$$

$$U_5 = -U_d$$

Pour la configuration pentacle, Les tensions de phase du moteur de l'enroulement statorique sont données par une différence entre les tensions de deux phases d'alimentations non adjacentes donc l'ouverture de ces deux phases élimine une tension composée d'alimentation contrairement au cas de deux phases adjacentes ouvertes et c'est la raison de l'apparition du plus grand déséquilibre observé.

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.

4.7 Ouverture de trois phases

Nous alimentons la machine par le réseau triphasé via un transformateur triphasé/pentaphasée avec une tension simple pentaphasée $V = 220V$, et nous faisons fonctionner la machine jusqu'à atteindre le régime permanent puis on ouvre trois phases au stator, et on relève les valeurs de courants au stator

4.7.1 Configuration étoile

4.7.1.1 Trois phases adjacentes

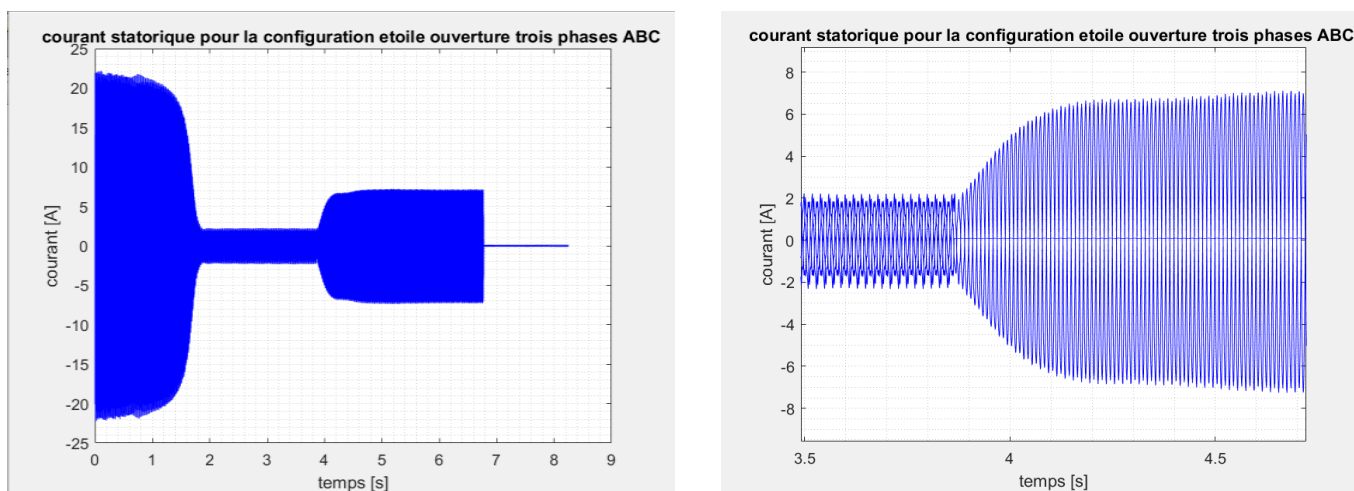


Fig.4-45: Courant statoriques avec ouverture de trois phases adjacentes au stator C-étoile

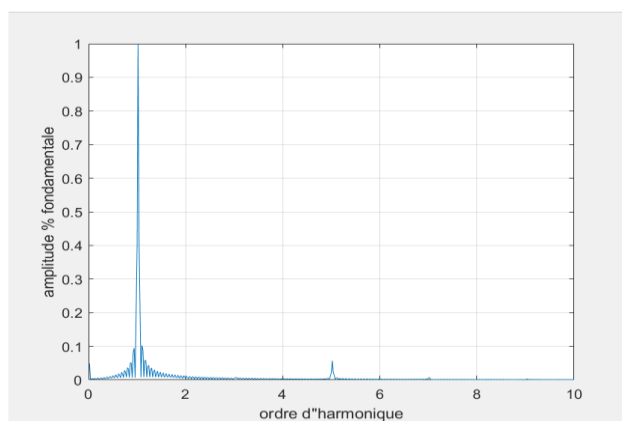


Fig4-46: Spectre de raies du courant statorique

Le courant atteint 7.4A après le défaut et la vitesse de la machine diminue légèrement lors de l'ouverture des phases, on remarque aussi qu'un courant statorique s'annule, cela est dû à l'ouverture de la phase.

4.7.1.2 Ouverture de trois phases non-adjacentes

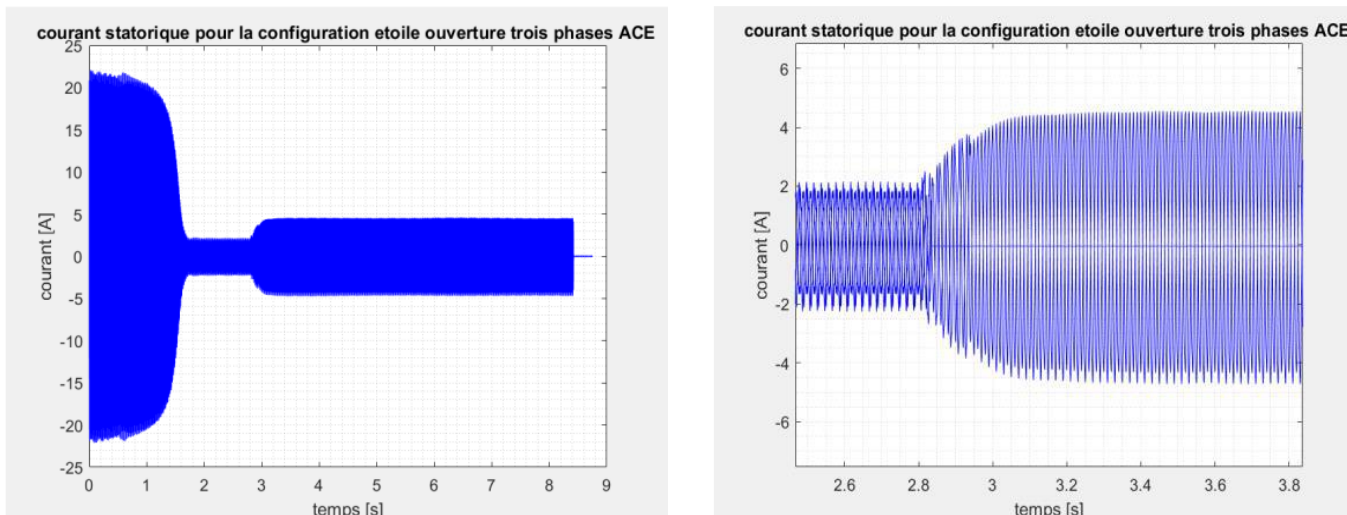


Fig.4-47: Courants statoriques avec ouverture de trois phases non-adjacentes au stator C-étoile

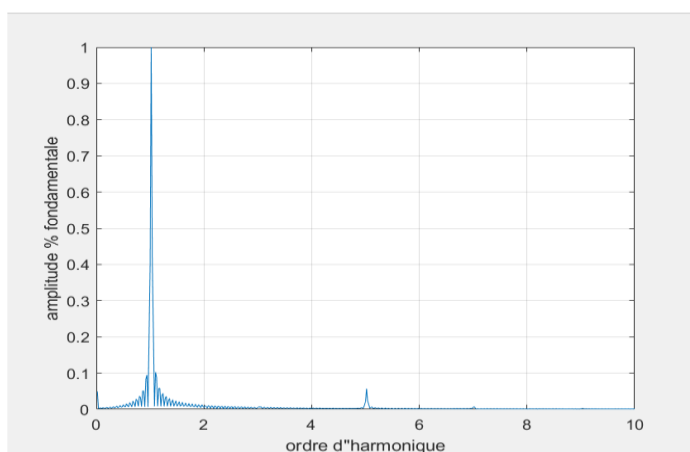


Fig.4-48: Spectre de raies du courant statorique

Le courant atteint 4.2A après défaut et la vitesse de la machine diminue légèrement lors de l'ouverture des phases, on remarque aussi que le courant statorique s'annule et cela est dû à l'ouverture de la phase, Fig.3-47.

On remarque que les courants statoriques dans le cas d'ouverture de trois phases non-adjacentes sont plus faibles que dans le cas des phases adjacentes et c'est à cause du couplage car lorsqu'on ouvre les trois phases, la machine devient une machine biphasée et dans le cas des phases non-adjacentes la disposition spatiale des pôles est plus proche du cas d'une machine diphasée contrairement au cas de trois phases -adjacentes qui a un plus grand déséquilibre.

L'analyse harmonique a donné une diminution de l'amplitude de l'harmonique 5 après défaut d'ouverture de trois phases au stator, Quant à l'harmonique 3, il disparaît comme dans le cas d'une machine asynchrone biphasée .

4.7.2 Configuration pentagone

4.7.2.1 Ouverture de trois phases adjacentes

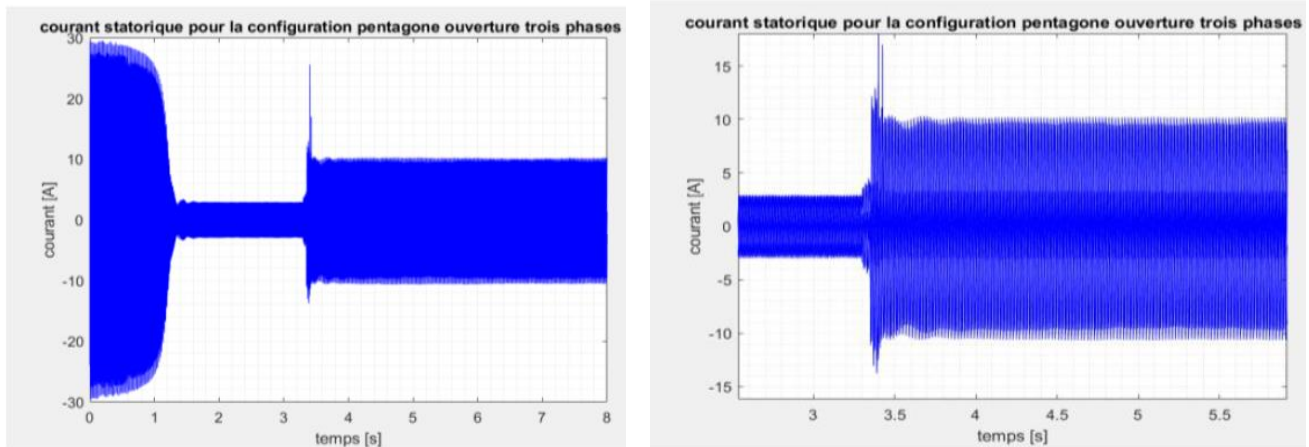


Fig.4-49: Courant statorique après Ouverture de trois phases adjacente C-pentagone

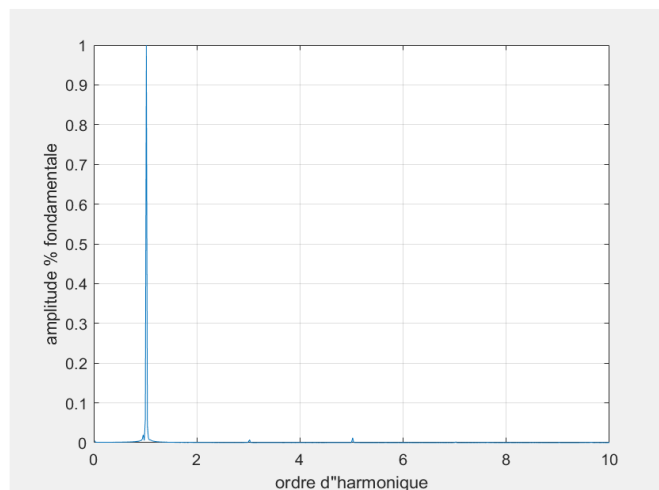


Fig.4-50: Spectre de raies du courant statorique

A partir de la Fig 3-49 ,on remarque que Le courant atteint 10A après le défaut avec un un déséquilibre important qui apparait comme un nouvel état transitoire.

Pour L'analyse d'harmonique Fig 3-50. On remarque la disparition des harmoniques 3 et 5 après l'ouverture de trois phases, cela s'explique par la machine qui se comporte comme une machine biphasée.

4.7.2.2 Ouverture de trois phases non-adjacentes

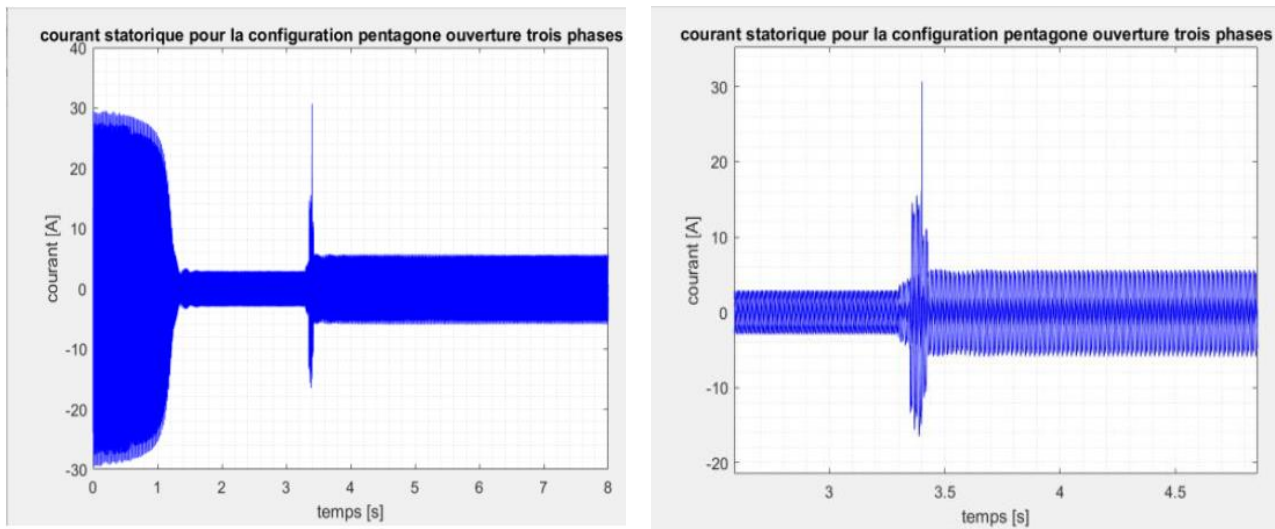


Fig.4-51: Courant statorique après Ouverture de trois phases non-adjacente C-pentagone

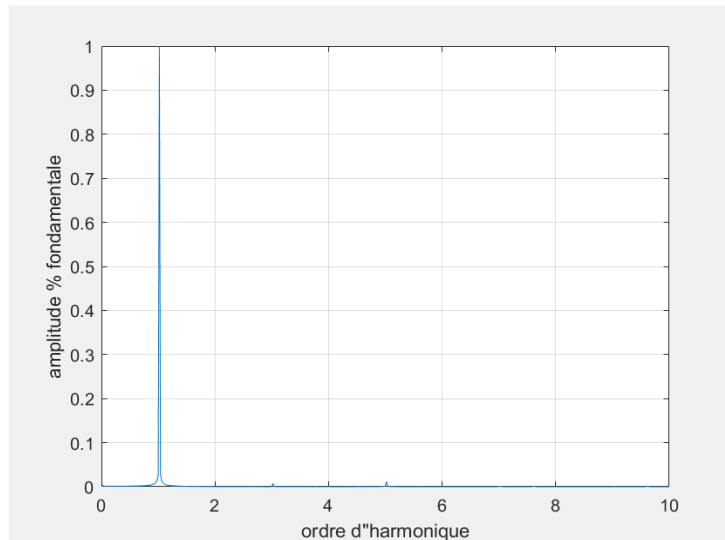


Fig.4-52: Spectre de raies du courant statorique

A partir de la fig 3-51 on remarque que ,Le courant atteint 7A après le défaut avec un grand déséquilibre qui apparait comme un nouvel état transitoire .

Pour l'ouverture de trois phases non-adjacentes (a,c,e) on a :

$$\begin{aligned}
 U_1 &= U_b \\
 U_2 &= U_b \\
 U_3 &= U_d \\
 U_4 &= -U_d \\
 U_5 &= 0
 \end{aligned}$$

L'ouverture de trois phases adjacentes (a,b et c) donne:

$$\begin{aligned}
 U_1 &= 0 \\
 U_2 &= 0 \\
 U_3 &= U_d \\
 U_4 &= U_e - U_d \\
 U_5 &= -U_e
 \end{aligned}$$

Lorsqu'on trois phases ouvertes sont adjacentes on obtient deux tensions composées d'alimentation qui s'annulent et c'est la raison pour laquelle le déséquilibre remarqué est plus grand.

4.7.3 Configuration pentacle

Pour la protection de la machine contre les forts courants dans le cas d'ouverture de trois phases au stator, couplage pentacle, nous avons alimenté la machine par le réseau triphasé via un transformateur triphasé/pentaphasée avec une tension simple $V= 180V$.

4.7.3.1 trois phases adjacentes

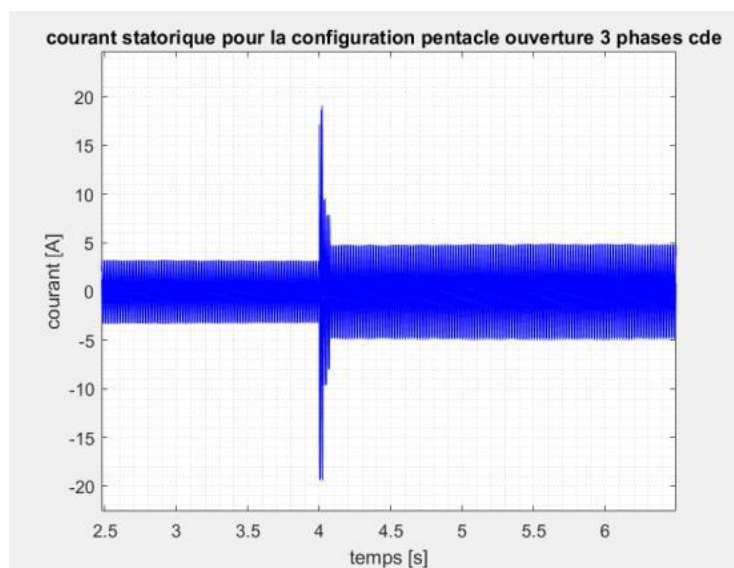
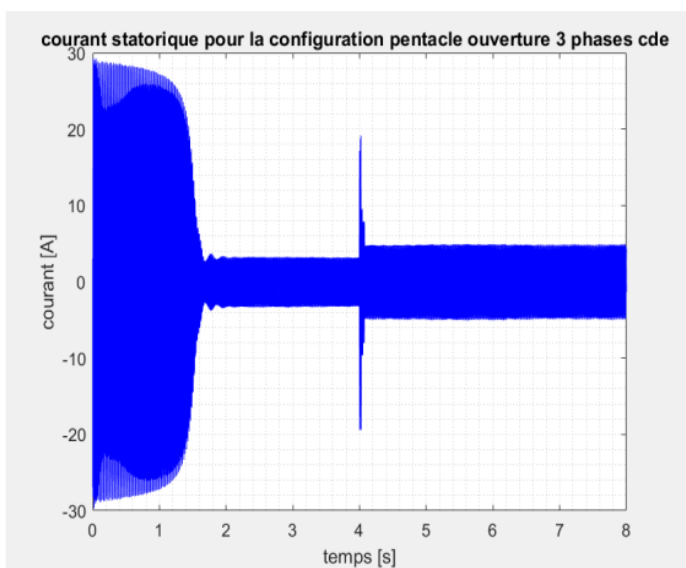


Fig.4-53: Courant statorique après Ouverture de trois phases adjacente C-pentacle

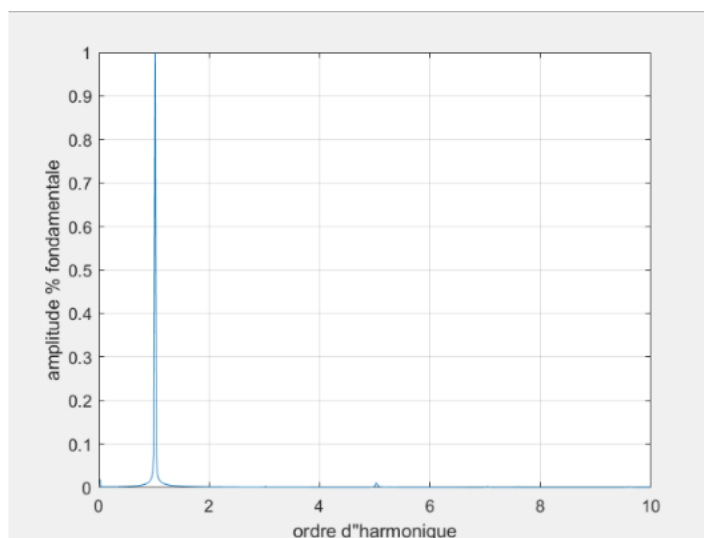


Fig.4-54: Spectre de raies du courant statorique

À partir de la Figure 3-53 on remarque que le courant atteint 5A après le avec un très grand déséquilibre qui apparaît comme un nouvel état transitoire,

Pour l'analyse d'harmonique de la Fig 3-54, on remarque la disparition des harmoniques 3 et 5 après l'ouverture de trois phases, cela s'explique par la machine qui se comporte comme une machine biphase.

4.7.3.2 Ouverture de trois phases non-adjacentes

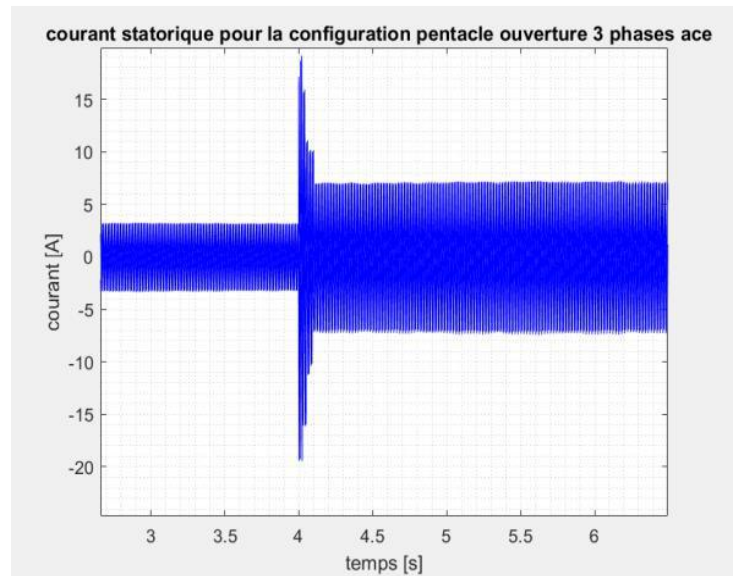
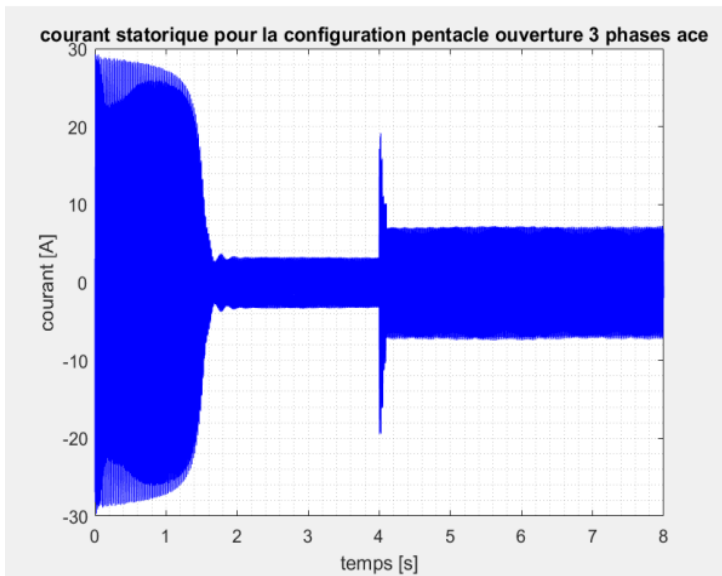


Fig.4-55: courant statorique après Ouverture de trois phases non-adjacente C-pentacle

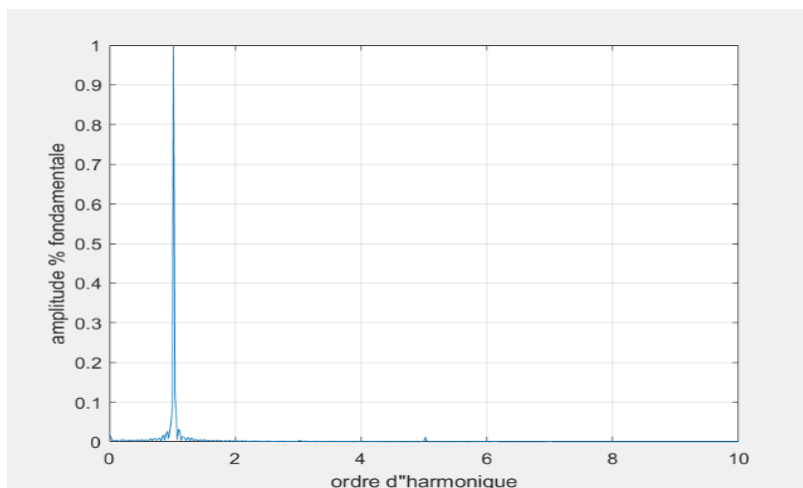


Fig.4-56: Spectre de raies du courant statorique

A partir de la Fig 3-55 on remarque que ,Le courant atteint 7.5A après le défaut avec un grand déséquilibre qui apparait comme un nouvel état transitoire .

Pour L'ouverture de deux phases adjacentes (a ,b et c) donne :

$$\begin{aligned} U_1 &= 0 \\ U_2 &= U_e \\ U_3 &= -U_e \\ U_4 &= U_d \\ U_5 &= -U_d \end{aligned}$$

Pour L'ouverture de deux phases non-adjacentes (a ,c et e)

$$\begin{aligned} U_1 &= 0 \\ U_2 &= 0 \\ U_3 &= U_b \\ U_4 &= U_d - U_b \\ U_5 &= -U_d \end{aligned}$$

Lorsqu'on ouvre trois phases non adjacentes nous obtenons deux tensions composées d'alimentation qui s'annulent et c'est pour cela que le déséquilibre est plus grand

4.8 Conclusion

Les tests expérimentaux effectués sur la machine asynchrone pentaphasée de 7,5 kW, alimentée par transformateur pentaphasée ont permis de valider la fiabilité de son modèle mathématique. Un certain nombre de remarques portent essentiellement sur le régime transitoire et le déséquilibre des courants :

- Le couplage pentacle possède le régime transitoire le plus court comparé à ses homologues, le couplage pentagone et le couplage Etoile
- Lors de l'examen des états de défauts du stator, nous nous sommes concentrés sur le défaut de phase pour différentes connexions d'enroulements statoriques. Nous avons constaté que les moteurs asynchrones pentaphasée peuvent tourner même avec 3 phases en défaut.
- En utilisant la même tension d'entrée pour les trois connexions (étoile, pentagone, pentacle), le courant stator est plus important pour la connexion pentagone plus que pour l'étoile. Pour le cas pentacle, le courant est plus important que pour les deux autres configurations.
- Le couplage pentagone est le plus stable car le déséquilibre entre les phases est minimum, contrairement au couplage pentacle.

Conclusion générale

Les moteurs asynchrones pentaphasés sont de plus en plus utilisés en industrie. Ils présentent des avantages pour les applications de grande puissance.

Avec des performances intéressantes pour les applications d'entraînement électrique qui nécessitent une forte densité de couple, les moteurs asynchrones pentaphasés permettent un fractionnement de la puissance et donc une réduction des tensions commutées à courant donné, une discrétion acoustique et vibratoire et une bonne robustesse notamment en fonctionnement avec défauts.

Ce mémoire de fin d'études traite du diagnostic de défauts et l'analyse du comportement du moteur asynchrone pentaphasé à cage alimentée par transformateur asymétrique pentaphasé dans les cas d'ouvertures d'une, de deux ou de trois phases adjacentes et non-adjacentes au stator. 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, [18].

Lors de notre étude, nous avons élaboré un modèle mathématique de la machine étudiée pour les séquences 1 et 3 dans le référentiel pentaphasé, et celui de R.H.Park. Cette modélisation a également été exploitée par des outils informatiques sous l'environnement MATLAB/SIMULINK pour réaliser des simulations du comportement électromécanique du moteur pour trois types de couplage applicable à une machine pentaphasée, tels que les connexions : étoile, pentagone et pentacle sous différentes conditions de fonctionnement. Les résultats obtenus ont été validés par des essais expérimentaux sur une machine de 7.5kW.

Nous avons comparé les résultats de simulations avec ceux de l'expérimentation et nous avons observé que le modèle construit est assez fiable. Il permet de prédire le comportement dynamique de la machine. Dans le cas des défauts d'ouverture au stator, la machine asynchrone pentaphasée continue de tourner avec une vitesse proche du synchronisme pour différentes connexions contrairement à la machine triphasée conventionnelle qui s'arrête si elle rencontre de tels défauts.

Nous avons observé également que lors du défaut statorique, il apparaît un déséquilibre entre les phases avec un courant plus élevé et de fortes oscillations de couple électromagnétique qui augmente avec l'augmentation du nombre de phases ouvertes.

Nous avons conclu que le meilleur couplage de la machine pentaphasée dans le cas du défaut au stator est le couplage pentagone comparé aux autres couplages, car le déséquilibre entre les phases est minimum, contrairement au couplage pentacle qui atteint des courants très importants avec un déséquilibre assez élevé entre les phases.

Perspectives

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

Bibliographie

- [1] Franck Scuiller. « Développement d'outils de conception de Machines polyphasées à aimants utilisant l'Approche multi-machines » Thèse de Doctorat en Génie Électrique, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Lille (ENSAM). Déc. 2006
- [2] Y. Crévits, "Caractérisation et commande des entraînements polyphasés en mode dégradé d'alimentation", Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2010
- [3] Y.MAUCHE, "contribution à l'étude de la machine asynchrone double étoile, Application à la sureté de fonctionnement ".Thèse de doctorat 2015.
- [4] S.-M.-H. Mosavi, S.-S.-S.-G. Sefid, S.-M. Mirbagheri, and S.-E.-S.-G. Sefid, "Reduction of torque ripple and increase of torque capacity of bldc motor," in PEDES 2011-2012 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, December, pp.1–5
- [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.1: 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, IEEE Transactions on Energy Conversion, December 2012, 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" IEEE Transactions on Industrial Electronics DOI 10.1109/TIE.2016.255001, 2016
- [9] Zaskalicky, P. (2019) "Behaviour of a Five-Phase Pentacle 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/acempoptim44294.2019.9007166
- [10] 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
- [11] Min-Huei Kim, Nam-Hun Kim, and Won-Sik Baik Yeungnam, 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] 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

[13] Ayman S. Abdel-Khalik, Mohamed I. Daoud, Shehab Ahmed, Ahmed A. Elserougi, and Ahmed M. Massoud, "Parameter Identification of Five-Phase Induction Machines With Single Layer Windings", 2014 IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 61, No. 10, pp. 5139 – 5142

[14] Min-Huei Kim, Nam-Hun Kim, and Won-Sik Baik, "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

[15] Hoang Le-Huy, Introduction à Matlab et Simulink, Université Laval, Québec, Canada, Septembre 1998, 28p.

[16] BESSEDIK Toumia, mémoire de fin d'étude (Identification paramétrique d'une machine Asynchrone Pentaphasée), Projet de Fin d'Études, Ecole Nationale Polytechnique, 2020

[17] 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

[18] F. Benabida, M. Ouadah Diagnostic de défaut au stator et au rotor par estimation paramétrique de la machine asynchrone à cage d'écureuil. PFE en Électrotechnique Alger, École Nationale Polytechnique : juin 2006

ANNEXE

Paramètres généraux de la machine asynchrone pentaphasée :

Nom	Valeur	Unités
Puissance nominale	7500	W
Tension nominale	220	V
Courant nominal	8	A
Vitesse nominale	3000	Tr/min
Fréquence nominale	50	Hz
Rendement	87%	
Facteur de puissance	0.88	
Poids	70	Kg

Tableau 8-1 : Paramètres généraux de la machine asynchrone pentaphasée