

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
la Recherche scientifique



Université d'EL-Oued

Faculté des Sciences et de la Technologie

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme de

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et de la Technologie

Filière : Génie Électrique

Spécialité: Contrôle et Diagnostic des Systèmes Électriques

Thème

Alimentation d'un Moteur asynchrone
Par Onduleur à deux Niveaux

Dirigé par:
Zegueb Boubaker

Réalisé par:
Boualem sassa
Triki djihad
Liribi hanan

Soutenu: Juin 2014

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

A l'esprit de mon père,

A ma très chère mère,

À mes très chères sœurs et frère

À ma grande famille.

À tous mes amis.

À tous les étudiants de CDSE

Boualem sassa

DEDICACE

A celle qui ma toujours bercé avec l'amour et l'affection

Oumi

A mon chère père .

A mes Sœurs et frères, Sally et Koferane, Sonia et Rafife

Daline et Aridje

Cette mémoire à mes frères: Mohamed et Moni et Ismail et Ala

A mon ancle : Hassan et Kamel

A mon camarade Sassia

A tous mes amis

A tous mes collègues des promotions de licence

2014

Triki djihad

DEDICACE

Avant tous, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour

Réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce modeste travail :

Pour tous mes professeurs distingués

A mes très chers parents, que dieu les garde et

les protège pour leur soutien moral et financier,

pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.

Cher à mon grand-père (ibrahim charfi) pour me soutenir pendant toute la durée de mes études

Et surtout à mon cher mari (ALI)

A mes frères

A mes sœurs

A ma grande famille

Aux chers amis khadidja , soltana sassia et djihade

A tous les amis (es) d'études surtout ceux d'CDSE promotion 2014

hanan.

REMERCIEMENT

Nous tenons à remercier tout premierement Dieu le tout puissant pour la volonté ,la santé ,qu'il nous a donné durant toutes ces longues années. Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur, **Mr.Zegueb Boubaker** pour suivi continuel tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils.Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidés de pré ou de loin à accomplir ce travail. Nous tenons à remercier vivement **Barir Naziha, Guia Reguia, Fadila**.Nous remerciment à tous les enseignants de la faculté des sciences et technologie

Tableau des matières

Tableau des matières	I
Résumé.....	IV
Notations et symboles	VII
Introduction générale	IX

Chapitre I : Description des moteurs asynchrones

I.1. Introduction	1
I.2. Constitution la machine asynchrone triphasé	1
I.2.1. Le stator	2
I.2.2. Le rotor	2
I.2.2.1. Le rotor à cage d'écureuil.....	3
I.2.2.2.Le rotor bobiné.....	5
I.2.3. Les organes mécaniques.....	5
I.2.3.1. La carcasse	5
I.2.3.2. L'arbre du rotor	5
I.2.3.3. la plaque à bornes.....	5
I.2.3.4. Le ventilateur	5
I.2.3.5. Les roulements	5
I.3. Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé	6
I.3.1. Avantages et inconvénients du moteur asynchrone à cage d'écureuil	6
I.3.1.1.Avantages.....	6
I.3.1.2.Inconvénients	6
I.3.2. Avantages et inconvénients du moteur à rotor bobiné	6
I.4. Les défauts de la machine asynchrones:.....	7
I.4.1.Défauts rotorique.....	7
I.4.2.Défauts statorique.....	7
I.5.Les couplages moteurs.....	7
I.5.1.Le couplage étoile	7
I.5.2.Le couplage triangle.....	8
I.5.3.Tableau récapitulatif sur les couplages.....	8
I.6.La plaque signalétique d'un moteur asynchrone triphasé	9
I.6.2.Interprétation les symboles électriques de la plaque signalétique.....	9
I.7.Bilan des puissances d'un moteur asynchrone	10

I.8.conclusion	11
----------------------	----

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone

II.1. Introduction	12
II.2.Modèle triphasé de la machine asynchrone.....	12
II.2.1. Hypothèses simplificatrices	12
II.2.2. Représentation schématique d'une machine asynchrone	13
II.2.2.1.Equations électriques :	13
II.2.2.2.Equations magnétiques	14
II.2.2. 3.Equations mécaniques	15
II.2.3.Modèle de Park de la machine asynchrone	15
II.2.3.1.Transformation de Park.....	15
II.2.3.2.Application de la transformation de PARK à la machine asynchrone	16
II.2.4.Choix de référentiel	17
II.2.4.1.Les équations de la machine dans le repère (α, β)	18
II.2.4.2. Les équations de la machine dans le repère (d, q)	19
II.2.4.3. Les équations de la machine dans le repère (x, y)	20
II.2.5. Choix de l'orientation du repère d'axes (α, β) :	21
II.2.5.1. - Équations électriques	21
II.2.5.2. Equations magnétiques	21
II.2.5.3. Equation du couple électromagnétique.....	22
II.3. Simulation et interprétation	22
II.3.1 Schéma bloc de simulation du moteur	23
II.3.2.Résultats de simulation à vide et en charge.....	23
II.3.2.1.Les Résultats de la simulation d'une machine asynchrone à vide	23
II.3.2.2.Résultats de simulation de la machine asynchrone en charge ($C_r=10N.m$).....	25
II.4.interprétation des résultats de simulation	27
II.4.1.simulation à vide.....	27
II.4.2. simulation en charge	28
II.5.Conclusion.....	28

Chapitre II : Association machine asynchrone-onduleur

III.1Introduction.....	29
III.2. Définition d'onduleur	29
III.2.1 Principe de fonctionnement d'un onduleur.....	29
III.2.3.Constitution de l'onduleur triphasé	31
III.2.4.Classification des onduleurs	31
III. 2.4.1 Onduleur autonome	31

III. 2.4.2 Onduleur non autonome:	31
III.2.5.Différents types d'onduleurs pour alimentation des machines asynchrones	32
III.2.5.1.Onduleur de courant	32
III.2.5.2.Onduleur de tension.....	32
III.3.Modélisation de l'onduleur	33
III.5.simulation de l'onduleur.	36
III.6.Association onduleur - Machine asynchrone	37
III.6.1.Simulation de la MAS associé avec onduleur à deux niveaux	38
III.6.1.1.Le Schéma de bloc.....	38
III.6.2.Résultats de simulation association machine asynchrone - onduleur	38
III.6.2.1.Pour $f=50\text{Hz}$	38
III.6.2.3.Pour $f=30\text{Hz}$	41
III.6.3.Interprétation des résultats	42
III.7. conclusion	42
Conclusion générale.....	X
Bibliographie.....	XI

Résumé

L'objectif principal de ce mémoire consiste à appliquer par simulation d'un onduleur de tension à deux niveaux à la machine asynchrone.

Avant d'aborder cette étude. Nous avons commencé par une étude générale sur les moteurs asynchrones. Cette étude nous a permis de connaître les moteurs et les précautions à prendre en vue d'une bonne exploitation et les conditions à satisfaire pour faire un bon choix.

Dans la deuxième partie nous avons présenté le modèle mathématique de la machine en vue d'une alimentation par réseau classique. La modélisation de la machine asynchrone est basée sur la transformation de park, ce qui a permis de simplifier les équations de la machine asynchrone.

La troisième partie est consacrée à onduleurs et la simulation de l'association de l'onduleur de tension à deux niveaux avec la machine asynchrone, puis voir les courbes du couple, vitesse et courant et l'influence de la variation de fréquence sur la vitesse de rotation

LISTE DE FIGURES

FigI.1.a-machine asynchrone à cage.....	2
FigI.1.b-moteur asynchrone à bague.....	3
FigI.2.a-stator d'une machine asynchrone	3
FigI.3.Rotor à simple cage.....	4
FigI.4.a -rotor à double cage	5
FigI.4.b –caractéristique du moteur à double cage.....	5
FigI.5 -rotor à bagues.....	6
FigI.6.a- couplage étoile.....	9
FigI.6.b- couplage triangle.....	9
FigI.7 la plaque signalétique d'un moteur asynchrone.....	10
FigI.8. Bilan de puissance.....	11
Fig II- 1 : Représentation schématique d'une MAS triphasée.....	14
Fig II.2 Passage du triphasé au biphasé.....	16
Fig. II.3 représentation des axes triphasés réels de la machine	19
Fig. II.4 schéma bloqué d'une machine asynchrone sans onduleur	24
FigII.5La vitesse d'une machine asynchrone à vide.....	24
FigII.6le couple électromagnétique d'une machine asynchrone à vide.....	25
FigII.7les courants statoriques d'une machine asynchrone à vide	25
FigII.8les courants rotoriques d'une machine asynchrone à vide	26
FigII.9 la vitesse en charge	26
FigII.10 le couple électromagnétique en charge.....	27
FigII.11les courants statoriques d'une machine asynchrone en charge.....	27
FigII.12les courants rotoriques d'une machine asynchrone en charge.....	28
FigIII.1le schéma symbolique de l'onduleur	30
Fig.III.2a.Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 1er demis cycle.....	31
Fig.III.2.b.Fonctionnementet signal de l'onduleur dans le 2émedemis cycle	31
figIII.2.c. Signal complet de sortie.....	31
Fig.III.3Montage d'un onduleur triphasé.....	32
FigIII.4. Convertisseur avec onduleur de courant	33
FigIII.5. Redresseur - onduleur de tension	34
Fig III.6 Schéma de principe de l'onduleur de tension.....	34
Fig III.7. Représentation des interrupteurs.....	35
Fig.III. 8principe techniquetriangulo-sinusoidale.....	36

FigIII.9. Schéma bloc de simulation de l'onduleur.....	37
FigIII.10.Principe de la commande par M.L.I triangle-sinusoïdal.....	38
FigIII.11.Schéma bloc de la machine asynchrone associée à un onduleur à deux niveaux.....	39
FigIII.12.Les tension delivrée par onduleur.....	39
FigIII.13.La vitesse d'une machine asynchrone associé avec onduleur à deux niveaux $f=50\text{Hz}$.....	40
FigIII.14 le couple d'une machine asynchrone associé avec onduleur à deux niveaux $f=50\text{Hz}$.....	40
FigIII.15. Les courants statoriques d'une machine asynchrone associé avec onduleur à deux niveaux $f=50\text{Hz}$.....	41
FigIII.16. Les courants rotoriques d'une machine asynchrone associé avec onduleur à deux niveaux $f=50\text{Hz}$.....	41
FigIII.17.la vitesse d'une machine asynchrone associé avec onduleur à deux niveaux $f=40\text{Hz}$.....	42
FigIII.18. le couple d'une machine asynchrone associé avec onduleur à deux niveaux $f=40\text{Hz}$.....	42
FigIII.19.la vitesse d'une machine asynchrone associé avec onduleur à deux niveaux $f=30\text{Hz}$.....	42
FigIII.20. le couple d'une machine asynchrone associé avec onduleur à deux niveaux $f=30\text{Hz}$.....	43

Notations et symboles

R_s	Résistance d'enroulements statorique
R_r	Résistance d'enroulements rotorique
L_{ss}	Inductance cyclique propre statorique
L_{rr}	Inductance cyclique propre rotorique
M_s	Inductance mutuelle entre deux phases statorique
M_r	Inductance mutuelle entre deux phases rotorique
M_{sr}	Inductance mutuelle entre une phase du stator et une phase du rotor
M	Inductance mutuelle maximale
a, b, c	Indice des phases statorique
A, B, C	Indice des phases rotorique
V_s	Tension statorique
V_r	Tension rotorique
I_s	Courant statorique
I_r	Courant rotorique
Φ_s	Flux statorique
Φ_r	Flux rotorique
X_a, X_b, X_c	les grandeurs statoriques et rotoriques dans le système triphasé
X_u, X_v	les grandeurs statoriques et rotoriques dans le système biphasé (u,v)
X_0	Composante homopolaire
θ_r	L'angle entre phase rotorique et l'axe u
θ_s	L'angle entre phase statorique et l'axe u
θ	L'angle fait par une phase rotorique par rapport à la phase statorique

ω_s	La vitesse angulaire de rotation du système d'axe biphasé (u, v)
ω_r	La vitesse rotorique
C_e	Couple électromagnétique
P	Nombre de pair de pôles
Ω	Vitesse mécanique du rotor
C_r	Couple résistant
(α, β)	Axes correspondant à la référence liée au stator
(d, q)	Axes correspondant à la référence liée au champ tournant
(x, y)	Axes correspondant à la référence liée au rotor
Φ_{rd}, Φ_{rq}	Flux rotorique selon l'axe (d, q)
Φ_{sd}, Φ_{sq}	Flux statorique selon l'axe (d, q)
V_{ds1}, V_{qs1}	Composante la tension avant componction
i_a, i_{sq}	Composantes de couple.
i_f, i_{sd}	Composantes de flux.
i_{ds}, i_{qs}	Composant des courants statorique instantanés selon l'axe (d, q)

Onduleur

MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion.
U_c	Source de tension continue de l'onduleur.
V_{abc}	Tension de sortie de l'onduleur A, B ou C.
$V_{réf}$	Tension de 2références.
V_m	Amplitude de la tension de référence.
V_p	Porte use triangulaire.
ω	Pulsation électrique.
$F_{réf}$	Fréquence de la tension de référence.
F_p	Fréquence de la porte use triangulaire.

Introduction générale

Les machines à courant alternatif sont largement utilisées dans l'industrie. Plus de 50 million de nouvelles machines sont installées chaque année. En générale, les machines sont dimensionnées pour des applications à vitesse et à couple constant afin d'assurer les meilleures caractéristiques. Par contre, dans le cas d'un couple de charge réduit où d'une vitesse de fonctionnement en dessous de la valeur nominale, le rendement de la machine ainsi que le facteur de puissance diminuent considérablement.

Les moteurs asynchrones remplacent de plus en plus les moteurs à courant continu (MCC) dans les applications industrielles. Ils présentent l'avantage d'être robustes, de construction simple et peu coûteux. Le mémoire comporte trois chapitres.

Dans le premier chapitre, nous rappelons la description des moteurs asynchrones et le Principe de fonctionnement ce qui nous a permis d'avoir une bonne connaissance des moteurs. Alors Cette étude nous a permet de connaître les moteurs et Les précautions à prendre en vue d'une bonne exploitation et les conditions à satisfaire pour faire un bon choix.

Au second chapitre nous présenterons le principe de modélisation et de simulation d'une Machine asynchrone à cage d'écureuil. La première partie comprendra la modélisation de la machine asynchrone à cage qui permettra d'établir le modèle mathématique de la machine étudiée. Nous réalisons ensuite le modèle de simulation de la machine asynchrone à cage dans

L'environnement MATLAB/SIMULINK.

Dans le troisième chapitre nous présenterons la partie puissance de la structure de commande des machines asynchrones qui constitue l'alimentation et nous parlerons également du principe de fonctionnement de l'onduleur triphasé à deux niveaux, et nous avons modélisé l'association convertisseur moteur asynchrone en vue de l'étude de ses performances, l'onduleur étant contrôlé par la stratégie triangulo- sinusoïdale.

I.1. Introduction

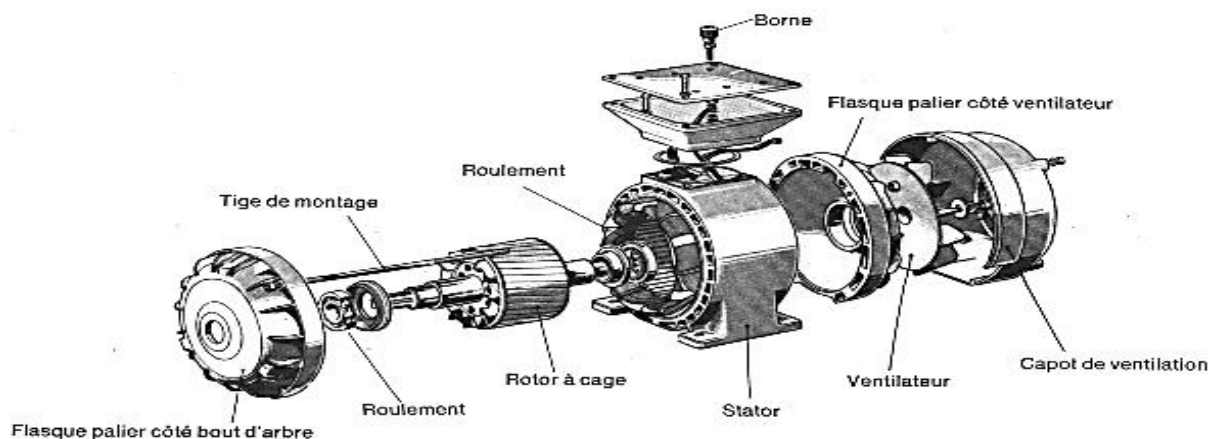
Une bonne connaissance de la machine asynchrone est nécessaire avant de procéder à leur alimentation. C'est la raison pour laquelle nous proposons ce chapitre pour mieux connaître la machines asynchrones.

Le moteur asynchrone est de beaucoup le plus utilisée dans l'ensemble des applications industrielles, du fait de sa facilité de mise en œuvre, de son faible encombrement .de son bon rendement et de son excellente fiabilité. Son seul point noir est l'énergie réactive, toujours consommée pour magnétiser l'entrefer.

I.2. Constitution la machine asynchrone triphasé

Le moteur asynchrone est constitué des principaux éléments suivants

- le stator (partie fixe):** constitué de disques en tôle magnétique portant les enroulements chargés de magnétiser l'entrefer.
- le rotor (partie tournante):** constitué de disques en tôle magnétique empilés sur l'arbre de la machine portant un enroulement bobiné ou injecté.
- les organes mécaniques:** permettant la rotation du rotor et le maintien des différents sous-ensembles.



FigI.1.a-machine asynchrone à cage.

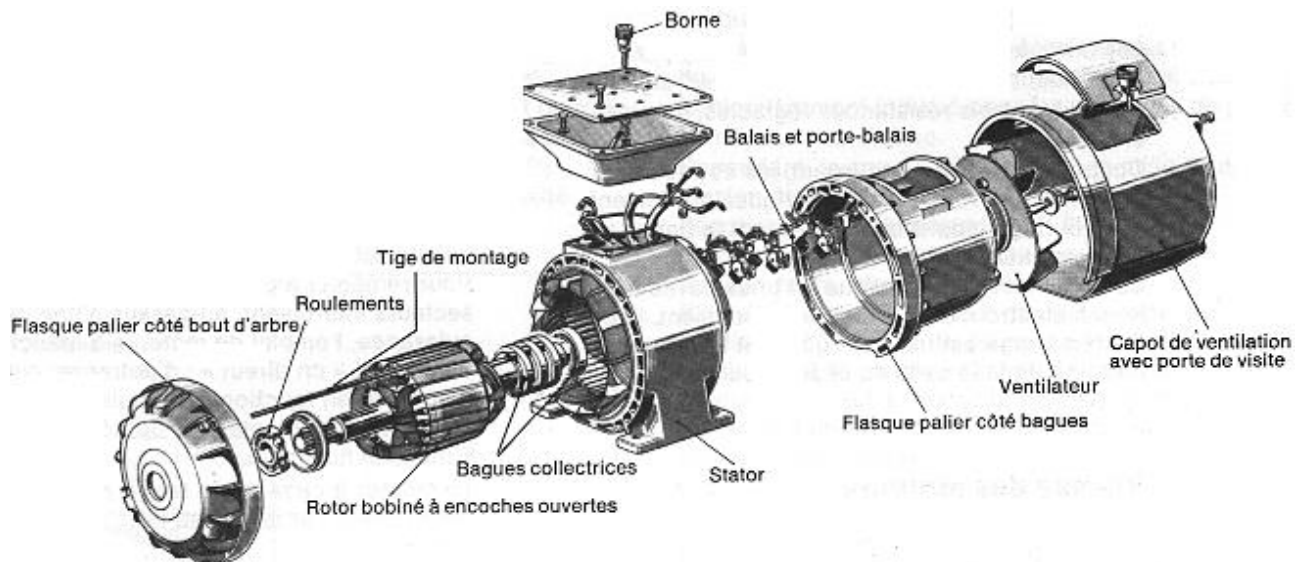


Fig1.1.b-moteur asynchrone à bague.

I.2.1. Le stator (fig1.2-a)

Il est constitué d'une enveloppe à l'intérieur de laquelle est logé un empilage de tôles magnétiques isolées entre elles par un vernis et munies d'encoches (fig1.2.b). Ces encoches sont réparties d'une façon uniforme et permettent de loger les bobinages.

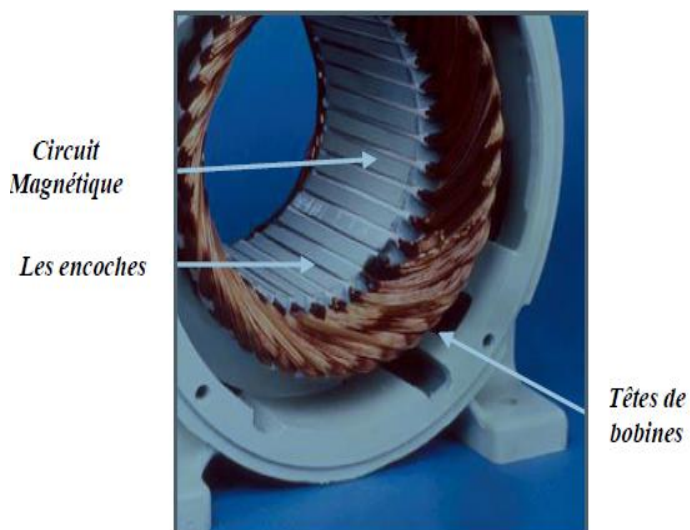


Fig1.2.a-stator d'une machine asynchrone



fig1.2.b-tôles magnétiques isolées

I.2.2. Le rotor

C'est la partie mobile de la machine ; il est placé à l'intérieur du stator, et constitué d'un empilage de tôles d'acier formant un cylindre claveté sur l'arbre du moteur.

- ❖ Il tourne à une vitesse inférieure à la vitesse du champ tournant.
- ❖ Il est placé dans un champ tournant par rapport à lui.

- ❖ Il doit être feuilleté pour réduire les pertes par courant de Foucault. Parmi les rotors on distingue.

I.2.2.1. Le rotor à cage d'écureuil (rotor en court-circuit)

I.2.2.1.1 Rotor à simple cage

Des encoches ou « trous » sont répartis à la périphérie c'est dans ces encoches que l'on placera des barres en cuivre servant de conducteurs. Ces conducteurs sont court-circuités à chaque extrémité par une couronne en cuivre l'ensemble formant une cage d'écureuil.

Ces moteurs ont un couple de démarrage relativement faible et l'intensité absorbée supérieur à I_n .



FigI.3. Rotor à simple cage.

I.2.2.1.2. Rotor à double cage

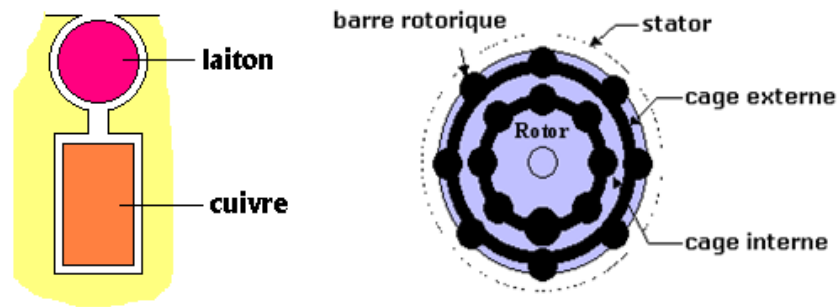
Pour les moteurs à cage, il n'est pas possible de connecter un rhéostat de démarrage; nous pouvons cependant obtenir un effet se rapprochant de celui-ci en modifiant la cage rotorique.

- Le moteur à double cage arrive à concilier la simplicité et la robustesse du moteur à cage et les qualités du rotor bobiné.

Le rotor possède deux cages concentriques (figI.4):

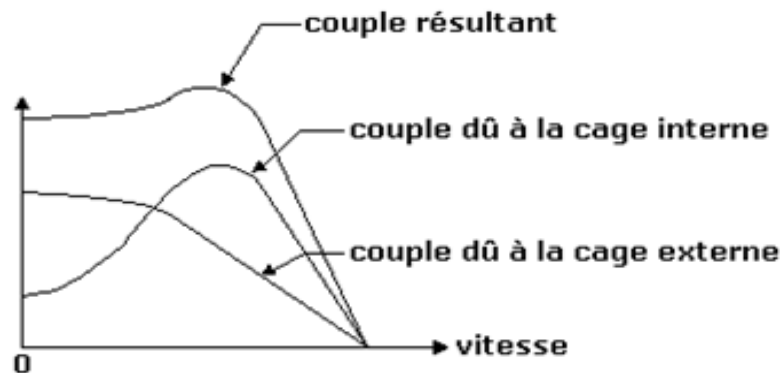
- la cage externe, (barres de laiton), la cage externe de faible section est la plus proche du stator; sa résistance est élevée et son inductance et de fuites faibles
- la cage interne, en cuivre, plus inductive parce qu'entourée de fer. est de forte section,

Sa résistance est faible et son inductance de fuites élevée en raison de son éloignement du stator.



FigI.4.a -rotor à double cage

Au démarrage, la fréquence rotorique $g.f$ est égale à 50 Hz; les réactances de fuites sont prépondérantes à cette fréquence; la cage externe a donc le plus fort courant et fait écran magnétique à la cage interne; le moteur démarre donc avec un rotor de forte résistance : le courant appelé est moyen et le couple élevé. Au fur et à mesure de l'augmentation de vitesse, la fréquence rotorique diminue et les résistances deviennent prépondérantes; le courant dans la cage interne augmente tandis que celui dans la cage externe diminue. A vitesse nominale, le moteur fonctionne quasiment sur la cage interne de faible résistance donc avec un faible glissement.



FigI.4.b –caractéristique du moteur à double cage.

I.2.2.1.3. Rotor à encoches profondes

On peut obtenir un effet similaire tout en simplifiant la construction du rotor en donnant aux encoches une forme allongée; le bobinage est réalisé en coulant de l'aluminium sous pression dans les encoches. Les barres du rotor, parcourues par un courant de fréquence $g.f$ et noyées dans le fer, sont soumises à l'effet de peau : le courant passe à la surface de la barre, dans une pellicule d'épaisseur d'autant plus faible que la fréquence est élevée. Au démarrage, $g = 1$ donne une fréquence de 50 Hz; la section utile de la barre est faible donc sa résistance élevée. Au fur et à mesure du démarrage l'augmentation de la vitesse diminue le glissement donc la fréquence rotorique; l'épaisseur de peau augmente donc la résistance diminue.

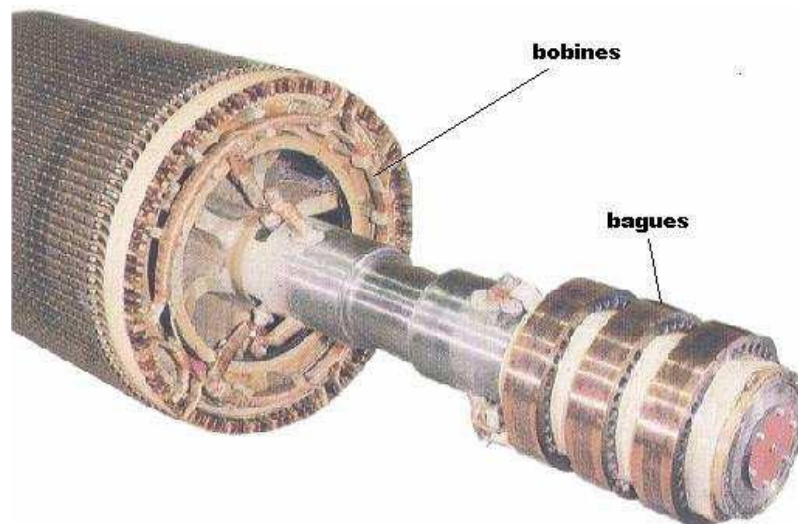
Tout se passe comme si on éliminait progressivement un rhéostat de démarrage.

1.2.2.2. Le rotor bobiné (à bagues)

C'est un cylindre constitué de tôles empilées solidaire de l'arbre de la machine, les encoches sont percées dans ses tôles. Près de la surface de ce cylindre, des conducteurs passent dans ses encoches sont réunis à une de leur extrémité en court-circuit, l'autre extrémité est raccordée à trois bagues permettant une liaison avec un circuit fixe (des résistances)(FigI.5).

Les pôles du rotor sont en même nombre que le stator. Sur les bagues viennent frotter des balais raccordés au dispositif de démarrage.

Cette machine ont un couple de démarrage s'élevant jusqu'à $2,5 C_n$, et le courant de démarrage est sensiblement égal à celui du couple.



FigI.5 -rotor à bagues.

1.2.3. Les organes mécaniques

1.2.3.1. La carcasse: sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur.

1.2.3.2. L'arbre du rotor : le rotor est monté sur un arbre en acier. A une de ses extrémité est monté le ventilateur et éventuellement le frein, à l'autre on trouve l'arbre de sortie avec une rainure de clavetage pour le montage du pignon d'entraînement.

1.2.3.3. la plaque à bornes : fixée sur la carcasse, elle comporte un ensemble de 6 bornes permettant de connecter les bobines statoriques à l'alimentation électrique en effectuant le couplage.

1.2.3.4. Le ventilateur : placé à l'arrière du moteur, il permet le refroidissement du moteur. Le capot oriente le flux d'air vers les ailettes du carter.

1.2.3.5. Les roulements : sur le moteur proposé, le guidage en rotation de l'arbre se fait par deux roulements à billes montés dans les flasques (d'autres combinaisons sont possibles).

I.3. Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé

On dispose sur le stator trois bobines identiques réparties géométriquement à 120° l'une de l'autre.

Ces trois bobines alimentées par trois tensions décalées à 120° électrique (période = 360°), issues donc d'un système triphasé, produisent un champ magnétique tournant (champ inducteur), le rotor se trouvant au centre de ce champ. Tant que le rotor a une fréquence de rotation différente que celle du champ inducteur, chaque point de rotor (voit) une variation de champ. Les conducteurs rotoriques produisent donc une f.e.m. qui, dans le circuit fermé, va donner naissance à des courants induits. Ces courants vont à leur tour produire un champ magnétique induit qui va s'opposer à la cause qui lui a donné naissance. Cela se traduit concrètement par un phénomène de poursuite du rotor vis à vis du champ tournant sans qu'il n'arrive jamais à le rattraper [2].

NB : Le rotor ne peut jamais tourner à la même vitesse que le stator (sauf entraînement mécanique extérieur).

I.3.1. Avantages et inconvénients du moteur asynchrone à cage d'écureuil

I.3.1.1. Avantages

- son faible coût (simplicité de fabrication, taille non proportionnelle à la puissance, pas de collecteur donc entretien quasi nul).
- sa nervosité (fort couple au démarrage).
- son adaptation à la variation de vitesse.

I.3.1.2. Inconvénients

- la difficulté de maîtrise du couple, notamment à basse vitesse, ce qui le disqualifie souvent pour des applications de positionnement.
- la longue pointe de courant qui oblige souvent à prévoir un dispositif de démarrage.

I.3.2. Avantages et inconvénients du moteur à rotor bobiné

Les principaux avantages de ce type de moteur se situent sur le plan du démarrage. Un fort couple ainsi qu'un faible courant, lors du démarrage, sont des caractéristiques très appréciées pour certaines utilisations. Un autre point intéressant de ce moteur est sa capacité de faire varier la vitesse grâce à une série de résistances.

Par contre, ce moteur est plus coûteux que celui à cage d'écureuil. D'autre part, son rendement diminue lorsqu'on tente de faire varier sa vitesse, ce qui peut entraîner des coûts non négligeables.

I.4. Les défauts de la machine asynchrones:

Le moteur asynchrone est une composante clé de la plupart des équipements industriels, du fait de sa grande robustesse et son prix de revient. Malgré toutes ces qualités, un certain nombre de contraintes de différentes natures (thermiques, électriques, mécaniques et d'environnement) peuvent affectés la durée de vie de la machine en faisant apparaître des pannes dans le stator et le rotor. Ces pannes occasionnent des pertes économiques considérables

I.4.1.Défauts rotorique

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du rotor, peuvent être définis comme suit:

- ❖ Rupture de barres.
- ❖ Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit.
- ❖ Excentricité statique et dynamique.
- ❖ Un défaut de contact balai - bague dans le cas d'un rotor bobiné.
- ❖ les défauts électriques au niveau rotor, qui comprennent une ouverture ou
- ❖ un court-circuit des spires pour les moteurs à rotor bobiné

I.4.2.Défauts statorique

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator.

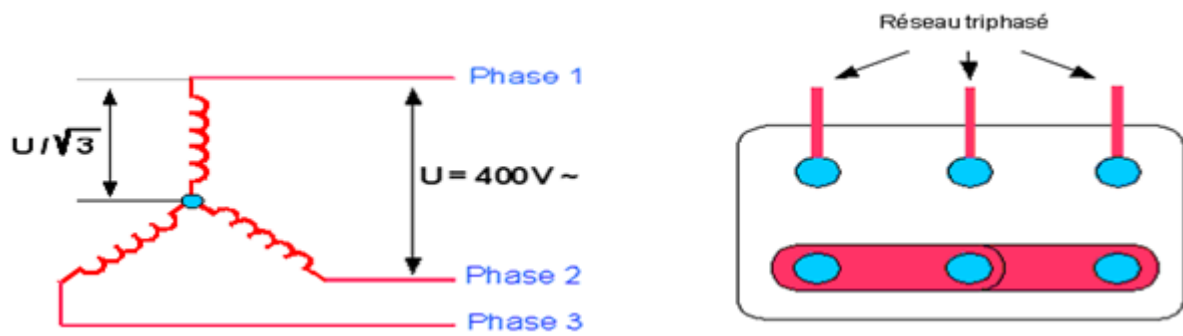
- défaut d'isolant.
- court-circuit entre spires.
- court-circuit entre phases.
- déséquilibre d'alimentation.
- défaut de circuit magnétique.

I.5.Les couplages moteurs

Afin d'adapter électriquement un moteur (et éviter de le griller) par rapport à l'alimentation électrique distribuée sur le réseau il est IMPERATIF de coupler les enroulements du moteur. deux couplages sont possibles :

I.5.1.Le couplage étoile

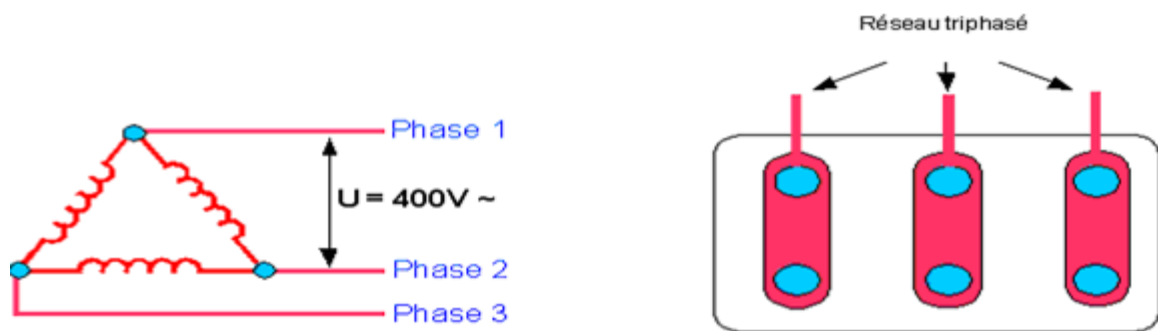
- La tension U d'alimentation triphasée du réseau alimente deux enroulements.
- Le couplage étoile sera réalisé lorsque la tension triphasée du réseau sera identique à celle supportée par deux enroulements.



FigI.6.a- couplage étoile.

I.5.2.Le couplage triangle

- La tension U d'alimentation triphasée du réseau alimente un seul enroulement.
- Le couplage triangle sera réalisé lorsque la tension triphasée du réseau sera identique à celle supportée par un seul enroulement.



FigI.6.b- couplage triangle.

I.5.3.Tableau récapitulatif sur les couplages

		Plaque signaltique du moteur		
		127/220V	220/380V	380/660V
RESEAU ELECTRIQUE	127/220V	En étoile	En triangle	Impossible Sous-tension
	220/380V	Impossible Sur tension	En étoile	En triangle

I.6. La plaque signalétique d'un moteur asynchrone triphasé

La plaque signalétique d'un moteur est sa fiche d'identité, elle est unique pour chaque moteur, elle permet de fournir les caractéristiques nominales principales du moteur.

LS		LEROY SOMER		MOT. 3~	LS80 L T
		N° 734570		BJ 002	kg 9
IP 55		I cl.F	40°C	S1	
V	Hz	min ⁻¹	kW	cosφ	A
Δ 220	50	2780	0,75	0,86	3,3
Y 380					1,9
Δ 230	50	2800	0,75	0,83	3,3
Y 400					1,9
Δ 240	50	2825	0,75	0,80	3,3
Y 415					1,9

FigI.7 la plaque signalétique d'un moteur asynchrone

I.6.2. Interprétation les symboles électriques de la plaque signalétique

[IP55]: indice de protection.

[I cl.F]: classe d'isolation F.

[40°C]: température maxi de fonctionnement.

[V]: tension d'alimentation.

[Hz]: fréquence.

[min⁻¹]: la vitesse de rotation tr/min.

[kW]: la puissance nominale.

[cosφ] : facteur de puissance.

[A]: intensité nominale.

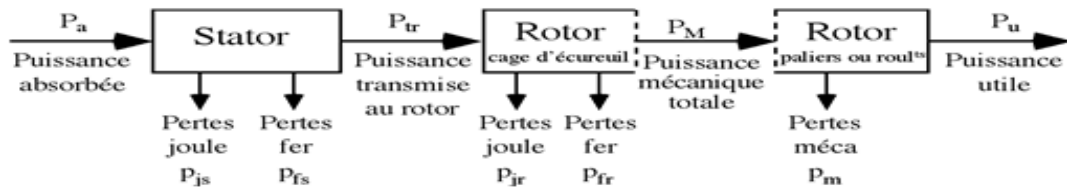
[Y]: couplage étoile.

[Δ]: couplage triangle.

[MOT.3~]: moteur triphasé alternatif.

I.7.Bilan des puissances d'un moteur asynchrone

La puissance utile est toujours inférieure à la puissance absorbée car lors de l'opération, il y a des pertes



FigI.8. Bilan de puissance.

Puissance électrique absorbée	$P_a = \sqrt{3}UI \cos \varphi$	U : tension entre deux bornes du moteur. I: courant en ligne.
Pertes par effet joule au stator	$P_{js} = \frac{3}{2}RI^2$	R : résistance entre deux bornes du stator.
Puissance transmise P_{tr}	$P_{tr} = P_a - P_{js} - P_{fr}$	C'est la puissance que reçoit le rotor.
Couple electro-magnétique T_{em}	Les forces qui s'exercent sur les conducteurs du rotor tournent à la vitesse Ω_s : elles glissent sur le rotor qui, lui, ne tourne qu'à la vitesse Ω . L'action de l'ensemble des forces électromagnétiques se réduit à un couple électromagnétique résultant de moment T_{em} .	
	$T_{em} = \frac{P_{tr}}{\Omega_s}$	T_{em} (N.m) ; P_{tr} (W) ; Ω_s (rad.s ⁻¹)
Puissance mécanique totale P_M	Le couple électromagnétique de moment T_{em} entraîne le rotor à la vitesse Ω . Il lui communique donc la puissance mécanique totale P_M $P_m + T_{em}\Omega = P_{tr} \frac{\Omega}{\Omega_s} = P_{fr}(1 - G)$ Soit $P_M = T_{em}\Omega$	
Pertes fer au rotor P_{fr}	$P_M = P_{tr}(1 - g)$	Cette puissance comprend la puissance utile et les pertes mécaniques.
	Ces pertes sont négligibles	
Pertes joules au rotor	$P_{jr} + P_{fr} = P_{tr} - P_{tr}(1 - g) = gP_{tr}$	
	$P_{jr} \approx g \cdot P_{tr}$	Les pertes fer du rotor sont négligeables.
Pertes collectives p_c	$P_c = P_{fs} + P_m$	Ces pertes ne dépendent que de U, f et n. Comme ces grandeurs sont généralement constantes, les pertes fer au stator et les pertes mécaniques le sont aussi.

Couple de perte	$T_p = \frac{P_c}{\Omega_s}$	Le couple de perte est une grandeur constante quelle que soit la vitesse et la charge de la machine.
Autres	$P_u = P_M - P_m ; T_u = \frac{P_u}{\Omega} ; \eta = \frac{P_u}{P_a}$	
Bilan complet	$P_a = P_u + p_{js} + p_{jr} + p_c$	

I.8.conclusion

Nous abordons la description des moteurs asynchrones et le Principe de fonctionnement ce qui nous a permis d'avoir une bonne connaissance des moteurs. Alors Cette étude nous a permet de connaître les moteurs et les précautions à prendre en vue d'une bonne exploitation et les conditions à satisfaire pour faire un bon choix.

II.1. Introduction

Le moteur asynchrone, de par sa simplicité de conception et d'entretien, a la faveur des industriels depuis son invention par Nikola Tesla à la fin du siècle dernier, quand il découvrit les champs magnétiques tournants engendrés par un système de courants polyphasés.

Cette simplicité s'accompagne toute fois d'une grande complexité physique, liée aux interactions électromagnétiques entre le stator et le rotor.

D'autre part, à la différence du moteur à courant continu où il suffit de faire varier la tension d'alimentation de l'induit pour faire varier la vitesse, le moteur asynchrone nécessite l'utilisation des courants alternatifs de fréquence variable. L'un des principaux blocages était constitué par l'onduleur devant fonctionner en commutation forcée. La machine asynchrone a donc longtemps été utilisée essentiellement à vitesse constante, faute de pouvoir maîtriser convenablement la dynamique de l'ensemble moteur charge [4].

L'objectif de ce chapitre est de présenter mathématiquement la modélisation de la machine asynchrone sous forme de différents modèles d'état selon le choix du repère, ces modèles sont définis dans un référentiel diphasé, fixé au stator (α, β), ces derniers sont déterminés à partir du référentiel triphasé conventionnel de la machine asynchrone à l'aide de transformations mathématiques. Ensuite, on procèdera à la modélisation de l'alimentation de la machine, qui est l'onduleur de tension à deux niveaux, avec une description de méthodes de commandes rapprochées à MLI sinus-triangle .

II.2. Modèle triphasé de la machine asynchrone

II.2.1. Hypothèses simplificatrices

La modélisation de la machine asynchrone est établie sous les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Entrefer constant (pas d'effet d'encoches).
- Circuit magnétique non saturé.
- Symétrie de construction de la machine.
- Pertes ferromagnétiques négligeables.
- Assimilation de la cage à un bobinage en court-circuit de même nombre de phases que le bobinage statorique.

Ces hypothèses constituent généralement une approche acceptable dans la plupart des fonctionnements, normaux des machines à induction.

II.2.2. Représentation schématique d'une machine asynchrone

Soit une machine asynchrone triphasée au stator et au rotor représentée schématiquement par la figure (II-1), et dont les phases sont repérées respectivement (A, B, C) et (a, b, c). L'angle électrique variable en fonction du temps définit la position relative instantanée entre les axes magnétiques des phases (A) et (a) choisis comme axes de référence.

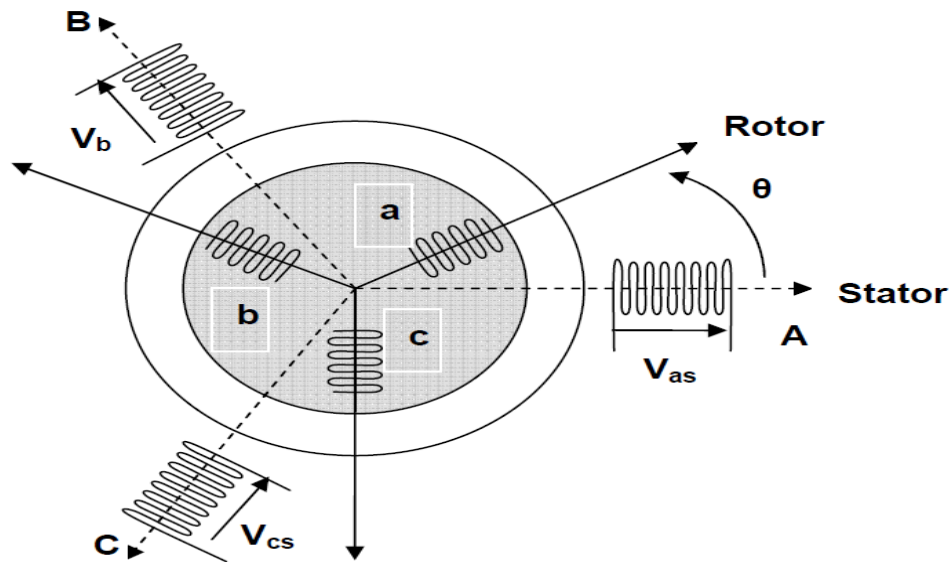


Fig II- 1 : Représentation schématique d'une MAS triphasée

II.2.2.1. Equations électriques :

Les six enroulements statoriques et rotoriques (a, b, c) et (A, B, C) représentés par la Fig (II-1) Obéissent aux équations matricielles suivantes

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [i_s] + \frac{d}{dt} [\phi_s] \\ [V_r] = [R_r] \cdot [i_r] + \frac{d}{dt} [\phi_r] \end{cases} \quad (II-1)$$

Tel que:

[V_s]: vecteur de tension statorique.

[i_s]: vecteur de courant statorique.

[Φ_s]: vecteur de flux total statorique.

[R_s]: vecteur de résistance statorique.

[V_r]: vecteur de tension rotorique.

$[i_r]$: vecteur de courant rotorique.

$[\Phi_r]$: vecteur de flux total rotorique.

$[R_r]$: matrice de résistance rotorique.

Pour l'ensemble des enroulements statoriques, on écrira en notation matricielle:

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II-2})$$

Pour l'ensemble des enroulements rotoriques, on écrira en notation matricielle :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = R_r \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{II-3})$$

II.2.2.2. Equations magnétiques

Les relations entre les flux totaux et les courants des enroulements statoriques peuvent être décrites par les équations matricielles suivantes:

$$\begin{cases} [\Phi_s] = [L_{ss}] \cdot [i_s] + [M_{sr}] \cdot [i_r] \\ [\Phi_r] = [L_{rr}] \cdot [i_r] + [M_{sr}]^t \cdot [i_s] \end{cases} \quad (\text{II-4})$$

L'écriture matricielle ci-dessous résume les 3 équations du flux statoriques

$$\begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{II-5})$$

De façon similaire, on aura au rotor

$$\begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} + M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II-6})$$

D' où :

$$\begin{cases} [V_s] = R_s [I_s] + \frac{d}{dt} ([L_{ss}] [I_s]) + \frac{d}{dt} ([M_{sr}] [I_r]) \\ 0 = R_r [I_r] + \frac{d}{dt} ([L_{rr}] [I_r]) + \frac{d}{dt} ([M_{sr}] [I_s]) \end{cases} \quad (\text{II-7})$$

Tel que:

$[L_{ss}]$: matrice d'inductances statoriques.

$[L_{rr}]$: matrice d'inductances rotoriques.

$[M_{sr}]$: matrice d'inductances mutuelles du couplage stator- rotor.

II.2.2. 3.Equations mécaniques

Le couple électromagnétique développé s'écrit:

$$J \frac{d}{dt} \omega_r + f \omega_r = C_e - C_r \quad (\text{II-8})$$

La résolution analytique dans ce repère est très difficile, car le système d'équations est à coefficients variables en fonction de θ (angle de rotation de la machine) [5].

II.2.3.Modèle de Park de la machine asynchrone

II.2.3.1.Transformation de Park

Cette transformation permet le passage du système triphasé d'axes (a, b, c) au système biphasé équivalent d'axes (u, v).

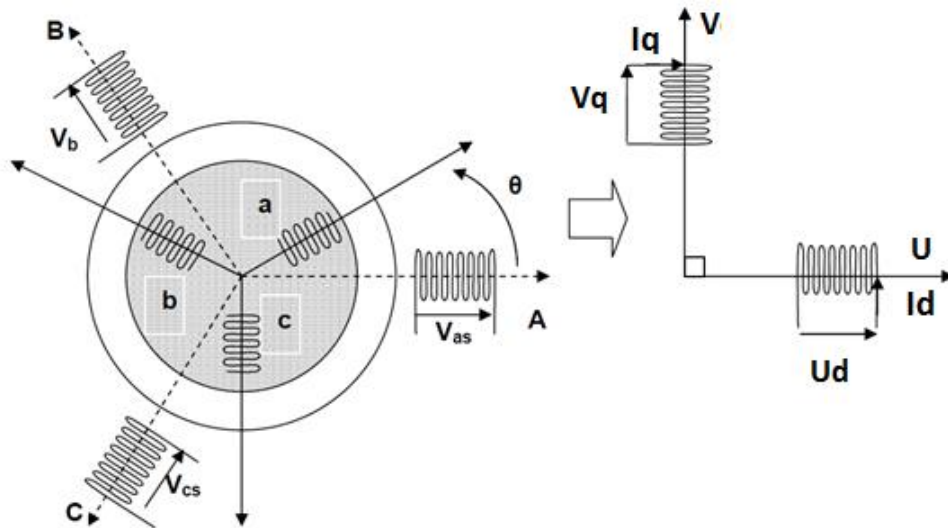


Fig II.2 Passage du triphasé au biphasé.

- La matrice de passage du système triphasé- biphasé $P(\theta)$ est donné par:

$$[p(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II-9})$$

et la matrice inverse:

$$[p(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II-10})$$

La transformation de Park sera appliquée aux courants, tensions, et aux flux de la machine.

On peut alors exprimer les grandeurs statorique et rotorique comme suit:

$$\begin{bmatrix} X_u \\ X_v \\ X_0 \end{bmatrix} = P(\theta_s) \cdot \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = P^{-1}(\theta_s) \cdot \begin{bmatrix} X_u \\ X_v \\ X_0 \end{bmatrix}$$

X : représente une tension, un courant ou un flux.

X_0 : est la composante homopolaire.

II.2.3.2. Application de la transformation de PARK à la machine asynchrone

On applique la transformation de Park aux courants, aux tensions et aux flux, les équations (II.1) et (II.2) de la machine deviennent :

II.2.3.2.1. Équations électriques

Dans le repère de Park (u, v) tournant à la vitesse angulaire $\omega_p = d\theta_p/dt$, les équations

(II-1) et (II.2) s'écrivent :

$$\begin{cases} V_{us} = R_s \cdot I_{us} + \frac{d}{dt} \phi_{us} - \omega_p \cdot \phi_{vs} \\ V_{vs} = R_s \cdot I_{vs} + \frac{d}{dt} \phi_{vs} + \omega_p \cdot \phi_{us} \\ 0 = R_r \cdot I_{ur} + \frac{d}{dt} \phi_{ur} - (\omega_p - \omega) \cdot \phi_{vr} \\ 0 = R_r \cdot I_{vr} + \frac{d}{dt} \phi_{vr} + (\omega_p - \omega) \cdot \phi_{ur} \end{cases} \quad (\text{II-11})$$

Avec : $\omega_p = \frac{d}{dt} \theta_p$ et $\omega = \frac{d}{dt} \theta$

II.2.3.2.2. Equations magnétiques :

$$\begin{cases} \phi_{us} = L_s I_{us} + M_{rs} I_{ur} \\ \phi_{vs} = L_s I_{vs} + M_{rs} I_{vr} \\ \phi_{ur} = L_r I_{ur} + M_{sr} I_{us} \\ \phi_{vr} = L_r I_{vr} + M_{sr} I_{vs} \end{cases} \quad (\text{II-12})$$

II.2.3.2.3. Equations mécaniques :

Une expression du couple électromagnétique exprimé à partir des différentes grandeurs exprimées donnée par :

$$Ce = \frac{3}{2} P \cdot (\Phi_{us} \cdot i_{vs} - \Phi_{vs} \cdot i_{us}) \quad (\text{II-13})$$

$$J \cdot \frac{d}{dt} \omega_r + f \cdot \omega_r = Ce - Cr \quad (\text{II-14})$$

L'équation mécanique d'un moteur s'écrit :

II.2.4. Choix de référentiel

Selon le repère où se référer, la position des deux axes (u, v) peut être située selon :

- Référentiel immobile par rapport au stator ($\omega_p=0$), d'axes (α, β)
- Référentiel lié au rotor ($\omega_p=\omega_r$), d'axes (d, q).
- Référentiel lié au champ tournant ($\omega_p=\omega_s$), d'axes (x, y).

Il existe pratiquement trois possibilités pour le choix de l'orientation du repère d'axes (u, v), qui dépendent évidemment des objectifs de l'application.

N. B : dans les trois cas, les axes biphasés sont orthogonaux.

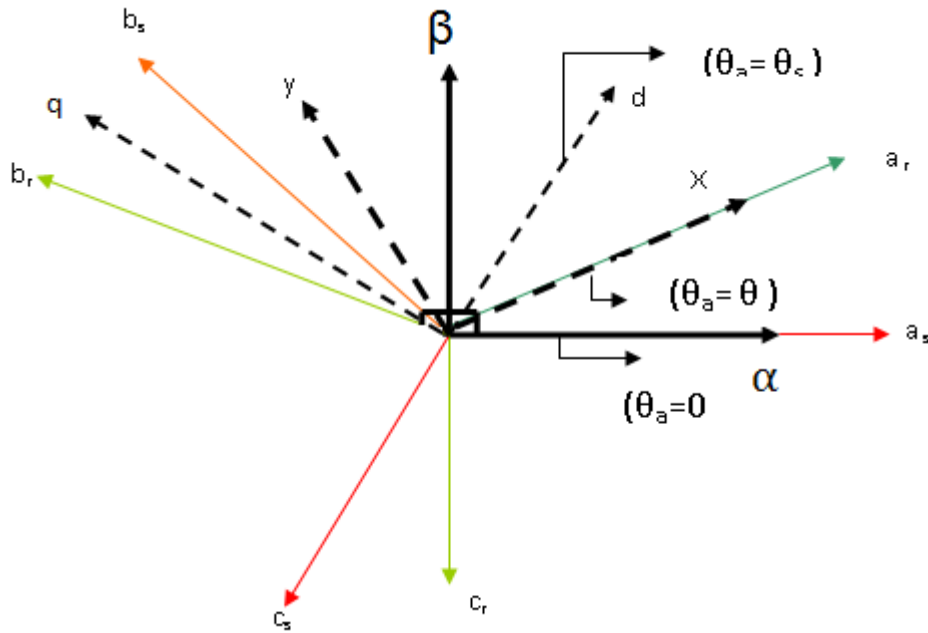


Fig. II.3 représentation des axes triphasés réels de la machine

Les axes biphasés sont : (α, β) , (x, y) et (d, q) .

- Axes (α, β) : système biphasé avec $\theta_a=0$ (———)
- Axes (x, y) : système biphasé avec $\theta_a=\theta$ (- - -)
- Axes (d, q) : système biphasé avec $\theta_a=\theta_s$ (- - - -)

II.2.4.1. Les équations de la machine dans le repère (α, β)

Dans le repère (α, β) , la vitesse de rotation des axes est nulle ($w_a=0$), on obtient la transformation de Clark T.

$$T = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad T^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

La transformation de Clarke sera appliquée aux courants, aux tensions et aux flux de la machine. On peut alors exprimer les grandeurs statoriques et rotoriques comme suit :

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_0 \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = T^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_0 \end{bmatrix}$$

Dans ($\omega_p = 0$) les équations (II-1) et (II-2) s'écrivent :

II.2.4.1.1. Équations électriques

$$\begin{cases} V_{\alpha s} = R_s \cdot i_{\alpha s} + \frac{d}{dt} \Phi_{\alpha s} \\ V_{\beta s} = R_s \cdot i_{\beta s} + \frac{d}{dt} \Phi_{\beta s} \\ V_{\alpha r} = R_r \cdot i_{\alpha r} + \frac{d}{dt} \Phi_{\alpha r} + \omega_r \cdot \Phi_{\beta r} \\ V_{\beta r} = R_r \cdot i_{\beta r} + \frac{d}{dt} \Phi_{\beta r} - \omega_r \cdot \Phi_{\alpha r} \end{cases} \quad (\text{II-15})$$

II.2.4.1.2. Equations magnétiques :

$$\begin{cases} \Phi_{\alpha s} = L_s \cdot i_{\alpha s} + M \cdot i_{\alpha r} \\ \Phi_{\beta s} = L_s \cdot i_{\beta s} + M \cdot i_{\beta r} \\ \Phi_{\alpha r} = L_r \cdot i_{\alpha r} + M \cdot i_{\alpha s} \\ \Phi_{\beta r} = L_r \cdot i_{\beta r} + M \cdot i_{\beta s} \end{cases} \quad (\text{II-16})$$

$L_s = l_s - M_s$: inductance cyclique propre statorique.

$L_r = l_r - M_r$: inductance cyclique propre statorique.

$M = 3/2 \cdot M_{sr}$: inductance mutuelle cyclique stator rotor.

II.2.4.1.3. Expression du couple électromagnétique :

Dans le repère (α, β) l'équation de couple s'écrit :

$$C_e = \frac{3}{2} P \cdot (\Phi_{\alpha s} \cdot i_{\beta s} - \Phi_{\beta s} \cdot i_{\alpha s}) \quad (\text{II-17})$$

II.2.4.2. Les équations de la machine dans le repère (d, q)

II.2.4.2.1.- Equations électriques :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega_r \cdot \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega_r \cdot \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} \end{cases} \quad (\text{II-18})$$

II.2.4.2.2. Equations magnétiques :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II-19})$$

II.2.4.2.3. Equation du couple électromagnétique

Dans le repère (d, q) l'équation de couple s'écrit :

$$Ce = \frac{3}{2} P \cdot (\Phi_{sd} \cdot i_{sq} - \Phi_{sq} \cdot i_{sd}) \quad (\text{II.20})$$

II.2.4.3. Les équations de la machine dans le repère (x, y)**II.2.4.3.1. Equations électriques**

$$\begin{cases} V_{xs} = R_s \cdot i_{xs} + \frac{d}{dt} \Phi_{xs} - \omega_s \cdot \Phi_{ys} \\ V_{ys} = R_s \cdot i_{ys} + \frac{d}{dt} \Phi_{ys} + \omega_s \cdot \Phi_{xs} \\ V_{xr} = R_r \cdot i_{xr} + \frac{d}{dt} \Phi_{xr} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \Phi_{yr} \\ V_{yr} = R_r \cdot i_{yr} + \frac{d}{dt} \Phi_{yr} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \Phi_{xr} \end{cases} \quad (\text{II-21})$$

II.2.4.3.2. Equations magnétiques

$$\begin{cases} \Phi_{xs} = L_s \cdot i_{xs} + M \cdot i_{xr} \\ \Phi_{ys} = L_s \cdot i_{ys} + M \cdot i_{yr} \\ \Phi_{xr} = L_r \cdot i_{xr} + M \cdot i_{xs} \\ \Phi_{yr} = L_r \cdot i_{yr} + M \cdot i_{ys} \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

II.2.4.3.3. Equation du couple électromagnétique

Dans le repère (x, y) l'équation de couple s'écrit :

$$Ce = \frac{3}{2} P \cdot (\Phi_{sd} \cdot i_{sq} - \Phi_{sq} \cdot i_{sd}) \quad (\text{II-23})$$

II.2.5. Choix de l'orientation du repère d'axes (α, β):

- **Référentiel au stator :** ($\theta_p = 0 \Rightarrow \omega_p = 0$)

II.2.5.1. - Équations électriques

$$\begin{cases} V_{\alpha s} = R_s \cdot i_{\alpha s} + \frac{d}{dt} \Phi_{\alpha s} \\ V_{\beta s} = R_s \cdot i_{\beta s} + \frac{d}{dt} \Phi_{\beta s} \\ V_{\alpha r} = R_r \cdot i_{\alpha r} + \frac{d}{dt} \Phi_{\alpha r} + \omega_r \cdot \Phi_{\beta r} \\ V_{\beta r} = R_r \cdot i_{\beta r} + \frac{d}{dt} \Phi_{\beta r} - \omega_r \cdot \Phi_{\alpha r} \end{cases} \quad (\text{II-24})$$

II.2.5.2. Equations magnétiques

$$\begin{cases} \Phi_{\alpha s} = L_s \cdot i_{\alpha s} + M \cdot i_{\alpha r} \\ \Phi_{\beta s} = L_s \cdot i_{\beta s} + M \cdot i_{\beta r} \\ \Phi_{\alpha r} = L_r \cdot i_{\alpha r} + M \cdot i_{\alpha s} \\ \Phi_{\beta r} = L_r \cdot i_{\beta r} + M \cdot i_{\beta s} \end{cases} \quad (\text{II-25})$$

En introduisant les expressions des flux (II-24) dans le système (II-25), celui-ci devient

$$\begin{cases} V_{s\alpha} = R_s \cdot i_{s\alpha} + L_s \frac{di_{s\alpha}}{dt} + M \frac{di_{r\alpha}}{dt} \\ V_{s\beta} = R_s \cdot i_{s\beta} + L_s \frac{di_{s\beta}}{dt} + M \frac{di_{r\beta}}{dt} \\ 0 = R_r \cdot i_{r\alpha} + L_r \frac{di_{r\alpha}}{dt} + M \frac{di_{s\alpha}}{dt} + \omega_r (L_r i_{r\beta} + M i_{s\beta}) \\ 0 = R_r \cdot i_{r\beta} + L_r \frac{di_{r\beta}}{dt} + M \frac{di_{s\beta}}{dt} - \omega_r (L_r i_{r\alpha} + M i_{s\alpha}) \end{cases} \quad (\text{II-26})$$

Le système d'équation peut être exprimé sous la forme :

$$[R] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}; [L] = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \text{ et } [I] = \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II-27})$$

$$[U] = \begin{bmatrix} U_{r\alpha} & U_{s\beta} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

A partir de l'expression (II.26) on peut écrire :

$$\frac{d}{dt}[I] = [L]^{-1}[R][I] + [L]^{-1}[U] \quad (\text{II-28})$$

Cette expression représente la forme équivalente de l'équation d'état

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}X &= AX + BX \quad \text{avec :} \\ A &= [L]^{-1}[R]; B = [L]^{-1} \text{ et } [R] = [R_1] + \omega_r [R_2] \\ \text{Ou } [R_1] &= \begin{bmatrix} -R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -R_r \end{bmatrix}; [R_2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -M & 0 & -L_r \\ M & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{II-29})$$

II.2.5.3. Equation du couple électromagnétique

Afin d'étudier les phénomènes transitoires avec une vitesse rotoriques variable (démarrage, freinage, variation de charge) , il faut compléter le modèle par les équation du mouvement :

Et celui du couple :

$$C_e - C_r = J \cdot \frac{d}{dt} \omega_r + f \cdot \omega_r \quad (\text{II-30})$$

$$C_e = \frac{3}{2} PM \cdot (i_{r\alpha} \cdot i_{s\beta} - i_{r\beta} \cdot i_{s\alpha}) \quad (\text{II-31})$$

II.3. Simulation et interprétation

• Paramètre de la machine

Paramètre	symbole	Les valeur
Resistance statorique	R_s	0.63Ω
Resistance rotorique	R_r	0.4Ω
Inductance statorique	L_s	$0.097H$
Inductance rotorique	L_r	$0.091H$
Moment d'inertie des parties tournantes	J	0.22
Coefficient de frottements visqueux	f	0.001
Nombre de paire de poles	p	2
Inductance mutuelle	M	$0.091H$

II.3.1 Schéma bloc de simulation du moteur

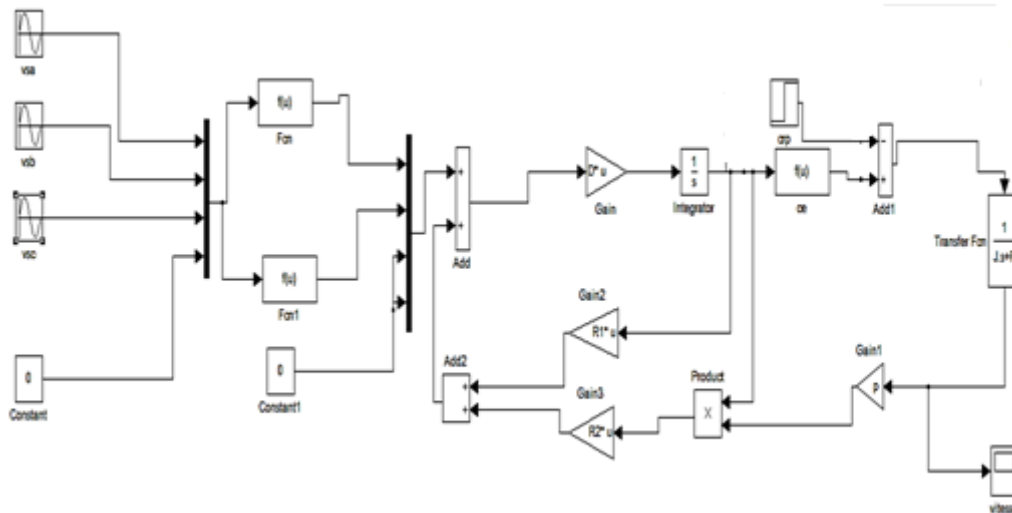
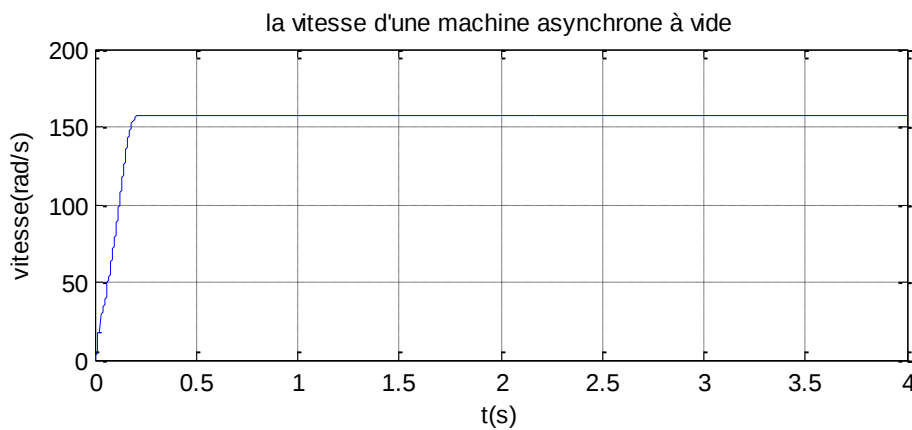


Fig. II.4 schéma bloc d'une machine asynchrone sans onduleur

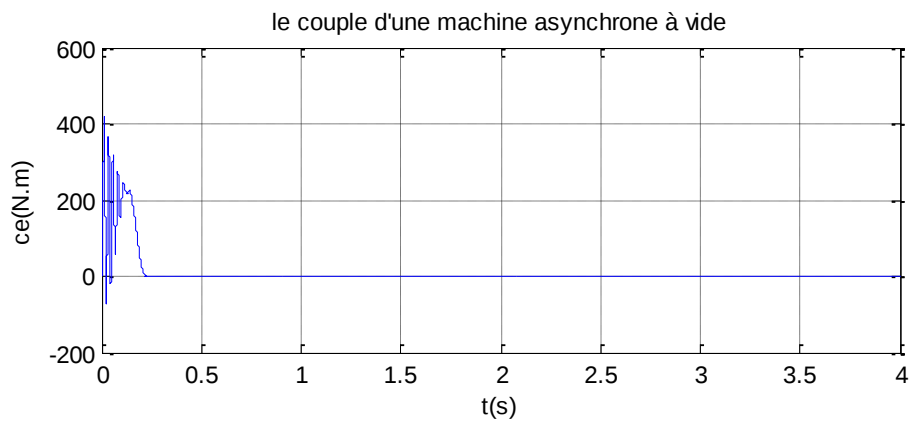
II.3.2. Résultats de simulation à vide et en charge

Les figures ci-dessous présentent les résultats de la simulation obtenue pour une machine étant alimentée par un système de tensions sinusoïdales, V_a , V_b et V_c (sans onduleur) démarrage à vide ($C_r = 0$ N.m), et en charge (Couple résistant $C_r = 10$ Nm).

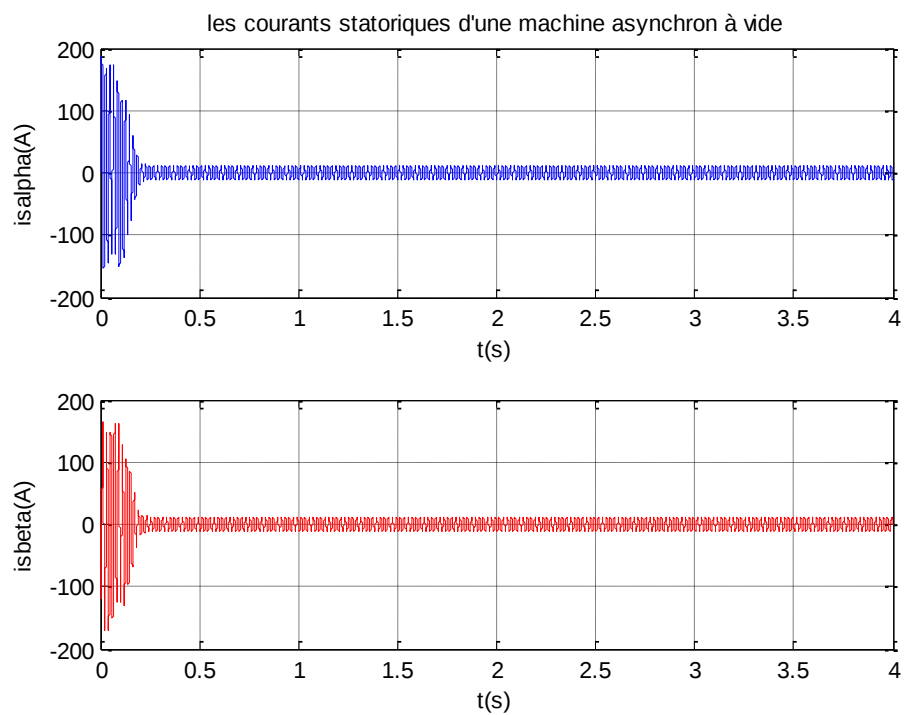
II.3.2.1. Les Résultats de la simulation d'une machine asynchrone à vide



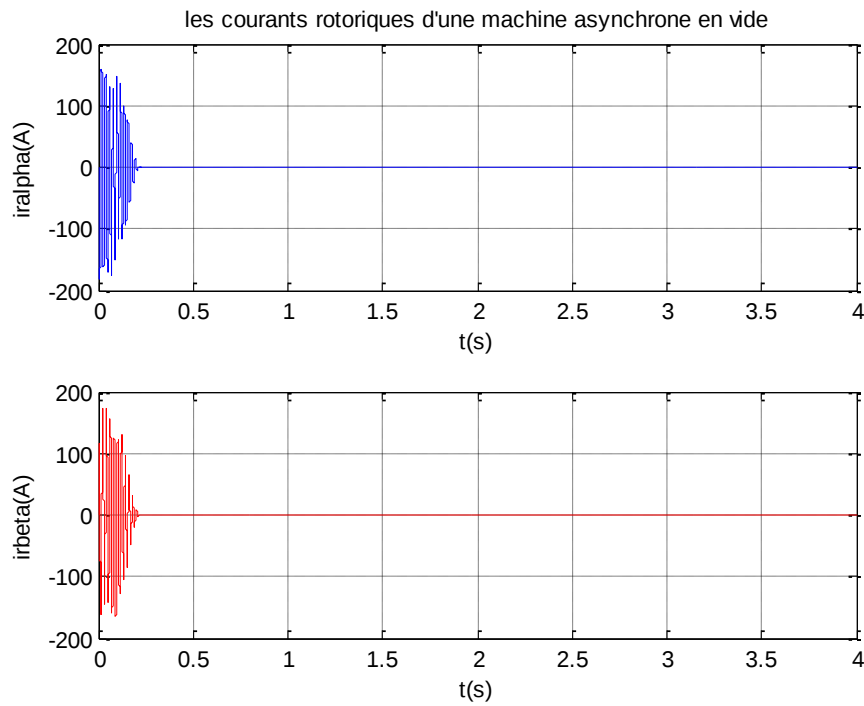
FigII.5 La vitesse à vide



FigII.6 le couple électromagnétique à vide

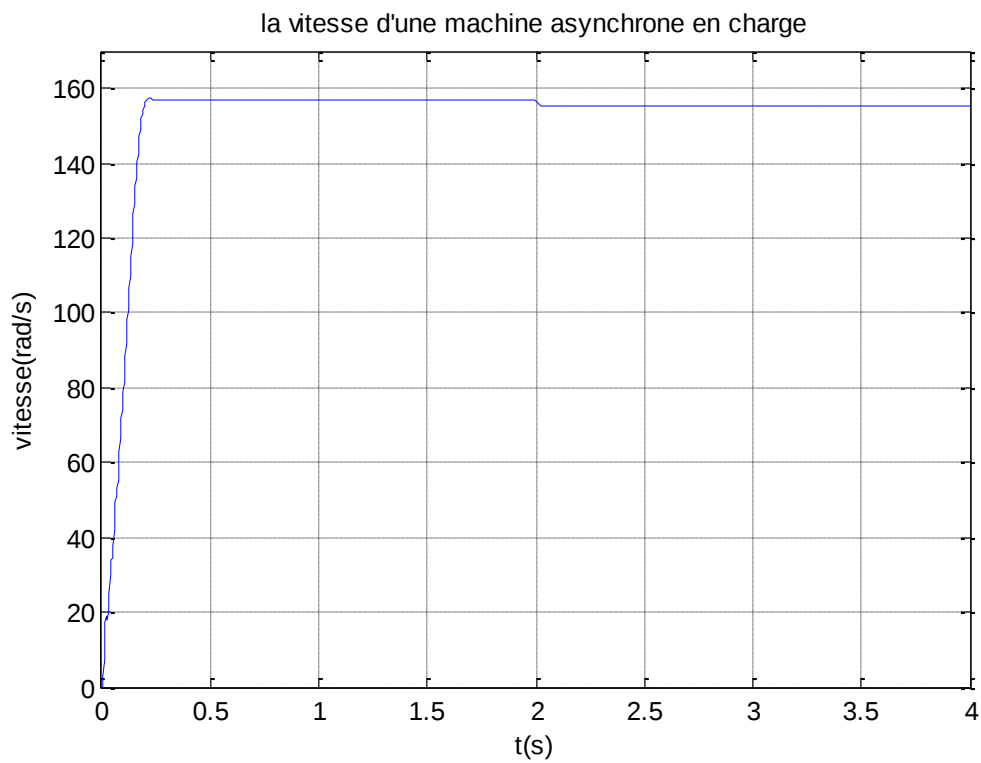


FigII.7 les courants statoriques à vide

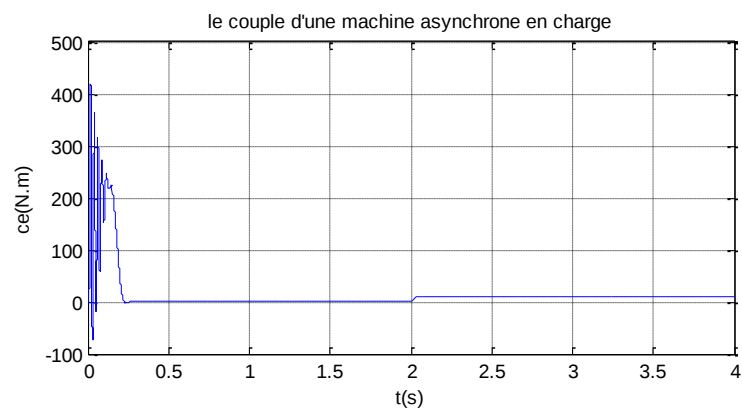


FigII.8 les courants rotoriques à vide

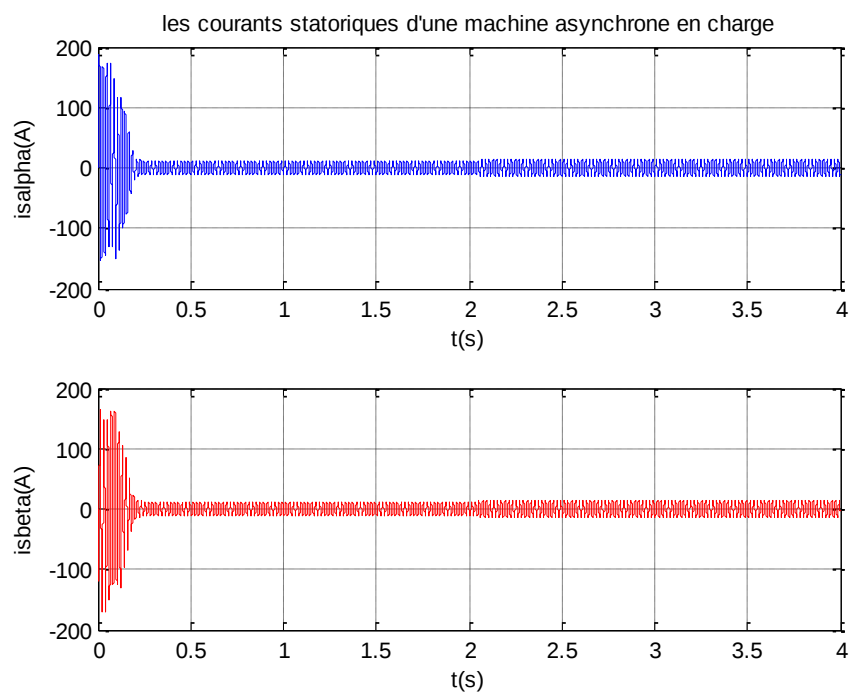
II.3.2.2. Résultats de simulation de la machine asynchrone en charge ($C_r=10N.m$)



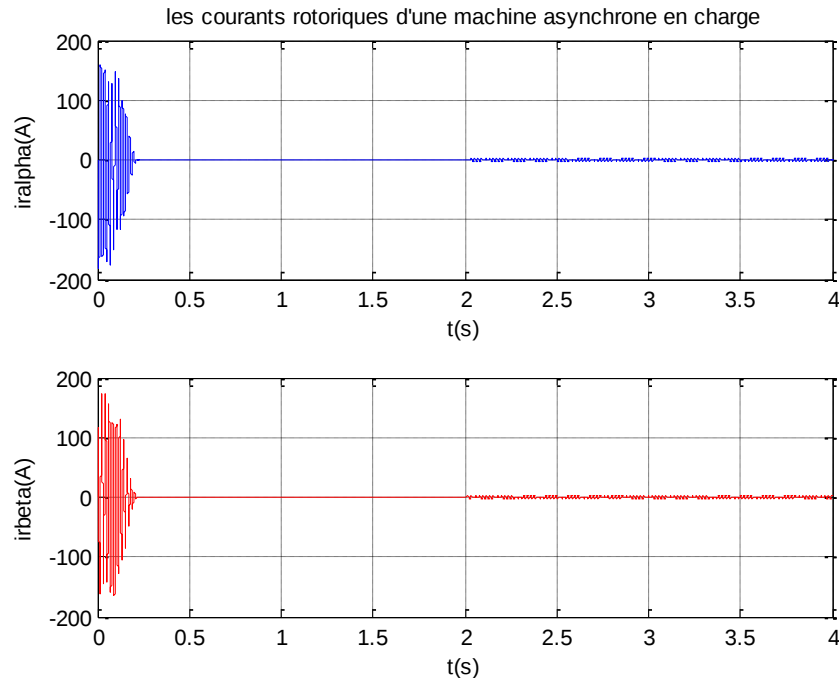
FigII.9 la vitesse en charge



FigII.10 le couple électromagnétique en charge



FigII.11 les courants statoriques en charge



FigII.12 les courants rotoriques en charge

II.4.interprétation des résultats de simulation

Les résultats de simulation donnés par les figures (II.5-II.12), représente l'évolution de quelques variables fondamentales de la machine asynchrone à savoir la vitesse (Ω), le couple électromagnétique (C_e), les courants rotoriques ($I_{r\alpha}$, $I_{r\beta}$) les courants ($I_{s\alpha}$, $I_{s\beta}$)

Nous avons simulé le fonctionnement de la machine asynchrone alimentée directement par le réseau Standard [220/ 380V, 50Hz], à vide et en charge. L'examen des courbes permet de constater que :

II.4.1.simulation à vide

La courbe de la vitesse présente des oscillations dans le premier instant de démarrage avec un accroissement presque linéaire, après un temps d'environ (2sec) la vitesse de rotation s'établit à une valeur proche de la vitesse de synchronisme.

La courbe du couple électromagnétique C_e présente aux premiers instants du démarrage une pulsation très importante, après (2 sec) le couple tend vers zéro.

Les courants rotoriques présentent des dépassements excessifs de faible amplitude dans le premier instant, après (2sec) les courants tendent vers zéro.

Les courants statoriques présentent des oscillations successives autour de zéro avec une amplitude maximale de (180) jusqu'à (2sec), après ce temps l'amplitude de ces oscillations reste constante.

II.4.2. simulation en charge

Avec $t \in [2,4]$ s: nous avons appliqué à l'arbre de la machine asynchrone un couple résistant ($C_r = C_n = 10 \text{ N m}$) à l'instant ($t = 0-1.5 \text{ s}$). Nous constatons que:

- La diminution du vitesse durant l'application de la charge ce qui prouve le fort couplage entre le flux et le couple électromagnétique.
- Le couple électromagnétique rejoint, après un régime transitoire, la valeur qui compense le couple résistant (10 N.m) appliqué.
- le courant statorique évolue selon la charge appliquée à l'arbre du moteur.

II.5.Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous nous sommes présenté le modèle de la machine asynchrone alimentée par une source d'alimentation purement sinusoïdale, la modélisation de la machine asynchrone triphasée permet de donner un sens mathématique de la machine asynchrone (modèle de Park.), valider ce modèle et vérifier que les simulations effectuées par le logiciel [MATLAB] sont valables ce qui a permis essentiellement de trouver les résultats classiques de la machine asynchrone. Lorsque on charge la machine, la vitesse chute, la machine seule ne répond pas toujours aux exigences du système d'entraînement à vitesse variable.

III.1 Introduction

D'après le développement des interrupteurs semi-conducteurs à commutation, les convertisseurs de fréquences de type onduleur, trouvent beaucoup d'intérêt surtout dans

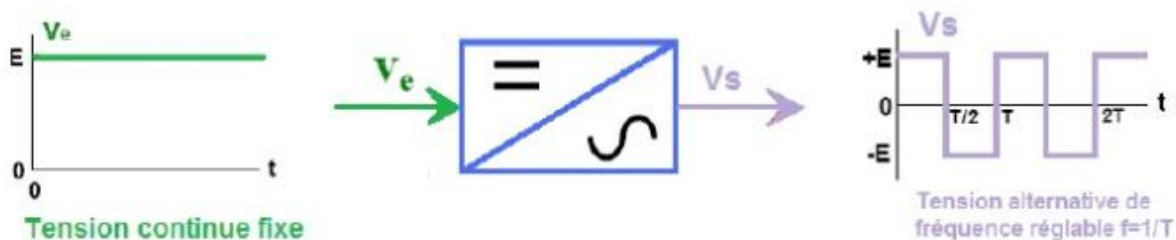
L'entraînement des machines à courant alternatif. La commande qui est souvent développées dans le but de générer une tension sinusoïdale à la sortie de l'onduleur ayant le moins d'harmoniques possible. Dans notre travail, on s'intéresse à la technique triangulo-sinusoïdale.

III.2. Définition d'onduleur

L'onduleur est un convertisseur statique qui permet de fournir une tension alternative d'amplitude et de fréquence réglables à partir d'une source de tension continue. Chaque bras composé de deux cellules comportant chacune une diode et un transistor. Tous ces éléments sont considérés comme des interrupteurs idéaux.

III.2.1 Principe de fonctionnement d'un onduleur

Le principe de fonctionnement d'un onduleur est basé sur l'électronique de commutation, on génère une onde de tension alternative à partir d'une tension continue comme le montre la figure, on peut dire qu'il existe deux moyens pour réaliser cette conversion



FigIII.1 le schéma symbolique de l'onduleur

L'utilisation directe d'une paire d'interrupteurs de base qui consiste à:

- Régler la fréquence et la durée des interconnexions de la source avec la sortie. Il est donc plutôt temporel et débouche sur les techniques de modulation de largeur d'impulsion.
- Contrôler l'amplitude soit de façon continue en créant une source réglable (ce qui suppose l'existence d'un autre étage de conversion), soit de façon discrète en disposant d'un nombre suffisant de sources.

Quand S1 – S2 sont Fermé (On) et S3 – S4 sont Ouvert (Off) pour $0 < t < \frac{T}{2}$

on obtient une alternance positif $U(t) = V_{DC}$ comme la montre la figure ci-dessous :

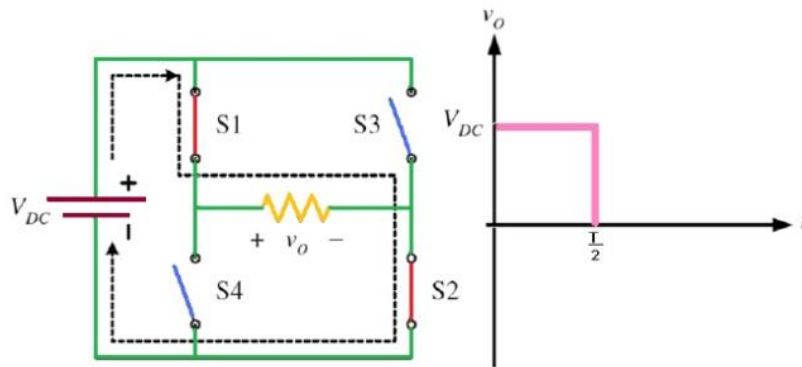


Fig.III.2a. Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 1er demis cycle

Quand S1-S2 sont ouvert (off) et S3-S4 sont fermé (on) pour $\frac{T}{2} < t < T$

on obtient une alternance négatif $U(t) = -V_{DC}$ comme la montre la figure(III.2.b)

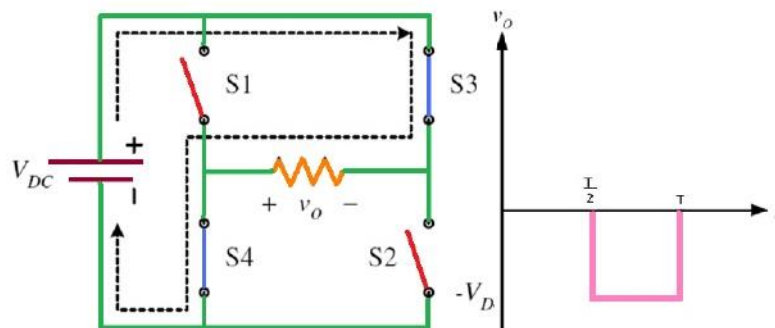
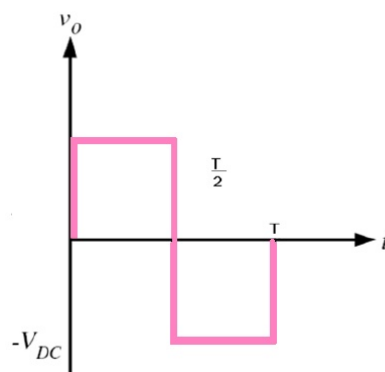


Fig.III.2.b. Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 2ème demis cycle

La période complète est présentée sur la figure III.2.c



FigIII.2.c. Signal complète

III.2.3.Constitution de l'onduleur triphasé:

Transistors IGBT et de deux diodes en antiparallèle ou thyristor. Le schéma de principe de l'onduleur triphasé monté en pont alimentant une charge, est donné par la figure III.3, la tension continue est généralement L'onduleur triphasé est constitué de trois bras (A, B, C) composés chacun de deux obtenue par un redresseur triphasé à diodes suivi d'un filtre L C. Chacun des trois branches comporte deux interrupteurs permettant de connecter une phase de la machine aux deux pôles de la source de tension.

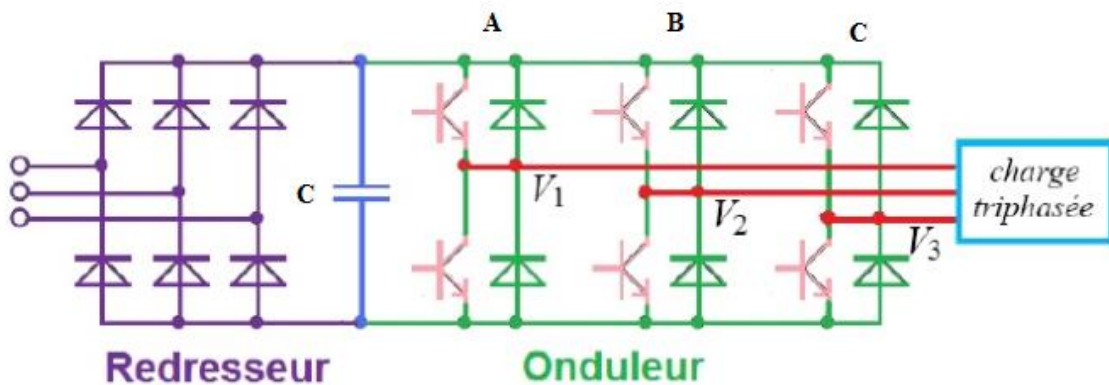


Fig.III.3Montage d'un onduleur triphasé

Les semi-conducteurs les plus couramment utilisés pour réaliser les interrupteurs sont les transistors de puissance (MOSFET, IGBT) et les thyristors rapides (principalement les GTO)[3].

III.2.4.Classification des onduleurs

Il existe plusieurs centaines de schémas d'onduleurs, chacun correspondant à un type d'application déterminé ou permettant des performances recherchées. Les onduleurs sont en général classés selon les modes de commutation de leurs interrupteurs.

III. 2.4.1 Onduleur autonome :

C'est un système qui nécessite des composants commandes à la fois à la fermeture et à l'ouverture, de fréquence variable, dont les instants de commutations sont imposés par des circuits externes la charge est quelconque cet onduleur n'est pas réversible.

III. 2.4.2 Onduleur non autonome :

Dans ce cas, les composants utilisés peuvent être de simples thyristors commandés uniquement à la fermeture et la commutation est «naturelle » contrairement à l'onduleur autonome. L'application principale de ce type d'onduleur se trouve dans les variateurs pour

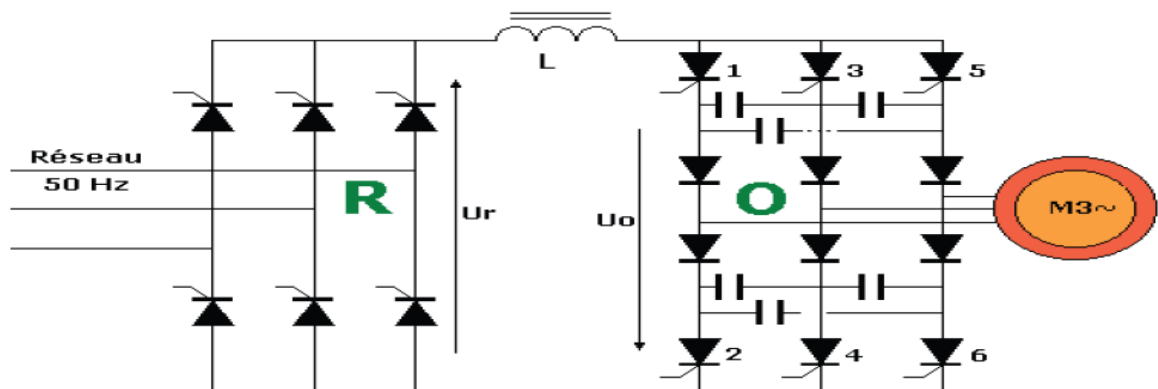
moteurs synchrones de très forte puissance où les thyristors sont souvent les seuls composants utilisables.

III.2.5. Différents types d'onduleurs pour alimentation des machines asynchrones

Pour fonctionner, un onduleur a besoin d'une source à courant continu que l'on peut obtenir en redressant la tension du réseau triphasé. La sortie à courant continu du redresseur et l'entrée à courant continu de l'onduleur sont reliées par un circuit intermédiaire. On utilise deux types de liaisons : les liaisons à source de courant et les liaisons à source de tension. Un onduleur associé à un redresseur est alors appelé onduleur de courant ou de tension.

III.2.5.1. Onduleur de courant

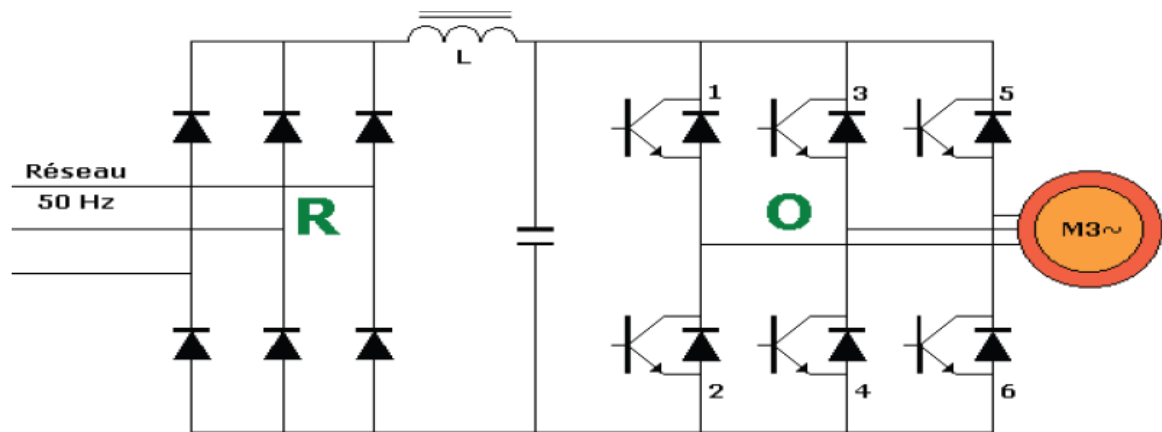
Lorsqu'il fonctionne en source de courant, le redresseur fournit un courant constant à l'onduleur ; une inductance de lissage L aide à maintenir le courant constant. La figure (III.4) représente un convertisseur avec un onduleur de courant.



FigIII.4 convertisseur avec onduleur de courant

III.2.5.2. Onduleur de tension

Fonctionne en source de tension, le redresseur fournit une tension constante à l'onduleur. La présence d'un condensateur dans le circuit de liaison aide alors à maintenir une tension constante à l'entrée de l'onduleur. Pour réaliser des onduleurs destinés à alimenter une charge ordinaire d'impédance très variable à partir d'un redresseur, on choisit des onduleurs de tension Figure (III.5).



FigIII.5 convertisseur avec onduleur de tension

Les raisons sont multiples :

- le fonctionnement de l'onduleur de tension est fort affecté par les imperfections de la source continue, peu par celle de la charge. Pour l'onduleur de courant, c'est l'inverse.
- les deux onduleurs ne délivrent pas directement une tension de sortie sinusoïdale,

donc il faut utiliser un filtre de sortie. Avec l'onduleur de tension on sait exactement ce qu'on a à filtrer (la tension à filtrer est imposée par la source continue). Avec l'onduleur de courant, la tension à filtrer dépend de la charge [4]

III.3.Modélisation de l'onduleur

La figure (III-6) représente le schéma de principe d'un onduleur, il est composé de six transistors ($T_1, T_2, T_3, T_1', T_2', T_3'$) Shuntés en antiparallèle par des diodes de récupération ($D_1, D_2, D_3, D_1', D_2', D_3'$). Les semi-conducteurs de l'onduleur sont considérés comme des éléments binaires idéalisés.

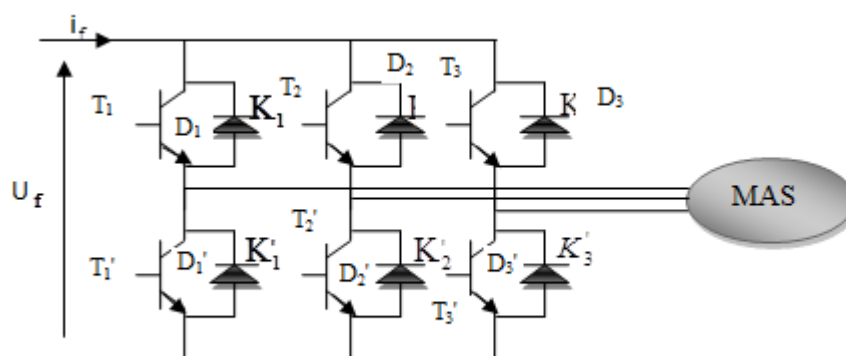


Fig III.6. Schéma de principe de l'onduleur de tension

Pour simplifier l'étude, nous associons à chaque bras de l'onduleur une fonction logique de connexion F_j ($j=1,2,3$).

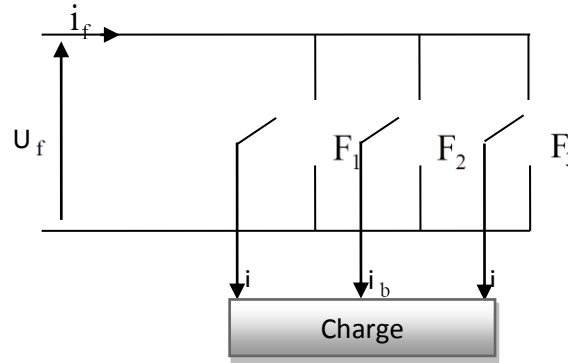


Fig III.7 Représentation des interrupteurs

Les commandes des interrupteurs d'un bras sont complémentaires du fait que chacun des trois bras de l'onduleur ne peut avoir que deux états logiques possibles (0, 1). Ces deux états peuvent être considérés comme une grandeur booléenne [1].

$$F_j = \begin{cases} 1 & \text{si } k_i \text{ est fermé et } k'_i \text{ ouvert} \\ 0 & \text{si } k'_i \text{ est fermé et } k_i \text{ ouvert} \end{cases}$$

Les tensions de lignes délivrées par l'onduleur sont :

$$\begin{cases} U_{ab} = U_f (F_1 - F_2) \\ U_{bc} = U_f (F_2 - F_3) \\ U_{ca} = U_f (F_3 - F_1) \end{cases} \quad (\text{III-1})$$

Sachant que la charge est équilibrée et le neutre est isolé alors :

$$V_a + V_b + V_c = 0 \quad (\text{III-2})$$

En tenant compte des deux relations (III-1) et (III-2), on obtient les tensions simples suivantes :

$$\begin{cases} V_a = \frac{U_f}{3} (2F_1 - F_2 - F_3) \\ V_b = \frac{U_f}{3} (-F_1 + 2F_2 - F_3) \\ V_c = \frac{U_f}{3} (-F_1 - F_2 + 2F_3) \end{cases} \quad (\text{III-3})$$

Les systèmes d'équations (III-3) peut s'écrire sous la forme matricielle :

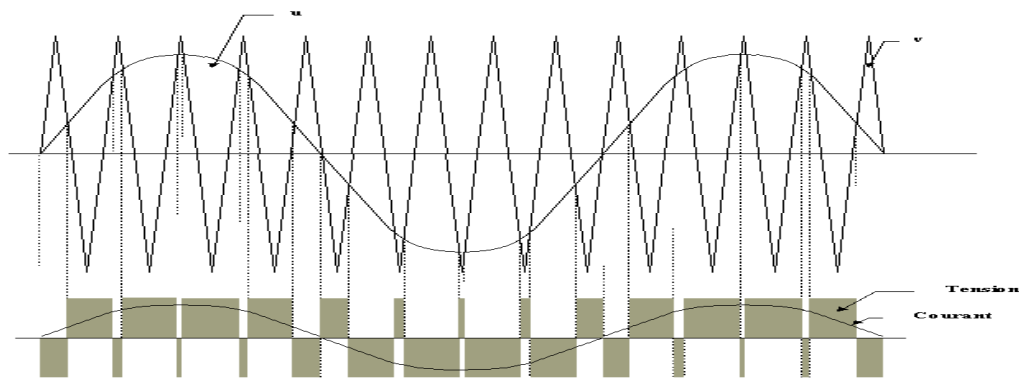
$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{U_f}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix}$$

L'expression de courant à l'entrée de l'onduleur :

$$i_f = F_1 i_a + F_2 i_b + F_3 i_c$$

III.4.Principe de la technique triangulo-sinusoïdale

La M.L.I. sinus triangle est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante (figIII.8). La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse. En triphasé, les trois références sinusoïdales sont déphasées de $2\pi/3$ à la même fréquence La porteuse étant triangulaire, il y a proportionnalité entre V_{ref} et le temps (t) de fermeture de l'interrupteur



FigIII.8 principe technique triangulo-sinusoïdale

Les signaux de référence sont donnés par l'équation suivante :

$$V_{ref} = r \sin \left[2\pi f t - 2(j-1) \frac{\pi}{3} \right] \quad j=1, 2, 3.$$

Avec : $r = \frac{V_m}{U}$: le coefficient de réglage en tension qui représente le rapport de l'amplitude de la tension de référence à la valeur crête de l'onde de modulation.

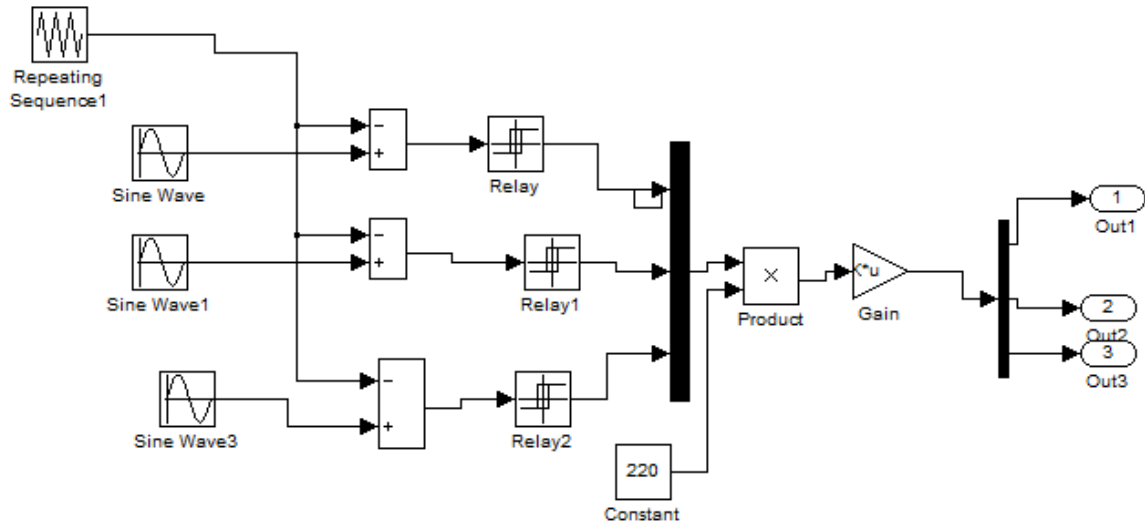
L'équation de la porteuse sur une période est donnée par :

$$V_p = \begin{cases} \frac{4t}{T_p} - (4n+1) & \text{si } nT_p < t < (2n+1)\frac{T_p}{2} \\ -\frac{4t}{T_p} + (4n+3) & \text{si } (2n+1)\frac{T_p}{2} < t < (n+1)T_p \end{cases} \quad (\text{III-4})$$

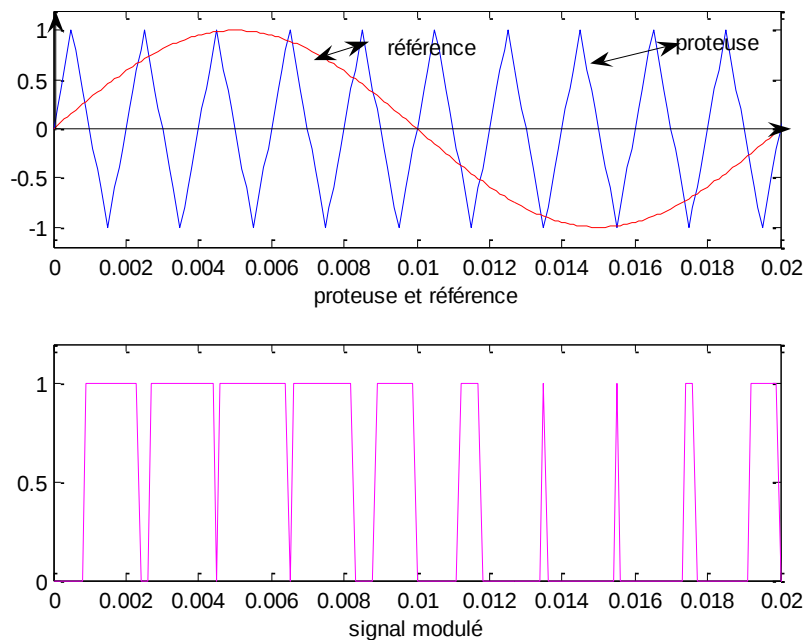
Où : $T_p = \frac{1}{f_p}$ et $f_p = m \cdot f$ avec $m = \frac{f_p}{f}$: indice de modulation qui est le rapport entre la

fréquence de la porteuse et la fréquence de la référence.

III.5.simulation de l'onduleur.



FigIII.9schéma bloc de simulation de l'onduleur.



FigIII.10 Principe de la commande par M.L.I triangle-sinusoidal

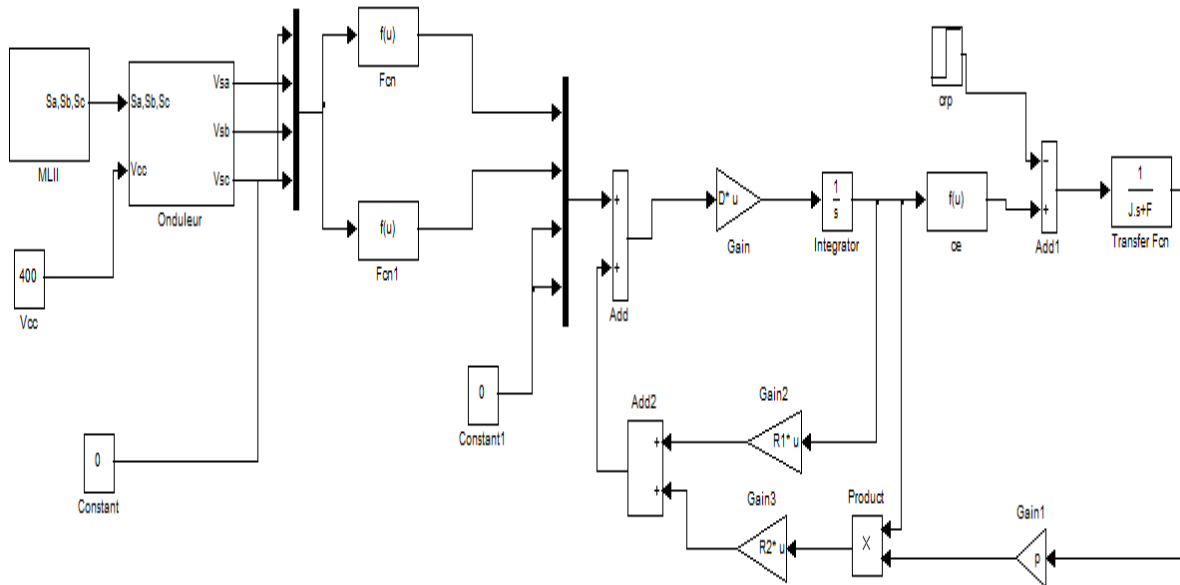
III.6.Association onduleur - Machine asynchrone

Pour les moteurs asynchrones, la vitesse de rotation du rotor dépend de la fréquence statorique f_s (fréquence de la tension d'alimentation du moteur) et de la fréquence des courants rotoriques (la charge). L'onduleur permet de faire varier la fréquence et donc de faire varier la vitesse de la machine.

Dans cette partie d'étude nous avons associé à la MAS un onduleur de tension pour fréquence $f=50$ Hz, 40 Hz et $f=30$ Hz afin de visualiser l'effet de la fréquence sur la vitesse pour cela nous avons provoqué un couple de charge à l'instant $t=2$ s de valeur $C_r=10$ N.m.

III.6.1.Simulation de la MAS associé avec onduleur à deux niveaux

III.6.1.1.Le Schéma de bloc

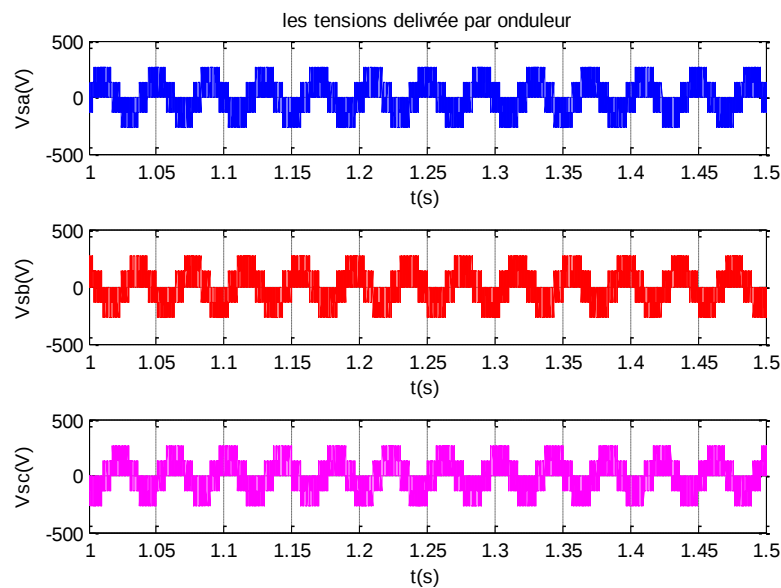


FigIII.11 Schéma bloc de la machine asynchrone

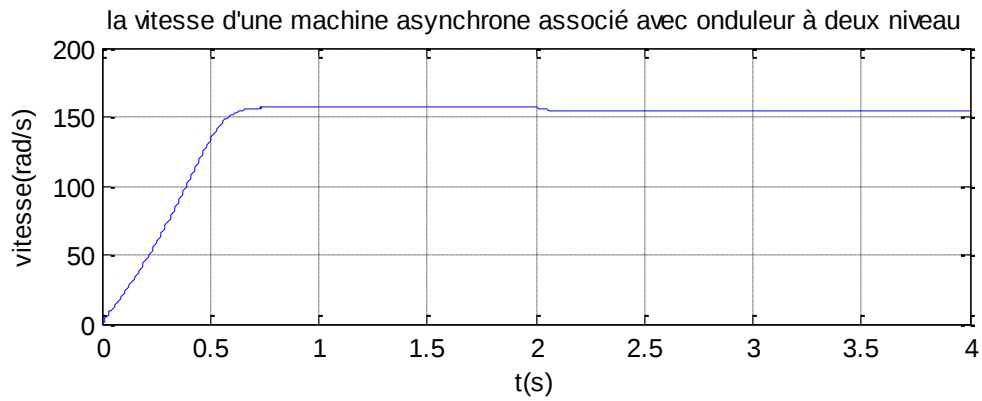
Associée à un onduleur à deux niveaux

III.6.2.Résultats de simulation association machine asynchrone - onduleur

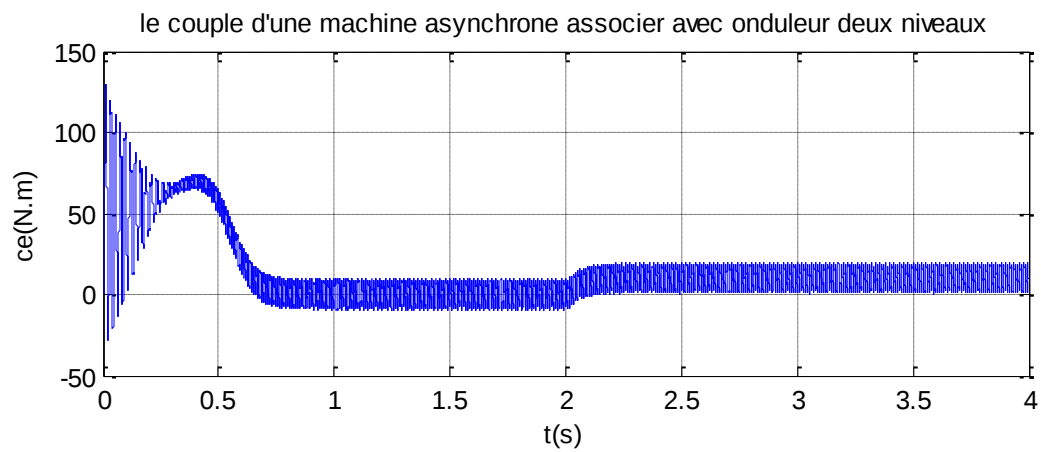
III.6.2.1.Pour $f=50\text{Hz}$



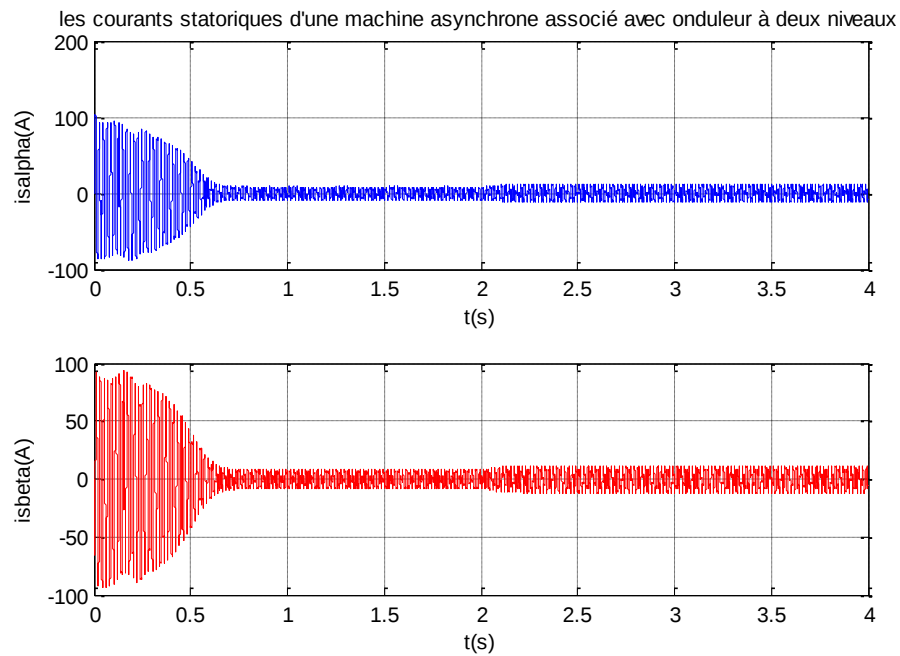
FigIII.12. les tension delivrée par l'onduleur



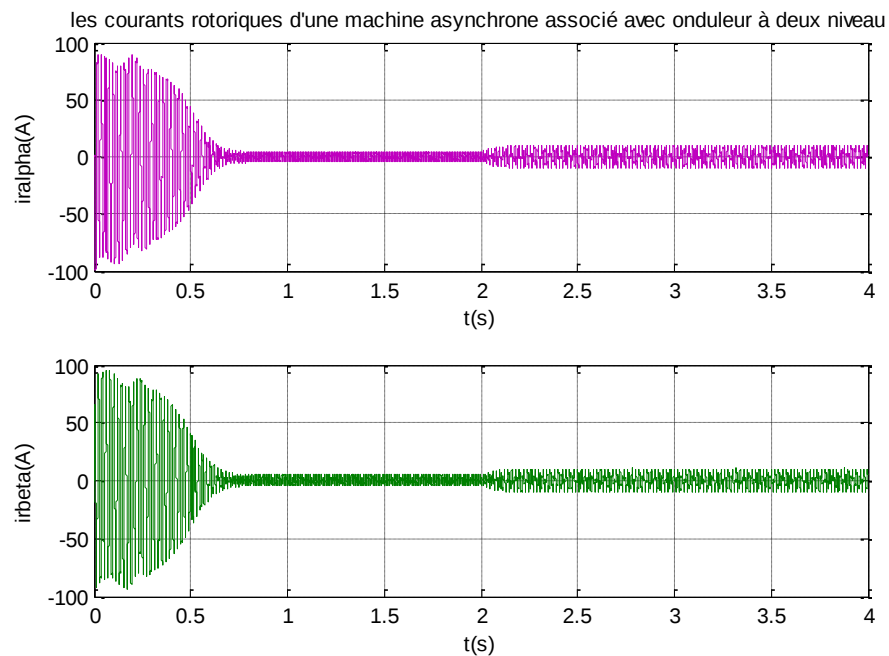
FigIII.13 la vitesse d'une machine asynchrone associé avec onduleur à deux niveaux $f=50\text{Hz}$



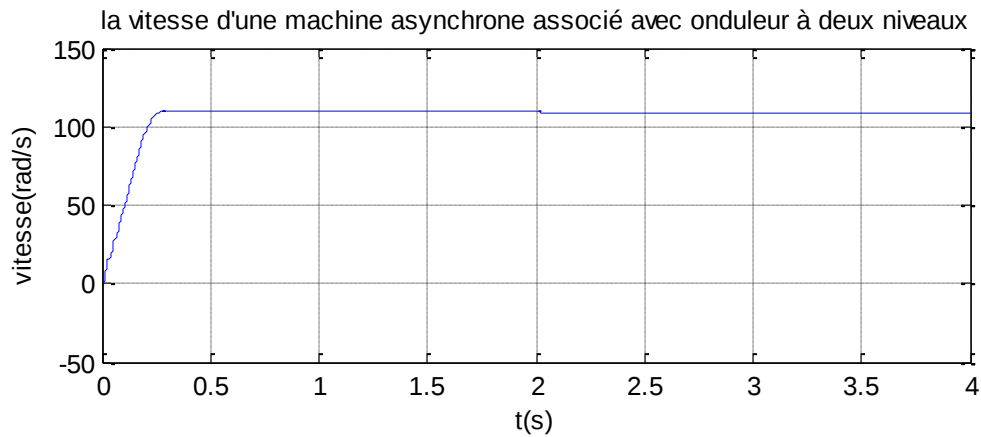
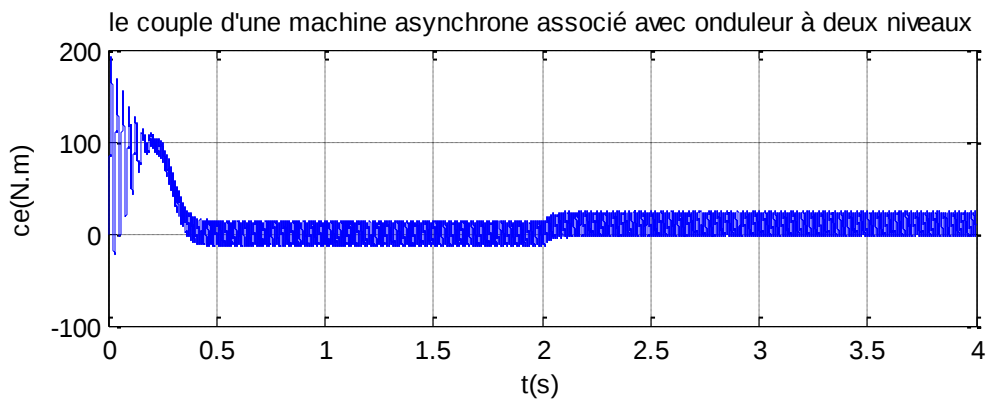
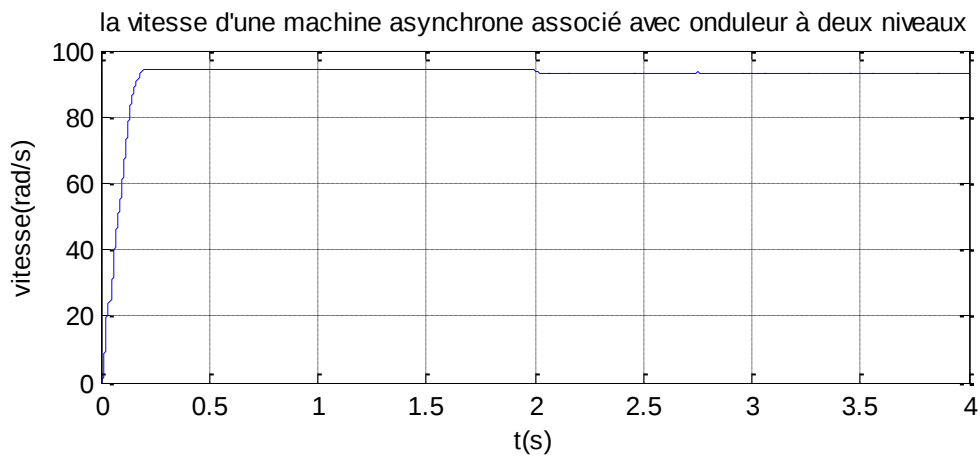
FigIII.14 le couple d'une machine asynchrone associé avec onduleur à deux niveaux $f=50\text{Hz}$

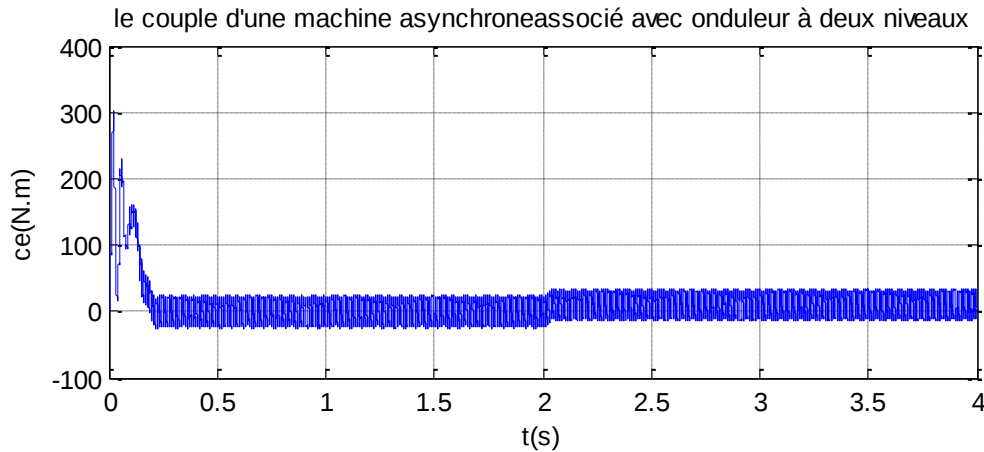


FigIII.15 les courants statoriques de la machine avec onduleur à deux niveaux $f=50\text{Hz}$



FigIII.16. Les courants rotoriques de la machine avec onduleur à deux niveaux $f=50\text{Hz}$

III.6.2.2. Pour $f=40\text{Hz}$ FigIII.17 la vitesse d'une machine asynchrone associé avec onduleur à deux niveaux $f=40\text{Hz}$ FigIII.18 le couple d'une machine asynchrone associé avec onduleur à deux niveaux $f=40\text{Hz}$ III.6.2.3. Pour $f=30\text{Hz}$ FigIII.19 la vitesse d'une machine asynchrone associé avec onduleur à deux niveaux $f=30\text{Hz}$



FigIII.20 le couple d'une machine asynchrone associé avec onduleur à deux niveaux $f=30\text{Hz}$

III.6.3. Interprétation des résultats

D'après les résultats de simulation de l'onduleur- machine asynchrone qui ont montrés que la vitesse en régime permanent se stabilise à une valeur proche de la vitesse, exactement comme dans le cas de la MAS alimentée directement par le réseau triphasé.

La forme de courant statorique es presque le même que celle dans le cas sans onduleur sauf qu'ici les valeurs maximale sont diminué avec une présence d'harmoniques. On note que la variation de la fréquence de commutation permet varier la vitesse de machine

III.7. conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe de fonctionnement de l'onduleur, et le principe de commande MLI par la technique trianuglo- sinusoïdale. On a étudié la machine asynchrone associée à un onduleur de tension, ont été présentés. Les résultats obtenus par simulation montrent que l'alimentation de la MAS par un onduleur présente une variation de vitesse et le couple. Donc il est clair que la MLI est nettement meilleure pour la variation de vitesse.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, en premier lieu nous avons Nous avons développé une étude général sur le moteur asynchrone afin que nous puissions une bonne connaissance de cette machine, qui joue un rôle important dans l'industrie.

Dans la deuxième partie nous avons présenté la modélisation du moteur asynchrone alimenté par une source de tension sinusoïdal triphasée et équilibrée à fréquence constante établi sous des hypothèses simplificatrices. Après, nous avons utilisé la transformation du Park pour éviter la complexité des équations différentielles. Cette transformation permet le changement du Système triphasé réel au système biphasé linéaire équivalent de cette machine ce qui signifie une facilité de résolution et de simulation

Dans la troisième partie, on à étudié la machine asynchrone associée à un onduleur à deux niveaux, ont été présentés. Les résultats obtenus par simulation montrent la vitesse de rotation d'un moteur asynchrone étant directement liée à la fréquence de son alimentation, pouvoir agir sur cette fréquence permet de modifier la vitesse du moteur. Il n'est cependant pas possible d'agir directement sur le réseau de distribution, c'est pourquoi on utilise la technique de modulation de largeur d'impulsion pour générer un signal électrique dont la fréquence sera contrôlée.

Bibliographie

- [1] **Abbas. Said**<< Commande Vectorielle d'un moteur asynchrone avec alimentation photovoltaïque >> master commande électrique Université de Batna **2011**
- [2] article Publié par **Patrick_mx** Principe et mise en oeuvre du moteur asynchrone - Cours de 1ère STI-GE
- [3] **BOUZID Allal El Moubarek** «Onduleur triphasé commandé par la Stratégie d'Élimination d'H armonique »magister : Analyse et Commande des Machines Électrique 2009/2010 **École Normale Supérieurs d'Enseignement Technique-ORAN-**
- [4] **diab youssouf et ben anter djamal**<< modelisation et commande d'un onduleur triphase pilote par mli a structre multiniveaux>> Master en Génie électrique Université Ouargla **2012**
- [5] **Sayoudi Tahar et Sayoudi Bouzid et Bengueddoudj Foudil** << Conception assistée par ordinateur (c.a.o) des machines asynchrones par l'application des algorithmes génétiques >> l'ingenieur département d'électrotechnique, Université de M'sila, [2006]
- [6] **Saouli farhat** << Mémoire commode d'une machine asynchrone sans capteur de vitesse >> Mémoire d'ingénieur de Université Larbi *Ben Mhidi* [2007]
- [7] **elhachemi fennouh**<<Apport des onduleurs multiniveaux dans la commande de la machine asynchrone (moteur à induction)>>Ingénieur d'état en électrotechnique De l'université de Batna **20**

