

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université-Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'Electrotechnique



Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Commandes Electriques
Thème :

***Etude des procédés de variation de vitesse
d'un moteur asynchrone***

Présenté par :

- 1) Melle : BOULEFDAOUI Fatima Zahra**
- 2) Melle : BOULEHIA Imene**

Soutenue, le -- / 07 / 2022

Devant les jurys composés de :

Dr. BENAZZA Baghdad	MCB	U.B.B	Président
Dr. YOUNES Mohammed	Prof	U.B.B	Encadrant
Dr. MENDAZ Kheira	MCA	U.B.B	Examineur

Promotion : 2021-2022

♠ Remerciement ♠

Tout d'abord, Nous tient à remercier « ALLAH » de nos avoir donné la possibilité de réaliser notre projet, d'arriver à notre souhait et d'atteindre notre objectif.

Nous tenons, tout d'abord, à remercier notre encadrant monsieur YOUNES Mohammed de nous avoir dirigés et de nous avoir encouragés tout au long de la réalisation de ce mémoire. Nous lui sommes très profondément reconnaissantes.

Nous remercions, les membres de jury de soutenance, Mr. BENAZZA Baghdadi et Mme. MENDAZ Kheira de nous honorer de leur présence et d'avoir accepté d'examiner notre travail.

A toutes les personnes, qui ont contribué de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail, nous les remercions tous, particulièrement notre famille et nos amis.

Enfin, nous ne pourrions terminer, ces remerciements sans une pensée à l'ensemble de nos enseignants qui sont à l'origine de notre savoir.

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail à :

A mes très chers parents ma mère et mon père pour tous les encouragements qu'ils m'ont fournis. Que dieu inchaa Allah les garde pour moi.

A mon frère : ABDE ALI.

A mes tantes : MENANA & RABHA.

A mes oncles et mes cousins.

A la mémoire de mes grands-parents.

A toute ma familles : BOULEFDAOUI & FAKIR

A mes chers amies : IMENE & GHIZLENE & JIHAD

BOULEFDAOUI FATIMA ZAHRA

DÉDICACE

Je dédie ce mémoire :

A mon père, à ma mère

A ma sœur : HASNAA.

A mon frère : YUCEF.

A ma tante : ZOUBIDA.

A mes cousins (es) : HOUARI & SOUMIA & IKRAM & KOUIDER.

A toute ma famille: BOULAHIA & BELKHIER.

A mes chère amies : FATIMA & KHADIJA & JIHAD.

BOULAHIA IMENE

SOMMAIRE

Sommaire

La liste de figures

Introduction générale	1
Chapitre I	
Généralité sur les Moteurs Asynchrones	
I.1 Introduction.....	2
I.2 Classification de machines électriques tournantes.....	2
I.3 Constitution de la machine asynchrone	3
I-3-1 Stator (inducteur)	3
I-3-2 Rotor (Induit)	4
I-3-2-1 Rotor bobiné	4
I-3-2-2 Rotor à cage d'écureuil.....	4
I-3-3 l'entrefer.....	5
I-4 Démarrage de la machine asynchrone.....	5
I-4-1 Démarrage direct.....	5
I-4-2 Démarrage étoile triangle.....	6
I-4-3 Démarrage par autotransformateur	7
I-4-4 Démarrage par résistance statorique	8
I-5 Principe de fonctionnement.....	9
I-6 Bilan de puissance.....	10
I-6-1 puissance électrique absorbée Pa.	10
I-6-2 Puissance mécanique totale PM	10
I-6-3 Pertes par effet joule et pertes dans le <i>fer</i> au rotor	Erreur ! Signet non défini. 11
I-6-4 Pertes collectives	11
I-7 Caractéristiques couple-vitesse	11
I-8 Les caractéristiques du fonctionnement.....	12

I-8-1 Fonctionnement à vide	12
I-8-2 Fonctionnement en charge	12
I-9 Conclusion.....	12
Chapitre II	
Modélisation et différentes méthodes de varier la vitesse de la MAS	
II-1	
Introduction.....	13
II-2 Représentation de la machine asynchrone.....	13
II-2-1 les hypothèses simplificatrices	13
II-2-2 Représentation des enroulements de la machine	13
II-3 Equation générales de la machine.....	14
II-4	Equations électriques.....
non défini.	Erreur ! Signet
II-5 Equations mécaniques.....	15
II-6 couples électromagnétiques.....	16
II-7 Paramètres de réglage.....	17
II-8 Réglage continu de la vitesse.....	17
II-8-1 Commande par variation du glissement.....	18
II-8-2Commande par variation de la fréquence de la tension d'alimentation.....	18
II-8-3Onduleur de courant	18
II-8-4Onduleur de tension.....	19
II-9 Réglage discontinu de la vitesse.....	19
II-9-1 Action sur le nombre de paires de pôles.....	19
II-9-2 Moteur à enroulements statoriques séparés	20
II-10 Conclusion.....	20
Chapitre III	
Etude et réalisation d'une commande pour une tension ondulée depuis cinq créneaux	
III-1 Introduction.....	23
III-2 Onduleur	23
III-3 Soit à décomposer le signal tension en séries de Fourier.....	24
III-4 Réarrangement du signal tension.....	25

III-5 Optimisation du signal en vue de réduire le DTH.....	29
III-5-1 Organigramme de calcul.....	30
III-6 Filtrage de la tension ondulée.....	32
III-6-1 Circuit d'un filtre passe-bas et fonction de transfert.....	32
III-7 Réalisation de la commande d'un pont en H pour une tension à 5 créneaux à fréquence variable.....	35
III-7-1 PIC 16F877A.....	35
III-7-2 Optocoupleur PC817.....	36
III-7-3 LED verte.....	36
III-8 Le microcontrôleur.....	37
III-8-1 Différentes familles des PICs.....	37
III-8-2 Choix d'un microcontrôleur.....	37
III-8-3 Présentation du microcontrôleur 16f877a.....	37
III-8-4 La désignation du microcontrôleur 16F877A.....	38
III-9 Loi de commande.....	38
III-10 Conclusion.....	40

CONCLUSION générale

Bibliographie

Résumé

Liste des figures

Chapitre I :Généralité sur les moteurs asynchrone

Figure (I-1) : Classification de machines électriques tournantes.....	1
Figure (I-2) : Schéma d'un moteur asynchrone.....	2
Figure (I-3) : Le stator de la machine asynchrone.....	2
Figure (I-4) : Le rotor bobiné d'un moteur asynchrone.....	4
Figure (I-5) : Le rotor à cage d'un moteur asynchrone.....	4
Figure (I-6) : Schéma de démarrage direct d'un moteur asynchrone.....	5
Figure (I-7) : Schéma de démarrage Etoile/Tringle d'un moteur asynchrone.....	6
Figure (I-8) : Schéma de démarrage par autotransformateur d'un moteur asynchrone.....	7
Figure (I-9): Schéma de démarrage par résistance statorique.....	8
Figure (I-10): Schéma présente le principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone.....	9
Figure (I-11): Le bilan de puissance d'un moteur asynchrone.....	10
Figure (I-12): Courbe typique du couple en fonction de la vitesse d'un moteur asynchrone triphasé de 1 kW.....	12
Chapitre II: Modélisation et différentes méthodes de varier la vitesse de la MAS	
Figure (II-1) : Représentation des enroulements de la machine asynchrone.....	14
Figure (II-2) : Courbe $C_{em}=f(g)$ d'une machine asynchrone.....	17
Chapitre III: Etude et réalisation d'une commande pour une tension ondulée depuis cinq créneaux.	
Figure (III-1) : Signal tension obtenu à partir du pont en H.....	23
Figure (III-2) : Décomposition du signal tension.....	23
Figure (III-3) : Signal rectangulaire à décomposer en série de Fourier.....	25
Figure (III-4) : Forme du signal décomposé en série de Fourier pour différent rang de fréquence (a : $k=1$; b : $k=19$; c : $k=109$; d : $k= 509$	26
Figure (III-5): Spectre fréquentiel de la forme de tension à 5 créneaux présenté jusqu'au rend 24.....	28
Figure (III-6): Organigramme de calcul les valeurs d'angle pour un DTH minimal avec le rang considéré jusqu'à 519.....	29

Figure (III-7): Forme du signal décomposé en série de Fourier pour différent rend de fréquence (a: $k=1$; b : $k=19$; c : $k=109$; d : $k=509$	30
Figure (III-8): Spectre fréquentiel de la forme de tension à 5 créneaux présenté jusqu'au rend 24.....	31
Figure (III-9) : Filtre basse bas pour la tension à la sortie de l'onduleur.....	31
Figure (III-10) : Diagramme de Bode (le gain et la phase).....	33
Figure (III-11) : Spectre fréquentiel de la tension filtrée présenté jusqu'au rang 39 ^{ème} rang.a : tension à 5 créneaux ; b : tension à 1 seul créneau.....	33
Figure (III-12) : l'onde de tension après filtrage présentées jusqu'au 519 ^{ème} rang. a : tension à 5 créneaux ; b : tension à un seul créneau	34
Figure (III-13): Circuit de commande relatif à un bras du pont en H.....	35
Figure (III-14) : Le boîtier depic 16f877A.....	36
Figure(III-15) : Signaux de commande des gates des mosfets visualisé sur oscilloscope.....	38

INTRODUCTION
GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le réglage de la vitesse du système d'entraînement électrique est fondamental, car il permet d'assurer la stabilité de fonctionnement de ces machines, meilleure productivité et qualité qui s'imposent dans l'établissement du projet des systèmes d'entraînement électriques et aussi dans le choix du type de moteur d'entraînement.

Dans la pratique de nombreuses situations dans lesquelles le processus technologique impose un maintien de la vitesse à une valeur strictement constante quelle que soient les actions ou perturbatrices extérieures influençant le fonctionnement du système. Afin de montrer l'importance d'entraînement à vitesse variable dans les différentes branches de l'industrie moderne, on peut citer par exemple :

En métallurgie, chaque métal est caractérisé par une vitesse optimale qui détermine le rendement du laminoir et la qualité des produits. Ainsi, une vitesse relativement basse, lors de laminage, introduit le déclin du rendement du métal, alors que pour une vitesse relativement grande introduira le déclin de la qualité du métal.

En cimenterie, la vitesse à laquelle doit tourner un aspirateur de fumée dépend de la qualité du combustible : son humidité, sa teneur en cendre, les conditions de combustion et le débit à la chaudière.

Les équipements d'appareil de levage : Pont roulant ; levage des treuils

La traction ferroviaire : Locomotives et les automotrices.

De nos jours, l'entraînement à vitesse variable pour les différentes machines de l'industrie exige essentiellement la fiabilité de fonctionnement, un réglage étendu et progressive.

Ainsi :

Dans le premier chapitre, nous donnerons un aperçu général sur la morphologie et le principe de fonctionnement de la machine asynchrone.

Dans le deuxième chapitre on s'intéressera à la modélisation de la MAS en équations mathématiques. Une transformation en deux axes sera utilisée afin de simplifier la difficulté de résolution des équations.

Dans le dernier chapitre nous étudierons un convertisseur statique « onduleur » comme solution de variation de vitesse et comme solution pour obtenir des tensions alternatives avec un excellent DTH.

CHAPITRE I

GENERALITE
SUR LES MOTEURS
ASYNCHRONES

I-1 Introduction :

Les moteurs asynchrones triphasés sont les moteurs employés le plus fréquemment dans l'industrie. Ils possèdent en effet plusieurs avantages : simplicité, robustesse, prix peu élevé et entretien facile. [1]

Les machines asynchrone se sont répondues dans tous les domaines de la motorisation industrielle, y compris pour des applications de haute technologie, depuis que les progrès récent de l'électronique de puissance et de la commande numérique permettent de les commandes avec de bonnes performances dynamiques. [2]

I-2 Classification de machines électriques tournantes :

Les moteurs électriques sont généralement classés selon type du réseau électrique dans Le quelle le moteur est relié: moteur à courant continu (DC) et des moteurs à courant alternatif (CA). Les moteurs avec alimentation (CA) sont subdivisés en deux : synchrones et asynchrones, Les moteurs à inductions sont divisés en deux catégories principales: monophasé et triphasé, le premier type de moteurs à induction n'est pas étudié dans ce travail. Les moteurs à induction triphasés sont classés en fonction du type du rotor: rotor à cage et rotor bobiné. [3]

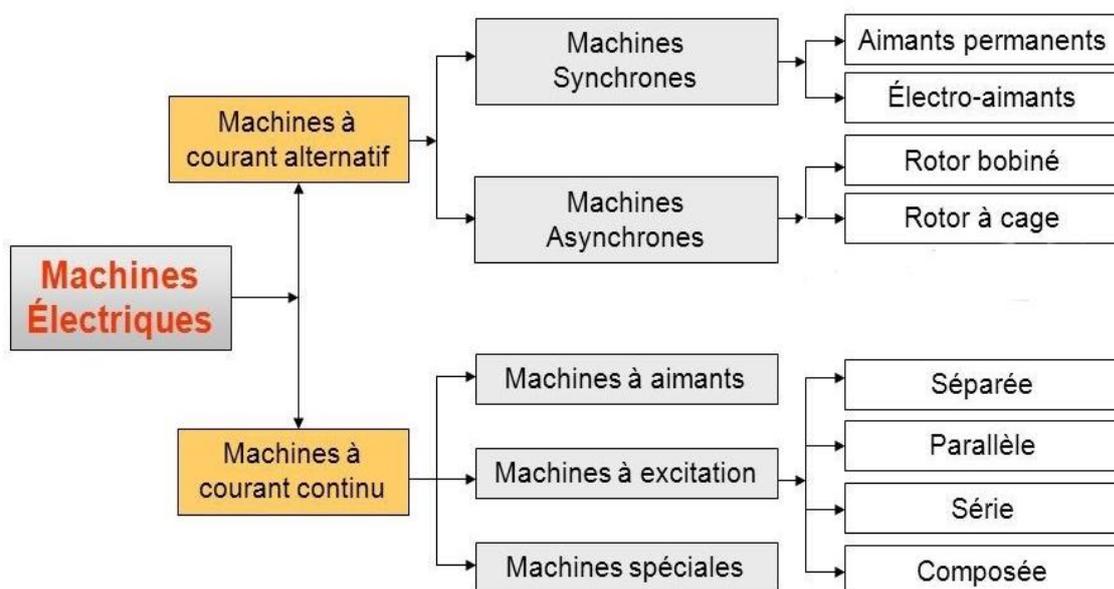


Figure I-1 : classification de machines électriques tournantes. [4]

I.3 Constitution de la machine asynchrone :

La machine asynchrone comporte une partie fixe constituée d'une carcasse à l'intérieur de laquelle est logés le circuit magnétique et le bobinage du stator d'une part, et d'une partie mobile appelée rotor d'autre part. [5]

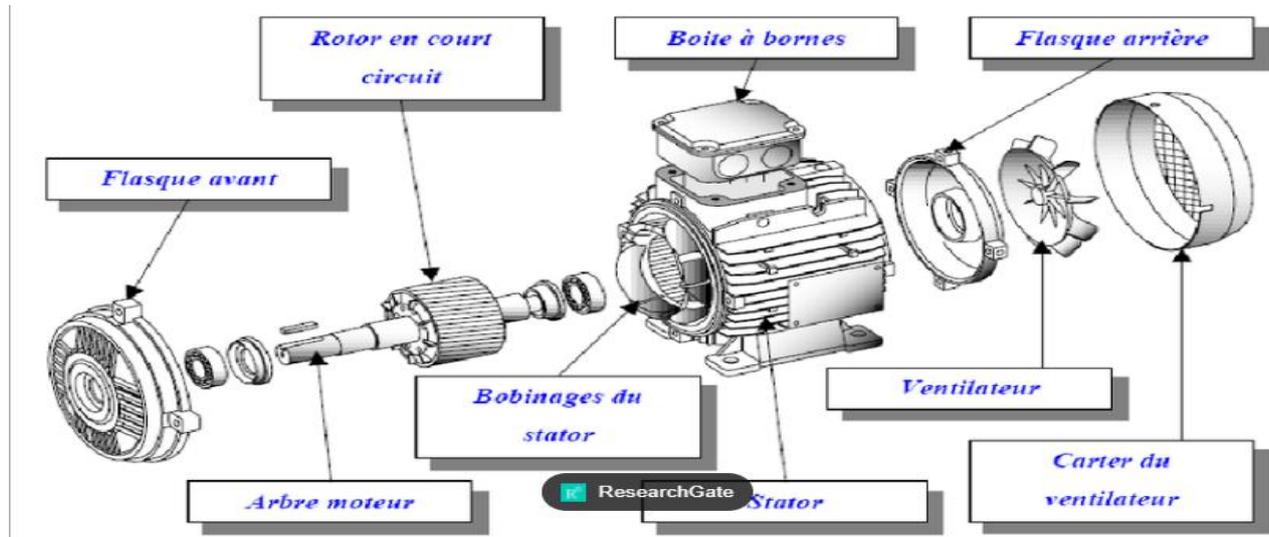


Figure I-2:schéma d'un moteur asynchrone. [3]

I-3-1 Stator (inducteur):

Le stator comporte une carcasse en acier renfermant un empilage de tôles identiques qui constituent un cylindre vide ; ces tôles sont percées de trous à leur périphérie intérieure. L'alignement de ces trous forme des encoches dans lesquelles on loge un bobinage triphasé. [1]

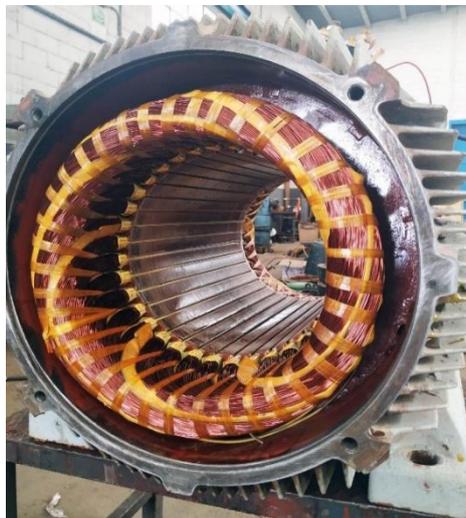


Figure I-3 : Le stator de la machine asynchrone. [6]

I-3-2 Rotor (Induit) :

Le rotor c'est la partie mobile de la machine n'est relié à aucune source de tension extérieure on distingue deux familles : ceux dont le rotor est dit bobiner et ceux dont le rotor est dit à cage :

I-3-2-1 Rotor bobiné :

Le bobinage rotorique est toujours couplé en étoile et il est accessible de l'extérieur grâce à un système de bagues et de balais, ce qui permet soit le court-circuiter soit le relier à un circuit permettant d'agir sur les caractéristiques du moteur dans certains fonctionnement. [7]



Figure I-4: le rotor bobiné d'un moteur asynchrone. [8]

I-3-2-2 Rotor à cage d'écureuil :

La grande majorité des moteurs sont à cage, ces encoches contiennent des barres en alliage d'aluminium pour les machines de petite et moyenne puissance, en cuivre pour les moteurs de forte puissance, reliés aux deux extrémités par des anneaux de court-circuit. [9]



Figure I-5: le rotor à cage d'un moteur asynchrone. [9]

I-3-3 l'entrefer :

C'est l'espace entre le stator et le rotor. Les performances de la machine asynchrone sont très dépendante de l'épaisseur de cet entrefer elle varie de quelques dixièmes de millimètres pour les machines de faible puissance à quelque millimètres pour celles de forte puissance. [2]

I-4 Démarrage de la machine asynchrone :**I-4-1 Démarrage direct :**

Démarrage réservé aux moteurs de petites puissances ($P < 5\text{kW}$) en raison de l'appel important de courant lors du démarrage : [10]

Les avantages :

- Simplicité de l'appareillage.
- Rapidité de la mise en régime.

Les inconvénients :

- Démarrage brutale.
- Courant d'appel élevé.

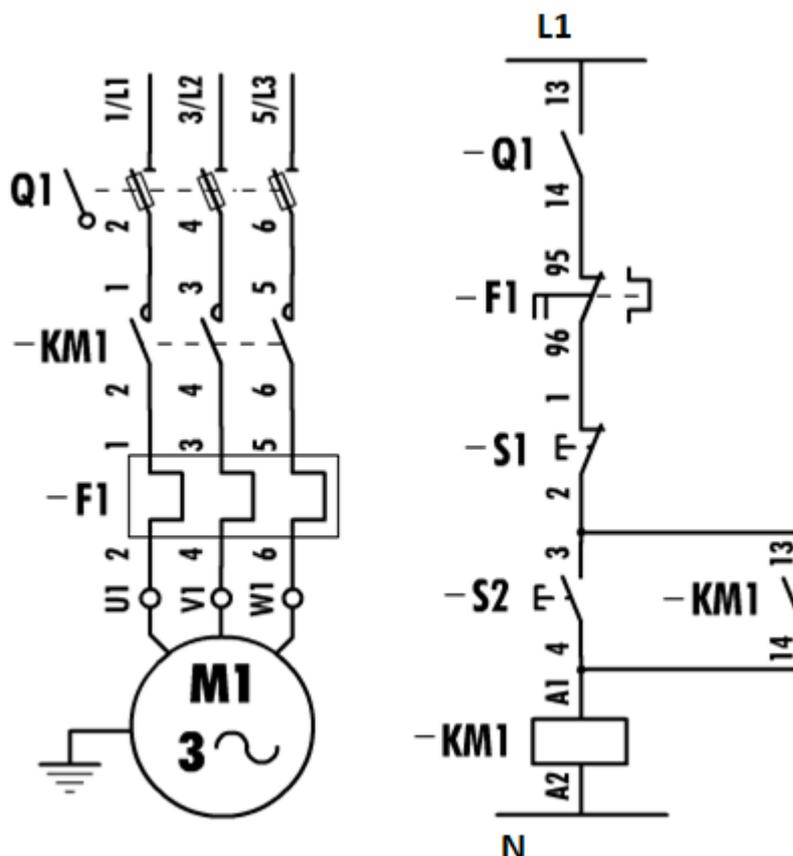


Figure I-6: Schéma puissance et commande de démarrage direct d'un moteur asynchrone. [11]

I-4-2 Démarrage étoile triangle :

Un moteur asynchrone triphasé alimenté d'une puissance importante nécessite ce type de démarrage, qui permet de limiter le courant d'appel au démarrage. Le moteur est commandé par un bouton marche et un bouton d'arrêt, l'arrêt est prioritaire. [12]

Les avantages :

- Réduction du courant de démarrage.
- Relativement bon marché.

Les inconvénients :

- Couple très réduit.
- Coupure d'alimentation lors du passage étoile-triangle.
- Temps de démarrage + élevé.

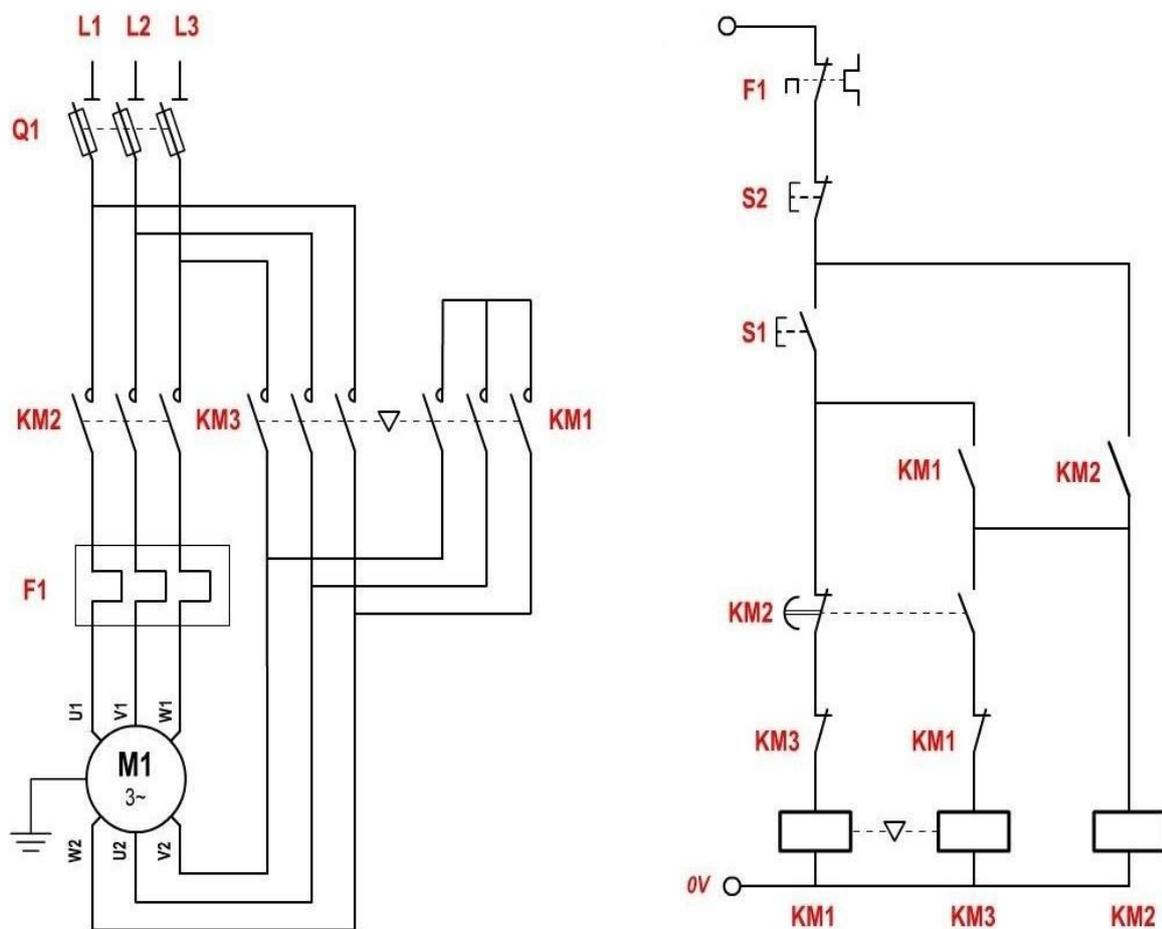


Figure I-7 : schéma puissance et commande de démarrage Etoile/Triangle d'un moteur asynchrone.

[13]

I-4-3 Démarrage par autotransformateur :

Cela consiste à réduire la tension d'alimentation en modifiant le nombre de spires secondaire d'un autotransformateur qui est mis hors circuit quand le démarrage est terminé :

Les avantages :

- possibilité de choisir le couple de démarrage. [7]
- le passage des différents temps de démarrage sans coupure de courant. [7]
- le courant de démarrage peut être choisi avec précision. [10]

Les inconvénients :

- Si le courant est déversé par 3 alors le couple est déversé par 9. [10]

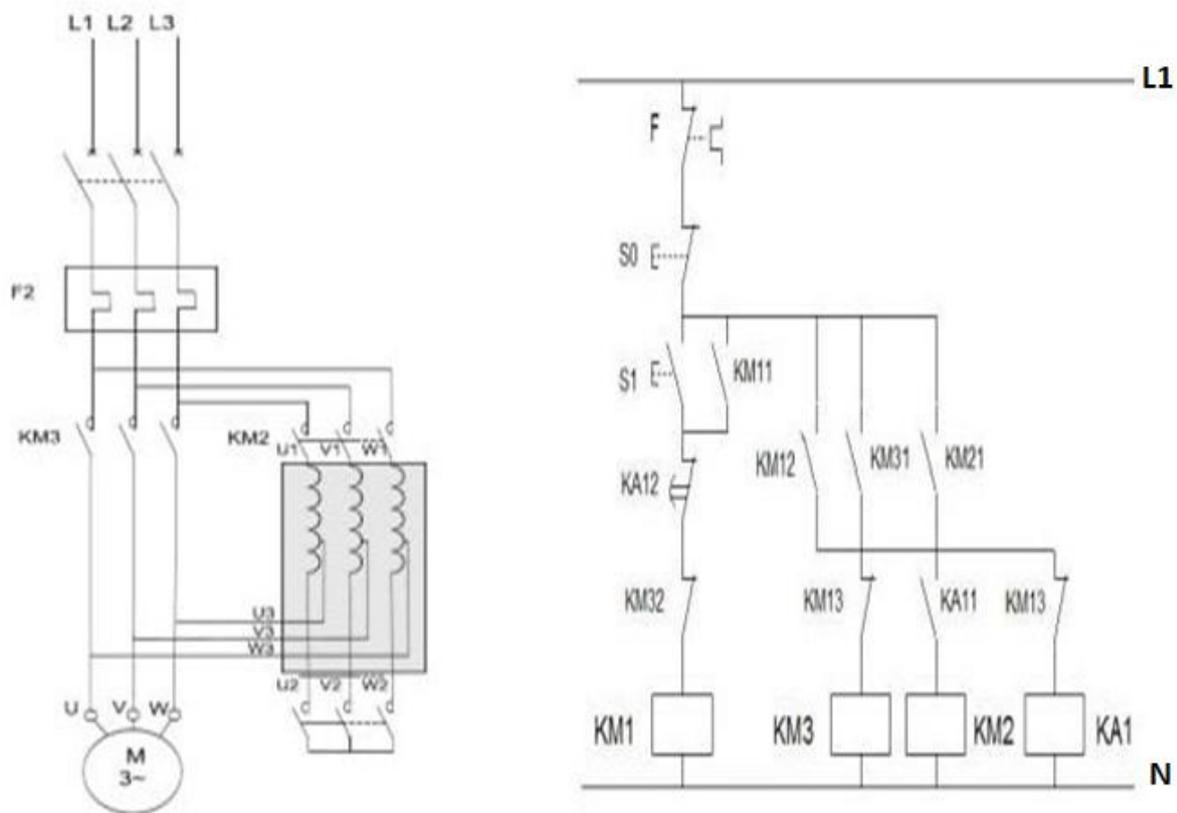


Figure I-8 : schéma de puissance et commande de démarrage par autotransformateur d'un moteur asynchrone. [14]

I-4-4 Démarrage par résistance statorique :

L'alimentation à tension réduite est obtenue dans un premier temps par la mise en série d'une résistance dans le circuit ; cette résistance est ensuite court-circuitée. Le courant de démarrage est réduit proportionnellement à la tension :

Les avantages :

- Possibilité de choisir le couple de démarrage. [10]
- Choix du courant de démarrage avec précision. [10]
- Passage entre phases de démarrage sans interruption du courant. [11]

Les inconvénients :

- Si le courant est divisé par 3 alors le couple est divisé par 9. [10]
- En pratique il est peu utilisé car on l'utilise que pour les couples résistant faibles (pompes, ventilateurs ...). [10]
- Perte de puissance dans les résistances au démarrage. [11]

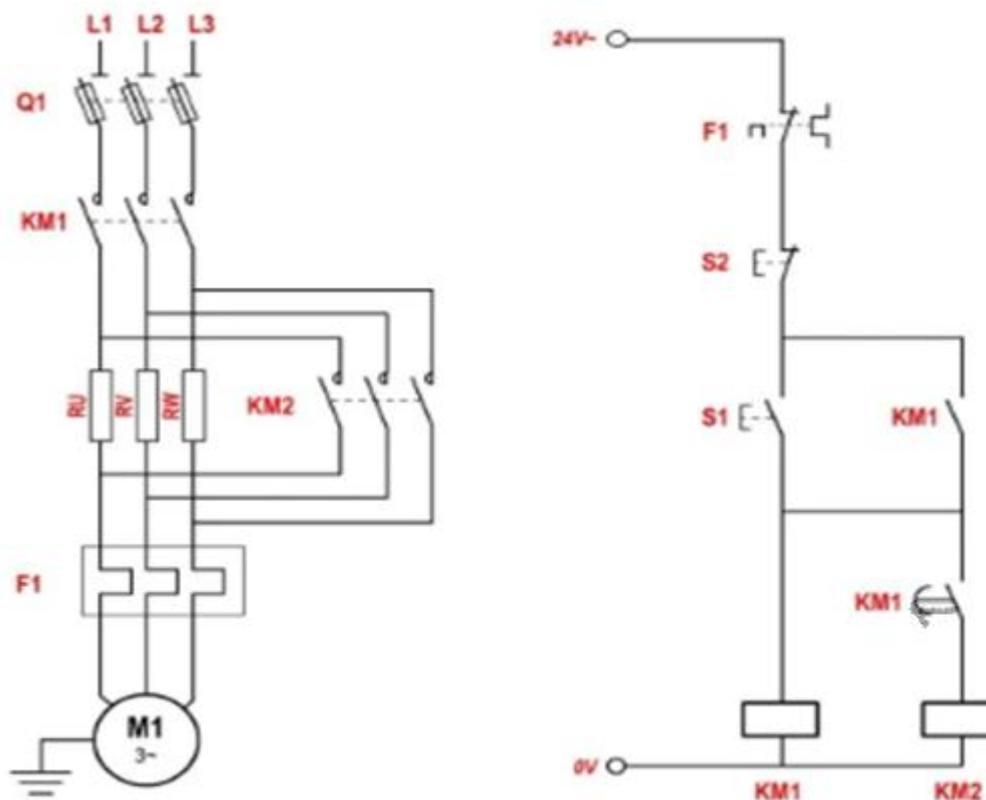


Figure I-9 : schéma puissance et commande de démarrage par résistance statorique. [13]

I-5 Principe de fonctionnement :

Le principe de fonctionnement repose entièrement sur les lois de l'induction : le moteur asynchrone est un transformateur à champ magnétique tournant dont le rotor est en court-circuit. [5]

Un ensemble de trois bobinages parcourus par des courants triphasés induisent un champ tournant statorique de vitesse de rotation en tours par minute $n_s = 60 \cdot \frac{f}{p}$ (I-1)

'p' : étant le nombre de paires de pôles du bobinage. Le rotor est constitué de conducteurs (des bobinages ou carrément des barres métalliques) disposés le long du rotor et court-circuités. Lorsque le champ tournant balaye ces conducteurs, il induit des courants qui entrent en interaction avec le champ et permettent à un couple moteur de se créer. Le rotor se met alors à tourner et se stabilise à une vitesse toujours légèrement inférieure à la vitesse de synchronisme.

Il est impossible pour le rotor de tourner à la vitesse de synchronisme puisqu'il serait alors baigné dans un champ fixe, et donc parcouru par un courant induit nul. En l'absence de courant, le couple serait nul, et la machine décélèrerait [15]

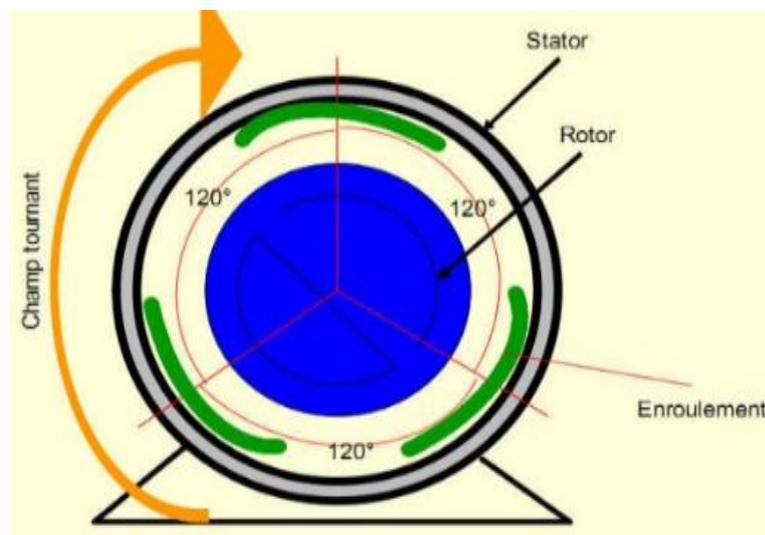


Figure I-10 : schéma présente le principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone. [16]

I-6 Bilan de puissance :

Le moteur asynchrone absorbe une puissance électrique (absorbé), qu'il transforme en puissance mécanique (utile) passe par quelques étapes comme sur la figure ci-dessous :

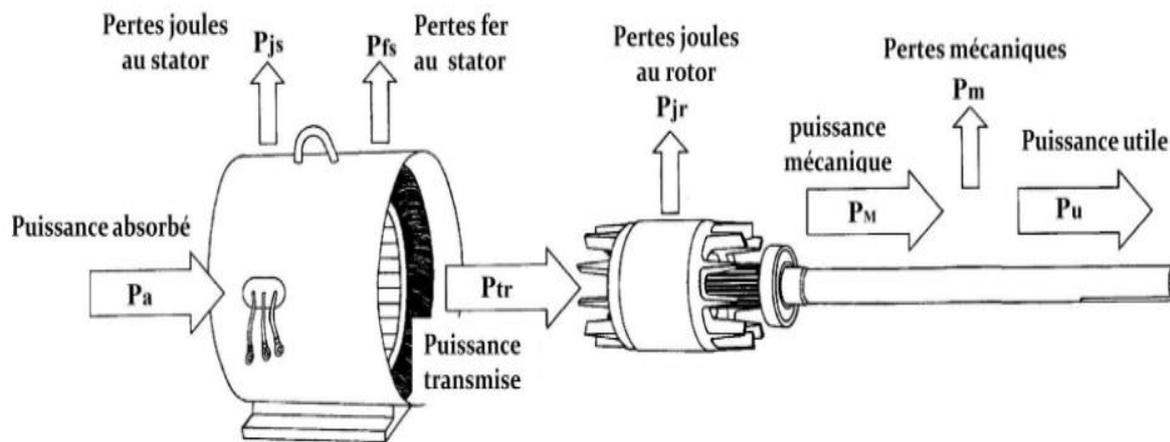


Figure I-11 : le bilan de puissance d'un moteur asynchrone. [1]

I-6-1 puissance électrique absorbée P_a :

La puissance absorbée par un moteur asynchrone est une puissance active électrique est notée p ou p_a et s'exprime en watts (W). Lorsque le moteur est connecté à un réseau triphasé, P_a vérifie la relation : $p_a = \sqrt{3}U \cdot I \cdot \cos\varphi$ (I-2)

Quelque-soit le couplage.

Cette puissance est transmise au stator de la machine qui est le siège de deux types de pertes. [17]

U : est la tension composée du réseau

I : est le courant en phase

φ : est le déphasage entre le courant et la tension

I-6-2 Puissance mécanique P_M :

La puissance mécanique P_M développée par le moteur est égale à la puissance transmise au rotor moins les pertes Joule dans celui-ci. Ainsi : [1]

$$P_M = P_r - P_{jr} = P_r - g \cdot P_r \quad (I-3)$$

$$\text{D'où : } P_M = P_r (1 - g) \quad (I-4)$$

P_M : Puissance mécanique.

P_r : Puissance transmise au rotor.

P_{jr} : Les pertes joule rotorique.

g : glissement.

I-6-3 Pertes par effet joule et pertes dans le fer au rotor :

Les pertes fer au rotor sont souvent négligeables : $p_{fr} \approx 0$

On préfère souvent à cette expression, la relation particulière qui les relie à la puissance transmise au rotor : [3]

$$p_{jr} = (g \cdot P_r) \quad (I-5)$$

1-6-4 Pertes collectives :

Lors d'un essai à vide, le moteur absorbe la puissance.

$$P_{a0} = \sqrt{3} U \cdot I_0 \cos \varphi_0 = p_{js} + p_{fs} + p_{jr} + p_{fr} + p_M + P_U \quad (I-6)$$

Or, à vide : $g \approx 0 \Rightarrow p_{jr} = 0$

$$P_U = 0 \text{ et } p_{fr} \approx 0 \quad \text{et} \quad p_{js} = \frac{3}{2} R \cdot I_0^2 \quad (I-7)$$

$$\text{Le bilan des puissances à vide s'écrit : } P_{a0} = \frac{3}{2} R \cdot I_0^2 + p_{fs} + p_M \quad (I-8)$$

Lors de l'essai à vide, les pertes par effet Joule au stator p_{js} sont négligeables [1].

$$\text{Les pertes collectives } p_c = p_{fs} + p_M [17] \quad (I-9)$$

I-7 Caractéristiques couple-vitesse :

Considérons un moteur alimenté par une source triphasée dont la tension et la fréquence sont fixes. À mesure qu'on augmente la charge mécanique, la vitesse baisse progressivement. Cependant, lorsque le couple atteint la valeur critique appelée point de décrochage, la vitesse chute subitement et le moteur s'arrête. Il existe donc une relation entre le couple développé par le moteur et sa vitesse. Cette relation n'est pas simple, c'est pourquoi on préfère la présenter sous forme de courbe plutôt que par une équation. On montre à la Figure (I-12) une courbe du couple en fonction de la vitesse pour un moteur de 1 kW, de construction conventionnelle. Si T désigne la valeur du couple de pleine charge, on voit que le couple de démarrage vaut $1,5 T$. À mesure que la vitesse croît, le couple diminue, et passe par un minimum avant d'augmenter de nouveau. Il atteint une valeur maximale de $2,5 T$ à 80 % de la vitesse synchrone. Passé ce point, le couple diminue, tandis que la vitesse continue à augmenter. On passe alors par le point d'opération normal (T, n) de pleine charge, avant d'atteindre la vitesse synchrone n_s , où le couple est nul.

Les moteurs de petite puissance (10 kW et moins) atteignent leur couple de décrochage à une vitesse n_d qui est d'environ 80 % de la vitesse synchrone.

Les machines de grosse puissance (1000 kW et plus) décrochent à une vitesse de l'ordre de 0,98 n_s . La forme de la courbe couple/vitesse dépend donc de la grosseur du moteur et de ses caractéristiques particulières. [1]

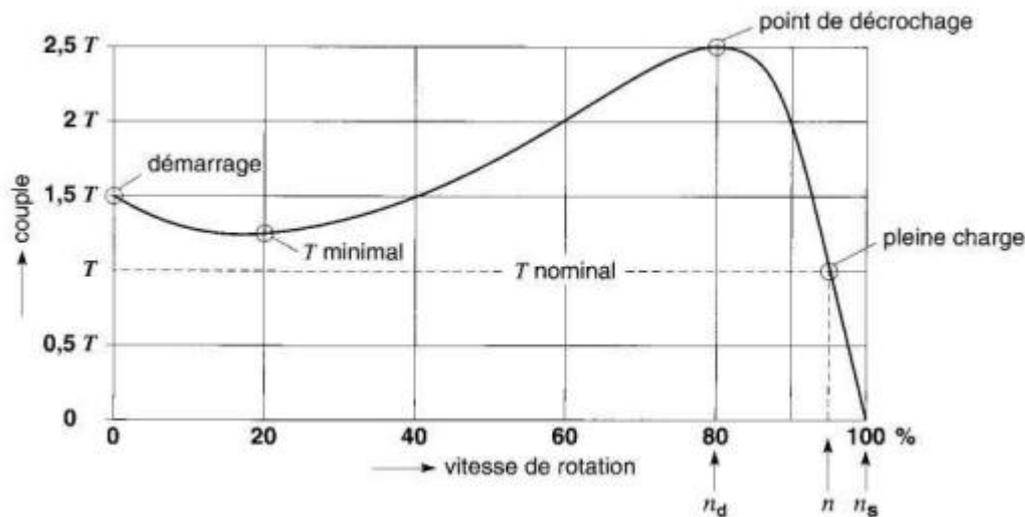


Figure I-12 : Courbe typique du couple en fonction de la vitesse d'un moteur asynchrone triphasé de 1 kW [1]

I-8 Les caractéristiques du fonctionnement :

I-8-1 Fonctionnement à vide :

À vide le moteur n'entraîne pas de charge.

Conséquence: le glissement est nul et le moteur tourne à la vitesse de synchronisme.

À vide : $g=0$ donc $n=n_s$ et la puissance absorbée : [18]

$$P_{a0} = P_m + P_{fs} + P_{js} \quad (I-10)$$

P_{js} Est négligeable.

I-8-2 Fonctionnement en charge :

Le moteur tourne à une vitesse voisine de la vitesse synchronisme lorsqu'il n'est pas chargé. Quand on le charge, il ralentit. Le champ tournant coupe alors les barres du rotor à une vitesse relative plus grande. Il en résulte que la tension induite et le courant dans le rotor augmentent de façon à développer un couple suffisant pour vaincre la charge mécanique à entraîner. La vitesse se stabilise lorsque le couple développé par le moteur est exactement égal au couple imposé par la charge [1]

I-9 Conclusion :

Les moteurs asynchrones triphasés sont très employés dans l'industrie pour les différents avantages qu'ils présentent, dans ce chapitre on a présenté quelques généralités sur la machine asynchrone ses différents types de démarrages et constituants ainsi que son principe de fonctionnement. Dans le deuxième chapitre on va étudier les différentes méthodes de variation de vitesse.

CHAPITRE II
MODELISATION
ET DIFFERENTES METHODES
DE VARIER LA VITESSE
DE LA MAS

II-1 Introduction :

La modélisation de la machine asynchrone, est destinée à l'étude de son comportement qu'à la mise en place des fonctionnements de la commande, est nécessaire pour le bon déroulement du processus d'entraînement. Ce chapitre sera consacré au modèle mathématique (équations électriques, équations mécaniques). [19]

Le moteur asynchrone est, en raison de son principe de fonctionnement, un moteur à vitesse unique, certaines applications nécessitant la variation de vitesse, lui ont été longtemps refusées malgré la recherche de solutions technologiques parfois innovantes.

En effet, de nos jours, grâce aux progrès de l'électronique de puissance et de l'électronique de commande (commande numérique par microprocesseur), la variation de vitesse est accessible à ce moteur. [28]

II-2 Représentation de la machine asynchrone :

II-2-1 les hypothèses simplificatrices :

La modélisation de la machine asynchrone est établie sous les hypothèses simplificatrices suivantes [20] :

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligeable.
- On suppose qu'on travaille en régime non saturé.
- On néglige le phénomène d'hystérésis, les courants de Foucault et l'effet de peau.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.
- Le bobinage est réparti de manière à donner une force magnétomotrice sinusoïdale s'il est alimenté par des courants sinusoïdaux.

II-2-2 Représentation des enroulements de la machine :

Les enroulements des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques dans l'espace peuvent être représentés comme indiqué en (Figure II-1). Les phases rotoriques sont court-circuitées sur elles-mêmes. ' Θ ' Est l'angle électrique entre l'axe de la phase ' A ' statorique et la phase ' a ' rotorique. [21]

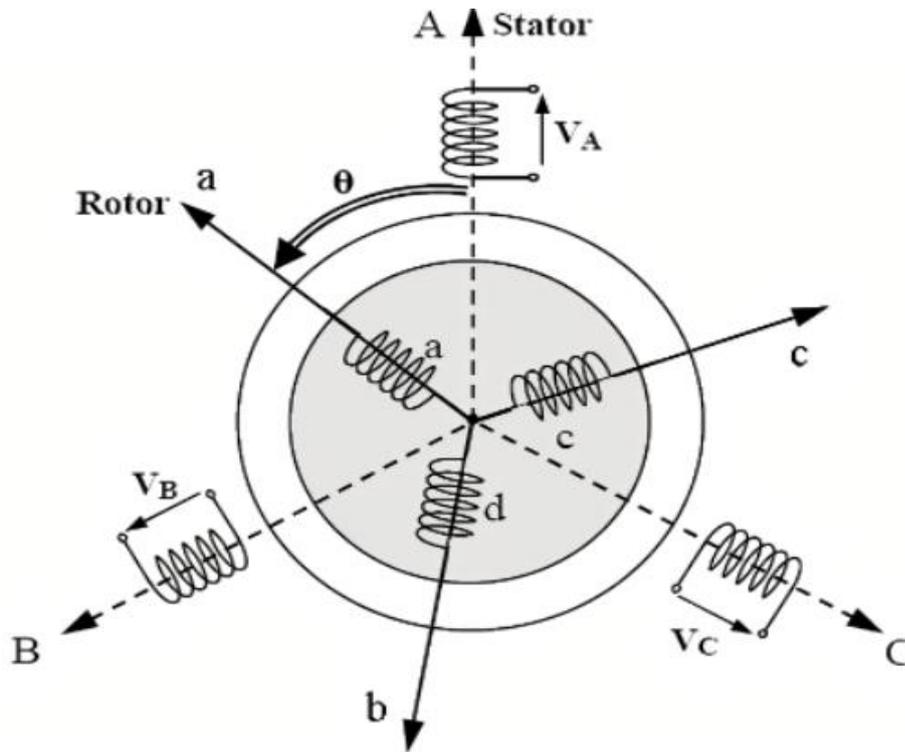


Figure II-1 : Représentation des enroulements de la machine asynchrone. [22]

II-3 Equation générales de la machine :

Les équations générales de la machine asynchrone à cage d'écurieul dans un repère triphasé s'écrivent :

$$[\mathbf{V}_{rabc}] = \mathbf{0} = \mathbf{R}_r \cdot [\mathbf{I}_{rabc}] \cdot \frac{d}{dt} [\mathbf{\Phi}_{rabc}] \quad (\text{II -1})$$

On spécifie respectivement les vecteurs ou paramètres statoriques par l'indice 's' et rotoriques par l'indice 'r'. Les indices abc indiquent les phases triphasées. Les paramètres \mathbf{R}_s et \mathbf{R}_r représentent respectivement les résistances statoriques et rotoriques par phase.

Les vecteurs $[\mathbf{V}], [\mathbf{i}]$ et $[\mathbf{\Phi}]$ sont les vecteurs tensions, courants et flux de chacune des armatures. [23]

Avec :

$$[\mathbf{V}_{rabc}] = (V_{sA}, V_{sB}, V_{sC})^t \quad (\text{II-2})$$

$$[\mathbf{V}_{sABC}] = (V_{ra}, V_{rb}, V_{rc})^t \quad (\text{II -3})$$

$$\mathbf{R}_s = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (\text{II-4})$$

$$R_r = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (\text{II -5})$$

$$[\Phi] = (\Phi_{sA}, \Phi_{sB}, \Phi_{sC})^t \quad (\text{II-6})$$

II-4 Equations électriques :

Les équations de la tension statoriques et rotoriques sont données par : [25]

$$[V_s] = \frac{d}{dt} [\Phi_s] + R_s [I_s] \quad (\text{II -6})$$

$$[V_r] = \frac{d}{dt} [\Phi_r] + R_r [I_r] \quad (\text{II -7})$$

Ou :

$[V_s] = (V_{sA}, V_{sB}, V_{sC})^t$ et $[V_r] = (V_{ra}, V_{rb}, V_{rc})^t$ représentent les tensions des trois phases statoriques et rotoriques, respectivement.

$[I_s] = (I_{sA}, I_{sB}, I_{sC})^t$ et $[I_r] = (I_{ra}, I_{rb}, I_{rc})^t$ sont les vecteurs des courants traversant ces phases.

$[\Phi_s] = (\Phi_{sA}, \Phi_{sB}, \Phi_{sC})^t$ et $[\Phi_r] = (\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc})^t$ correspondent aux vecteurs des flux totalisés traversant les enroulements statoriques et rotoriques.

$[R_s]$ C'est une matrice des résistances des phases statoriques.

$[R_r]$ C'est une matrice des résistances des phases rotoriques. [25]

II-5 Equations mécaniques :

L'étude des caractéristiques de la machine asynchrone fait introduire de la variation non seulement des paramètres électriques mais aussi des paramètres mécaniques.

$$c_{em} - c_r - f_r \Omega_r = J \frac{d\Omega_r}{dt} \quad (\text{II -8})$$

J : Moment d'inertie des masses tournantes.

c_r : Couple résistant imposé à l'arbre de la machine.

Ω_r : Vitesse rotorique.

c_{em} : Couple électromagnétique.

f_r : Coefficient de frottement visqueux.

Nous aboutirons ainsi à un système de six équations différentielles et une expression du couple dont certains coefficients font intervenir des fonctions sinusoïdales dues au mouvement de rotation du rotor, d'où la complexité de la résolution analytique. Afin de surmonter cette difficulté, on considère les enroulements biphasés équivalents aux enroulements statorique et rotorique. [26]

II-6 couples électromagnétiques :

D'après le modèle élaboré précédemment, la puissance électromagnétique est donc égale à :

$$P_{em} = 3 \frac{R_2}{g} I_{1t}^2 \quad (\text{II -9})$$

Le couple électromagnétique a donc pour expression :

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_s} \quad (\text{II -10})$$

Or, en négligeant la résistance R1 des enroulements du stator, donc en supposant $V_1 = V_e$ on peut écrire :

$$I_{1t} = \frac{V_1}{\frac{R_2}{g} + j L_f \omega} \quad \text{et donc} \quad I_{1t}^2 = \frac{V_1^2}{\left(\frac{R_2}{g}\right)^2 + (L_f \omega)^2} \quad (\text{II -11})$$

D'où l'expression du couple électromagnétique :

$$C_{em} = 3 \frac{V_1^2}{\Omega_s} \frac{\frac{R_2}{g}}{\left(\frac{R_2}{g}\right)^2 + (L_f \omega)^2} \quad \text{avec} \quad g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \quad (\text{II -12})$$

Cette expression peut finalement s'écrire sous la forme :

$$C_{em} = \frac{2 C_{max}}{\frac{g}{g_{max}} + \frac{g_{max}}{g}} \quad (\text{II -13})$$

$$\text{Avec : } C_{em} = \frac{3 V_1^2}{2(L\omega)\Omega_s} \quad (\text{II -14})$$

$$g_{max} = \frac{R}{L\omega} \quad (\text{II -15})$$

L'allure du couple en fonction du glissement est alors la suivante :

Cette courbe fait apparaître les deux comportements de la machine asynchrone, linéaire et hyperbolique. Pour de faibles glissements, la courbe caractéristique est linéaire, et on a

$$\frac{g}{g_{max}} = \frac{C_{em}}{C_{max}} \quad (\text{II -16})$$

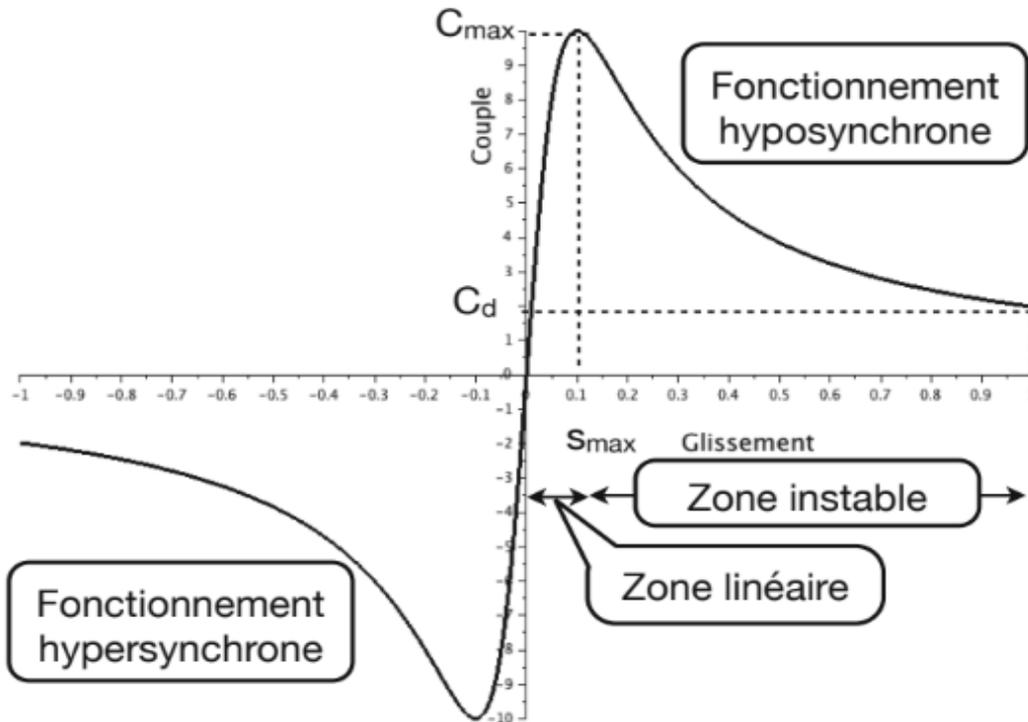


Figure II-2 : Courbe $C_{em}=f(g)$ d'une machine asynchrone [27]

Au-delà de cette partie linéaire, le comportement peut engendrer une instabilité. Le fonctionnement hypo synchrone est le fonctionnement normal d'un moteur asynchrone.

Le fonctionnement hyper synchrone correspond au fonctionnement normal d'une génératrice. C_d représente le couple de démarrage. [27]

II-7 Paramètres de réglage :

Les paramètres de réglage de vitesse des moteurs asynchrones peuvent être classés en trois groupes. Sachant que la vitesse du moteur s'exprime par : $n = (1 - g) f/p$ (II -17)

Donc, pour la faire varier on peut : [29]

Soit agir sur le nombre de paires de pôles p .

Soit agir sur le glissement g .

Soit agir sur la fréquence d'alimentation f .

II-8 Réglage continu de la vitesse :

II-8-1 Commande par variation du glissement :

Deux techniques existent :

La première utilise un moteur à rotor bobiné. En insérant des résistances en série avec les enroulements rotoriques, le glissement varie. Ce procédé entraîne des pertes par effet joule importantes au rotor, le rendement est loin d'être optimal.

La seconde méthode consiste à récupérer l'énergie perdue dans la première méthode pour la renvoyer sur le réseau. Ce système nécessite l'utilisation d'une cascade hyposynchrone qui permet de relier deux réseaux de fréquence différente (le rotor et le stator). [30]

II-8-2 Commande par variation de la fréquence de la tension d'alimentation :

Convertisseurs de fréquence électromécaniques (alternateur entraîné par un moteur à courant continu pilotant plusieurs moteurs asynchrones tournant à la même vitesse)

Convertisseurs statiques (onduleurs de courant, de tension, M.L.I, contrôle vectoriel de flux, cyclo-convertisseurs) [31]

II-8-3 Onduleur de courant :

Alimentés par une source de courant continu. La nature de la source continue impose celle de la charge alternative. L'évolution rapide des techniques de fabrication des dispositifs à semi-conducteurs et l'orientation des concepteurs vers la technologie des composants hybrides tels que l'IGBT ont permis de développer de nouvelles structures d'onduleurs multi niveaux.

Ils sont mieux adaptés aux applications de grandes puissances parce qu'ils réduisent les contraintes dues aux phénomènes de commutation sollicitant les interrupteurs pour des applications de forte puissance et haute tension. La technologie de conversion de l'énergie continu-alternatif en utilisant les convertisseurs statiques est une partie de l'électronique de puissance en pleine croissance ; cela tient essentiellement à deux raisons :

La première est l'étendue du domaine de leurs applications : systèmes d'entraînements à vitesse variable, utilité d'interconnexion, alimentation de sécurité...etc.

La seconde vient de l'amélioration des performances des semi-conducteurs de puissance et de l'apparition de nouvelles composantes (modulation de largeur d'impulsion, modulation vectorielle). Cela permet d'adapter pour chaque application la structure de l'onduleur et la stratégie de Commande qui lui conviennent le mieux l'usage limité aux applications de faibles et moyennes puissances seulement. La détérioration prématurée des roulements causée par l'application des tensions homopolaires à l'arbre du moteur. [32]

II-8-4 Onduleur de tension :

Un onduleur ne peut que distribuer convenablement aux trois phases des moteurs, le courant qu'il reçoit sauf si la source continue est une source de tension, l'onduleur est appelé onduleur de tension.

En fonction de leurs applications ces onduleurs sont classés en trois catégories :

Les onduleurs à fréquence fixe à commutation forcée.

Les onduleurs à fréquence variable à commutation forcée.

Les onduleurs d'entretien du circuit oscillant

Notre étude, se limitera à utiliser l'onduleur de tension à fréquence variable à commutation forcée, dont l'avantage est de pouvoir alimenter n'importe quel type de machine à courant alternatif, tout en facilitant d'inverser l'ordre de succession des phases. [32]

Sur ce, on distingue trois types d'onduleurs de tension :

-onduleur à conduction 120°

-onduleur à conduction 180°

-onduleur à modulation de largeur d'impulsion(MLI).

-commande en MLI avec injection d'harmonique

- technique d'élimination d'harmonique.

II-9 Réglage discontinu de la vitesse :**II-9-1 Action sur le nombre de paires de pôles :**

Des anciennes installations (ex ; d'ascenseur) fonctionnent encore avec des moteurs à deux vitesses. La plupart du temps se sont des moteurs dont le rotor est composé de deux nombres différents de paires de pôles. Les enroulements sont disposés dans les encoches du stator d'une manière particulière qui en fait tout sa complexité. Les différents couplages par paire de pôles permettent d'obtenir différentes vitesses.

Un moteur bipolaire a une vitesse de rotation de 3 000 [tr/min], tandis qu'un quadripolaire tourne à 1 500 [tr/min] ou à 3 000 [tr/min]. Donc pour autant que l'on puisse réaliser des couplages différents sur des moteurs à deux nombres différents de paires de pôles, on obtient des vitesses différentes. [33]

II-9-2 Moteur à enroulements statoriques séparés :

Ce type de moteurs, comportant deux enroulements statoriques électriquement indépendant, permet d'obtenir deux vitesses dans un rapport quelconque.

Il est également possible de réaliser des moteurs à trois ou quatre vitesse en procédant au couplage des pôles sur l'un des enroulements statoriques ou sur les deux. Cette solution exige des prises supplémentaires sur les bobinages.[34]

II-10 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons fait la modélisation de la machine asynchrone cette modélisation basée sur la théorie de Park, l'intérêt primordial de cette transformation est de simplifier le problème dans le modèle triphasé

Les méthodes classiques d'étude de ce type de machine utilisent des modèles simples dans le repère (d, q), négligeant un certain nombre de phénomènes. Ces modèles sont fréquemment affectés par les transformations et le changement d'axes de référence.

Nous avons vu aussi quelques méthodes de réglage de vitesse des moteurs asynchrones. Nous avons constaté que chacune d'elles présentent des avantages et des inconvénients. Donc, utilisées dans des domaines industriels bien précis et pour l'entraînement de charges bien définies.

Dans troisième chapitre nous étudierons un convertisseur statique ' onduleur' comme solution de variation de vitesse.

CHAPITRE III

ETUDE ET REALISATION D'UNE
COMMANDE POUR UNE TENSION
ONDULEE DEPUIS CINQ
CRENEAUX

III-3 Soit à décomposer le signal tension en séries de Fourier :

La décomposition du signal en série de Fourier nécessite en premier temps, la mathématique de ses règles :

Toute fonction périodique peut être décomposée en série Fourier

$$f(\beta) = f_{moy} + A_n \cos(n\beta) + B_n \sin(n\beta) \quad (\text{III. 1})$$

$$A_n = \int_0^{2\pi} (f(\beta) - f_{moy}) \cos(n\beta) d\beta \quad (\text{III. 2})$$

$$B_n = \int_0^{2\pi} (f(\beta) - f_{moy}) \sin(n\beta) d\beta \quad (\text{III. 3})$$

Où : $n \in \mathbb{N}^*(1, 2, 3, \dots)$.

Les paramètres A_n, B_n sont les **coefficients de Fourier**, leur valeur donne des indications sur la nature du signal.

Si f est impaire (symétrique par rapport à l'origine) alors $A_n = 0$

Si f est paire (symétrique par rapport à l'axe des ordonnées) $B_n = 0$

Si f présente une symétrie de glissement ($f(\beta + \pi) = -f(\beta)$) alors :

$$A_{2k} = 0 \quad \text{et} \quad B_{2k} = 0 \\ \text{avec} \quad n = 2k$$

Le TDH est défini par l'équation suivante :

$$TDH = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} V_{eff k}^2}}{V_{eff F}} \quad (\text{III. 4})$$

III-4 Réarrangement du signal tension :

Afin de faciliter la décomposition en série de Fourier de la *figure III.2*, nous décomposons le signal de la façon suivante (figure 3):

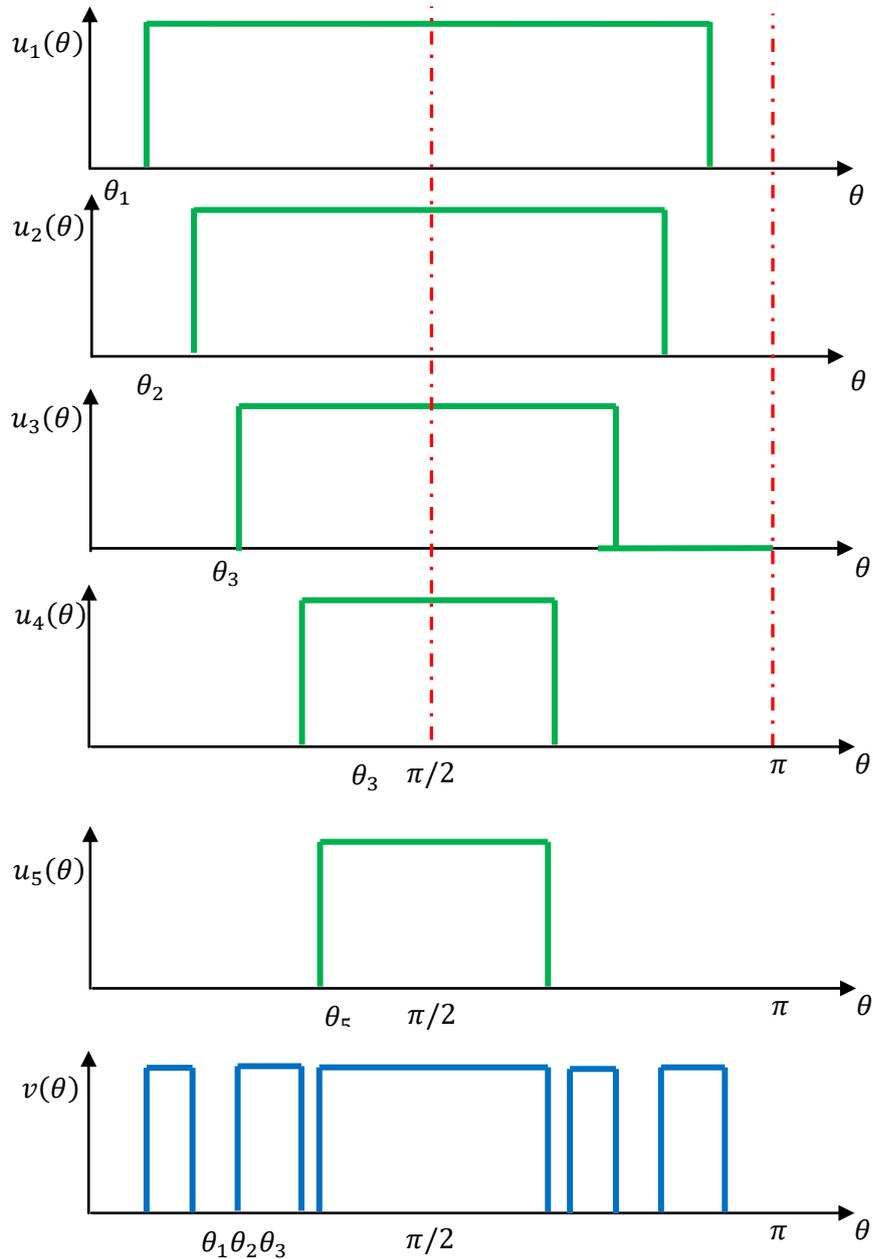


Figure III-3 : décomposition du signal tension

$$v(t) = u_1(t) - u_2(t) + u_3(t) - u_4(t) + u_5(t) \tag{III.5}$$

On constate que le signal tension est une somme arithmétique de plusieurs simples créneaux. Du fait la décomposition en série de Fourier se réduit à un seul créneau avec différent angle de commutation.

Soit alors à décomposer le signal de la figure (III.4)

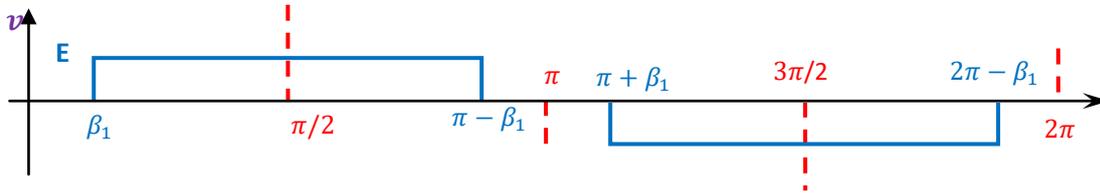


Figure III.4 : signal rectangulaire à décomposer en série de Fourier.

Cette fonction est périodique est :

- 1- Impair alors $A_n = 0$
- 2- Admit une symétrie de glissement alors $B_{2k} = 0$

$$B_n = \frac{2}{2\pi} \int_{\beta_1}^{2\pi-\beta_1} v(\beta) \sin(n \beta) d\beta \quad (\text{III. 6})$$

$$B_n = \frac{2}{\pi} \int_{\beta_1}^{\pi-\beta_1} E \sin(n \beta) d\beta \quad (\text{III. 7})$$

$$B_n = \frac{2E}{\pi} \int_{\beta_1}^{\pi-\beta_1} \sin(n \beta) d\beta \quad (\text{III. 8})$$

$$B_n = \frac{2E}{\pi} \left[-\frac{1}{n} \cos(n \beta) \right]_{\beta_1}^{\pi-\beta_1} \quad (\text{III. 9})$$

$$B_n = \frac{2E}{\pi} \frac{1}{n} [-\cos(n (\pi - \beta_1)) + \cos(n \beta_1)] \quad (\text{III. 10})$$

Comme n est impaire alors

$$-\cos (n \pi - n \beta_1) = \cos(n \beta_1) \quad (\text{III. 11})$$

Soit :

$$B_n = \frac{4 E}{\pi} \frac{1}{n} [\cos(n \beta_1)] \quad (\text{III. 12})$$

Soit alors :

$$TF(v) = \frac{4 E}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} E[\cos(n \beta_1)] \sin(n \beta) \quad (\text{III. 13})$$

Jusqu'à n^{ième} harmonique l'équation (III.13) s'écrit :

$$TF(v) = \frac{4 E}{\pi} \sum_1^{\infty} \frac{1}{n} \cos(n\beta_1) \sin(n\beta) \quad (\text{III. 14})$$

$$B_{12k-1} = \frac{4 E}{\pi} \frac{1}{2k-1} [\cos((2k-1)\theta_1)] \quad (\text{III. 15})$$

$$u_1(t) = \frac{4E}{\pi} \left[\cos(\theta_1). \sin(\alpha) + \frac{1}{3} \cos(3 \theta_1). \sin(3 \alpha) + \frac{1}{5} \cos(5 \theta_1). \sin(5 \alpha) \right] \quad (\text{III. 16})$$

Pour les 4 autres créneaux :

$$u_2(t) = \frac{4E}{\pi} \left[\cos(\theta_2). \sin(\alpha) + \frac{1}{3} \cos(3 \theta_2). \sin(3 \alpha) + \frac{1}{5} \cos(5 \theta_2). \sin(5 \alpha) \right] \quad (\text{III. 17})$$

$$u_3(t) = \frac{4E}{\pi} \left[\cos(\theta_3). \sin(\alpha) + \frac{1}{3} \cos(3 \theta_3). \sin(3 \alpha) + \frac{1}{5} \cos(5 \theta_3). \sin(5 \alpha) \right] \quad (\text{III. 18})$$

$$u_4(t) = \frac{4E}{\pi} \left[\cos(\theta_4). \sin(\alpha) + \frac{1}{3} \cos(3 \theta_4). \sin(3 \alpha) + \frac{1}{5} \cos(5 \theta_4). \sin(5 \alpha) \right] \quad (\text{III. 19})$$

$$u_5(t) = \frac{4E}{\pi} \left[\cos(\theta_5). \sin(\alpha) + \frac{1}{3} \cos(3 \theta_5). \sin(3 \alpha) + \frac{1}{5} \cos(5 \theta_5). \sin(5 \alpha) \right] \quad (\text{III. 20})$$

$TF(v_s)$

$$= \frac{4E}{\pi} \left[\begin{array}{l} (\cos(\theta_1) - \cos(\theta_2) + \cos(\theta_3) - \cos(\theta_4) + \cos(\theta_5)) \sin(\alpha) \\ + \frac{1}{3} [\cos(3\theta_1) - \cos(3\theta_2) + \cos(3\theta_3) - \cos(3\theta_4) + \cos(3\theta_5)] \sin(3 \alpha) \\ + \frac{1}{5} (\cos(5\theta_1) - \cos(5\theta_2) + \cos(5\theta_3) - \cos(5\theta_4) + \cos(5\theta_5)) \sin(5 \alpha) \\ + \frac{1}{7} (\cos(7\theta_1) - \cos(7\theta_2) + \cos(7\theta_3) - \cos(7\theta_4) + \cos(7\theta_5)) \sin(7 \alpha) \\ + \frac{1}{9} (\cos(9\theta_1) - \cos(9\theta_2) + \cos(9\theta_3) - \cos(9\theta_4) + \cos(9\theta_5)) \sin(9 \alpha) \end{array} \right] \quad (\text{III. 21})$$

$$v(\alpha) = \frac{4E}{\pi} \sum_{p=1}^5 (-1)^{p+1} \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2k-1} \cos((2k-1)\theta_p) \cdot \sin((2k-1)\alpha) \right] \quad (\text{III. 22})$$

L'équation(III. 22), donne le tracer de la tension décomposée en série de Fourier au figure (5).

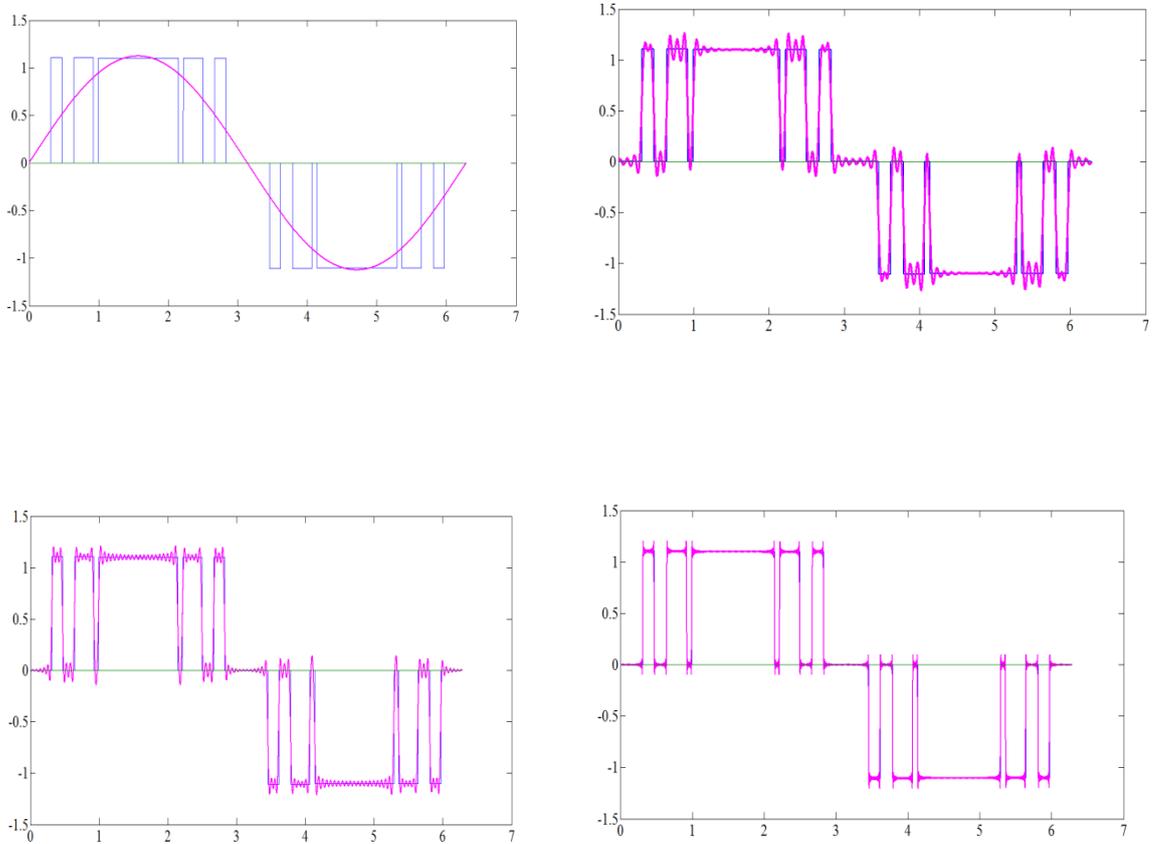


Figure III.5 : forme du signal décomposé en série de Fourier pour différent rang de fréquence
(a : k=1 ; b : k=19 ; c : k=109 ; d : k=509.)

La tension efficace de l'harmonique fondamental est donnée par :

$$V_{eff F} = \frac{4 E}{\pi\sqrt{2}} [\cos(a_1) - \cos(a_2) + \cos(a_3) - \cos(a_4) + \cos(a_5)] \quad (\text{III. 23})$$

D'après les figures (III.5 :a,b,c et d) La décomposition de Fourier est bien réussi. Sur la figure (III.6), nous représentons le spectre fréquentiel de telle forme de tension jusqu'à la 24^{ème} harmonique :

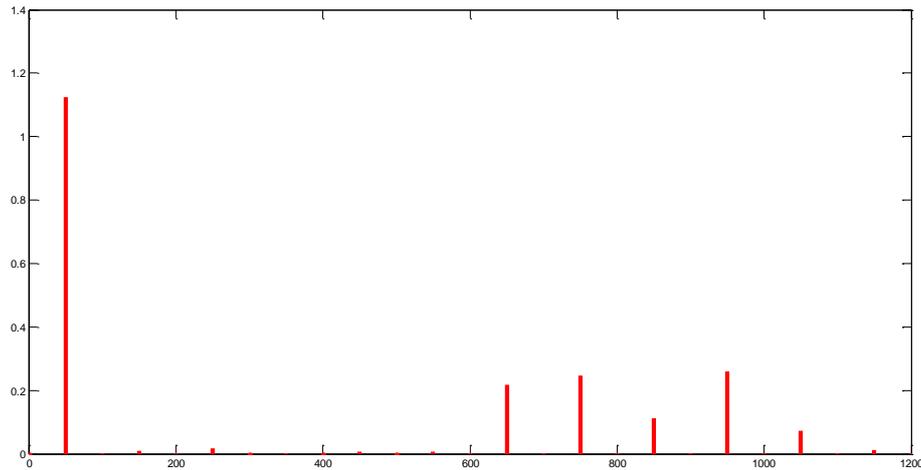


Figure III.6 : spectre fréquentiel de la forme de tension à 5 créneaux présenté jusqu'au rang 24.

Sur la figure (III.6), on constate des amplitudes bien proportionnées par rapport à la fondamentale. Il est primordial de chercher une combinaison d'angles de commutation des interrupteurs qui peut supprimer les amplitudes des harmoniques afin d'avoir un taux de distorsion harmonique minimal.

III-5 Optimisation du signal en vue de réduire le DTH :

Comme il est prévu de supprimer les harmoniques (préserver le fondamental), le système d'équation à résoudre est le suivant :

$$\begin{bmatrix} (\cos(3\alpha_1) - \cos(3\alpha_2) + \cos(3\alpha_3) - \cos(3\alpha_4) + \cos(3\alpha_5))\sin(3\alpha) \\ (\cos(5\alpha_1) - \cos(5\alpha_2) + \cos(5\alpha_3) - \cos(5\alpha_4) + \cos(5\alpha_5))\sin(5\alpha) \\ (\cos(7\alpha_1) - \cos(7\alpha_2) + \cos(7\alpha_3) - \cos(7\alpha_4) + \cos(7\alpha_5))\sin(7\alpha) \\ (\cos(9\alpha_1) - \cos(9\alpha_2) + \cos(9\alpha_3) - \cos(9\alpha_4) + \cos(9\alpha_5))\sin(9\alpha) \\ \dots \dots \dots \\ \dots \dots \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ \dots \end{bmatrix} \quad (III.24)$$

Sont 5 inconnues pour une infinité d'équations, du fait la résolution du système est impossible. Alors, chercher une combinaison de valeurs des cinq angles réduisant en maximum le TDH devient la seule démarche possible pour obtenir une meilleure valeur du TDH. La résolution est purement numérique en investiguant toutes les combinaisons avec un pas de l'angle égale 1° [35].

$$\begin{bmatrix} \cos(3\alpha_1) - \cos(3\alpha_2) + \cos(3\alpha_3) - \cos(3\alpha_4) + \cos(3\alpha_5) \\ \cos(5\alpha_1) - \cos(5\alpha_2) + \cos(5\alpha_3) - \cos(5\alpha_4) + \cos(5\alpha_5) \\ \cos(7\alpha_1) - \cos(7\alpha_2) + \cos(7\alpha_3) - \cos(7\alpha_4) + \cos(7\alpha_5) \\ \cos(9\alpha_1) - \cos(9\alpha_2) + \cos(9\alpha_3) - \cos(9\alpha_4) + \cos(9\alpha_5) \\ \dots \\ \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ \dots \end{bmatrix} \quad (\text{III. 25})$$

III-5-1 Organigramme de calcul :

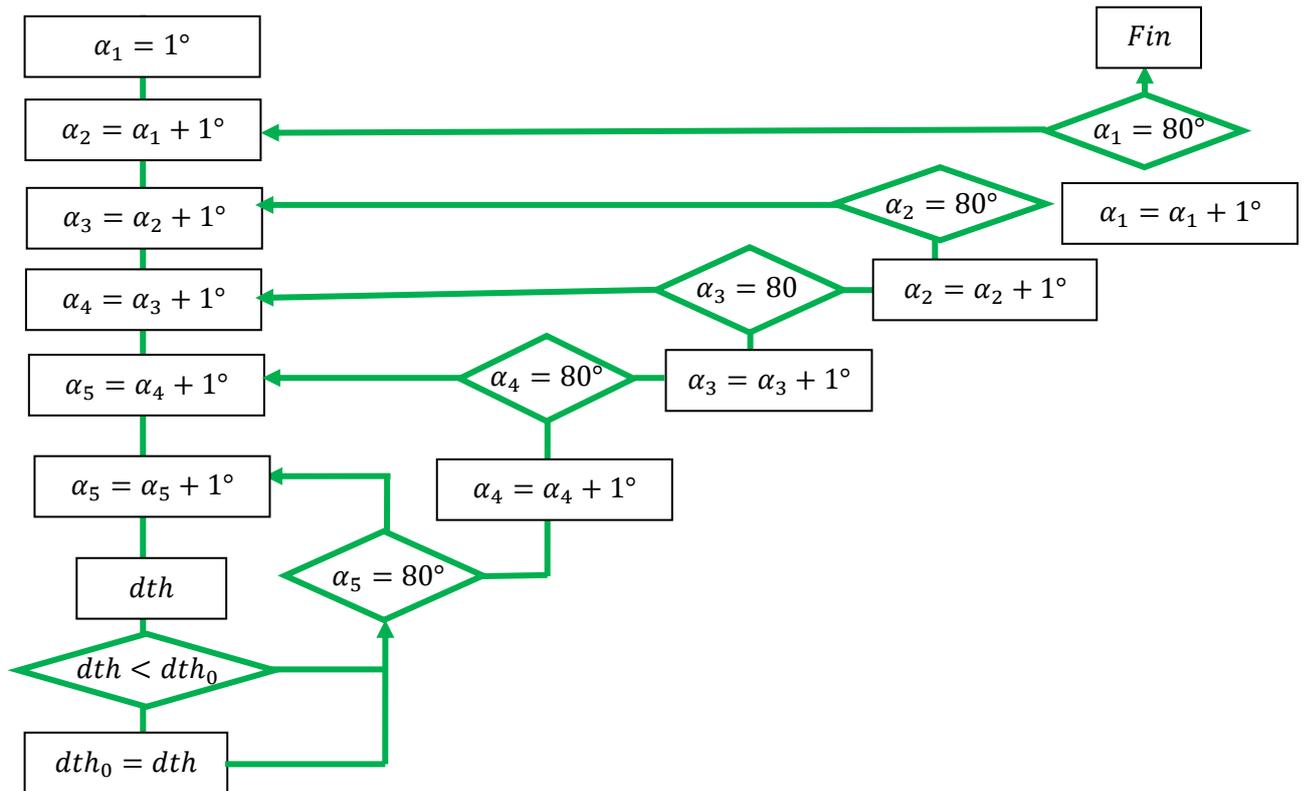


Figure III.7 : Organigramme de calcul les valeurs d'angle pour un DTH minimal avec le rang considéré jusqu'à 519.

Le programme établi a donné les résultats suivants :

Pour un respect de cinq crénaeux est :

$$\alpha_1 = 17^\circ ; \alpha_2 = 26^\circ ; \alpha_3 = 35^\circ ; \alpha_4 = 53^\circ ; \alpha_5 = 58^\circ$$

Pour un DTH selon l'équation (10) est 48,9 %

Pour un calcul à un créneau :

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = 23^\circ$$

Pour un DTH selon l'équation (10) est 40 %

La décomposition de Fourier est représenté sur la figure (III.8) pour plusieurs rends afin de montrer la réussite de cette décomposition. Sur la figure (III.9), nous représentons le spectre fréquentiel de cette onde.

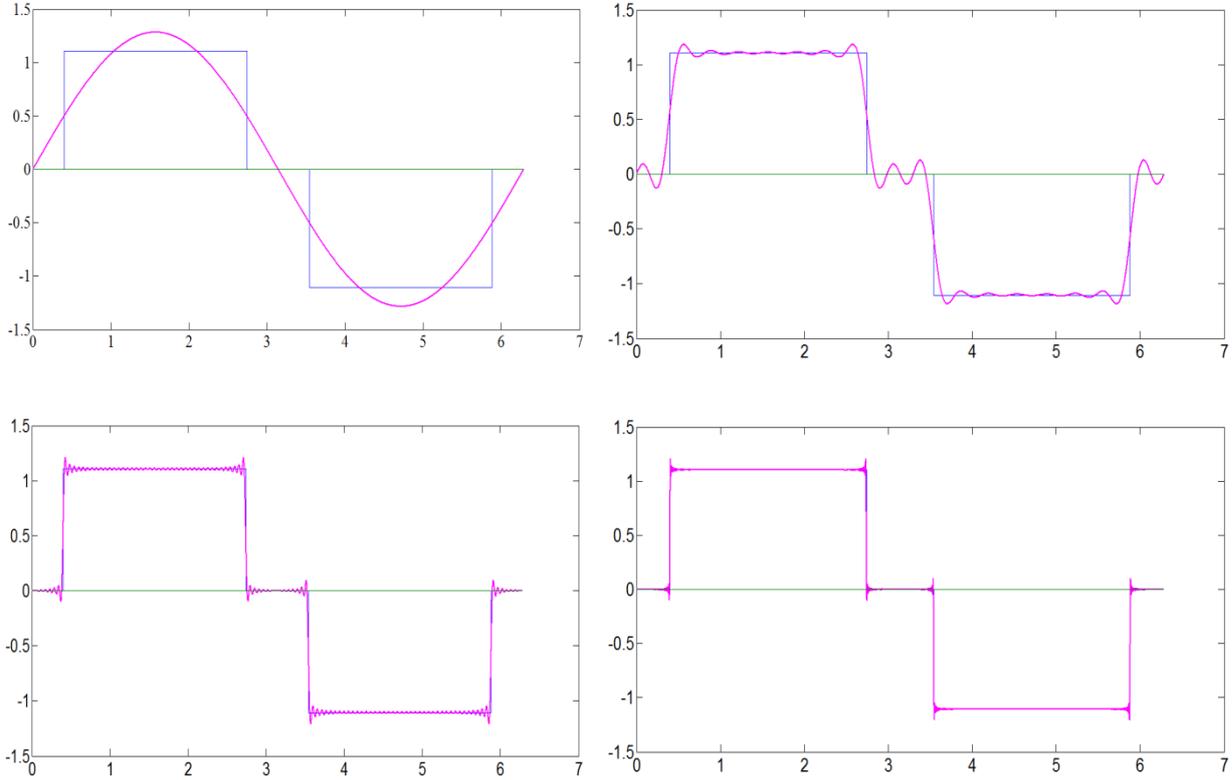


Figure III.8 : forme du signal décomposé en série de Fourier pour différent rang de fréquence (a : $k=1$; b : $k=19$; c : $k=109$; d : $k=509$).

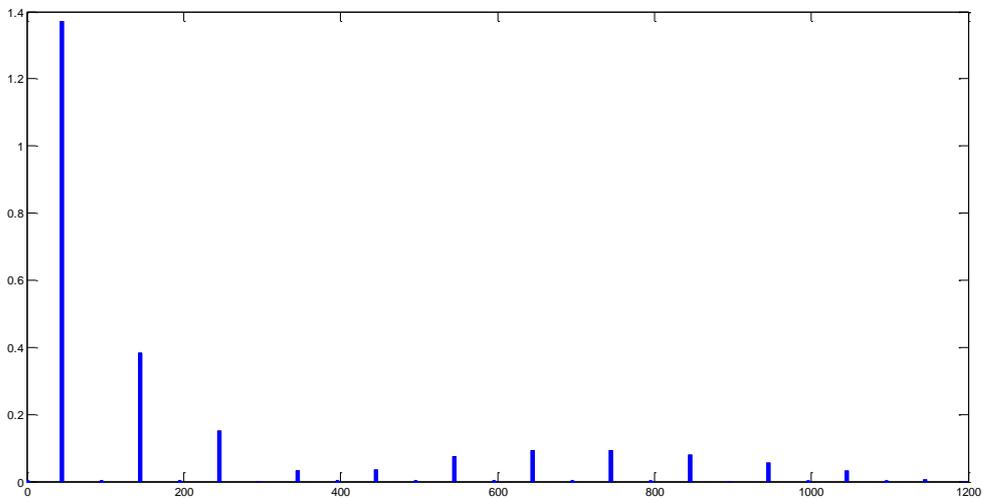


Figure III.9 : spectre fréquentiel de la forme de tension à un seul créneau présenté jusqu'au rang 24.

Le DTH du signal de tension à un seul créneau ($D_{th}=40\%$) est largement meilleur que celui de 5 créneaux ($D_{th} = 48,9\%$). Seulement on constate que pour le signal à 5 créneaux, les importantes amplitudes des harmoniques sont éloignées de l'harmonique fondamental en comparaison avec le cas de la tension à un seul créneau. Cette particularité nous sert bien au filtrage. En effet, le signal à un seul créneau, le filtre passe bas doit avoir une fréquence de coupure au voisinage de la fréquence de l'harmonique fondamental. Cela provoque un déclin de l'amplitude de l'harmonique fondamental, donc, aussi sur le rendement. Tandis que sur le signal à 5 créneaux, le filtre passe bas n'influe que légèrement sur l'amplitude de l'harmonique fondamental, donc le filtrage influe moins sur le rendement en comparaison avec le signal à un seul créneau.

III-6 Filtrage de la tension ondulée :

Dans cette partie de travail, nous allons appliquer un filtrage pour mieux quantifier les constatations faites sur le paragraphe ci-dessus. Les appareils sensibles aux harmoniques de la tension appliquée ou du courant qu'ils traversent, doivent impérativement être protégés par le filtre. Ce filtre aura pour rôle de réduire au maximum les harmoniques en exception de la fondamentale. C'est un circuit simple dont il faut déterminer la fréquence de coupure et respecter la puissance de ses éléments.

Ces filtres sont des quadripôles aux fonctions variées. Sont réparties dans 4 catégories :

- 1- Filtre passe-bas, ils bloquent les signaux de hautes fréquences
- 2- Filtre passe-haut, ils bloquent les signaux de basses fréquences
- 3- Filtre passe-bande laissant passer une certaine bande de fréquence
- 4- Filtre passe c'est le complémentaire de passe bande.

Ces filtres sont caractérisés par le paramètre appelé fréquence de coupure. C'est à partir de cette valeur par exemple le filtre passe bas commence à atténuer les tensions aux fréquences qui les qualifient comme tension haute fréquence. Cette valeur de fréquence de coupure (f_c) est déterminée à partir du paramétrage du filtre. [36 37]

III-6-1 Circuit d'un filtre passe-bas et fonction de transfert :

C'est un quadripôle se composant d'une inductance et d'un condensateur

En décomposant en série de Fourier, le paquet de signaux à fréquence multiple, va être filtré. En effet, la réactance inductive série augmente avec la fréquence et la réactance capacitive en parallèle diminue avec la fréquence. Donc les deux bloquent le passage des signaux à haute fréquence. [36 37]

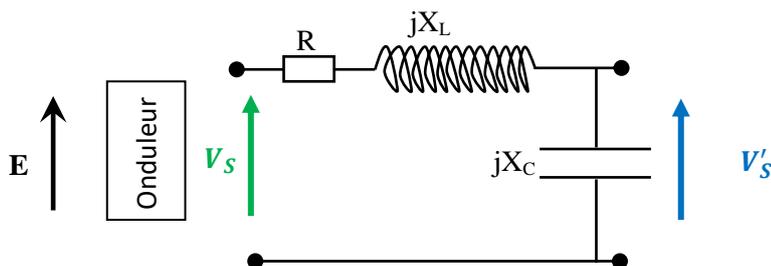


Figure III.10 : filtre basse pass pour la tension à la sortie de l'onduleur.

Soit la fonction de transfert $H(\omega)$ du circuit filtre passe bas :

$$|H(\omega)| = \left| \frac{V'_S(\omega)}{V_S(\omega)} \right| = \frac{1}{\text{sqrt}[(1 - LC\omega^2)^2 + (RC\omega)^2]} \quad (\text{III. 26})$$

$$|H_k| = \frac{1}{\text{sqrt}[(1 - LC(k\omega)^2)^2 + (RCk\omega)^2]} \quad (\text{III. 27})$$

$$V'_S(\omega) = H(\omega)V_S(\omega) \quad (\text{III. 28})$$

Représentation du gain sur diagramme de Bode, il est impératif de savoir l'amplitude de la tension après le filtrage et son argument. Car généralement, cette tension va être exploitée par un appareil en aval dont l'entrée soit prédéterminée (tension en question).

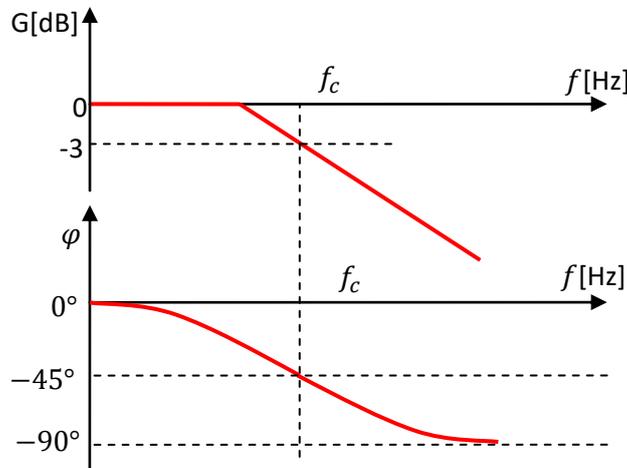


Figure III.11 : Figure : Diagramme de Bode (le gain et la phase)

La tension transformée en série de Fourier filtrée devient

$$v(t) = \frac{4E}{\pi} \sum_{p=1}^5 (-1)^{p+1} \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2k-1} \cos((2k-1)\theta_p) \cdot \sin((2k-1)\theta) \right] * H((2k-1)\theta) \quad (\text{III. 29})$$

Sur la figure (III.12) nous représentons le spectre fréquentiel après le filtrage. Les résultats sont donnés sur le tableau (III.1).

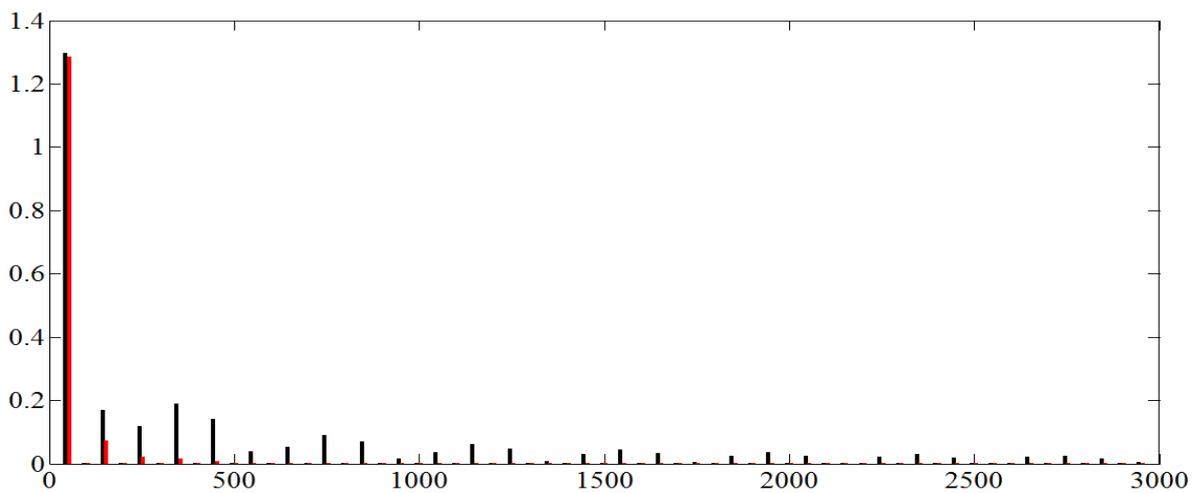
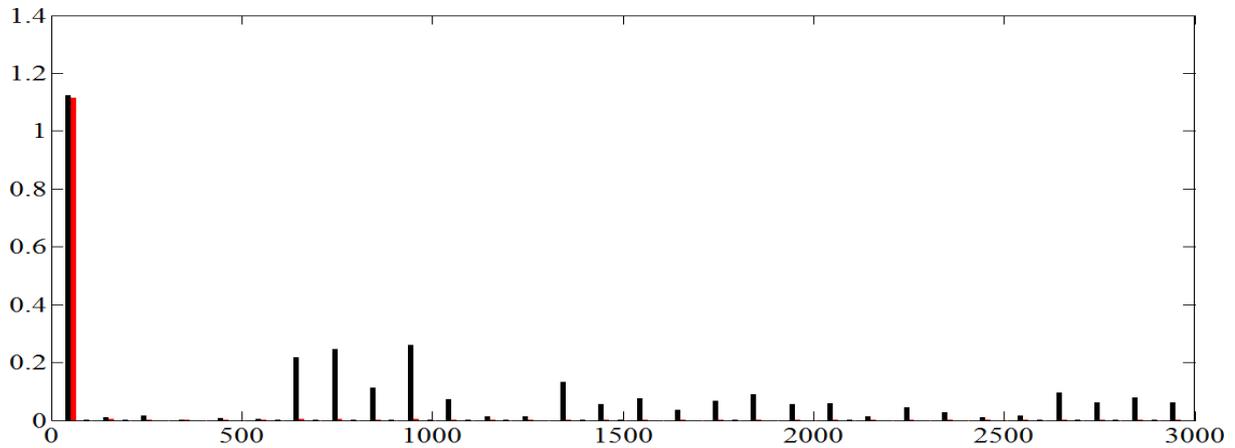


Figure III.12 : spectre fréquentiel de la tension filtrée présenté jusqu'au 39^{ème} rang.

a : tension à 5 créneaux ; b : tension à 1 seul créneau.

$R=5$; $L=8$ mH ; $C=300$ μ F ; $f_c=100$ Hz

Tableau III-1 : résultats de filtrage des deux tensions (à seul créneau et à 5 créneaux)

Signal carré	DTH %	
	Sans filtre	Avec filtre
5 créneaux	48,9	1,18
1 créneau	40	15,41

Sur la figure (III.13) on représente la tension filtré jusqu'à 999^{ème} harmonique. La tension filtré à cinq créneaux est bien la plus proche de la tension sinusoidale que celle d'un seul créneau.

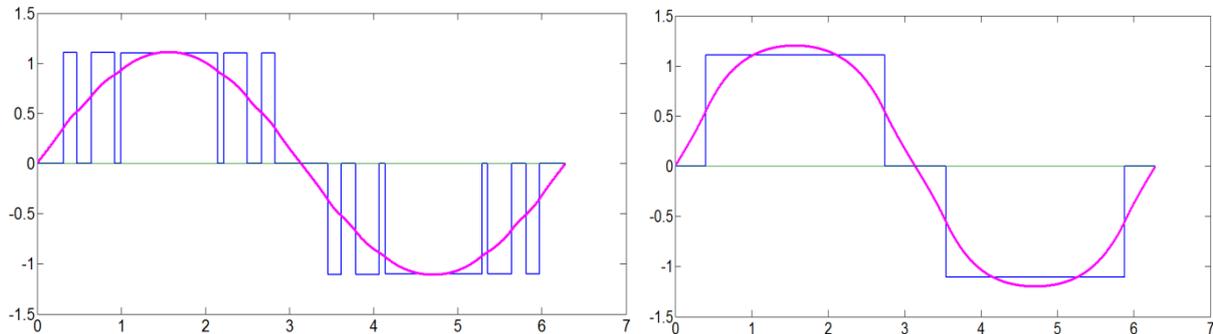


Figure III.13 : l'onde de tension après filtrage présentées jusqu'au 519^{ème} rang.
a : tension à 5 créneaux ; *b* : tension à un seul créneau ;

III-7 Réalisation de la commande d'un pont en H pour une tension à 5 créneaux à fréquence variable :

Dans cette dernière partie du chapitre, nous décrirons la réalisation de la commande d'un onduleur à cinq créneaux avec la possibilité de commander la valeur de la fréquence. Il se constitue d'un pont en H avec les éléments suivants :

- 1- PIC16F877A.
- 2- Optocoupleur PC817.
- 3- LED verte.
- 4- QUARTZ 10 MHz.
- 5- Condensateurs de 22pF.
- 6- Résistance de 300Ω.
- 7- Résistance de 2,2K Ω.
- 8- Potentiomètre.

III-7-1PIC 16F877A:

- Operating frequency: DC-20MHz
- Flash program memory (14-bit words): 8K
- Data memory (bytes): 368
- EEPROM data memory (bytes) 256
- I / O ports: A, B, C, D, E ports. [38]

III-7-2 Optocoupleur PC817 :

- Forward current $I_F = 50$ mA
- Power dissipation $P = 70$ mW
- Collector current $I_C = 50$ mA

- Forward voltage $V_F=1.4$ V. [39]

III-7-3LED verte :

- Tension directe de 2,1V
- Courant Direct (I_F) de 10mA. [40]

Les mosfet (type N et type P) sont utilisés comme interrupteur de puissance. Ils sont commandés par les pins de PIC à travers des optocoupleurs. Ces derniers servent à une séparation galvanique. En effet étant constitué de deux circuits isolé l'un de l'autre, la transmission de du signal ne se faite que par émetteur lumière de la diode et le récepteur qu'est la base d'un phototransistor. Cette séparation galvanique est faite pour protéger le microcontrôleur à la suite de disfonctionnement de la commande sur les gates des mosfet. Sur la figure (13) nous montrons le bras d'un pont en H, cette figure montre le détail du circuit de commande de mosfet.

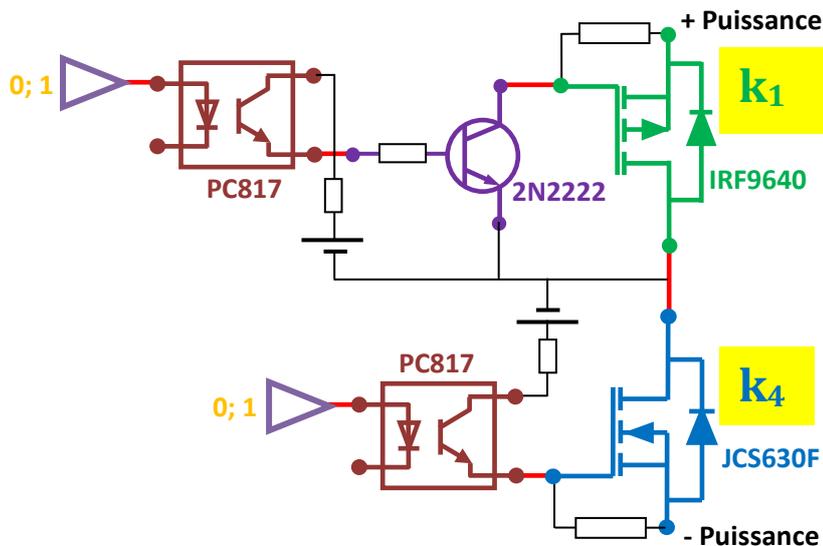


Figure III.14 : circuit de commande relatif à un bras du pont en H.

III-8 Le microcontrôleur :

Le microcontrôleur 16F877A qui est la base même de notre circuit de commande a pour rôle de générer les signaux de commandes des MOSFETs. Nous donnons une brève description de ce type de circuit.

Les PICs sont des composants dits RISC (composant à jeu d'instructions réduit). Un PIC est un microcontrôleur : unité de traitement de l'information de type microprocesseur à laquelle est ajouté des circuits internes pour générer des tensions de 0 et 5 V et autres, sur leurs pins qui vont être exploité par des circuits externes. Il est créée pour des tâches de commande dans l'industrie et non pas pour faire des calculs proprement dit. [41]

III-8-1 Différentes familles des PICs :

La famille des PICs est subdivisée à l'heure actuelle en 3 grandes familles :

- **Base-line** : c'est une famille qui utilise des mots d'instructions de 12 bits.
- **Mid-range**: c'est une famille qui utilise des mots de 14 bits.

- **High-end:** c'est une famille qui utilise des mots de 16 bits. [42]

III-8-2 Choix d'un microcontrôleur :

Il existe plusieurs types de microcontrôleurs fabriqués par : INTEL, MOTOROLA, HITACHI NEC, TEXAS instrument... etc.

Le choix d'un microcontrôleur dépend de plusieurs critères de sélection dont le développeur doit tenir compte comme : [43]

- Nombre d'entrées/sorties.
- Liaison d'entrées/sorties.
- Conversion analogique numérique et numérique analogique.
- Mémoire RAM, ROM, EEPROM interne ou externe, sa taille.
- Vitesse d'horloge, temps d'exécution d'une multiplication, d'une division.
- Bus de données 8bits /16bits.
- Les logiciels de programmation (assembleur, c, micro,). [44]

III-8-3 Présentation du microcontrôleur 16f877a :

Le microcontrôleur **16F877A**, en boîtier **DIP 40** broches, peut fonctionner à une fréquence maximale de **20 MHz** pour un cycle d'instruction de **200ns**, une tension d'alimentation entre 2 et 5.5 V. Il est constitué des éléments suivants : [41]

- 8 K mots de 14 bits de mémoire programme du type Flash,
- 256 octets de EEPROM,
- 368 octets de RAM,
- 2 Timers 8 bits et un Timer 16 bits,
- Un convertisseur A / N 10 bits avec 5 entrées multiplexées,
- Un chien de garde (WatchDog),
- Une interface série synchrone (SPI),
- Une interface série asynchrone (USART).
- 5 ports E/S :
 - Un port A de 6 bits (RA0 à RA5).
 - Un port B de 8 bits (RB0 à RB7).
 - Un port C de 8 bits (RC0 à RC7).
 - Un port D de 8 bits (RD0 à RD7).
 - Un port E de 3 bits (RE0 à RE3).

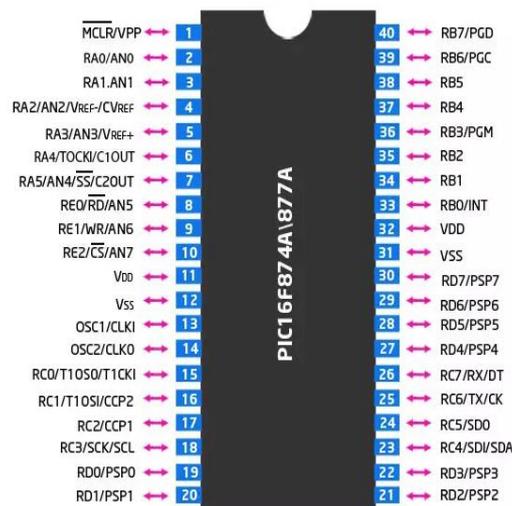


Figure III.15: le boîtier de pic16f877A. [41]

III-8-4 La désignation du microcontrôleur 16F877A

- Le numéro 16 signifie qu'il fait partie de la famille "MID-RANGE".
- La lettre F indique que la mémoire programme de ce PIC est de type "Flash". Chaque ligne de mémoire est un mot de 14 bits.
- Les trois derniers chiffres permettent d'identifier précisément le PIC, ici c'est un PIC de type 877.
- Un groupe de lettres pour indiquer le boîtier et la gamme de température. [45]

III-9 Loi de commande

Le signal à 5 créneaux est obtenu selon la loi de commande des gates des mosfet présenté sur le tableau (2). Du fait que deux mosfet conduisent simultanément tandis que les deux autres restent ouverts pendant toute l'alternance, alors ça nécessite deux pins d'un microcontrôleur. Concernant la commande de fréquence en temps réel, une conversion analogique numérique est nécessaire. Nous utiliserons un potentiomètre pour offrir une tension variable de 0 V à 5 V. cette tension entre par le port analogique pour être transformé en quantité numérique sur un registre de 16 bits (seulement 10 sont considérés soit 1024 niveau de tension. La quantité numérique est utilisé comme multiplicateur de période soit diviseur de fréquence. Sur la figure (15), nous montrons les deux signaux destiné à contrôler les gates des mosfet du pont en H.

Tableau III-2 : Commande de gates des mosfet pour une tension à 5 créneaux

	Séquence	U	PORTC b_1b_0	Durée (°)	
			$k_4k_3k_2k_1$		
1 ^{ère} ALTERNANCE	1	0	0000	18	180°
	2	E	0101	9	
	3	0	0000	10	
	4	E	0101	16	
	5	0	0000	4	
	5	E	0101	66	
	6	0	0000	4	
	7	E	0101	16	
	8	0	0000	10	
	9	E	0101	9	
10	0	0000	18		
2 ^{ème} ALTERNANCE	Séquence	U	PORTC	Durée (°)	180°
	1	0	0000	18	
	2	-E	1010	9	
	3	0	0000	10	
	4	-E	1010	16	
	5	0	0000	4	
	5	-E	1010	66	
	6	0	0000	4	
7	-E	1010	16		

	8	0	0000	10	
	9	-E	1010	9	
	10	0	0000	18	

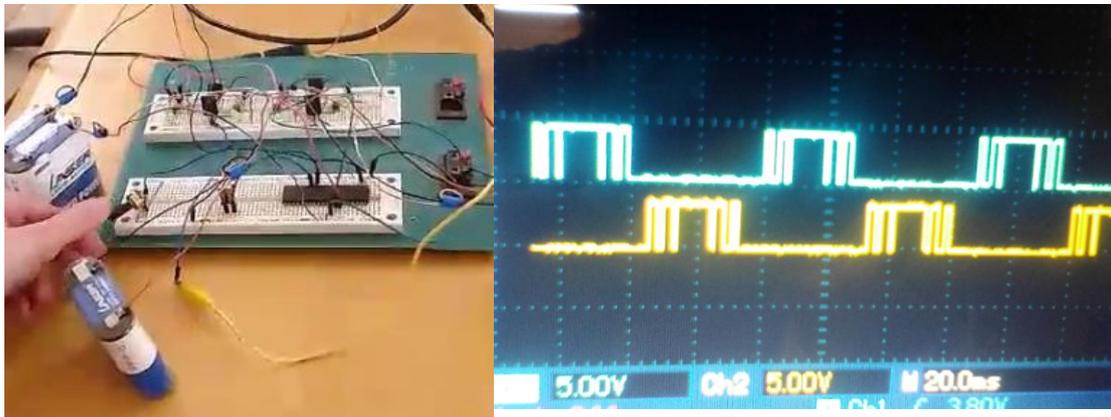


Figure III-16 : signaux de commande des gates des mosfets visualisé sur oscilloscope

III-10 Conclusion :

Dans ce dernier chapitre nous avons quantifié l'importance d'utiliser un signal ondulé à plusieurs créneaux en exploitant le spectre fréquentiel issu de la transformation du signal en série de Fourier. Nous avons aussi concrétisé cette commande à travers l'utilisation du PIC 16F877A.

CONCLUSION
GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le but final concernant notre mémoire, était de commander un onduleur en tension et en fréquence tout en respectant le rapport des deux grandeurs constant. Cette fin est recommandée par le moteur asynchrone pour plusieurs applications tel qu'un monte-charge.

Nous avons commencé par l'étude d'une machine asynchrone puis nous avons donné différents procédés de variateur de vitesse. A la fin, l'important travail est donné à l'étude de l'onduleur qui lui seul peut donner une satisfaction en terme d'ondulation et fréquences.

L'unité de commande (microcontrôleur) a bien été capitale pour contrôler l'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur avec les durées maîtrisées par la programmation. Nous avons mis en évidence la décomposition en série de Fourier comme une démarche indispensable pour analyser et corriger un signal.

Nous avons pu vérifier qu'un signal à plusieurs créneaux est bien meilleur qu'un signal d'un seul créneau si on procède à un filtrage passe bas.

Dans un travail futur, nous proposons une étude sur une charge inductive alimentée via un onduleur.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Wildi et Sybille ; « Electrotechnique » ; 4^e édition ; 2005
- [2] René Le Doeuff ; Mohammed El-Hadi Zaim ; « Machines électriques tournantes : de la modélisation matricielle à la mise en œuvre » ; 2009
- [3] A.Abbad et A.Gherba ; « commande d'un moteur asynchrone par logique floue adaptative » ; mémoire ; université de Bouira ; 2018
- [4] M.ZEGRARI ; « machines électriques » ; Cours ; Université Hassan II de Casablanca.
- [5] Caron et Hautier ; « Modélisation et commande de la machine asynchrone » ; 1995
- [6] <https://www.bme-machines-tournantes.fr/bobinage>
- [7] Mayé Pierre ; « Moteurs électriques industriels » ; 2005
- [8] <http://www.moteurs-reducteurs-pompes.com/p/bobinages/bobinages-de-moteurs-a-rotor-bobine>
- [9] <https://newautoinsurance.review/>
- [10] C.Haouy ; « Démarrage des moteurs asynchrones » ; cours
- [11] G.ELETUFE ; « Graphe de Commande Etape Transition » ; Travaux pratiques
- [12] W.Boudjtat et A.himoura ; « étude et simulation d'une machine asynchrone alimenter par un onduleur de tension à commande MLI » ; mémoire de master ; 2017
- [13] <https://elec13.wordpress.com/2016/10/01/demarrage-des-moteurs-asynchrone-triphasés/>
- [14] M.chihaoui ; « Étude de la protection électrique des moteurs asynchrone triphasés » ; mémoire d'ingénieur d'état ; université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2012
- [15] Luc Lasne ; « Exercices et problèmes d'électrotechnique .Notions de base, réseaux et machines électriques » ; 2^e édition
- [16] http://lycees.acrouen.fr/maupassant/site2/BEPME/sujet03_04/com_tech/moteur_asynchrone.pdf
- [17] Y.MOREL ; « Le moteur asynchrone triphasé » ; cours.
- [18] E.Mahfoudi ; « Machine asynchrone triphasé » ; cours ; Centre de Brevet de Technicien Supérieur.
- [19] Philippe Barret ; « Régimes transitoires des machines tournantes électriques » ; Edition Eyrolles 1987
- [20] Michel PINARD « Commande électronique des moteurs électriques » Edition DUNOD, année 2004
- [21] L.BaGhli ; « Modélisation et commande de la Machine asynchrone » notes de cours IUFM de Lorraine ; 2005.

[22]https://www.researchgate.net/figure/Representation-electrique-dun-moteur-asynchrone-triphasee_fig1_337447291

[23]G. Sturtzer, E. Smigiel, « Modélisation et commande des Moteurs Triphasés » Ellipses Edition Marketing Paris 2000

[24] Schneider de l'enseignement technologique et professionnelle ; « Les techniques de commande du moteur asynchrone » ; guide technique ; 1998

[25] M. Pinard "Commande électronique des moteurs électriques " Edition Dunod, 2004.

[26] N. Khenfer, « Machine asynchrone : ses modèles, son identification et sa commande », Thèse de Doctorat, I.N.P de Lorraine (France), Octobre 1995

[27] Chapitre 10 : Moteurs asynchrones

[28] N.Sghaier haouari ; « chapitre 5 : les variateurs de vitesse ».

[29]https://www.ummt0.dz/dspace/bitstream/handle/ummt0/9003/HocineSamir_SiAhmedAbderrahmane_Hocineferhat.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[30] S.Chaouch ; « Variation de vitesse de la machine asynchrone » ; cours ; Univ Batna2 ; 2021.

[31] Bapio BAYALA« machines asynchrone» Edition revue 2010

[32] Guy Segulier, Francis Labrique ; «Les convertisseurs de l'électronique de puissance, volume 4, La conversion continu-alternatif » ; 1989

[33] Chapitre 4 : Machines Electriques Machines Electriques

[34] Schneider Electric ; « Guide des solutions d'automatisme: schématique» ; 2007

[35] Pierre Mayé « problèmes corrigés d'électronique de puissance » DUNOD 2013.

[36]T.Rachid « électronique de base » Berti édition 1992.

[37]https://fr.wikibooks.org/w/index.php?title=Électronique/Les_filtres_électriques&oldid=631705

[38]<https://www.alldatasheet.com/datasheetpdf/pdf/82338/MICROCHIP/PIC16F877A.html>;

[39]<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/678998/KEXIN/PC817.html>;

[40]<https://pdf1.alldatasheet.fr/datasheetpdf/view/15067/PHILIPS/2N2222.html>;

[41]K.Saad ; « Programmation en C du microcontrôleur PIC 16F877 » ; Mémoire ; Université de science et technologie d'Oran ; 2008

[42]Y. Rkhissi Kamoun; « Microcontrôleurs »; Iset Nabeul.

[43] S.Zaamta : « Réalisation d'un régulateur solaire à base de microcontrôleur pour le contrôle de l'état de charge et la protection des accumulateurs » ; Mémoire ; Université Larbi Ben M'hidi d'Oum El Bouaghi.2008.

[44] Z.Zarour ; « Réalisation d'une carte de commande d'un convertisseur DC/AC à base d'un microcontrôleur PIC 16f877 » ; Mémoire ; Université Larbi Ben M'Hidi d'OUM EL BOUAGHI ; 2015.

[45] H.Dehaba ; « Réalisation d'un cardio-fréquencemètre à base du PIC 16F877 » ; Mémoire; Université FERHAT ABBAS de Sétif ; 2014

Résumé

Le faible coût, sa simplicité de construction et sa robustesse, la machine asynchrone est devenue de plus en plus attractive dans les domaines de l'entraînement, seulement en vitesse variable, il est moins avantageux.

Notre projet a été pour but d'étudier les procédés de variation de vitesse d'un moteur asynchrone, pour cela nous avons présenté au premier temps les différentes généralités sur les MAS triphasé. Ensuite la modélisation de ce dernier ainsi les différentes méthodes pour varier sa vitesse.

A la fin nous avons étudié l'onduleur qui se présente comme une solution efficace pour maîtriser la variation de vitesse. Nous avons vérifié que le signal à plusieurs créneaux est bien meilleur qu'un signal à un seul créneau après un filtrage passe bas et cela a été montré en utilisant les spectres fréquentiels des deux signaux. A la fin nous avons réalisé la commande à cinq créneaux à fréquence variable via un PIC 16F877A.