

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI, TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de magister en électrotechnique

Option: Entraînements électriques

Présenté par:

OUADFEL Ghania

Thème:

**Contribution à l'étude des performances de l'entraînement
électrique du mécanisme de levage**

Devant le jury d'examen composé de:

Mr. BENAMROUCHE Nacer Eddine, Professeur, UMMTO

Président

Mr. CHAIBI Rachid, Professeur, UMMTO

Rapporteur

Mr. NEDJAR Mohammed, Professeur, UMMTO,

Examineur

Mr. MAIDI Ahmed, Maître de conférences (A), UMMTO

Examineur

Mr. SADAoui Youcef, Maître de conférences (A), UMMTO

Examineur

Soutenu le:

*Je voudrais tout d'abord adresser ma gratitude à mon promoteur Monsieur **CHAIBI Rachid**, Professeur à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou pour l'encadrement qu'il m'a assuré et ses précieux et judicieux conseils qu'il n'a cessé de me prodiguer tout au long de ce projet, sa confiance témoignée, sans oublier sa qualité humaine.*

*Je tiens à remercier très vivement Monsieur **BENAMROUCHE Nacer Eddine**, Professeur à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury.*

*Je remercie également Monsieur **NEDJAR Mohammed**, Professeur à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour avoir accepté de participer à ce jury.*

*Je désire aussi remercier Messieurs **MAIDI Ahmed** et **SADAoui Youcef** Maître de conférence A à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou d'accepter de faire partie du jury.*

*Je tiens à remercier tout particulièrement et à témoigner toute ma reconnaissance aux personnes suivantes, **HELALI Kamelia**, **AISSAOUI Nassima**, **HAMEL Meziane**, **BOUHEDDA Ali** pour leurs soutiens et leurs aide.*

*Je remercie toute l'équipe pédagogique de la faculté de génie électrique et de l'informatique de l'UMMTO pour leur serviabilité, une pensée particulière à mes amis et camarades de la promos: **M'ZALI Nabil**, **CHAOUICHE Farid**, **AIT HAMOU Assia**.*

J'adresse enfin mes sincères remerciements à toute ma famille, et plus particulièrement ma source du courage mon très cher père, qui ma beaucoup encouragé et à qui je dois ma réussite, à tous mes amis(ies) pour le soutien dont ils ont fait preuve tout au long de ces années d'études, ainsi qu'à toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, contribué à la réalisation de ce mémoire.

A

Mes très chers parents

Mes frères et sœurs

Mes tantes et oncles

Mes cousines

Tous mes amis(es).

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I- Généralités sur les mécanismes de levage et les entraînements électriques	
I.1. Introduction	4
I.2. Analyse des différents mécanismes de levage	4
I.2.1. Pont roulant	5
I.2.2. Portique de manutention	5
I.2.3. Palan	6
I.2.4. Potence	7
I.2.5. Treuil	8
I.3. Généralités sur les entraînements électriques	8
I.3.1. Structure d'un entraînement électrique	9
I.3.2. Les moteurs des entraînements électriques	10
I.3.2.1. Entraînements par moteurs à courant continu (MCC)	12
I.3.2.1.a. Constitution de la machine	12
I.3.2.1.b. Principe de fonctionnement d'un MCC	13
I.3.2.1.c. Classification des moteurs à courant continu	13
1. L'excitation parallèle (shunt)	14
2. L'excitation série	14
3. L'excitation composée (ou compound)	15
4. Moteurs à courant continu à aimants permanents	15
5. L'excitation séparée (indépendante)	15
I.3.2.1.d. Variation de la vitesse d'un moteur à courant continu	16
1. Réglage par rhéostat	16
2. Réglage par le flux	16
3. Réglage par la tension d'induit	17
I.3.2.2. Les avantages et les inconvénients de la MCC	18
I.3.2.2. Entraînements par moteurs à courant alternatif	19
I.3.2.2.1. Moteurs asynchrone	19
1. Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone	19
2. Variation de la vitesse d'un moteur asynchrone	20
I.3.2.2.2. Moteur synchrone	21
1. Principe de fonctionnement de la machine synchrone	21
2. Variation de vitesse d'une machine synchrone	22
I.3.2.3. Commande des moteurs à courant alternatif	23
I.3.2.3.1. Commande du moteur asynchrone	23
1. Commande scalaire	23
2. Commande vectorielle à flux orienté	23
3. Commande directe du couple (DTC)	24
I.3.2.3.2. Commande de moteur synchrone	25
I.4. Critères de choix du moteur de l'entraînement électrique	25
I.5. Conclusion	27
Chapitre II- Variation de la vitesse d'un MCC	
II.1. Introduction	28
II.2. Convertisseurs pour moteurs à courant continu	28

Sommaire

II.2.1. Convertisseur continu-continu	29
II.2.2. Convertisseur alternatif-continu.....	29
II.2.2.1. Le contenu harmonique	30
II.2.2.2. Facteur de puissance.....	30
II.2.2.3. La réversibilité en courant	31
II.3. Freinage des moteurs à courant continu	31
II.4. Les structures des convertisseurs réversibles	33
II.4.1. Montages à circulation de courant	34
II.4.2. Montage sans courant de circulation.....	37
II.4.2.1. Montage avec bonde morte.....	38
II.4.2.2. Montage à logique d'inversion	38
II.5. Choix et la détermination des éléments de puissance	40
II.5.1.Choix et dimensionnement des composants de puissance	40
II.5.1.1. Choix du transformateur.....	40
II.5.1.2. Choix des thyristors.....	42
II.5.1.3. Choix de l'inductance de lissage	42
II.6. Calcul des diagrammes de charge et le choix de moteur	44
II.6.1. calcul de couple résistant appliqué à la montée et à la descente.....	44
II.6.2. Construction de diagramme de charge du moteur, en respectant ces limites de l'échauffement et de surcharge admissible	47
II.6.3 Caractéristiques mécaniques en régime statique en boucle ouverte	49
II.7. Conclusion.....	53

Chapitre III- Elaboration du système de commande et modélisations des processus dynamiques

III.1. Introduction	54
III.2. Modélisation des différents éléments de la chaîne de conversion.....	54
III.2.1. Modélisation de la machine à courant continu	54
III.2.1.1. Equations de la machine à courant continu	55
1. Equations électriques	55
2. Equations électromécaniques	56
3. Equation mécanique.....	56
III.2.1.2. Fonction de transfert du moteur.....	57
III.2.1.3. Schémas-blocs	57
III.2.2. Modélisation du convertisseur statique.....	58
III.2.2.1. Tension de réseau.....	58
III.2.2.2. Modélisation du redresseur à thyristor.....	58
III.2.2.3. La fonction de transfert du convertisseur.....	60
III.3. Construction du diagramme de charge du moteur lors de la variation linéaire de la f.é.m (montée et descente) du mécanisme de levage	61
III.4. La régulation d'un moteur à courant continu en boucle fermée	62
III.4.1. Les différentes chaînes de régulations d'un MCC	62
1. Régulation élémentaire	63
2. Régulation à boucles convergentes.....	63
3. Régulation en boucle multiple (ou en cascade).....	63
4. Régulation à boucles en parallèle	64
III.4.2. Les régulateurs pour un moteur à courant continu à excitation indépendante (MCCEI).....	65
III.4.2.1 Schéma de principe de la régulation	65

Sommaire

1. Régulateur du courant	68
2. Régulateur de la vitesse.....	71
III.5. Caractéristiques mécaniques en régime statique en boucle fermée.....	73
III.6. Elaboration du schéma de commande	74
III.7. Construction des régimes transitoires du mécanisme de levage	76
III.8. Conclusion.....	77
Conclusion générale.....	78
Références bibliographiques	

Introduction générale

Dès le premier âge jusqu'à la découverte de la machine à vapeur, l'homme n'a pratiquement disposé, pour assurer sa survie, que de sa propre énergie et de celle des animaux. En fait, les activités de levage et de manutention sont le quotidien de tous les chantiers de construction. Pensons seulement aux Égyptiens qui, pour ériger leurs pyramides, ont soulevé, transporté et disposé de gros blocs lourds à l'aide de cordages, de poulies, d'installations de levage et de traction, de rouleaux faits avec des troncs d'arbres, de leviers et bien sûr de milliers de bras. Sans ces activités dites de levage et de manutention, ces merveilles n'existeraient tout simplement pas. Mais c'était long et pénible.

Aujourd'hui, il en va tout autrement. Grâce à des appareils de levage puissants, à des accessoires de manutention adaptés et à des méthodes de travail appropriées, ces activités s'accomplissent très simplement et dans des délais raisonnables. La technique des moteurs électriques présente un certain nombre d'avantages: les réglages sont aisés et précis (couple, vitesse); l'utilisation est propre et silencieuse; le coût est raisonnable.

Au début des années 1880, des nombreux moteurs à courant continu et alternatif avaient été mis au point, l'obstacle majeur résidait dans la difficulté de leur démarrage ou dans la fragilité de leur commutateur mécanique, et la variation de leur vitesse [1].

Autrefois, pour réguler la vitesse d'un moteur à courant continu, on utilisait un groupe Ward-Léonard. Ils sont encombrants, ont un mauvais rendement et exigent beaucoup d'entretien. Ils sont désormais remplacés par des ensembles redresseurs commandés, qui permettent une régulation simple et précise de la vitesse, et offrent un rendement et une fiabilité élevés [2].

Les développements actuels en variation de vitesse (TGV, voiture électrique, entraînements de toute sorte) nécessitent la réalisation d'ensembles machine-alimentation-commande, qui optimisent les performances statiques et dynamiques des machines électriques utilisées en actionneurs. La conception de ces ensembles repose sur une approche pluridisciplinaire qui intègre les bases variées du génie électrique, de l'électrotechnique à l'automatique, en passant par l'électronique de puissance et l'informatique industrielle sans oublier la mécanique. Cette complémentarité s'avère nécessaire à l'optimisation des chaînes d'entraînement et à l'amélioration des performances des actionneurs électriques.

Jusqu'aux années 1980, les applications de vitesse variable étaient principalement réalisées avec des machines à courant continu, alimentées par des redresseurs commandables, la commande de la vitesse et du couple sont obtenus en faisant varier la tension d'induit, le courant d'excitation, ou les deux [1].

La possibilité offerte de nos jours par l'électronique de puissance et notamment par des composants discrets (thyristors, transistors MOSFET ou IGBT) capables de commuter très rapidement des puissances considérables, rend désormais économiquement et énergétiquement rentable la mise en œuvre d'alimentations à fréquence variable pour l'emploi de machines à courant alternatif. Il reste néanmoins encore de nombreuses applications où la première solution est la plus intéressante [2].

Dans un entraînement à vitesse variable, le moteur constitue un élément de la boucle de régulation. Il est donc nécessaire de prendre en compte son comportement dynamique. Suivant le niveau des performances demandées par l'utilisation, on sera amené à considérer un modèle de la machine plus ou moins complexe adapté au type de commande choisie. Les lois de commande de plus en plus performantes permettent un meilleur contrôle des régimes transitoires tout en assurant, dans une grande plage de fonctionnement, un asservissement précis de la vitesse et du couple électromagnétique. Toutes ces améliorations demandent une bonne connaissance de la machine et de son convertisseur, notamment en régime transitoire. Lorsqu'on est plus exigeant sur les performances dynamiques, ce qui est le cas des machines-outils, des appareils de levage, des entraînements de laminoirs, il est nécessaire de maîtriser le couple à faible vitesse pendant les régimes transitoires. On utilise alors des commandes qui permettent de contrôler le courant, donc le couple, ainsi que la vitesse du moteur.

Plusieurs applications exigent un fonctionnement réversible du point de vue tension et courant. Une des structures qui offre cette possibilité est le redresseur quatre quadrants. Ce dernier est constitué de deux ponts redresseurs montés en tête bêche. Il est destiné principalement à alimenter un moteur à courant continu pour lui permettre de restituer au réseau de l'énergie lors de son freinage tout en lui donnant la possibilité de tourner dans les deux sens de rotation. Les deux ponts peuvent soit fonctionner en même temps ou soit fonctionner de manière alternée, et chacun assure le fonctionnement dans deux quadrants.

L'étape de la modélisation est très importante. Il s'agit de la description mathématique du système à l'aide d'équations différentielles ou de fonctions de transfert, mettant en évidence le comportement statique et dynamique et d'éventuels phénomènes non linéaires. Dans la plupart des processus industriels, en particulier les moteurs électriques, il est indispensable de maîtriser certains variables physiques (vitesse, position, angle...etc.), il est donc très souvent nécessaire d'avoir recours à une commande. La commande PID (Proportionnelle-Intégrale-Dérivée) est une méthode qui a fait ses preuves et qui donne de bons résultats, grâce à l'action proportionnelle qui améliore la rapidité, l'intégrale pour la précision, et la dérivée pour la

stabilité. La modélisation de la commande et du système moteur à courant continu (MCC) est programmée sous environnement *Matlab/Simulink*.

Le but de ce travail est de consolider, approfondir les connaissances des entraînements électriques et contribuer à l'étude des performances d'un mécanisme de levage.

Ce mémoire est divisé en trois chapitres:

Le premier chapitre présente des généralités sur les différents mécanismes de levage motorisés existants et les entraînements électriques en se basant sur les différents moteurs électriques utilisés, nous expliquons brièvement leurs avantages et inconvénients, et les modes de leurs commandes, dans le but de choisir un moteur pour notre application.

Le deuxième chapitre est consacré à analyser des différentes topologies de convertisseurs statiques utilisés pour alimenter des moteurs à courant continu, plus précisément les convertisseurs réversibles dans les quatre quadrants car ils permettent de restituer l'énergie lors de la phase de freinage. Nous présentons les circuits de réglage les plus appropriés et les paramètres des éléments de puissance. Nous construisons le diagramme de charge du moteur lors de la variation linéaire de la f.é.m (montée et descente) de notre charge, par la suite nous déterminons les caractéristiques mécaniques du régime statique en boucle ouverte.

Le dernier chapitre est réservé à la représentation du schéma-bloc convertisseur-moteur en boucle fermée à deux contours: courant et vitesse, nous représentons les caractéristiques mécaniques statiques en boucle fermée. A la fin, nous élaborons le schéma de commande, nous déterminons les régimes transitoires de notre mécanisme de levage

Nous terminons par une conclusion générale et nous proposons quelques perspectives pour la continuation future de ce travail.

Chapitre I

Généralités sur les mécanismes de levage et les entraînements électriques

I.1 Introduction

Les appareils de levage sont largement utilisés dans toutes les activités de production, de stockage, de transport et dans la distribution de matériels manufacturés, donc ils sont des compléments inévitables lors des opérations de manœuvres. Cette diversité d'activités fait appel à des moyens de manutention ou de levage les plus adaptés. L'utilisation très répandue des appareils de levage explique sans aucun doute l'existence de nombreux types. Chacun d'entre eux possède des caractéristiques qui lui sont propres pour soulever et transporter des charges lourdes [5].

Ce chapitre est en deux parties. Dans la première partie, nous décrivons les appareils de levage les plus couramment utilisés, et nous traiterons uniquement les appareils de levage motorisés, c'est-à-dire entraîné par un moteur électrique alimenté par une source d'énergie, ce qui implique que la force musculaire de l'utilisateur s'avère insuffisante pour la manutention envisagée.

Dans la deuxième partie, l'analyse globale du système d'entraînement électrique est effectuée tout en axant l'étude sur les types de moteurs qui existent sur le marché. Nous présenterons différentes techniques de commande et interpréterons leurs implantations. Les difficultés rencontrées, les avantages et inconvénients de chaque technique seront développées afin de choisir celle qui est la plus adaptée au moteur sélectionné pour l'application envisagée.

I.2 Analyse des différents mécanismes de levage

Il existe de nombreux types d'appareils de levage adaptés aux différentes conditions de manutention. Leur choix doit être fait avec le plus grand soin, nous devons tenir compte de leur capacité maximale, et surtout les hauteurs auxquelles on prévoit de lever (ou descendre) les charges (ou les personnes), et les mouvements désirés (levage, direction, translation).

On considère comme appareils de levage les grues, ponts roulants, portiques, treuils, palans, potences, chariots élévateurs, engins élévateurs à nacelle, plates-formes élévatrices, vérins, crics [5], [6]. Les accessoires de levage sont des organes de suspension qui assurent la liaison entre la charge et l'appareil de levage. Les élingues, les chaînes, les sangles, les palonniers, crochets et moufles, ventouse de levage, pince, griffe, grappin, manille sont des accessoires de levage [5].

Nous citerons ci-dessous les mécanismes de levage les plus répandus dans l'industrie:

I.2.1. Pont roulant

Le pont roulant est un appareil de levage largement utilisé dans les ateliers, parcs, salles de machines et la grosse industrie.

D'une manière générale, les ponts roulants sont constitués d'un ensemble de poutres horizontales qui peuvent se déplacer sur des chemins de roulement. Une cabine de pilotage est souvent disposée sur la poutre principale du pont roulant, qui permet de déplacer l'appareil de levage. Elle est munie de mécanismes d'entraînement motorisés qui produisent les divers mouvements de l'ensemble. Permettant ainsi de desservir la totalité de la zone située sur toute la longueur du pont roulant. Le poids soulevé par de tels ponts dépend de la taille et de la structure de l'engin [3].

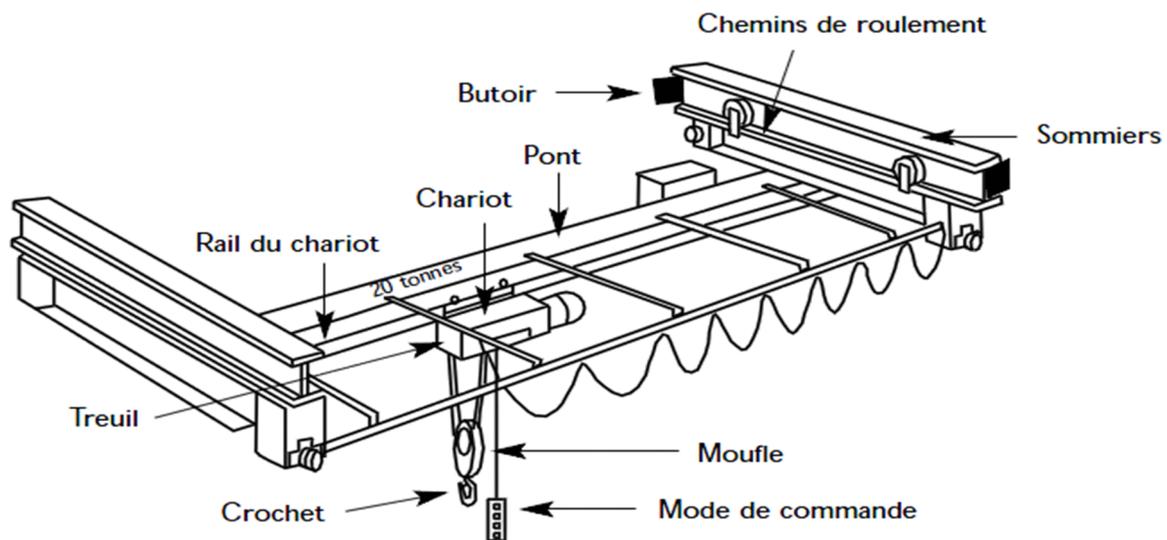


Figure. I.1. Les composants d'un pont roulant

I.2.2. Portique de manutention

Le portique est une structure qui est constituée d'une ou plusieurs poutres munies de jambages sur lesquelles est placé un appareil ou un accessoire de levage. Il est utilisé principalement sur de grandes aires de stockage à l'air libre (ports, parcs de matières en vrac ou de produits industriels de masse). Le portique remplit sensiblement les mêmes fonctions qu'un pont roulant dont il ne diffère que par le principe de fonctionnement. Un pont roulant circule sur un chemin de roulement situé en hauteur sur des poutres en acier ou béton. Le portique quant à lui circule sur une bande de roulement, généralement constituée de rails, située à même le sol. Sur ces rails, circule un chariot qui supporte le matériel de levage lui-

même (un ou deux treuils sur lesquels s'enroulent les câbles de levage ainsi que le moyen de préhension). Une cabine de conduite suspendue complète l'installation.



Figure I.2. Portique de manutention

I.2.3. Palan

Le palan est un appareil de levage qui est généralement suspendu et qu'on utilise à poste fixe ou mobile pour soulever et abaisser verticalement, ainsi que pour déplacer horizontalement des charges par l'intermédiaire de chaînes ou de câbles d'acier [3].

Le palan comprend principalement :

- un moteur,
- un réducteur par engrenages,
- un tambour sur lequel s'enroule le câble (chaîne),
- un frein incorporé ou non au moteur,
- un limiteur de course,
- un appareillage de commande,
- éventuellement, un limiteur de charge ou de couple.

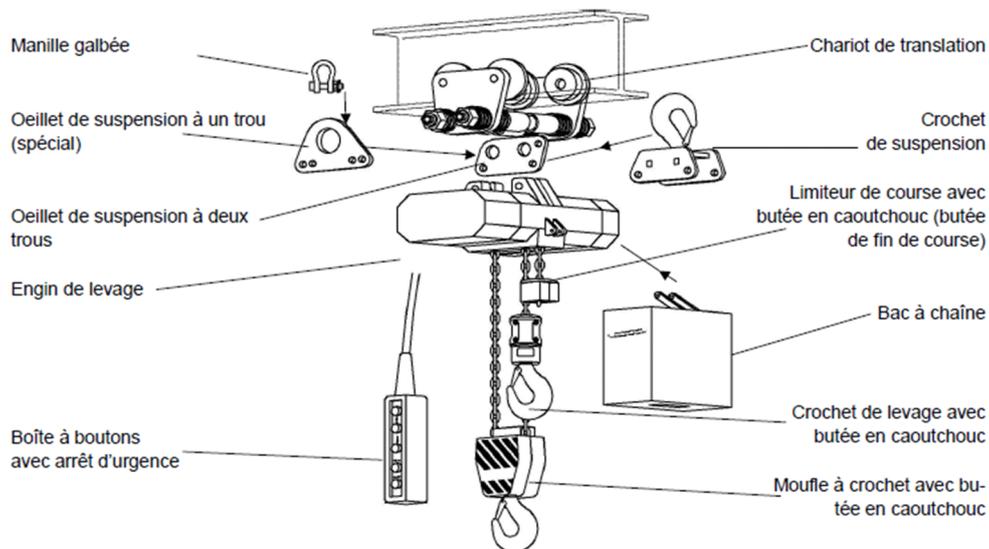


Figure. I.3. Palan électrique

Le palan électrique est commandé à distance notamment depuis le poste de conduite et permis par action sur les boutons poussoirs "arrêt d'urgence" de provoquer l'immobilisation totale de l'appareil, il présente un avantage sécuritaire intéressant, l'encombrement réduit, la puissance élevée qu'il procure et leur durée de vie intéressante [3].

I.2.4. Potence

La potence est une structure constituée d'un bras horizontal qui pivote sur son axe et sur lequel est placé un appareil ou un accessoire de levage. Elle peut comprendre également une colonne sur laquelle est alors fixé le bras horizontal, dans le cas contraire, le bras soit fixé directement à la structure du bâtiment [4].



Figure. I.4. Potence

I.2.5. Treuil

Les treuils sont les mécanismes les plus répandus et permettant les plus grandes variations de niveau, et Leur construction simple s'adapte parfaitement aux petites et grandes charges. Le treuil peut également être facilement intégré dans les constructions existantes. Il s'utilise à poste fixe ou il peut être posé sur un pont roulant. Cette possibilité d'être posé sur un pont roulant le différencie des autres appareils. Il peut faire une traction oblique ou même horizontale [3].

Les treuils sont constitués des éléments suivants:

- Un moteur électrique,
- Un tambour sur lequel le câble est enroulé,
- Un système de réduction,
- Une boîte à relais permettant de commander le treuil. Cette boîte peut être intégrée dans le treuil ou séparée de ce dernier.

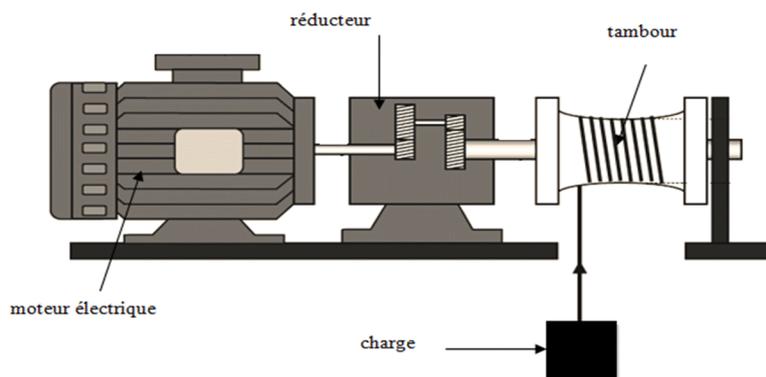


Figure .I.5 treuil électrique

I.3. Généralités sur les entraînements électriques

Le champ d'application des entraînements électriques ne cesse de s'étendre de jour en jour. Ils sont aujourd'hui légion dans toutes les installations industrielles, la nécessité de pouvoir varier continuellement la vitesse d'un entraînement est le plus souvent évidente. Dans le secteur industriel, plus de 60% de l'énergie électrique produite est consommée et transformée en énergie mécanique par des entraînements électriques. Ces derniers se sont imposés aux autres types d'entraînements grâce aux avantages suivants [1], [6], [7]:

- La suppression des fortes surintensités du courant appelé par le moteur au démarrage, réduction de la puissance d'alimentation,
- Grandes étendues de plages de la puissance, du couple élevé et de la vitesse,
- Améliorer le rendement d'un équipement,
- La souplesse, la flexibilité, la précision et la rapidité des régulations permettent un accroissement de la production,
- Allongement de la durée de vie des moteurs (réduction des échauffements au démarrage, limitation de la fatigue des roulements par réduction de la vitesse, protection contre les défauts du réseau).

I.3.2.1 Structure d'un entraînement électrique

Un entraînement électrique est un système assurant une conversion électromécanique par le biais d'un moteur électrique ou d'un transducteur et comprenant l'ensemble des périphériques nécessaires à la transmission, à l'alimentation et au contrôle. La structure générale du système d'entraînement électrique peut être représentée par le schéma-bloc de la figure I.6 [1], [6], [8].

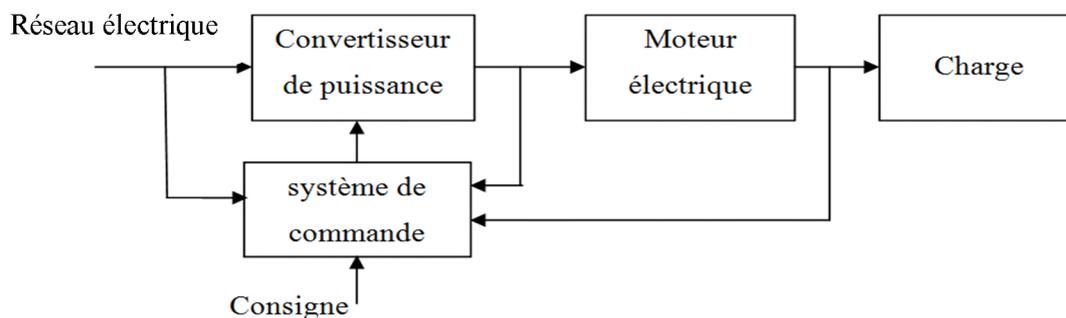


Figure. I.6 schéma bloc d'un entraînement électrique.

Le système d'entraînement est constitué essentiellement par [9], [7]:

- un moteur électrique, généralement de type à courant continu ou alternatif,
- un convertisseur statique employant des semi-conducteurs de puissance,
- un système de commande,
- une charge associée à un convertisseur mécanique.

La puissance électrique fournie par la source d'alimentation au convertisseur de puissance, est transformée en puissance électrique réglable. Cette dernière est transformée en

puissance électromagnétique puis en puissance mécanique par le moteur. Le moteur entraîne la machine à animer par l'intermédiaire d'une transmission mécanique [8].

Le système de commande peut varier d'un simple bouton poussoir à un ordinateur de commande. En général, il élabore les signaux de commande des semi-conducteurs du convertisseur statique, à partir des consignes de pilotage du procédé et des mesures de tension, courant, vitesse, couple, accélération,... fournies par les divers capteurs placés à l'entrée et à la sortie du convertisseur et sur l'arbre du moteur.

La démarche d'analyse d'un système d'entraînement électrique implique tout d'abord l'étude des composants:

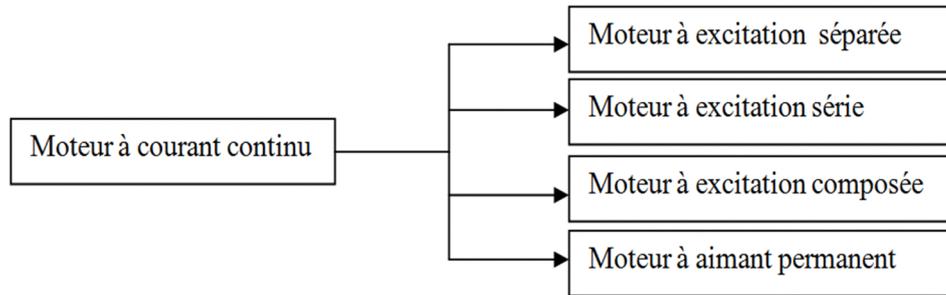
- Le moteur, son alimentation, sa commande et ses périphériques qui sont étroitement liés et conditionnés par la fonction à réaliser,
- L'organe entraîné qui doit permettre de définir le cahier des charges et des contraintes imposées à l'entraînement électrique,
- La transmission qui permet l'adaptation de l'entraînement électrique à la charge.

I.3.2 Les moteurs des entraînements électriques

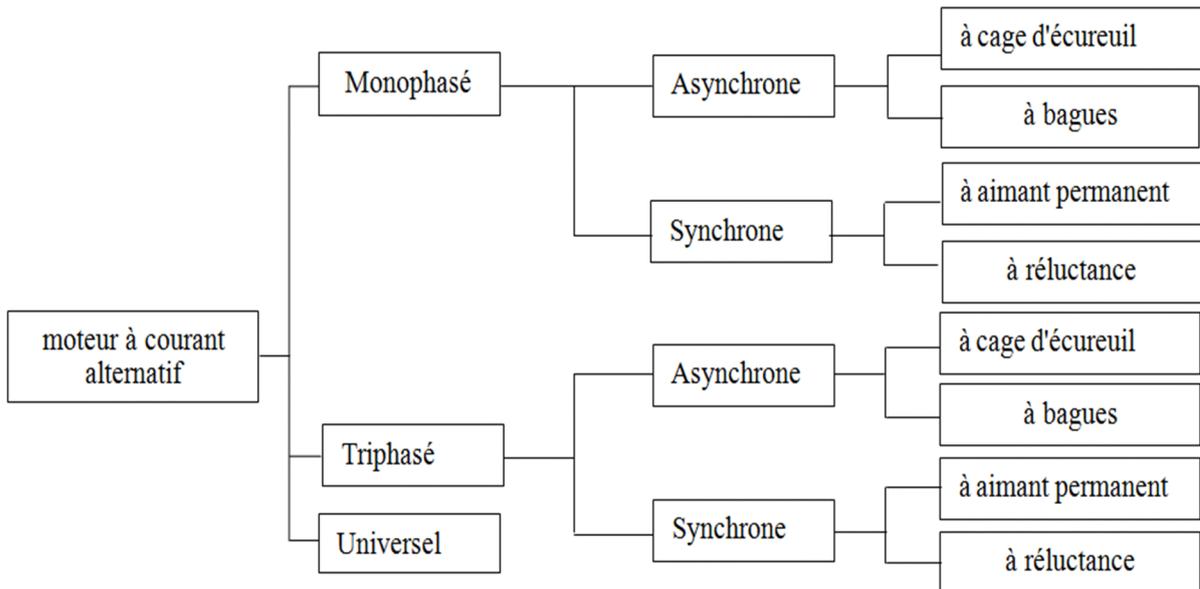
On peut difficilement imaginer de nos jours, un monde sans moteurs électriques. Les moteurs ont trouvé d'innombrables applications dans les domaines les plus divers. Une multitude de moteurs de types différents sont à notre disposition. Chaque type de moteur possède ses caractéristiques propres qui permettent de l'adapter à une application ou à une autre. Selon la nature de la source d'alimentation, on distingue [9], [7]:

- Entraînements par moteurs à courant continu (à excitation séparée, série, shunt, composé, ou à aimants permanents),
- Entraînement par moteurs à courant alternatif (synchrone, asynchrone et à réluctance).

La section qui suit, donne une brève description des moteurs les plus employés dans les entraînements électriques. La figure I.7 présente les moteurs le plus couramment utilisés à l'heure actuelle dans les entraînements électriques.



a. Moteur à courant continu



b- Moteur à courant alternatif

Figure. I.7 Classification des moteurs pour les entraînements électriques

Tous les moteurs se composent de deux parties essentielles :

- Le stator (partie fixe),
- Le rotor (partie tournante).

La conception et la fabrication de ces deux composantes définissent le type du moteur et ses caractéristiques propres. D'autres éléments (par exemple, balais, bagues collectrices, paliers, ventilateurs, condensateurs, interrupteurs centrifuges, etc.) peuvent être particuliers à chaque type de moteur.

I.3.2.1 Entraînements par moteurs à courant continu

I.3.2.1.a Constitution de la machine

Le moteur à courant continu est un convertisseur électromécanique permettant la conversion bidirectionnelle de l'énergie. Dans l'organisation d'une machine à courant continu, on peut distinguer les principaux éléments suivants [10], [11], [12]:

- Un enroulement statorique qui, une fois alimenté, génère un champ magnétique statorique fixe canalisé dans la machine par des matériaux ferromagnétiques. Suivant la méthode de création du champ magnétique, on distingue l'excitation magnétoélectrique et électromagnétique, et ce dernier est la plus répandue,
- Un enroulement rotorique porte le bobinage parcourus par un courant continu qui tournant dans le flux inducteur, il est le siège de forces électromotrices induites, l'alimentation des conducteurs mobiles se fait à travers des contacts glissants dans un organe, appelé collecteur. Celui-ci est un commutateur mécanique du courant. L'induit est le lieu de la conversion électromagnétique, d'où le couple moteur est dû à l'action du flux du stator sur le courant du rotor. Le rotor est toujours feuilleté pour réduire les pertes par courants de Foucault. Le choix des tôles du rotor doit être tel que les pertes par hystérésis soient les plus faibles possible,
- Le collecteur est la pièce maîtresse de l'induit d'un MCC, c'est un ensemble de lames de cuivre isolées latéralement les unes des autres, réunies aux conducteurs de l'induit en certains points. Les balais, portés par le stator, frottent sur les lames du collecteur, et permettent d'établir une liaison électrique entre l'induit qui tourne et l'extérieur de la machine. La figure I.8 représente les éléments constituant un moteur à courant continu.

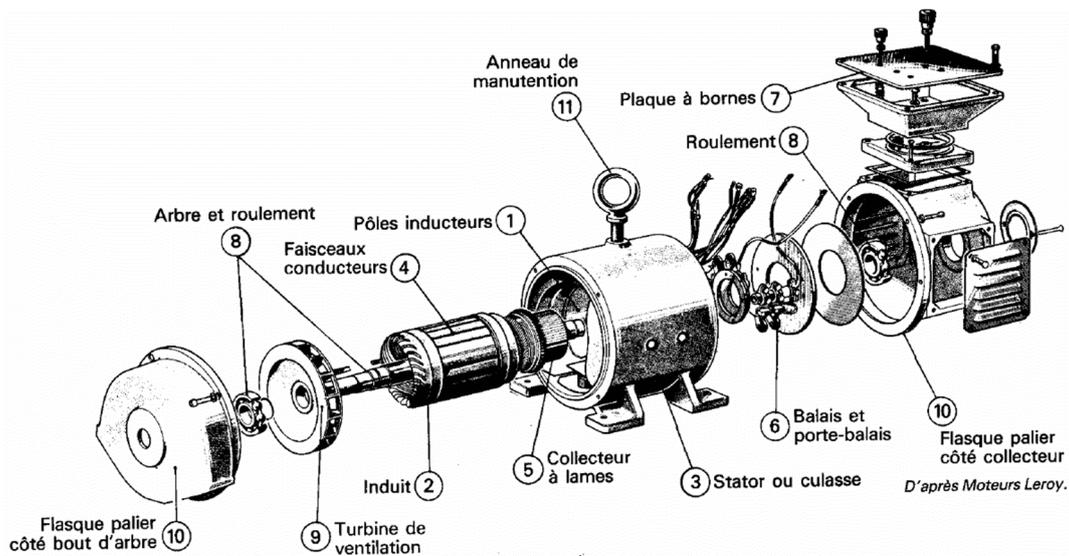


Figure I.8 Constitution d'un moteur à courant continu

I.3.2.1.b Principe de fonctionnement d'un moteur à courant continu

Le principe de la machine à courant continu repose sur l'application de forces de Laplace sur des conducteurs solidaires du rotor et baignées dans une induction magnétique créée par l'enroulement inducteur. La particularité de la machine est qu'elle est pourvue d'un système balais collecteur qui permet de répartir les courants dans les conducteurs du rotor suivant une disposition fixe qui ne dépend pas de la rotation du rotor. En conséquence, cette machine peut produire un couple sur son rotor indépendant de la vitesse de rotation de ce dernier.

I.3.2.1.c Classification des moteurs à courant continu

La classification des moteurs à courant continu se fait suivant leur mode de connexion de l'enroulement d'excitation (inducteur) par rapport à l'induit. Pour cela nous avons deux groupes des moteurs :

- Les moteurs à excitations indépendante (moteur à aimant permanent, moteur à excitation séparée).
- Les moteurs auto-excités (moteur à excitation série, moteur à excitation parallèle, moteur à excitation composée).

La figure I.9 illustre les différents modes d'excitations :

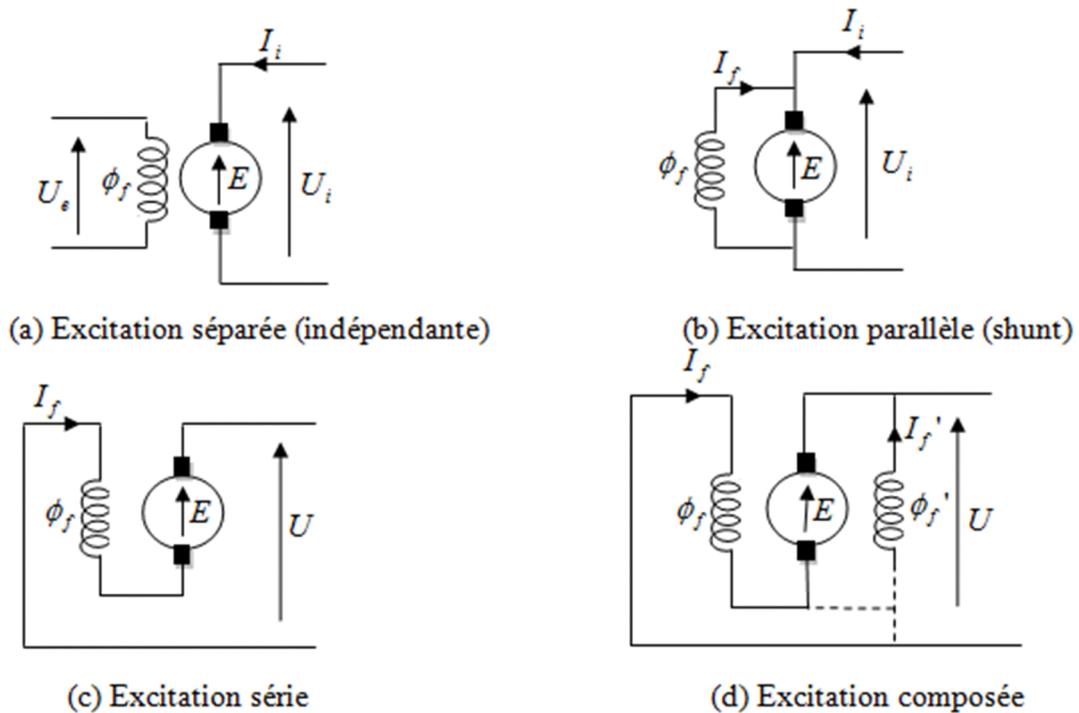


Figure I.9 Les différents modes d'excitation des enroulements d'un moteur à courant continu

1. L'excitation parallèle (shunt)

L'enroulement d'excitation est connecté en parallèle avec l'induit du moteur, ce mode de connexion est utilisé précisément lorsque le réglage séparé des tensions induit et inducteur n'est pas possible. La tension aux bornes du rotor est la même que celle aux bornes du stator, figure I.9 (b).

2. L'excitation série

L'inducteur est en série avec l'induit, une seule source d'alimentation suffit. Le courant d'excitation I_e est donc égal au courant d'induit I_i et au courant I absorbé par la machine. Ces moteurs se caractérisent par un couple de démarrage très élevé. La régulation de vitesse est difficile à assurer et ils ont une vitesse à vide très élevée, figure I.9 (c).

3. L'excitation composée (ou compound)

Cette machine est plus complexe, elle nécessite deux enroulements d'excitation. Elle constitue une recherche de compromis entre les propriétés de l'excitation séparée et de l'excitation série. Ce

moteur réunit les avantages des deux types de moteur, le fort couple à base vitesse du moteur série et l'absence d'emballement (survitesse) du moteur shunt. Il délivre un couple de démarrage pouvant être très important. Il est plus employé quand le couple résistant comporte de grosses variations, figure I.9 (d).

4. Moteurs à courant continu à aimants permanents

Les MCC à aimants permanents trouvent un vaste champ d'application dans le secteur des entraînements de machines-outils, car ils satisfont optimalement aux exigences imposées par ces machines à la caractéristique couple-vitesse (leur couple est maximale à proximité de la vitesse nulle et décroît à vitesse croissante), économique avec un meilleur rendement en raison de l'absence de l'enroulement inducteur [11].

5. L'excitation séparée (indépendante)

Ce mode d'excitation nécessite deux sources d'alimentations distinctes, figure I.9 (a). Dans ce cas, la tension d'induit et le couple sont nettement découplés en raison de l'alimentation. De ce fait, le fonctionnement du moteur se prête à une large adaptation aux exigences du mécanisme entraîné [11].

Les moteurs à courant continu à excitation indépendante sont encore utilisés assez largement pour l'entraînement à vitesse variable, la variation de la vitesse s'obtient simplement par action sur la tension d'induit et/ou sur le courant d'excitation car il conduit à une grande souplesse pour piloter la machine en vitesse ou en couple, il permet en effet de contrôler de façon complètement séparée les grandeurs statorique et rotorique. Très facile à miniaturiser, il s'impose dans les très faibles puissances. Il se prête également fort bien à la variation de vitesse avec des technologies électroniques simples pour des performances élevées et jusqu'à des puissances importantes. Leurs caractéristiques permettent également une régulation précise du couple, en moteur ou en générateur. Leur vitesse de rotation

nominale est adaptable aisément par construction à toutes les applications, car elle n'est pas liée à la fréquence du réseau [12], [13], [14].

Dans les équipements récents, on limite le plus souvent l'emploi des variateurs à moteur à courant continu à des applications de faible puissance et performances dynamiques élevées [13].

I.3.2.1.d. Variation de la vitesse d'un moteur à courant continu

L'étude de la variation de vitesse pour une machine à courant continu reste très intéressante. La vitesse d'un moteur à excitation séparée ou parallèle ω est donnée par l'équation (I.1):

$$\omega = \frac{U_i - R_i I_i}{k \phi_n} \quad (\text{I.1})$$

U_i : tension d'alimentation d'induit,

R_i : résistance d'enroulement d'induit,

I_i : courant d'induit,

$k \phi_n$: constante du moteur.

Le réglage de la vitesse du moteur (série, shunt ou excitation séparée) se fait en général par les moyens suivants [37]:

- variation par un rhéostat.
- variation de la tension d'alimentation de l'induit.
- variation du flux d'excitation.

1. Réglage par rhéostat

Il est possible de réduire la vitesse en augmentant la résistance de l'induit avec un rhéostat branchée en série avec l'induit tout en fixant les paramètres U_i et ϕ à leurs valeurs nominales. L'expression de la vitesse est:

$$\omega = \frac{U_i}{k \phi_n} - (R_i + R_h) \frac{I_i}{k \phi_n} \quad (\text{I.2})$$

R_h résistance rhéostatique.

Le faible rendement et les mauvaises performances du réglage par rhéostat en font une solution qui n'est guère employée de nos jours, car elle engendre une importante dissipation d'énergie dans le rhéostat, ainsi que l'échauffement de la machine. Ce système n'est donc employé que pour le démarrage ou le freinage du moteur, en particulier en traction électrique [6] [37].

2. Réglage par le flux

L'action sur l'excitation: en diminuant le courant inducteur le flux diminue, ce qui provoque une augmentation de vitesse au-dessus de la vitesse nominale jusqu'à la vitesse maximale avec un rhéostat de champ qui est mis en parallèle avec l'enroulement d'excitation ou une tension U_e réglable effectué par un redresseur d'électronique, n'offre qu'une variation limitée et engendre une diminution du couple électromagnétique, et n'est pas possible si l'inducteur est à aimants permanents.

Il faut noter cependant que dans ce mode de réglage, le couple correspondant au courant nominal de la machine diminue dans les mêmes proportions que la réduction du flux. De plus, dans cette région, la tension d'alimentation d'induit étant constante, pour un courant d'induit constant égal à la valeur nominale, le moteur fonctionne à puissance constante.

Dans la pratique, il n'est pas possible de réduire le flux à moins du tiers de sa valeur nominale ce qui limite la vitesse au triple de la vitesse nominale $\phi_n \leq \phi < \phi_n/3$ [15].

3. Réglage par la tension d'induit

Cette solution est donc la plus couramment employée pour le réglage de vitesse. Elle requiert cependant une alimentation en courant continu variable, Le flux étant réglé à sa valeur nominale, la vitesse peut être variée d'une valeur nulle à la valeur nominale en variant la tension d'alimentation de l'induit de zéro à la valeur nominale, La puissance nominale augmente linéairement avec la vitesse, jusqu'à ce que la tension et la vitesse atteignent leur valeur nominale. Ce mode de réglage est effectué par un redresseur d'électronique [15]. Les avantages de cette solution sont:

- un contrôle de vitesse sans pertes d'énergie, contrairement au réglage rhéostatique,
- la conservation de caractéristiques mécaniques à l'allure shunt.

La souplesse de ces deux réglages indépendants confère à ce moteur une grande précision. Le réglage de la vitesse d'un moteur série peut se faire de façon identique à celui d'un moteur shunt: par rhéostat, par réglage du flux d'excitation, par réglage de la tension d'alimentation. La figure I.10 représente le diagramme de puissance et du couple pour les deux modes de réglage (réglage par la tension d'induit et le flux d'excitation) [38].

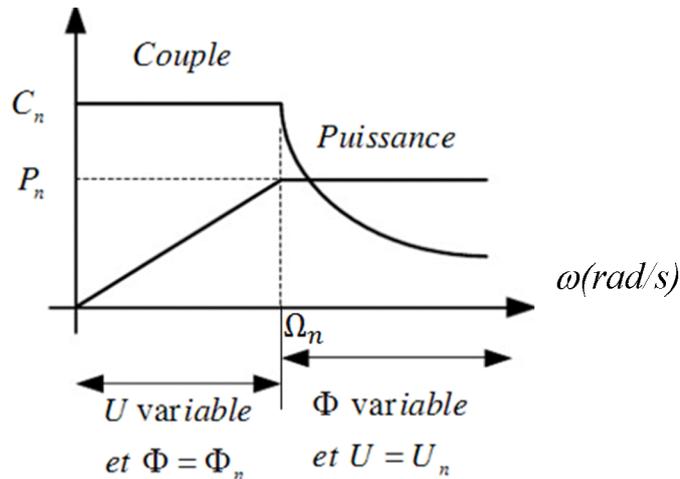


Figure I.10 Diagramme de puissance maximale et couple maximal

I.3.2.1.e Les avantages et les inconvénients de la machine à courant continu

Certains prédisent la mort des moteurs à courant continu depuis plus de 20 ans. Pourtant ils sont loin de s'avouer vaincus et leurs avantages, bien que rarement soulignés, sont incontestables. Ils présentent plusieurs avantages par rapport aux autres machines. Parmi ces avantages, on peut citer [12], [10]:

- Simplicité de régulation et de commande en couple et en vitesse de rotation par réglage de la tension ou des courants d'induit et d'inducteur, ainsi que son alimentation, en utilisant des convertisseurs statiques classiques (redresseurs, hacheurs).
- Une large gamme de variation de vitesse au-dessus et au-dessous de la vitesse de régime.
- Une accélération, un freinage et une inversion du sens de rotation très rapide, ce qui est avantageux dans les cas des appareils de levage et des machines outils;

Mais le MCC possède un certain nombre d'inconvénients bien connus, citons [12], [10], [16]:

- Ils peuvent être dangereux en milieu explosifs (le collecteur imposant des ruptures de contact provoque des arcs, qui usent rapidement le commutateur et génèrent des parasites dans le circuit d'alimentation);
- Nécessite beaucoup de maintenance, notamment pour le remplacement des balais et du collecteur, surtout lors de fonctionnement en vitesses élevées car le frottement est important.

I.3.2.2 Entraînements par moteurs à courant alternatif

I.3.2.2.1 Les moteurs asynchrones

Le moteur asynchrone, appelée aussi moteur à induction. Ils sont basés sur l'entraînement d'une masse métallique par l'action d'un champ tournant. Ils comportent deux armatures à champ tournant coaxiales: l'une est fixe, l'autre est mobile [10]. Stator comporte une carcasse en fonte ou en tôle d'acier dans laquelle est inséré un circuit magnétique formé d'un empilage de tôles. Il porte un enroulement triphasé réparti dans des encoches du circuit magnétique. Rotor (mobile) se divise en deux catégories suivant la structure de leur rotor qui peut être bobiné ou à cage d'écureuil [17], [11].

- Moteur asynchrone à cage d'écureuil, dans ce cas, les encoches contiennent des barres reliées aux deux extrémités par des anneaux de court-circuit. L'ensemble forme une cage d'écureuil. Ce moteur est le plus connu. Il s'est imposé grâce à sa robustesse, sa simplicité de construction et sa facilité d'entretien. Il est destiné en premier lieu aux entraînements à vitesse unique [11],
- Moteur asynchrone a rotor bobiné, les encoches présentes à la périphérie du moteur contiennent un enroulement similaire à celui du stator. Le bobinage rotorique est toujours couplé en étoile et il est accessible de l'extérieur grâce un système de bagues et balais, ce qui permet soit de le court-circuiter, soit de le relier à un circuit permettant d'agir sur les caractéristiques de la machine dans certains fonctionnements [17], [11].

1. Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone

La compréhension du fonctionnement de la MA repose essentiellement sur deux lois physiques fondamentales: la loi d'Ampère (loi des forces électromagnétiques) et la loi de Faraday (loi de l'induction électromagnétique).

Les bobines statoriques sont alimentées par une tension alternative triphasée. Ces trois bobines produisent un champ magnétique variable qui a la particularité de tourner autour de l'axe du stator suivant la fréquence de la tension d'alimentation ω_s , ce champ magnétique est appelé champ tournant.

La vitesse est: $\Omega_s = \omega_s / p$, elle s'appelle aussi vitesse de synchronisme.

p : nombre de paires de pôles.

L'enroulement au rotor est donc soumis à des variations des flux, une force électromotrice induite apparaît, des courants rotoriques se créent. Ces courants sont responsables de l'apparition d'un couple de forces de Laplace qui tend à mettre le rotor en mouvement afin de s'opposer à la variation du flux. Le rotor se met donc à tourner à une vitesse ω pour tenter de suivre le champ statorique [9].

La différence de vitesse entre le rotor et le champ statorique est appelée vitesse de glissement

$$g\Omega_s = \Omega_s - \omega$$

g : est le glissement.

2. Variation de la vitesse d'un moteur asynchrone

La machine asynchrone très convoitée par l'industrie moderne depuis son invention pour ces avantages incontestés (robustesse électromécanique, simplicité de conception et d'entretien, faible coût et surtout absence de l'ensemble balais collecteur). Cette simplicité s'accompagne toutefois d'une grande complexité physique de son modèle non linéaire, multi-variables et fortement couplé variant dans le temps, et les grandeurs physiques ne sont pas mesurables pour le moteur à cage d'écureuil. La variation de la vitesse des moteurs asynchrones est assez difficile, car elle dépend de plusieurs paramètres. Cependant, sa nature non linéaire rend sa commande compliquée.

A partir du schéma équivalent [9], nous allons donner l'expression du couple électromagnétique produit par la machine:

$$C_{em} = 3p \frac{R}{g\omega_s} \frac{V_s^2}{\left(\frac{R}{g}\right)^2 + (L_f\omega_s)^2} \quad (I.3)$$

p : nombre de paire de pole

V_s : valeur efficace de la tension aux bornes d'une des phases du stator de la machine.

g : glissement.

R : résistance d'une phase rotorique ramenée au stator.

L_f : inductance totale de fuite ramenée au stator

Le réglage de la vitesse de la machine asynchrone est donc obtenu en agissant sur le couple qu'elle produit, soit, si l'on se réfère à son expression ci-dessus: le nombre de paires de pôles, la tension d'alimentation de la machine, le glissement ou la fréquence d'alimentation de la machine, la résistance rotorique [11].

I.3.2.2.2 Moteur synchrone

Toute machine électrique dont laquelle la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant est appelé machine synchrone. Cette famille des machines regroupes, en fait, plusieurs sous familles, qui vont de la machine à aimant permanent et de la machine à réluctance variable, en passant par les moteurs pas à pas. Néanmoins, la structure de toutes ces machines est relativement proche. Le stator est généralement constitué de trois enroulements triphasés répartis, ce bobinage constitue l'induit de la machine car il est le siège de forces électromotrices induites par le champ tournant [17], [9].

Il existe trois grandes familles de rotor, ayant pour rôle de générer le champ d'induction rotorique. Les rotors bobinés à pôles lisses, les rotors bobinés à pôles saillants ainsi que les rotors à aimants. Pour le rotor bobiné, il porte en général un bobinage placé dans des encoches, dans le cas des rotors à pôles lisses ou sur des pôles saillants. Cet enroulement destiné à être alimenté en courant continu, constitue l'inducteur de la machine car il sert à créer le champ magnétique qui va balayer les conducteurs de l'induit. L'excitation peut également être produite par des aimants permanents montés en surface ou enterrés. Une variante particulière ne comporte aucune excitation au rotor et utilise les variations de réluctance [17].

1. Principe de fonctionnement de la machine synchrone

Le moteur synchrone est alimenté par deux sources. La première à courant continu fournit l'excitation. La deuxième, polyphasée, alimentant l'induit, fournit la puissance à la

machine. Le rotor crée un champ magnétique rotorique qui suit le champ tournant statorique, ce qui entraîne la rotation du rotor à la vitesse de synchronisme correspondant à la fréquence d'alimentation. Lorsque le moteur tourne au synchronisme, le couple fourni sur l'arbre est constant si les tensions polyphasées sont purement sinusoïdales et équilibrées.

2. Variation de vitesse d'une machine synchrone

Actuellement, la quasi totalité des machines synchrones utilisées en vitesse variable fonctionnent en mode autopiloté pour prévenir tout risque de décrochage. Pour assurer un fonctionnement à vitesse variable de la machine synchrone, il est nécessaire d'alimenter la machine à fréquence variable. L'alimentation à fréquence variable de la machine se fait à l'aide d'un convertisseur statique généralement continu-alternatif.

La source d'entrée peut être du type source de courant ou du type source de tension. En sortie du convertisseur, on contrôle l'amplitude des tensions statoriques ou l'amplitude des courants statoriques et la fréquence f_s est proportionnelle à la vitesse de rotation de la machine.

Pour une machine synchrone à pôles lisses, l'expression du couple électromagnétique déduite du modèle simplifié de la machine est:

$$C_{em} = 3p \left(\frac{\varphi_r}{L} \right) \left(\frac{V_s}{\omega_s} \right) \sin \delta \quad (\text{I.4})$$

L est inductance synchrone.

V_s est valeur efficace de la tension de phase, fournie par la source d'alimentation.

φ_r est le flux rotorique.

δ est l'angle interne entre la f.é.m. E et la tension statorique V_s .

Pour une machine alimentée en tension, les variables de contrôle du couple sont alors:

- l'angle de décalage interne δ ,
- la tension d'alimentation V_s ,
- la pulsation statorique ω_s .

I.3.2.3 La commande des moteurs à courant alternatif

Le but de cette partie n'est pas de donner des outils complets et précis sur l'utilisation des diverses commandes, mais plutôt de décrire quelques architectures du contrôle de la machine asynchrone et synchrone.

I.3.2.3.1. Commande du moteur asynchrone

Le problème de la complexité de ces machines et les demandes aux applications plus performantes ont ouvert la voie à plusieurs stratégies de commande qui répondent aux exigences industrielles. Il existe principalement trois types de commande pour ce type de machine sont: la commande scalaire, la commande vectorielle à flux orienté et la commande directe du couple [18].

1. Commande scalaire

C'est la première commande qui a été introduite dans l'industrie, elle a occupé une grande partie des applications industrielles à vitesses variables. Cette commande est basée sur le régime permanent de la machine pour calculer le couple et prévoir les points de fonctionnement. Pour découpler le couple et le flux, la commande sert à contrôler le couple par augmentation du glissement et le flux par le rapport tension/fréquence (constant). Mais, et à cause du manque d'informations sur le rapport U/f , ce type de commande a montré ses limites en matière de qualité de ses performances. Nonobstant ses inconvénients vis-à-vis de ses performances en régime dynamique, qui sont nettement moins bonnes, elle est très répandue pour sa simplicité et son coût réduit [18], [19].

2. Commande vectorielle à flux orienté

La commande par orientation du flux rotorique, aussi connue par la commande vectorielle, est l'évolution du contrôle scalaire tout en maintenant ses performances en régimes dynamique. Depuis son invention, elle a beaucoup évolué et présente actuellement des résultats très intéressants [19].

Pour un contrôle vectoriel, les paramètres de la machine doivent être connus assez précisément, la dynamique du contrôle devient de plus en plus efficace avec une bonne connaissance paramétrique. La méthode du flux orienté consiste à ramener la commande de la machine à induction à une commande linéaire similaire à celle d'une machine à courant continu à excitation séparée et de choisir un système d'axes (d, q), repère tournant biphasé orienté sur ϕ_r (flux rotorique) ou ϕ_s (flux statorique) et un type de commande permettent de découpler le couple et le flux, la décomposition du courant statorique en deux composantes, une productrice du champ magnétique rotorique et la deuxième génératrice du couple électromagnétique [20], [21], et la difficulté va résider justement dans ce fait, car il est difficile de distinguer le courant producteur de couple du courant producteur de flux, fortement couplés. Elle permet d'avoir une réponse plus rapide et une meilleure précision du contrôle du couple. Il existe deux méthodes de la commande vectorielle par orientation du flux rotorique:

- une commande vectorielle directe, qui nécessite une régulation du flux rotorique ainsi que sa connaissance de son module et de sa position, cette méthode nécessite l'utilisation du capteur placé dans l'entrefer de la machine, opération généralement délicate à réaliser, elle repose sur une commande de flux en boucle fermée [22].
- la commande vectorielle indirecte, on s'affranchit de la connaissance de ce flux en faisant quelque approximation, elle est caractérisée par une régulation du flux en boucle ouverte [23].

Cependant cette commande présente plusieurs inconvénients : elle est plus difficile à implémenter puisqu'elle requiert plus de puissance de calcul en temps réel. De plus, elle utilise beaucoup de capteurs, ce qui augmente le coût et complique la réalisation de la machine.

3. Commande directe DTC

La commande directe du couple (DTC) est relativement récente, elle a ouvert un nouvel horizon dans le domaine de la commande, en effet le principe de cette méthode est de contrôler le couple et le flux de la machine asynchrone alimenté par l'onduleur directement [24], cela est réalisé à travers des comparateurs à hystérésis qui comparent les valeurs de références avec celles estimées, puis commande directement l'onduleur afin de réduire les erreurs de couple et de flux dans les limites de la bande d'hystérésis [25]. Quand le flux est

hors la bande d'hystérésis, la fréquence de l'onduleur change et le flux prend un chemin optimal vers la valeur désirée, ceci est la cause du principal inconvénient de la DTC qui est l'ondulation que présente le couple, le flux, et le courant en régime permanent, ceux-ci sont reflétés sur l'estimation de la vitesse et sa réponse, et aussi se traduisant par des bruits acoustiques accrus. Elle a été inventée pour simplifier la commande vectorielle, l'algorithme qu'elle utilise dépend de moins de paramètres. Cette commande n'effectue pas de calcul de changement de repère, elle possède moins de correcteurs PI. La réponse est donc plus rapide que celle de la commande vectorielle à flux orienté.

I.3.2.3.2. Commande de moteur synchrone

En ce qui concerne le réglage des moteurs synchrones, les problèmes et leurs solutions sont en principe les mêmes que pour les moteurs asynchrones, la seule différence, c'est l'existence d'un enroulement d'excitation qui offre une entrée de réglage supplémentaire. Ce dernier permet d'agir sur le facteur de puissance en plus des possibilités d'action sur le flux et le couple [26].

I.4. Critères de choix du moteur de l'entraînement électrique

Le processus de conception des systèmes d'entraînement de machines électriques nécessite un choix stratégique des principaux éléments. Ce processus commence donc par le choix du moteur électrique car il est l'élément fondamental. Le choix du moteur détermine celui de la structure de convertisseur statique à associer. Le système de commande adéquat est ensuite choisi pour l'ensemble convertisseur-moteur pour que les exigences du cahier des charges soient satisfaites.

Les entraînements avec moteurs à courant continu ont atteint au cours des années une certaine standardisation. Par contre, les entraînements avec des moteurs à champ tournant sont encore en plein développement et on ne rencontre pas encore de standardisation [27].

Les moteurs les plus répandus sont les moteurs à courant continu, le succès de ces moteurs peut s'expliquer par leurs principaux atouts. Le moteur à courant continu à balais est simple à commander et minimise le coût du contrôleur associé, ce moteur permet aussi de générer un couple très régulier, cependant ce moteur est limité par l'utilisation d'un collecteur. Le moteur synchrone présente l'avantage d'un excellent rendement et facteur de

puissance, mais n'assure pas la même régularité de couple que son concurrent avec balais. Toutefois ce désavantage peut être compensé par un contrôleur complexe et donc coûteux. Le moteur asynchrone bénéficie d'une grande simplicité de construction, d'une grande robustesse et d'un faible coût de fabrication.

En se basant sur ce qu'on a vu dans la partie précédente, nous éliminons les moteurs synchrone et asynchrone à rotor bobiné de ce choix, car le premier s'utilise dans des applications de grandes puissances s'il est à rotor bobiné et dans les entraînements à hautes performances s'il est à aimants permanents, le deuxième qui peut être remplacé par le moteur à cage qui est plus économique pourvu qu'on lui choisit une bonne commande [12].

Le choix entre le moteur à courant continu et le moteur asynchrone à cage est une sélection délicate, car ces deux moteurs sont les plus utilisés dans les appareils de levage. Le choix d'un moteur à courant continu s'est donc imposé comme la meilleure solution pour le réglage de la vitesse et du couple mécanique. Donc on favorise pour cette application le moteur à courant continu [6] [34].

Pour bien satisfaire les exigences élevées des mécanismes entraînés, on devra tenir compte également des facteurs suivants [26]:

- Il est nécessaire de calculer la puissance de charge demandée par le mécanisme entraîné. Généralement, le moteur est choisi pour que sa puissance nominale soit un peu supérieure à la puissance de charge $P_{moteur} = [1.1 \div 1.3] P_{charge}$.
- Réseau de distribution électrique disponible.
- L'environnement et type d'application.
- La plage, type de vitesse nécessaire (variable ou constante) et le besoin de son réglage.
- Le rendement, le facteur de déplacement ($\cos\phi$) sont des critères clés dans le choix d'un moteur électrique, tant sur le plan de l'investissement que sur celui des coûts opérationnels.
- Dans les mécanismes caractérisés par des accélérations/ décélérations fréquentes une vérification du moteur aux critères d'échauffements et de surcharge s'impose, elle permet de s'assurer que la température du moteur, particulièrement celle des isolations, ne dépasse pas la valeur limite spécifiée par le fabricant.
- Le moteur est choisi pour que son service de fonctionnement se rapproche le plus à celui du mécanisme entraîné, ce qui permet une utilisation plus efficace du moteur.

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé en premier lieu, les appareils de levage les plus couramment utilisés. Ensuite, nous avons exhibé un aperçu général sur les entraînements électriques et les moteurs les plus utilisés ont été donnés ainsi que les différents types de commande appropriés, de même que les principes de ces dernières.

Concernant le choix du moteur pour notre mécanisme de levage, nous avons choisi un moteur à courant continu à excitation séparée, car il est idéal, son comportement est facile à observer et à commander.

Le chapitre suivant sera consacré à l'analyser les différentes topologies de convertisseur qui peuvent nous assurer la variation de la vitesse d'un moteur à courant continu à excitation séparée, ce dernier entraîne notre mécanisme de levage. De même que, nous allons choisir et dimensionner les paramètres des composants de puissance.

L'implantation de la commande appliquée sur un modèle de la machine à courant continu à excitation séparée qui entraîne notre mécanisme de levage. De même que, nous allons analyser les différentes topologies de convertisseur qui peuvent nous assurer la variation de la vitesse du moteur qu'il alimente.

Chapitre II

Variation de la vitesse d'un MCC

II.1 Introduction

Bien qu'elle soit la plus ancienne des machines tournantes industrielles, la machine à courant continu reste très utilisée, particulièrement, comme actionneur. Ceci tient au fait que son fonctionnement est d'une très grande simplicité, de même que sa modélisation, surtout que ses performances statiques et dynamiques sont exceptionnelles. En effet le couple est le produit vectoriel de deux grandeurs naturellement orthogonales (flux inducteur et courant induit) quasiment indépendantes et indépendantes de la vitesse et de la position du rotor. L'induit ou l'inducteur est des plus aisés et les convertisseurs statiques nécessaires, redresseurs ou hacheurs, sont également simples et facilement contrôlables. De toutes les associations machine-convertisseur-commande pour entraîner un mécanisme de levage, c'est l'ensemble le plus simple qui puisse exister avec les meilleures performances [27].

Dans cette section, on présentera les convertisseurs statiques utilisés pour alimenter le moteur à courant continu pour faire monter ou descendre notre charge. Ce sont plus précisément le convertisseur de courant bidirectionnel. Après avoir évoqué les stratégies de commande du moteur, on présentera aussi les circuits de réglage les plus utilisés. Le choix et la détermination des paramètres des éléments de puissance seront effectués, en plus la construction du diagramme de charge du moteur lors de la phase de montée et la phase de descente, nous avons obtenu les caractéristiques mécaniques du régime statique en boucle ouverte pour les différents modes de fonctionnement de notre moteur.

II.2 Convertisseurs pour moteurs à courant continu

Les convertisseurs statiques ont toujours été dotés d'une grande importance dans le domaine de génération et de conversion de l'énergie électrique, vu la nécessité d'interfaçage entre le réseau électrique et la majorité des applications domestiques et industrielles. Cet intérêt n'a cessé de croître avec l'apparition continue de nouveaux besoins du consommateur d'une part, et de nouvelles exigences des fournisseurs d'autre part.

Ils sont connectés à un réseau d'alimentation qui est dans la plupart des cas, un réseau triphasé. Parfois, il s'agit aussi d'une source de tension continue (accumulateur). Ils transforment la présentation de l'énergie électrique pour lui donner la forme désirée. En d'autres termes, ils contrôlent le transit de puissance nécessaire au moteur de façon à obtenir les performances dynamiques désirées [9].

Les ensembles convertisseurs-moteurs à courant continu sont caractérisés par un nombre relativement faible de montages de base et de procédés de régulation. La variation de vitesse dans le moteur à courant continu s'effectue, le plus souvent, par la variation de tension d'induit. Selon le type du réseau d'alimentation exigé par le cahier de charge, la réalisation des entraînements par moteur à courant continu fait appel aux convertisseurs suivants [9] [13]:

II.2.1 Convertisseur continu-continu

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques continu-continu permettant de concevoir une source de tension continue variable à partir d'une source de tension continue fixe. Ils sont utilisés, soit comme source de tension continue réglable, soit comme variateurs de vitesse pour moteur à courant continu.

Pour la commande des moteurs, on utilise surtout des hacheurs série ou des hacheurs à quatre quadrants. Les hacheurs sont utilisés pour la commande en vitesse ou en position des moteurs à courant continu à flux constant [27] [28].

La majorité des convertisseurs employés dans l'industrie sont de type alternatif-continu, les convertisseurs de type continu-continu n'ayant que des domaines d'application très restreints, en particulier la traction électrique et la commande des machines-outils [6].

II.2.2. Convertisseur alternatif-continu

Pour obtenir une tension continue variable appliquée aux bornes de l'induit, le plus simple est d'utiliser un redresseur [13]. Ils sont monophasés ou triphasés selon la puissance de la charge ou du moteur. Ils utilisent des diodes et des thyristors.

Cette solution avec pont redresseur commandé (pont mixte monophasé pour une structure un quadrant, pont complet monophasé ou triphasé pour une structure deux quadrants et deux ponts complets monophasés ou triphasés montés tête bêche pour une structure quatre quadrants) est de loin la solution la plus utilisée pour l'alimentation des moteurs à courant continu d'une puissance allant de quelques kilowatts à quelques Mégawatts. Les montages de redresseuses triphasées doubles alternances (en pont) présentent les meilleures performances du point de vue facteur de puissance et taux de distorsion harmonique. De plus, ils produisent la tension de sortie moyenne la plus élevée.

Le choix du convertisseur statique pour notre application (soulever ou descendre une charge) se fait à partir des données sur la puissance et courant nominal du moteur, la tension d'alimentation disponible, les exigences du point de vue performances dynamiques.

Les critères suivants sont pertinents au choix du convertisseur statique [29] [9]:

- La réversibilité: le besoin de freinage et d'inversion de sens du mouvement;
- Le taux d'harmoniques qu'il injecte au réseau et éventuellement à la charge qu'il alimente.
- Le facteur de puissance.

II.2.2.1. Le contenu harmonique

Tous les convertisseurs électroniques de puissance utilisés dans différents types de systèmes d'entraînements électriques provoquent des répercussions sur le réseau d'alimentation en injectant directement des courants harmoniques dans ce dernier, la distorsion harmonique est une forme de pollution susceptible de poser des problèmes. Afin de réduire l'injection d'harmoniques indésirables au réseau d'alimentation la présence d'un filtre de ligne est nécessaire [30].

II.2.2.2. Facteur de puissance

Normalement, pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active (P) et la puissance apparente (S). En présence des harmoniques, la puissance apparente (S) est composée de trois parties: active (P), réactive (Q) et une puissance supplémentaire appelée puissance déformante (D). La puissance réactive (Q) est associée au courant fondamental. La puissance déformante (D) est due aux harmoniques de courant. D'où l'expression du facteur de puissance $\cos \alpha$.

$$\cos \alpha = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (\text{II.1})$$

Il en découle que le facteur de puissance se trouve diminué par la présence des harmoniques.

II.2.2.3. La réversibilité en courant

Les machines sont naturellement réversibles. Pour bénéficier de cette propriété, il faut que le convertisseur soit également réversible. La réversibilité se définit comme étant l'habilité d'un convertisseur à inverser le sens de transmission de puissance en un temps qui soit le plus court possible, il permet à la machine qu'il alimente, de fonctionner aussi bien en moteur lors de la phase de montée qu'en génératrice lors la phase de descente et par conséquent dans les quatre quadrants du plan tension/courant de la figure II.1 [29][6].

Ils peuvent aussi fonctionner soit en redresseur, si l'énergie du réseau est absorbée et transformée en énergie mécanique dans le moteur, soit en onduleur si l'énergie est renvoyé au réseau.

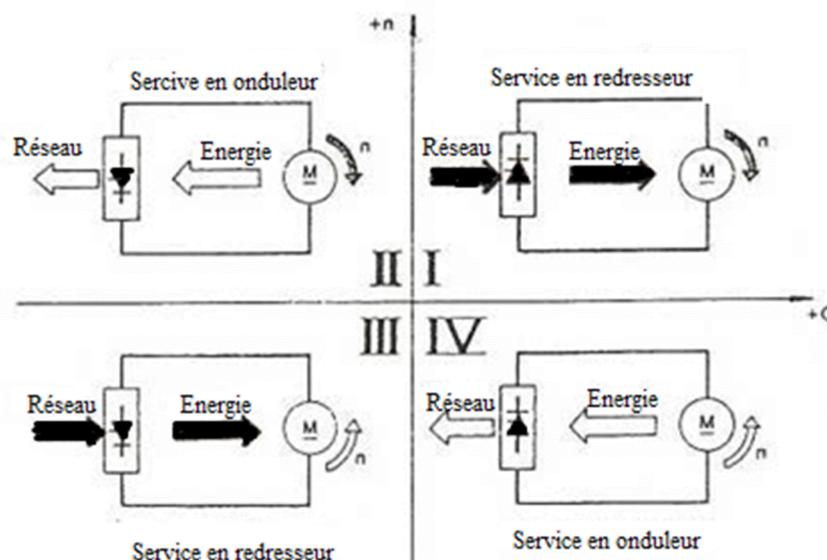


Figure II.1 Quadrants de fonctionnement d'un convertisseur réversible

II.3. Freinage des moteurs à courant continu

Dans de nombreuses applications (traction, levage ...), le problème du freinage est important. On préfère utiliser une solution électrique que de faire appel aux systèmes mécaniques. Plutôt que de dissiper l'énergie de freinage dans des résistances, l'énergie cinétique de la machine en freinage peut donc être réinjectée sous forme de puissance électrique dans la source d'alimentation (le réseau). Le freinage par récupération a l'avantage de ne pas dissiper l'énergie cinétique emmagasinée en chaleur (cas d'utilisation d'une

résistance extérieure en série). En outre, le couple électromagnétique de freinage peut être contrôlé avec précision ce qui permet d'obtenir le temps de freinage désiré [9].

Pour obtenir un freinage électrique avec récupération d'énergie des solutions est possible:

- inverser le branchement de l'induit lorsque la récupération est demandée, par un inverseur électromécanique, ou de type statique à semi-conducteurs. Les performances dynamiques de cette procédure sont peu satisfaisantes car elle entraîne une augmentation sensible du temps mort nécessaire à l'inversion du couple, comme le montre la figure II.2 [6] [29].

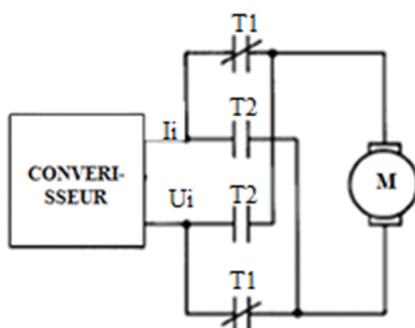


Fig II.2 Inverseur électromécanique

- Inversion du courant inducteur, on applique le même principe avec inverseur électromécanique sur l'inducteur, on peut également obtenir un fonctionnement dans les quatre quadrants du plan couple- vitesse avec un seul redresseur en inversant le flux après annulation du courant I_i dans l'induit. L'inversion du courant d'excitation est d'ordinaire obtenue par deux petits redresseurs montés tête bêche et alimentant l'enroulement inducteur dans un sens ou dans l'autre, cette solution simple et économique n'est utilisable que lorsqu'on accepte un temps mort d'inversion du couple assez élevé (0.5 seconde à quelques secondes) car, à cause de la constante de temps de l'inducteur, l'inversion de I_e ne peut être très rapide [13].

- Pour obtenir les performances élevées, il faut recourir à des convertisseurs réversibles, qui donnent accès aux quatre quadrants et qui permettent une inversion très rapide. Les montages permettant de réaliser cette condition sont nommés convertisseurs de courant bidirectionnels, donc on branche aux bornes du moteur deux convertisseurs du même type en montage antiparallèles (tête-bêche), l'association permet donc d'avoir une tension U_i positive ou négative et un courant I_i positif ou négatif, chaque pont assure le fonctionnement dans deux quadrants, donc de faire fonctionner la charge dans les quatre quadrants du plan $u_i(i_i)$.

On préfère travailler, pour maximiser les performances dynamiques avec un convertisseur sur l'induit [29] [6] [15].

II.4 Les structures des convertisseurs réversibles

Nous allons proposer ci-dessous des montages permettant à la fois la réversibilité en vitesse et en couple dans le cas du fonctionnement dans quatre quadrants [12].

La figure II.3 nous indique la structure de deux ponts complets à thyristors qui sont montés en tête-bêche aux bornes de l'induit.

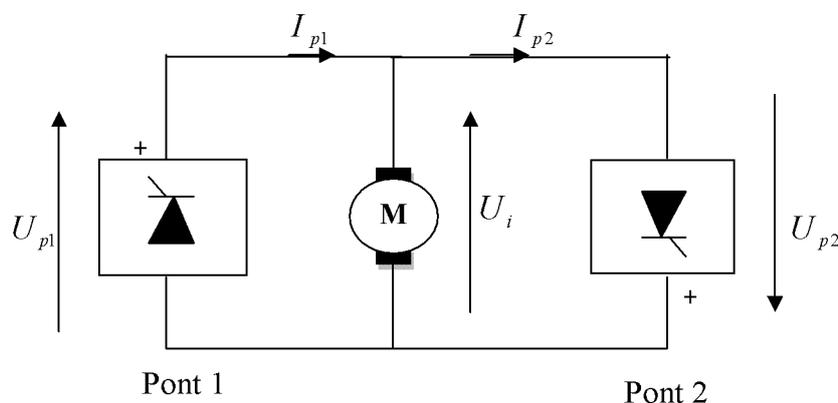


Fig. II.3. Montage de redresseur réversible

Lorsque le moteur (charge) fonctionne dans les quatre quadrants, il marche d'abord en moteur dans le sens direct (quadrant I) pendant un certain temps. Une condition extérieure lui impose à travailler en moteur en sens inverse (quadrant III) mais pour passer de (I) à (III), il fonctionne temporairement en génératrice (quadrant II). De même, pour revenir dans le quadrant (I), un fonctionnement momentané dans le quadrant (IV) s'impose.

La figure II.4 illustre le principe de fonctionnement d'un mécanisme de levage alimenté par un redresseur quatre quadrants.

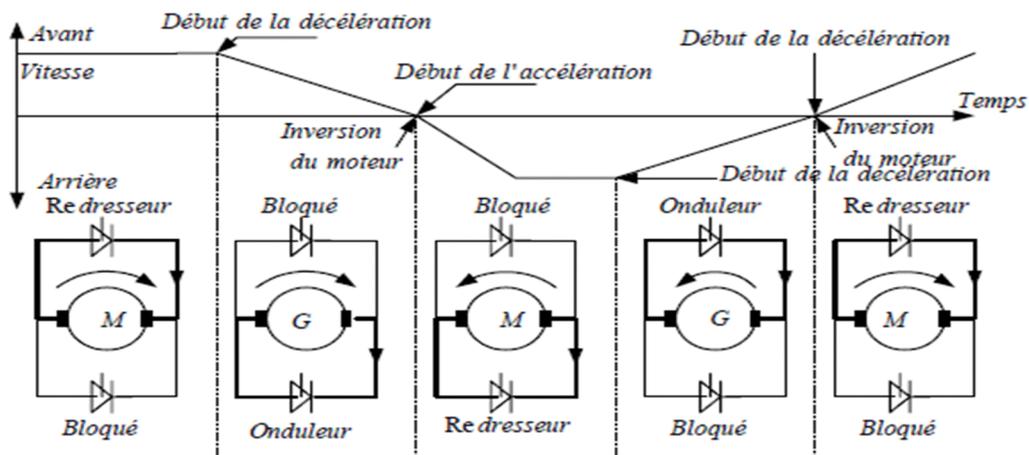


Figure II.4 Le principe de fonctionnement d'un redresseur réversible dans le cas d'un mécanisme de levage

La mise en œuvre des groupements en antiparallèle peut se faire de deux façons, ce qui conduit à deux stratégies de pilotage possibles pour l'ensemble des deux ponts [29] [31] [32]:

- Les deux ponts fonctionnent simultanément avec une régulation qui permet d'avoir sensiblement l'égalité des tensions moyennes. Pour éviter les courts-circuits évoqués par l'inégalité des tensions instantanées, on place les inductances entre eux pour limiter l'amplitude des courants, qui ne vont pas manquer de se développer, à des amplitudes suffisamment faibles pour ne pas trop surdimensionner en courant le système. La famille des montages correspondants est dite à courants de circulation.

- Seul le redresseur correspondant au sens du courant demandé est mis en état de débiter. Deux variantes de montages sans courant de circulation ont été développées, l'une dite à bande morte, la seconde à logique d'inversion.

II.4.1 Montages à circulation de courant

Il existe diverses possibilités de connexion de deux convertisseurs de courant qui permettent d'obtenir un courant continu réversible. Tous ces montages sont caractérisés par le fait qu'un courant peut circuler d'un convertisseur de courant à l'autre. Sans passer par la charge [12] [15].

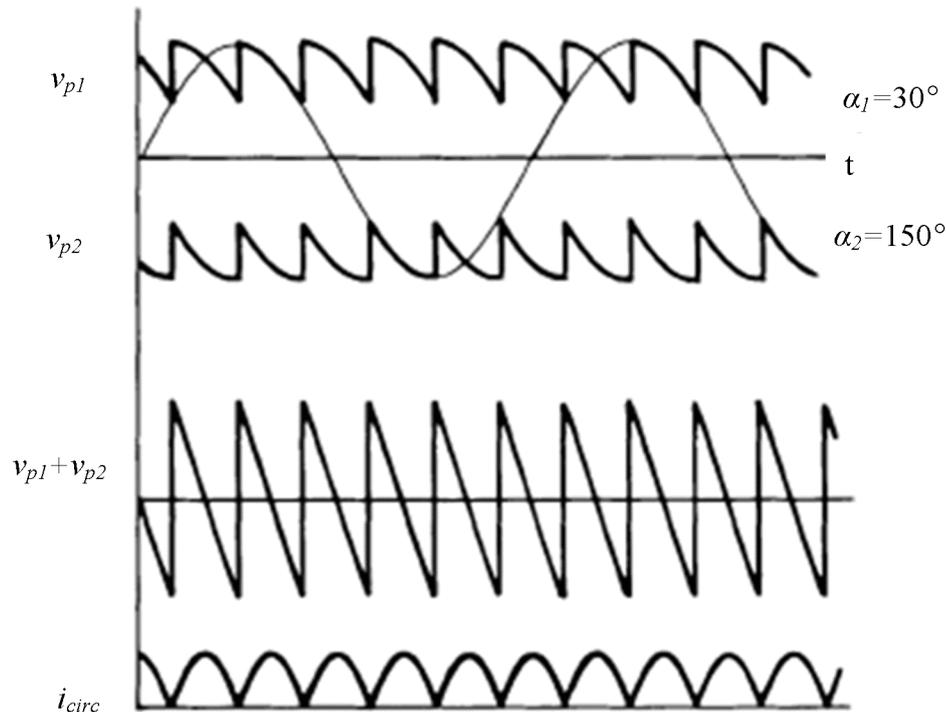


Figure. II.5 Tensions et courants dans un montage à circulation de courant

Dans ce cas on commande en permanence les redresseurs de deux ponts de façon qu'ils donnent toujours aux bornes du moteur des tensions redressées moyennes égales et opposées. Leurs commandes doivent être complémentaires.

Cependant, les valeurs instantanées des tensions v_{p1} , v_{p2} ne sont pas égales en raison des harmoniques, c'est cette tension instantanée qui provoque la circulation d'un courant de court circuit entre les deux ponts comme l'indique la figure II.5. On élimine ou on limite tout au moins ce courant de circulation en insérant des inductances de courant de circulation (inductance de limitation) dans la boucle à courant continu. Il y a deux montages possibles selon le nombre d'inductances utilisées [29] [12] [31]:

1. Le montage antiparallèle avec quatre (4) inductances, si les deux structures sont alimentées par la même source alternative,
2. Le montage croisé avec seulement deux (2) inductances, chacun des deux ponts est alimenté par son propre secondaire de transformateur.

Le courant de circulation passe alors dans les deux redresseurs passants de chaque pont, le réseau et les inductances L de limitations. D'ordinaire, on dimensionne les inductances pour que i_{circu} n'excède pas 10 à 20% de la valeur nominale de courant d'induit [31].

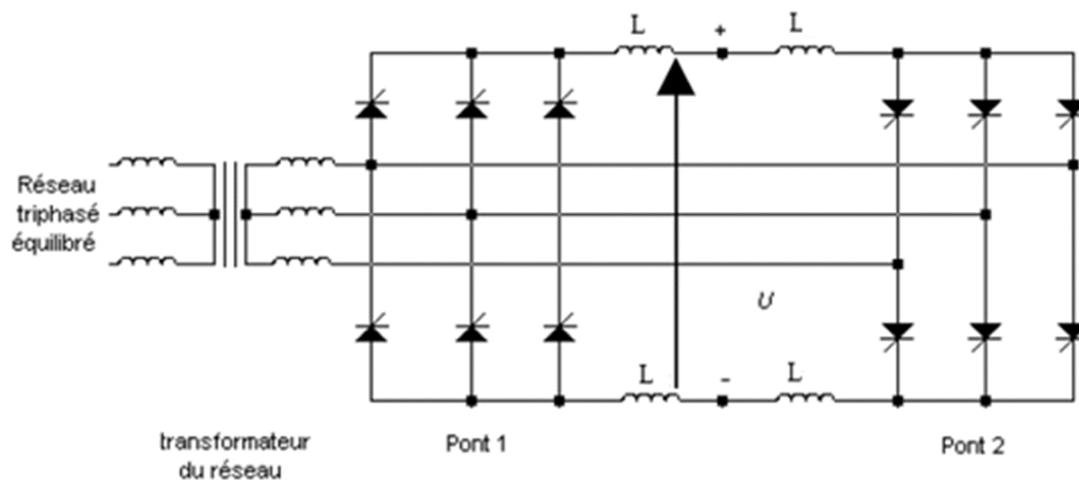


Fig II.6.a : redresseurs PD3 à thyristors montés en antiparallèle avec courant de circulation

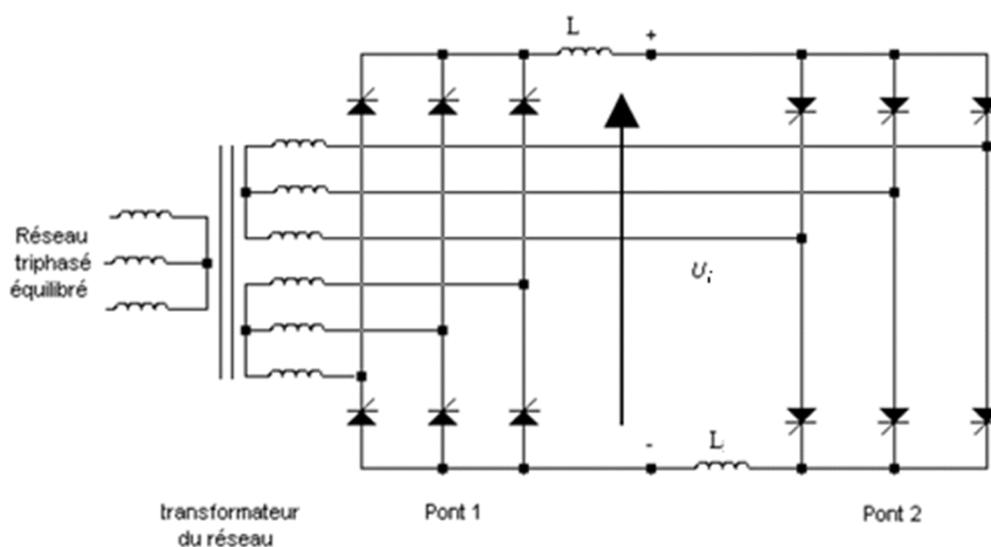


Figure II.6.b : redresseurs PD3 à thyristors montés en croisé avec courant de circulation

Les principaux avantages de ce montage sont les suivants:

- les deux montages sont toujours maintenus en conduction continue, à cause de la présence du courant de circulation;
- La réalisation du circuit de commande est simple;
- le passage du mode moteur au mode générateur et vice versa est instantané.

- Ils permettent avec une commande simple, d'inverser très rapidement le courant continu. dans les entraînements à vitesse variable avec moteur à courant continu, on peut obtenir aussi une inversion très rapide du couple [31].

Les inconvénients les plus remarquables de ce montage sont:

- L'angle de garde en fonctionnement onduleur empêche d'aller au-delà de 30° en redresseur.
- Si $\alpha_1 + \alpha_2 < 180^\circ$ (α_1 , α_2 sont respectivement les angles d'amorçages du pont 1 et pont2) il circule un fort courant continu entre les deux ponts, il faut donc prévoir une limitation de courant en ajoutant des inductances, ces dernières sont des composants lourds et encombrants rayonnant de plus des champs parasites. La présence des inductances augmente la puissance réactive consommée donc réduit le facteur de puissance, ainsi augmente le coût du montage [31].
- Les deux ponts sont surdimensionnés par rapport à la puissance du moteur, le courant de circulation vient s'ajouter au courant de charge dans les redresseurs et le réseau alternatif; il entraîne des pertes supplémentaires et contraint à une augmentation du courant nominal des enroulements du transformateur et des thyristors [31].

II.4.2 Montage sans courant de circulation

Dans la pratique, on préfère habituellement éviter la présence des inductances de filtrage et les inconvénients qui lui sont attachés en acceptant un très faible temps mort. A cet effet, on règle la logique de commande des gâchettes pour que tous les thyristors d'un groupe soient bloqués quand l'autre groupe fonctionne [15].

Pour interdire la circulation de ce courant en jouant sur la commande des redresseurs; il suffit pour cela que la tension $v_{p1} + v_{p2}$ crée un courant dans le sens bloquant des redresseurs; nous dirons alors que nous avons une structure sans circulation de courant. Les schémas utilisés sont les même que pour les montages avec courant de circulation, mais les inductances de limitation sont supprimées, d'après le principe utilisé, on distingue schématiquement [31]:

- Les montages dits à bande morte ou à zone morte;
- Les montages dits à logique d'inversion ou de basculement.

II.4.2.1 Montage avec bande morte

Pour supprimer le courant de circulation et s'affranchir de l'ajout d'inductance de fortes valeurs, on fait en sorte que la tension instantanée délivrée par l'ensemble moteur-onduleur soit toujours supérieure à celle délivrée par l'ensemble moteur- redresseur. Dans le montage dit à bande morte, on va utiliser le décalage des commandes pour que la tension $v_{p1}+v_{p2}$ soit toujours négative, pour cela, il suffit de commander les éléments redresseurs de l'un des ponts avec angle $\alpha=\pi$, elle tend alors à créer un courant de circulation dans le sens bloquant des thyristors; le courant de circulation est alors toujours nul [12].

Avantages et inconvénients du montage avec bande morte

– Avantages

- En annulant le courant de circulation par la commande, on n'a plus besoin d'inductances de limitation; on allège ainsi la structure et on améliore le facteur de puissance,
- On peut faire varier l'angle d'amorçage jusqu'à 0° en redresseur du pont conduisant tout le courant de charge, puisque le pont commandé à 180° n'est traversé par aucun courant donc ne risque pas d'avoir un défaut de commutation,
- La loi de commande est simple à réaliser.

– Inconvénient

- L'inconvénient le plus flagrant de ce montage est qu'à faible courant la condition est discontinue en conséquence la commande du convertisseur devient non précise à cause de non linéarité du système [9],
- La réversibilité en courant ne peut être instantanée en raison de la bande morte; en effet lorsqu'un thyristor conduit, la modification son angle de commande ne prend effet qu'à l'amorçage suivant; la durée d'inversion du courant est de l'ordre de 30 à 40 ms pour une structure monophasée et de 15 à 20 ms pour une structure triphasée.

II.4.2.2 Montage à logique d'inversion

Lorsqu'on demande au système des performances dynamiques très poussées, on doit réduire le temps mort apparaissant dans l'inversion du courant. On complique alors un peu la commande pour que, à chaque instant, les gâchettes des thyristors d'un seul redresseur

reçoivent des impulsions de blocage [31]. Pour s'affranchir du temps mort caractérisant le montage précédent, on peut envisager un montage utilisant des circuits logiques choisissant le pont à commander suivant le sens du couple et de la vitesse du moteur [12].

A chaque instant, les thyristors d'un seul pont reçoivent des impulsions. Le choix se fait à partir des informations de courant, de vitesse (si la charge est une machine à courant continu) et de la consigne.

Procédure à suivre pour inverser le sens du courant (passage du pont 1 au pont 2) [9] :

- Annulation du courant en fonctionnement pour le pont 1,
- Dès que le courant s'annule, on cesse d'envoyer des impulsions sur le pont 1 (il ne faut pas perdre le contrôle de l'onduleur),
- Temporisation après la dernière impulsion pour attendre le blocage effectif,
- Commande des thyristors du pont 2.

Un seul pont est actif à un moment donné, seule la bobine en série avec la charge est utile (plus économique que la solution avec circulation de courant). La figure II.7 illustre la technique de commande.

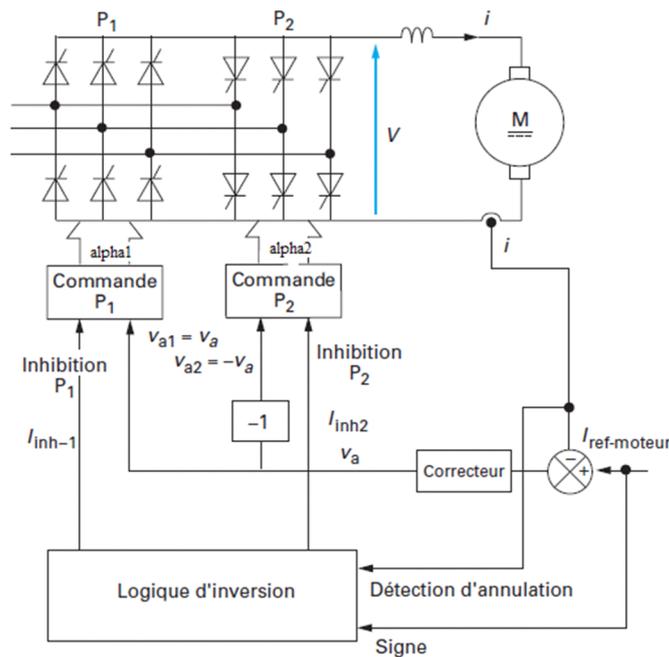


Figure II.7 Principe de la commande par logique d'inversion

En comparaison avec la commande à bande morte, la commande à logique d'inversion permet de diviser par deux le temps d'inversion du courant, la commande est plus complexe, et la principale difficulté est la détection du zéro de courant.

On emploie les montages avec circulation de courant uniquement lorsqu'il est nécessaire de supprimer complètement le temps mort lors de l'inversion du courant, et lorsqu'on désire avoir un système fiable et rapide, accompagné d'une grande précision [32] [31].

II.5. Le choix et la détermination des éléments de puissance

La figure II.8 illustre le schéma de puissance qui alimente notre mécanisme de levage.

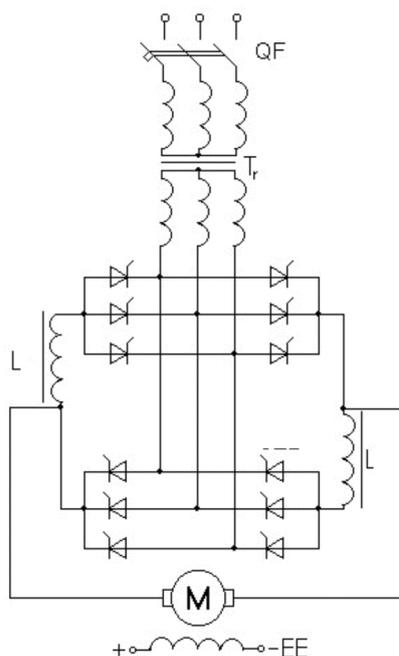


Figure II.8 Le schéma de puissance

II.5.1. Choix et dimensionnement des composants de puissance

II.5.1.1. Choix du transformateur

Le choix du transformateur de puissance est effectué sur les valeurs calculées des courants I_1 et I_2 , la tension U_2 et de puissance apparente S .

– Valeur estimée de la tension secondaire du transformateur U_2 est donnée par:

$$U_2 = k_u k_c k_a k_R U_d = 0.461 \cdot 1.1 \cdot 1.1 \cdot 1.05 \cdot 220 = 128.854 \text{ V} \quad (\text{II.2})$$

Où

$k_u = 0,461$: coefficient caractérisant le rapport de tension U_2 / U_{d0} réel redresseur.

U_{d0} : tension du convertisseur quand $\alpha=0$.

$k_c = 1,1$: facteur de sécurité qui tient compte de chute de la tension d'alimentation.

$k_\alpha = 1,1$: facteur de sécurité qui tient compte de l'ouverture partielle de la vanne au signal de commande maximale.

$k_R = 1,05$: coefficient de sécurité de tension, en tenant compte de la chute de tension dans les enroulements du transformateur, des soupapes et en raison du chevauchement des anodes.

$U_i = U_d = 220$ V: tension nominale du moteur ou bien la tension redressée.

– Valeur calculée du courant secondaire:

$$I_2 = k_I k_i I_d = 0,815 \cdot 1,1 \cdot 41,073 = 36,822 \text{ A} \quad (\text{II.3})$$

Où

$k_I = 0,815$: coefficient caractérisant le rapport courant I_2 / I_d dans le schéma idéal;

$k_i = 1,1$: coefficient tenant compte de l'écart des courants.

$I_d = I_i$: courant nominal du moteur

$$I_i = \frac{P_n}{\eta_m \cdot U_i} = \frac{7500}{0,83 \cdot 220} = 41,073 \text{ A} \quad (\text{II.4})$$

– Puissance apparente estimée du transformateur:

$$S = k_s k_\alpha k_i U_i I_i \cdot 10^{-3} = 1,065 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 220 \cdot 41,073 \cdot 10^{-3} = 11,644 \text{ KVA} \quad (\text{II.5})$$

Où

$k_s = 1,065$: coefficient, caractérisé par un rapport de puissance $S / U_d I_d$ pour une charge redresseur idéal en arrière par rapport à la fém.

Choix d'un transformateur de puissance qui répond aux conditions suivantes:

$S \geq 11,644$ KVA; $U_2 \geq 128,854$ V; $I_2 \geq 36,822$ A.

Sur la base des résultats obtenus, nous choisissons le transformateur TC-16. Ces paramètres sont: $S = 16$ KVA; $U_1 = 380 \pm 5\%$ V; $U_2 = 230-133$ V; $P_0 = 213$ W; $P_k = 529$ W; $U_k = 4,6\%$

Y/Y₀-Δ

– Rapport de transformation:

$$k' = 0,95 \frac{U_1}{U_2} = 0,95 \frac{380}{230} = 1,57 \quad (\text{II.6})$$

– Valeur estimée du courant primaire:

$$I_1 = \frac{I_2}{k'} = \frac{36,822}{1,57} = 23,45 \text{ A} \quad (\text{II.7})$$

II.5.1.2. Choix des thyristors

Les paramètres indiqués ci-dessous sont importants pour un interrupteur en semi-conducteur (thyristor) conçu pour les applications de conversion de puissance [6] [35].

– Courant moyen de Thyristor:

$$I_{imoy} = k_{zi} \frac{I_d}{k_{ox} m'} = 2,5 \frac{41,073}{0,35 \cdot 3} = 97,793 \text{ A} \quad (\text{II.8})$$

Où

$k_{zi} = 2,5$: facteur de sécurité de courant.

$k_{ox} = 0,35$: coefficient qui tient compte de l'intensité du refroidissement de la soupape d'alimentation.

$m' = 3$: nombre de phases du transformateur.

– Valeur maximale de la tension inverse:

$$U_{invmax} = k_{zn} k_{Uo} U_{d0} = 1,8 \cdot 1,065 \cdot 279,51 = 535,82 \text{ V} \quad (\text{II.9})$$

Où

$k_{zn} = 1,8$: tension de sécurité, en tenant compte de la possibilité d'augmenter la tension d'alimentation (y compris mode veille) et les émissions périodiques régulière de vannes de commutation.

$k_{Uo} = 1,065$: coefficient de tension inverse égale au rapport de la tension U_{invmax} / U_{d0} .

– U_{d0} : tension du convertisseur quand $\alpha = 0$

$$U_{d0} \approx k_c k_\alpha k_R U_d = 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,05 \cdot 220 = 279,51 \text{ V} \quad (\text{II.10})$$

A partir des résultats précédents, on a choisi des thyristors de type T151-100.

II.5.2.3. Choix de l'inductance du filtre de lissage

Sous l'influence d'une tension asymétrique, en contournant le circuit de charge, un courant de compensation peut s'écouler, ce qui engendre une perte dans les enroulements de transformateurs et des redresseurs, et peut conduire à une unité de déclenchement [15].

Le filtrage est naturellement crée par l'inductance du moteur, si elle est suffisante sinon par une inductance additionnelle. Tenir compte de la présence éventuelle d'une inductance de lissage connectée en série au moteur, nécessaire pour le bon fonctionnement de son alimentation, elle est dimensionnée de manière à assurer une ondulation négligeable du

courant dans l'induit. Pour que ce courant puisse être considéré continu et ne présente pas des discontinuités, cette inductance doit être de valeur élevée [9] [15] [29].

L'intérêt du lissage du courant de sortie d'un redresseur se résume essentiellement à trois points [33]:

- Diminuer les pertes dans la charge, au détriment de celle dans l'inductance de lissage.
- Garantir une transmittance indépendante de la charge, afin de simplifier le régulateur.
- Elle réduit aussi le courant de circulation.

Ce courant est appelé courant de circulation qui doit être limité par des inductances de limitation. Celle-ci est généralement calculée de telle manière que le courant moyen maximal de circulation soit de l'ordre de [10÷20%] du courant nominal du moteur. Ce qui suppose des inductances relativement importantes et coûteuses.

$$L \geq \frac{\sqrt{2}U_n^1}{m\omega_c \cdot 0.05I_i} \quad (\text{II.11})$$

Où

U_n^1 égale deux fois la valeur efficace de la première harmonique de la tension redressée:

$$U_n^1 = \frac{U_n}{U_{d0}} U_{d0} \cdot 2 = 0.26 \cdot 220 \cdot 2 = 114.4 \text{ V} \quad (\text{II.12})$$

Où

$U_n / U_{d0} = 0,26$ déterminée par un modèle pour $m = 6$ et $\alpha = 90^\circ$.

$m = 6$: nombre de phases de redresseur.

$$L \geq \frac{\sqrt{2} \cdot 114.4}{6 \cdot 314 \cdot 0.05 \cdot 41.073} = 0.042 \text{ mH}$$

L'inductance de circulation choisit est une inductance avec un noyau partiellement saturé de valeur: $L_{circu}=0,7L=0,029 \text{ mH}$

L'inductance de courant de circulation choisit est de type Φ POC-150. $L_{circu}=0,03 \text{ mH}$.

II.6. Calcul des diagrammes de charge et choix du moteur

La figure II.10 expose le schéma simplifié de l'entraînement électrique du mécanisme de levage.

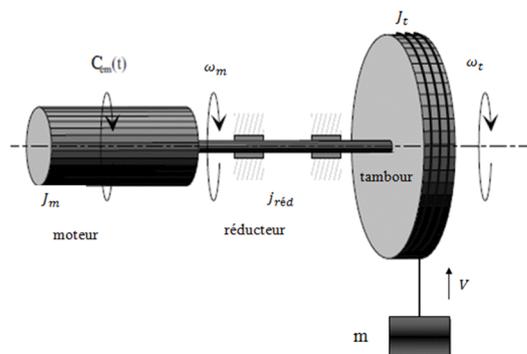


Figure. II.10 Schéma du mécanisme de levage (charge)

Données sur la charge et le mécanisme de levage:

- capacité de levage:3000kg
- Diamètre du tambour : 490 mm
- Facteur de transmission du réducteur : 85
- Rendement de transmission : 80%
- Vitesse à la montée : 25 m/min
- Hauteur de montée : 12m
- Masse du dispositif de pinçage : 25kg
- Facteur d'utilisation du mécanisme : 15%

II.6.1 Calcul de couple résistant appliqué à la montée et à la descente

- **Couples résistants à la montée et à la descente**

$$\text{A la montée : } C_{rm} = \frac{(m_l + m_p) \cdot g \cdot R_t}{\eta \cdot j_r} = \frac{(3000 + 25) \cdot 9.81 \cdot 0.245}{0.8 \cdot 85} = 106.918 \text{ N.m} \quad (\text{II.13})$$

$$\text{A la descente : } C_{rd} = \frac{(m_l + m_p) \cdot g \cdot R_t \cdot \eta}{j_r} = \frac{(3000 + 25) \cdot 9.81 \cdot 0.245 \cdot 0.8}{85} = 68.428 \text{ N.m} \quad (\text{II.14})$$

– Temps de cycle

$$t_c = t_{mont} + t_{desc} + 2t_{pause} = t_{fonct} + t_{pause} \quad (\text{II.15})$$

Avec:

t_{mont} : temps de montée.

t_{desc} : temps de descente.

t_{pause} : temps de pause.

t_{fonct} : temps de fonctionnement

On considère: $t_{mont} = t_{desc} = \frac{h}{v} = \frac{12}{(25/60)} = 28.777 \text{ s}$

$$t_{fonct} = t_{mont} + t_{desc} = 2 \times 28.777 = 57.554 \text{ s}$$

– Facteur d'utilisation du mécanisme (Fu)

$$Fu = \frac{t_{fonc}}{t_c} \Rightarrow t_c = \frac{t_{fonct}}{Fu} = \frac{57.554}{0.15} = 383.693 \text{ s} \quad (\text{II.16})$$

– Temps de pause

$$t_{pause} = 0.5(t_c - t_{fonct}) = 0.5(383.693 - 57.554) = 163.07 \text{ s} \quad (\text{II.17})$$

La figure II.11 montre la variation du couple résistant appliqué au moteur.

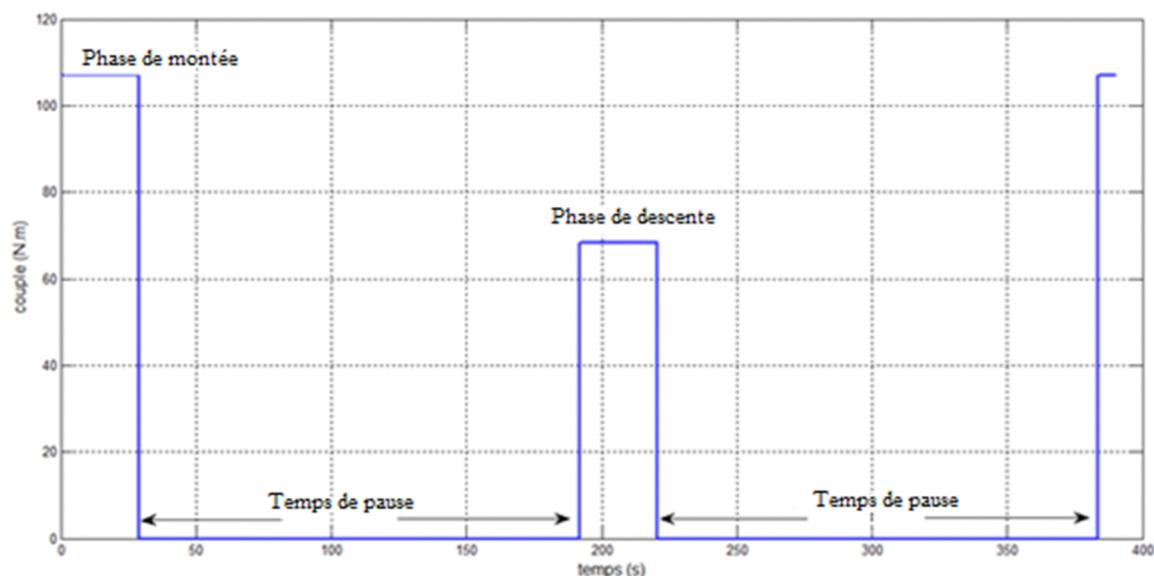


Figure II.11 La variation du couple résistant appliqué au moteur en fonction du temps.

Le moteur est choisi à partir du service de fonctionnement S1, ce dernier fonctionne à charge nominale constante d'une durée suffisante pour que l'équilibre thermique soit atteint.

– **Couple équivalent pour un cycle de fonctionnement**

$$C_{\text{équi}} = \sqrt{\frac{C_{rm}^2 \cdot t_{\text{mont}} + C_{rd}^2 \cdot t_{\text{desc}}}{t_c}} = \sqrt{\frac{106,918^2 \cdot 28,777 + 68,428^2 \cdot 28,777}{383,693}} = 34,764 \text{ N.m} \quad (\text{II.18})$$

La vitesse angulaire du moteur qui correspond à $v = 25 \text{ m/min}$:

$$\omega_m = \frac{v \cdot j_t}{R_t} = \frac{0,417 \cdot 85}{0,245} = 144,673 \text{ rad/s} \quad (\text{II.19})$$

– **Puissance équivalente du moteur**

$$P_{\text{équi}} = C_{\text{équi}} \cdot \omega_m \cdot k_3 = 34,764 \cdot 144,673 \cdot 1,3 = 6,538 \text{ Kw} \quad (\text{II.20})$$

$k_3 = 1,3$: coefficient considérant la différence entre les diagrammes de charges du mécanisme et du moteur.

Sur la base des résultats obtenus, on choisit le moteur suivant: moteur à courant continu à excitation séparée, type **2P+160MYXL4**, ayant pour paramètres techniques suivants:

- Puissance nominale du moteur: $P_n = 7,5 \text{ kW}$.
- la tension nominale d'induit: $U_i = 220 \text{ V}$.
- la vitesse de rotation nominale: $n = 1500 \text{ trs/min}$.
- la vitesse de rotation maximale : $n_{max} = 4200 \text{ trs/min}$.
- le rendement du moteur: $\eta_m = 83\%$.
- la résistance d'induit : $R_i = 0,145 \Omega$.
- la résistance auxiliaire : $R_{aux} = 0,101 \Omega$.
- la résistance de circuit d'excitation: $R_e = 53,1 \Omega$.
- l'inductance de circuit d'induit: $L_i = 4 \text{ mH}$.
- Le moment d'inertie du moteur : $J_{mot} = 0,083 \text{ kg.m}^2$.
- classe isolation – B.

II.6.2 Construction de diagramme de charge du moteur, en respectant ces limites de l'échauffement et de surcharge admissible

– Moment d'inertie total

$$J_T = 1.2J_m + J_M \quad (\text{II.21})$$

– Moment d'inertie du mécanisme

$$J_M = m\rho^2 = (m_l + m_p)R_t^2 / j_r^2 = (3000 + 25)0.245^2 / 85^2 = 0.025 \text{ Kg.m}^2 \quad (\text{II.22})$$

$$J_T = 1.2 \cdot 0.083 + 0.025 = 0.1246 \text{ Kg.m}^2$$

– Couple dynamique

$$C_{dyn} = 2,5C_n - C_{rm} = 2,5 \cdot 47,747 - 106,918 = 12,448 \text{ N.m} \quad (\text{II.23})$$

– Couple nominal du moteur C_n

$$C_{nom} = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{P_n \cdot 30}{\pi \cdot n_n} = \frac{7500 \cdot 30}{3,14 \cdot 1500} = 47,747 \text{ N.m} \quad (\text{II.24})$$

– Accélération angulaire

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{M_{dyn}}{J_\Sigma} = \frac{12.448}{0.1246} = 99.906 \text{ m/s}^2 \quad (\text{II.25})$$

- Temps de fonctionnement de l'entraînement électrique, en prenant en considération le temps d'accélération et décélération

$$t_1 = \frac{\omega_m}{\varepsilon} = \frac{144,673}{99,906} = 1,448 \text{ s} \quad (\text{II.26})$$

- Hauteur à laquelle la charge est soulevée à l'accélération

$$S_1 = \frac{V_{final} - V_{init}}{2} \cdot t_1 = \frac{0,417 - 0}{2} \cdot 1,448 = 0,302 \text{ m} \quad (\text{II.27})$$

- Distance parcourue par la charge sans accélération

$$h_1 = h - 2S_1 = 12 - 2 \cdot 0,302 = 11,396 \text{ m} \quad (\text{II.28})$$

- Temps de fonctionnement sans accélération

$$t_{ee} = \frac{h_1}{v} = \frac{11,396}{0,417} = 27,329 \text{ s} \quad (\text{II.29})$$

- Temps de cycle en tenant compte de l'accélération

$$t_c = 2(2t_1 + t_{ee} + t_{pause}) = 2(2 \cdot 1,448 + 27,329 + 163,07) = 386,59 \text{ s} \quad (\text{II.30})$$

A partir des données de vitesse, de couple résistant et de moment d'inertie du mécanisme entraîné, le graphe de la variation du couple en fonction du temps est représenté dans la figure II.12.

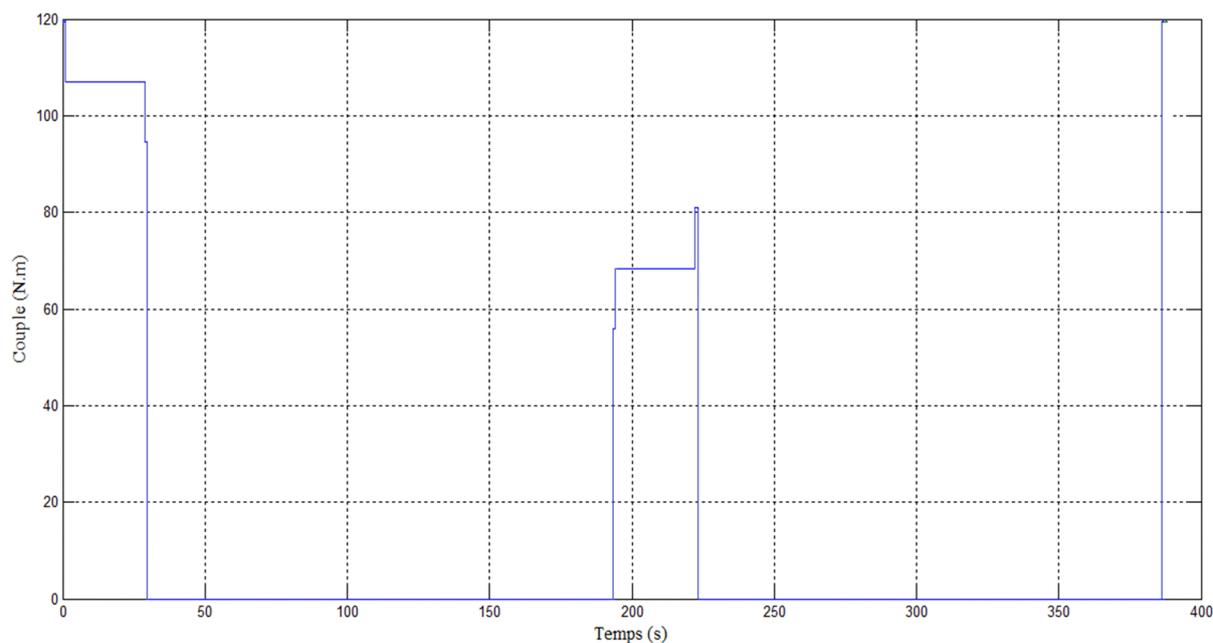


Figure II.12 Le diagramme de charge de l'entraînement électrique

A l'aide du diagramme de charge, on détermine de nouveau le couple équivalent $C_{\text{équi}}$

$$C_{\text{équi}} = \sqrt{\frac{(C_{rm} + C_{\text{dyn}})^2 \cdot t_1 + C_{rm}^2 \cdot t_{ee} + (C_{rd} - C_{\text{dyn}})^2 \cdot t_1 + (C_{rd} + C_{\text{dyn}})^2 \cdot t_1 + C_{rd}^2 \cdot t_{ee} + (C_{rd} - C_{\text{dyn}})^2 \cdot t_1}{t_c}} \quad (\text{II.31})$$

$$C_{\text{équi}} = \sqrt{\frac{119,37^2 \cdot 1,45 + 106,92^2 \cdot 27,39 + 94,47^2 \cdot 1,45 + 55,98^2 \cdot 1,45 + 68,43^2 \cdot 27,39 + 80,88^2 \cdot 1,45}{386,59}} = 35,53 \text{ Nm}$$

$$C_{\text{équi}} = 35,53 \text{ Nm} < C_n = 47,747 \text{ Nm}, C_{\text{max}} = 2,5 C_n = 119,37 \text{ Nm}$$

Le moteur sélectionné satisfait aux conditions de capacité thermique et de surcharge.

II.6.3 Caractéristiques mécaniques en régime statique en boucle ouverte

Nous pouvons construire les caractéristiques mécaniques en régime statique de notre mécanisme de levage en boucle ouverte en utilisant les expressions suivantes:

$$\begin{cases} \omega_m = \frac{U_i}{K} - \frac{R_p}{K^2} C_r \\ \omega_n = \frac{U_i}{K} - \frac{I_{nc} R_{\text{équi}}}{K} \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

II.6.3 Calcul et détermination des différents éléments du circuit de puissance

– **Calcul de l'inductance de lissage:**

$$L_{\text{lissage}} \geq \frac{\sqrt{2} U_n}{m \omega_c 0,05 I_d} = \frac{\sqrt{2} \cdot 72,673}{6 \cdot 314 \cdot 0,05 \cdot 41,073} = 0,027 \text{ mH}$$

Où

$$U_n = U_n^1 / 2 = 72,673 \text{ V} \text{ valeur du premier harmonique de la tension redressée.}$$

- **Résistance équivalente du circuit de puissance**
- **Résistance équivalente en tenant compte du courant redressé**

$$R_p = k(R_i + R_{\text{aux}}) + R_{bc} + R_c \quad (\text{II.34})$$

$$k = 1 + \alpha'(t_n - t_\alpha) = 1 + 0,004(100 - 15) = 1,34$$

k : coefficient relie la classe d'isolation avec la température.

$\alpha' = 0,004$: coefficient de résistance du cuivre à la température

$t_n = 100^\circ$: température de fonctionnement du moteur pour la classe d'isolation B

$t_\alpha = 15^\circ$: température ambiante

R_{bc} - résistance contact balai

$$R_{bc} = 2 / I_d = 2 / 41,073 = 0,049 \Omega$$

– **Résistance du convertisseur**

$$R_c = 2R_m + R_{ud} + \frac{x_m m}{2\pi} \quad (\text{II.35})$$

Où

R_m : résistance des enroulements du transformateur:

$$R_m = \frac{\Delta P_\kappa}{m' I_1^2 k'^2} = \frac{529}{3 \cdot 550,07 \cdot 2,46} = 0,130 \, \Omega$$

x_m : réactance inductive des enroulements du transformateur:

$$x_m = \frac{u_k \% \cdot U_{1\phi}}{100 \cdot I_1 \cdot k^2} = \frac{4,6 \cdot 220}{100 \cdot 23,45 \cdot 2,46} = 0,175 \, \Omega$$

– **Résistance active de mise à niveau R_{ud}**

$$R_{ud} = R_m / m' = 0,130 / 3 = 0,043 \, \Omega$$

Ainsi:

$$R_c = 2 \cdot 0,130 + 0,043 + \frac{0,175 \cdot 6}{2\pi} = 0,470 \, \Omega$$

$$R_p = 1,34 \cdot (0,145 + 0,101) + 0,049 + 0,470 = 0,878 \, \Omega$$

– **Résistance équivalente du circuit d'induit en tenant compte de l'échauffement**

$$R_{\text{équi}} = k(R_i + R_{\text{aux}}) + R_{bc} = 1,34(0,145 + 0,101) + 0,049 = 0,408 \, \Omega \quad (\text{II.36})$$

– **Courant d'excitation**

$$I_e = \frac{U_e}{R_e} = \frac{220}{53,1} = 4,14 \, \text{A} \quad (\text{II.37})$$

– **Courant nominale du contour**

$$I_{nc} = I_i - I_e = 41,073 - 4,14 = 36,93 \, \text{A} \quad (\text{II.38})$$

D'après les équations des caractéristiques statiques (II.32), on peut déterminer la constante du moteur :

$$K = \frac{U_i - I_{nc} R_{\text{équi}}}{\omega_n} = \frac{220 - 36,93 \cdot 0,408}{\pi \cdot 1500 / 30} = 1,305 \quad (\text{II.39})$$

– **Tension redressé à la montée de la charge**

$$U_{\text{montée}} = \omega_m K + \frac{R_p}{K} C_{rm} = 144,67 \cdot 1,305 + \frac{0,878}{1,305} 106,918 = 260,728 \, \text{V} \quad (\text{II.40})$$

– **Tension redressée à la descente de la charge**

$$U_{descente} = -\omega_m K + \frac{R_p}{K} C_{rd} = -144,67 \cdot 1,305 + \frac{0,878}{1,305} 68,428 = -142,756 \text{ V} \quad (\text{II.41})$$

– **Equation des caractéristiques mécaniques statiques à la montée**

$$\omega = \frac{U_{montée}}{K} - \frac{R_p}{(K)^2} C = \frac{260,728}{1,305} - \frac{0,878}{(1,305)^2} C$$

$$\omega = 199,792 - 0,516 C \quad (\text{II.42})$$

– **Equation des caractéristiques mécaniques statiques à la descente**

$$\omega = \frac{U_{descente}}{K} - \frac{R_p}{(K)^2} C = \frac{-142,756}{1,305} - \frac{0,878}{(1,305)^2} C$$

$$\omega = -109,392 - 0,516 C \quad (\text{II.43})$$

– **Equation des caractéristiques statiques à tension redressée maximale**

La tension redressée maximale à $\alpha = 0$: $U_{n.\max} \approx U_{d0} = 279,51 \text{ V}$

$$\omega = \frac{U_{n.\max}}{K} - \frac{R_p}{(K)^2} C = \frac{279,51}{1,305} - \frac{0,878}{(1,305)^2} C$$

$$\omega = 214,184 - 0,516 C \quad (\text{II.44})$$

– **Caractéristique statique à $U_i = 0 \text{ V}$**

$$\omega = -\frac{R_p}{(K)^2} C = -\frac{0,878}{(1,305)^2} C$$

$$\omega = -0,516 C \quad (\text{II.45})$$

– **Caractéristique naturelle en régime statique**

$$\omega = \frac{U_i}{K} - \frac{R_{\text{équi}}}{(K)^2} C = \frac{220}{1,305} - \frac{0,408}{(1,305)^2} C$$

$$\omega = 168,582 - 0,24 C \quad (\text{II.46})$$

Des expressions (II.42), (II.43), (II.44), (II.45), (II.45), (II.46), nous pouvons tracer les caractéristiques mécaniques en régime statique en boucle ouverte.

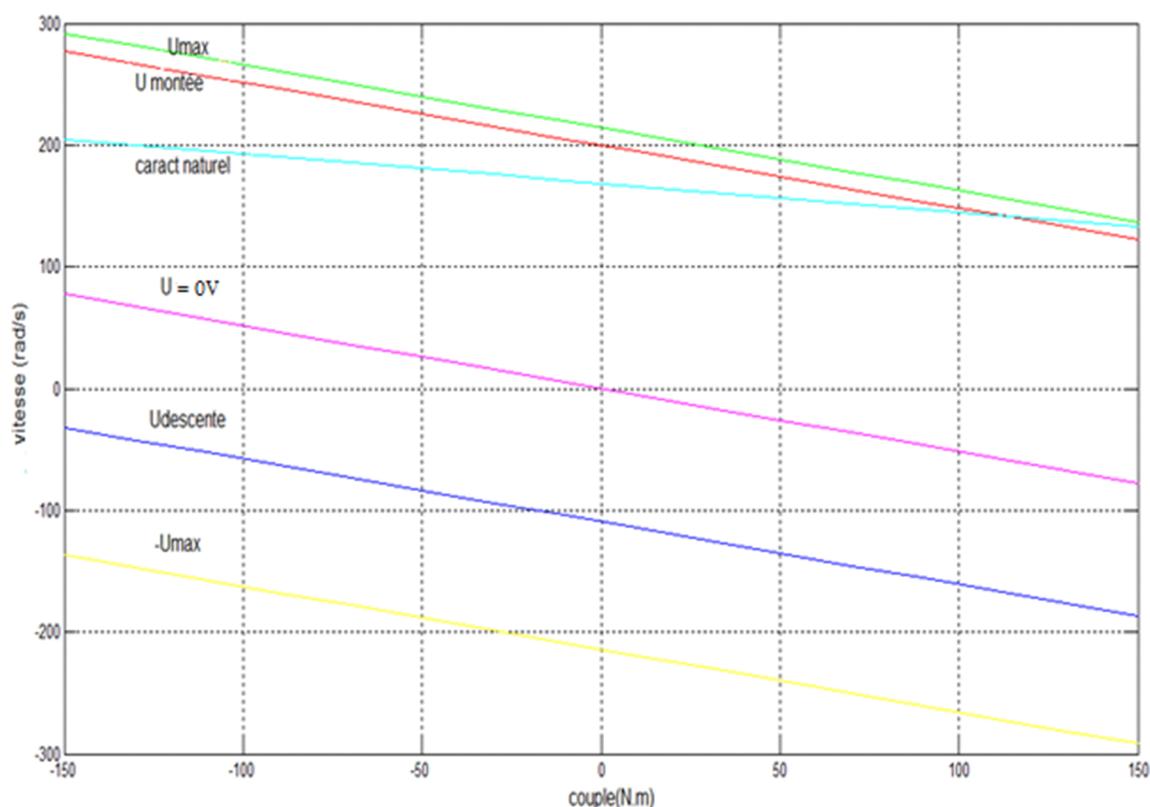


Figure II.13. Caractéristiques mécaniques du régime statique en boucle ouverte.

Les caractéristiques sont donc des droites paramétrées par la tension d'alimentation d'induit jusqu'à la tension d'alimentation maximale. Il est toutefois possible d'envisager une vitesse plus élevée en défluxant la machine (diminution du courant inducteur), si la caractéristique de la charge entraînée le permet: En effet le couple maximal disponible diminue d'autant. La connaissance de ces caractéristiques est essentielle car elles contiennent les paramètres électriques sur lesquels nous pouvons agir pour changer le couple et donc changer la vitesse. L'action sur la tension d'induit du MCC permet de translater la caractéristique mécanique et a donc pour effet de modifier la vitesse de rotation stabilisée du moteur et de sa charge. Le point de fonctionnement correspond à l'égalité entre le couple moteur C_m et le couple résistant C_r , ce qui est équivalent à dire que la vitesse de rotation est stabilisée.

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons analysé les différentes topologies de convertisseurs de puissance bidirectionnelle proposée pour résoudre le problème de réversibilité pour assurer une rotation dans les deux sens lors de la phase de montée et la descente de notre charge. Egalement, nous avons effectué une brève étude sur le fonctionnement du pont pour pouvoir dimensionner les éléments de circuit de puissance pour construire le diagramme de charge du moteur lors de variation linéaire de la f.é.m en montée et en descente de la charge, selon le diagramme de charge du moteur, nous avons sélectionné le moteur et vérifié selon les termes de l'échauffement et de surcharge son efficacité. Par la suite, nous avons déterminé les caractéristiques mécaniques du régime statique en boucle ouverte.

Dans le prochain chapitre, une modélisation des différents éléments constituant le mécanisme de l'entraînement électrique est effectué, ainsi que, les caractéristiques statiques et dynamiques du système en boucle fermée seront élaborées. A la fin, nous allons élaborer le schéma de commande de notre mécanisme de levage, nous allons déterminer les régimes transitoires lors de la montée et de la descente de la charge.

Chapitre III

**Elaboration du système de commande et
modélisation des processus dynamiques**

III.1 Introduction

La modélisation de la machine électrique est une phase primordiale de son développement, les progrès de l'informatique et du génie des logiciels permettent de réaliser des modélisations performantes et d'envisager l'optimisation des machines électriques. Ainsi la modélisation permet de guider les développements par une quantification des phénomènes. En outre, elle est d'un apport précieux en permettant d'une part de restituer une image de ce que l'on peut observer expérimentalement et d'autre part de prévoir des comportements de la machine plus variés que ceux de l'observation expérimentale.

C'est facile à faire pour le moteur à courant continu, à cause du découplage naturel de ses paramètres de cette machine, et aussi à cause de la linéarité des équations régissant le fonctionnement de ces machines. Pour obtenir le modèle d'un système, trois tâches doivent être accomplies: choisir le modèle mathématique du système à commander, qui est dans ce cas l'ensemble convertisseur, machine et charge, déterminer ses paramètres et enfin vérifier sa validité.

Dans ce chapitre, nous présentons dans un premier temps les éléments constituant notre mécanisme de levage. Nous décrivons les différents types d'équations régissant le moteur que nous avons choisi auparavant pour entraîner notre charge. Par la suite, nous exposons le redresseur et sa modélisation. Ensuite, nous présentons la structure du système de réglage pour une boucle en cascade pour commander notre mécanisme en vitesse et courant. Nous déterminons les caractéristiques mécaniques en boucles fermées. Nous élaborons le schéma de commande, à la fin nous modélisons les processus dynamiques pour obtenir les résultats de simulation des régimes transitoires lors de la montée et la descente de la charge.

III.2 Modélisation des différents éléments de la chaîne de conversion

III.2.1. Modélisation de la machine à courant continu

L'étude du comportement dynamique des machines à courant continu est basée sur les hypothèses simplificatrices suivantes [6] :

- la saturation du circuit magnétique n'est pas prise en considération,
- les pertes fer sont négligées,
- tous les enroulements sont représentés par une résistance et une inductance équivalentes en série, indépendantes de la température,

La machine à courant continu peut être modélisée par le biais d'équations

électrique, électromécanique et mécanique. Ces trois groupes d'équations nous permettront de mieux appréhender la machine à courant continu dans son fonctionnement réel.

III.2.1.1 Equations de la machine à courant continu

Le schéma équivalent d'une machine à courant continu est représenté sur la figure III.1 suivante :

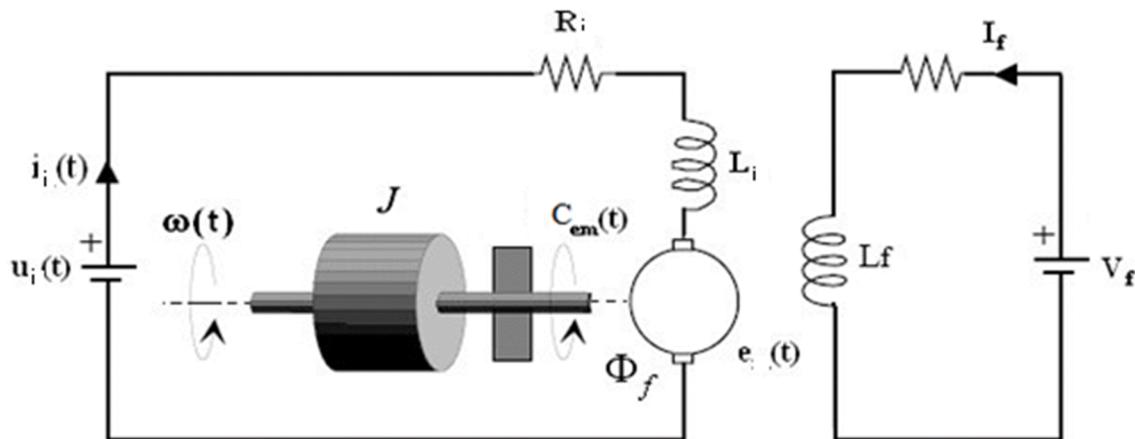


Figure. III.1 : Schéma équivalent de l'induit et l'inducteur d'un moteur à courant continu

Selon le schéma de la figure III.1, le moteur électrique est régi par les équations physiques découlant de ses caractéristiques électriques, mécaniques et magnétiques.

1. Equations électriques

Prenant en compte la résistance R_i et l'inductance L_i du circuit d'induit, du collecteur, des balais et des connexions, et en les supposant toutes deux constantes (pas de variation due à l'échauffement ni à la saturation magnétique), l'équation de tension induite s'écrit :

$$U_i(t) = R_p i_i(t) + L_{\text{equi}} \frac{di_i(t)}{dt} + e(t) \quad (\text{III.1})$$

$U_i(t)$: la tension aux bornes de l'induit,

$I_i(t)$: le courant traversant le circuit d'induit,

$e(t)$: la force électromotrice induite.

2. Equations électromécaniques

La tension induite $e(t)$ est proportionnelle à la vitesse angulaire $\omega(t)$ et au flux inducteur $\phi_f(t)$:

$$e(t) = k_e \phi_f(t) \omega(t) \quad (\text{III.2})$$

On a :

k_e : constante de construction du moteur côté enroulement d'induit,

$\omega(t)$: la vitesse angulaire du rotor du moteur.

$\phi_f(t)$: le flux magnétique d'excitation

3. Equation mécanique

Pour étudier les phénomènes transitoires électromécaniques avec une vitesse rotorique variable (démarrage, freinage, ect...), il faut ajouter l'équation de mouvement au système. D'après le principe fondamental de la dynamique on a :

$$J_T \frac{d\omega}{dt} = C_{em}(t) - f\omega(t) - C_r(t) \quad (\text{III.3})$$

Où

J_T : inertie totale entraînée (moteur J_m et charge J_{ch})

f : coefficient de frottement visqueux

$C_r(t)$: couple résistant

Le couple électromagnétique $C_{em}(t)$ développé a pour expression:

$$C_{em}(t) = k_m \phi_f(t) i_i(t) \quad (\text{III.4})$$

k_m : constante de construction du moteur.

En règle générale les coefficients k_e et k_m sont si proches qu'il est raisonnable de les considérer égaux, négligeant alors les pertes durant la conversion électromécanique de puissance. On pose $k_m \phi_f(t) = k_e \phi_f(t) = K$

III.2.1.2. Fonction de transfert du moteur

La première étape de l'étude d'un asservissement consiste à développer les fonctions de transfert des éléments du système dans le domaine des variables de Laplace (domaine s). Les transformées de Laplace des équations (III.1), (III.2), (III.3), (III.4) sont les suivantes :

$$U_i = E + R_p I_i + s L_{\text{équi}} I_i = E + (R_p + L_{\text{équi}} s) I_i \quad (\text{III.5})$$

$$E = K \Omega \quad (\text{III.6})$$

$$C_{em} = K I_i \quad (\text{III.7})$$

$$C_{em} - C_r = s J_T \Omega + f \Omega = (f + J_T s) \Omega \quad (\text{III.8})$$

– Rigidité des caractéristiques mécaniques statiques

$$\beta = \frac{(K)^2}{R_p} = \frac{(1.305)^2}{0.878} = 1.94 V^2 s^2 / \Omega$$

– Constante du temps électromécanique:

$$\tau_e = \frac{J_T}{\beta} = \frac{0.125}{1.94} = 0.064 s$$

– Inductance totale estimée du circuit d'induit

$$L_{\text{équi}} = L_{dv} + 2L_{tr} + L_{\text{lissage}} = 0.010 + 0.001056 + 0.030 = 0.0411 mH$$

– Constante du temps électromagnétique

$$\tau_{em} = \frac{L_{\text{équi}}}{R_p} = \frac{0.0411}{0.878} = 0.047 s$$

III.2.1.3. Schémas-blocs

Le mcc peut être vu comme un système à contre-réaction. Pour s'en apercevoir, il faut reprendre les équations précédentes et les représenter sous forme de schéma-bloc. On aboutit à la figure III.2.

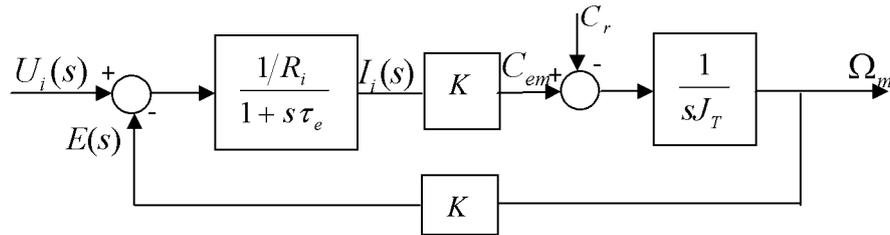


Figure.III.2 : Schéma-bloc tension-vitesse du moteur à courant continu.

III.2.2. Modélisation du convertisseur statique

Les convertisseurs statiques de l'énergie électrique, qui agissent à la fois comme unité d'adaptation de l'énergie électrique et d'interface entre le réseau et les appareils domestiques et industriels, occupent une place de plus en plus importante, et une des principales applications des convertisseurs statiques est la commande de machines électriques.

III.2.2.1. Tension de réseau

Les tensions instantanées des différentes phases du réseau d'alimentation triphasé sont données par l'équation suivante:

$$V_a = V_{\max} \sin(\omega t) \quad (\text{III.9})$$

$$V_b = V_{\max} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{III.10})$$

$$V_c = V_{\max} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (\text{III.11})$$

III.2.2.2. Modélisation du redresseur à thyristors

Le redresseur est un pont triphasé commandé réversible en tension et en courant, alimenté par un réseau de tensions triphasées, représenté par la figure III.3.

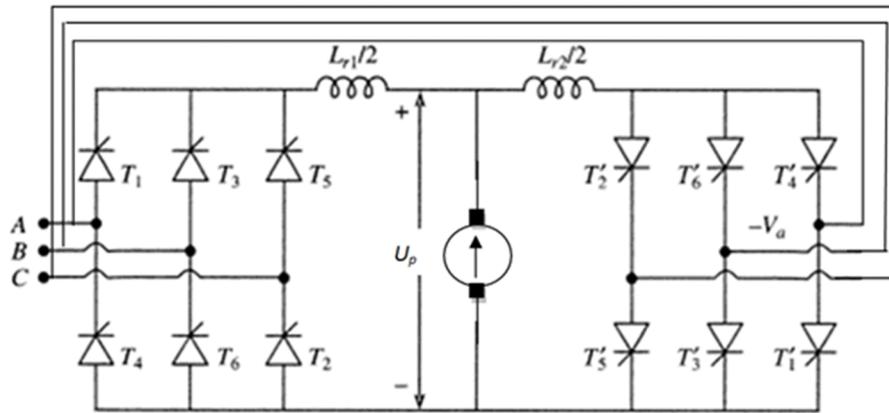


Figure III.3 Redresseur bidirectionnel en tension et en courant

Si les ponts P_1 et P_2 sont alimentés sous la même tension, on peut avoir pour les valeurs moyennes $U_{p1} + U_{p2} = 0$ et $U_i = U_{p1} = -U_{p2}$

Le premier montage donne:

$$U_{P1\text{moy}} = \frac{3V_{\text{eff}} \sqrt{2} \sqrt{3}}{\pi} \cos \alpha_1 = 2.34V_{\text{eff}} \cos \alpha_1 \quad (\text{III.12})$$

Et le deuxième donne:

$$U_{P2\text{moy}} = \frac{3V_{\text{eff}} \sqrt{2} \sqrt{3}}{\pi} \cos \alpha_2 = 2.34V_{\text{eff}} \cos \alpha_2 \quad (\text{III.13})$$

De (III.12) +(III.13) les angles de retard à l'amorçage doivent être reliés par : $\alpha_1 + \alpha_2 = 180^\circ$

α_1 : Angle d'amorçage du convertisseur 1.

α_2 : Angle d'amorçage du convertisseur 2.

Cette condition implique qu'un des deux convertisseurs de courant fonctionne en redresseur et l'autre en onduleur, comme l'indique la caractéristique de commande des deux redresseurs tracée dans la figure III.4.

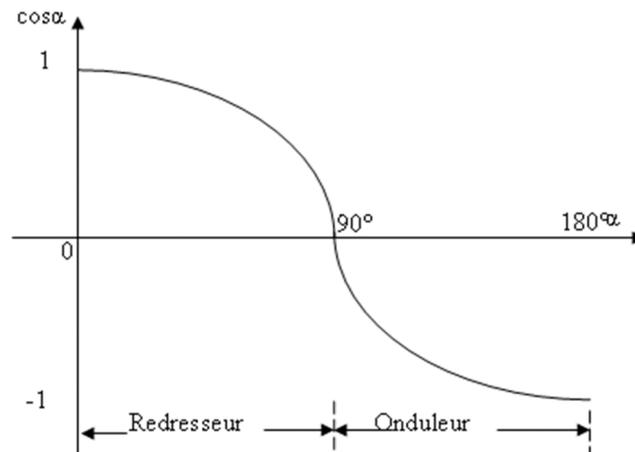


Figure.III.4 Caractéristique de commande en conduction continu

Selon l'angle de retard d'allumage α_1 la tension continue U_i aux bornes du montage antiparallèle peut être variée entre des valeurs positives et négatives.

Pour respecter la limite de fonctionnement en onduleur et tenant compte de la relation entre α_1 et α_2 on constate que α_1 ne peut varier qu'entre $30^\circ < \alpha_1 < 150^\circ$ environ. Ce fait limite la valeur maximale de la tension continue qui peut être fournie par ce montage de convertisseur de courant bidirectionnel.

I_{p1} , I_{p2} : Courant continu respectivement du convertisseur 1 et 2. Pour le courant continu, il y a la relation suivante: selon que $I_{p1} > I_{p2}$ ou $I_{p1} < I_{p2}$, le courant de sortie est positif ou négatif. Avec la supposition d'une inductance de limitation infinie, le courant I_i sera lisse.

III.2.2.3. La fonction de transfert du convertisseur

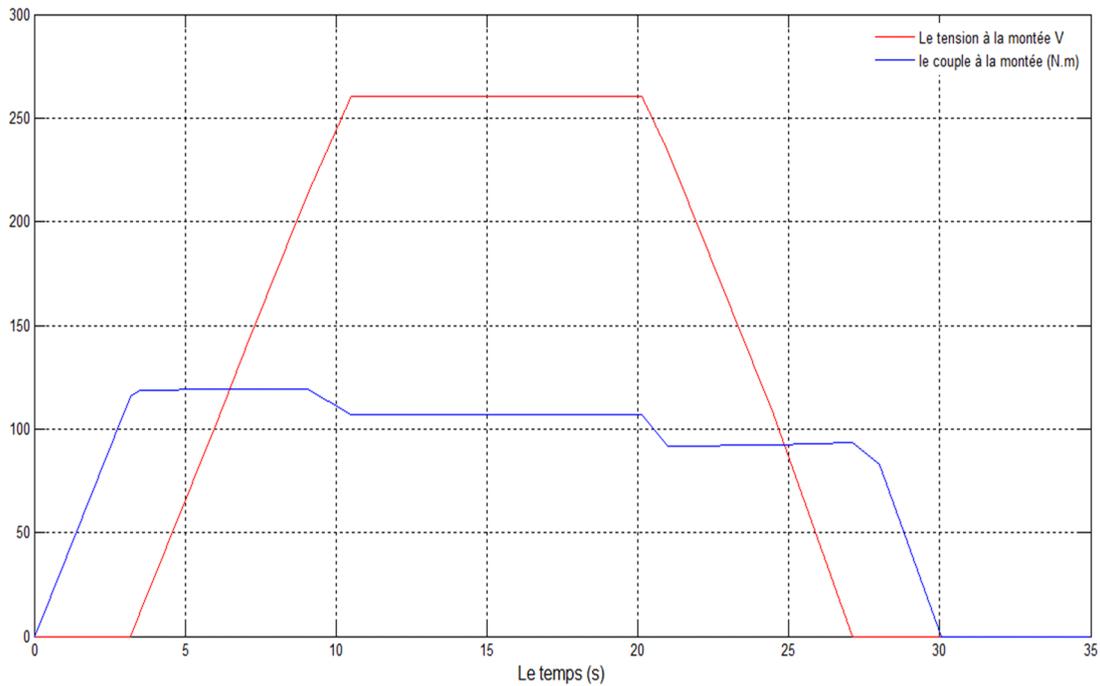
Les convertisseurs sont représentés en tant qu'amplificateur dont l'entrée est la tension de commande et la sortie la tension d'alimentation fournie, qui peut être assimilée à sa valeur moyenne. En régime statique, quelque soit le type de la commande, le redresseur commandé est représenté par un gain statique pur K_c .

Alors qu'en régime dynamique le convertisseur peut être ainsi modélisé par une fonction de transfert du premier ordre tel que [9] [40].

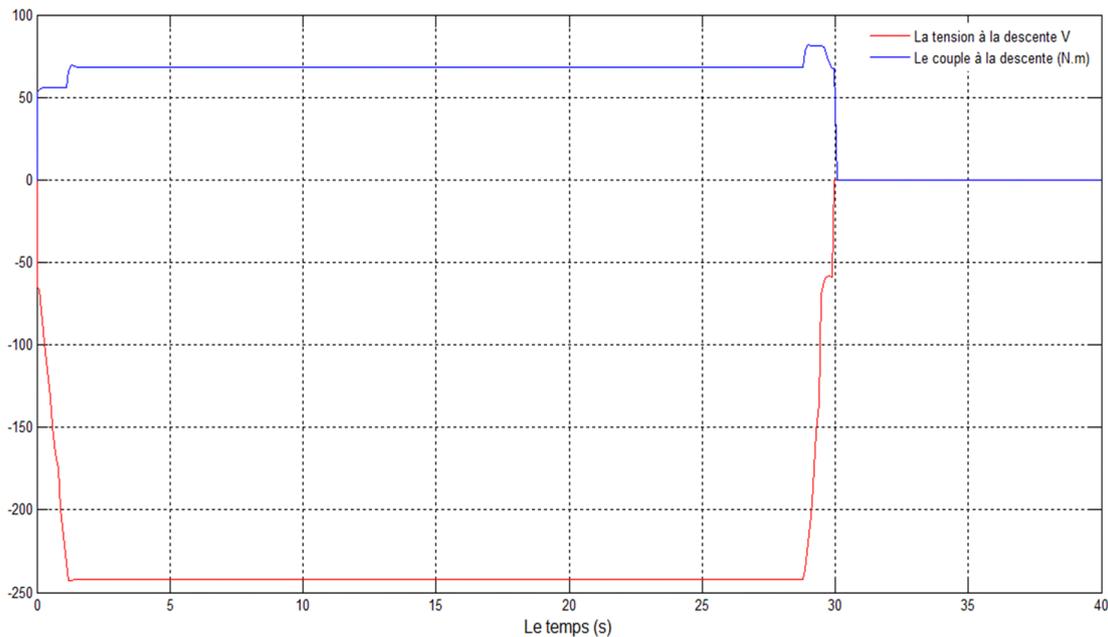
$$G_c(s) = \frac{K_c}{1 + \tau_c s} \quad (\text{III.14})$$

III.3. Construction le diagramme de charge du moteur lors de la variation linéaire de la f.é.m (montée et descente)

La figure II.5 représente le diagramme de charge du moteur lors de la variation linéaire de la f.é.m lors de la phase de montée et la phase de descente.



a- à la montée



b- à la descente

Figure III.5. Diagramme de charge du moteur lors de la variation linéaire de FEM: a- lors de montée, b- lors de la descente.

III.4. La régulation d'un moteur à courant continu en boucle fermée

La plupart des processus ont besoin de correcteur pour compenser et améliorer la précision et la stabilité. Un correcteur est un système qui va élaborer la commande d'un système en fonction de l'erreur mesurée entre la sortie et la consigne. Si on prend le cas d'un correcteur proportionnel est un système qui donne une commande proportionnelle à l'erreur mesurée. Beaucoup de systèmes peuvent être commandés par ce type de correcteur, qui est simple à mettre en œuvre. Le principe c'est l'ajustement du gain qui va consister à obtenir un bon compromis entre la stabilité et la précision. Le régulateur PI est probablement le plus largement utilisé dans le contrôle industriel. Le régulateur PI est une simple implémentation de retour d'information. Il a la capacité d'éliminer la compensation de l'état d'équilibre grâce à l'action intégrale [20].

III.4.1. Les différentes chaînes de régulations d'un moteur à courant continu

Il est à noter que la régulation de vitesse doit toujours s'effectuer sans que le moteur ou le convertisseur ne soit soumis à des contraintes trop fortes, il est notamment interdit de

dépasser le courant maximum autorisé. Il y a essentiellement quatre concepts de régulation [12]:

- régulation élémentaire,
- régulation à boucles convergentes,
- régulation à boucles multiples (en cascade),
- régulation à boucles en parallèle ou à commutation parallèle.

1. régulation élémentaire

Cette structure de régulation est simple à mettre en œuvre, mais elle présente l'inconvénient d'une limitation de courant très peu précise ce qui limite son utilisation [6].

2. régulation à boucles convergentes

À la boucle de régulation élémentaire vient s'ajouter une boucle convergente de courant. L'avantage de cette structure, elle est bon marché et ne nécessite qu'un petit nombre de composants pour contrôler la vitesse et limiter le courant [12]. Les inconvénients de la structure:

- On n'a qu'un seul régulateur pour deux variables, les deux boucles ne peuvent avoir l'une et l'autre une réponse optimale (meilleure rapidité, meilleure précision statique). il faudra donc faire un compromis pour le réglage du régulateur ce qui n'est pas forcément évident et requiert donc du temps et de l'expérience.
- La limitation de courant dépend non seulement du seuil choisi mais aussi du signal de référence de vitesse, donc lorsque la vitesse augmente, la limitation de courant s'élève également.
- Le transfert d'un mode de fonctionnement à l'autre (limitation de courant à régulation de vitesse) sans à coup est difficile à réaliser.

3. régulation en boucle multiple (ou en cascade)

Ce réglage est aussi connu sous le nom de réglage maître-esclave. Ici le réglage se passe comme ceci : le régulateur maître va régler la variable mais il n'envoie pas son signal de sortie au dispositif de réglage mais à un deuxième régulateur qui utilise ce signal de sortie

comme consigne. Cette méthode est très fréquemment utilisée pour la commande des moteurs car elle s'est avérée très efficace [36].

C'est une régulation à deux boucles imbriquées, comme l'indique la figure III.6 ci-dessous :

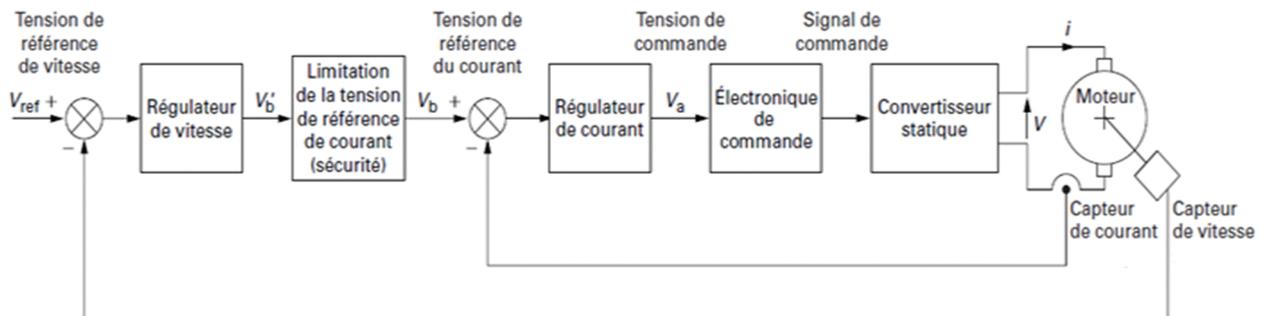


Figure III.6 structure d'un variateur de vitesse à régulation en cascade

Dans l'application de la configuration ci-dessus, la grandeur principale à contrôler est la vitesse, elle fait l'objet de la boucle externe. La sortie du régulateur de vitesse sert d'entrée, c'est-à-dire de référence au régulateur de la boucle intérieure (courant d'induit), à laquelle on peut appliquer une consigne de valeur limite, de façon à toujours travailler à couple maximal lors des changements de régime. Comme dans toute régulation en cascade, il est nécessaire que la boucle interne soit notablement plus rapide que la boucle externe [15].

A cette condition, les avantages essentiels d'une régulation en cascade sont:

- performance de régulation globalement meilleure qu'avec une seule boucle;
- régime transitoire plus rapide;
- effet des perturbations du processus intermédiaire moins sensible sur la boucle principale.
- la boucle de courant permet la régulation du courant, et on peut donc:
- limiter le couple, c'est à dire travailler en régime transitoire à couple constant.
- limiter le courant pour des questions de sécurité du moteur et du convertisseur associé.

4. régulation à boucles en parallèle

Cette architecture de boucle permet de ne pas pénaliser la dynamique en vitesse lorsque ses performances potentielles sont aussi élevées ou meilleures que celles de la boucle de courant. Cela se produit assez rarement mais peut arriver notamment pour des entraînements à très faible inertie [37].

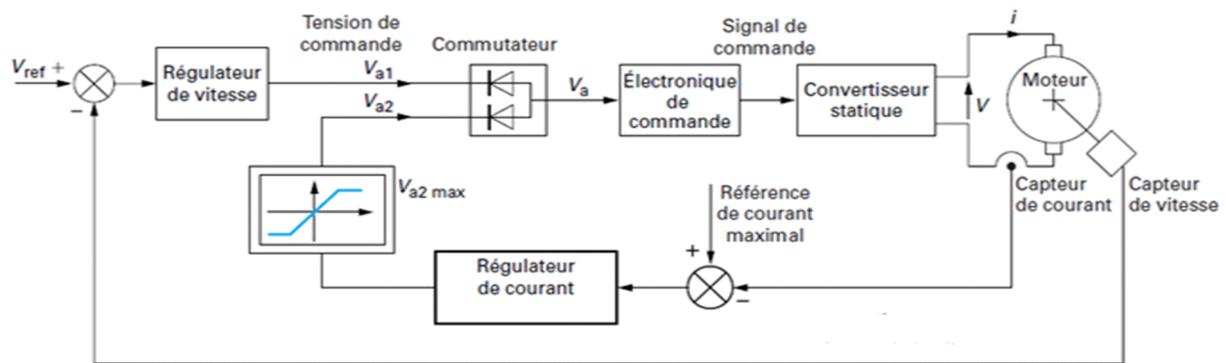


Figure III.7 structure d'un variateur de vitesse à régulation parallèle

Le choix entre la régulation en cascade et celle en parallèle dépend beaucoup du système à régler. La régulation en cascade est presque universellement employée sur des entraînements de toutes puissances, elle convient particulièrement bien à la régulation de vitesse et l'addition d'autres boucles en cascade est simple. Une boucle interne permet aussi de bien compenser les non-linéarités de l'ensemble convertisseur-moteur, par contre la régulation parallèle est employée dans les entraînements complexes où le nombre de variables à régler est important [6].

III.4.2. Les régulateurs pour un moteur à courant continu à excitation indépendante (MCCEI)

III.4.2.1 Schéma de principe de la régulation

Actuellement on trouve différents concepts de régulation de systèmes asservis, ainsi pour notre cas nous avons opté pour la régulation en cascade, car elle est très recommandée dans la commande des moteurs d'entraînement. La boucle interne est déterminée de tel sort qu'elle soit plus rapide que la boucle externe [40]. Etant donné que la constante mécanique est beaucoup plus grande que la constante électrique, la boucle externe sera celle de vitesse et la boucle interne sera celle de courant.

La figure III.8 illustre le concept de régulation en cascade pour un moteur à courant continu à excitation indépendante.

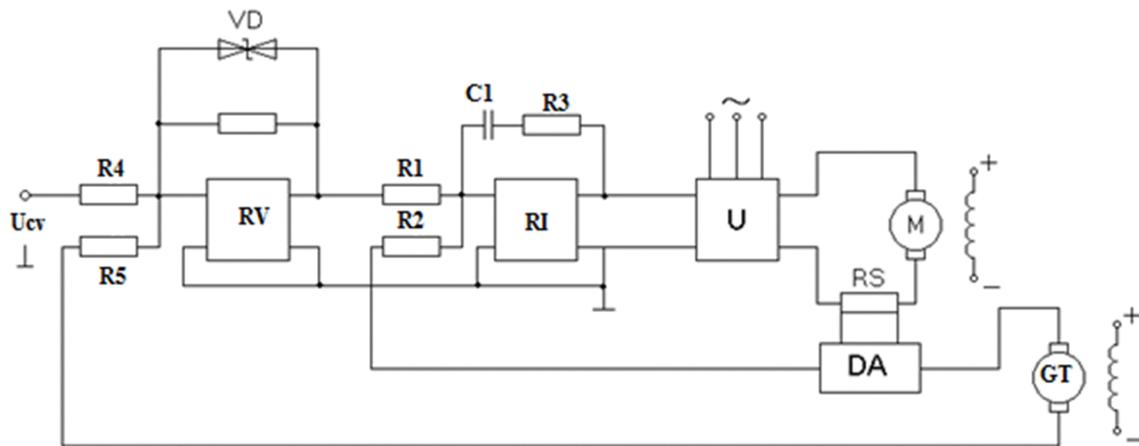


Figure III.8 principe de La boucle cascade

Un tel système comporte un régulateur propre à chacune des variables contrôlées. La variable asservie principale (vitesse) est réglée par la boucle externe. La sortie du régulateur correspondante sert comme signal de référence au régulateur de la boucle interne soit plus rapide que la boucle externe [40].

Le premier rôle de régulateur d'un système de régulation est d'obliger les grandeurs asservies (sortie de système) à conserver des valeurs aussi proches que possible de celles que l'on considère comme idéales. Généralement les systèmes de commande sont à boucle fermée qui consiste en une commande à rétroaction puisque c'est le moyen le plus commode de réaliser les relations désirées entre l'entrée et la sortie des systèmes, ce qui permet une compensation interne des imprécisions et les dérivées des caractéristiques du système [38].

Pour contrôler la vitesse il fallait contrôler le courant. La figure III.9 montre la structure de régulation qui permet d'asservir le courant de circulation à une consigne.

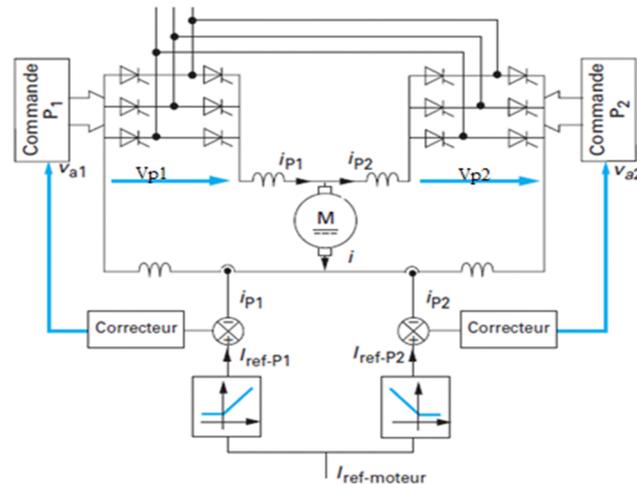


Figure III.9 Architecture de régulation d'un montage à circulation de courant pour la boucle interne du courant

On remarquera que les deux ponts sont régulés indépendamment en courant. Lorsque la consigne de courant moteur est positive, la consigne de courant du pont 1 est égale à la somme des consignes alors que le pont 2 ne reçoit que la consigne de courant de circulation. Quand la consigne courant moteur s'inverse, c'est le contraire.

Comme les deux ponts tête-bêche fonctionnent simultanément, la limitation de tension en onduleur de l'un, due à l'angle de garde, se traduit par la même limitation en redresseur de l'autre. Ainsi, si l'angle de garde vaut environ 30° , la tension disponible en mode redresseur est réduite de 14 % environ [29].

Les brusques variations de consigne ou de couple résistant (accélérations, décélérations, surcharges mécaniques) provoquent des courants importants dans l'induit (en particulier, au démarrage, seule la résistance de l'induit limite le courant). La limitation de courant, obligatoire, est ainsi prioritaire sur la régulation de la vitesse. Le schéma du variateur est donc complété d'un dispositif limitant le courant d'induit comparant la valeur réelle de ce dernier et la limite que s'est fixée l'utilisateur (1.2 à $2 I_n$).

Dans la suite, on ne représentera que la régulation relative à un pont (pont 1 par exemple).

La mise en service de la régulation en cascade est très simple; on procède par étapes successives en traitant chaque boucle séparément en partant de la plus rapide c.-à-d. la boucle interne qui est la boucle de courant, car sa constante du temps électrique est la plus faible de toutes les constantes de temps.

1. Régulateur du courant

L'étude de l'asservissement de courant du mcc peut se faire sous deux angles. Soit on fait une synthèse en utilisant la fonction de transfert complète. Soit on fait le raisonnement approché suivant. La force électromotrice étant une grandeur proportionnelle à la vitesse de rotation, ses variations sont lentes devant celles du courant d'induit. On peut donc la considérer comme une perturbation dans le transfert tension-courant, d'après le schéma de la figure III.2. Sous ces hypothèses la fonction de transfert de la partie électrique $W_I(s)$ se résume à :

$$W_I(s) = \frac{1}{R_p + L_{\text{équi}}s} = \frac{1/R_p}{\tau_e s + 1} \quad (\text{III.15})$$

La figure II.10 montre le schéma fonctionnel de la boucle interne de courant

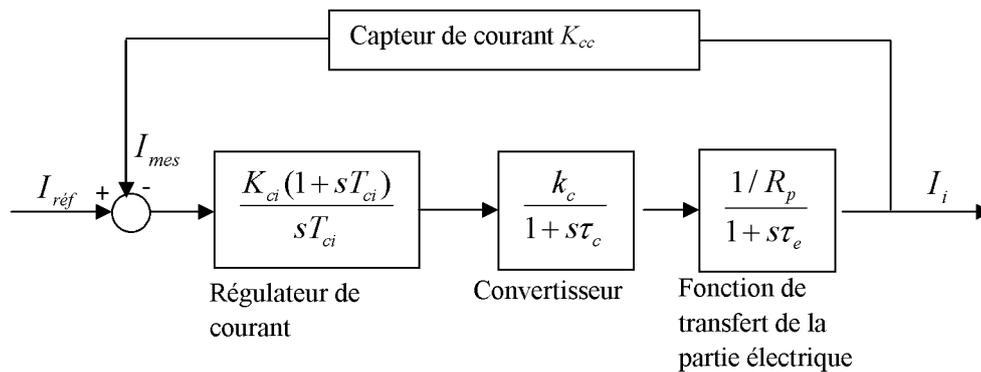


Figure III.10. Schéma fonctionnel de la boucle interne de courant d'un moteur à courant continu.

K_{cc} : le gain du capteur de courant

Tous les variateurs de vitesse actuels sont munis d'un dispositif de régulation inséré dans la carte de contrôle. Afin de mieux les choisir et les utiliser, nous allons expliquer sommairement ses fonctions.

Les systèmes asservis peuvent présenter des défauts, tel que: une précision insuffisante, une mauvaise stabilité, un temps de réponse trop lent, un dépassement trop important. Il est donc souvent nécessaire d'intégrer dans le système asservi un réseau correcteur, dont l'objectif est d'améliorer un ou plusieurs de ces différents paramètres.

Le choix d'un régulateur pour un système en boucle fermée dépend des performances que l'on souhaite obtenir pour ce système. Nous avons adopté un régulateur proportionnel intégral (PI) qui a une fonction de transfert qui s'écrit sous la forme générale suivante:

$$C_i(s) = K_{ci} \left(\frac{T_{ci}s + 1}{T_{ci}s} \right) \quad (\text{III.16})$$

L'ajustement des paramètres d'un régulateur est fonction des caractéristiques dynamiques de la boucle de régulation et des critères de performance définis dans la spécification [9].

Nous pouvons écrire la fonction de transfert de la boucle du courant non compensé:

$$W_{nc} = \frac{k_c}{\tau_c s + 1} \cdot \frac{1/R_p}{\tau_e s + 1} \quad (\text{III.17})$$

Où k_c : gain du convertisseur.

k_{cc} : gain du capteur du courant.

La fonction de transfert désirée de la boucle ouverte en prend en compte le régulateur du courant:

$$W_c = \frac{1/k_{cc}}{a_m \tau_c s (\tau_c s + 1)} \quad (\text{III.18})$$

Où: $a_m = \tau' / \tau_c$: rapport des constantes de temps du circuit

– **Constante d'intégration du régulateur de courant**

$$T_{ci} = \frac{k_{cc} k_c}{R_p} a_m \tau_c \quad (\text{III.19})$$

– **Gain de la partie proportionnelle**

$$k_{ci} = \tau_e / R_1 C_1 \text{ et } k_{ci} = R_3 / R_1$$

$$R_3 C_1 = \tau_e = k_{ci} T_{ci}$$

De ce fait:

$$R_3 = \frac{\tau_e}{C_1} = \frac{0,047}{10^{-6}} = 47000 \Omega$$

Où $\tau_e = 0.047$: constante de temps électromagnétique.

– **Coefficient du capteur du courant**

$$k_{cc} = \frac{U_{cmd\max}}{I_{imax}} = k_{cts} k_{gc} \frac{R_1}{R_2} \quad (\text{III.20})$$

Où k_{cts} : coefficient de transfert shunt

k_{gc} : gain du capteur de courant

$$k_{cts} = \frac{U}{I} = \frac{75 \cdot 10^{-3}}{100} = 7,5 \cdot 10^{-4}$$

– **Courant maximal qui traverse la résistance shunt**

$$I_{imax} = \frac{C_{\max}}{K} = \frac{119,37}{1,305} = 91,47 \text{ A}$$

Pour capter le courant on a choisi une résistance shunt de type RC-75. Ces paramètres sont:

$$I = 100 \text{ A} \text{ et } U = 75 \text{ mV}$$

– **Gain du capteur de courant**

Nous prenons $R_1 = R_2$ puis

$$k_{tr} = \frac{U_{cmd}}{U} = \frac{10}{75 \cdot 10^{-3}} = 133,3$$

$$k_{cc} = k_{cts} k_{tr} = 7,5 \cdot 10^{-4} \cdot 133,3 = 0,10 \text{ V / A}$$

– **Gain du convertisseur**

$$k_c = \frac{E_{d0}}{U_{com\max}} = \frac{279,5}{10} = 27,95$$

– **Constante d'intégration PI**

$$T_{ci} = \frac{k_{cc} k_c}{R_p} a_m \tau_c = \frac{0,1 \cdot 27,95}{0,878} 2 \cdot 0,01 = 0,064 \text{ s}$$

– **Gain du contrôleur**

$$k_{ci} = \frac{\tau_e}{T_{ci}} = \frac{0,047}{0,064} = 0,734$$

$$R_1 = \frac{R_3}{k_{ci}} = \frac{47000}{0,734} = 64.033 \text{ K}\Omega$$

- **Courant maximal limite:**

$$I_{i\max} = 91.47 A$$

- **Valeur de la tension de consigne:**

$$U_{ci} = k_{cc} I_{i\max} = 0,1 \cdot 91,47 = 9,147 \text{ V}$$

2. Régulateur de vitesse

Pour la conception de la boucle de commande de vitesse, le circuit de régulation de courant peut être modélisé par une fonction de transfert équivalente, il est alors possible de mettre en place, en cascade une boucle de vitesse souhaitée. Pour réaliser l'asservissement de la vitesse du rotor d'un mcc, la vitesse mesurée est comparée à une vitesse de référence désirée $\Omega_{réf}$.

La vitesse du rotor est mesurée par l'un ou l'autre des capteurs possibles (génératrice tachymétrique, synchro-résolveur, codeur) et la tension image est directement obtenue en sortie du procédé dans le cas des capteurs analogiques, ou après comptage dans le cas des codeurs incrémentaux. Le schéma-bloc de l'asservissement de vitesse est représenté à la figure III.11.

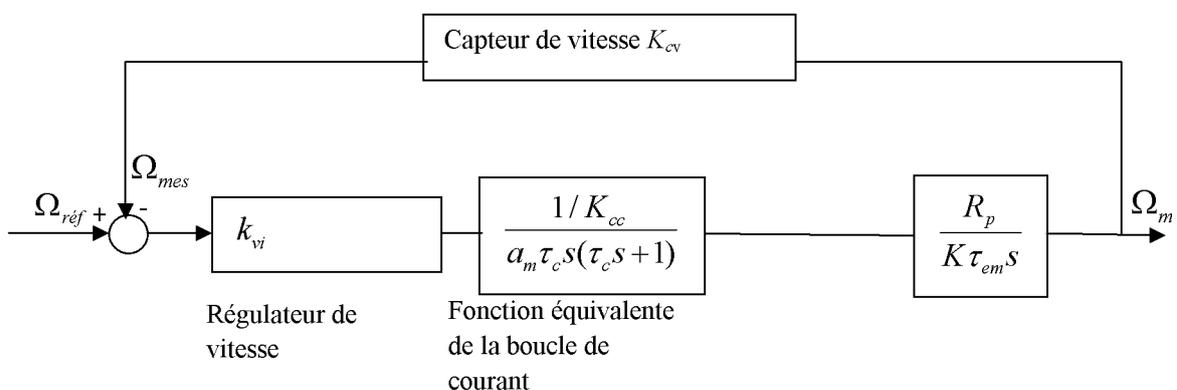


Figure III.11. Asservissement de vitesse d'un mcc avec boucle interne de courant.

Le schéma de la figure III.11 comprend deux boucles de régulation [39]:

- une boucle de courant qui assure la commande directe du convertisseur comme on l'a vu précédemment, elle est représentée par une fonction de transfert équivalente.
- une boucle de vitesse : elle assure la régulation de la vitesse de sortie en fonction de la variation de la charge et de la consigne de la vitesse.

La fonction de transfert de la vitesse en boucle ouverte non compensée:

$$W_{vnc} = \frac{1/k_{cc}}{a_m \tau_c s(\tau_c s + 1) + 1} \cdot \frac{R_p}{K \cdot \tau_{em} s} \quad (\text{III.21})$$

Constante de temps non compensé pour la boucle de vitesse est deux fois plus que la boucle de courant:

$$\tau_{cnc} = a_m \tau_c = 2 \cdot 0,01 = 0,02 \text{ s}$$

La fonction de transfert souhaitée de la boucle ouverte:

$$W_{vbo} = \frac{1/k_{cv}}{a_c a_m \tau_c s(a_m \tau_c s + 1)} \quad (\text{III.22})$$

Où

$a_c = \tau''/\tau_{cnc}$: rapport des constantes de temps. $a_c = 2$ pour un circuit optimal.

La fonction de transfert du régulateur de vitesse:

$$W_v = \frac{K k_{cc} \tau_{em}}{R_p k_{cv} a_c a_m \tau_c} \quad (\text{III.23}) .$$

De toute évidence, il est nécessaire d'appliquer un dispositif de commande de vitesse proportionnelle (régulateur P): son gain $k_{vi} = W_v$

Dans un système fermé ω_m et C_r liés par:

$$\omega_m = \frac{U_{cmd \max}}{k_{cv}} - \frac{a_c a_m \tau_c}{\beta \tau_{em}} C_r \quad (\text{II.24})$$

– **Gain du capteur de vitesse**

$$k_{cv} = \frac{U_{cmd \max}}{\omega_m + \frac{a_c a_m \tau_c}{\beta \tau_{em}} C_r} = \frac{10}{144,673 + \frac{2 \cdot 2 \cdot 0,01}{1,94 \cdot 0,064} \cdot 106,918} = 0,056 \text{ V / s}$$

– **Gain du régulateur P**

$$k_{vi} = \frac{K k_{ci} \tau_{em}}{R_p k_{cv} a_c a_m \tau_c} = \frac{1,305 \cdot 0,1 \cdot 0,064}{0,878 \cdot 0,056 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 0,01} = 4,249$$

– **Vitesse de ralenti maximale**

$$\omega_{0\max} = \frac{U_{\text{cmdmax}}}{k_{cv}} = \frac{10}{0,056} = 179,12 \text{ rad / s}$$

Nous demandons $R_5 = 100 \text{ k}\Omega$, alors:

$$R_4 = \frac{R_5}{k_{cv}} = \frac{100 \cdot 10^3}{4,247} = 23546,03 \Omega$$

La valeur de la f.é.m maximale quand $\omega_0 = \omega_{0\max}$, en utilisant une génératrice tachymétrique de constante $k_{gtch}=0.32$:

$$E_{\max} = k_{gtch} \cdot \omega_{0\max} = 0,32 \cdot 179,12 = 57,32 \text{ V}$$

– **Résistance dans le retour de vitesse**

$$R_5 = R_4 \frac{E_{\max}}{U_{\text{cmdmax}}} = 23,5 \cdot 10^3 \frac{57,32}{10} = 134,702 \text{ k}\Omega$$

III.5. Caractéristiques mécaniques en régime statique en boucle fermé.

Dans un système fermé avec $C < 119,37 \text{ N.m}$, l'équation caractéristique statique:

$$\omega = \frac{U_{\text{com}}}{K_{cv}} - \frac{a_m a_c \tau_c}{\tau_{em} \beta} C$$

$$\omega = \frac{10}{0,056} - \frac{2 \cdot 2 \cdot 0,01}{0,064 \cdot 0,94} C = 178,57 - 0,32C \quad (\text{III.24})$$

Lorsque $C = C_{\max} = 119,37 \text{ N.m}$ est:

$$\omega_{\max} = 178,57 - 0,32 \cdot 119,37 = 140,37 \text{ rad / s}$$

Après avoir déterminé les paramètres de régulateur pour la boucle de vitesse et la boucle interne du courant, la figure III.12 représente les caractéristiques mécaniques en régime statique en boucle fermée.

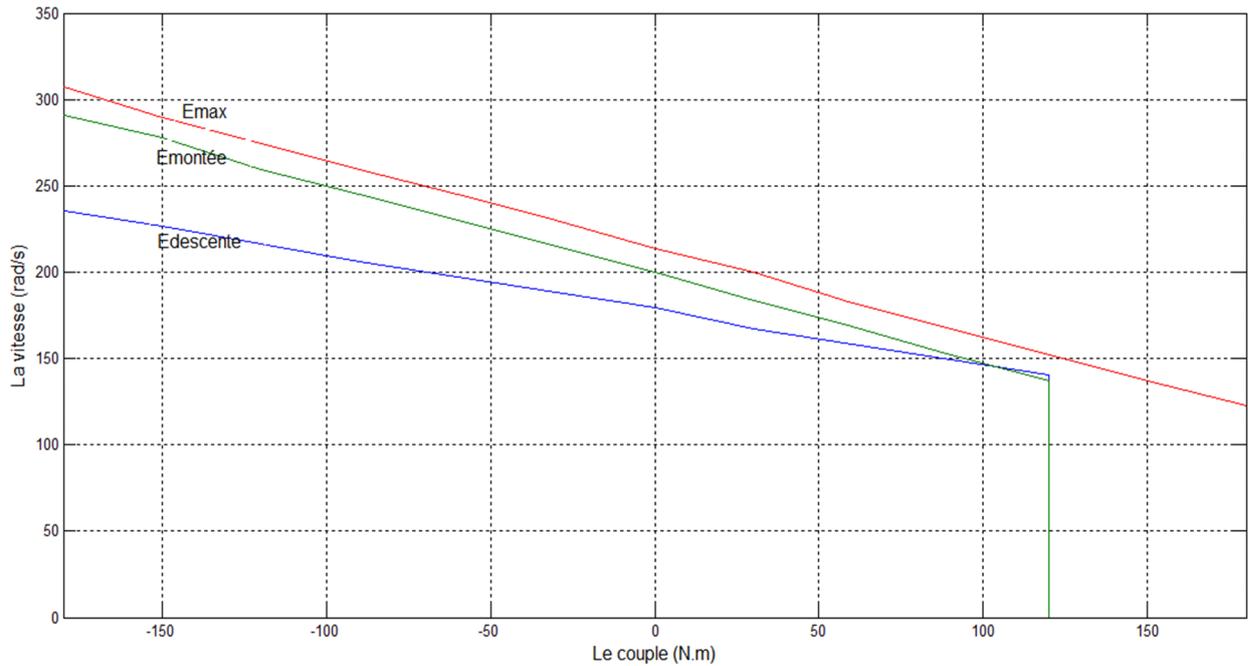


Figure III.12 Caractéristiques mécaniques en régime statique en boucle fermée

III.6. Elaboration du schéma de commande

Le circuit de commande de la figure III.13 est constitué d'amplificateurs de courant comprennent un régulateur de courant (RI), un régulateur de vitesse (RV), un capteur et une génératrice tachymétrique GT avec diviseur de tension R22 et R11 qui capte la vitesse.

Le potentiomètre RP change les niveaux du signal de référence et sa polarité par l'action sur les relais KV1 et KV2 (avant et arrière).

Le QF est un disjoncteur, QF1, QF2 alimente le circuit de puissance et de contrôle. Relais KF est un relais de rupture de la matière, c'est le contact principal dans le circuit de commande. Lorsque vous appuyez sur le SB1 (hausse) relais KV1 déclenche et ferme ses contacts dans le circuit de commande et circuit de puissance. Il ya un déplacement de la charge vers le haut (montée). Lorsque la charge atteint la hauteur maximale SQ2 déclenche et le moteur s'arrête. Pour assurer la descente de la charge, il faut cliquer sur le SB2 (Descente). Dans ce cas le relais KV2, dans les circuits de puissance et de contrôle sont activés. A la descente de la charge, qui se poursuit jusqu'à la fin de course du circuit SQ1. Pour arrêter élever ou abaisser le bouton SB3 (frein).

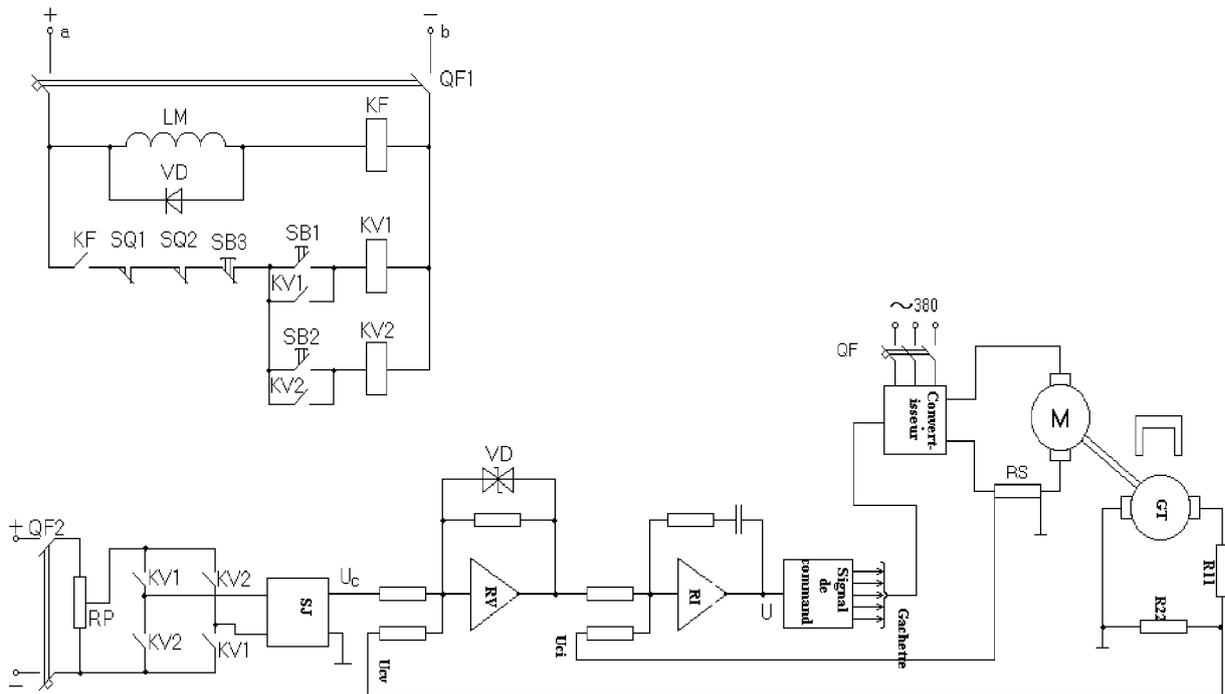


Figure III.13 Le circuit de commande du moteur.

II.7. Construction des régimes transitoires du mécanisme de levage

Les résultats obtenus des régimes transitoires lors de la phase de montée et la phase de descente de notre mécanisme de levage sont représentées sur les figures (II.14) et figure (III.15).

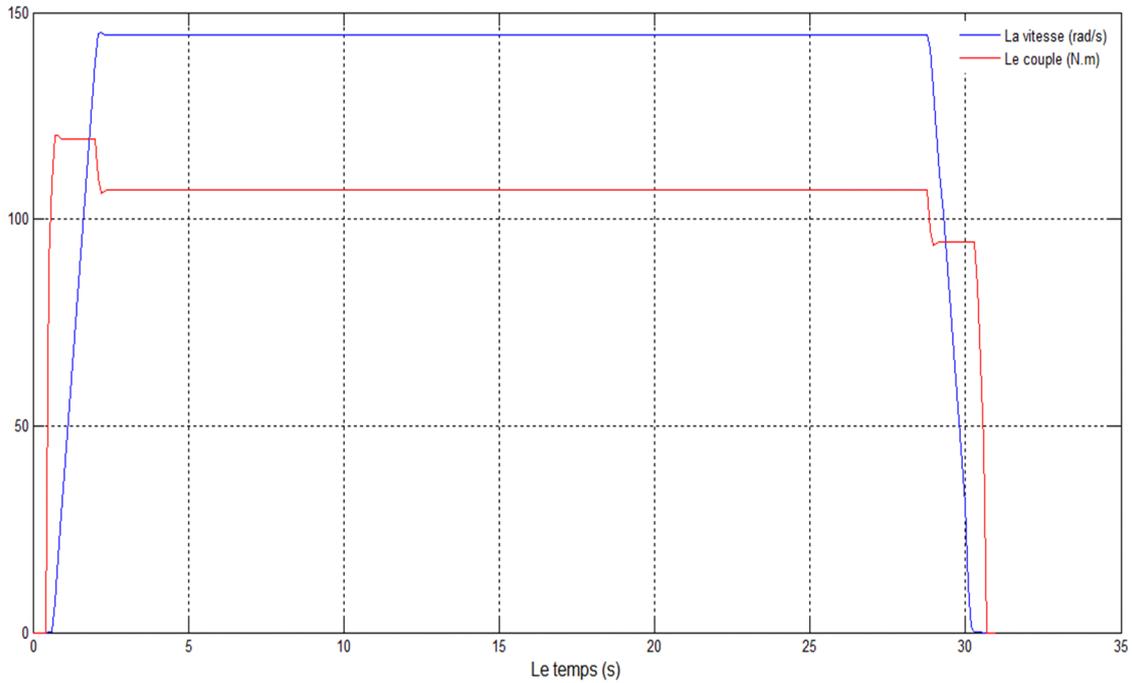


Figure III.14 Régimes transitoires lors de la phase de montée

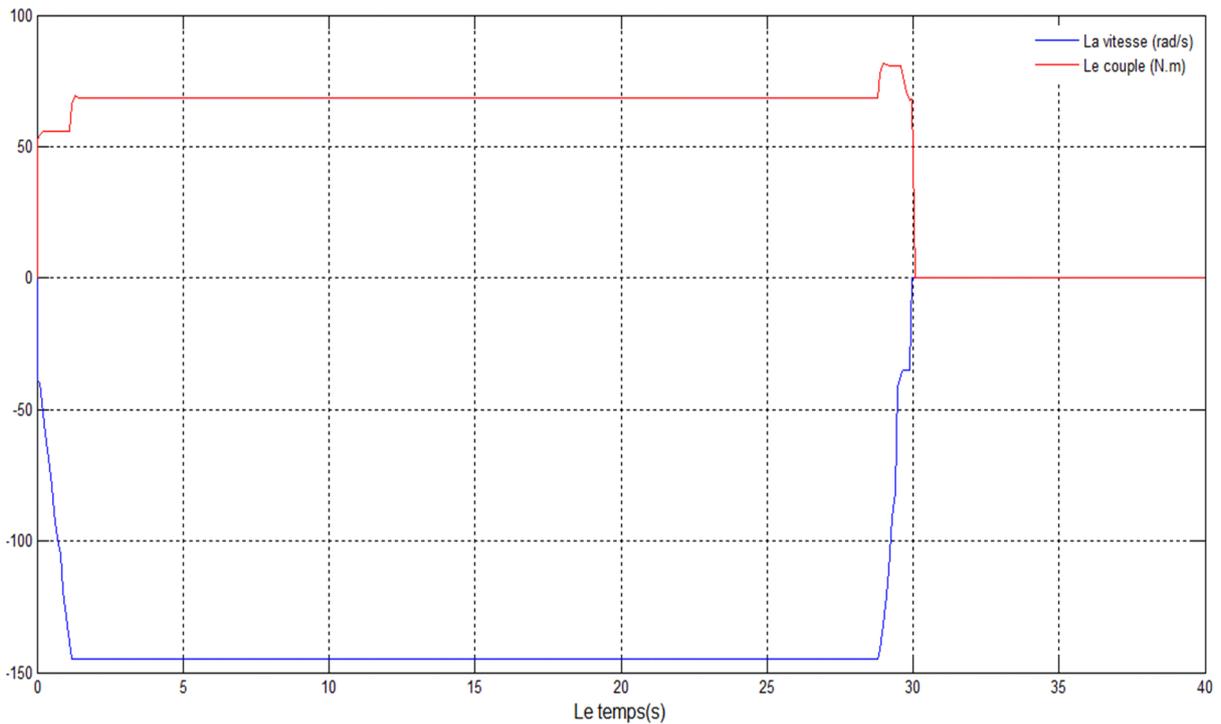


Figure III.15 Régimes transitoires lors de la phase de descente

En analysant ces résultats, nous pouvons dresser les remarques suivantes:

Dans la figure III.14, on voit que lors de la phase de montée de la charge, la vitesse de rotation tourne dans le sens positif et atteint une valeur de 140.37 rad/s en régime permanent, le couple électromagnétique passe par un régime transitoire, il se stabilise à une valeur au

régime permanent de valeur 106.918 N.m. Une fois que la charge atteint la hauteur désirée, le moteur passe par un autre régime transitoire pour qu'il s'arrête.

Dans la figure III.15, on voit que lors de la phase de descente de la charge, la vitesse de rotation tourne dans le sens négatif et atteint une valeur de -144.65 rad/s en régime permanent, le couple électromagnétique passe par un régime transitoire, il se stabilise à une valeur au régime permanent de 68.428 N.m. A la fin de course, le moteur passe par un régime transitoire de courte durée, après il s'arrête.

III.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons:

- présenté les principaux éléments du système de notre mécanisme de levage,
- exposé les différentes chaînes de régulations qu'on peut utiliser pour la variation de la vitesse de notre moteur,
- sélectionné la régulation en cascade, car elle nous offre la possibilité de contrôler deux grandeurs indépendantes avec des bonnes performances
- déterminé les caractéristiques mécaniques du régime statique en boucle fermée dans le but de déterminer les points de fonctionnement stable pour un couple résistant appliqué
- déterminé les régimes transitoires lors de la phase de montée et descente de la charge.

Conclusion générale

L'objectif de ce travail est la contribution à l'étude des performances de l'entraînement électrique du mécanisme de levage entraîné par un moteur à courant continu à excitation indépendante, commandé par un redresseur réversible en tension et en courant. Ce redresseur assure et permet au moteur de fonctionner dans les quatre quadrants du plan couple/vitesse. L'utilisation de ce dernier a un but, non seulement de faciliter l'utilisation des appareils de levage, mais aussi de récupérer l'énergie lors de la phase de freinage.

En premier lieu, nous avons présenté les différents mécanismes de levage motorisés qu'on peut rencontrer et les plus utilisés dans l'industrie. En plus, nous avons exposé les différents types des moteurs employés dans les entraînements électriques, et nous avons énuméré les paramètres sur lesquels nous pouvons agir pour varier la vitesse du moteur. Nous avons cité brièvement les différentes techniques de commande des moteurs accompagnés de leurs principes d'implantation.

Parmi ces moteurs nous avons choisi le moteur à courant continu à excitation indépendante, en se basant sur le diagramme de charge et les conditions d'échauffement et surcharge admissible, il s'est avéré que le moteur sélectionné satisfait à ces conditions.

Parmi les différents types de convertisseurs que nous avons cités et qui peuvent assurer la réversibilité en tension et en courant dans les quatre quadrants, nous avons utilisé un redresseur réversible antiparallèle avec inductances de circulation. Après avoir choisi le redresseur réversible, nous avons déterminé les paramètres des éléments de puissance. Ensuite, nous avons construit le diagramme de charge du moteur lors de la variation linéaire de la f.é.m dans la phase de la montée et de la descente de la charge.

Afin de concevoir des commandes avec un outil de simulation performant, nous avons reformulé nos modèles sous forme de schéma-bloc. Selon les résultats obtenus en boucle ouverte, une implantation de la commande de deux correcteurs classiques pour commander le courant et la vitesse est nécessaire.

En revanche, la structure comporte deux boucles une interne pour le courant et l'autre externe pour la vitesse.

Nous avons remarqué, d'après les différents résultats de simulation obtenus en boucle fermée, que la commande qu'on a appliquée nous a permis d'obtenir de bonnes performances dynamiques satisfaisantes, le régulateur de la vitesse et du courant a donné des résultats satisfaisants,

Dans notre travail, nous avons implanté et validé les lois de commande développées en théorie, avec un logiciel dans l'environnement virtuel qu'est *Matlab/Simulink*. Ce logiciel est un bon moyen d'étude du fonctionnement des MCC dans les conditions de fonctionnement

voulues. En effet, il nous permet de présenter une approche assez réaliste des phénomènes physiques.

A la fin, nous avons présenté les résultats obtenus en boucle fermée, des régimes transitoires. Ces résultats ont montré une bonne performance dynamique, le moteur passe d'abord par un régime transitoire de courte durée 1.448 s pour atteindre le régime permanent lors de la phase de montée et de descente. Durant la montée, l'induit du moteur est alimenté avec une tension de 260.728 V et tourne avec une vitesse de rotation de 144.67 rad /s pour un couple de charge de 106.918 N.m.

Alors que dans la phase de descente, l'induit du moteur est alimenté avec une tension de 308.589 V et tourne avec une vitesse de rotation de -144.65 rad /s pour un couple de charge de 68.428 N.m.

En perspective, pour améliorer et rendre ce travail rentable, c'est d'abord:

- valider ces résultats expérimentalement pour mettre le modèle en œuvre.
- apporter plus d'amélioration en éliminant les inductances de circulations qui encombrant le modèle.
- refaire la même étude en appliquant la structure sans courant de circulation, principe de la commande par logique d'inversion indiqué auparavant.
- pour rendre le modèle plus proche de la réalité, en prenant en considération les autres formes de pertes dans la machine (pertes mécaniques et pertes fer...) ainsi que dans le convertisseur de puissance (phénomènes d'empiètement, pertes par commutation...).

Références bibliographiques

-
- [1] Jean-Marie Caro, « Entraînements électriques à vitesse variable, rappels d'électrotechnique et de mécanique les procédés de variation de vitesse », Editions Lavoisier, Paris, 1997.
- [2] Géza Jogs, Edward D.Goodman, « Entraînements à courant continu », Presses de l'université du Québec, 1987.
- [3] Hanri-pierre Naud, « Appareils de levage motorisés légers et moyens », Technique de l'ingénieur, Traité Génie électrique AG 939, 1982.
- [4] Gilles Boivin, « Lexique des appareils de levage: lexique anglais-français », préparé à la direction des services linguistiques de l'office de la langue française, Sainte-Foy, Québec, 1996.
- [5] Claude Pelletier, « Appareils de levage, généralités », Technique de l'ingénieur, AG7010 , 2000.
- [6] Myer Kutz, « Environmentally couscious materials handling », Edition Wiley, new jersy, 2009.
- [7] André Veltman, Duco W.J. Pulle et Rik W.De Doncker, « Power Systems, Fundamentals of Electrical Drives », Springer, 2007.
- [8] Spinnler Georges, « Conception des machines, principes et applications: dimensionnement », Edition Lausanne: P.P.U.R, Etats Unis, 1998.
- [9] Nacer Benameur, « Introduction à la commande des machines électriques », Centre des publications universitaire, Manouba, Tunisie, 2010.
- [10] Abdessemed Rachid, « Modélisation et simulation des machines électriques », Edition ellipses, Paris, 2009.
- [11] Guy Séguier, Francis Notelet, « Electrotechnique industrielle », Editions Lavoisier, Paris , 1994.
- [12] Robert Perret, Elisabeth Rullière et Pascal Tixador, « Entraînements électriques, alimentation des machines électriques, principes de la conversion électromagnétique », Tome 1, Edition Lavoisier, Paris, 2006.
- [13] Robert Bousière, Francis Labrique, « Electronique de puissance, structure, fonctions de base principales applications: cours exercices résolus », Édition Dunod, Paris,2004.
- [14] François Bernot, « Machines à courant continu, constitution et fonctionnement », Technique de l'ingénieur, Traité Génie électrique, D3555, 2000.
- [15] Milsant Francis, « Cours d'électrotechnique, diodes, thyristors, commande des moteurs », Édition Eyrolles, Paris, 1981.

-
- [16] Pinard Michel, « Commande électronique des moteurs électriques », Edition Dunod, Paris, 2004.
- [17] Pierre Mayé, « Aide-mémoire, électrotechnique », Edition Dunod, Paris, 2006.
- [18] Bûler. H, « Réglage des systèmes d'électronique de puissance », Presse Polytechnique et universitaire Romandes, Lausanne, 1997.
- [19] Grellet. G, Clerc. G, « Actionneurs électriques: principes, modèles, commande », Edition Eyrolles, Paris, 1996.
- [20] Canudas Dewit. C, « Commande des moteurs asynchrones: modélisation, contrôle vectoriel et DTC », Hermès Science Publication, France, 2000.
- [21] E.Ho, P.sen, « Decoupling control of induction motor drives », IEEE Trans.Indus.Elec, Vol 35, N°2, pp.253-262, Mai 1988.
- [22] Gabriel R, Léonard. W, Norbdy. C, « Field Oriented control of a standard AC using microprocessors », IEEE Transaction on Industry Applications, Vol.IA.16, N°2, pp.186-192, March/April 1980.
- [23] M.S Mongkol Konghirun, « Fast-Transient Current Control Strategy and Other Issues for Vector Controlled AC Drives », Thèse de doctorat, université Ohio, 2003.
- [24] Takahashi I., T. Noguchi, « A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor », IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-22, no.5, pp.820-827, 1986.
- [25] Nik Rumzi, Nik Idris, Abdul Halim, Mohamed Yatim, « Direct Torque Control of Induction Machines with Constant Switching Frequency and Reduced Torque Ripple », IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.51, N°4, August 2004.
- [26] Mamadou Lamine Doumbia, « Outil d'aide à la conception des systèmes d'entraînement de machines électriques: exemples d'application »,Thèse présentée à l'école polytechniques de Montréal, Mai 2000.
- [27] Bûhler Hansruedi, « Convertisseur statiques », Edition Lausanne, PPUR, 1991.
- [28] Pinard Michel, « Convertisseur et électronique de puissance: commande, description mise en œuvre application avec labview », Edition Dunod, Paris, 2007.
- [29] Jean-Paul Louis, Bernard Multon, Yvan Bonnassieux et Michel Lavabre,« Convertisseurs statiques pour la variation de vitesse des mcs », Technique de l'ingénieur, Traité génie électrique d3611, Paris , 2003.
- [30] Jean Bonal, Guy Séguier, « Entraînements électriques à vitesse variable, Interactions convertisseur-réseau et convertisseur-moteur-charge », Edition TEC et DOC, Paris, 2000.

- [31] Guy Séguier, « Les convertisseurs de l'électronique de puissance, la conversion alternatif-continu », 2^{ème} Edition Lavoisier, 1998.
- [32] V.jagannathan, « Power electronics, devices and circuits », 2^{ème} Edition, PHI learning private limited, New Delhi, 2011.
- [33] François Bernot, « Redresseurs et onduleurs assistés », Technique de l'ingénieur, Traité Génie électrique E3962, 2000.
- [34] Jean-Paul Luois, Bernard Multon, Yvan Bonnassieux, Michel Lavabre, « Commande des machines à courant continu (mcc) à vitesse variable », Technique de l'ingénieur, Traité Génie électrique D3610, 2000.
- [35] Timothy L. Skvarenina, « The Power Electronics Handbook », Edition CRC Press LLC 2002, ISBN 0-8493-7336-0.
- [36] Jean-Paul Louis, Bernard Multon, Yvan Bonnassieux, Michel Lavabre, « Régulation des mcc- structure générale », Technique de l'ingénieur, traité Génie électrique D3612, 2000.
- [37] R.Krishnan, « Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and control », Prentice Hall, New Jersey, 2001.
- [38] Raju Singh1, A.K.Pandey, « Closed loop speed control of sedc motor using three phase fully controlled bridge rectifier with inner current loop », International Journal of Advances in Engineering & Technology, IJAET ISSN: 2231-1963, May 2012.
- [39] P. Louis, « Convertisseur continue-continue – Hacheur », Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie Electriques D3160, 2000.

Résumé:

Les activités de levage et de manutention sont le quotidien de tous les chantiers de construction du début jusqu'à la fin. Il est parfois difficile, voire impossible de déplacer ou de soulever certaines charges très lourdes. La technologie d'aujourd'hui permet de réaliser ces tâches beaucoup plus facilement grâce à des dispositifs mécaniques entraînés par des moteurs électriques. Ces dispositifs que l'on nomme appareils de levage, nous permettent d'utiliser l'énergie mécanique de façon plus efficace, rendant ainsi plus facile l'accomplissement d'un mouvement. Ainsi, le travail sera accompli avec moins d'efforts et meilleures performances. L'objectif de ce travail est la contribution à l'étude des performances de l'entraînement électrique du mécanisme de levage entraîné par un moteur à courant continu à excitation indépendante commandé par un redresseur réversible en tension et en courant. Le Choix du schéma du mécanisme de levage et éléments du circuit de puissance est une phase très importante pour obtenir le diagramme de charge en montée et descente de l'entraînement électrique. Une élaboration du système de commande plus une analyse des propriétés dynamiques du système en boucle fermée et calcul et construction des régimes transitoires est effectuée.

Mots clés:

Entraînements électriques, performances, mécanisme de levage, diagramme de charge, moteur à courant continu.