

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la
Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Electromécanique

Thème

Commende et Simulation de Moteur à Courant Continu

Devant le jury composé de :

Mohrem Abdelkrim

Président

Beggat Fateh

Examineur

Guia Houssef Eddine

Encadreur

Présenté par :

- Ramouli Lakhdar 1

- Sek Seif Eddine 2

- Hoggui Imad 3

2018-2019

Remerciements

Remerciements à Dieu –le tout puissant– qui nous a aidé à réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à remercier notre promoteur

M^{er} Guia Housseem Eddine d'avoir accepté de nous encadrer et de nous suivre durant toute cette période.

M^{er} Nezli Etayeb pour son assistance.

Nos remerciements vont aussi au président du jury et aux membres du jury examinateurs qui nous fait l'honneur de participer au jury de ce travail.

Et enfin nous remercions l'ensemble, enseignants et collègues de notre promotion, qui nous ont aidés à réaliser ce modeste travail.

Dédicace

Nous consacrons CE MODESTE TRAVAIL A :

Nos chers parents

Nos sœurs et nos frères

Toutes nos familles

Tous nos amis

*Tous les enseignants qui m'ont aidé de proche ou de loin pour
être un jour licencié d'électromécanique*

LAKHDAR RAMOULI

Dédicace

C'est avec un grand plaisir que je dédie ce modeste mémoire.

A celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma mère.

A mon père, école de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes mes années d'études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à m'aider et à me protéger.

A tous mes chères amies dont j'ai passé d'agréables moments et qui m'ont donnés de l'aide lorsque je rencontre des anomalies durant toute la période préparative de ce mémoire.

Sek Seif Eddine.

Dédicace

Je dédie ce travail qui n'aura jamais pu voir le jour sans les soutiens indéfectibles et sans limite de mes chers parents qui ne cessent de me donner avec amour le nécessaire pour que je puisse arriver à ce que je suis aujourd'hui. Que dieux vous protège et que la réussite soit toujours à ma portée pour que je puisse vous combler de bonheur.

Je dédie aussi ce travail à :

Nos chers parents

Nos sœurs et nos frères

Toutes nos familles

Tous mes amis, mes collègues et tous ceux qui m'estiment.

Houggi Imad

Chapitre I: Généralités sur les machines à courant continu

I.1 Introduction	1
I.2 Historique	1
I.3 Les principaux éléments constituant la machine à courant continu	2
I.3.1 Partie fixe d'une machine à courant continue	2
I.3.2 Partie mobile d'une machine à courant continue.....	4
I.4 Les matériaux utilisés dans la machine à courant continu	5
I.4.1 Les matériaux ferromagnétiques doux	5
I.4.2 Les aimants permanents (matériau ferromagnétique dur).....	6
I.5 Bobinages des machines à courant continu	6
I.5.1 Définition des termes couramment utilisés	6
I.5.1.1 Section de bobinage	6
I.5.1.2 Pas d'enroulement au collecteur.....	6
I.5.1.3 Pas d'enroulement	7
I.5.2 Enroulement de type imbrique	8
I.5.3 Enroulement de type ondulé.....	8
I.5.4 Enroulement de type concentré	9
I.5.5 Comparaison entre les trois types de bobinages	10
I.6 Le collecteur	11
I.7 Principe de fonctionnement des machines à courant continu	12
I.7.1 Cas Générateur	12
I.7.2 Cas Moteur.....	13
I.8 Les différents types de moteurs.....	13
I.8.1 Les moteurs à inducteur à aimant permanent	13
I.8.2 Les moteurs à inducteur bobiné.....	14
I.8.2.1 Excitation séparé.....	14
I.8.2.2 Excitation série	16
I.8.2.3 Excitation shunt	17
I.8.2.4 Excitation composée ou compound	18
I.9 Conclusion	20

Chapitre II: Commande des machines a courant continu	
II.1 Introduction	22
II.2 Choix d'une machine à courant continu	22
II.2.1 Choix d'un moteur à courant continu pour un service déterminé	22
II.2.1.1 Moteurs à excitation indépendante	22
II.2.1.2 Moteurs shunt	22
II.2.1.3 Moteurs compound	22
II.2.1.4 Moteurs série	23
II.3 Démarrage	23
II.4 Freinage	23
II.4.1 Freinage dynamique	24
II.4.2 Freinage par inversion	24
II.5 Inversion de sens de rotation	25
II.5.1 Principe de l'inversion de sens	25
II.5.2 Commande de l'inversion de sens	25
II.6 Variation de vitesse	26
II.7 Les convertisseurs statiques	26
II.8 Les convertisseurs continu-continu	27
II.8.1 Hacher série (abaisseur de tension)	27
II.8.2 Hacheur parallèle (élevateur de tension)	32
II.8.3 Hacheur réversible en courant	35
II.8.4 Hacheur en pont ou 4 quadrants	36
II.9 Conclusion	38
Chapitre III: Modulation continu et discrète de l'ensemble convertisseur-MCC	
III.2 Modèle du moteur à courant continu	40
III.2.1 Hypothèses simplificatrices	40
III.2.2 Équations du modèle électrique et mécanique	40
III.2.2.1 Equations électriques	40
III.2.2.2 Equation mécanique	41
III.2.3 Schéma fonctionnel du moteur CC	41
III.3 Modèle du convertisseur alimentant le moteur à courant continu	42
III.3.1 Fonctionnement du convertisseur	42
III.3.1.1 Commande séquentielle	42
III.3.1.2 Commande continue	45

III.4	Schéma block de l'ensemble convertisseur-moteur CC	47
III.5	Conclusion	48
Chapitre IV: Etude et simulation de la commande du MCC		
IV.1	Partie 1	50
IV.1.1	Fonctionnement dans le 1 ^{er} quadrant ($U_{smoy} > 0, I_{smoy} > 0$).....	50
IV.1.2	Fonctionnement dans le 3 ^{eme} quadrant ($U_{smoy} < 0, I_{smoy} < 0$) moteur sens inverse	52
IV.2	Partie 2.....	54
IV.2.1	Variateur PI de vitesse du moteur à courant continu	54
IV.3	Conclusion générale	57

Chapitre I

Fig I-1 Les principaux éléments constituant la machine à courant continu	2
Fig I-2 Structure de l'inducteur.....	3
Fig I-3 Schéma de bronchement de balais.....	4
Fig I-4 Schéma d'induit de machine à courant continu.....	5
Fig I-5 Schéma des principaux éléments constituant la machine à courant continu	5
Fig I-6 Pas d'enroulement au collecteur	7
Fig I-7 Schéma montre les deux brins de la spire correspond au pas d'enroulement.....	7
Fig I-8 Enroulement de type imbriquée	8
Fig I-9 Enroulement de type ondulé.....	9
Fig I-10 Enroulement de type concentré	10
Fig I-11 Collecteur de moteur à courant continu	12
Fig I-12 Barre en translation dans le champ D [9]	12
Fig I-13 Barre place dans un champ B. [9].....	13
Fig I-14 Moteur à aimant permanent.....	14
Fig I-15 Schéma d'une machine à courant continu à excitation séparé.	14
Fig I-16 Caractéristiques $n=f(V)$ d'un moteur à excitation séparée.....	15
Fig I-17 Le couple en fonction de courant d'alimentation	15
Fig I-18 Schéma électrique d'un Moteur à excitation série.....	16
Fig I-19 Caractéristique $n=f(I)$ de vitesse d'un moteur série.....	17
Fig I-20 Caractéristique de couple d'un moteur série	17
Fig I-21 Schéma électrique d'un Moteur à excitation shunt.....	18
Fig I-22 Schéma d'une machine à courant continu à excitation composée.....	18
Fig I-23 Courte dérivation.....	19
Fig I-24 Long dérivation.....	19

Chapitre II

Fig II-1 Courbe de couple de freinage dynamique et optimal de MCC	24
Fig II-2 Principe général de l'inversion de sens de rotation	25
Fig II-3 Principe de commande de l'inversion de sens de rotation.....	25
Fig II-4 Diagramme des divers types de convertisseur statique	26
Fig II-5 Principe de convertisseur DC-DC	27
Fig II-6 Schéma électrique de l'hacheur série (charge R).....	27
Fig II-7 Chronogramme de l'hacheur série (charge R).....	28
Fig II-8 La valeur moyenne en fonction de rapport cyclique (α).....	29
Fig II-9 Schéma électrique de l'hacheur série (charge RLE)	29
Fig II-10 Chronogramme de l'hacheur série (charge RLE)	31
Fig II-11 Schéma électrique de l'hacheur parallèle.....	32
Fig II-12 Chronogramme d'un hacheur parallèle (tension, courant).....	34
Fig II-13 Schéma de l hacheur réversible en courant (série + parallèle).....	35
Fig II-14 Chronogramme de l hacheur réversible en courant (série + parallèle).....	36

<i>Fig II-15 Schéma électrique de l'hacheur en pont ou 4 quadrants</i>	37
<i>Fig II-16 Présentation de quatre quadrants de fonctionnement de MCC</i>	37

Chapitre III

<i>Fig III-1 Schéma fonctionnelle de machine à courant continu</i>	42
<i>Fig III-2 Principe de commande séquentielle d'un hacheur quatre quadrants</i>	43
<i>Fig III-3 Circuit d'hachage par H1 (source vers MCC) et sa roue libre</i>	44
<i>Fig III-4 Circuit d'hachage par H2 et sa roue libre</i>	44
<i>Fig III-5 Circuit d'hachage par H1 (MCC vers la source) et sa roue libre</i>	45
<i>Fig III-6 Circuit d'hachage par H2 (sens inverse) et sa roue libre</i>	45
<i>Fig III-7 Principe de commande continue d'un hacheur quatre quadrants</i>	46
<i>Fig III-8 Commande continu d'hacheur</i>	46
<i>Fig III-9 Commande continu d'hacheur (sens inverse)</i>	47
<i>Fig III-10 Schéma block de l'ensemble hacheur+MCC</i>	47

Chapitre IV

<i>Figure IV-1 Schéma de simulation du hacheur quatre quadrants avec une MCC pour un commande séquentielle (1^{er} quadrant)</i>	50
<i>Figure IV-2 Courbes de courant (1^{er} quadrant)</i>	51
<i>Figure IV-3 Courbe de couple (1er quadrant)</i>	51
<i>Figure IV-4 Forme d'onde de tension U_s (1er quadrant)</i>	51
<i>Figure IV-5 Courbe de vitesse Ω (1er quadrant)</i>	51
<i>Figure IV-6 Schéma de simulation du hacheur quatre quadrants avec une MCC pour un commande séquentielle (3^{eme} quadrant)</i>	52
<i>Figure IV-7 Courbes de courant (3eme quadrant)</i>	52
<i>Figure IV-8 Courbe de couple (3eme quadrant)</i>	53
<i>Figure IV-9 Courbe de tension (3^{eme} quadrant)</i>	53
<i>Figure IV-10 Courbe de vitesse (3^{eme} quadrant)</i>	53
<i>Figure IV-11 Schéma block de hacheur et MCC commandé par un régulateur PI (vitesse désirée de 200 tr/min)</i>	54
<i>Figure IV-12 Tension de hacheur (temps de fermeture $5 \cdot 10^{-4}$)</i>	55
<i>Figure IV-13 Courbe de vitesse a désirée (200 tr/min)</i>	55
<i>Figure IV-14 Schéma block de hacheur et MCC commandé par un régulateur PI (vitesse désirée de 200 tr/min)</i>	55
<i>Figure IV-15 Tension de hacheur (période de fermeture $1 \cdot 10^{-4}$)</i>	56
<i>Figure IV-16 Courbe de vitesse désirée (800 tr/min)</i>	56

Symbole

I_d	: courant de démarrage
U	: tension de source d'alimentation
R_a	: résistance rotorique
R_s	: résistance statorique
R_f	: résistance de freinage
Ω	: Vitesse de rotation
K	: constant de tension
\emptyset	: flue
I_a	: courant de induit
E	: f.é.m
V_H	: tension de l'interrupteur
V_s	: tension de la charge
i_s	: courant de sortie d'hacheur
i_e	: courant de source
$V_s \text{ moy}$: tension moyen de la charge
R	: résistance
L	: inductance
D	: diode
H	: thyristor
U_s	: tension de induit
C_e	: couple
C_r	: couple résistive
f	: coefissision de freinage
J	: inertie
K_f	: constant de l'inductance mutuel de stator
K_r	: constant de l'inductance mutuel de rotor

Abréviations

PI	Proportionnel Intégral
MCC	Machine a Courant Continu

Introduction général

Le monde industriel a été dominé pendant longtemps par les machines à courant continu. Grâce à leurs avantages relatifs qu'elles présentent par rapport à d'autres types de machines (machines à courant alternatif), elles sont largement employées dans plusieurs domaines de l'industrie.

Cette mémoire est composée d'une introduction, et un ensemble des quatre chapitres et une conclusion, et répartie comme suit :

Le premier chapitre, est consacré à l'étude théorique de la machine à courant continu. Il est constitué d'un rappel des généralités sur cette machine, en donnant leur structure, le phénomène d'induction les différents types selon quelques critères (la puissance, le mode d'excitation).

Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié le choix des moteurs à courant continu, ainsi que les différents manœuvres de commande (démarrage, freinage, Technique de variation de vitesse et sens de rotation), enfin nous avons présenté le principe de fonctionnement et les différents types des convertisseurs statique continu-continu.

Le troisième chapitre, nous avons réservé une partie pour la modélisation du moteur à courant continu (moteur à courant continu à excitation séparée) et les convertisseurs continu-continu, dans ce chapitre on a présenté le modèle de ces moteurs à partir la transformation de LAPLACE des équations électriques et mécanique, pour construire le schéma fonctionnel de ce moteur.

Le quatrième chapitre présente une partie de la simulation du moteur à courant continu (moteur à courant continu à excitation séparée) avec les convertisseurs continu-continu qui nous permet d'extraire les caractéristiques de ces moteurs (la vitesse, le couple utile et le courant) en utilisant le programme MATLAB/SIMULINK.

Chapitre I :
**Généralités sur les machines à
courant continu**

I.1 Introduction :

Ce premier chapitre rappelle les différentes structures de machines à courant et leur fonctionnement. Après un bref historique, nous présentons les différents composants qui les constituent et les matériaux qui sont utilisés pour leur réalisation. Ainsi nous présentons ensuite trois types de bobinage d'induit, le bobinage imbriqué, le bobinage ondulé et le bobinage concentré. Enfin, le principe de fonctionnement de machine à courant continu.

I.2 Historique :

En 1821, après la découverte du phénomène du lien entre électricité et magnétisme, l'électromagnétisme, par le chimiste Danois Oersted, le physicien anglais Michael Faraday construit deux appareils pour produire ce qu'il appela une « rotation électromagnétique » : le mouvement circulaire continu d'une force magnétique autour d'un fil, en fait la démonstration du premier moteur électrique. Le schéma de la roue de Barlow En 1822, Peter Barlow construit ce qui peut être considéré comme le premier moteur électrique de l'histoire : la « roue de Barlow » qui est un simple disque métallique découpé en étoile et dont les extrémités plongent dans un godet contenant du mercure qui assure le passage du courant. Elle ne produit cependant qu'une force juste capable de la faire tourner, ne lui permettant pas d'application pratique. Le premier commutateur utilisable expérimentalement a été inventé en 1832 par William Sturgeon. Le premier moteur à courant continu fabriqué avec l'intention d'être commercialisé a été inventé par Thomas Davenport en 1834 puis breveté en 1837[5]. Ces moteurs n'ont pas connu de développement industriel à cause du coût des batteries à l'époque. On doit la vérification pratique de la réversibilité des machines électriques au physicien italien Antonio Pacinotti en 1864[6].

En 1869, l'inventeur belge Zénobie Gramme rend possible la réalisation des génératrices à courant continu en imaginant le collecteur. Il améliore les premières versions archaïques d'alternateurs (1867) et devient célèbre en retrouvant le principe de l'induit en anneau de Pacinotti. En 1871, il présentera à l'Académie des sciences de Paris la première génératrice industrielle de courant continu, que l'on appela machine de Gramme. En 1873, Hippolyte Fontaine, partenaire de Zénobie Gramme réalise la première application industrielle de la transmission électrique des forces. Tout en démontrant à l'occasion de l'exposition de Vienne, la réversibilité de la machine de Gramme, il présente une expérience associant dynamo et moteur à

courant continu, séparés par 2 km de fils électriques. Avant cette expérience décisive, l'énergie mécanique des cours d'eau devait être utilisée sur place, car intransportable sur de longues distances.

I.3 Les principaux éléments constituant la machine à courant continu :

Une machine à courant continu comprend deux parties principales. Une partie mobile appelée l'induit, dans laquelle a lieu la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique. Une partie fixe destinée surtout à créer le flux magnétique. Les parties fixe et mobile sont séparées l'une de l'autre par un entrefer comme le montre la Fig I-1.

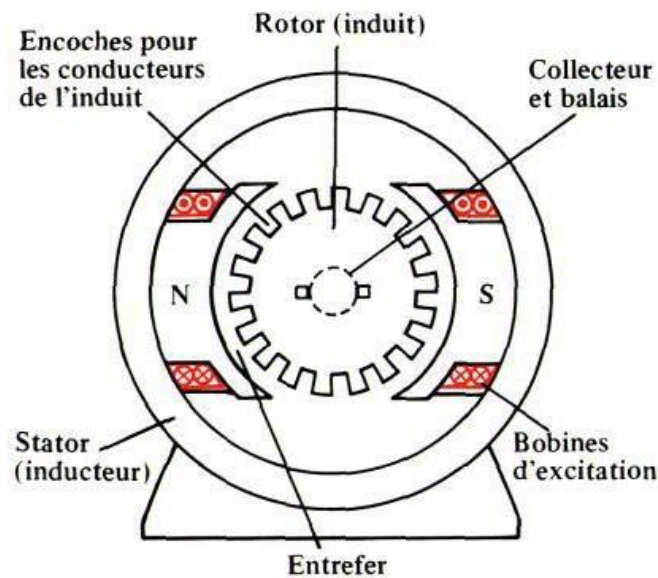


Fig I-1 Les principaux éléments constituant la machine à courant continu

I.3.1 Partie fixe d'une machine à courant continu :

a) L'inducteur (stator) :

C'est la partie fixe. Parfois c'est un aimant permanent, pour les petites puissances mais en général c'est un électro-aimant constitué de deux bobines en série qui sont alimentées en courant continu, créent un pôle nord et un pôle sud. Le champ magnétique dans l'entrefer est maximal dans l'axe des pôles et nul dans la direction perpendiculaire à cet axe Fig I-2, appelé ligne neutre [2]



Fig I-2 Structure de l'inducteur

b) La carcasse :

On appelle carcasse la partie de la machine à laquelle sont fixés les pôles principaux et auxiliaires et à l'aide de laquelle la machine est réunie à la fondation. Une partie de la carcasse sert au passage du flux produit par les pôles principaux et auxiliaires est appelée culasse. Dans les machines dont l'induit a un grand diamètre on fixe à la carcasse la couronne avec les porte-balais.

c) Les pôles principaux :

Destinés à créer le flux magnétique principal. Ces pôles comprennent un noyau en tôle d'acier électromagnétique de 1mm d'épaisseur. Le noyau a un épanouissement polaire servant à faciliter le passage du flux magnétique par l'entrefer. On place sur le noyau du pôle une bobine de l'enroulement d'excitation par laquelle passe un courant continu. La bobine est enroulée sur un fourreau fabriqué soit en tôle d'acier de 1 ou 2mm d'épaisseur sur laquelle est collé un carton électrotechnique de 2 ou 3mm d'épaisseur, soit en matière plastique ou en papier bakélite. Dans les machines de faible et moyenne puissance les bobines de pôle sont souvent fabriquées sans fourreau. Afin de réduire l'hygroscopicité et d'augmenter la conduction de la chaleur, les bobines sont composées ou imprégnées à plusieurs reprises de vernis chaud et sont ensuite séchées au four. Pour assurer un meilleur refroidissement, on divise souvent la bobine en deux ou plusieurs parties en hauteur entre lesquelles, on laisse des canaux de ventilation de largeur suffisante. Les pôles sont fixés à la carcasse à l'aide de boulons spéciaux [1].

d) Les pôles auxiliaires :

Les pôles auxiliaires installés entre les pôles principaux sont destinés à éliminer les étincelles sous les balais (dans les machines de très faible puissance, vu le manque de place, on ne prévoit pas de pôles auxiliaires).

e) Balais :

Les balais assurent la liaison électrique (contact glissant) entre la partie fixe et la partie tournante Fig I-3. Pour des machines de forte puissance, la mise en parallèle des balais est alors nécessaire. Pour des raisons d'économie, ils doivent avoir une durée de vie aussi longue que possible et assurer un bon contact électrique. Différentes technologies existent : les balais au charbon dur, les graphitiques, les électro-graphitiques, et les métallo-graphitiques. On peut considérer que dans un contact glissant. [2].

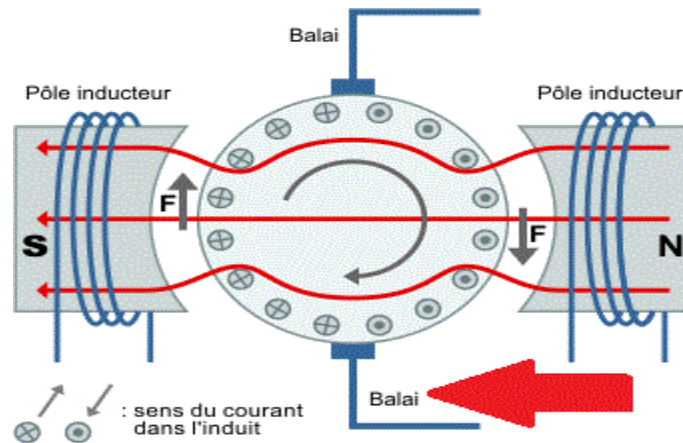


Fig I-3 Schéma de branchement de balais

I.3.2 Partie mobile d'une machine à courant continu :

a) L'induit (rotor) :

C'est la partie tournante. C'est un cylindre ferromagnétique feuilleté constitué d'encoches dans lesquelles sont répartis des conducteurs voir la Fig I-4. C'est un enroulement fermé sur lui-même. Calé sur le rotor se trouve le collecteur, constitué de lamelles conductrices isolées entre elles. Le courant est acheminé dans le cas du moteur, ou récupéré dans le cas de la génératrice, grâce à deux balais en carbone frottant sur le collecteur [2].

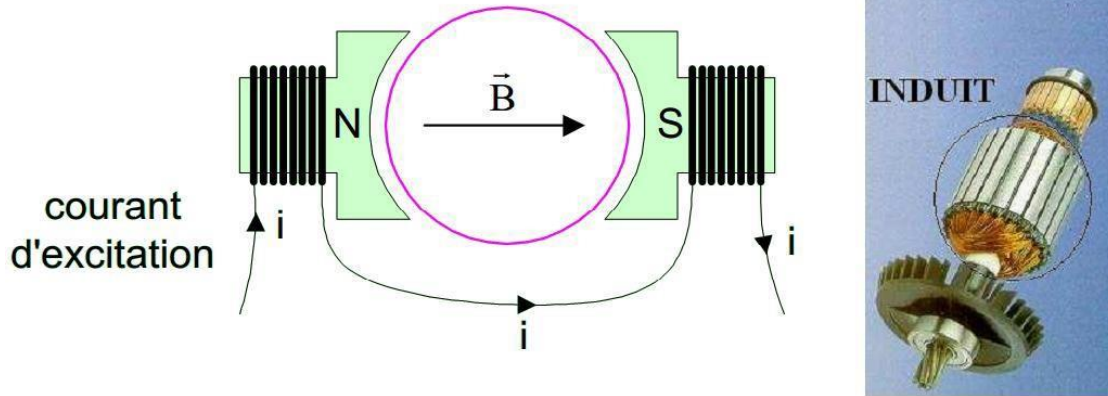


Fig I-4 Schéma d'induit de machine à courant continu

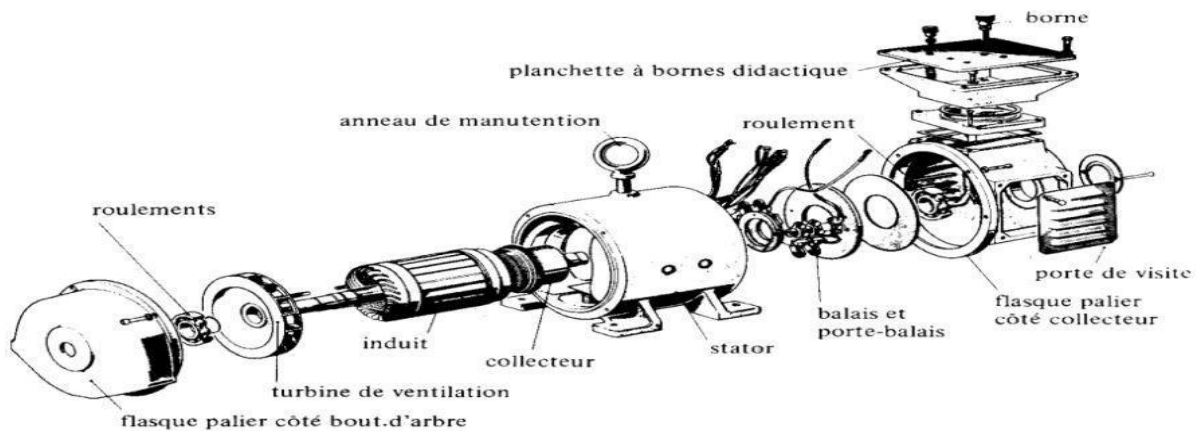


Fig I-5 Schéma des principaux éléments constituant la machine à courant continu

I.4 Les matériaux utilisés dans la machine à courant continu :

I.4.1 Les matériaux ferromagnétiques doux :

Parmi les matériaux employés dans les machines électriques, on peut citer la fonte, l'acier coulé, l'acier au silicium (1%) pour faire des tôles isolées de haute perméabilité. On peut aussi Utiliser de nouveaux matériaux de type composite (fer-résine) pour remplacer les tôles. Ces matériaux sont réalisés à base de poudre de fer et de résine. Ils ont une faible perméabilité relative ($\mu_r=300$), une faible valeur d'induction de saturation (1.4 T) par rapport aux autres matériaux laminés. Ils sont faciles à usiner et on peut réaliser des formes très complexes avec les moules. Ce type de matériau permet de réaliser le rotor en une seule opération par moulage ou pressage ce qui conduit à un gain de temps dans la production de masse, par rapport aux autres types de matériaux. [4]

I.4.2 Les aimants permanents (matériau ferromagnétique dur) :

Le choix d'un type d'aimant permanent pour une machine à courant continu dépend principalement de la valeur du champ coercitif, du champ rémanent et de son prix. Le but d'utilisation de ces aimants est d'avoir un niveau d'induction élevé dans l'entrefer et donc de réduire les dimensions et l'encombrement du moteur. De nos jours, il existe une grande variété de matériaux pour aimants permanents dont les propriétés et les applications sont très diverses. On distingue : Les ferrites dures, matériaux céramiques bon marché, très stable, mais peu puissant et fragile. Ce sont les aimants les plus compétitifs au niveau de leur prix et les plus utilisés. Les alliages à base d'éléments de terre rare, très stable et très puissants. Mais ces aimants sont chers et difficiles à usiner. Ils sont aussi sensibles à la corrosion. Les aimants permanents sont des matériaux à large cycle d'hystérésis. Ils sont caractérisés par une courbe de démagnétisation qui correspond au deuxième cadran du cycle communément appelé courbe de désaimantation. [3]

I.5 Bobinages des machines à courant continu :

Les bobinages sont conçus afin d'utiliser au mieux les ampères-tours de l'induit. L'enroulement d'induit est l'élément le plus important de la machine. Il est l'objet de diverses exigences :

- L'enroulement doit être réalisé en minimisant le matériau du point de vue du poids et de l'enroulement en limitant les pertes [9].
- La commutation à courant continu doit être satisfaisante (absence d'étincelles nuisibles au collecteur).

I.5.1 Définition des termes couramment utilisés :

I.5.1.1 Section de bobinage :

Une section de bobinage est une partie de l'enroulement d'induit qui comprend une ou plusieurs spires en série. Les deux extrémités de cet ensemble de spires sont connectées à deux lames différentes du collecteur. Pour que l'enroulement forme un système fermé, on connecte le commencement de chaque section à la fin de la section précédente.

I.5.1.2 Pas d'enroulement au collecteur :

Les pas au collecteurs est la distance Y_c entre les lames du collecteur auxquelles est connectée une section. Ce pas est mesuré en nombre d'intervalles entre lames du collecteur [5].

La Fig.I-6 montre deux coupes de deux moteurs avec un pas au collecteur différent. La Figure 1.6.a montre une section liée entre les lames 3 et la lame 14. On peut compter 11 intervalles au collecteur. La figure 1.6.b montre deux sections A et C. La section A est liée entre la lame 8 et la lame 9. On peut compter un seul intervalle au collecteur. C'est la même chose pour la section C qui est liée entre les lames 9 et 10

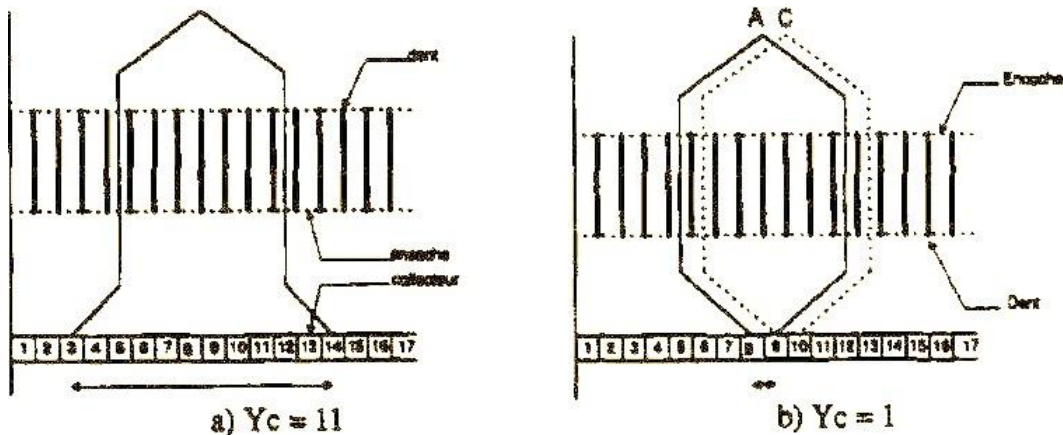


Fig I-6 Pas d'enroulement au collecteur

I.5.1.3 Pas d'enroulement :

Le pas d'enroulement est la distance entre le premier et le second coté actif d'une même section. Le pas d'enroulement correspond au nombre d'encoches contenues entre les deux cotés actifs de la section.

La Fig.I-7 montre une coupe d'un moteur ou on peut voir une spire liée entre la lame 8 et la lame 9 passant par deux encoches différentes. Le nombre d'encoches entre les deux brins de la spire correspond au pas d'enroulement [5].

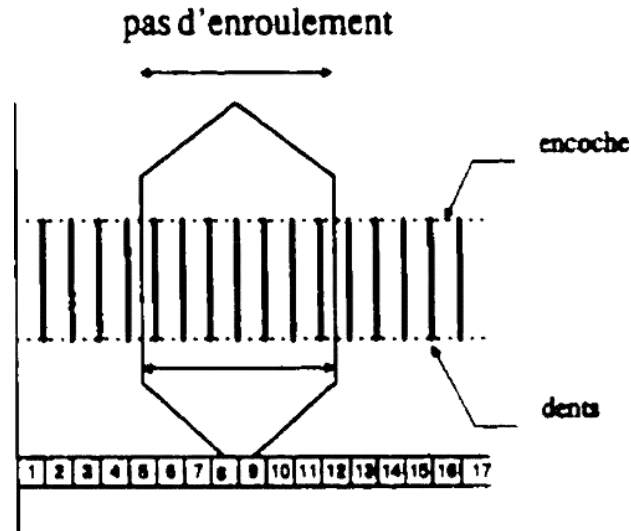


Fig I-7 Schéma montre les deux brins de la spire correspond au pas d'enroulement

I.5.2 Enroulement de type imbriqué :

Pour réaliser un enroulement imbriqué (en anglais: *lap winding*) simple, il suffit de prendre une première section de bobinage (par exemple, un bobine A) et de connecter ses extrémités à deux lame adjacentes 8 et 9 (24). La deuxième étape est de connecter les extrémités d'une deuxième section de bobinage, par exemple un autre bobine C sur qui est placés dans les encoches 6 et 13 et qui reliée aux barres et 10 du collecteur. Nous devons noter que le début de la bobine C est connecté à la fin de la bobine A. Ces deux sections de bobinage sont donc mises en série entre la lame 8 et 10. Plusieurs sections peuvent être placés de la même manière que la bobine C jusqu'à ce que l'extrémité droite de la dernière section soit connectée à la barre 8 et fermé le bobinage d'induit. Sur le pas d'enroulement est de 7 encoches.

Le bobinage imbriqué est souvent appelé bobinage parallèle. En effet, dans un enroulement imbriqué simple, le nombre de la voies d'enroulement, que l'on note a , est égal au nombre de paires des pôles P de la machine [6].

Le couplage magnétique entre les bobines est maximal mais on utilise une quantité de cuivre importante au niveau des bobines.

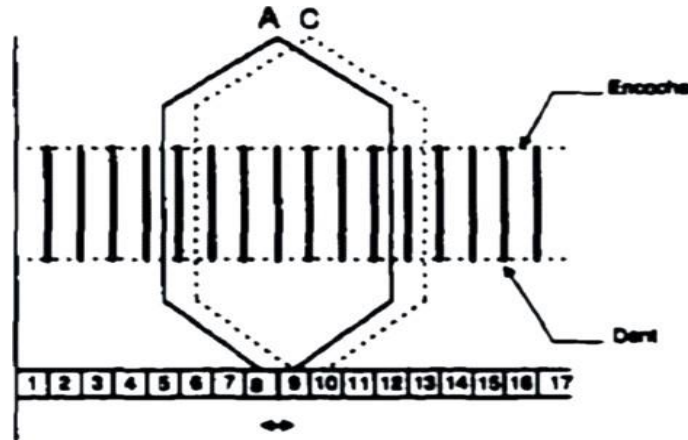


Fig I-8 Enroulement de type imbriqué

I.5.3 Enroulement de type ondulé :

Un enroulement ondulé (en anglais: *wave winding*) est appelé aussi bobinage série. Les bobines qui forment une section sont similaires à celle d'un bobinage imbriqué. C'est simplement la façon de connecter les extrémités d'une section aux lames du collecteur qui différencie le bobinage ondulé du bobinage imbriqué. Les têtes des bobines sont aussi enchevêtrées et débordent largement du circuit magnétique. *Fig.I-7* montre un exemple de connections au collecteur qui correspond à un bobinage de type ondulé. Les extrémités d'une première section de bobinage (bobine A dans l'encoche 1 et 5) sont connectées aux lames 1 et 7 du collecteur. Une deuxième section correspondant à la bobine B est placée dans l'encoche 17 et 24 et ses bornes sont connectées aux lames 7 et 13 du collecteur. Le pas au collecteur est donc de 6 intervalles. Pour produire un décalage et la mise en série des sections de bobinage dans le cas d'un enroulement ondulé simple, il faut arriver à la lame qui précède ou qui suit la lame initiale après avoir fait un tour sur le collecteur [5].

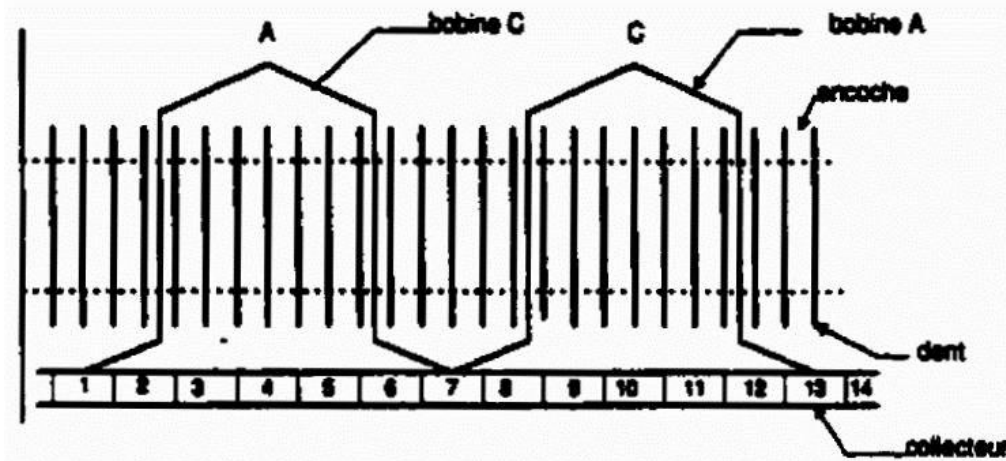


Fig I-9 Enroulement de type ondulé

Au différent d'un bobinage imbriqué, les voies d'enroulement sont constituées d'un ensemble de sections qui sont placées sous pôles différents. Cette configuration de bobinage minimisé les courants de circulation qui sont provoqués des différences au niveau du flux inducteur de chaque pôle (variation d'épaisseur de l'entrefer, variation des ampères-tours des pôles inducteur ou variation de l'alimentation). Dans un bobinage imbriqué, les courant de circulation passant par les balais. Ils produisant des pertes supplémentaires et détériorent la commutation du courant.

I.5.4 Enroulement de type concentré :

Dans le cas d'un bobinage concentré (Fig I-10), le pas d'enroulement est égal à une encoche et le pas au collecteur peut être supérieur ou égal à 1, Toutes les sections sont connectées en série. Le premier côté d'une section est voisin du deuxième côté de la section précédente. Plusieurs structures peuvent utiliser un bobinage concentré [7] [8]. Le principal avantage de ce type bobinage est son faible cout de réalisation et le réducteur du volume de cuivre. L'exemple le plus connu et le plus répandu est un moteur de jouet alimenté par une source de tension de quelques volts. Ce moteur comporte 1 encoches, 2 pôles, 3 lame sur le collecteur

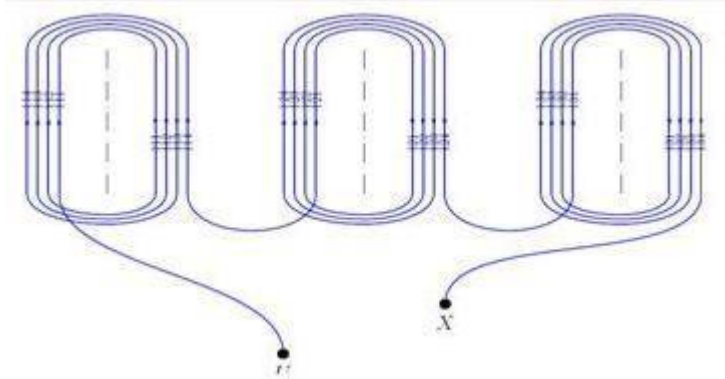


Fig I-10 Enroulement de type concentré

I.5.5 Comparaison entre les trois types de bobinages :

A niveau de tension d'alimentation égal, un bobinage de type ondulé comporte généralement moins de conducteurs qu'un bobinage imbriqué en raison de la mise en série des sections de bobinages. Cependant à nombre de section égal, les conducteurs d'un bobinage ondulé sont traversés par un plus grand courant puisque le nombre de vies d'enroulement est plus faible dans le cas du bobinage ondulé. Les conducteurs d'un bobinage ondulé doivent avoir une section de fil plus importante. On a donc un gain sur le prix puisque les grandes sections de suivre sont moins chère que les petites

Généralement, un bobinage imbriqué nécessite des connections équipotentielles sur le collecteur pour ne pas faire circuler les courants de déséquilibre par les balais. Pour le bobinage ondulé, ces liaisons ne sont pas nécessaires en raison de la mise en série sections de bobinage qui sont des pôles différents.

Il faut signaler aussi qu'un bobinage ondulé permet d'utilisé une seule paire de charbons quel que soit le soit le nombre de pôles du moteur. Cependant, il est possible aussi de réaliser un bobinage imbriqué avec de liaisons équipotentielles sur le collecteur pour minimiser le nombre de balais lorsque le nombre de pôles est élevé.

Le bobinage ondulé a certaine limite d'utilisation à cause du problème de commutation. Il est conseillé d'utiliser le bobinage imbriqué pour les courants de rotor dépassant 400 ampères.

Le bobinage concentré a l'avantage de minimiser les têtes de bobine (quantité de cuivre plus faible que dans le cas des bobinages imbriqué et ondulé). Dans le cas d'un bobinage concentré, le nombre d'encoches est du même ordre de grandeur que le nombre de pôles du

moteur. Généralement, le bobinage est très simple à réaliser. Il convient donc parfaitement pour des applications à faible cout.

A priori, l'inductance de commutation du bobinage concentré est plus importante que celle d'un bobinage imbriqué ou ondulé. C'est la raison pour laquelle on a limité jusqu'à présent l'utilisation des bobinages concentrés à des applications de faible puissance (inférieures à 200 W) et de faible cout.

Les choix entre les diverses combinaisons de bobinage peuvent se faire dans le but d'optimiser :

- La résistance totale (volume de cuivre, longueur des chignons)
- La résistance de fuite d'induit
- Le nombre des balais (pas toujours égal au nombre de pôles)
- Les connections entre balais (à priori en parallèle, avec respect des polarités)
- L'équilibrage des voies d'enroulement pour limiter l'effet des courants de circulation

I.6 Le collecteur :

Le collecteur est un ensemble de lames de cuivre isolées latéralement, formant un cylindre, et emboîtés à une extrémité de l'arbre du rotor. Chaque lame est électriquement reliée à des conducteurs de l'induit conformément à un schéma de bobinage. Il change le sens du courant (commutation) dans les conducteurs lors du franchissement de la ligne neutre, permettant ainsi aux forces d'agir dans le même sens (Fig.I.2). Le collecteur est un onduleur de courant tournant (dans le cas du moteur).

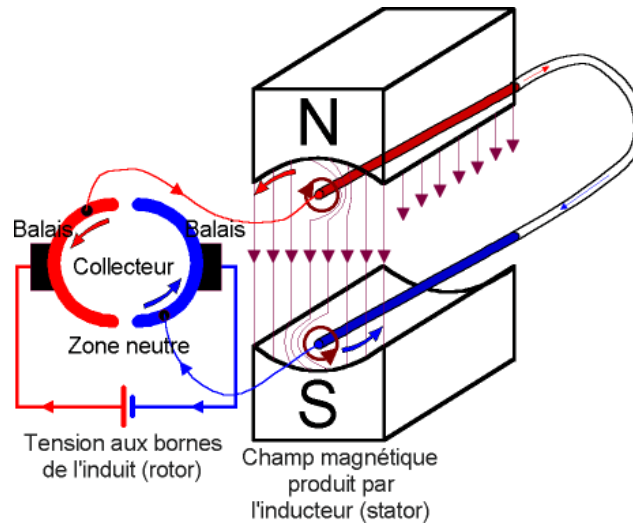


Fig I-11 Collecteur de moteur à courant continu

I.7 Principe de fonctionnement des machines à courant continu

I.7.1 Cas Générateur :

Dans un repère, un conducteur de longueur L est en mouvement à vitesse constante V , dans un champ B uniforme et orthogonal au plan de mouvement du conducteur. [9]

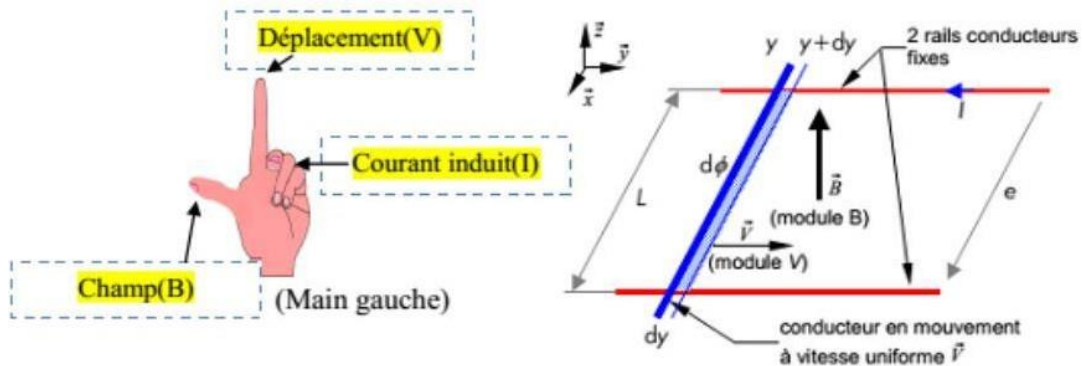


Fig I-12 Barre en translation dans le champ D [9]

Entre t et dt , la barre parcourt la distance élémentaire

$$dy = v. dt \tag{I-1}$$

Le flux coupé par le conducteur est alors :

$$d\phi = B. L. dy \tag{I-2}$$

Avec :

En appliquant (en module) la loi de Faraday, on obtient l'expression de la f.é.m. induite

$$e = \frac{d\phi}{dt} = b \cdot l \cdot v \quad (I-3)$$

Si l'induction ou la vitesse changent de sens, le sens du flux change et la f.é.m. change de signe

I.7.2 Cas Moteur :

Un conducteur (une barre) de longueur L qui est placé dans un champ magnétique \mathbf{B} et est parcouru par un courant \mathbf{I} ; est alors soumis à une force électromagnétique de Laplace dont le sens est donné par la règle des trois doigts de la main droite. La figure suivante montre le conducteur placé dans un champ magnétique et la force \mathbf{F} à laquelle il est soumis. [9]

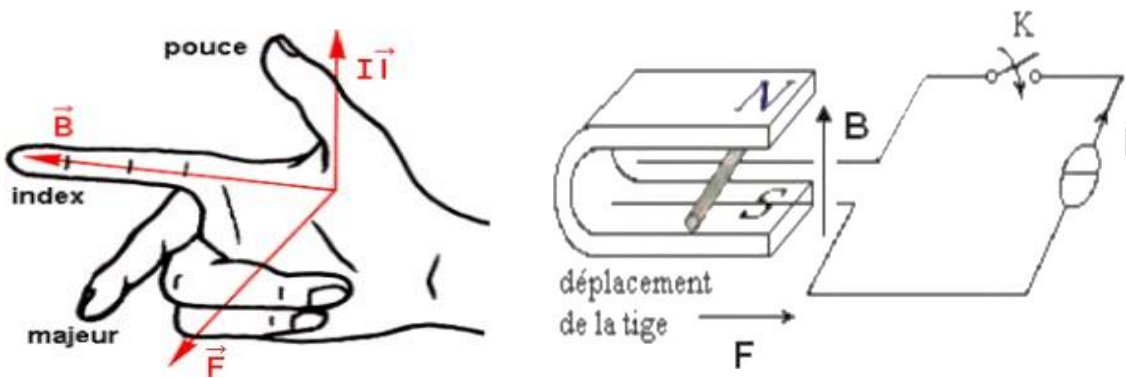


Fig I-13 Barre place dans un champ B . [9]

I.8 Les différents types de moteurs :

On distingue deux types de moteurs à courant continu :

I.8.1 Les moteurs à inducteur à aimant permanent :

Il n'y a pas de circuit inducteur, le flux inducteur est produit par un aimant permanent. Tous les moteurs à courant continu de faible puissance et les micromoteurs sont des moteurs à aimant permanent. Ils représentent maintenant la majorité des moteurs à courant continu. Ils sont très simples d'utilisation [03].

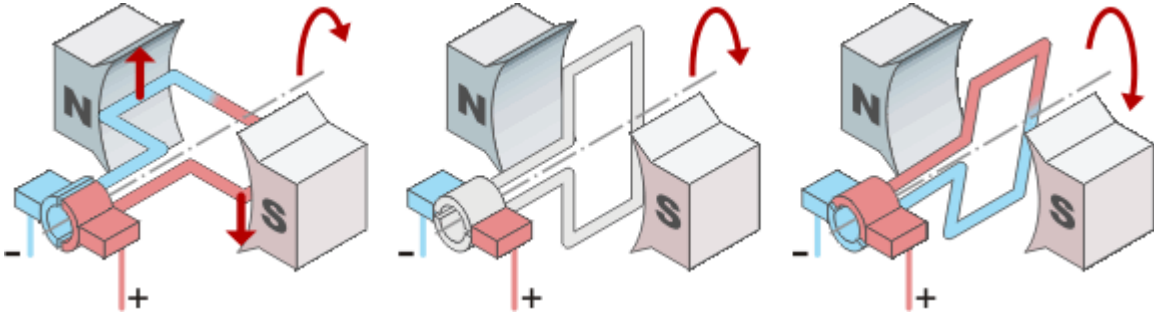


Fig I-14 Moteur à aimant permanent

I.8.2 Les moteurs à inducteur bobiné :

Il existe 4 types différents de moteurs électriques qui sont classés en fonction du type d'excitation qui est employé, qui sont : excitation séparé, excitation série, excitation shunt, excitation composée ou compound

I.8.2.1 Excitation séparée :

On dispose d'un moteur à courant continu dont l'excitation est indépendante comme le montre la Fig I-15 où l'induit et l'inducteur sont alimentés séparément par deux sources de tensions différentes. [9]

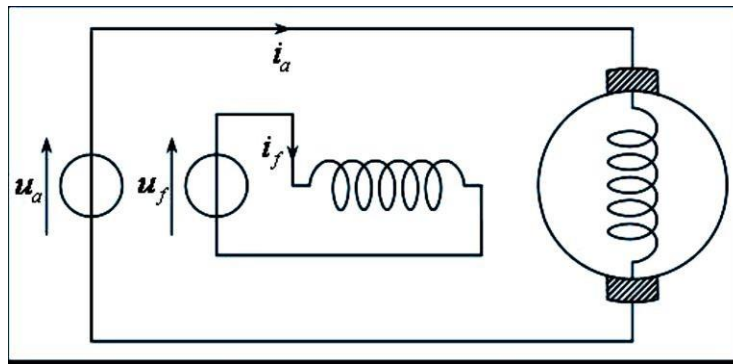


Fig I-15 Schéma d'une machine à courant continu à excitation séparé.

- Particularités :
 - ✓ Moteur autorégulateur de vitesse;
 - ✓ La vitesse est relativement constante quel que soit la charge;
 - ✓ Le courant crée un champ et une quantité de champ à travers une spire donne un flux. Si la tension (V_e) est constante, le courant d'excitation (I_e) est constant et le flux (Φ) est constant;

- ✓ Dans ces conditions, la force contre électromotrice (E) ne dépend que de la fréquence (n) de rotation;
- ✓ Donc la fréquence de rotation (n) est proportionnelle à la tension (V) d'alimentation du moteur.
- Emplois :
 - ✓ Entraînement de machines-outils (Remplacé par le moteur asynchrone triphasé).

Donc le couple utile (Tu) est proportionnel à l'intensité du courant d'alimentation du moteur. Pour un moteur à excitation séparée, le flux (Φ) est constant donc la fréquence de rotation (n) est proportionnelle à la tension d'alimentation (V) :

$$n = \frac{E}{K\phi} = \frac{V - R_a I}{K\phi} = K \cdot V \quad (I-4)$$

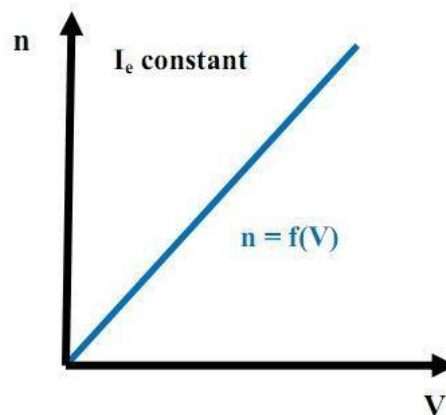


Fig I-16 Caractéristiques $n=f(V)$ d'un moteur à excitation séparée

Et le couple (Tu) est proportionnel à l'intensité du courant d'alimentation (I) :

$$T = \frac{E_a I}{\Omega} = K\phi \cdot I = K' \cdot I$$

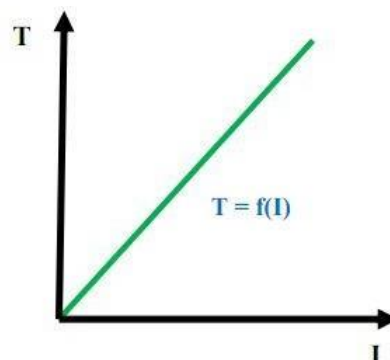


Fig I-17 Le couple en fonction de courant d'alimentation

I.8.2.2 Excitation série :

L'inducteur est traversé par le courant d'induit, il comporte peut de spires de grosses sections. Le circuit électrique est représenté par la figure suivante :

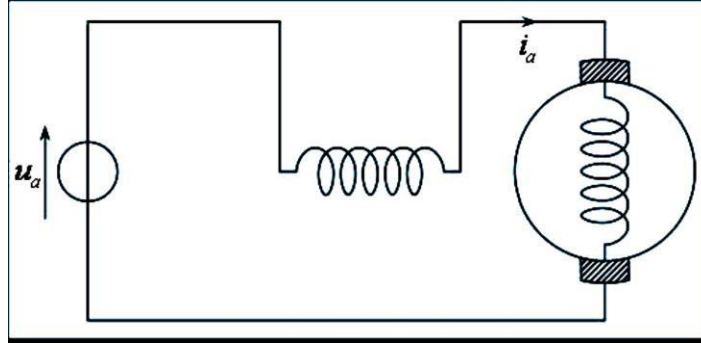


Fig I-18 Schéma électrique d'un Moteur à excitation série.

- Particularités :
 - ✓ Moteur autorégulateur de puissance.
 - ✓ Possède un très grand couple de démarrage
 - ✓ Mais risque l'emballement à vide.
 - ✓ La vitesse décroît quand la charge
 - ✓ Le flux n'est plus constant mais proportionnelle à (I).
 - ✓ Dans ces conditions, la force contre électromotrice (E) dépend de la fréquence (n) de rotation et de l'intensité du courant (I).
 - ✓ Donc la fréquence de rotation (n) est proportionnelle à la tension (V) et au courant (I) d'alimentation du moteur.
- Emplois :
 - Les entraînements tel que: les treuilles électrique, les grues, levage...

Pour un moteur à excitation série, le flux (Φ) n'est pas constant mais proportionnel à (I) donc la tension d'alimentation (V) est proportionnelle à la fréquence de rotation n et à l'intensité de courant (I) [11] :

$$E = k. n. N. \quad (I-5)$$

$$\Phi = K. \Omega. I \quad (I-6)$$

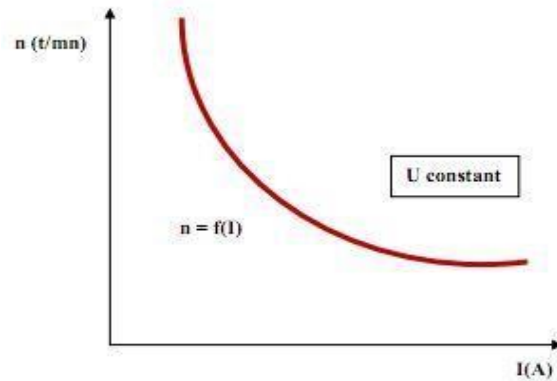


Fig I-19 Caractéristique $n=f(I)$ de vitesse d'un moteur série

Et le couple (T) est proportionnel au carré de l'intensité du courant d'alimentation (I).

$$T = \frac{E \cdot I}{\Omega} = K \cdot I^2 \quad (I-7)$$

Avec $U = \text{Constant}$ et $I = \text{constant}$

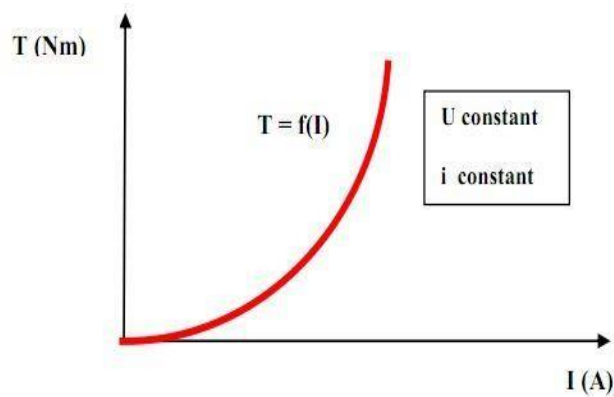


Fig I-20 Caractéristique de couple d'un moteur série

I.8.2.3 Excitation shunt :

L'enroulement d'excitation est connecté en parallèle sur l'alimentation du moteur, il possède les mêmes propriétés que le moteur à excitation séparée du fait que, dans les deux cas, l'inducteur constitue un circuit extérieur à celui de l'induit. Le circuit électrique est représenté par la suivante :

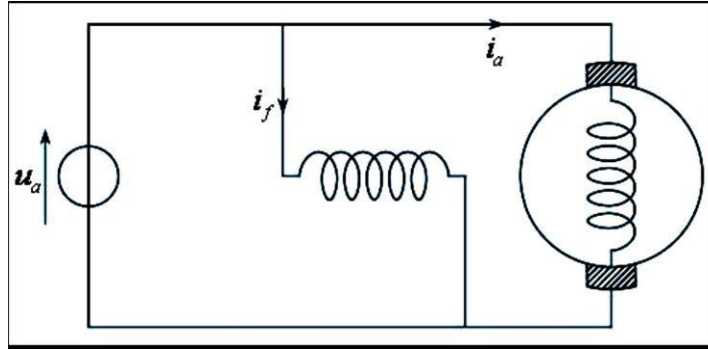


Fig I-21 Schéma électrique d'un Moteur à excitation shunt.

- Particularités
 - Ne s'emballé pas;
 - Meilleur couple de démarrage.
- Emplois
 - Appareils de levage et de manutention
 - Utilisé aussi en excitation indépendante excitation dérivation.

I.8.2.4 Excitation composée ou compound

On trouve une partie des enroulements inducteurs en série et une partie en parallèle.

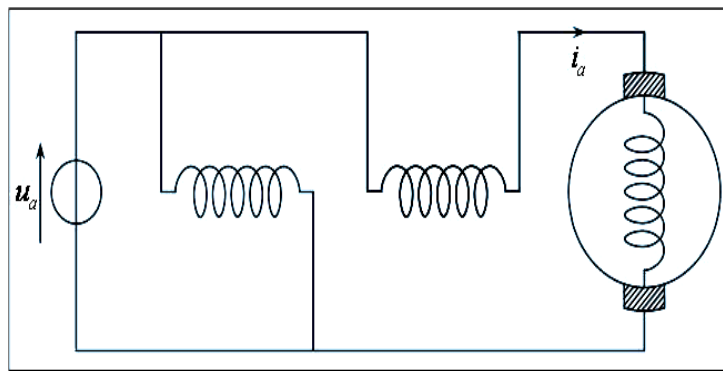


Fig I-22 Schéma d'une machine à courant continu à excitation composée.

On distingue deux types de branchements :

Courte dérivation : L'enroulement est shunté directement avec l'induit.

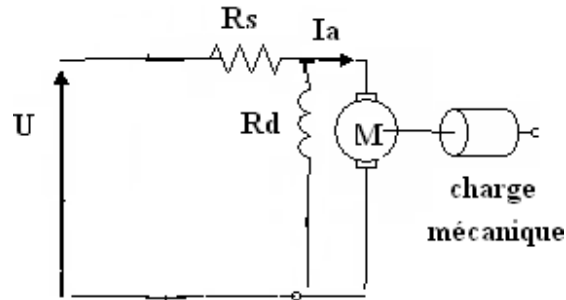


Fig I-23 Courte dérivation

Long dérivation : L'enroulement est shunté en parallèle avec l'induit.

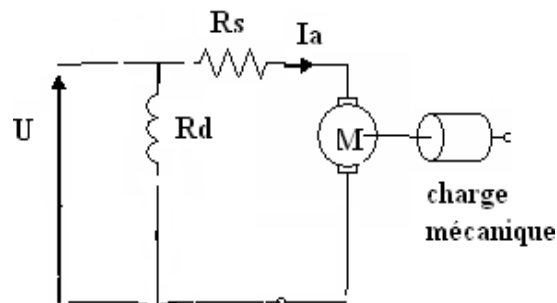


Fig I-24 Long dérivation

- **Les avantages et les inconvénients des machines à courant continu**

Les machines à courant continu présentent des avantages très importants surtout les moteurs. Ils sont moins polluants et moins bruyants, ils démarrent seuls et facilement, facile à l'emploi dans le cas de démarrage fréquent, régularité du couple utile, possibilité d'inversion du sens de rotation sans utilisation de dispositifs mécaniques.

Les machines à courant continu ont des avantages mais aussi des inconvénients. Ces inconvénients sont :

Elles ont une partie fragile (considérons comme point faible des machines à courant continu), cette partie est le collecteur et les ballais, il faut changer les ballais de temps en temps pour assurer le meilleur contact. Le prix d'un moteur à courant continu est plus de deux fois celui d'un moteur triphasé asynchrone de même puissance.

I.9 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de rappeler les différents éléments qui constituent une machine à courant continu, le principe de fonctionnement et les différents types selon le mode d'excitation. Dans le chapitre suivant nous étudierons la commande de cette machine.

Chapitre II :

**Commande des machines à
courant continu**

II.1 Introduction

L'utilisation de Commande des machines à courant continu pour des différentes applications devient de plus en plus importante.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les critères de dimensionnement et choix d'une machine à courant continu. Ensuite, nous donnerons une explication des différents manœuvres de commande (démarrage, freinage, inversion de sens de rotation et variation de vitesse). En fin, nous donnerons une description détaillée du type de convertisseurs continu-continu (hacheur).

II.2 Choix d'une machine à courant continu :

II.2.1 Choix d'un moteur à courant continu pour un service déterminé

Ce sont les caractéristiques de vitesse et de couple qui fixent le choix du type de moteur convenant à un emploi déterminé :

II.2.1.1 Moteurs à excitation indépendante :

La séparation complète des deux circuits d'inducteur et d'induit donne à ces moteurs une grande souplesse, mais complique leur installation. On ne les emploie que pour des puissances de plusieurs centaines de chevaux, par exemple pour la commande des laminoirs, la manœuvre des cages d'extraction dans les mines ; Souvent leur excitation est constante. On applique aux bornes de l'induit une tension dont le sens peut changer, dont la valeur est réglable. On obtient ainsi une vitesse qui est réglable dans de très grandes limites, dans l'un ou l'autre sens de rotation.

II.2.1.2 Moteurs shunt :

Leur vitesse est pratiquement constante et réglable, leur couple est de valeur moyenne constante tant au démarrage qu'en marche normale. Ils servent pour la commande de machines – outils, de pompes centrifuges, de tous appareils dont le couple de démarrage est relativement faible. Certains ont une puissance de plusieurs milliers de chevaux.

II.2.1.3 Moteurs compound :

Leur vitesse diminue quand la charge augmente ; leur couple au démarrage est élevé. Ils conviennent pour entraîner des compresseurs, des pompes alternatives, des appareils démarrant en charge avec un couple important.

II.2.1.4 Moteurs série :

Leur vitesse est très variable, leur couple de démarrage est grand. Ce sont des moteurs de traction pour les tramways, les locomotives et les camions électriques, les tracteurs de bateaux, les appareils de levage. On ne les emploie pas quand ils risquent de fonctionner à vide ou à charge réduite. On en construit jusqu'à une puissance de quelques centaines de chevaux.

II.3 Démarrage

On ne peut brancher directement à la source d'alimentation que des moteurs de faible puissance. Pour les moteurs puissants, le courant au démarrage peut atteindre des valeurs très élevées de l'ordre de (10 à 100 fois) fois le courant nominal du moteur.

En shunt le courant est : $I_d = \frac{U}{R_a}$

et en série le courant égale $I_d = \frac{U}{R_a + R_s}$ ce qui entraînerait :

- un échauffement instantané de l'induit très élevé ;
- une chute de tension inadmissible sur le réseau d'alimentation ;
- un couple de démarrage lui aussi très supérieur au couple nominal et risquant de rompre l'accouplement. [9]

II.4 Freinage

Si on coupe l'alimentation de l'induit, d'un moteur alimenté par une tension U_n et tournant à une vitesse Ω , le moteur ne s'arrête pas instantanément. Il décélère mais il continue à tourner sous l'effet de l'énergie cinétique emmagasinée dans la partie tournante du système d'entraînement (Fig II-1).

Pour assurer un arrêt rapide, on doit appliquer un couple de freinage électromagnétique dont le principe consiste à faire circuler dans l'induit un courant de sens approprié. [9]

- Freinage dynamique.
- Freinage par inversion

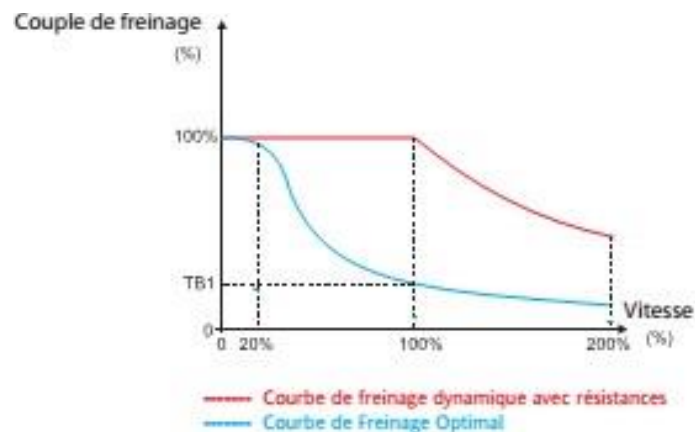


Fig II-1 Courbe de couple de freinage dynamique et optimal de MCC

II.4.1 Freinage dynamique :

Le principe de freinage dynamique consiste à brancher une résistance R_f aux bornes de l'induit lors de l'arrêt. Le branchement de cette résistance aux bornes de l'induit assure la circulation d'un courant d'induit dans le sens inverse. Il en résulte un couple de freinage.

$$I_a = \frac{U-E}{R_a} \quad (II-1)$$

$$E = K \cdot \Phi \cdot \Omega \quad (II-2)$$

II.4.2 Freinage par inversion :

On peut arrêter un moteur encore plus rapidement en utilisant le freinage par inversion, cette méthode consiste à inversion brutalement le sens du courant dans l'induit en interversion les bornes de la source. En marche normale (moteur), le courant I_a absorbée par l'induit [9]

$$I_a = \frac{U-E_c}{R_a} \quad (II-3)$$

I est 50 fois supérieur à I_n , dangereux même pour les protections, on le limite par R , dans ce cas il faut ouvrir immédiatement l'interrupteur si non le moteur tourne dans l'autre sens, car même pour $U=0$, il reste le courant

$$I_a = \frac{E_c}{R_a} \quad (II-4)$$

II.5 Inversion de sens de rotation

II.5.1 Principe de l'inversion de sens :

➤ L'inversion de sens s'effectue en :

- 1- Inversant le sens du courant circulant dans l'induit pour un MCC à aimant permanent,
- 2- Inversant le sens du courant circulant dans l'induit ou dans l'inducteur pour un MCC à bobinages.

On étudiera uniquement le cas où l'inversion de sens s'effectue en inversant le sens du courant circulant dans l'induit pour un MCC à aimant permanent :

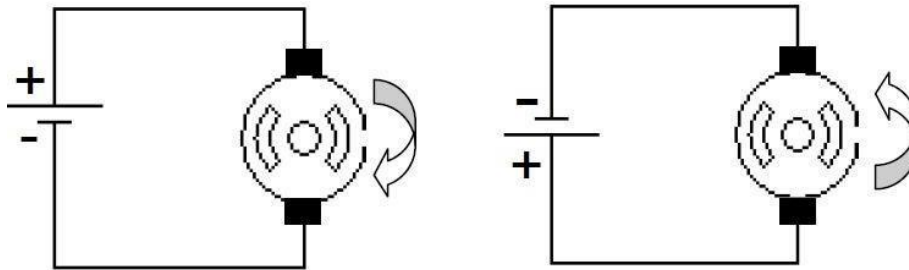


Fig II-2 Principe général de l'inversion de sens de rotation

II.5.2 Commande de l'inversion de sens :

On utilise un « pont en H ». Le moteur est au milieu de ce pont d'interrupteurs.
 Rotation sens 1 : SW1 et SW4 sont fermés, rotation sens 2 : SW2 et SW3 sont fermés.

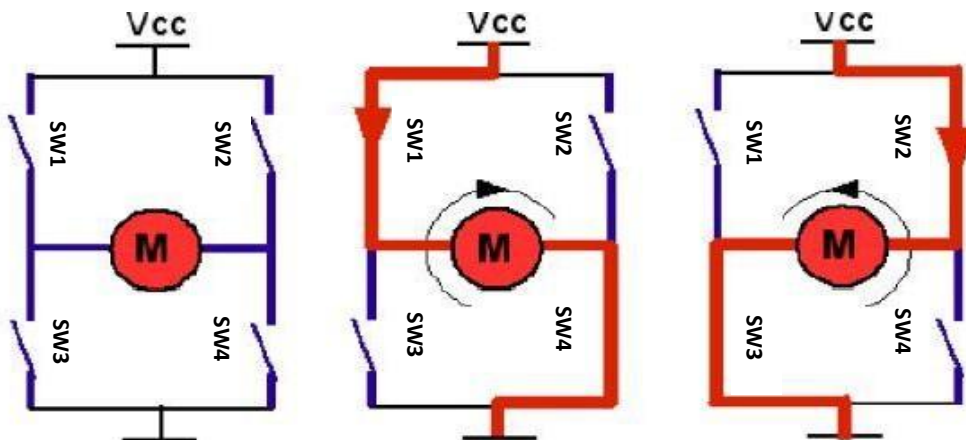


Fig II-3 Principe de commande de l'inversion de sens de rotation

II.6 Variation de vitesse

Pour faire varier la vitesse d'un moteur à courant continu, on peut agir sur la tension aux bornes de l'induit. La tension d'induit est directement proportionnelle à la vitesse de rotation. La puissance varie mais le couple reste constant. On dit alors que l'on fait de la variation de vitesse à couple constant

II.7 Les convertisseurs statiques :

Un convertisseur statique est un système permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné. Suivant le type de machine à commander et suivant la nature de la source de puissance (monophasée ou triphasée), [12].

On distingue plusieurs types de convertisseurs statiques :

Gradateur (alternatif – alternatif);

Redresseur (alternatif -continu);

Onduleur (continu - alternatif);

Hacheur (continu - continu).

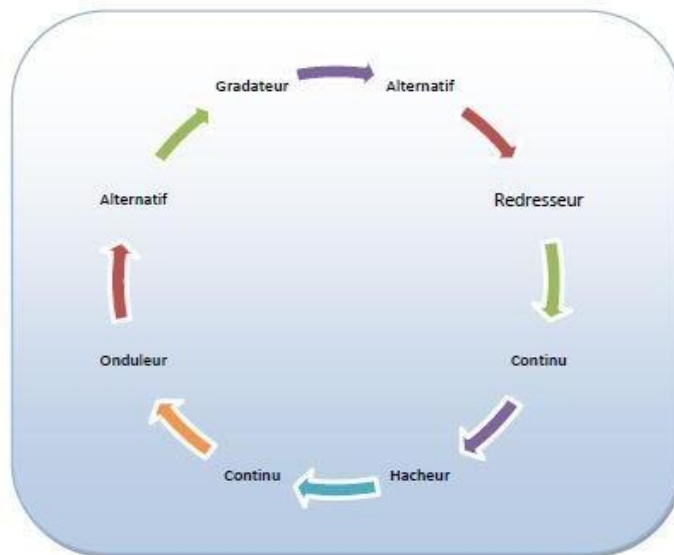


Fig II-4 Diagramme des divers types de convertisseur statique

II.8 Les convertisseurs continu-continu :

Le hacheur est un dispositif permettant d'obtenir une tension continue de valeur moyenne réglable à partir d'une source de tension continue fixe (batterie d'accumulateurs ou bien pont redresseur - alimenté par le réseau de distribution).

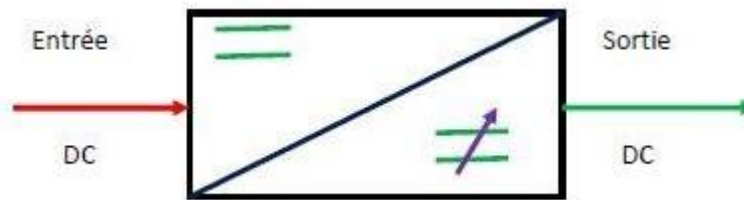


Fig II-5 Principe de convertisseur DC-DC

Un hacheur peut être réalisé à l'aide des interrupteurs électroniques commandables à la fermeture et à l'ouverture telle que les transistors bipolaires ou IGBT ou les thyristors GTO.

II.8.1 Hacher série (abaisseur de tension)

a) Charge (R) :

On considère le montage :

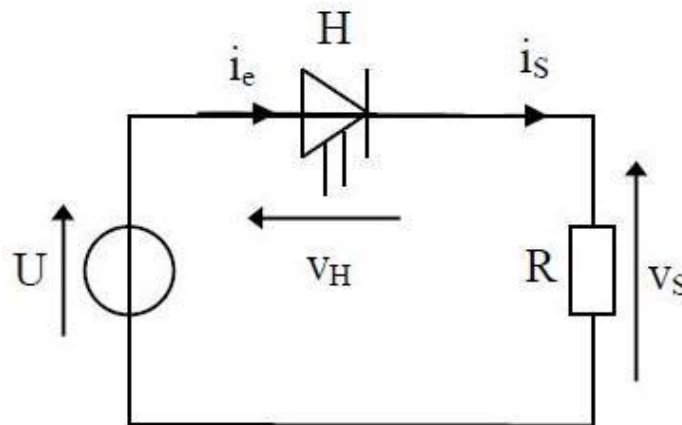


Fig II-6 Schéma électrique du hacheur série (charge R)

H : interrupteur unidirectionnel parfait. L'interrupteur électronique H est commandé par un signal V_c périodique de période T, de rapport cyclique $\alpha = \frac{t_f}{T}$ (durée de fermeture sur la période), élaboré par un circuit électronique isolé du hacheur. L'état haut de ce signal commande la fermeture de H, l'état bas, sa fermeture.

➤ **Analyse du fonctionnement :**

- $0 < t < t_1 = \alpha T$: H est fermé
 - $V_H = 0$
 - $V_S = U = Ri_S = Ri_e$
 - $i_S = \frac{U}{R}$
- $t_1 < t < T$: H est ouvert
 - $i_S = i_e = 0$
 - $V_S = 0 = Ri_S = Ri_e$
 - $V_H = U$

➤ **Chronogrammes :**

$U = 100 \text{ v}$; $R = 100 \Omega$; $\alpha = 0.6$ et $T = 1 \text{ ms}$

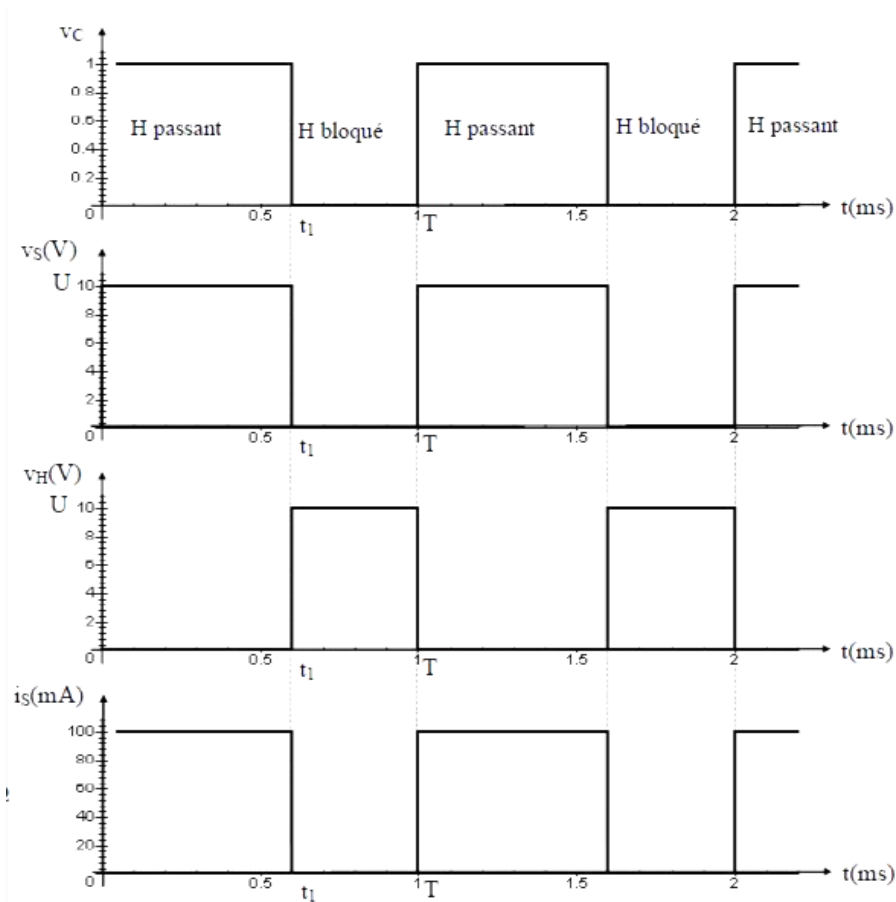


Fig II-7 Chronogramme du hacheur série (charge R)

➤ **Valeur moyenne de la tension V_c :**

$$V_s \text{ moy} = \frac{1}{T} \int_0^T V_S(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} U dt + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T 0 dt \quad (\text{II-5})$$

$$V_s \text{ moy} = \frac{U}{T} (\alpha T - 0) = \alpha \cdot U \quad (\text{II-6})$$

➤ **Traçons l'allure de $V_s = f(\alpha)$:**

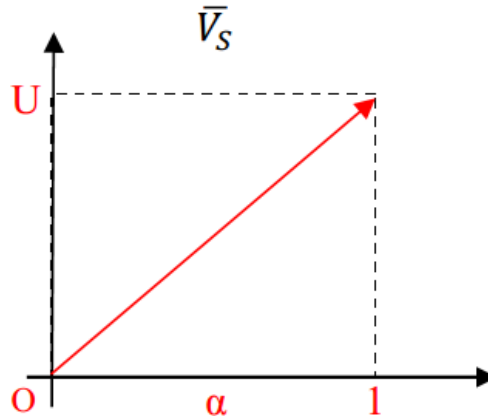


Fig II-8 La valeur moyenne en fonction de rapport cyclique (α)

b) Charge active : R, L, E :

On suppose H et DRL parfaits

DRL : diode de roue libre

L suffisamment grand pour avoir i_s ininterrompu

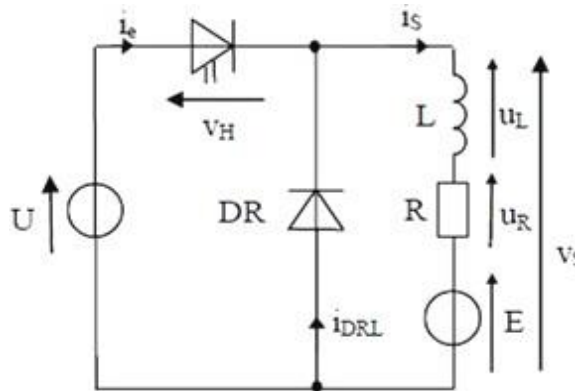


Fig II-9 Schéma électrique du hacheur série (charge RLE)

E est capable de recevoir i_s (batterie ou moteur à courant continu)

H est commandé par un signal V_c tel que :

$$\begin{cases} 0 < t < \alpha T : V_c \text{ à l'état haut} \rightarrow \mathbf{H} \text{ fermé} \\ \alpha T < t < T : V_c \text{ à l'état bas} \rightarrow \mathbf{H} \text{ ouvert} \end{cases}$$

➤ **Analyse du fonctionnement :**

• **$0 < t < \alpha T$:** H est fermé

- La diode de roue libre DRL est polarisée en inverse \rightarrow DRL bloquée $\rightarrow i_{DRL} = 0$
- $i_e = i_s$
- $V_H = 0$
- $U = V_S$

L'intensité du courant dans la charge $i_s(t)$ vérifie l'équation différentielle suivante :

$$U = E + R \cdot i_s + L \frac{di_s}{dt} \quad (II-7)$$

• **$\alpha T < t < T$:** H est ouvert

- La diode de roue libre DRL assure la continuité du courant dans la charge et protégé H contre les surtensions \rightarrow DRL passante $\rightarrow i_{DRL} = i_s$
- $i_e = 0$
- $V_H = U$
- $U = 0$

L'intensité du courant dans la charge $i_s(t)$ vérifie l'équation différentielle suivante :

$$0 = U = E + R \cdot i_s + L \frac{di_s}{dt} \quad (II-8)$$

➤ **Hypothèse simplificatrice :**

En général, R est très faible et on suppose la chute de tension U_r nulle.

Ainsi :

- l'équation (II-7) devient : $U = E + L \frac{di_s}{dt}$

$$\text{soit: } di_s = -\frac{U-E}{L} dt \quad \rightarrow \quad i_s(t) = -\frac{U-E}{L}t + I_S$$

I_S : Valeur de l'intensité dans la charge lors de la fermeture de H en régime établi

- l'équation (II-8) devient : $0 = U = E + L \frac{di_s}{dt}$

$$\text{soit: } di_s = -\frac{E}{L} dt \quad \rightarrow \quad i_s(t) = -\frac{E}{L}(t - \alpha T) + I_S$$

I_S : valeur de l'intensité dans la charge lors de l'ouverture de H en régime établi

Remarque :

I on néglige R, on assimile les portions de courbes réelles (exponentielles) à des droites.

➤ **Chronogrammes.**

Pour $E=6V$, $R \approx 1+12 \Omega$, $L=0,4H$, $U=15V$ et $f=500Hz$ Pour $\alpha = 0,6$,

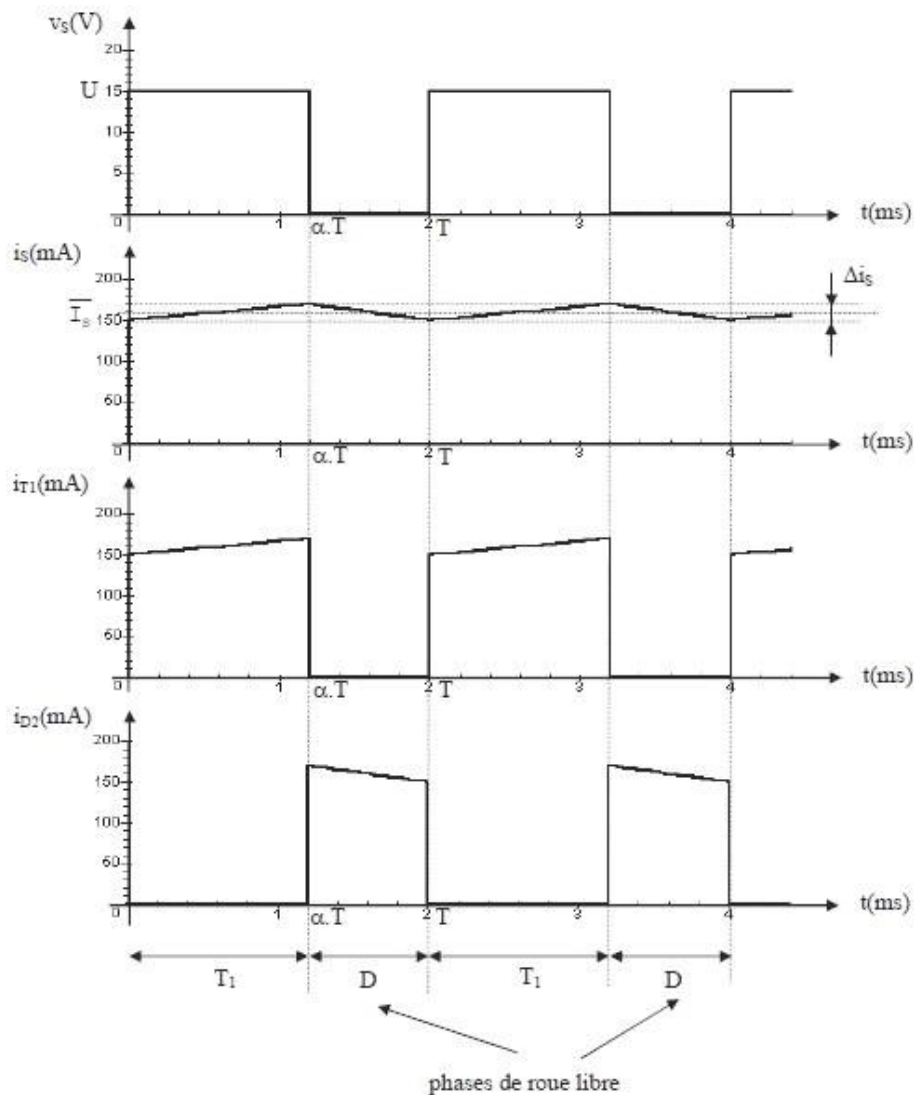


Fig II-10 Chronogramme du hacheur série (charge RLE)

➤ **Valeur moyenne du courant dans la charge :**

On a la relation suivante entre les valeurs moyennes :

$$V_S = RI_S + E + L \frac{di_S}{dt} \quad (\text{II-9})$$

Or $V_S = \alpha \cdot U$ et sur une période $L \frac{di_S}{dt} = 0$ donc :

$$I_S = \frac{\alpha \cdot U - E}{R} = \frac{I''_s + I'_s}{2} \quad (\text{II-10})$$

➤ **Ondulation du courant dans la charge:**

L'ondulation du courant est $i_s = \frac{I''_s + I'_s}{2}$

On montre à partir des relations du (II-10) que : $\Delta i_s = \frac{\alpha \cdot (1-\alpha) U}{2LF}$

Elle est maximale pour $\alpha = 0.5$: $\Delta i_{smax} = \frac{U}{8LF}$

II.8.2 Hacheur parallèle (élevateur de tension)

a) Intérêt du hacheur élevateur :

Si on considère un moteur DC entraînant une lourde charge (train par exemple). Lors d'une phase de freinage il est intéressant de récupérer l'énergie mécanique en la transformant en énergie électrique au lieu de la transformer en chaleur pour être dissipée dans l'atmosphère. Lors de la phase de freinage, la machine DC fonctionne en génératrice mais sa f.é.m. (qui décroît car la vitesse diminue) est inférieure à la tension U qui alimentait le moteur. Pour assurer le transfert d'énergie électrique de la génératrice vers le réseau, il faut un convertisseur continu-continu élevateur de tension c'est-à-dire un hacheur parallèle. [13]

b) Analyse du fonctionnement :

On suppose que D, H et L sont parfaits ($r = 0\Omega$)

H est commandé périodiquement par un signal

Tel que : $\begin{cases} H \text{ fermé pour } 0 \leq t \leq \alpha T \\ H \text{ ouvert pour } \alpha T \leq t \leq T \end{cases}$

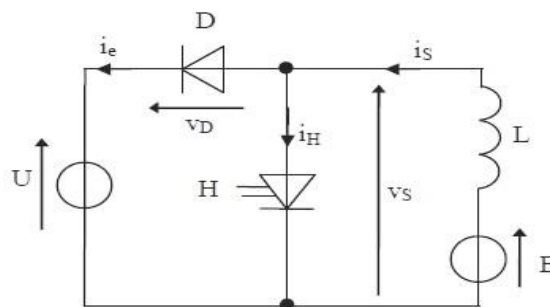


Fig II-11 Schéma électrique du hacheur parallèle

- Pour $0 \leq t \leq \alpha T$:

$$\begin{aligned} i_0 &= \mathbf{0} \\ \text{H est fermée D est bloquée donc : } \{ i_H &= i_S \\ V_S &= \mathbf{0} \end{aligned}$$

La loi d'ohm se traduit par la relation :

$$E = L \cdot \frac{di_S}{dt} \quad (II-11)$$

équation différentielle du premier ordre de solution :

$$i_S = \frac{E}{L} \cdot t + I'_S \quad (II-12)$$

L'intensité i_S croît de sa valeur minimale I_a sa valeur maximale I_a

L'inductance L accumule de l'énergie

- Pour $\alpha T \leq t \leq T$:

$$\begin{aligned} i_0 &= i_S \\ \text{H est ouvert et D est passante donc : } \{ i_H &= \mathbf{0} \\ V_S &= U \end{aligned}$$

On peut écrire : $V_S = U = E - L \frac{di_S}{dt} > E$

$$\text{et : } \frac{di_S}{dt} = -\frac{U-E}{L} < \mathbf{0}$$

équation différentielle du premier ordre de solution : $i_S = -\frac{U-E}{L} \cdot (t - \alpha T) + I_S$

c) Chronogrammes :

$U = +10V$, $L = 1H$ et $E = 6V$ (accumulateur).

Pour $\alpha = 0,4$ et $f = 500Hz$.

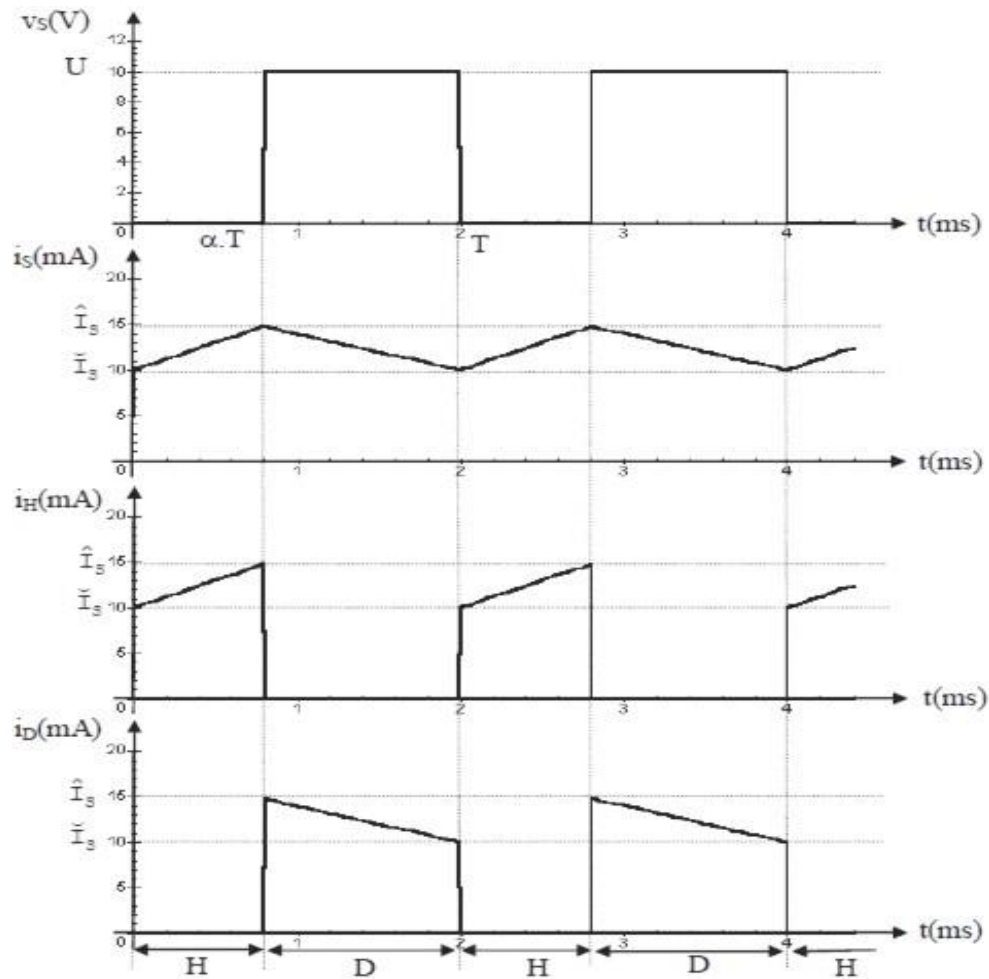


Fig II-12 Chronogramme d'un hacheur parallèle (tension, courant)

d) Valeur moyenne de la tension V_s :

On a d'une part: $V_s = E - L \frac{di_s}{dt}$, ce qui s'écrit en moyenne sur une période

$$V_s = E$$

Or, $V_s = (1 - \alpha) \cdot U$ donc : $U = \frac{E}{1 - \alpha} \geq E$

Remarques :

- Il y a bien transfert de l'énergie de l'accumulateur de f.é.m. E (ou du moteur) vers le récepteur de tension U fixe $> E$.
- L'intensité i_s du courant est limitée par les résistances négligées.

II.8.3 Hacheur réversible en courant :

a) Schéma – principe :

Ce dispositif rassemble un hacheur série (H_S, D_S) abaisseur de tension et un hacheur parallèle (H_P, D_P) élévateur de tension.

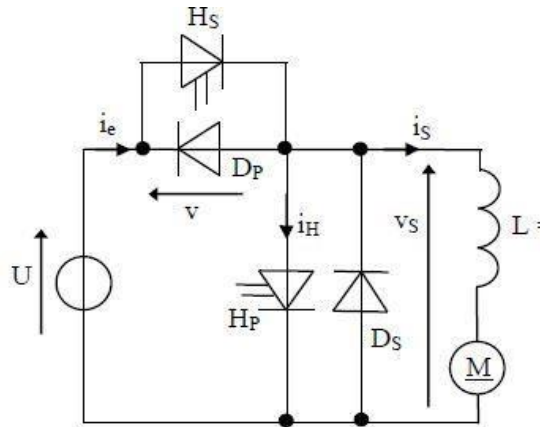


Fig II-13 Schéma de l hacheur réversible en courant (série + parallèle)

Quand on commande le hacheur série, le hacheur parallèle étant inactif, la machine à courant continu fonctionne en moteur ($i_s > 0$), il y a transfert d'énergie électrique de la source U vers la charge.

Quand on commande le hacheur parallèle, le hacheur série étant inactif, c'est la machine à courant continu fonctionnant en génératrice qui débite dans la source ($i_s < 0$), permettant ainsi la récupération d'énergie lors des phases de freinage.

Ce type de hacheur permet des phases de traction et de freinage sans réversibilité de la vitesse (tension v_s unidirectionnelle) mais avec réversibilité de couple (réversibilité de courant) → fonctionnement de la machine dans les quadrants 1 et 4 pour lesquels $\Omega > 0$. [13]

a) Analyse du fonctionnement :

H_S fermé durant αT

H_P fermé durant $(1 - \alpha)T$

$$V_s = U \text{ pour } 0 < t < \alpha T$$
 Quel que soit le courant i_s , on a : $\{V_s = 0 \text{ pour } \alpha T < t < T\}$

$$E = aU$$

b) Chronogrammes.

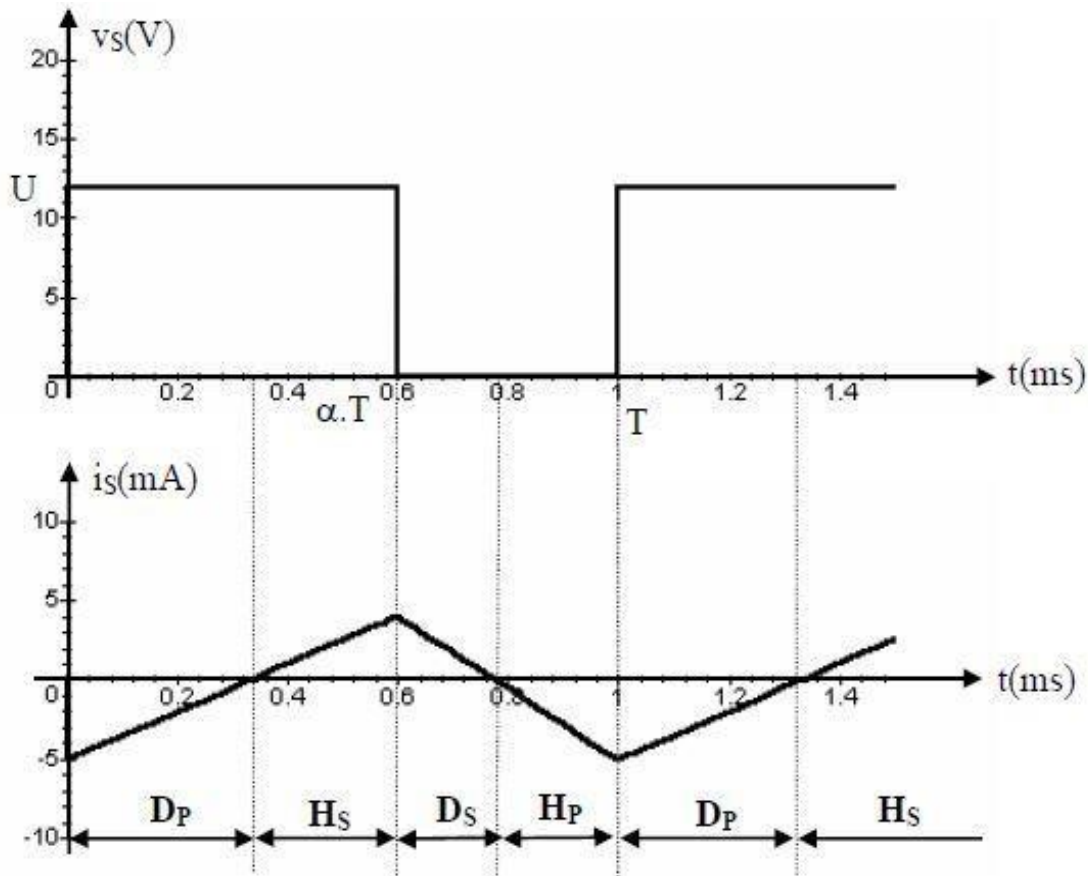


Fig II-14 Chronogramme de l'hacheur réversible en courant (série + parallèle)

II.8.4 Hacheur en pont ou 4 quadrants :

Cet hacheur est à la fois réversible en courant et en tension.

Il peut alimenter un moteur DC afin de le faire fonctionner dans les quatre quadrants du plan couple-vitesse c'est-à-dire, le faire tourner dans les deux sens de rotation et autoriser la récupération d'énergie pendant les phases de freinage

Chaque interrupteur électronique est associé à une diode dite de récupération. Elles permettent la circulation du courant lorsque l'interrupteur est commandé et que le courant est dans le sens opposé au sens autorisé par l'interrupteur électronique.

Pour les interrupteurs électroniques, il faut utiliser des semi-conducteurs à ouverture et fermeture commandées (transistors, thyristors, ...).[13]

U est une source de tension réversible.

a) Schéma :

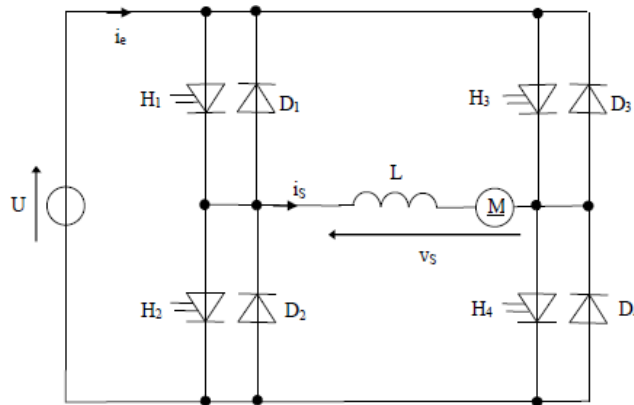


Fig II-15 Schéma électrique du hacheur en pont ou 4 quadrants

Inconvénients :

- 2 fois plus de commutations par période ;
- Variations de la tension de sortie V_s 2 fois plus grande, ce qui augmente l'ondulation du courant i_s .

Avantage :

Inversions rapides de la tension et du courant.

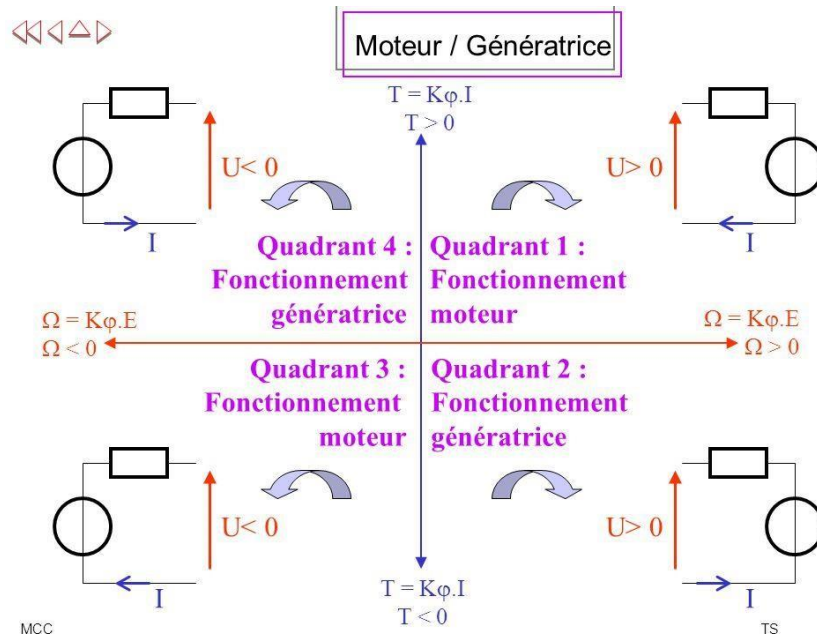


Fig II-16 Présentation de quatre quadrants de fonctionnement de MCC

II.9 Conclusion :

Ce chapitre nous permis de présenter les normes de choix d'un moteur à courant continu, ainsi que leur démarrage, freinage, variation de vitesse et sens de rotation. La présentation des différents types des convertisseurs continu-continu, ainsi que les principales applications de chaque type surtout celles du hacheur 4Q qui peut être employé pour deux cas d'entraînement des moteurs à courant continu

Chapitre III :

***Modélisation continue et discrète de
l'ensemble convertisseur-machine à
courant continu***

III.1 Introduction

La machine à courant continu peut être modélisée par un groupe d'équations électrique, électromécanique et mécanique. Ces trois groupes d'équations nous permettront de mieux comprendre le fonctionnement réel de la machine. En général ces équations sont complexes. En effet, la répartition du flux, des enroulements et la géométrie propre de la MCC rendent son modèle difficile à mettre en œuvre. Cependant, l'adoption de certaines hypothèses simplificatrices permet de contourner cette difficulté. Dans ce chapitre nous allons présenter les procédures des modulations de la MCC et le hacheur 4 quadrants en vue de leurs simulations.

III.2 Modèle du moteur à courant continu

Les simulations présentées dans ce travail ont été réalisées sous l'environnement Matlab/Simulink). On prend comme charge une Machine à Courant Continu (MCC) à excitation séparée, équivalente à R, L et E.

III.2.1 Hypothèses simplificatrices

Lors de la modélisation de la machine utilisée, on admet quelques hypothèses permettant une simplification du traitement.

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligeable;
- Machine d'une construction symétrique;
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau (effet pelliculaire);
- L'excitation des enroulements inducteurs est constante et égale à la valeur nominale;
- Les matériaux magnétiques ne sont pas saturés, ceci permet d'exprimer le flux comme une fonction linéaire du courant;
- On suppose que les pertes de fer hystérésis et courants de Foucault sont nulles;
- La réaction magnétique de l'induit n'est pas considérée;
- Tous les enroulements formant l'induit de la machine sont représentés par une résistance et une inductance. Leurs valeurs ne changent pas durant le fonctionnement.

III.2.2 Équations du modèle électrique et mécanique :

III.2.2.1 Equations électriques:

- Equation l'induit U_s :

$$U_s(t) = E(t) + Ri_s(t) + L \frac{di_s(t)}{dt} \quad (III-1)$$

III.2.2.2 Equation mécanique :

- Le couple électromagnétique C_e :

$$C_e(t) = C_r i_s(t) + f \cdot \Omega(t) + J \frac{d\Omega(t)}{dt} \quad (III-2)$$

Avec :

$$E(t) = K_f \Omega(t) \quad (III-3)$$

$$C_e(t) = K_r i_s(t) \quad (III-4)$$

$$K_f = K_\phi \quad (III-5)$$

III.2.3 Schéma fonctionnel du moteur CC :

En appliquant la transformation de Laplace :

$$U_s(s) = E(s) + Ri_s(s) + Ls \cdot i_s(s) \quad (III-6)$$

$$C_e(s) = +f \cdot \Omega(s) + J \cdot s \cdot \Omega(s) \quad (III-7)$$

A partir de l'équation de la tension d'induit nous obtenons :

$$i_s(s) = \frac{U_s(s) - E(s)}{Ls + R} \quad (III-8)$$

La fonction de transfert de la partie électrique est écrite comme suit :

$$G_1(s) = \frac{i_s(s)}{U_s(s) - E(s)} = \frac{1}{Ls + R} \quad (III-9)$$

A partir de l'équation du couple électromagnétique, nous obtenons :

$$= \frac{C_e(s) - C_r(s)}{J \cdot s + f} \quad (III-10)$$

La fonction de transfert de la partie mécanique est écrite comme suit :

$$G_2(s) = \frac{\Omega(s)}{C_e(s) - C_r(s)} = \frac{1}{J \cdot s + f} \quad (III-11)$$

Le schéma bloc du moteur et de sa charge est le suivant

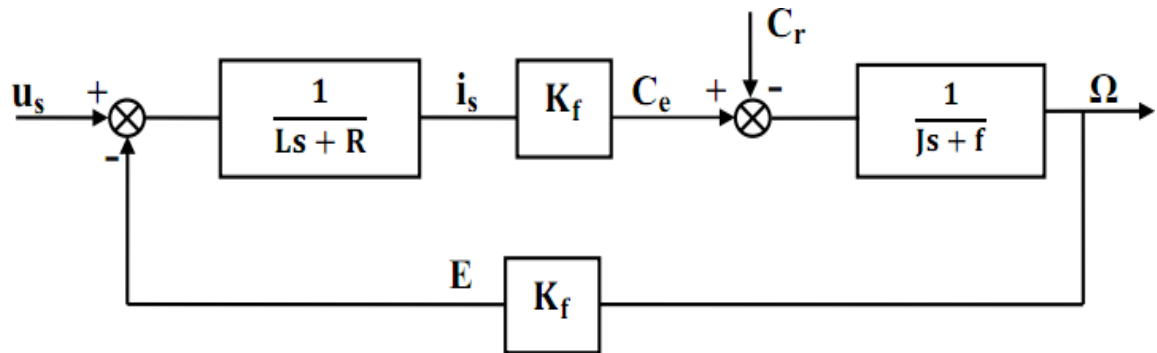


Fig III-1 Schéma fonctionnelle de machine à courant continu

III.3 Modèle du convertisseur alimentant le moteur à courant continu :

III.3.1 Fonctionnement du convertisseur :

$$4 \text{ modes de fonctionnement : } \begin{cases} v_s > 0 \text{ et } i_s > 0 \\ v_s > 0 \text{ et } i_s < 0 \\ v_s < 0 \text{ et } i_s > 0 \\ v_s < 0 \text{ et } i_s < 0 \end{cases}$$

III.3.1.1 Commande séquentielle :

Dans ce cas, il s'agit de réaliser deux signaux de commande, les quatre signaux nécessaires pour la commande des interrupteurs statiques sont déduits de ces deux signaux. La Fig III-2 représente le schéma de principe de la génération des signaux pour une séquence de commutation circulaire.

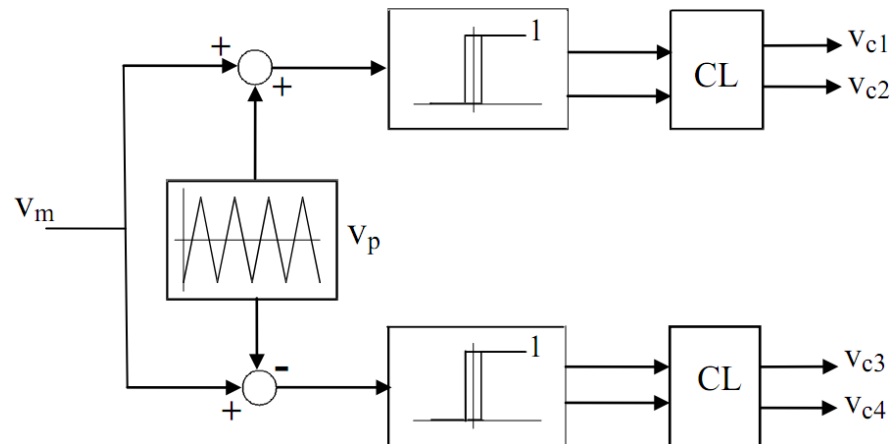


Fig III-2 Principe de commande séquentielle d'un hacheur quatre quadrants

Le signal de commande V_m est soumis à une double comparaison avec la tension auxiliaire V_p de forme triangulaire et puis V_p de signe opposé. Les deux trains d'impulsions résultant de ces comparaisons sont appliqués respectivement à la branche gauche et à la branche droite du pont en H. Comme précédemment, la commande logique (CL) contient l'ensemble des algorithmes logiques.

On ne fait travailler que deux interrupteurs :

- L'un fermé en permanence, joue le rôle d'interrupteur d'aiguillage ;
- L'autre, fermé et ouvert à la fréquence de fonctionnement de hacheur assure le hachage.

Exemple :

Pour obtenir une tension $v_s > 0$, on peut commander en permanence la fermeture de H_4 :

- Si $i_s > 0$, on hache par H_1 :
 - a) H_1 fermé, i_s passe par H_1 et H_4 : et $v_s = U$ et $i_e = i_s$.
 - b) H_1 ouvert, i_s passe par D_2 et H_4 : et $v_s = 0$ et $i_e = 0$.

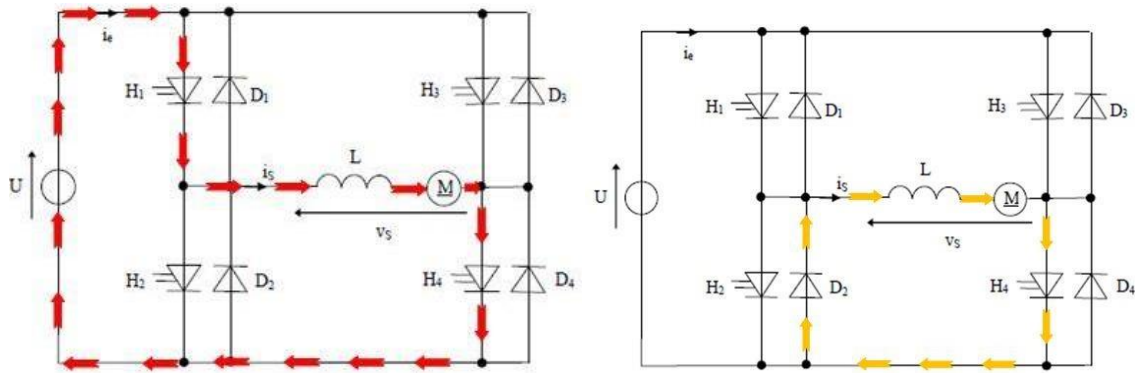


Fig III-3 Circuit d'hachage par H_1 (source vers MCC) et sa roue libre

- Si $i_s < 0$, on hache par H_2 :

H_2 fermé, $-i_s$ passe par H_2 et D_4 : et $v_s = 0$ et $i_e = 0$.

H_2 ouvert, $-i_s$ passe par D_1 et D_4 : et $v_s = U$ et $i_e = -i_s$.

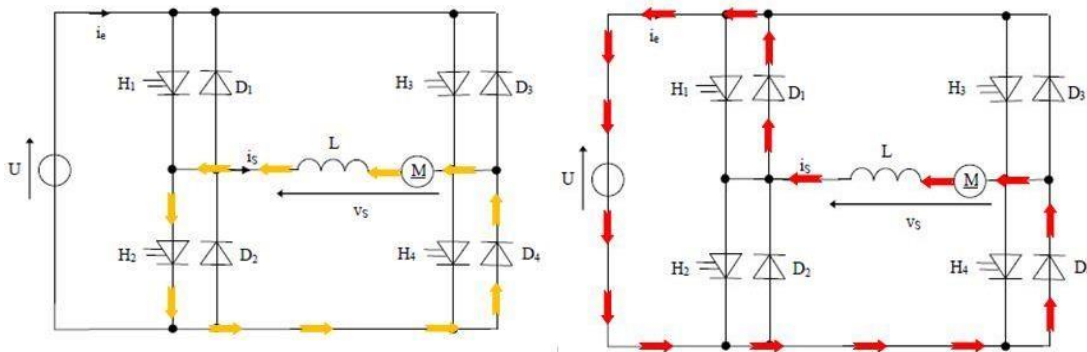


Fig III-4 Circuit d'hachage par H_2 et sa roue libre

Pour obtenir une tension $v_s < 0$, on peut commander en permanence la fermeture de H_3 :

- Si $i_s > 0$, on hache par H_1 :

H_1 fermé, i_s passe par H_1 et D_3 : et $v_s = 0$ et $i_e = 0$.

H_1 ouvert, i_s passe par D_2 et D_3 : et $v_s = -U$ et $i_e = -i_s$

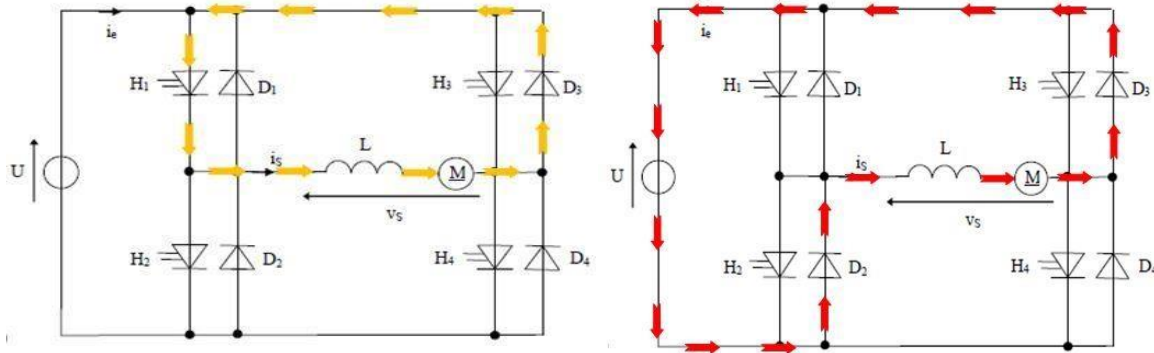


Fig III-5 Circuit d'hachage par H_1 (MCC vers la source) et sa roue libre

- Si $i_s < 0$, on hache par H_2 :

H_2 fermé, $-i_s$ passe par H_2 et H_3 : et $v_s = -U$ et $i_e = -i_s$.

H_2 ouvert, $-i_s$ passe par D_1 et H_3 : et $v_s = 0$ et $i_e = 0$.

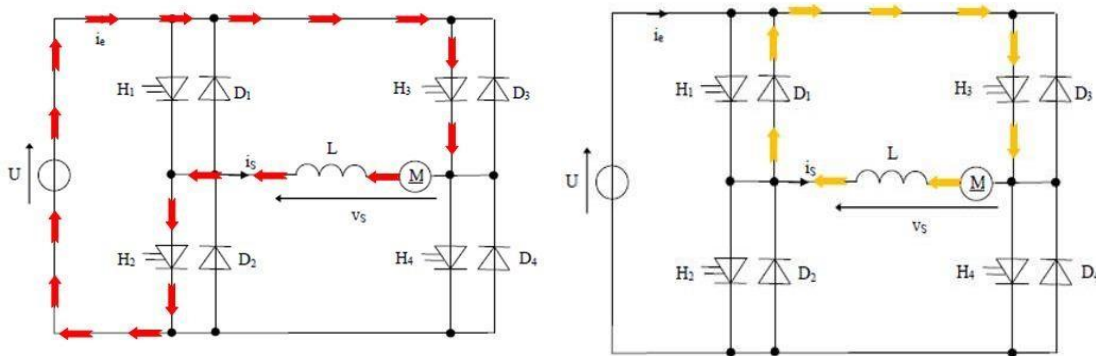


Fig III-6 Circuit d'hachage par H_2 (sens inverse) et sa roue libre

III.3.1.2 Commande continue :

Dans cette commande, la séquence de commutation des interrupteurs est obtenue par la comparaison entre deux signaux, un signal triangulaire (V_p) et un autre constant (V_m) qui peut prendre deux valeurs, positive ou négative. La différence entre V_m et V_p est appliquée à l'entrée d'un comparateur fournissant un train d'impulsions. La fréquence de pulsation du hacheur sera celle du signal V_p . Le train d'impulsions dans ce cas est appliqué à une commande logique (CL) fournissant les signaux pour les quatre interrupteurs du hacheur quatre quadrants (vc_1 , vc_2 , vc_3 et vc_4), Figure III.7 [14] :

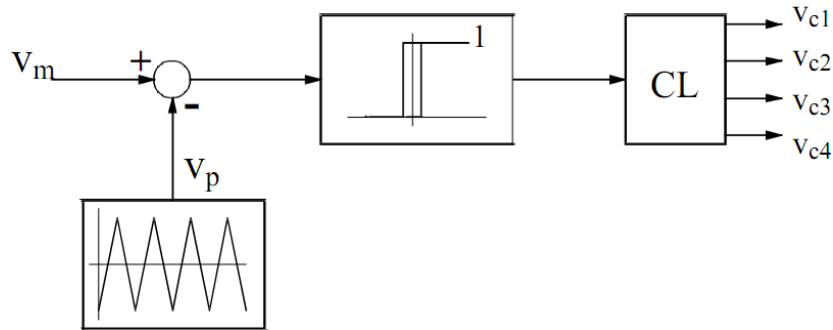


Fig III-7 Principe de commande continue d'un hacheur quatre quadrants

Dans le cas de la séquence de commutation alternée, le courant passe soit par deux interrupteurs, soit par deux diodes se trouvant chacun dans une branche différente. La charge voit à ses bornes une tension passant alternativement de $+U$ à $-U$. Malgré la fermeture de l'interrupteur, si le courant est opposé au sens de conduction du semi-conducteur commandable, il circulera par le semi-conducteur à fermeture spontanée (diode).

On procède ainsi :

- A chaque période T , on commande la fermeture de H_1 et H_4 pendant $\alpha.T$
- On commande la fermeture de H_2 et H_3 pendant la reste de la période.

Pour $0 < t < \alpha.T$, on commande la fermeture de H_1 et H_4 :

- Si $i_s > 0$, il passe par H_1 et H_4 , et $v_s = U$
- Si $i_s < 0$, il passe par D_1 et D_4 , et $v_s = U$

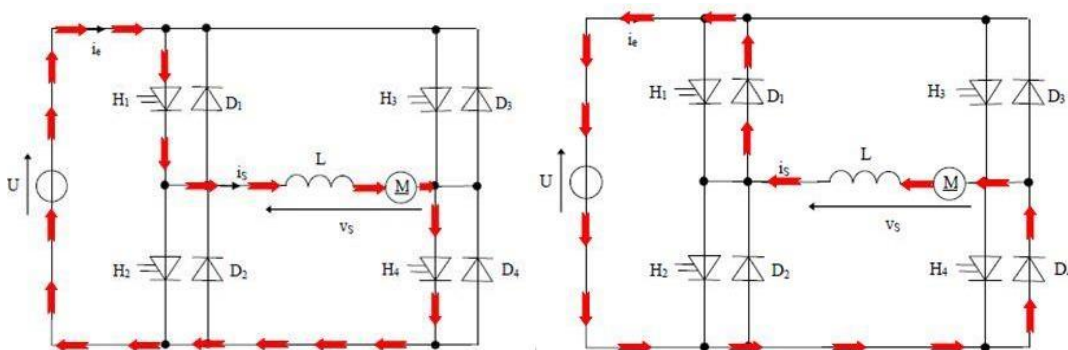


Fig III-8 Commande continu d'hacheur

Pour $0 < t < \alpha.T$, on commande la fermeture de H_2 et H_3 :

- Si $i_s > 0$, il passe par D_2 et D_3 , et $v_s = -U$
- Si $i_s < 0$, il passe par H_2 et H_3 , et $v_s = -U$

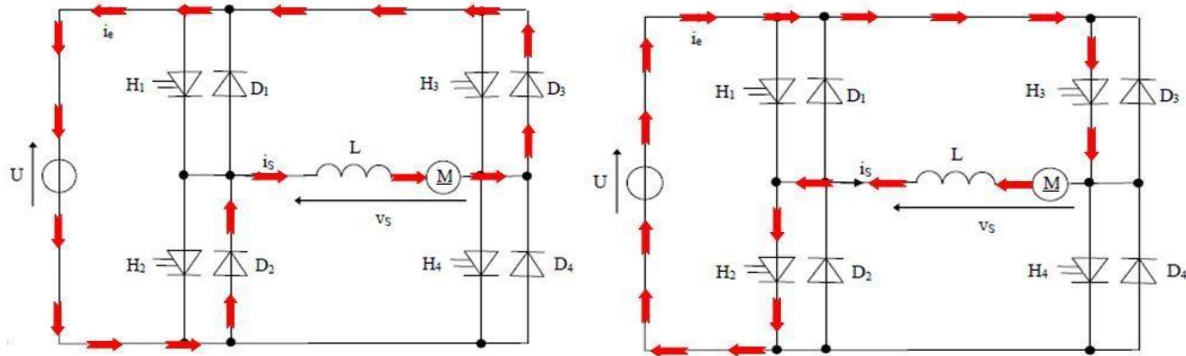


Fig III-9 Commande continu d'hacheur (sens inverse)

III.4 Schéma block de l'ensemble convertisseur-moteur CC :

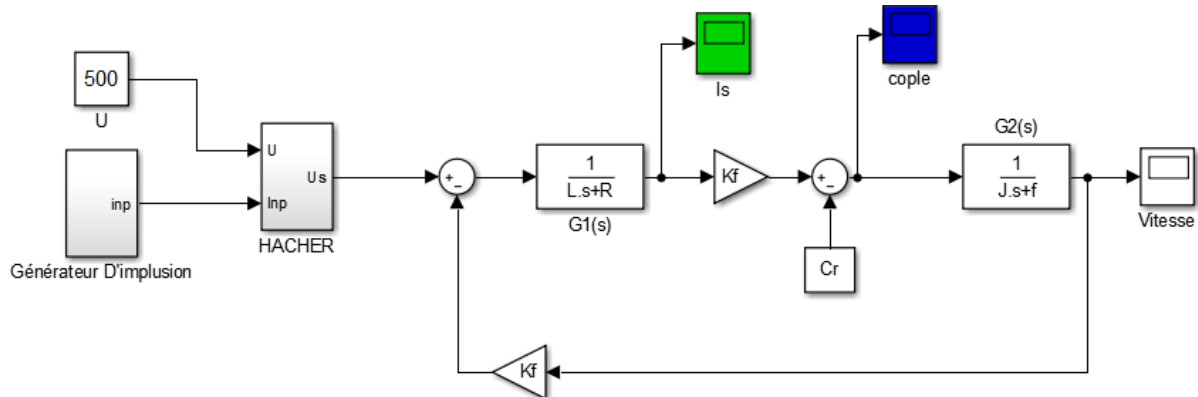


Fig III-10 Schéma block de l'ensemble hacheur+MCC

III.5 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons modélisé le moteur à courant continu (moteur à courant continu à excitation séparée) et le convertisseur continu-continu. Les équations mécanique et électrique des MCC et convertisseur ainsi que la transformation de LAPLACE nous a permis de construire un schéma fonctionnel qui va être utilisé par la suite dans le chapitre suivant pour la simulation.

Chapitre IV:

***Étude et simulation de la
commande du MCC***

IV.1 Partie 1 :

Les simulations présentées dans ce travail ont été réalisées sous l'environnement Matlab/Simulink (Fig IV-1) On prend comme charge une Machine à Courant Continu (MCC) à excitation séparée, équivalente à R, L et E. son schéma fonctionnel dans la Fig III-1 (chapitre3) cette machine est associée avec un hacheur commandé par une commande séquentielle

On utilise le paramètre suivant pour simuler la machine dans les quadrants 1 et 3 de fonctionnement d'hacheur quatre quadrant :

- $U_e = 500 \text{ V}$; $I_n = 5.75$; $P_n = 1.1 \text{ KW}$; $N_n = 2000 \text{ tr/min}$.
- $R = 5 \Omega$ (la résistance d'induit de la machine) ;
- $L = 60 \text{ mH}$ (inductance d'induit ($L_a = 17.8 \text{ mH}$) + inductance de lissage) ;
- $E = k_f \Omega_n$; $\Omega_n = 2\pi N_n / 60 = \pi N_n / 30 \approx 210 \text{ rad/s}$;
- $K_f = 1.074 \text{ V/rad.s}^{-1}$

Le hacheur est alimenté sous $U_e = 500 \text{ V}$, et le couple résistant est constant et réglé sur 5 Nm

IV.1.1 Fonctionnement dans le 1^{er} quadrant ($U_{smoy} > 0$, $I_{smoy} > 0$)

- Pour obtenir les résultats ci-dessous nous faisons le schéma block suivant :

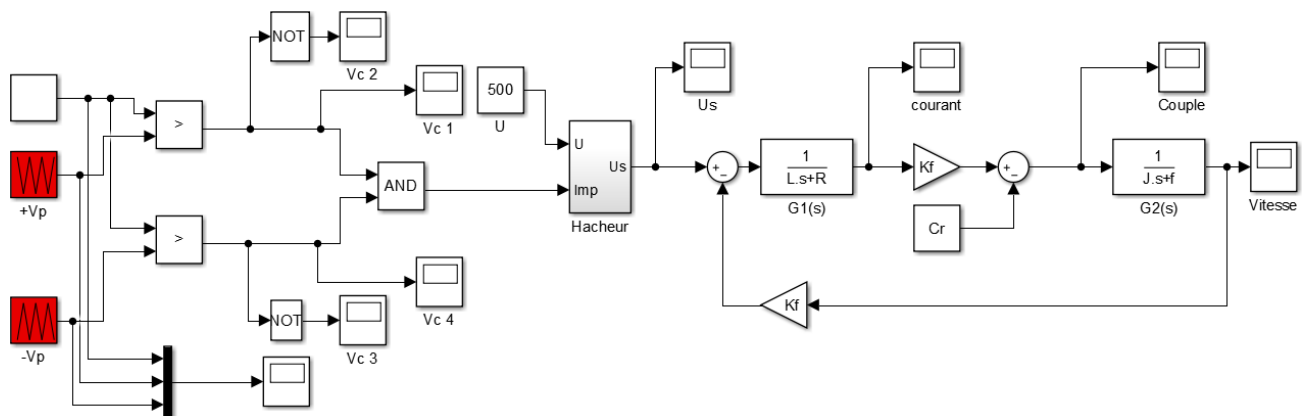


Fig IV-1 Schéma de simulation du hacheur quatre quadrants avec une MCC pour une commande séquentielle (1^{er} quadrant)

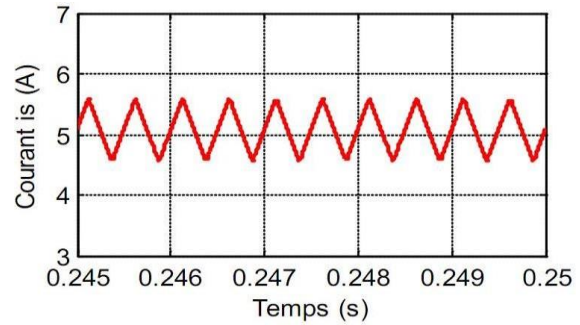
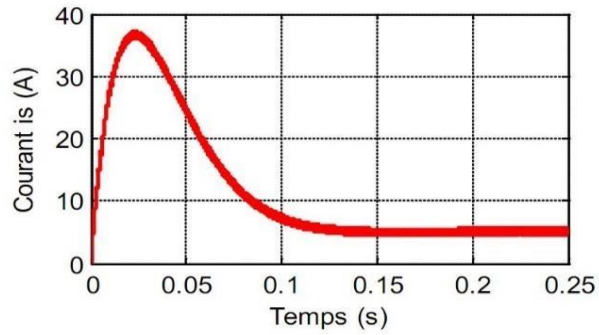


Fig IV-2 Courbes de courant (1^{er} quadrant)

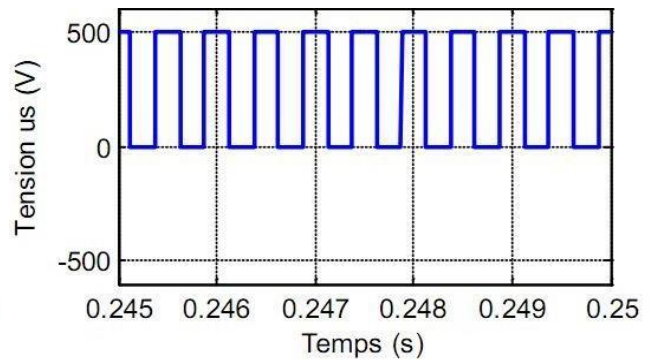
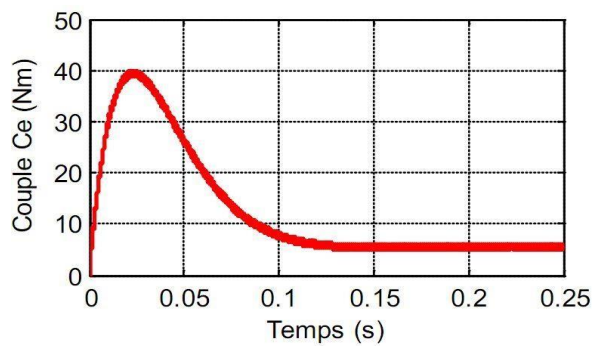


Fig IV-3 Courbe de couple (1^{er} quadrant)

Fig IV-4 Forme d'onde de tension U_s (1^{er} quadrant)

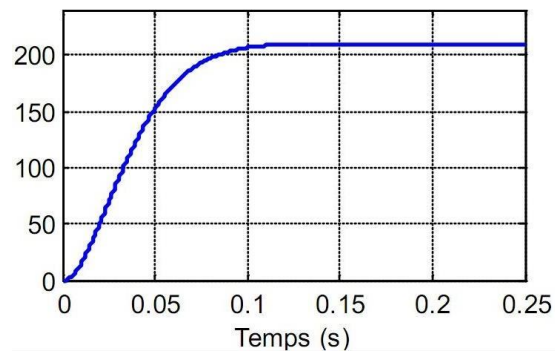


Fig IV-5 Courbe de vitesse Ω (1^{er} quadrant)

Nous pouvons observer que les valeurs moyennes de la tension aux bornes de la charge et de son courant absorbé, sont positives ($U_{smoy} > 0$, $I_{smoy} > 0$). C'est le cas de fonctionnement en moteur de la MCC dans le premier sens de rotation ($\Omega > 0$). Cette vitesse stabilise à la valeur de 220 tr/min

La tension u_s est obtenue selon les signaux de commande des interrupteurs H_1 et H_4 . Cette tension prend deux valeurs ($+U_e$ et 0) ce qui limite son ondulation. Le courant absorbé présente une ondulation autour de sa valeur moyenne ($1,1$ A) et une valeur maximale de (37 A) au démarrage de la MCC.

Nous pouvons aussi remarquer que la vitesse de rotation atteint presque sa valeur nominale (220 tr/min) au bout de 1 s. Le couple électromagnétique est à l'image du courant absorbé vu la relation de proportionnalité qui les relie, le couple de démarrage est de l'ordre de 40 Nm.

IV.1.2 Fonctionnement dans le 3^{ème} quadrant ($U_{smoy} < 0$, $I_{smoy} < 0$) moteurs sens inverse :

- On utilise les mêmes paramètres comme le schéma précédent :

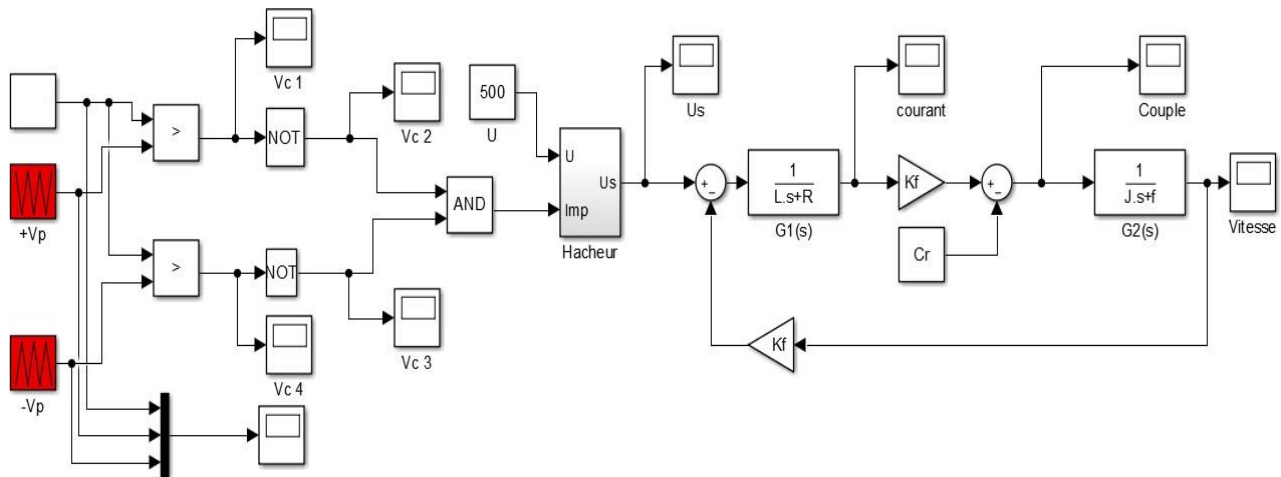


Fig IV-6 Schéma de simulation du hacheur quatre quadrants avec une MCC pour un commande séquentielle (3^{ème} quadrant)

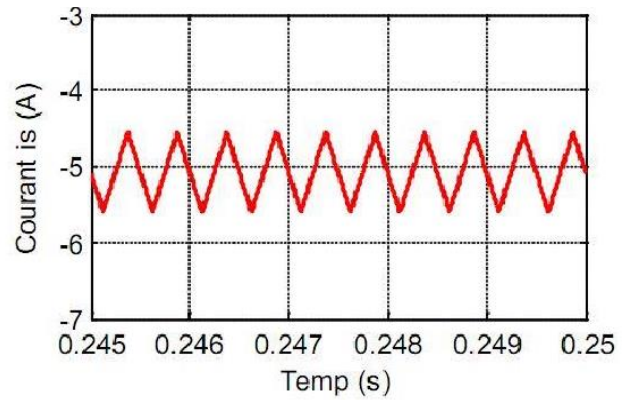
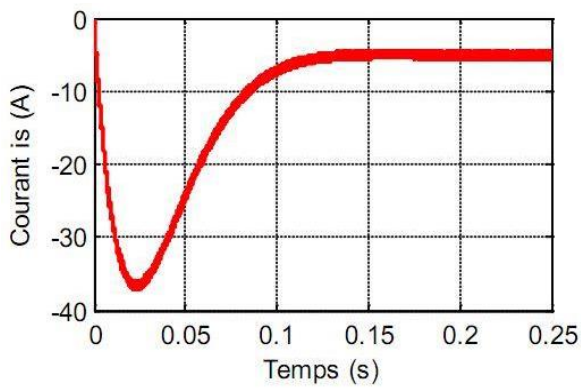


Fig IV-7 Courbes de courant (3^{eme} quadrant)

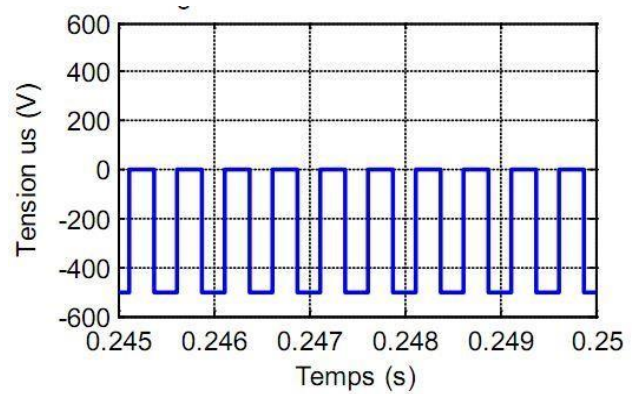
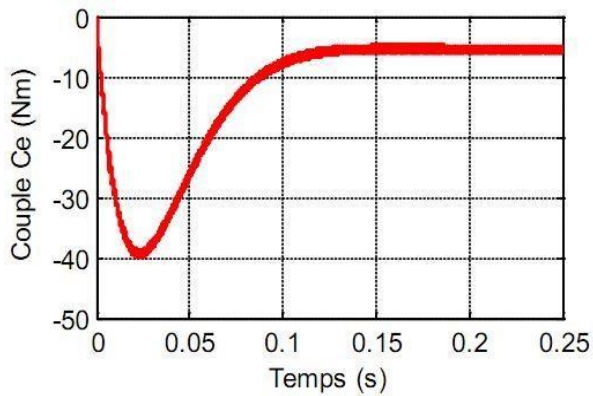


Fig IV-8 Courbe de couple (3^{eme} quadrant)

Fig IV-9 Courbe de tension (3^{eme} quadrant)

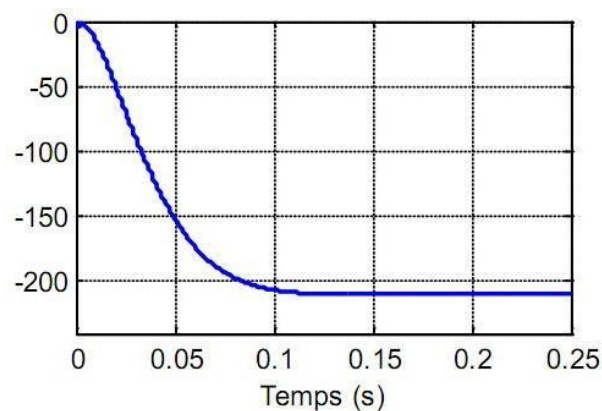


Fig IV-10 Courbe de vitesse (3^{eme} quadrant)

La tension moyenne négative ($U_{smoy} < 0$) est obtenue selon les signaux de commande des interrupteurs H_2 et H_3 . Cette tension prend deux valeurs (0 et $-U_e$).

La Fig IV-7 montre le cas où le courant dans la charge est strictement négatif. La tension moyenne aux bornes de la charge est négative et supérieure (Fig IV-9), en valeur absolue, à la f.é.m de la machine fonctionnant en moteur dans le deuxième sens de rotation ($\Omega < 0$) (Fig IV-10). Le courant absorbé moyen est donc négatif ($I_{smoy} < 0$). De même que pour le couple électromagnétique ($C_e < 0$) (Fig IV-8) qui est à l'image du courant.

IV.2 Partie 2 :

IV.2.1 Régulateur PI de vitesse du moteur à courant continu :

Pour faire varier la vitesse d'un moteur à courant continu ou atteindre une vitesse désirée on peut faire varier la tension d'alimentation à ses bornes mais dans ce cas une partie importante de l'énergie est consommée par le dispositif d'alimentation, on préfère l'alimenter de façon discontinue avec un hacheur associé avec une commande de Modulation par Largeur d'Impulsions (MLI) et faire ainsi varier la tension moyenne à ses bornes. On parle alors de régulateur PI. le principe de cette régulation est schématisé par la Fig IV-11

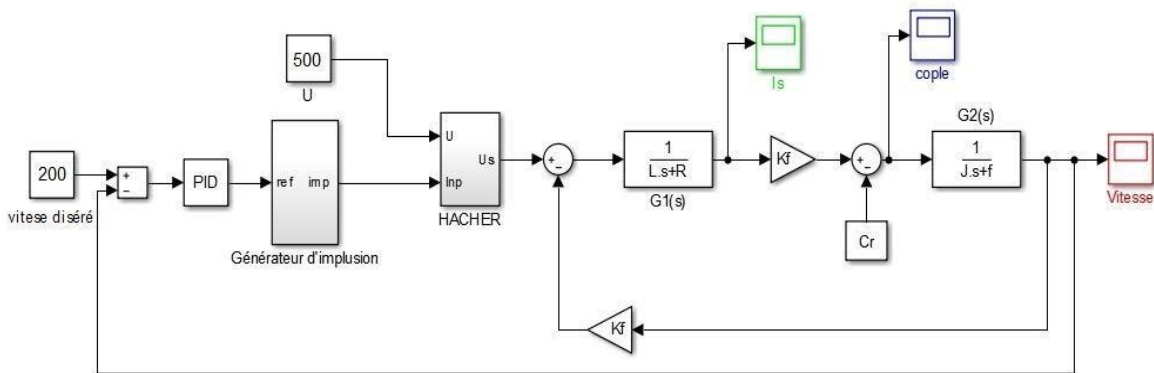


Fig IV-11 Schéma block de hacheur et MCC commandé par un régulateur PI (vitesse désirée de 200 tr/min)

Le régulateur PI fonctionner comme une référence pour la commande MLI, la diminution et augmentation de la vitesse provoque la valeur de rapport cyclique (α), par conséquence un changement de période de fermeture des interrupteurs d'hacheur et alors un changement dans la valeur de tension moyenne d'hacheur qui alimenter le moteur à courant continu

- Après cette régulation on obtenir les résultats suivants :
- La tension de sortie du hacheur pour une vitesse de référence égal (200 tr/min) est représenté par la figure suivant :

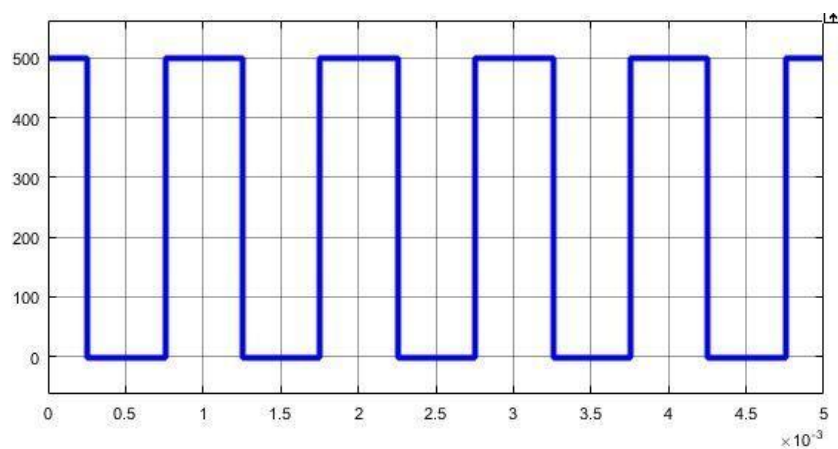


Fig IV-12 Tension du hacheur (temps de fermeture $5 \cdot 10^{-4}$)

- La vitesse de rotation du moteur à courant continu pour une vitesse référence égal (200 tr/min) est représenté par la figure suivant :

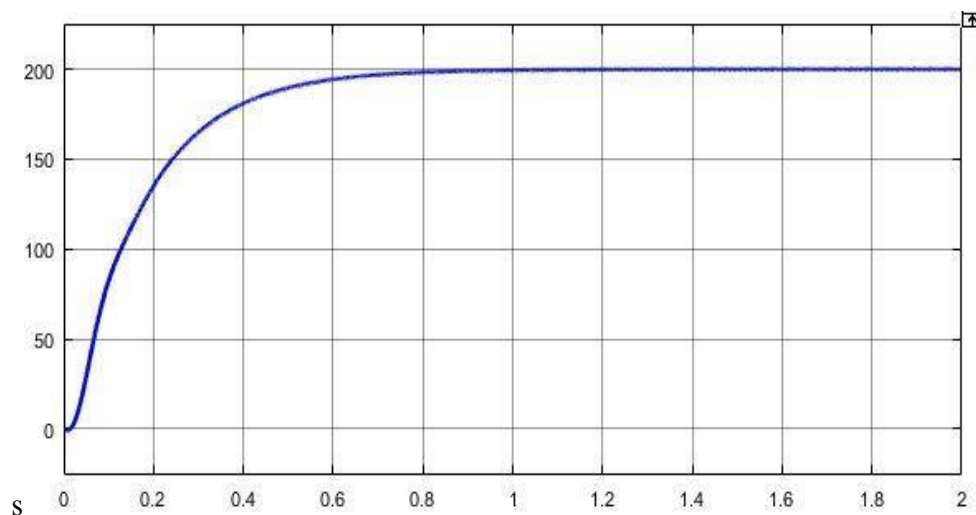


Fig IV-13 Courbe de vitesse a désirée (200 tr/min)

La vitesse de rotation du moteur alimenté par le hacheur dévolteur part de zéro pour se stabiliser autour de 200 tr/min, qui est la vitesse (vitesse désire) en régime établi. La courbe à une forme exponentielle, cette vitesse dépend de la tension moyenne d'alimentation sortants au borne du hacheur (qui est réglé par la régulateur PI).

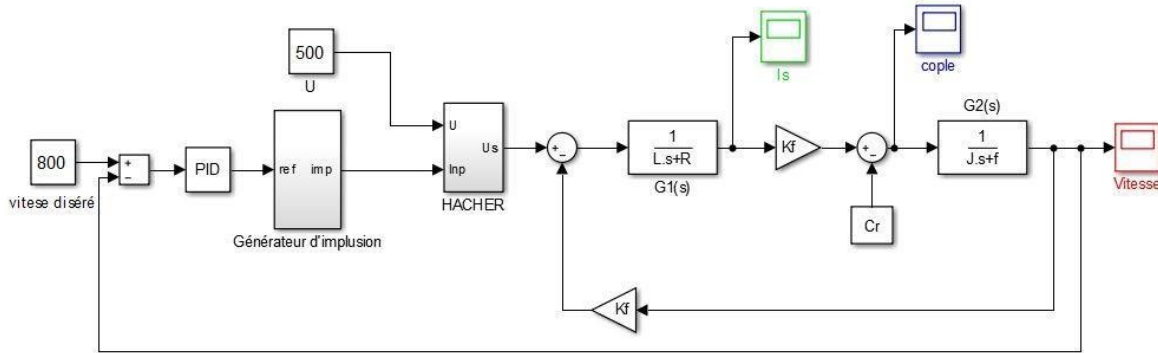


Figure IV-14 Schéma block de hacheur et MCC commandé par un régulateur PI (vitesse désirée de 200 tr/min)

- La tension de sortie du hacheur pour une vitesse de référence égal (800 tr/min) est donnée par la figure suivant :

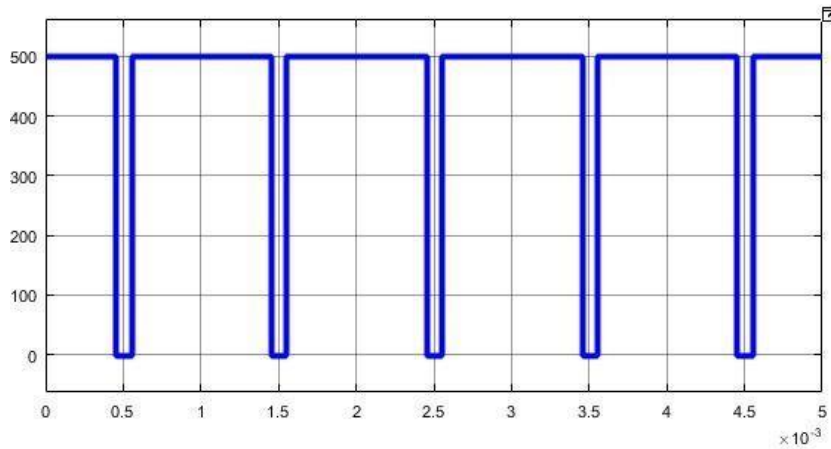


Figure IV-15 Tension d'hacheur (période de fermeture 1.10^{-4})

- La vitesse de rotation du moteur à courant continu pour une vitesse de référence égal (800 tr/min) est donnée par la figure suivant :

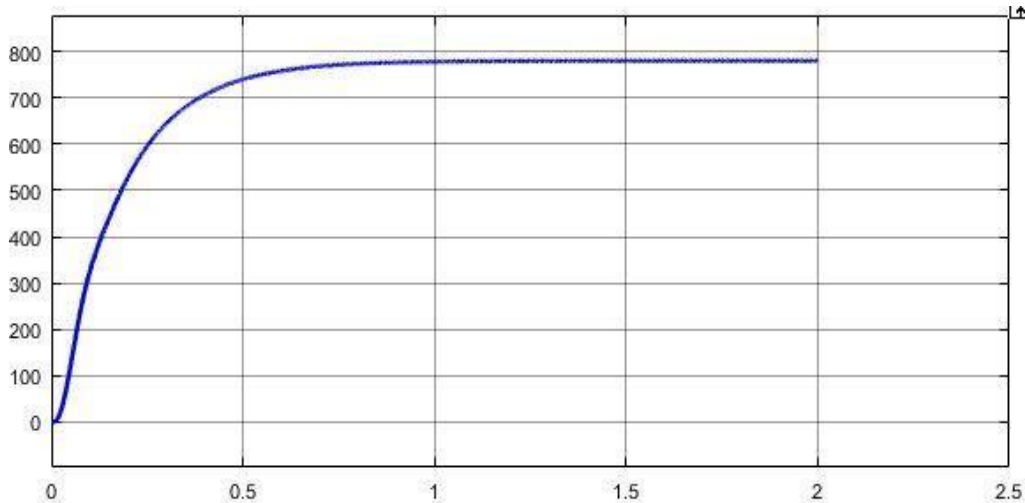


Figure IV-16 Courbe de vitesse désirée (800 tr/min)

La vitesse de rotation du moteur alimenté par le hacheur dévolteur part de zéro pour se stabiliser autour de 800 tr/min, qui est la vitesse (vitesse désire) en régime établi. La courbe à une forme exponentielle, cette vitesse dépend de la tension moyenne d'alimentation sortants au borne du hacheur (qui est réglé par la régulateur PI). Le moteur a mis 1s pour atteindre le régime permanent, cela est dû à l'inertie de la machine et de la charge.

IV.3 Conclusion :

Ce dernier chapitre, nous avons réalisé deux simulations de l'ensemble MCC-Hacheur. La première est en boucle ouverte (sans régulateur et chaîne de retour), par contre la deuxième simulation est en boucle fermée (avec régulateur et chaîne de retour). Le travail a été réalisé sous l'environnement Matlab/Simulink pour étudier le comportement d'un moteur à courant continu à excitation séparée.

Après la simulation, on a obtenu des résultats qui ont permis de montrer que le régulateur donne de meilleures réponses par rapport aux autres montages sans régulateur PI à savoir que la valeur de la vitesse ne dépasse pas la valeur de référence. Le régulateur PI est le plus utilisé dans l'industrie due à sa simplicité.

Conclusion générale et perspective

Les machines à courant continu sont peu à peu remplacées par les machines asynchrones et synchrones dans certains processus. Pourtant leur étude s'avère nécessaire car elles sont toujours utilisées dans plusieurs domaines où elles sont les mieux adaptées. Ce projet de fin d'étude nous a permis de mettre en place un laboratoire virtuel de simulation des machines à courant continu dans l'environnement Simulink de logiciel Matlab.

L'étude présentée dans ce mémoire a porté essentiellement sur la commande et simulation de moteur à courant continu avec un hacheur quatre quadrants (4Q) qui font partie de la catégorie des convertisseurs DC-DC (ou hacheurs réversibles). En effet, dans cette étude nous avons présenté:

- ✓ Une étude théorique de la machine à courant continu, généralités sur ces machines, leur structure (intérieure et extérieure), les différents types selon quelques critères (le mode d'excitation).
- ✓ Une étude sur les normes de choix d'un moteur à courant continu ainsi que leur commande (leur démarrage, freinage, variation de vitesse et sens de rotation).
- ✓ Une présentation des différents types des convertisseurs continu-continu, ainsi que les principales applications de chaque type surtout celles du hacheur 4Q qui peut être employé pour deux cas d'entraînement des moteurs à courant continu.
- ✓ Une modélisation du moteur à courant continu (moteur à courant continu à excitation séparée) et les convertisseurs continu-continu. Le modèle de ce moteur conclu à partir de la transformation de LAPLACE des équations électriques et mécanique.
- ✓ Des simulations avec des schémas block élaborés sous *Simulink* de l'environnement *Matlab*. Ces simulations ont permis de générer premièrement les signaux de commande des interrupteurs du hacheur 4Q sans régulateur (PI) (seulement à partir de commande MLI) et deuxièmement avec régulateur (PI), et de montrer les variations de la tension, du courant, du couple et de la vitesse de rotation d'un moteur à courant continu. Ces variations sont traduites par un régime transitoire au démarrage du moteur et un régime permanent correspondant au fonctionnement périodique du hacheur.

On propose comme représentative de ce projet l'étude de commande du moteur à courant continu avec d'autres types des régulateurs PD, PID et ainsi que l'utilisation de l'intelligence

artificielle (réseau de neurone et logique floue).

Nous voudrions terminer en disant que ce projet de fin d'étude nous a permis d'approfondir nos connaissances dans le domaine de la commande du moteur à courant continu et de nous familiariser avec l'outil qu'est MATLAB/SIMULINK.

- [1] - **Mikhail Kostenko** et Ludvik Piotrovski, Machines électriques, machines à courant continu, transformateurs. Éditions de Moscou 1979.
- [2] - **Guy Chateigner**, Michel Boes, Daniel Bouix, Jacques Vaillant et Daniel Verkindère, Manuel de génie électrique. Dunod, Paris, 2006.
- [3] - **A. HALILA** : étude des machines à courant continu, UNIV LAVAL, mai 2001
- [4] - **P. Maye** : Aide-mémoire Électrotechnique, illustrations : Alain et Bouteville dunod, Paris, 2006
- [5] - **M.KOSTENKO** et PROTROVSKI « Machine électrique Tomel : Machine à courant continu Transformateur » Edition MIR Moscou 1979 pp 43-59
- [6] - **JEAN ANCEL** bobinage des machines tournants « Technique de l'ingénieur 11-1996 D3 –II- génie électrique, machine électrique » D437-1 pp 11-21
- [7] - **JEROME CROS** « Définition d'un actionneur à aimant permanent et électrique intégré pour l'automobile » thèse de doctorat INP Toulouse 1992
- [8] - **BAN ITSUKI**, SHIRAKI, MANUBU, EGA%I KAZUHITO “Direct current motor with no-superposed armature windings” United states patent 4,315.177 9 Février 1982
- [9] - **Dr. BELHAMDI SAAD** : Machines Electriques à Courant Continu et Transformateur Univ MOHAMED BOUDIAF de M'silla.
- [10] - **Fabrice DESCHAMP**, « Cours BAC S SI – Convertir L'énergie – Machine à Courant Continu » Sciences de L'ingénieur, LYCEE JACQUES PREVERT.
- [11] - **www.elec.jbd.free.fr**, « Machine électromagnétique », Chapitre 13.

[12] - **Mr ZEMOURI Azzedine**, « Etudes expérimentales d'un convertisseur DC/DC contrôler par une commande robuste », Mémoire de Magister, Université de Batna, 2014.

[13] - **M.L.LOUAZENE**, « Cours d'électroniques de puissance », université d'Ouargla, 2011.

[14] - **M. Correvon** - Electronique de puissance, Chapitre 3 : Variateurs de courant continu à pulsation, Haute Ecole d'Ingenierie et de Gestion du Canton du Vaud (heig-vd) & Hes.SO.

SYSTÈMES ELECTRONIQUES, Chapitre 8 : Modélisation du variateur de courant continu à pulsation, heig-vd & Haute Ecole Spécialisée de Suisse Occidentale (Hes.SO).

Titre du mémoire : Commande et simulation de moteur à courant continu

Auteur: #Hoggui Imed #Ramouli Lakhdar #Sek Seif Eddine

Mots clés : La machine à courant continu, l'étude la modélisation et la simulation, Convertisseur réversible, Hacheur quatre quadrants, commande MLI

Résumé :

L'apparition du moteur à courant continu crée un grand développement dans notre vie quotidienne, il est plus utilisé dans les instruments domestiques et l'application industrielle

L'objectif visé par ce travail est l'étude du structure extérieur, intérieure et les types de le moteur à courant continu et leur commande et simulation. Dans notre étude nous allons associer un moteur à courant continu (excitation séparée) avec un hacheur réversibles en courant et en tension (*hacheurs en pont ou hacheurs quatre quadrants (4Q)*). Dans cette étude nous allons concentrer l'étude dans 2 quadrant (1^{er} et 3^{eme}) pour permet de visualiser l'évolution des différents paramètres (vitesse, couple...etc.) du moteur en fonction du temps.

Title : Control and simulation of direct current engine

Keywords : The direct current machine, modeling and simulation study, Reversible converter, four quadrant chopper , PWM controls

Summary :

The appearance of the Direct Current Engine creates a great development in our daily lives, it is more used in domestic instruments and industrial application.

The objective of this work is to study the external, interior structure and types of the DC engine and their control and simulation. In our study we will combine a DC engine (separate excitement) with a chopper (bridge choppers or four quadrant (4Q)). In this study we will concentrate just on 2 quadrant (1st and 3rd) to visualize the evolution of the different parameters (speed, torque ... etc.) engine based on time.

عنوان المذكرة : تحكم ونمذجة محركات التيار الكهربائي المستمر

الكلمات المفتاحية : آلة التيار المستمر, دراسة النمذجة و المحاكاة , المحولات السكونية . المحول القابل للعكس . المحول السكوني للتيار المستمر الوظيفي في أربعة أرباع , التحكم بطول الموجة

ملخص :

ظهور محرك التيار المستمر خلق تطورا كبيرا في حياتنا اليومية ، وهو أكثر استخداما في الآلات المنزلية و الصناعية، الهدف من هذا العمل هو دراسة الهيكل الخارجي والداخلي لمحركات التيار المستمر وانواعها وكذلك التحكم فيها ومحاكاتها. في دراستنا قمنا بربط محرك التيار المستمر مع المحول السكوني للتيار المستمر بحيث نركز على اشتغال المحرك في الاتجاه العادي والاتجاه العكسي وذلك لدراسة تطور مختلف خصائص هذا المحرك (السرعة ، وعزم الدوران... وما إلى ذلك) بدلالة الوقت.