

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou



Faculté De Génie Electrique Et D'informatique

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

Mémoire De Fin d'Etude
DE MASTER ACADEMIQUE
Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Génie électrique
Spécialité : INSTRUMENTATION

Présenté par :

BEN AMRANE Hassiba

BEN MOUSSA Fadhila

Thème

**Modélisation et simulation d'une régulation de
la machine à courant continu**

Mémoire soutenu publiquement le 27/09/2018 devant le jury composé de :

Mr : Mohammed TAHANOUT	Maitre de conférences classe B, U.M.M.T.O	Président
Mr : Mustapha ZAOUIA	Maitre de conférences classe A, U.M.M.T.O	Encadreur
Mme : Ouerdia BOUZEBUDJA	Maitre Assistante classe A, U.M.M.T.O	Examinatrice
Mr: Mohamed Lamine HAMIDA	Doctorant, U.M.M.T.O	Examineur

Promotion: 2017/2018

Remerciements

Nous remercions le Dieu qui nous a aidés à faire ce modeste travail.

Nous tenons à remercier vivement notre dévoué promoteur Mr ZAOUI Mustapha, pour son encadrement et pour sa contribution à travers sa disponibilité, son temps et son expérience.

Nous remercions particulièrement Mr HAMIDA Mohamed Lamine pour l'aide qu'il nous a fournie afin de mener ce travail à terme.

Nous tenons également à remercier d'avance les membres du jury qui nous feront l'honneur d'accepter d'évaluer notre travail et d'apporter leurs réflexions et leurs critiques le jour de notre soutenance.

Hassiba et Fadhila

Dédicace

Je dédie ce modeste travail en signe de respect, reconnaissance et remerciement à :

Mon très cher père : je te remercie pour tous ce que t'as fait pour moi, ta confiance, et sur tout d'avoir veillé pour que rien ne me manque.

Ma très chère mère : je te remercie pour toutes les sacrifices que t'as fait pour Moi,

Pour mes frères et sœurs, pour toutes les prières que t'as prononcé pour nous, et pour tout ce que t'a fait, au passage je te souhaite la guérissant, que dieu te garde a moi.

Ma grand-mère que dieu la garde pour nous.

Mes très chers frères et sœurs, vous que je trouve toujours à mes coté, dans les moments les plus heureux et sur tout les plus durs, et à qui je souhaite beaucoup de réussite dans leurs vie.

Ma chère amie et binôme : Hassiba à qui je souhaite beaucoup de réussite dans sa vie et sa famille.

Tous mes ami (e)s et toute ma promotion.

Fadhila

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à:

*Ma très chère mère, source de tendresse et exemplaire, qui a été
toujours près de moi pendant toutes ces années d'études, qui ma entouré
avec ses conseils utiles et lumineux ;*

*Mon très cher père, qui a fait meilleur des pères par son
encouragement, son aide, le soutien qu'il m'a apportée et le sacrifice
qu'il a fait pour nous en m'aidant à aller de l'avant vers le meilleur ;*

“Que dieu les protèges et les entoures de sa bénédiction “

*Mes chères sœurs : Nabila, Lynda, Karima et Hakima a qui je
souhaite beaucoup de réussites dans leur vie*

Mon très cher unique et petit frère que dieu le protège pour nous

Mes grands-mères que dieu les garde pour nous

Toute ma famille

Ma très chère amie et sœur Roza

Mes chers amis Fouad et Djamel

*Ma chère amie et binôme : Fadhila à qui je souhaite beaucoup de
réussite dans sa vie*

Tous mes collègues de la promotion d'électronique

Tous mes amis sans exception

Hassiba

Sommaire

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I : Généralités sur la machine à courant continu

I.1.Introduction.....	2
I.2.Définition de la machine à courant continu.....	2
I.3.Constitution de la machine à courant continu.....	2
I.3.1.Inducteur.....	3
I.3.2.L'induit.....	4
I.3.3.Collecteur et balais.....	4
I.4.Principe de fonctionnement.....	5
I.5.Bilan des puissances de la machine à courant continu.....	7
I.5.1.Bilan de puissance en Fonctionnement moteur.....	7
I.5.2.Bilan de puissance en Fonctionnement génératrice.....	8
I.6.Les différents types d'excitation de la machine à courant continu.....	8
I.6.1.Moteur à excitation série.....	8
I.6.2.Moteur à excitation shunt.....	10
I.6.3.Moteur à excitation séparée.....	12
I.6.4.Moteur à excitation compound.....	13
I.6.4.1.Moteur compound à flux additif.....	13
I.6.4.2.Moteur compound à flux soustractif.....	14
I.7.Différents modes de réglage de vitesse.....	15
I.7.1.Réglage rhéostatique.....	15
I.7.2.Réglage par variation de la tension d'induit.....	16
I.7.3.Réglage par variation de flux d'excitation.....	16
I.8.Avantages et Inconvénients de la machine à courant continu.....	17
I.9.Conclusion.....	17

Chapitre II : Modélisation et régulation d'un moteur à courant continu

II.1.Introduction.....	18
II.2.Description de la machine à courant continu.....	18
II.3.Point de fonctionnement du moteur à excitation séparée.....	19
II.4.Généralités sur la commande à vitesse variable des moteurs à courant continu.....	19
II.5.Description du redresseur.....	20
II.5.1.Description du pont du gräetz.....	21
II.5.2.Description et commande des thyristors.....	21
II.6.Description de capteur.....	22
II.6.1.Capteur de vitesse.....	22
II.6.2.Capteur de courant.....	22
II.7.Modélisation de l'ensemble moteur-convertisseur.....	23
II.7.1.Modélisation du moteur à courant continu à excitation séparée.....	23
II.7.2.Modélisation du redresseur.....	25
II.7.3.Schéma fonctionnel global du système moteur – convertisseur – capteur.....	29
II.8.Régulation du moteur à courant continu.....	29
II.8.1.Correction proportionnelle intégrale.....	29
II.8.2.Correction proportionnelle dérivée.....	30
II.8.3.Correction proportionnelle intégrale et dérivée.....	31

II.9.Type de régulations.	32
II.10.Définition des différents types de régulations... ..	32
II.10.1.Régulation par anticipation.....	32
II.10.2.Régulation parallèle.....	32
II.11.Régulation cascade.	32
II.11.1.Rôle d'un asservissement de courant.....	33
II.11.2.Asservissement de la boucle de courant.....	33
II.11.3.Méthode de compensation.....	33
II.11.4.Calcul des paramètres du régulateur du courant.....	34
II.11.5.Asservissement de la boucle de vitesse.....	35
II.11.6.Calcul des paramètres du régulateur de vitesse.....	36
II.12.conclusion.....	36

Chapitre III : Simulation de la commande de la machine à courant continu

III.1.Introduction.....	37
III.2.Paramètres de la machine à courant continu.....	37
III.3.Simulation de la machine à courant continu sans régulation....	38
III.4.Interprétation des résultats de simulation sans régulation.....	38
III.5. Simulation de la machine à courant continu avec régulation cascade.....	40
III.6.Interprétation des résultats de simulation avec régulation... ..	41
III.7.Conclusion.....	44
Conclusion générale.....	45

Les machines à courant continu furent les premières machines électriques utilisées par les ingénieurs au milieu du 19^{ème} siècle pour produire la puissance électromotrice. Elles jouent un rôle dominant surtout qu'un simple réglage de la tension d'alimentation d'induit permettrait un fonctionnement à vitesse variable.

De nos jours, l'automatique fait partie des sciences de l'ingénieur. Cette discipline traite de la modélisation, de l'analyse, de la commande et de la régulation des systèmes.

L'utilisation de la machine à courant continu dans les systèmes automatisés figure dans un grand nombre d'applications vu la simplicité de son fonctionnement, son alimentation et sa commande.

La régulation joue un rôle essentiel dans l'industrie moderne. Elle supprime la surveillance continue par une main d'œuvre d'une opération, de routine et en assure le contrôle avec une grande précision qu'aucun opérateur humain n'est capable d'effectuer.

La liaison d'un moteur à courant continu à une source du même type se fait par l'intermédiaire d'un convertisseur statique, qui permet la variation de la tension moyenne aux bornes de l'induit. Jusqu'à ces dernières années, la commande des convertisseurs statiques industriels était réalisée à l'aide de circuits analogiques à faible ou moyen degré d'intégration. Mais le développement de l'électronique et de l'informatique met aujourd'hui à la disposition de l'utilisateur des dispositifs à très haut degré d'intégration. Notre travail nous le présentons en trois chapitres :

Dans le premier chapitre nous nous intéresserons aux généralités sur la machine à courant continu dont nous allons présenter les différents composants la constituant, son fonctionnement et les différents types d'excitation a savoir la machine à courant continu à excitation séparée, série, parallèle et composée .

Le deuxième chapitre, est consacré à la modélisation et la régulation de la machine à courant continu.

Dans le troisième chapitre, nous présentons la simulation de la machine à courant continu ainsi que les résultats obtenus tels que l'allure de la vitesse, du courant avec et sans perturbation. Nous présentons aussi les mêmes résultats en précédant à l'application de la régulation.

Nous terminerons notre travail avec une conclusion générale.

I.1.Introduction

Les machines à courant continu sont très utilisées dans les systèmes automatiques qui nécessitent une variation précise de la vitesse de rotation. Dans ce chapitre, nous nous intéresserons aux généralités sur la machine à courant continu qui se traduit par la présentation de sa constitution et son principe de fonctionnement. Il s'agit principalement d'établir les différents types de moteurs à courant continu, leurs domaines d'utilisation ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients [1].

I.2.Définition de la machine à courant continu

Une machine à courant continu est un convertisseur électromécanique. Elle est réversible, elle transforme l'énergie mécanique en énergie électrique (génératrice) ou inversement, c'est-à-dire qu'elle transforme l'énergie électrique en énergie mécanique (moteur). La Figure. I.1 présente le schéma général de la machine à courant continu [2] [3].

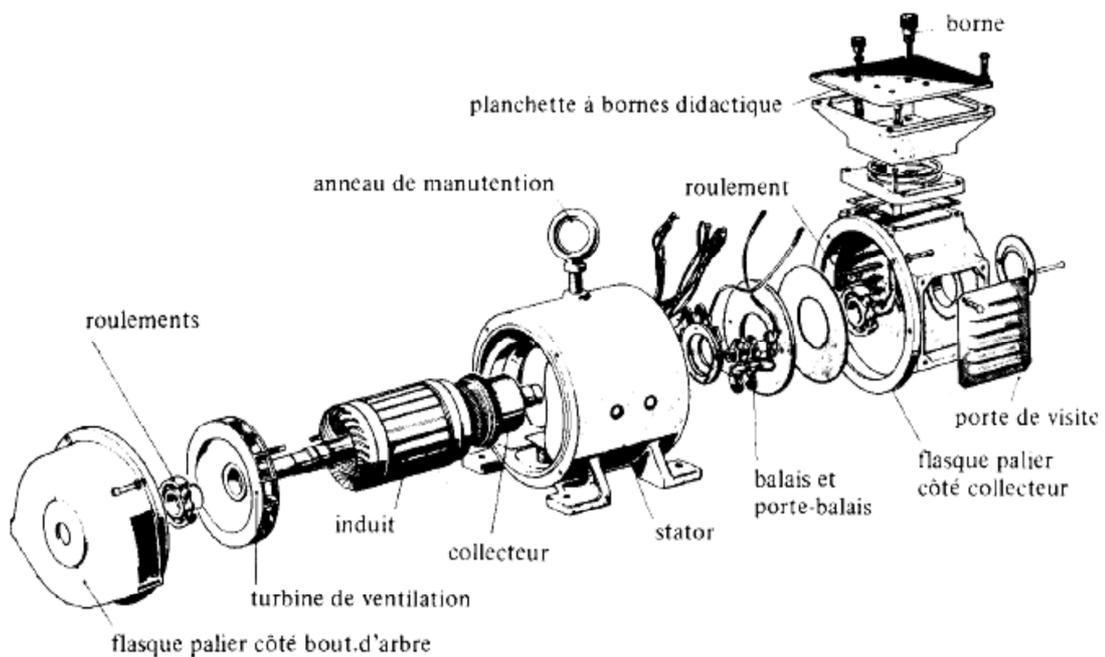


Figure. I.1 : Schéma général de la machine à courant continu.

I.3.Constitution de la machine à courant continu

Les machines à courant continu sont constituées comme toutes les machines de deux parties essentielles (Figure. I.2):

- Partie fixe appelée stator que l'on appelle aussi inducteur.
- Partie mobile appelée rotor que l'on appelle aussi induit.

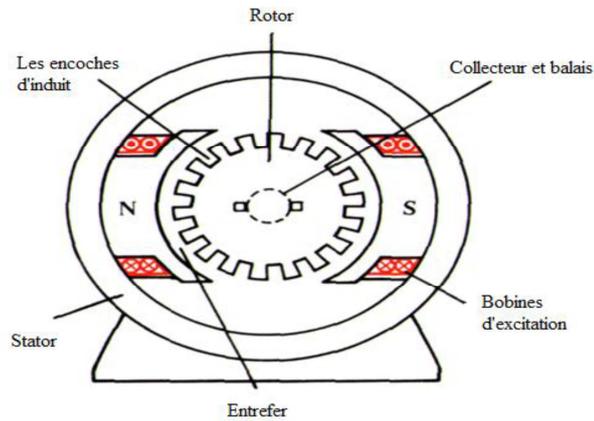


Figure. I.2 : Constitution de la machine à courant continu.

I.3.1.Inducteur

C'est la partie fixe. L'inducteur est formé soit d'aimants permanents en ferrite soit de bobines placées autour des noyaux polaires. Lorsque les bobines sont parcourues par un courant continu, elles créent un champ dans le circuit magnétique de la machine notamment dans l'entrefer, espace d'air séparant la partie fixe et la partie mobile.

a. Inducteur à aimant permanent

Il est constitué d'aimants permanents qui créent un champ magnétique rémanent, son induction coercitive est grande, cela lui donne des propriétés particulières comme d'exercer une force d'attraction sur un matériau ferromagnétique. Les matériaux les plus utilisés sont les ferrites (Figure. I.3).



Figure. I. 3 : Inducteur à aimants permanents.

b. Inducteur bobiné

Il crée un champ rémanent. Il est constitué de bobines enroulées autour d'un noyau polaire (Figure. I.4). Formé d'un empilage de tôles en silicium séparées entre elles par du verni pour réduire les courants, avec une partie plus large appelé épanouissement polaire destiné à mieux répartir l'induction sur une grande partie de l'induit.



Figure. I.4 : Inducteur bobiné.

I.3.2.Induit

L'induit est la partie tournante de la machine. Le noyau d'induit est en fer pour canaliser les lignes de champ, les conducteurs sont logés dans les encoches du rotor, deux conducteurs forment une spire (Figure. I.5) [4].

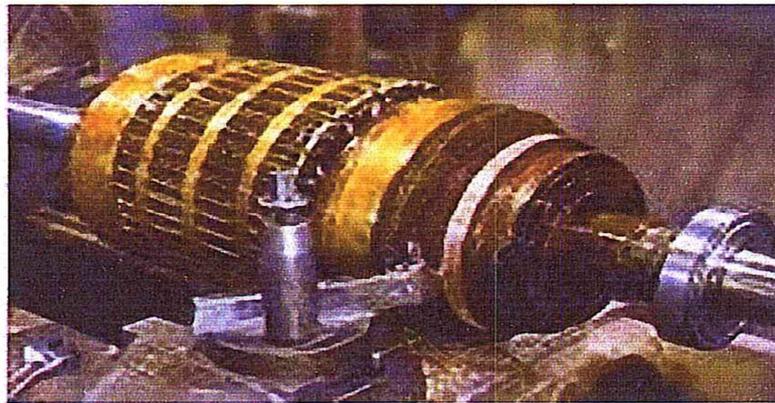


Figure. I.5 : Induit.

I.3.3.Collecteur et balais

a. Collecteur

Il est réalisé par assemblage des lames isolantes et conductrices (cuivre), où le bobinage est ensuite agrafé, soudé (par point) ou brasé. La surface du collecteur est généralement de structure cylindrique, le collecteur tourne afin d'être bien lisse, puis les cales inter-lames sont fraisées en biais afin d'augmenter leur tenue en tension. Le collecteur joue le rôle d'un interrupteur tournant et assure la distribution du courant quel que soit la vitesse de rotation de la machine (Figure. I.6) [5].

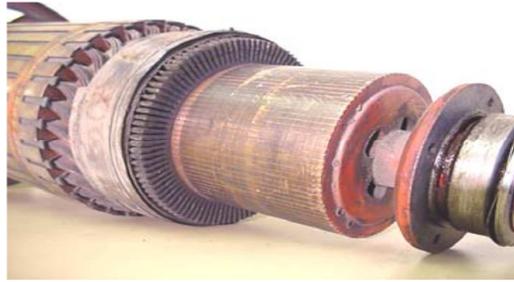


Figure. I.6:Collecteur.

b. Balais

Ils assurent le passage du courant électrique entre l'alimentation et les bobinages de l'induit sous forme d'un contact par frottement. La Figure .I.7 représente les balais de la machine à courant continu.

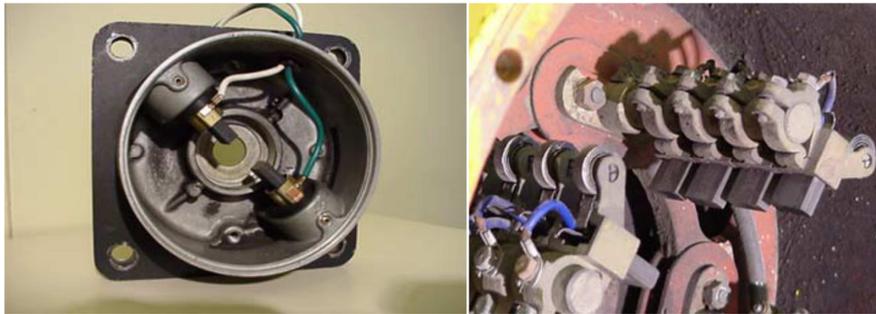


Figure. I.7 :les balais.

I.4.Principes de fonctionnement

Quelles que soient les machines étudiées, nous pouvons toutes les assimiler à des convertisseurs d'énergie :

- convertisseur électrique - mécanique.
- convertisseur mécanique - électrique.

a. Moteur

Le moteur est un convertisseur d'énergie électrique en énergie mécanique (Figure. I.8).

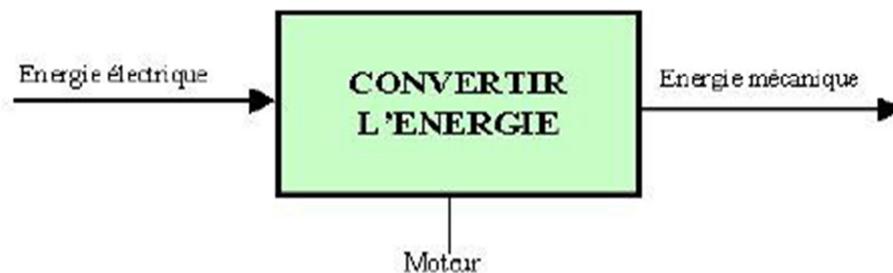


Figure. I.8 : Fonctionnement en moteur.

Son fonctionnement est basé sur la circulation d'un courant continu I dans un bobinage d'excitation, il produit un flux d'induction magnétique \vec{B} dans l'entrefer. Si une différence de potentiel continu est appliquée entre les balais, les conducteurs d'induit situé sous un même pôle (d'un même coté des balais) sont parcourus par un courant de même sens ces derniers baignant dans un champ d'induction de l'inducteur, d'après la loi de Laplace ils sont donc soumis à une force électromagnétique \vec{F} donnée comme suit :

$$d\vec{F} = I d\vec{l} \wedge \vec{B} \tag{I-1}$$

L'ensemble des forces forment un couple dont l'action tend à faire tourner l'induit. La Figure ci-dessous montre le principe de fonctionnement de la machine à courant continu [1].

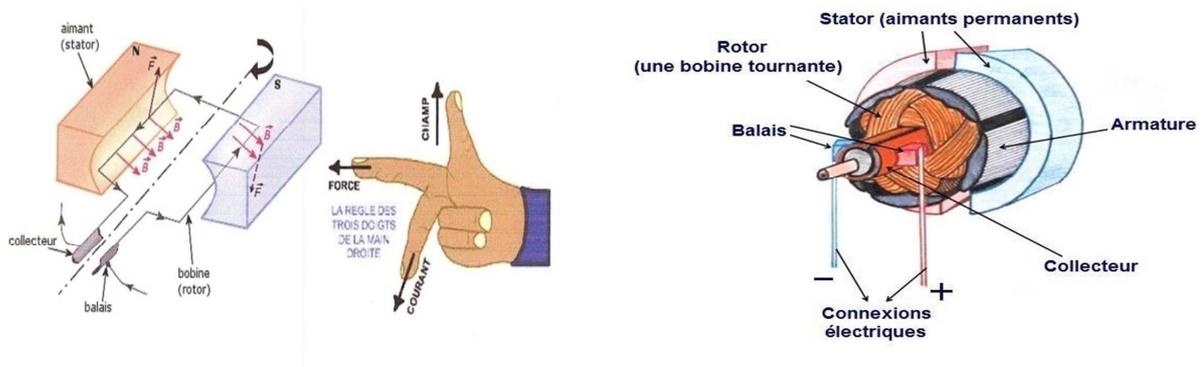


Figure. I.9 : principe de fonctionnement d'un moteur à courant continu.

Le sens est donné par les trois doigts de la main droite :

- **Pousse** : Sens du champ magnétique \vec{B}
- **Index** : Sens de la force électromagnétique \vec{F} .
- **Majeur** : Sens du courant I .

b. Génératrice

La génératrice est un convertisseur d'énergie mécanique en énergie électrique (Figure. I.10).

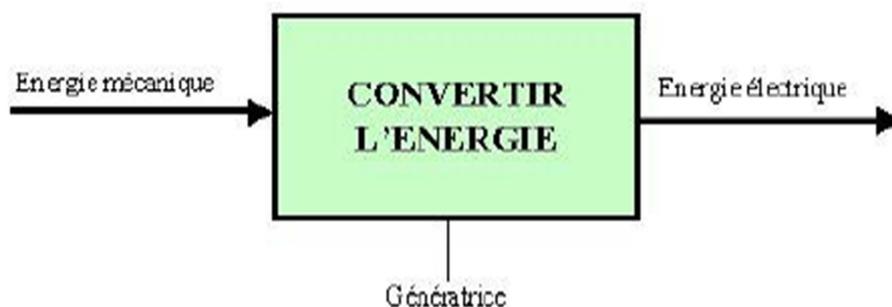


Figure. I.10 : Fonctionnement en génératrice.

Si l'on considère une spire constituée de deux conducteurs et placée sur l'induit lequel tourne à vitesse donnée Ω , cette spire en tournant coupe les lignes de champ et selon la loi de Faraday suivante:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{I-2})$$

Elle est alors le siège d'une force électromotrice E (f.e.m) sinusoïdale. L'ensemble des (f.e.m) générées par les différentes spires sont redressés par le système balais-collecteur pour obtenir aux bornes des balais la tension (f.e.m) continu E donnée par (I-3) [2] :

$$E = \frac{P}{2\pi\alpha} N \cdot \Phi \cdot \Omega \quad (\text{I-3})$$

$$E = K_e \cdot \Phi \cdot \Omega \quad (\text{I-4})$$

Avec :

$$k_e = \frac{P}{2\pi\alpha} N \quad (\text{I-5})$$

N : Le nombre de conducteur.

P : Nombre de paires de pôles.

Φ : Le flux d'inducteur [Wb].

α : Nombre de paires de voies d'enroulement.

K_e : Constante électromagnétique.

I.5. Bilan des puissances de la machine à courant continu

Quelle que soit la transformation d'énergie et en considérant les pertes P, la puissance absorbée P_a par un système, la puissance utile P_u . Qu'il restitue et le rendement η sont liées par les relations suivantes:

$$P_a = P_u + P \quad (\text{I-6})$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_u}{P_u + P} \quad (\text{I-7})$$

I.5.1. Bilan de puissance en fonctionnement moteur

On alimente la machine par une source de tension fournissant la puissance électrique P_a et la puissance utile P_u est délivrée sous forme mécanique à la charge par le rotor. La figure I.11 montre le bilan de puissance de la machine en fonctionnement moteur [6].

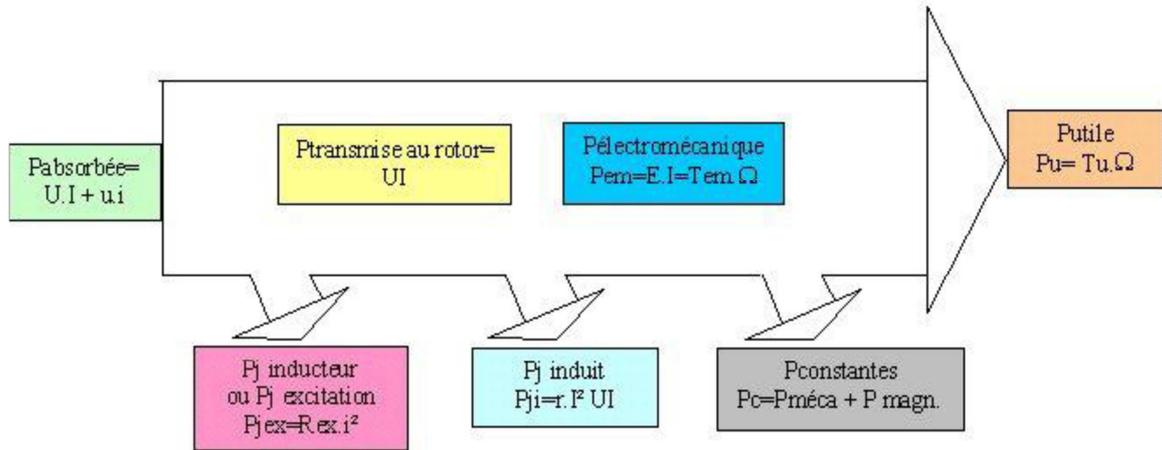


Figure. I.11 : Bilan de puissance en fonctionnement moteur.

I.5.2. Bilan de puissance en fonctionnement génératrice

On entraîne le rotor mécaniquement en fournissant la puissance mécanique P_a et on récupère une puissance électrique P_u aux bornes de l'induit (Figure. I.12).

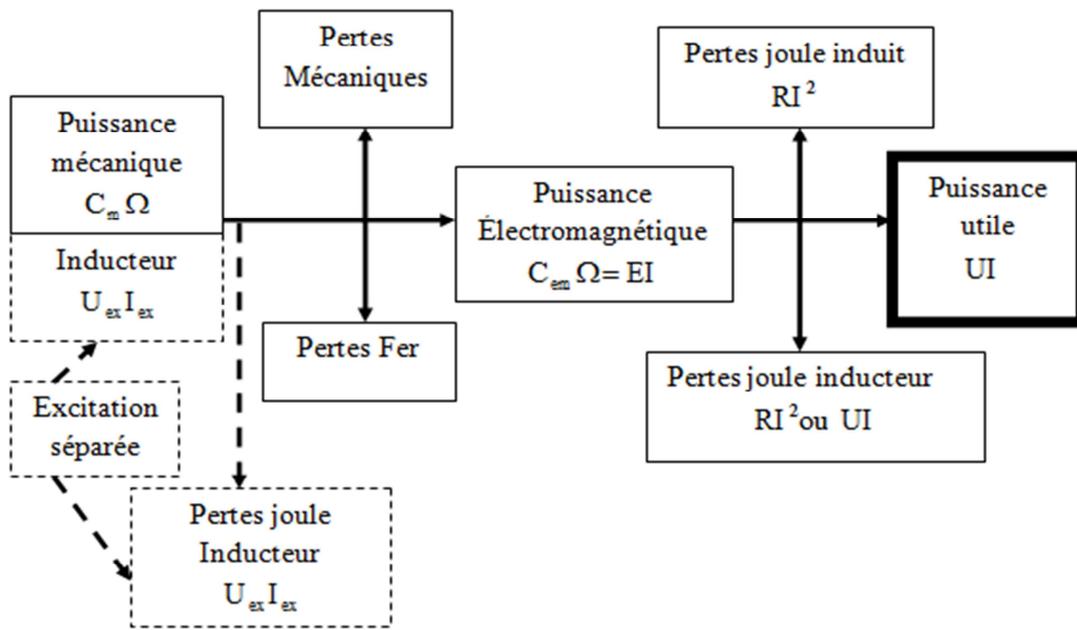


Figure. I.12 : Bilan de puissance en fonctionnement génératrice .

I.6. Différents types d'excitation de moteur à courant continu

I.6.1. Moteur à excitation série

Le moteur à excitation série est constitué de deux enroulements, induit et inducteur montés en série (même courant). Il est alimenté par une source continue de tension U , et de courant I qui débite sur un induit, de résistance R_a , d'inductance L_a et de force contre électromotrice E et d'un inducteur de résistance R_f et d'inductance L_f (Figure. I.13) [7] :

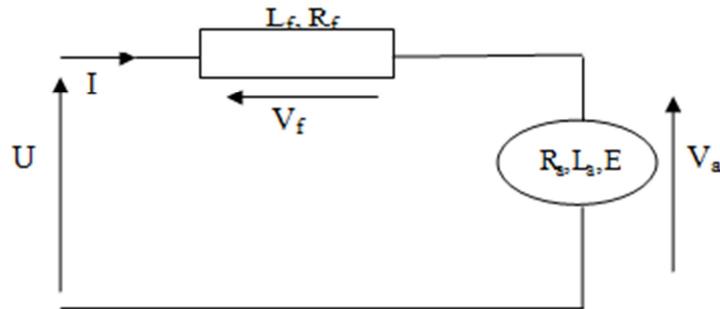


Figure. I.13 : moteur à excitation série.

L'équation de la tension d'alimentation est :

$$U = V_a + V_f \quad (\text{I-8})$$

Les équations du moteur deviennent alors :

$$V_a = E + R_a I + R_f I = E + (R_a + R_f) I \quad (\text{I-9})$$

$$C_m = K_m \cdot \phi \cdot I_a \quad (\text{I-10})$$

Avec :

U : Tension d'alimentation du circuit d'induit [V].

I : Courant d'induit [A].

R_a : Résistance du circuit d'induit [Ω].

L_a : Inductance du circuit d'induit [H].

V_f : Tension du circuit d'excitation [V].

R_f : Résistance du circuit d'excitation [Ω].

E : Force contre électromotrice [V].

a. Caractéristiques

Le moteur série est autorégulateur de puissance. Sa caractéristique mécanique montre qu'il possède un très fort couple au démarrage qui ne dépend pas de la tension, mais il ne peut pas fonctionner à faible charge car sa vitesse devient infini (risque de destruction du moteur). Sa vitesse décroît quand la charge augmente d'où l'option de changement de vitesse automatique, cette vitesse est moins sensible aux variations brusques de la tension d'alimentation que le moteur shunt ...etc. (Figure. I.14) [3].

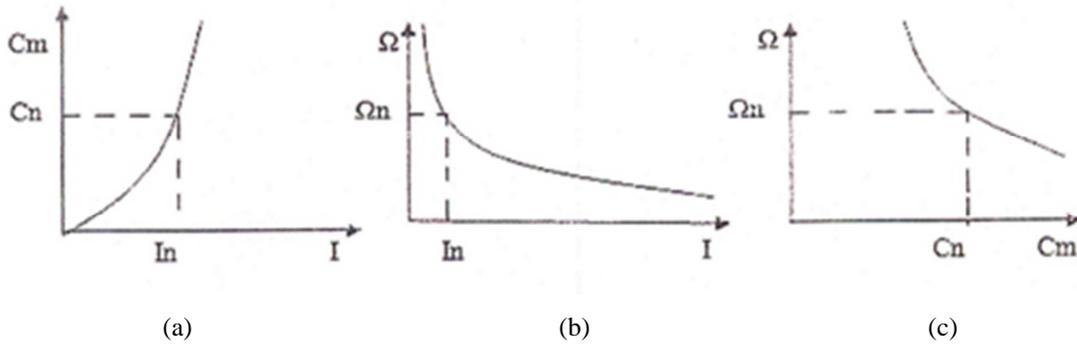


Figure. I.14 : caractéristiques de la machine à excitation série.

- (a) : Caractéristique électromécanique du moteur série.
- (b) : Caractéristique de vitesse en fonction du courant du moteur série.
- (c) : Caractéristique mécanique du moteur série.

Avec :

- C_m : Couple moteur [N.m].
- I_n : Courant nominal d’induit [A].
- Ω : Vitesse angulaire [rd/s].
- Ω_n : Vitesse angulaire nominale [N.m].

b. Domaine d’utilisation

Le moteur à excitation série est utilisé particulièrement dans l’actionnement de pompes (compresseur), ou ventilateurs traction, transport...etc.

I.6.2.Moteur à excitation shunt

Le moteur à excitation shunt (parallèle) est constitué de deux enroulements, induit et inducteur montés en parallèle. Il est alimenté par une seule source continue de tension U et de courant I . Le circuit inducteur constitué d’une self L_f et d’une résistance R_f est parcouru par un courant I_f , et celui de l’induit comportant une résistance, une inductance et une force contre électromotrice respectivement R_a, L_a, E est parcouru par un courant I_a (Figure. I.15). Pour varier la vitesse, il faut varier le courant d’excitation et le couple développé par le moteur [7].

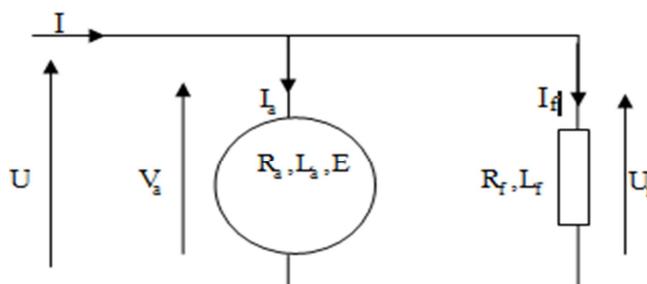


Figure .I.15 : Moteur à excitation shunt .

Les équations du moteur sont :

$$V_a = E + R_a I_a \quad (\text{I-11})$$

$$U = R_a I_a + L \frac{dI_f}{dt} + E \quad (\text{I-12})$$

$$C_{em} = K_m \cdot \phi \cdot I_a \quad (\text{I-13})$$

Avec

I_a : Courant d'induit [A].

K_m : Constante propre du moteur.

C_{em} : Couple électromagnétique de la machine [N.m].

a. Caractéristiques

D'après les caractéristiques données par la Figure. I.16, on remarque que le moteur shunt est un autorégulateur de vitesse dans des limites étroites. Cette dernière n'est pas vraiment influencée par la variation de la tension d'induit. Que le moteur à excitation séparée, elle est relativement constante quel que soit la charge. Il peut fonctionner à vide sans risque d'emballement, utilisé pour l'entraînement des machines dont la vitesse ne doit pas dépendre de la charge, cas des machines outils, et remplace le moteur série où l'emballement est à craindre [3].

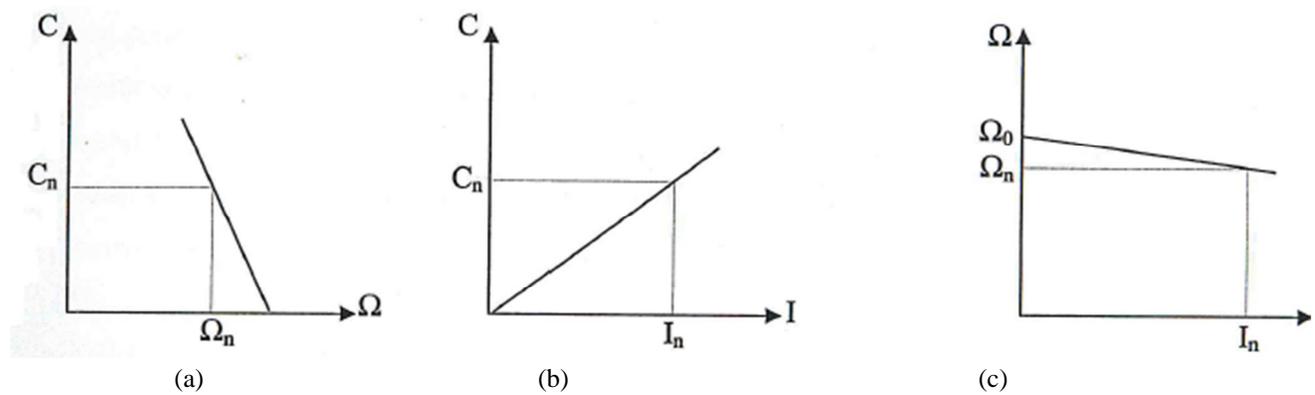


Figure .I.16: caractéristique de la machine à excitation shunt.

(a) : Caractéristique mécanique du moteur shunt.

(b) : Caractéristique électromécanique du moteur shunt.

(c) : Caractéristique vitesse en fonction du courant.

b. Domaine d'utilisation

Ce moteur est utilisé dans les machines laminoirs, les broyeuses, les cisailles, appareilles de lavage et téléphérique ...etc.

I.6.3. Moteur à excitation séparée

Le moteur à excitation séparée est constitué de deux enroulements induit et inducteur qui sont alimentés séparément par deux sources distinctes. L'inducteur qui comporte une résistance R_f et une inductance L_f qu'est excitée par une source continue de tension V_f , et de courant I_f , et l'induit qui est constitué d'une résistance, d'une inductance, et d'une force contre électromotrice respectivement R_a , L_a et E . Il est excité par une source continue de tension V_a , et de courant I_a (Figure. I.17) [7] :

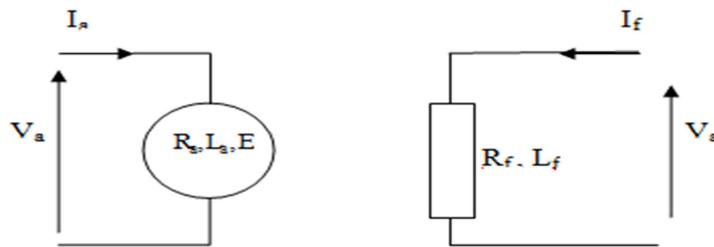


Figure I.17 : Moteur à excitation séparée.

a. Caractéristiques

Le moteur à courant continu à excitation séparée joint à l'avantage d'un réglage de vitesse dans de larges limites. Cette dernière est très sensible aux variations de la tension d'induit, et indépendante de la charge, c'est pour cela qu'on peut le coupler à de faibles charges sans risque d'emballement. Son couple est proportionnel au courant d'induit, et très important à faible vitesse, d'où ses performances dynamiques très élevées. Son courant de démarrage est très fort d'où la nécessité de le limiter pour éviter l'échauffement du circuit induit. Ce moteur est le moteur de base des asservissements de position, aussi bien pour les petites que les grandes puissances. La Figure I.18, montre les principales caractéristiques du moteur à excitation séparée [3] :

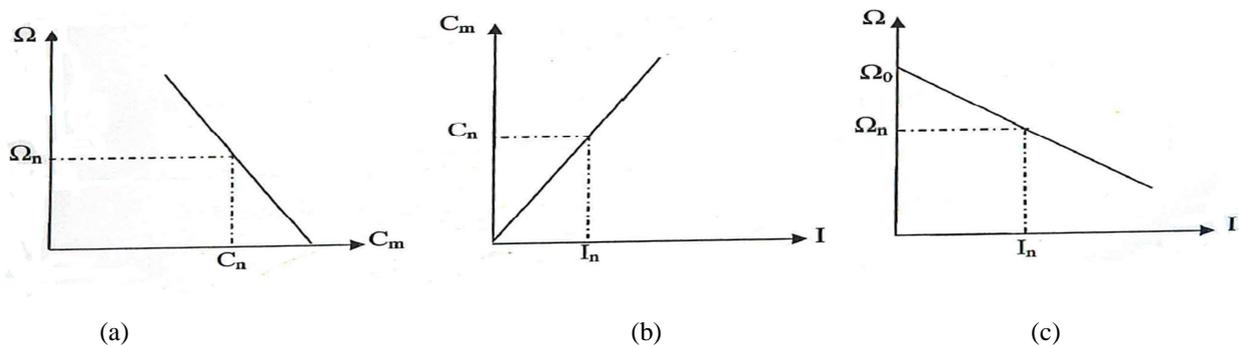


Figure. I.18 : Caractéristique du moteur à excitation séparée.

(a) : Caractéristique mécanique du moteur à excitation séparée.

(b) : Caractéristique électromécanique du moteur à excitation séparée.

(c) : Caractéristique de vitesse en fonction de courant du moteur à excitation séparée.

b. Domaines d'utilisation

Ce moteur est employé dans les machines d'excitation (les pompes, transport, trolleybus, TG...) et les entraînements d'essuie glaces...etc.

I.6.4. Moteur à excitation composée (compound)

Le moteur à excitation composé, possède deux enroulements inducteurs, série et shunt. Ce type de moteur a des propriétés intermédiaires entre celles des moteur série et shunt. Suivant le raccordement de l'enroulement inducteur shunt, de cette composition on peut avoir deux types additionnel ou différentiel.

I.6.4.1. Moteur compound à flux additif

Le moteur compound à flux additif est alimenté par une source de tension continue U , et de courant I . L'inducteur série contenant une résistance R_s , et une inductance L_s , est parcourue par le même courant que l'induit qui comporte une résistance, une inductance et une force contre électromotrice respectivement R_a , L_a et E et l'inducteur shunt de résistance R_f et d'inductance L_f est parcourue par un courant I_f , Figure I-19 [7].

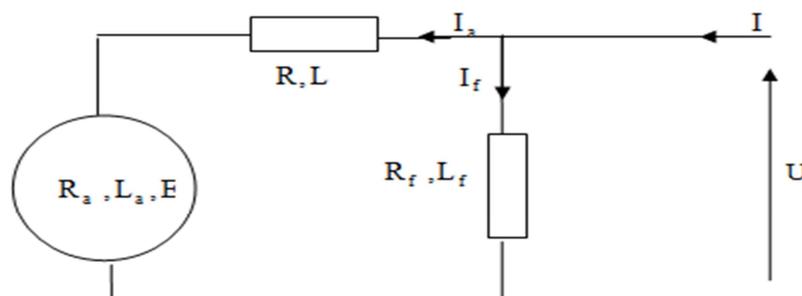


Figure. I.19 : Schéma électrique du moteur compound à flux additif.

a. Caractéristiques du moteur compound à flux additif

D'après les caractéristiques données par la Figure. I.20, on remarque que le moteur compound à flux additif est un alliage du moteur série et du moteur shunt, il a bénéficié des avantages des deux moteurs. Son couple de démarrage est plus fort que le moteur shunt. Il peut fonctionner à faible charge sans risque d'emballerment et présente une meilleure stabilité que les deux moteurs précédents, mais il est fait seulement pour l'entraînement à vitesse strictement constante [3].

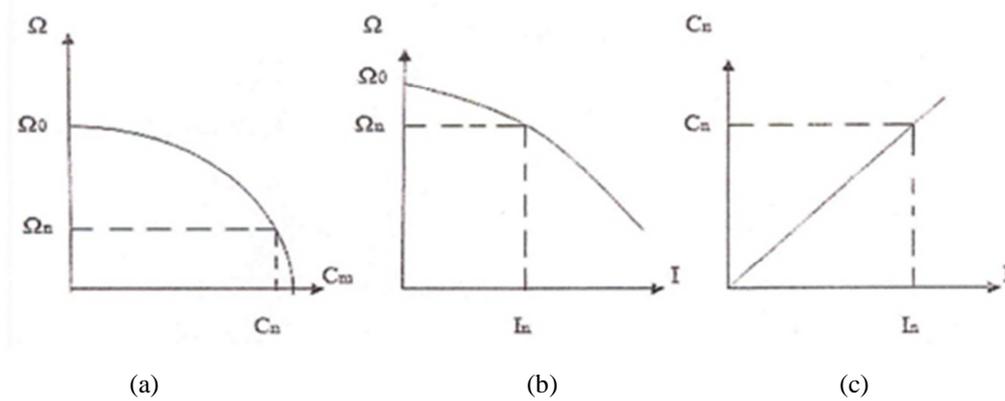


Figure.20 : Caractéristiques du moteur composé à flux additif.

(a) : Caractéristique mécanique du moteur compound à flux additif.

(b) : Caractéristique de vitesse en fonction de courant du moteur compound à flux additif.

(c) : Caractéristique électromécanique du moteur compound à flux additif.

b. Domaine d'utilisation

Ateliers (étaux limeurs, raboteuse, cisailles ...), traction électrique.

I.6.4.2. Moteur compound à flux soustractif

Le moteur compound à flux soustractif est alimenté par une source de tension continue U et de courant I . L'inducteur série qui comporte une résistance R , et une inductance L est parcourue par le courant d'alimentation I . L'induit du moteur est constitué d'une résistance R_a , d'une inductance L_a , et d'une force contre électromotrice E et l'inducteur shunt de résistance R_f et d'inductance L_f est parcourue par un courant I_f . Figure. I.21 [7].

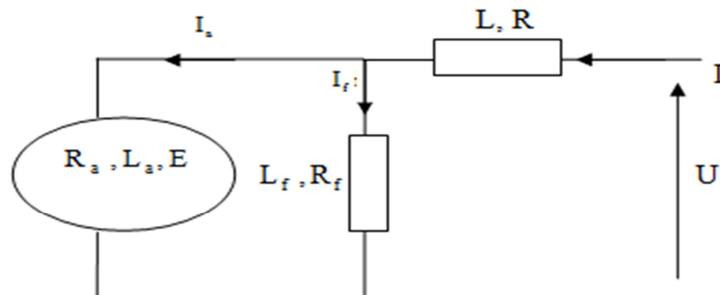


Figure. I.21 : Schéma électrique du moteur compound à flux soustractif.

a. Caractéristiques

Le moteur compound à flux soustractif a une très grande caractéristique mécanique (indépendance de la vitesse en fonction de la charge). Sa vitesse augmente avec l'augmentation du couple, ce qui présente un très grand danger, car sa vitesse croît jusqu'à l'infini d'où le risque de destruction du moteur. Il présente une très grande instabilité, et un risque d'emballement du fait de

l'annulation du flux résultant des enroulements série et shunt. Pratiquement ce moteur n'est plus utilisé [3].

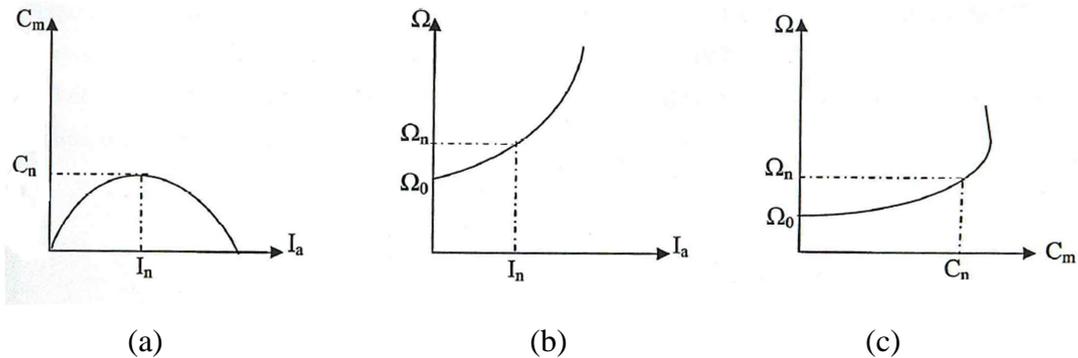


Figure I.22 : Caractéristique du moteur composé à flux soustractif.

- Caractéristique électromécanique du moteur compound à flux soustractif.
- Caractéristique de la vitesse en fonction de courant du moteur compound à flux soustractif.
- Caractéristique mécanique du moteur compound à flux soustractif.

I.7. Différents mode de réglage de la vitesse

Pour illustrer les différents modes de réglage de la vitesse d'un moteur à courant continu, nous avons opté pour un moteur à excitation séparée qui est soumis à une alimentation continue. En régime variable nous avons :

$$V_a = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E \quad (\text{I-14})$$

$$E = K \cdot \Phi \cdot \Omega \quad (\text{I-15})$$

En régime établi (la variation de I est nulle), les équations (I-14) et (I-15) deviennent :

$$V_a = R_a I_a + E \quad (\text{I-16})$$

A partir des équations (I-15) et (I-16), on déduit l'expression générale de la vitesse de rotation du moteur :

$$\Omega = \frac{V_a - R_a I_a}{K \Phi} \quad (\text{I-17})$$

Avec

K : Constante du moteur.

On remarque que la vitesse de rotation Ω dépend de trois variables à savoir la tension de l'induit V_a , la résistance de l'induit R_a et le flux Φ ce qui donne les trois possibilités de réglage suivantes [3] :

I.7.1 Réglage rhéostatique

En fixant la tension d'induit et le flux d'excitation à leurs valeurs nominale, on peut varier la vitesse en agissant sur la résistance d'induit avec un rhéostat monté en série avec l'enroulement induit. Le réglage rhéostatique a l'inconvénient d'amplifier les pertes par effet joule, d'où la rareté son utilisation.

I.7.2 Réglage par variation de la tension d'induit

En fixant le flux d'excitation à sa valeur nominale, on fait varier la tension d'induit entre zéro et la tension nominale du moteur. On obtient une famille de droites parallèles à la caractéristique mécanique du moteur, donnée par la Figure. I.23 :

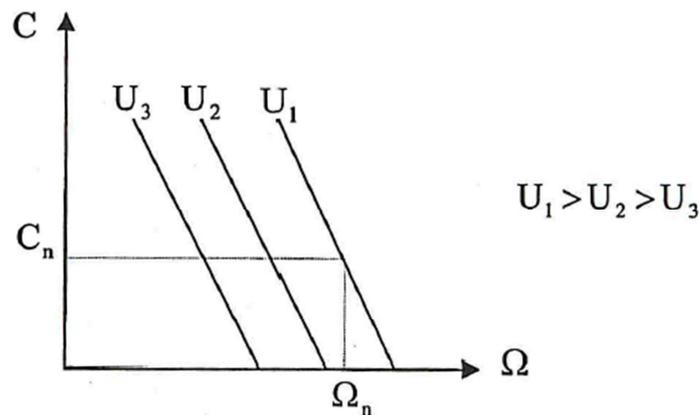


Figure. I.23 : Variation de la vitesse par la tension d'induit.

I.7.3 Réglage par variation du flux d'excitation

En fixant la tension d'induit à sa valeur nominale, on fait varier le flux d'excitation entre la valeur minimale et la valeur nominale, On obtient une famille de droites parallèles à la caractéristique mécanique donnée par la Figure .I.24:

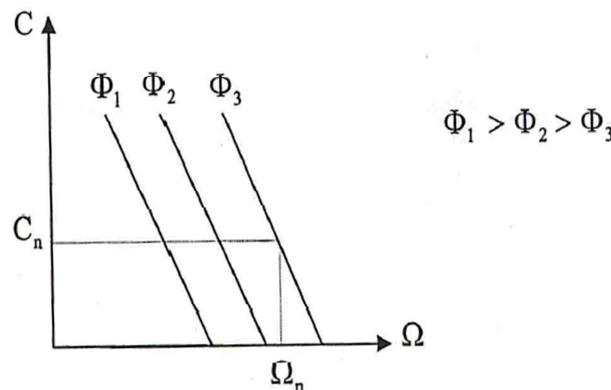


Figure. I.24 : Variation de la vitesse par flux d'excitation.

Le réglage par la tension d'induit permet seulement de diminuer la vitesse (variation de zéro à Ω_n), par contre le réglage par variation du flux d'excitation permet seulement de l'augmenter,

(variation entre Ω_n et $3\Omega_n$). Pour avoir une plage de variation de la vitesse entre zéro et trois fois la vitesse nominale, on combine les deux modes de réglage.

I.8. Avantages et Inconvénients de la machine à courant continu

a. Avantages

- L'avantage principal des machines à courant continu réside dans leur adaptation simple aux moyens permettant de régler ou de faire varier leur vitesse, leur couple et leur sens de rotation, les variateurs de vitesse, voir leur raccordement direct à la source d'énergie (batterie d'accumulateur, piles...etc.).
- La variation de fréquence de rotation est simple à réaliser.

b. Inconvénients

- Le principal problème de ces machines vient de la liaison entre les balais et le collecteur rotatif, ainsi que le collecteur lui même comme indiqué plus haut et la complexité de sa réalisation.
- Plus la vitesse de rotation est élevée, plus la pression des balais doit augmenter pour rester en contact avec le collecteur donc plus de frottement. Donc des vitesses élevées, les balais doivent être remplacés très régulièrement.
- Le collecteur imposant des ruptures de contact provoque des arcs, qui usent rapidement le commutateur et génèrent des parasites dans le circuit d'alimentation, ainsi que par rayonnement électromagnétique.
- Le contact électrique imparfait cause des arcs électriques, usant rapidement le commutateur et générant des parasites dans le circuit d'alimentation.

Pour des fonctionnements en moteur de petite puissance, ce problème peut être résolu à la technologie du moteur à courant continu sans balai communément appelé moteur Brushless. Un dispositif d'électronique de puissance remplace l'ensemble balai collecteur. La position du rotor est détectée par des capteurs à effet Hall et le courant est commuté par des transitoires à effet de champ

I.9. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté d'une façon plus au moins détaillée la machine à courant continu à savoir les différents constituants, les différents schémas de branchement et les modes d'excitation de la machine à courant continu et leur principales caractéristiques, nous avons aussi présenté les équations électriques et mécaniques qui régissent le fonctionnement de la machine. Dans le chapitre suivant nous allons-nous intéresser à la modélisation et la régulation de la machine à courant continu.

II.1.Introduction

Pour effectuer l'analyse et la synthèse de la machine à courant continu, il est nécessaire de connaître les relations entre ses grandeurs d'entrée et ses grandeurs de sortie. L'ensemble de ces relations constituent le modèle mathématique de la machine. Dans cette partie il est préférable d'adapter une commande électrique d'un moteur à excitation séparée dû à la simplicité de sa commande (son flux d'excitation est constant) et ses performances dynamique très élevées (très fort couple à faible vitesse). La machine à courant continu peut être modélisée par l'ensemble d'équations électriques, électromagnétique et mécanique. Ces trois groupes d'équations nous permettent de mieux appréhender la machine à courant continu dans son fonctionnement réel.

Le système moteur- convertisseur possède des caractéristiques propres qui sont rarement satisfaisants vis-à-vis des objectifs que l'on fixe, pour un système commandé, on souhaite :

- Une bonne précision et rapidité.
- Une bonne stabilité.
- Une insensibilité aux perturbations.

Afin d'améliorer les performances du système, on modifie la structure de l'asservissement en ajoutant des composantes qui vont corriger les signaux transmis entre les différents blocs [3].

II.2.Description de la machine à courant continu

Le moteur à courant continu dont nous allons établir les équations est représenté par la Figure .II.1 :

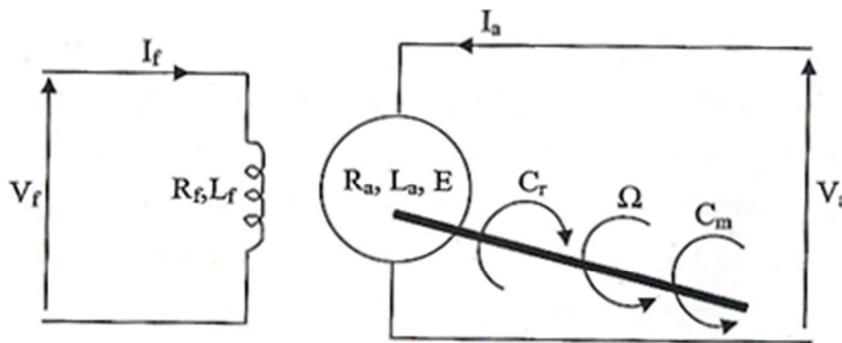


Figure. II.1 : Schéma électrique du moteur à excitation séparée.

Du côté électrique nous pouvons dire que la machine à courant continu se définit par un circuit d'induit et un circuit d'inducteur ; l'induit de la machine à courant continu peut être vu comme une résistance R_a et une inductance L_a en série avec une source de tension commandée V_a et proportionnelle à la vitesse.

Du côté mécanique, nous représentons la machine à courant continu par l'inertie de l'induit augmenté de celui de la charge entraînée.

II.3. Point de fonctionnement du moteur à excitation séparée

Une charge oppose au moteur un couple résistant C_r , pour que le moteur puisse entraîner cette charge, il doit fournir un couple utile C_m de telle sorte que :

$$C_r = C_m \quad (\text{II-1})$$

Avec :

c_r : Couple résistant [N.m].

c_m : Couple moteur [N.m].

La relation (II-1) définit le point de fonctionnement du moteur qui est le point d'intersection de la caractéristique mécanique du moteur avec celle de la charge (voir la Figure. II.2) :

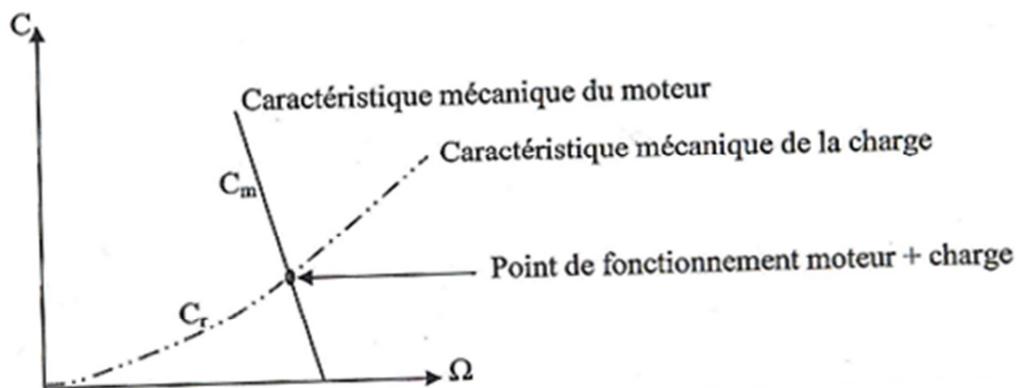


Figure II.2 : caractéristique de fonctionnement du moteur plus charge.

II.4. Généralités sur la commande à vitesse variable des moteurs à courant continu

Comme tous les moteurs électriques, le moteur à courant continu doit être considéré comme un générateur de couple. Ce couple est alors transmis à la charge qui peut entrer en rotation. La vitesse de l'ensemble moteur-charge n'est pas imposée par le moteur, mais par la caractéristique couple-vitesse de l'ensemble moteur-charge. Le point de fonctionnement de l'ensemble de la motorisation est situé à l'intersection de la caractéristique mécanique de l'ensemble moteur-charge et celle du moteur. Pour faire varier la vitesse de rotation de l'ensemble, il faut moduler le couple fourni par le moteur à la charge. Si l'on souhaite augmenter la vitesse de rotation de l'ensemble moteur-charge, il faut augmenter le couple fourni par le moteur, qui devient alors supérieur au couple de charge. Il apparaît alors un couple d'accélération $\left(J \frac{d\Omega}{dt}\right)$, ce qui entraîne une augmentation de la vitesse de la charge. L'ensemble d'une commande à vitesse variable, quel que soit le type de motorisation utilisée, peut donc se décomposer en deux boucles d'asservissement, une boucle de courant et une boucle de vitesse Figure. II. 3.

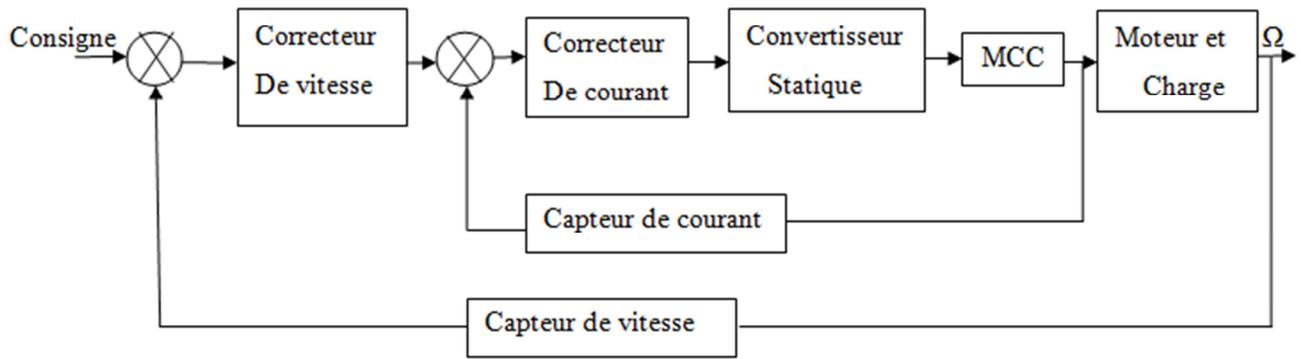


Figure .II.3 : Ensemble d'une commande à vitesse variable d'un moteur à courant continu.

a. Convention des signes

- Un courant positif crée un flux positif à travers son propre enroulement.
- Une force électromotrice positive fait circuler un courant positif.
- L'induit et l'inducteur sont considérés comme récepteurs.

b. Hypothèses simplificatrice

- On suppose que le circuit magnétique n'est pas saturé, condition nécessaire pour considérer les flux comme fonctions linéaires des courants.
- On suppose que le circuit magnétique parfaitement feuilleté, ce qui permet de considérer que seuls les enroulements inducteur et induit est parcouru par un courant.
- On prend la densité de courant comme uniforme dans la section des conducteurs.

II.5. Description du redresseur

Du point de vue des utilisateurs, l'énergie électrique est souvent utilisée en continu, il est donc nécessaire de disposer un système qui effectue cette conversion, ce dispositif est appelé redresseur également convertisseur destiné à alimenter une charge de type continu à partir d'une source alternative ; la source est la plupart du temps, du type tension dans notre cas ou utilisé un convertisseur commande tout thyristor (pont de Gräetz) (voir la Figure ci-dessous) [11].

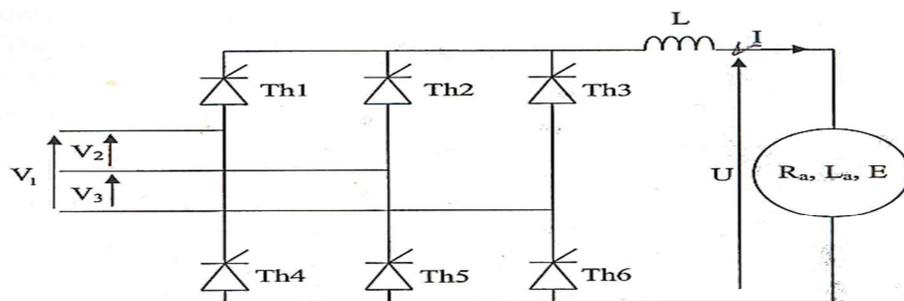


Figure .II.4. Redresseur triphasé tous thyristors.

II.5.1. Description du pont du Gräetz

C'est une association en série d'un montage cathode commune et un montage anode commune, ces commutations à cathode commune formé par les thyristors Th1, Th2 et Th3, il est alimenté par un système de tension triphasé est fourni un courant unidirectionnel sous une tension continu variable, cette dernière est obtenue par la variation de l'angle d'amorçage α selon la tension V_{moy} redressé qu'on désire obtenir afin d'avoir un courant délivré par le redresseur tout thyristors complètement laissé on utilise une inductance L assez élevée, avec $\tau = L/r$ satisfaisant la condition $\tau \gg T$ [11].

Avec :

τ : constante du temps de la bobine de lissage[s].

T : période du courant redressée[s].

II.5.2. Description et commande des thyristors

a. Descriptions des thyristors

Le thyristor est le composant de puissance le plus utilisé pour la réalisation des convertisseurs électroniques, ce thyristor est caractérisé par un courant de gâchette cette caractéristique est mise à profit pour faire varier la grandeur électrique de la sortie et ainsi régler la valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge et le courant qui la traverse [11].

b. Commande des thyristors

Les thyristors fonctionnant en commutation naturelle. A cause de la nature alternative des tensions d'alimentation, le courant dans chaque thyristor s'annule automatiquement du fait de l'entrée en conduction de l'autre thyristor. La Figure. II.5 montre les intervalles possibles d'amorçage des six thyristors. Ils ont tous une largeur angulaire de π , et sont décalés deux à deux de $2\pi/6$ [3] :

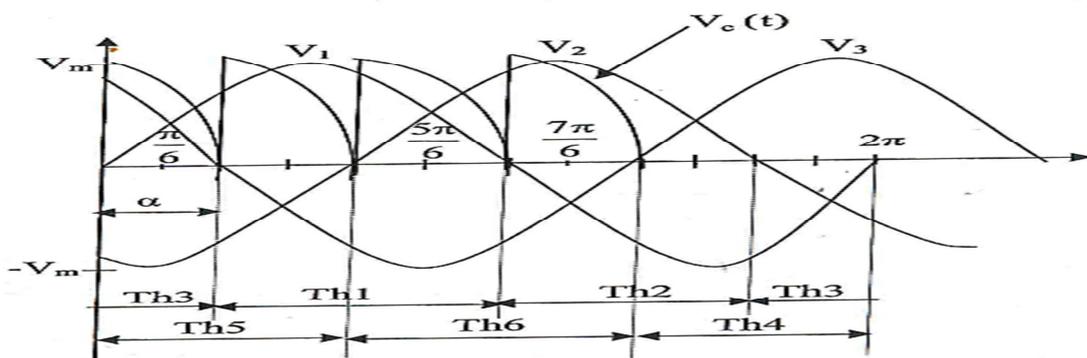


Figure .II.5 : intervalles d'amorçage des six thyristors du redresseur.

Avec :

- $+V_m$: tension d'alimentation maximale [V].
- $-V_m$: tension d'alimentation minimale [V].

c. Hypothèses de redresseur

- Courant de charge parfaitement lissé.
- Thyristors parfaits.
- Commutation instantanée.

II.6. Description de capteur

Les capteurs sont l'un des principaux éléments dans un système automatique, ils assurent la fonction de la mesure. En effet, le capteur est directement connecté à la grandeur à régler ou à contrôler, son rôle est de fournir une image réduite du signal plus commande à traiter. Notre système nécessite deux types de capteur [12].

II.6.1. Capteur de vitesse

a. la génératrice tachymétrie (GT)

Elle est montée sur l'arbre du moteur, elle débite à ces bornes une tension continue proportionnelle à la vitesse de rotation, elle introduit un gain K_{Ω} . La tension aux bornes de la génératrice est légèrement ondulée, elle nécessite donc un filtrage (Figure. II. 6) [12].

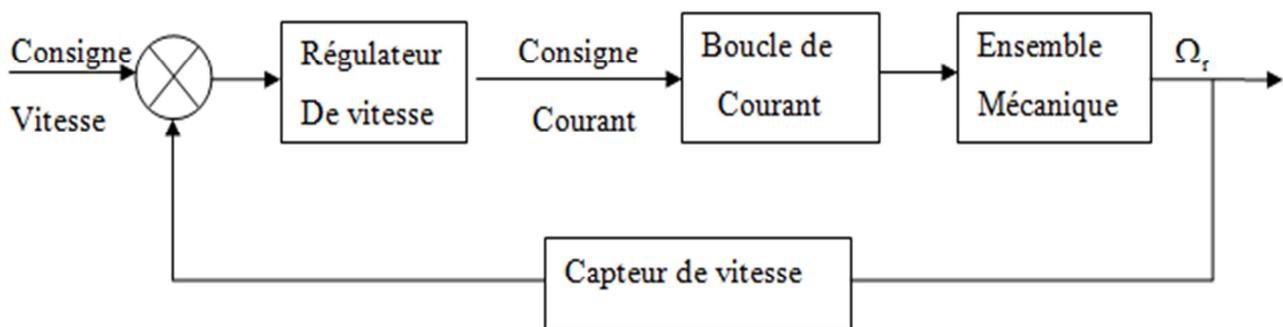


Figure .II.6 : Boucle de vitesse

II.6.2. Capteur de courant

Il existe plusieurs types de capteurs de courant et on distingue :

a. Capteurs résistifs

Il s'agit d'un shunt (résistance placée en série avec l'induit) ayant pour tâche de convertir le courant d'induit en tension, les pertes joules qu'il consomme sont négligeables, il introduit un gain K_1 , la tension aux bornes de shunt présente des ondulations d'où la nécessité d'utiliser un filtre [12].

b. Capteur de courant à effet Hall

Ce type de capteur de courant exploite l'effet Hall pour produire une tension qui est l'image exacte du courant à mesurer ou à visualiser. Le courant à visualiser est appliqué à un enroulement de circuit magnétique, il produit un champ magnétique qui est responsable de l'apparition de la tension Hall. Dans le cas de la machine à courant continu, réaliser un asservissement de couple revient à

réaliser un asservissement du courant. Nous allons donc dans un premier temps étudier l'asservissement du courant dans la machine. Cet asservissement a pour schéma bloc suivant [12] :

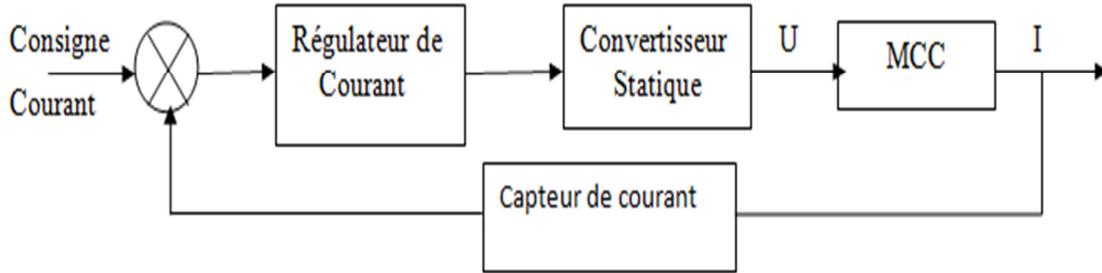


Figure .II.7 : Boucle de courant

Afin de pouvoir mener à bien la réalisation de cet asservissement, il est nécessaire de mettre en équation le comportement en courant de la motorisation, c'est-à-dire évaluer la fonction de transfert suivante :

$$C(p) = \frac{I(p)}{U(p)} \quad (\text{II-2})$$

II.7. Modélisation de l'ensemble moteur-convertisseur

Dans cette partie, nous allons donner le modèle mathématique du moteur et du redresseur dans le domaine temporel puis dans le domaine opérationnel.

II.7.1. Modélisation du moteur à courant continu à excitation séparée

La modélisation consiste à écrire à partir d'une analyse physique et d'un système électromécanique, les équations mathématiques régissant son fonctionnement pour représenter notre système sous forme fonction de transfert. Les équations qui régissent le moteur à courant continu à excitation séparée dans le domaine temporel sont :

a. Equations électriques

$$V_a = R_a \cdot I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E \quad (\text{II-3})$$

$$E = K \cdot \Phi \cdot \Omega \quad (\text{II-4})$$

$$K \cdot \Phi = K_m \quad (\text{II-5})$$

$$\Omega = \frac{1}{P} \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{II-6})$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (\text{II-7})$$

Avec :

K_m : Constante du moteur [V / rd.s⁻¹].

V_a : Tension aux bornes de l'induit [V].

I_a : Courant aux bornes de l'induit [A]

Ω : vitesse de rotation du moteur [rd/s].

Φ : Flux d'excitation [weber].

E : Force contre électromotrice [V].

R_a : Résistance aux bornes de l'induit [H].

L_a : Inductance de l'induit [H].

ω : Vitesse angulaire du rotor [rd/s].

P : Nombre de paires de pôles.

b. Equations mécaniques

D'après le principe fondamental de la dynamique, l'équation mécanique du moteur est donnée par :

$$C_m = C_J + C_f + C_r + C_s \quad (\text{II-8})$$

On néglige les frottements secs et on obtient :

$$C_m - C_r = C_J + C_f \quad (\text{II-9})$$

$$C_f = f \cdot \Omega \quad (\text{II-10})$$

$$C_J = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{II-11})$$

$$C_m - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega \quad (\text{II-12})$$

$$C_{em} = C_m = K_m \cdot I_a \quad (\text{II-13})$$

$$K_m \cdot I_a - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega \quad (\text{II-14})$$

Avec :

C_J : Couple d'inertie [N.m].

C_f : Couple de frottement visqueux [N.m].

C_s : Couple de frottement sec [N.m].

C_{em} : Couple magnétique de la machine [N.m].

J : Moment d'inertie de l'ensemble moteur-charge [N.m].

f : Coefficient de frottement visqueux moteur-charge [N.m. rd/s].

c. Equations magnétiques

Les équations magnétiques du moteur sont données comme suit :

$$\Phi_a = L_a \cdot I_a \quad (\text{II-15})$$

$$\Phi_f = M_{fa} \cdot I_f \quad (\text{II-16})$$

Avec :

M_{fa} : Inductance mutuelle entre l'enroulement induit et inducteur.

Φ_a : Flux magnétique de l'induit [weber].

Φ_f : Flux magnétique de l'inducteur [weber].

II.7.2. Modélisation du redresseur

Le redresseur est alimenté par un système triphasé équilibré dont les tensions entre phase de valeur efficace V et de fréquence F ont pour équations:

$$V_1 = V\sqrt{2} \sin \omega t \quad (\text{II-17})$$

$$V_2 = V\sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{II-18})$$

$$V_3 = V\sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (\text{II-19})$$

La tension moyenne aux bornes de la charge est donnée par :

$$V_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T V_s(t) dt \quad (\text{II-20})$$

$$V_{\text{moy}} = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{-\pi}{6} + \alpha}^{\frac{\pi}{6} + \alpha} V_m \sin \theta d\theta \quad (\text{II-21})$$

$$V_{\text{moy}} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \cos \alpha \quad (\text{II-22})$$

Avec :

$$\theta = \omega t.$$

$$V_m = V\sqrt{2}.$$

Le courant moyen :

$$I_{\text{moy}} = \frac{I_a}{3} \tag{II-23}$$

Le courant efficace :

$$I_{\text{eff}} = \frac{I_a}{\sqrt{3}} \tag{II-24}$$

a. Model de transfert du moteur

En écrivant les équations du moteur dans le domaine opérationnel, et en supposant que les conditions initiales sont nulles. Les relations (II-3), (II-4), (II-12) et (II-13) deviennent [8]:

$$V_a(p) = R_a \cdot I_a(p) + L_a p \cdot I_a(p) + E(p) \tag{II-25}$$

$$E(p) = K_m \cdot \Omega(p) \tag{II-26}$$

$$C_m(p) = K_m \cdot I_a(p) \tag{II-27}$$

$$C_m(p) - C_r(p) = J \cdot p \cdot \Omega(p) + f \cdot \Omega(p) \tag{II-28}$$

De l'équation (II-25), on peut déduire la relation entre la tension d'alimentation $V_a(p)$, et la force contre électromotrice $E(p)$, qui est donnée par :

$$V_a(p) - E(p) = (R_a + L_a \cdot p) I_a(p) \tag{II-29}$$

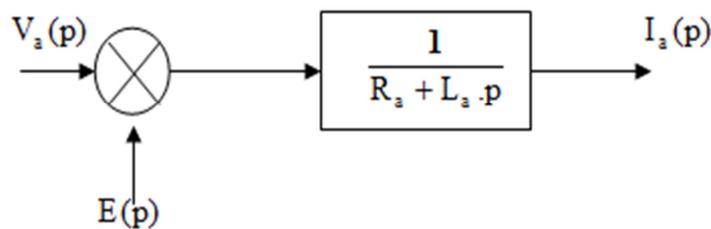


Figure. II.8 : schéma bloc de la boucle du courant.

➤ **Fonction de transfert global du moteur**

De l'équation (II-27), on déduit la relation entre le courant d'induit $I_a(p)$ et le couple moteur $C_m(p)$ Figure .II.9 :

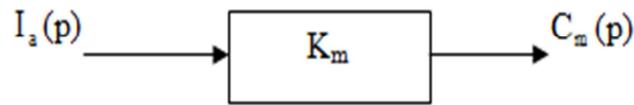


Figure II.9: schéma bloc de la boucle du couple.

De l'équation (II-28), on déduit la relation entre la vitesse de rotation $\Omega(p)$ et le couple utile $C_m(p) - C_r(p)$ qui est donnée comme suit :

$$C_m(p) - C_r(p) = (J \cdot p + f) \Omega(p) \tag{II-30}$$

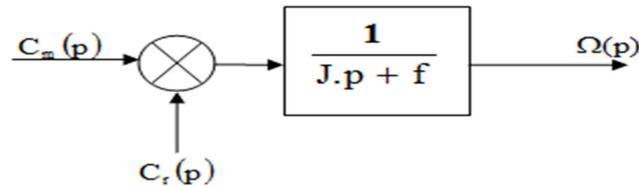


Figure II.10 : schéma bloc de la boucle de la vitesse

De l'équation (II-26), on trouve la relation entre la vitesse de rotation et la force contre électromotrice, Figure II.11 :

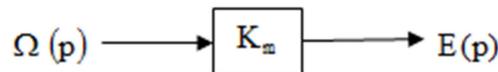


Figure II.11 : schéma bloc de la vitesse de rotation en fonction de contre électromotrice.

A partir des relations (II-25), (II-26), (II-27), (II-28) on obtient la fonction de transfert globale du moteur qui est donnée comme suit :

$$T(p) = \left(\frac{\Omega}{V_a} \right)_{cr=0} = \frac{\frac{K_m}{R_a \cdot f + K_m^2}}{\left(\frac{L_a J}{R_a \cdot f + K_m^2} \right) p^2 + \left(\frac{L_a \cdot f + R_a \cdot J}{R_a \cdot f + K_m^2} \right) p + 1} \tag{II-31}$$

En reliant les différents blocs, Figure II.8, Figure II.9, Figure II.10 et Figure II.11, on obtient le schéma bloc global du moteur, Figure II.12:

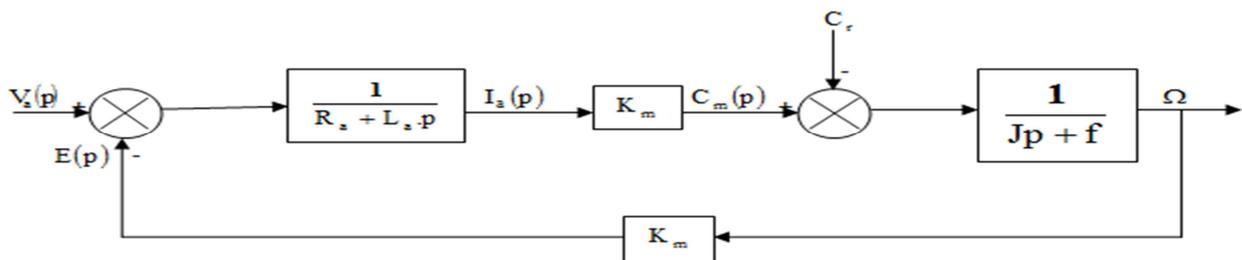


Figure II.12 : schéma fonctionnel du moteur à excitation séparée.

b. Model de transfert du redresseur

En générale le model de transfert d'un redresseur, est représenté par une fonction de transfert de premier ordre de la forme suivante :

$$G(p) = \frac{G_{cv}}{1 + T_{cv}(p)} \tag{II-32}$$

Avec :

G_{cv} : Le gain pur du redresseur.

T_{cv} : La constante de temps qui traduit le retard mis par le redresseur pour fournir la tension redressé.

$$T_{cv} = \beta + \tau \tag{II-33}$$

Avec :

β : Constante de temps due à l'amorçage.

➤ **Schéma fonctionnel du redresseur**

Le schéma fonctionnel du redresseur est donné comme suit :

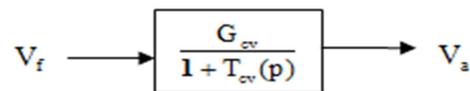


Figure .II.13 : Schéma bloc du redresseur.

c. Model de transfert des capteurs

Le capteur de vitesse introduit un gain pur :

$$K_{\Omega} = \frac{V_{\Omega}}{\Omega} \tag{II-34}$$

De l'équation (II-34), on peut déduire le schéma du capteur de vitesse, Figure .II.14.

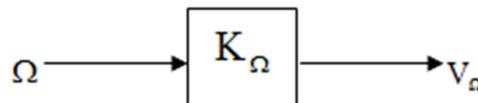


Figure .II.14 : schéma bloc du capteur de vitesse.

Le capteur de courant on introduit un gain pur :

$$K_I = \frac{V_I}{I_a} \tag{II-35}$$

A partir de l'équation (II-35), on trouve le schéma du capteur de courant, Figure .II.15.

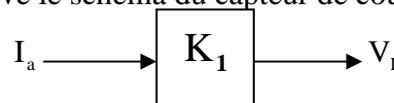


Figure .II.15 : Schéma bloc du capteur de courant.

II.7.3 Schéma fonctionnel global du système moteur - convertisseur - capteur

Après avoir illustré tous les différents schémas blocs constituant le système moteur – redresseur – capteur, on obtient le schéma fonctionnel global du système, Figure. II.16 :

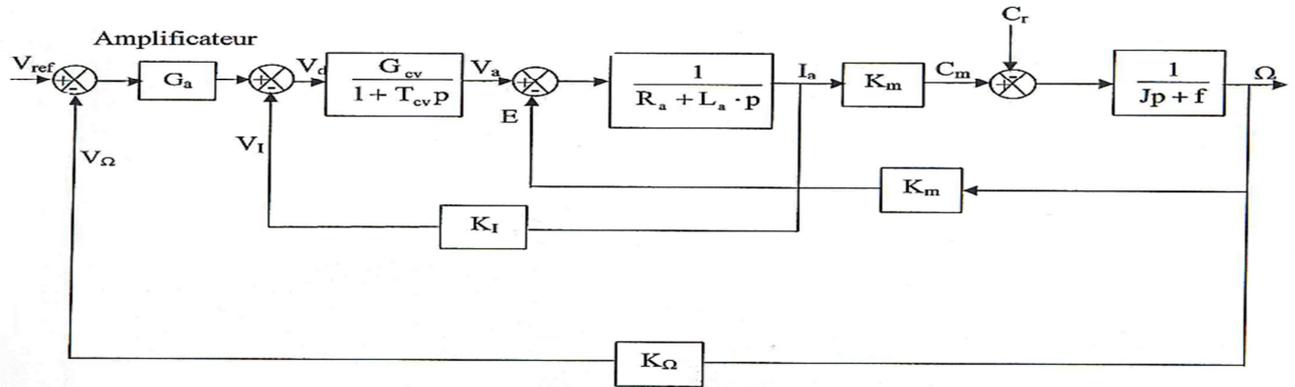


Figure. II.16 : schéma fonctionnel global du système moteur – redresseur – capteur

II.8. Régulation du moteur à courant continu

La régulation est la partie intelligente d’un système asservi, il comporte un correcteur dont le rôle est d’améliorer le comportement du processus en garantissant d’abord une bonne stabilité ensuite la rapidité de réaction. Il existe trois actions correctives élémentaires à savoir proportionnelle, dérivée et intégrale qui permettent individuellement, de corriger telle ou telle performance. Elles sont relativement simples à réaliser, mais en général, dégradent d’autres performances, celles-ci sont réalisables lorsque le cahier des charges est peut exigeant. Dans le cas contraire il faut envisager de combiner ces différentes actions au sein d’un correcteur plus complexe [3].

II.8.1. Correction proportionnelle intégrale

Le correcteur proportionnel intégrale modifie le signal (e(t)) appliqué à son entrée en une sortie S(t), telle que :

$$S(t) = k_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_{\tau=0}^t e(\tau) d\tau \right) \tag{II-36}$$

Avec :

k_p : Gain proportionnel.

T_i : Constante de temps de l’action intégrale.

Ce correcteur permet d’augmenter le gain uniquement en basses fréquences. Il se comporte donc comme un filtre passe bas. Il est utilisé pour améliorer la précision d’un système asservi, sa fonction de transfert est donnée par l’équation II-37:

$$C(p) = k_p \left(\frac{1 + T_i p}{T_i p} \right) \quad (\text{II-37})$$

➤ **Avantages**

Annule l'erreur statique grâce à l'action intégrale.

➤ **Inconvénients**

Retard de phase à cause de l'action intégrale qui peut conduire à une instabilité si le correcteur est mal placé.

II.8.2. Correction proportionnelle dérivée

Le correcteur proportionnel dérivé permet d'augmenter la marge de phase d'un système, il s'agit de composer un faible déphasage autour de la pulsation de coupure à 0dB. Ce correcteur modifie le signal transmis prenant en compte l'amplitude et la dérivée du signal d'entrée. Sa fonction de transfert est donnée par :

$$C(p) = k_p (1 + T_d p) \quad (\text{II-38})$$

Avec :

T_d : Constante de temps de l'action dérivée.

Dans le domaine temporel l'équation (II-38) devient :

$$S(t) = k_p \left(e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (\text{II-39})$$

Un tel correcteur est physiquement irréalisable, en pratique on utilise un correcteur dont la fonction de transfert est :

$$C(p) = k_p \left(\frac{1 + T_d p}{1 + a T_d p} \right) \quad (\text{II-40})$$

Avec : $a < 1$

Ce correcteur se comporte comme un filtre passe haut où les basses pulsations sont plus atténuées.

➤ **Avantages**

- Améliore la stabilité du système.
- Améliore la rapidité du système.

➤ **Inconvénients**

- Augmente le gain en hautes fréquences.
- Sensibilité aux bruits accrus.

II.8.3. Correction proportionnelle intégrale et dérivée

Le correcteur proportionnel intégral et dérivée réunit les possibilités de la correction proportionnelle, intégrale et dérivée, ce correcteur transforme le signal ($e(t)$) appliqué à son entrée en un signal ($S(t)$) tel que [3]:

$$S(t) = k_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_{\tau=0}^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (\text{II-41})$$

Ainsi que nous l'avons signalé précédemment, le dérivateur n'est pas réalisable physiquement. La fonction de transfert du correcteur PID théorique est :

$$C(p) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p \right) \quad (\text{II-42})$$

Elle est remplacée par la fonction de transfert du PID réel, elle est donnée par l'équation (II-43) :

$$C(p) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i p} + \frac{T_d}{1 + a T_d p} \right) \quad (\text{II-43})$$

Avec $a < 1$

➤ Action du correcteur proportionnelle intégrale et dérivée

Ce correcteur correspond à la mise en cascade (série) d'un correcteur PI suivi d'un correcteur PD. Il en résulte qu'il a une action sur toutes les fréquences. En basses fréquences, il a une action intégrale qui permet d'annuler l'erreur statique. Aux moyennes fréquences, il aura aussi un effet stabilisateur. Il permet de répondre au compromis précision – rapidité - stabilité.

➤ Avantages

- Annuler l'erreur statique.
- Améliore la rapidité du système.
- Améliore la stabilité du système.

➤ Inconvénients

L'action dérivée peut avoir des effets néfastes, ainsi que l'amplification des bruits en hautes fréquences.

Si on considère ces correcteurs du point de vue filtrage, on peut dire que le correcteur PD représente un filtre passe haut, le correcteur PI un filtre passe bas et le correcteur PID un filtre passe bande. On peut réaliser ces fonctions en utilisant des composants électriques (résistances, condensateurs et bobines), on obtient alors un correcteur à avance de phases, retard de phase ou une combinaison des deux (avance ou retard de phase) [3].

➤ **Le choix du correcteur PI est motivé pour les raisons suivantes**

- Système assez rapide après correction.
- La réponse rejoint parfaitement l'entrée du système (erreur permanente nulle).
- Amortissement convenable en boucle fermée

Sans mettre en jeu d'énergie appréciable, il est avantageux de placer le correcteur en cascade dans la boucle de régulation.

II.9.Types de régulations

Les structures de régulations sont choisies pour répondre à plusieurs fonctions, la plus importante étant de réguler la machine de façon que celle-ci puisse imposer à la charge une vitesse, une position ou un couple désiré. Selon la loi de commande on distingue trois types de régulation [3]:

- Régulation par anticipation.
- Régulation en parallèle.
- Régulation en cascade (série).

II.10. Définition des différents types de régulations

II.10.1.Régulation par anticipation

Dans ce type de régulation, le correcteur s'appelle un compensateur compte tenu du fait qu'il est conçu pour compenser exactement l'effet de certaines grandeurs physiques, comme par exemple les perturbations. Cette correction semble assez simple à mettre en œuvre, malheureusement d'une part l'entrée perturbatrice est rarement mesurable et d'autre part les correcteurs à élaborer sont souvent impossibles à réaliser physiquement d'une manière parfaite [3].

II.10.2.Régulation parallèle

Le bloc correcteur peut également être placé en réaction. Dans ce cas on réalise une boucle interne (secondaire) avec contre réaction dont la chaîne de retour est constitué par le correcteur parallèle.

II.11. Régulation cascade

La régulation est appelé régulation en cascade, car la sortie du premier régulateur impose sa consigne à la boucle secondaire, le plus souvent à autre régulateur. Le but de la régulation en cascade est de prévoir une boucle interne rapide afin d'anticiper les perturbations, avant que celles-ci n'aient atteint la sortie de la boucle principale. Bien entendu la régulation en cascade est inefficace si la perturbation survient en aval de la mesure intermédiaire. Ce type de régulation est intéressant lorsque l'on a affaire à des processus à longs temps de réponse. En effet, quand une perturbation se manifeste, il est nécessaire d'attendre que son influence ressente au niveau de l'organe de mesure placé en sortie de la chaîne. Son principe est représenté ci- dessous par son schéma fonctionnel, Figure II.17 [3]:

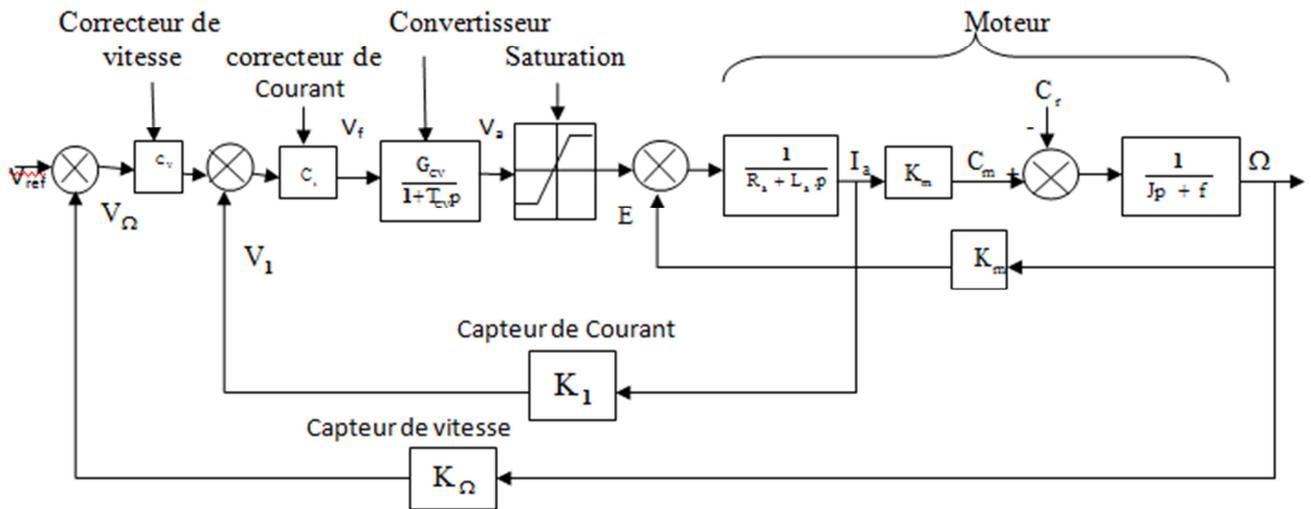


Figure .II.17 : Schéma fonctionnel d'une régulation en cascade

II.11.1. Rôle d'un asservissement de courant

Si on cherche à asservir directement la vitesse, on peut laisser le courant de la machine évoluer librement, pour satisfaire aux conditions de vitesse imposées, dans la pratique, il est préférable de contrôler le courant, on peut par exemple améliorer le temps de réponse et de faire en sorte que ce dernier ne dépasse pas la valeur nominale du moteur utilisé. Pour limiter le courant, on a en plus intérêt à introduire une limitation qui permettra de faire en sorte que la sauvegarde du système prenne le pas sur l'asservissement (suivre la commande de vitesse) si cela est nécessaire [9].

II.11.2. Asservissement de la boucle de courant

Le schéma fonctionnel de la boucle de courant avec correcteur est représenté par la Figure. III.2 [10] :

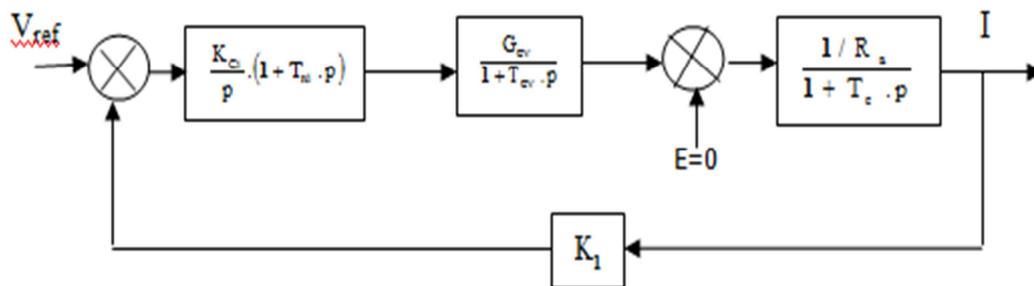


Figure .II.18. Schéma fonctionnel de la boucle de courant avec correcteur de courant

II.11.3. Méthode de compensation

L'apport d'un zéro par le régulateur PI dans la fonction de transfert en boucle fermée peut modifier le régime transitoire du système. Pour remédier à ce problème, la méthode de compensation des pôles est plus adaptée pour le calcul des paramètres K_p et K_i . Elle consiste à imposer le zéro du

régulateur égal à un pôle de la fonction de transfert du système à commander une constante de temps T_{ni} répondant aux objectifs fixés.

La fonction de transfert du courant en boucle fermée est donnée par :

$$I_{bo}(p) = \frac{G_{cv} \cdot K_1}{R_a} \frac{1}{(1 + T_{cv} \cdot p) \cdot (1 + T_e \cdot p)} \quad (\text{II-44})$$

II.11.4. Calcul des paramètres du régulateur du courant

La fonction de transfert du correcteur de la boucle de courant peut s'écrire sous la forme suivante [3]:

$$C_i(p) = \frac{K_{ci}}{P} (1 + T_{ni} p) \quad (\text{II-45})$$

Avec :

K_{ci} : Gain global du correcteur.

T_{ni} : La constante de temps la plus élevée à compenser.

La constante de temps à compenser, correspond en valeur absolue au pôle le plus faible, afin de se ramener à une fonction de transfert en boucle ouverte qui permet d'assurer une annulation de l'erreur statique. On impose donc $T_e = T_{ni}$

En effet, avec le correcteur, la fonction de transfert en boucle ouverte du courant devient :

$$I_{boc}(p) = \frac{K_{ci} \cdot G_i}{p \cdot (1 + T_{cv} \cdot p)} \quad (\text{II-46})$$

Avec :

$$G_i = \frac{G_{cv} \cdot K_1}{R_a}$$

T_{ii} est le rapport entre le gain total de la fonction de transfert du courant en boucle fermée (G_i) et la marge de gain (A_i) :

$$T_{ii} = \frac{G_i}{A_i} \quad (\text{II-47})$$

A partir de l'équation (II-47), on peut déterminer le gain du correcteur (K_{ci}) :

$$K_{ci} = \frac{1}{T_{ii}} \quad (\text{II-48})$$

Le gain proportionnel du correcteur est donné comme suit :

$$K_{pi} = \frac{T_{ni}}{T_{ii}} \quad (\text{II-49})$$

La fonction de transfert de la boucle fermée du courant avec correcteur est donnée par :

$$I_{icf}(p) = \frac{K_{ci} \cdot \left(\frac{G_{cv}}{R_a} \right)}{T_{cv} \cdot p^2 + p + G_i} \quad (\text{II-50})$$

Si on néglige $(T_{cv} \cdot p^2)$, l'équation II-50 devient :

$$I_{icf}(p) = \frac{K_{ci} \cdot \left(\frac{G_{cv}}{R_a} \right)}{p + G_i} \quad (\text{II-51})$$

On remarque que la fonction de transfert en boucle fermée du courant est de premier ordre.

II.11.5. Asservissement de la boucle de vitesse

Après avoir réalisé l'asservissement de courant et à partir de la nouvelle entrée, on va chercher à asservir la vitesse. Les deux boucles seront donc imbriquées. Une fois la boucle de courant réalisée, c'est l'entrée de cette boucle qui constitue la nouvelle entrée du système à modéliser. La sortie qui nous intéresse est celle de la dynamo tachymétrique fournissant une tension proportionnelle à la vitesse de rotation [11].

En négligeant le coefficient de frottement, la fonction de transfert de la vitesse en boucle ouverte avec correcteur de courant est donnée par l'équation (II-52) :

$$\Omega_{ic}(p) = \frac{\frac{K_m \cdot K_{\Omega} \cdot k_{ci} \cdot G_{cv} \cdot G_a}{J \cdot R_a \cdot (T_e + T_{cv})} (1 + T_{ni} \cdot p)}{p^3 + \left(\frac{K_i \cdot G_{cv} \cdot K_{ci} \cdot T_e}{R_a} + \frac{K_m^2 \cdot T_{cv}}{J \cdot R_a} + 1 \right) \cdot \frac{p^2}{(T_e + T_{cv})} + \left(\frac{K_m^2}{J \cdot R_a} + \frac{K_i \cdot K_{ci} \cdot G_{cv}}{R_a} \right) \cdot \frac{p}{T_e + T_{cv}}} \quad (\text{II-52})$$

Cette fonction de transfert peut s'écrire comme suit :

$$\Omega_{ic}(p) = \frac{G_v \cdot (1 + T_{ni} \cdot p)}{p \cdot [1 + \tau_1 \cdot p + \tau_2 \cdot p^2]} \quad (\text{II-53})$$

Avec :

$$G_v = \frac{K_m \cdot K_{\Omega} \cdot K_{ci} \cdot G_{cv} \cdot G_a}{K_m^2 + J \cdot K_i \cdot K_{ci} \cdot G_{cv}}$$

$$\tau_1 = \frac{J \cdot K_i \cdot G_{cv} \cdot K_{ci} \cdot T_e + K_m^2 \cdot T_{cv} + J \cdot R_a}{K_m^2 + J \cdot K_i \cdot K_{ci} \cdot G_{cv}}$$

$$\tau_2 = \frac{J.R_a.(T_e + T_{cv})}{K_m^2 + J.K_1.K_{ci}.G_{cv}}$$

II.11.6. Calcul des paramètres du régulateur de vitesse

La fonction de transfert du correcteur de vitesse est donnée par l'équation (II-54) :

$$C_v(p) = \frac{K_{cv}}{p} (1 + T_{nv} \cdot p) \quad (\text{II-54})$$

Avec :

K_{cv} : Gain global du correcteur

T_{nv} : La constante de temps du correcteur de vitesse qui compense la constante la plus élevée de

la fonction de transfert $\Omega_{ic}(p)$, donc $T_{nv} = \frac{T_{ni}}{T_{ii}}$.

Les paramètres du régulateur de vitesse sont donnés comme suit :

$$T_{iv} = \frac{G_v}{A_v} \quad (\text{II-55})$$

$$k_{cv} = \frac{1}{T_{iv}} \quad (\text{II-56})$$

$$k_{pv} = \frac{T_{nv}}{T_{iv}} \quad (\text{II-57})$$

D'où la fonction de transfert de la vitesse en boucle fermée avec correcteur qui est donnée comme suit :

$$\Omega_{vc}(p) = \frac{\frac{k_m \cdot k_{\Omega} \cdot k_{ci} \cdot G_{cv} \cdot G_a \cdot k_{cv}}{(T_e + T_{cv}) \cdot J \cdot R_a} \cdot (1 + T_{ni}) \cdot (1 + T_{nv})}{p^4 + \left(\frac{k_i \cdot G_{cv} \cdot k_{ci} \cdot T_e}{R_a} + \frac{k_m^2 \cdot T_{cv}}{J \cdot R_a} + 1 \right) \cdot \frac{p^3}{(T_{cv} + T_e)} + \left(\frac{k_m^2}{J \cdot R_a} + \frac{k_i \cdot k_{ci} \cdot G_{cv}}{R_a} \right) \cdot \frac{p^2}{(T_{cv} + T_e)}} \quad (\text{II-58})$$

II.12. Conclusion

Après modélisation du système et dimensionnement des différents régulateurs dans ce présent chapitre, nous permettra dans le chapitre suivant de faire une simulation de la machine à courant continu

III.1.Introduction

Après avoir modélisé la machine à courant continu à excitation séparée et dimensionné les paramètres du régulateur proportionnel-Intégral (PI) dans le chapitre précédent, une simulation Matlab Simulink de la régulation de cette machine est effectuée et présentée dans ce présent chapitre. Après cette simulation, nous présentons en premier lieu, les résultats avec et sans perturbation et sans régulation, et en second lieu en appliquant la régulation. Les principaux résultats tels que la vitesse et le courant sont obtenus pour deux types de référence.

III.2. Paramètres de la machine à courant continu :

Le tableau ci-dessous présente les paramètres de la machine à courant continu [13]:

Paramètres	valeurs
Tension nominale d'induit	220 V
Tension nominale d'inducteur	110 V
Courant nominal d'induit	16 A
Courant nominal d'inducteur	1,32 A
Puissance utile	3 Kw
Couple nominal	19 Nm
Vitesse de rotation	1500 tr/mn
Résistance d'induit	1,35 Ω
Résistance d'inducteur	65,15 Ω
Inductance d'induit	0,0059 H
Inductance d'inducteur	8,35 H
Constante de la f.c.e.m	1,41 V /rd/s
Mutuelle inductance entre induit et inducteur	1,07 H
Coefficient de frottement	0,0045 Nm/rd/s
Inertie des masses tournantes	0,036 Kg.m
Constante de temps	0,000033 s

Tableau. III.1 : Paramètres du moteur à courant continu.

III.3.Simulation de la machine à courant continu sans régulation

La Figure. III.1 représente le schéma bloc de simulation sous Matlab, qui nous a permis de visualiser les différentes réponses temporelles du courant d'induit et de la vitesse de rotation de la machine à courant continu sans régulation avec et sans perturbations.

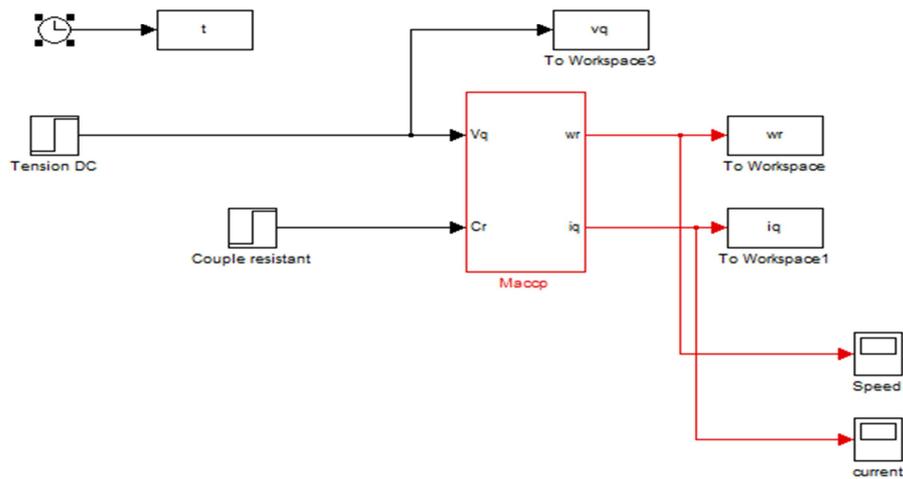


Figure III.1: Schéma bloc de simulation de la machine à courant continu sans régulation.

III.4. Résultats de simulation sans régulation et Interprétations

➤ La Figure.III.2 montre la réponse temporelle de la vitesse sans perturbation ($C_r=0$ Nm) et sans régulation. On remarque d'après cette courbe, que l'allure de la vitesse atteint son régime permanent à une valeur de 155.6 rd/s à $t= 0.15$ s. Sachant que la vitesse de référence est de 157 rd/s (Annexe, Figure A.1), l'erreur statique est de 1.4 rd/s.

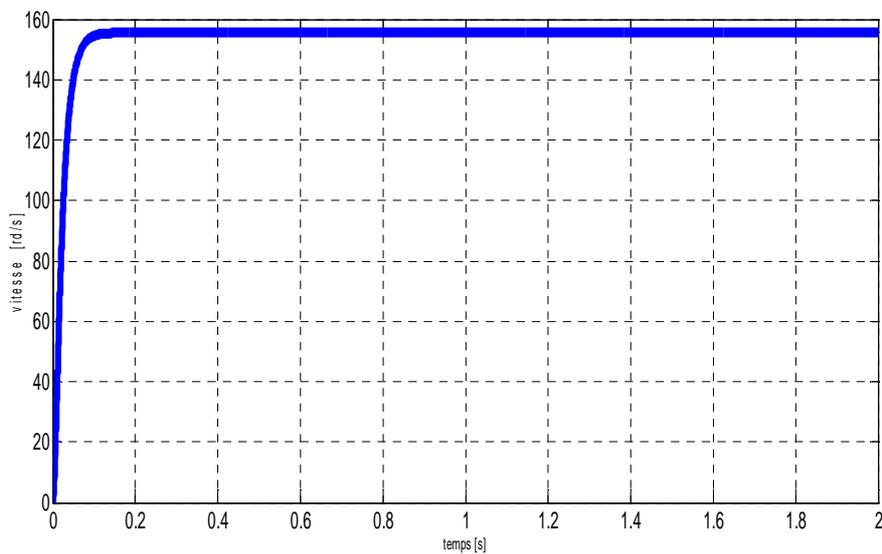


Figure. III.2 : Réponse temporelle de la vitesse sans régulation pour $C_r=0$.

➤ D'après le graphe de la Figure III.3, qui représente la réponse temporelle du courant sans perturbation ($C_r=0$ Nm) et sans régulation, on remarque que le courant présente un pic important de 126.3 A, car le moteur doit absorber un courant important pendant son démarrage puis il décroît vers une faible valeur de 2.4 A.

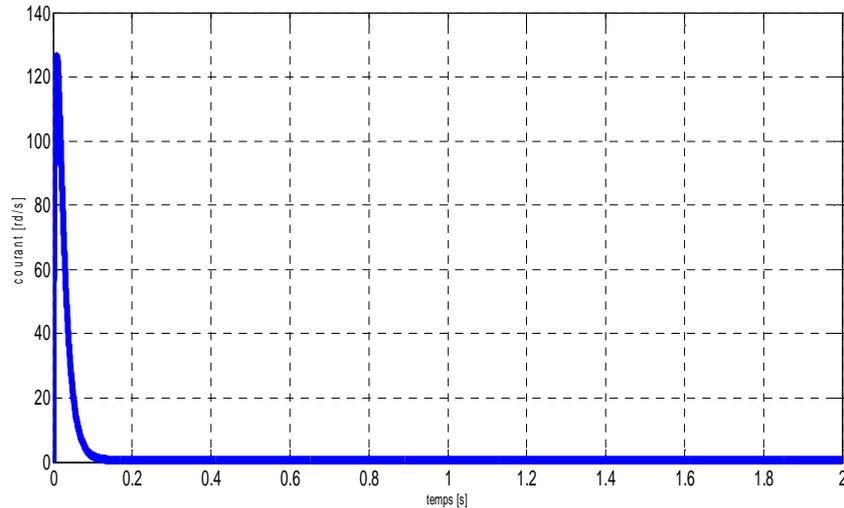


Figure .III.3 : Réponse temporelle du courant sans régulation pour $C_r=0$.

➤ D'après la courbe de la Figure. III.4 de la vitesse, on remarque que le système est très sensible à la perturbation, car l'application du couple résistant de $C_r= 5$ Nm à $t=1$ s, fait chuter la vitesse de rotation jusqu'à 152 rd/s, l'erreur statique est de 5 rd/s.

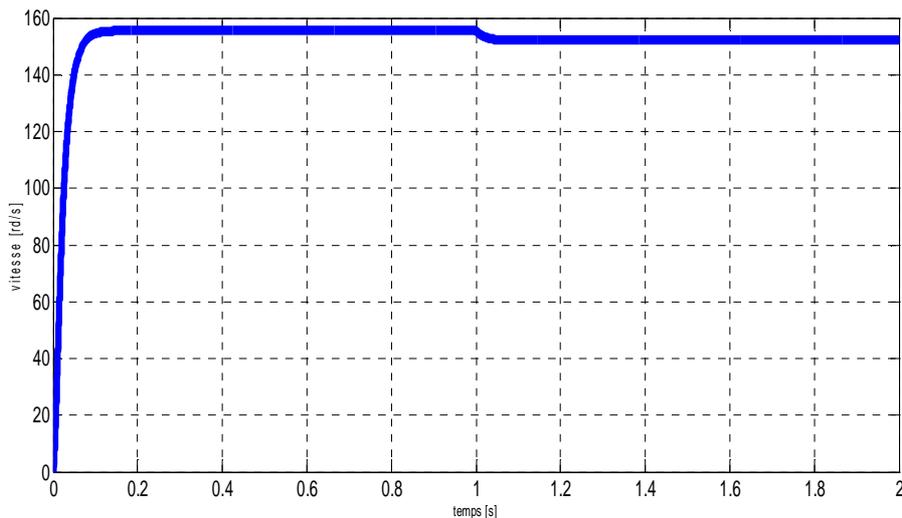


Figure. III.4: Réponse temporelle de la vitesse sans régulation pour $C_r=5$ Nm.

➤ La Figure .III.5 illustre la réponse temporelle du courant sans régulation mais avec perturbation ($C_r=5\text{Nm}$). D'après cette courbe, on remarque qu'après l'application de ce couple à $t=1\text{s}$ le courant augmente à une valeur de 4.2 A .

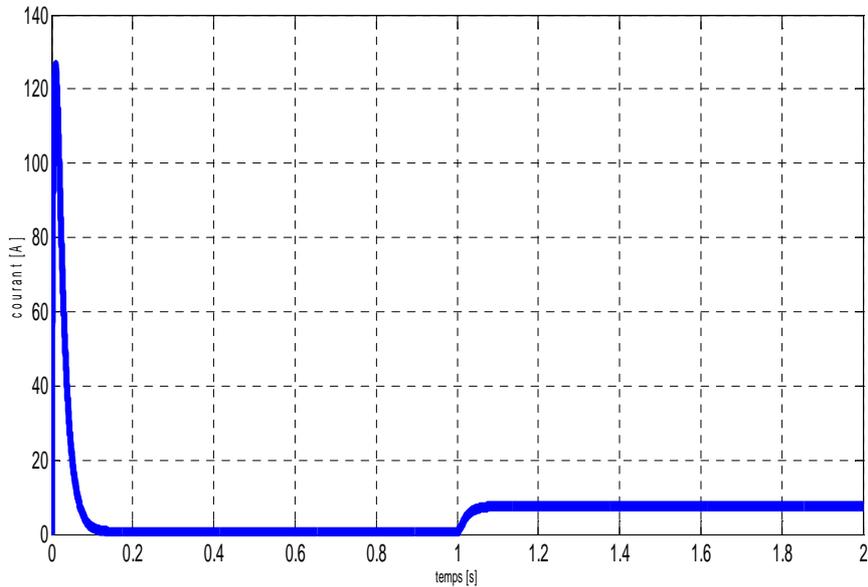


Figure .III.5 : Réponse temporelle du courant sans régulation pour $C_r=5\text{ Nm}$.

III.5.Simulation de la machine à courant continu avec régulation en cascade

Dans ce cas, nous avons effectué une simulation de la machine, le but est d'améliorer le comportement du système c'est-à-dire le rendre plus précis, stable et si possible rapide en introduisant un correcteur de type proportionnel-Intégral (PI).

➤ **Paramètres des régulateur PI :**

Les différents paramètres du régulateur sont donnés par le tableau suivant :

K_{ci}	10,2966
K_{pi}	0.0450
K_{vi}	3
K_{pv}	0.7

Tableau.III.2 : Paramètres du régulateur PI.

➤ La Figure III.6 représente le schéma bloc de simulation de la machine à courant continu avec régulation en cascade.

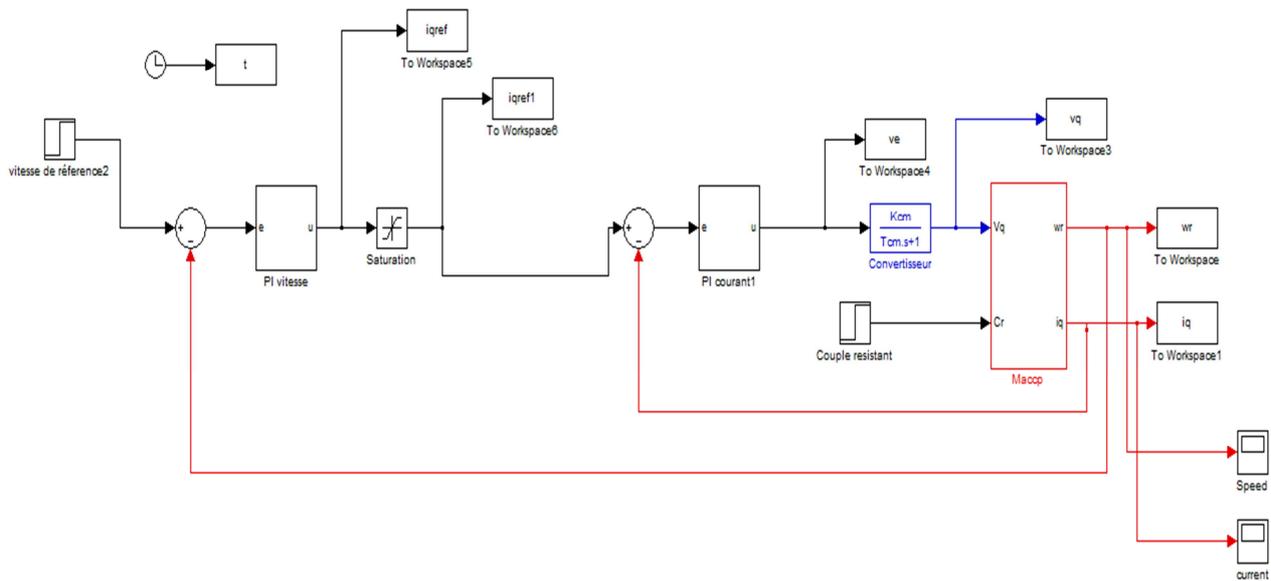


Figure III.6: Schéma bloc de simulation de la machine à courant continu avec régulation.

III.6. Résultats de simulation avec régulation et Interprétations

➤ L’allure de la réponse de la vitesse sous forme de réponse d’un système de second ordre avec dépassement. En régime permanent atteint la valeur de 157 rd/s ce qui veut dire que l’erreur statique est nulle. On remarque dans ce cas que la réponse temporelle de la vitesse suit la référence qui est de 157 rd/s (Annexe Figure A.1).

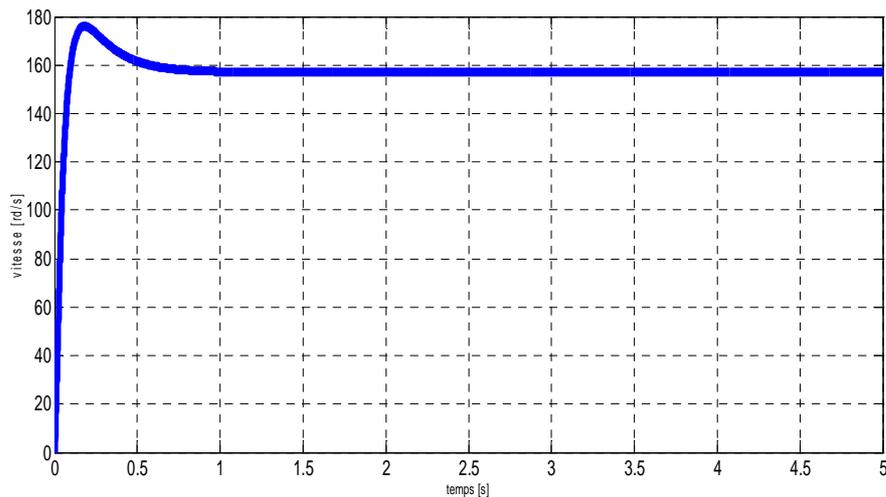


Figure III.7 : Réponse temporelle de la vitesse avec régulation $C_r=0$ Nm.

➤ Pour ce qui 'est de la réponse du courant (Figure.III.8), l'allure de la courbe obtenue présente un pic très excessif au démarrage qui 'est de l'ordre de 68.5 A, cela est du a l'absence de la force contre-électromotrice au démarrage. Avant d'atteindre son régime permanent, il devient négatif et il se stabilise à une valeur de 1.3 A à $t=0.5$ s.

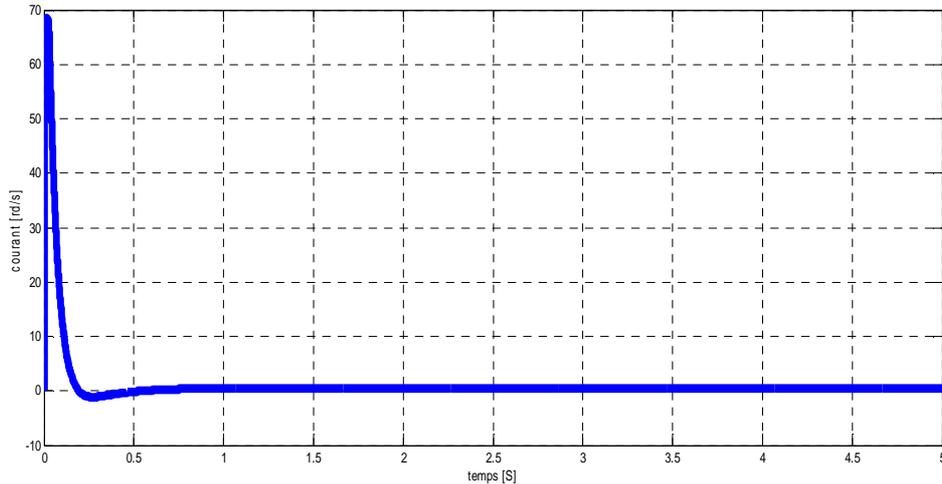


Figure.III.8 : Réponse temporelle du courant avec régulation pour $C_r = 0$ Nm.

➤ La Figure .III.9 représente la réponse de la vitesse avec application d'un couple $C_r = 15$ Nm. Après l'application de ce dernier, la vitesse chute à 145 rd/s, puis revient à son état d'équilibre qui 'est la référence donnée par la Figure A.1(Annexe). On remarque que le régulateur de vitesse intervient pour remettre la vitesse à sa valeur de référence.

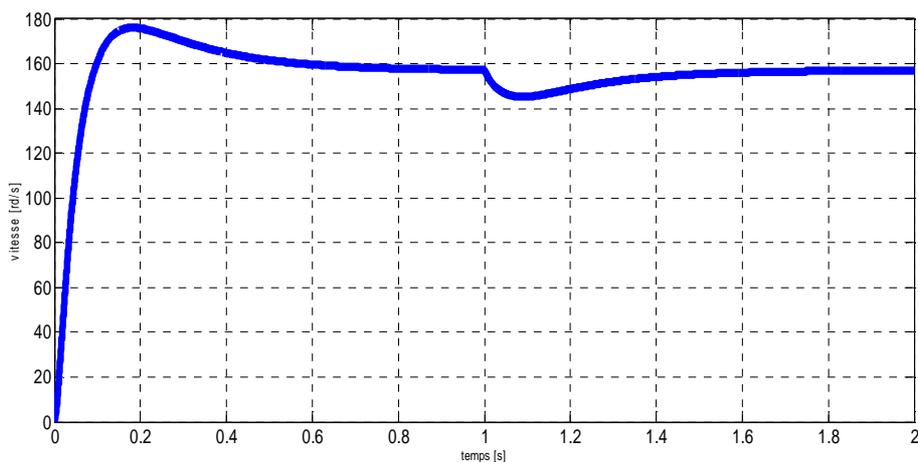


Figure.III.9 : Réponse temporelle de la vitesse avec régulation pour $C_r = 15$ Nm.

➤ La Figure .III.10 montre la courbe du courant obtenu. Ce dernier présente un pic très excessif au démarrage qui est de l'ordre de 68.5 A, puis il atteint son régime permanent. En appliquant un couple $C_r=15$ Nm, on remarque que le courant augmente pour rendre le système plus précis.

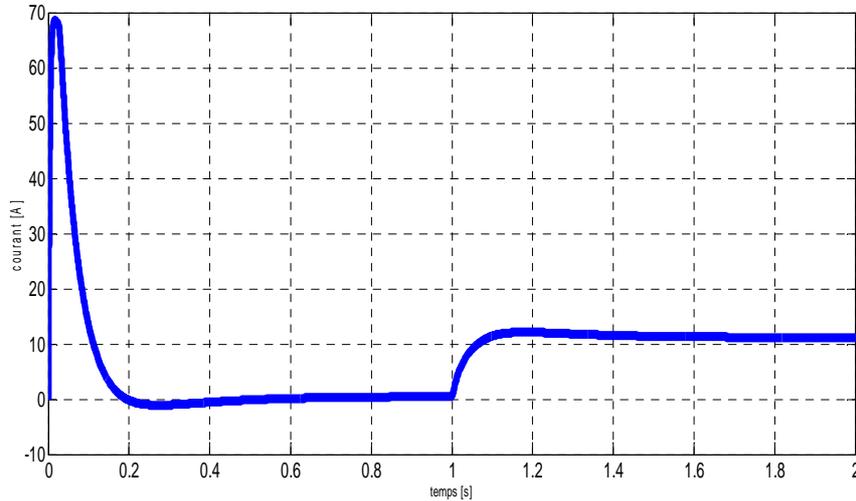


Figure.III.10 : Réponse temporelle du courant avec régulation pour $C_r = 15$ Nm.

➤ La Figure .III.11 montre la réponse temporelle de variation de la vitesse. D'après cette courbe la vitesse du moteur suit la vitesse de référence imposée au départ. On remarque aussi que la vitesse possède des dépassements.

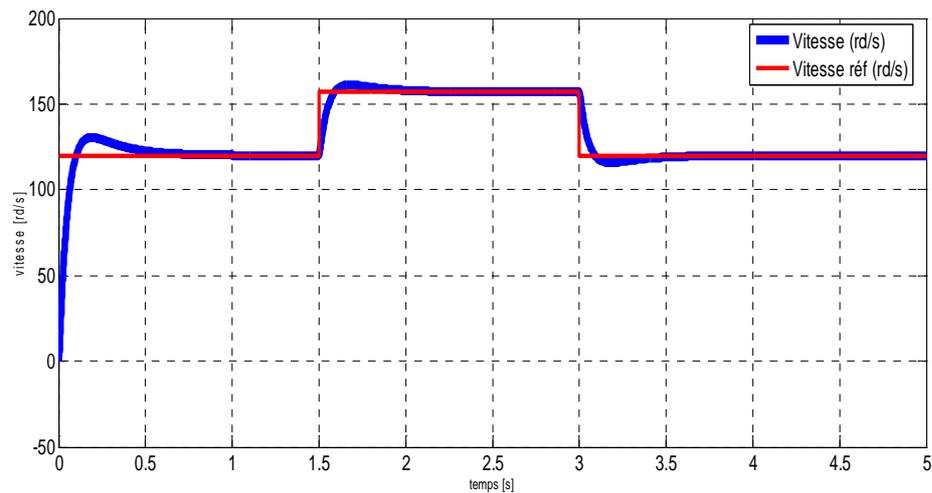


Figure .III.11 : Réponse temporelle de la variation de vitesse.

➤ La Figure .III.12 illustre la réponse temporelle de la variation du courant après application de la référence. Ce dernier présente des piques qui sont dues aux appels du courant par le moteur lorsqu'on passe d'un niveau de vitesse à un autre.

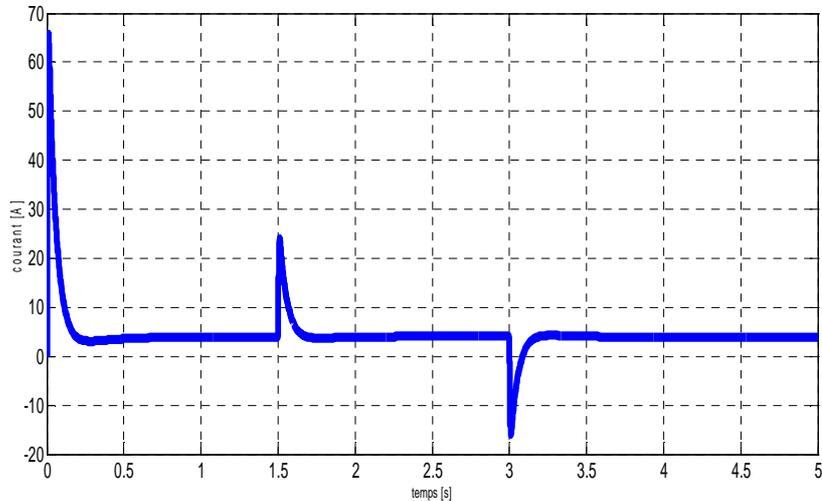


Figure .III.12 : Réponse temporelle de la variation du courant.

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, plusieurs tests des simulations ont été effectués en utilisant le logiciel Matlab Simulink, afin de montrer l'efficacité du régulateur proportionnel-Intégral (PI) dimensionné dans le chapitre précédent. D'après les résultats de simulation, on remarque que le PI dimensionné répond avec des bonnes performances aux perturbations appliquées à la machine à courant continu. Il est à signaler que les résultats sont obtenus pour deux types de référence.

Cette étude nous a permis d'enrichir nos connaissances sur les machines à courant continu, leurs fonctionnements et leurs modélisations. Les machines à courant continu sont des machines qui occupent une place dans les actionneurs électriques et qui présentent encore beaucoup d'intérêt, en particulièrement lorsque des variations de vitesse sont requises, à cet effet il est le sujet de plusieurs recherches.

Dans le cadre de notre travail nous nous sommes intéressés aux généralités sur les machines à courant continu, la modélisation, la régulation ainsi qu'à la simulation d'une machine à courant continu.

Après avoir modélisé le système moteur-convertisseur, il ressort du modèle obtenu deux variables de contrôle, le courant qui est très important lors du démarrage et la vitesse qui est très sensible aux perturbations. Afin de régler ces problèmes, nous avons fait appel à la régulation.

La simulation de la régulation de la machine à courant continu considérée sous Matlab Simulink, sans et avec perturbations nous a permis de visualiser et interpréter les différents résultats obtenus, telles que la réponse temporelle de la vitesse et du courant, sans régulation et avec régulation en cascade.

D'après les résultats de simulation, on remarque que le régulateur utilisé répond d'une manière satisfaisante aux perturbations appliquées à la machine à courant continu.

Références bibliographiques

- [1] BEKKOUCHE Charaf Eddine et TOUGGOURTI Abdel Kader, « Etude et simulation d'un variateur de vitesse commande un moteur à courant continu », Mémoire de Master en électrotechnique Industrielle, Université KASDI KERBAH OUARGLA ,2015-2016.
- [2] M.L.SADEG, F.YAHIA TENE « Etude et réalisation de la commande par retour d'état adaptative d'un moteur à courant continu », Mémoire de Master électromécanique, Université DJILLALI LIABES DE SIDI BEL ABBES, 2015 -2016.
- [3] K.RAFIL, M.MEZIANI « Etude de la commande et de la régulation d'un moteur à courant continu », Mémoire d'ingénieur d'état en Machines électriques, UMMTO, 2006.
- [4] N.BENNABI, S.CHERFA, O.MEZIANI « modélisation et simulation de la machine à courant continu sous logiciel Matlab» Mémoire DEUA en électrotechnique UMMTO, 2009-2010.
- [5] ANOUAR HALILA, « ETUDE DES MACHINES A COURANT CONTINU » Mémoire du grade de maitre des sciences, Université Laval, 2001.
- [6] J.C ROLIN, « C14 Machine à courant continu », Lycée G Eiffel Dijon, 2013
- [7] Guy Segulier, Francis Notelet, «Electrotechnique Industrielle », Technique et documentation Lavoisier, 5^e tirage revu, 1987.
- [8] Andre Genon et Willy legros, « Machines électriques », édition, HERMES, Science Europe, 2000.
- [9] Francis Milsant, « Machine à courant continu asservissements linéaires », Edition, BERTI ,1993.
- [10] N.Benamrouche, S.Osmani, « Polycopie de cours d'asservissement », UMMTO, 1995.
- [11] O.KANANE « étude de la commande d'un moteur à courant continu avec variation vitesse type MQC 1510 », mémoire de fin d'étude, DEUA en électrotechnique, UMMTO, 2006-2007.

[12] F.MILAZ DIT MELAL, F OUIKENE, « étude d'une régulation de la machine à courant continu », Mémoire DEUA en électrotechnique, UMMTO, 2007.

[13] M. L.HAMIDA, F.KADI, « Identification et contrôle de la machine à courant continu par la Dspace 1103 », Mémoire de fin d'études de MASTER ACADEMIQUE en machines électriques, UMMTO, 2015.

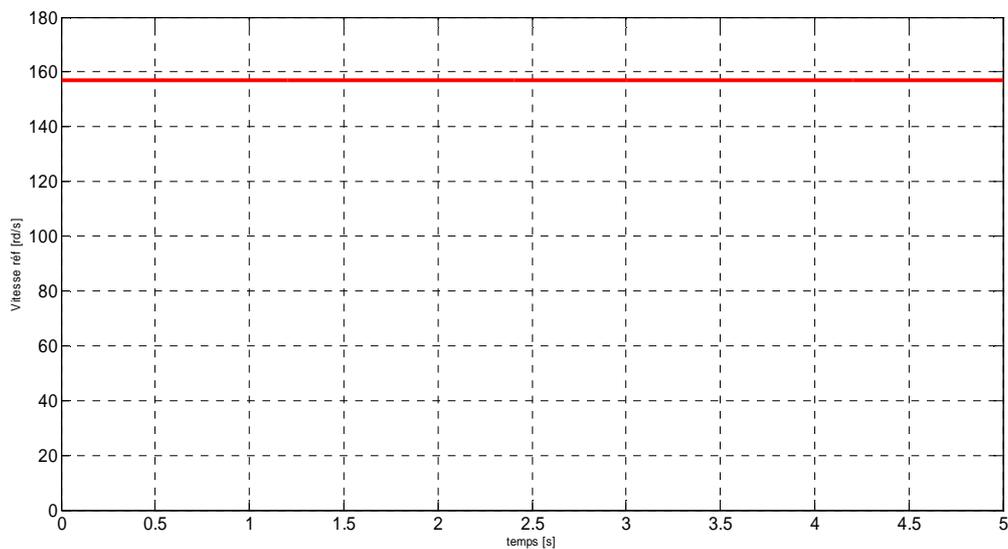


Figure .A.1 : Réponse temporelle de la vitesse de référence.

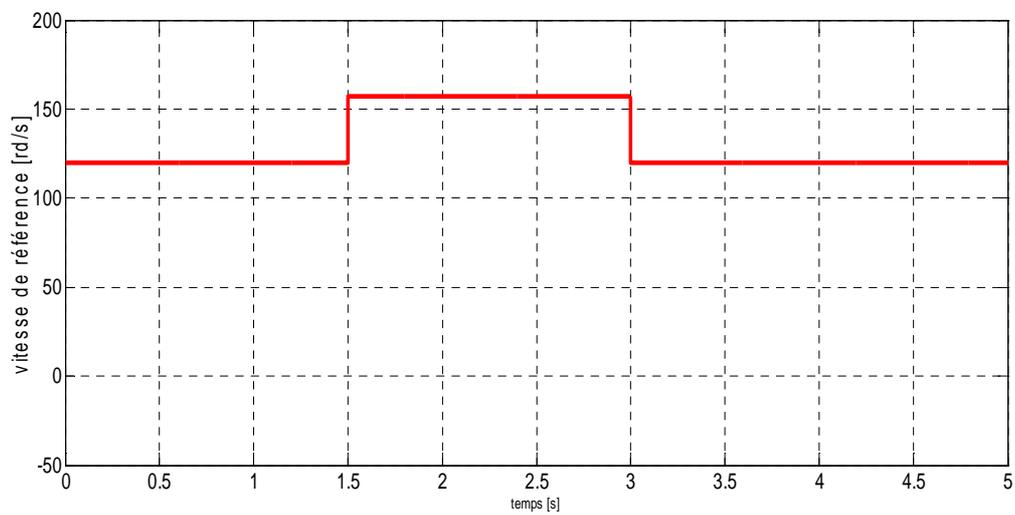


Figure. A.2 : Réponse temporelle de la variation de la vitesse de référence.