

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

FACULTE : Sciences de l'Ingénierat

DEPARTEMENT : Électrotechnique

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Électrotechnique

OPTION : Commande des Systèmes industriels

Thème

Etude et Synthèse d'un Contrôleur PI et Application

Présenté par :

Ghania Boukerche

Dirigé par :

Mohammedi Moufid

Jury de soutenance :

- Bahi Tahar	Président	Professeur	Université d'Annaba
- Mohammedi Moufid	Rapporteur	MC-A	Université d'Annaba
- Chine Abdelghani	Examineur	MC-B	Université d'Annaba

Promotion : juin 2017

Remerciements

Ce travail a été réalisé au département d'électrotechnique de l'Université Badji Mokhtar de Annaba. Je remercie Monsieur Mohammedi Moufid, Docteur, qui est à l'origine de ce sujet de projet de fin d'études, pour m'avoir accueilli au sein de son équipe, je le remercie pour ces qualités humaines, pour son implication et sa disponibilité. Il a toujours su mettre ses compétences à ma disposition.

Je remercie monsieur Bahi Tahar, Professeur, de m'avoir aidée. Ses compétences scientifiques et son optimisme ont été décisifs pour mener à bien ce travail, je le remercie pour avoir accepté de présider ce jury et juger ce travail.

Je remercie également Monsieur Chine Abdelghani, Docteur, d'avoir accepté d'examiner mon travail.

Je remercie également les membres permanents et thésards du département qui m'ont accompagnée au cours de ce mémoire, particulièrement Madame Sara.

Sans oublier mes collègues de l'Unité de Recherche en Matériaux Avancés (URMA/CRTI) pour l'aide fournie, Hinda Gueroui, Naima Touati, Afef Azzi, Mohamed Lemouchi, Djalal Drissi, Dahmani Nacira, Khoukha Berahal, Skander Boukhezar et surtout Mohamed Boulkra, Chef d'atelier, pour l'aide et la flexibilité.

Je remercie aussi notre directeur Hazem Meradi, pour son aide et sa compréhension.

Dédicace

Ce travail est un hommage à mes parents, que dieu les reçois dans son vaste paradis.

Je dédie cet humble travail à ma famille, à mon mari **Tarek** pour son soutien inconditionnel. A mes enfants : **Meriem**, **Manar** et **Mouatez**, pour le temps pris de leur temps je vous serai toujours redevable !

Mes frères : **Rachid**, **Samir** et **Omar** pour les encouragements. Mes sœurs : **Leila**, **Nora** pour l'estime et la présence.

Sommaire

Liste des figures	7
Liste des tableaux.....	9
Nomenclature.....	10
Résumé.....	11
Introduction générale.....	12

Chapitre 1 : Modélisation et simulation d'un hacheur - MCC

I.1 Introduction	14
I.2 Moteur à courant continu.....	14
I.2.1 Structure de la machine à courant continue.....	14
A. Stator (Inducteur)	14
B. Rotor (Induit)	15
C. Collecteur	16
D. Balais.....	16
I.2.2 Principe de fonctionnement	17
I.2.3 Circulation de flux magnétique	18
I.2.4 Régime de fonctionnement d'un MCC.....	18
A. Fonctionnement en moteur	18
B. Fonctionnement en Génératrice	19
I.2.5 Types de moteur à courant continu	19
I.2.6 Applications industrielles des machines à courant continu [5]	20
I.2.7 Moteur à excitation séparée	22
A. Equations électriques.....	23
B. Equation mécanique.....	23
I.2.8 Simulation du MCC à excitation séparée.....	23
I.2.8.1 Caractéristiques statiques et différents modes de réglage de la vitesse du MCC	24
A. Réglage Rhéostatique	24
B. Réglage par variation des flux (R, U constantes)	25
C. Réglage par variation de la tension.....	26
I.2.8.2 Caractéristiques dynamiques	27
I.3 Conclusion	29

Chapitre II : Régulation d'un moteur à courant continu MCC

II.1. Introduction	31
II.2 Conception d'un système de commande	31
A. Asservissement	32
B. Régulation	32
II.3 Principe général de la régulation	32
II.4 Performances des systèmes réglés [8].....	33
II.5 Système en boucle ouverte	34
II.6 Système en boucle fermée	35
II.7 Influence des perturbations	36
II.8 Configurations de correction	37
A. Correcteur en série	37
B. Correction en parallèle	37
C. Correction série- réaction	38
D. Correction en série parallèle par rapport au signal d'entrée	38
II.8 Différents types de régulateurs	39
II.9 Régulateur PID.....	40
II.10 Schéma électronique du correcteur	41
II.10.1 Schéma électronique du correcteur proportionnel	41
II.10.2 Schéma électronique du correcteur intégral	42
II.10.3 Schéma électronique du correcteur proportionnel intégral	42
II.10.4 Schéma électronique du correcteur dérivé (D)	43
II.10.5 Schéma électronique du correcteur proportionnel et dérivée	44
II.10.6 Schéma électronique du correcteur proportionnel, intégral et dérivée	46
II.10 Conclusion.....	48

Chapitre III :

III.1. Introduction.....	50
III.2 Définition des hacheurs	50
III.2.1 Critères de choix.....	51

Sommaire

III.2.2 Hacheur série (abaisseur de tension).....	51
A. Principe :.....	51
B. Effet de l'inductance sur la forme d'ondes	52
1. Fonctionnement à courant dans la charge ininterrompu (conduction continue).....	53
2. Fonctionnement à courant dans la charge interrompu (conduction discontinue)	53
III.2.3 Hacheur parallèle (élevateur de tension).....	55
A. Principe	55
B. Effet de l'inductance sur la forme d'ondes	55
III.2.4 Différents types d'hacheur et leurs applications [11]	58
III.3 Simulation du hacheur dans l'environnement Matlab/Simulink.....	59
III.3 Conclusion.....	61

Chapitre IV : Réglage de vitesse de la MCC

IV.1 Introduction.....	64
IV.2 Synthèse des régulateurs <i>PI</i> et <i>IP</i>	64
IV.2.1 Structure de la commande <i>PI</i>	64
IV.2.2 la méthode de placement des pôles [13].....	65
IV.2.3 la méthode de compensation des pôles.....	66
IV.2.4 Structure de commande <i>IP</i>	66
IV.2.5 Dimensionnement des régulateurs et simulations.....	68
A. Régulation de vitesse.....	68
B. Régulation de courant.....	69
IV.3 Commande de vitesse de la machine à courant continu alimenté par un hacheur.....	69
IV.3.1 Simulation du variateur de vitesse à régulations en cascade	70
IV.4 Conclusion.....	73
Conclusion générale.....	74
Références bibliographiques.....	75

Liste des figures

Figure	Page
Figure I.1. Structure générale d'une MCC	14
Figure I.2. Composition de l'inducteur	15
Figure I.3. Composition de l'induit	16
Figure I.4. Collecteur	16
Figure I.5. Balais et porte balais	17
Figure I.6. Principe de fonctionnement de MCC	17
Figure I.7. Distribution de flux	18
Figure I.8. Fonctionnement en moteur	19
Figure I.9. Fonctionnement en Génératrice	19
Figure I.10. Une grue de chantier naval et des ponts de levage	21
Figure I.11. Remontées mécaniques	21
Figure I.12. Chaîne de tréfilage	21
Figure I.13. Machine rotative	21
Figure I.14. Machine d'enroulage pour film plastique transparent	21
Figure I.15. Schéma électrique du MCC à excitation séparée	22
Figure I.16. Caractéristiques mécaniques pour variation de rhéostat	25
Figure I.17. Caractéristiques mécaniques pour variation de flux	26
Figure I.18. Caractéristiques mécaniques avec variation de tension	27
Figure I.19. Courant d'induit	28
Figure I.20. Couple électromagnétique	28
Figure I.21. Vitesse de rotation ω_r	29
Figure II.1. Chaîne de traitement de l'information	31
Figure II.2. Système de commande	32
Figure II.3. Performances d'un système de commande	33
Figure II.4. Stabilité du système	34
Figure II.5. Schéma bloc d'un système en boucle ouverte	34
Figure II.6. Schéma bloc d'un système en boucle fermée	35
Figure II.7. Schéma bloc d'une régulation avec une perturbation	36
Figure II.8. Correction en série	37
Figure II.9. Correction en réaction ou parallèle	38
Figure II.10. Correction série parallèle	38
Figure II.11 (a). Correction en série	39
Figure II.11 (b). Correction en parallèle	39
Figure II.12. Schéma électronique du correcteur P avec 2 amplificateurs opérationnels	41
Figure II.13. Schéma électronique du correcteur I avec 2 amplificateurs opérationnels.	42
Figure II.14. Schéma électronique du correcteur PI avec deux amplificateurs opérationnels	42
Figure II.15. Réalisation du correcteur PI avec trois amplificateurs opérationnels.	43
Figure II.16. Schéma électronique du correcteur D avec 2 amplificateurs opérationnels.	44
Figure II.17. Schéma électronique du correcteur PD avec deux amplificateurs opérationnels	44

Liste des figures

Figure II.18. Schéma électronique du correcteurs PD avec trois amplificateurs opérationnels	45
Figure II.19. Schéma électronique du correcteurs PID avec deux amplificateurs opérationnels	46
Figure II.20. Schéma électronique du correcteurs PID avec trois amplificateurs opérationnels	47
Figure III.1 Montage d'un convertisseur statique	50
Figure III.2 Convertisseur Continu(DC)-Continu(DC).	51
Figure III.3. Hacheur série	52
Figure III.4. Hacheur série (Fonctionnement à courant ininterrompu dans la charge)	53
Figure III.5. Fonctionnement à courant interrompu dans la charge	54
Figure III.6. Hacheur série avec filtre passe-bas	54
Figure III.6. Hacheur parallèle	55
Figure III.7. Fonctionnement à courant ininterrompu dans la charge	56
Figure III.8. Fonctionnement à courant interrompu dans la charge	57
Figure III.9. Résultat de simulation du hacheur	60
Figure III.10. Les effets de l'inductance et du rapport cyclique α sur le courant de la charge	61
Figure IV.1. Schéma de commande utilisant la structure PI	64
Figure IV.2. Schéma de commande utilisant la structure IP	67
Figure IV.3. Résultat de simulation de la Boucle de vitesse	69
Figure IV.4. Structure d'un variateur de vitesse à régulations	70
Figure IV.5. Résultat de simulation de courant	71
Figure IV.6. Résultat de simulation de couple	72
Figure IV.7. Résultat de simulation de vitesse et courant.	73

Liste des tableaux

Tableau	Page
Tableau I.1. Différents types de moteurs à courant continu	
Tableau 1.2. Différents Applications des machines à courant continu	
Tableau II.1. Intérêt des actions K_p, K_i, K_d	
Tableau III.1. Différents types d'hacheur	

Nomenclature

Φ	: flux magnétique dans l'entrefer.
a	: nombre de pair de voie d'enroulement.
E	: fém. Induit totale.
e	: fém. Induit dans un conducteur.
I_{ind}	: courant d'induit.
K	: courant de proportionnalité.
N	: vitesse de rotation.
N	: nombre de conducteur.
P	: nombre de pair de pole.
R_{ind}	: résistance d'induit.
U	: tension aux bornes de l'induit.
B	: champ magnétique.
r	: résistance l'inducteur.
(B_s)	: champ inducteur (B_s).
U_{ex}	: tension d'excitation.
I_{ex}	: courant d'excitation.
R_{ex}	: résistance d'excitation.
R_{ex}	: résistance additionnelle.
C	: couple moteur.
ω_r	: vitesse de rotation.
G	: génératrice.
MCC	: moteur à courant continu.
M	: moteur.
$S(p)$: grandeur de (sortie)
$E(p)$: grandeur d'entrée.
$G(p)$: fonction de transfert.
$\varepsilon(p)$: erreur.
$C(p)$: fonction de transfert du régulateur.
$G(p)$: processus à commander (moteur à courant continu).
$E(p)$: grandeur d'entrée.
$e(t)$: signal d'entrée.
K_p	: gain Proportionnel.
K_i	: gain Intégral.
K_d	: gain Dérivative.
E_c	: La f.é.m. de la charge
I_{d0}	: Valeur moyenne du courant $I_d(t)$.
τ	: La constante de temps
f	: fréquence de commande .
(α)	: Rapport cyclique

Résumé

Les machines électriques à courant continu demeurent intégrer dans les installations à vitesse variable. Elles sont simples à commander. Cependant, ce travail de projet de fin d'études constitue une étude des performances du réglage en cascade d'une chaîne à courant continu en utilisant deux types de régulateurs PI et IP (P : proportionnel ; I : intégral).

Mots clés : MCC, régulateur PI et IP, performances, simulation.

Introduction générale

Les machines électriques sont utilisées dans un très grand nombre de procédés industriels notamment la fabrication, la traction électrique (trains, tramways, véhicules électriques) et la génération d'énergie (les éoliennes). En fonction de ces applications, les MCC sont de divers types et les exigences sont déverses. Par conséquent, ces moteurs doivent répondre de manière efficace à des variations de consignes (vitesse, position, couple) et cela, dans une large gamme de variations du point de fonctionnement. Donc, afin de le contrôler de manière rapide et appropriée pour mieux adapter le moteur aux exigences imposées, moindre le choix de ce type d'entraînement se justifie encore pour certaines applications : Coût à puissance égale et un faible encombrement.

Les machines à courant continu sont celles qu'on fabrique en grand nombre et leur puissances disponibles vont du moteur de jouet d'un watt jusqu'à plusieurs méga watts pour une locomotive.

Ce travail de mémoire de fin d'étude est une étude sur la commande de vitesse pour la machine à courant continu. Nous introduisons des régulateurs pour assurer un temps de réponse minimale de la machine. Une première approche repose sur l'utilisation de régulateur classiques du type PI. Une commande en cascade du courant et de la vitesse est appliquée. Aussi, on considère le réglage a base de deux (2) types régulateur proportionnel intégral (PI) et intégral proportionnel (IP) pour cela, on commence à présenter leurs méthodes de synthèses. Et finalement, les performances sont discutées. En effet, chaque type de régulateurs présent ses propres avantages et inconvénients et le choix se fait selon les performances désirées.

Le premier chapitre est consacré à l'étude générale de la machine à courant continu, nous présentons dans ce chapitre le principe de fonctionnement et la constitution globale de la MCC puis on note les différentes applications des machines à courant continu tout en faisant une comparaison par rapport aux autres machines.

Le second chapitre présente le modelé mathématique de la machine à courant continu et on définit les caractéristiques pour le cas d'excitation ainsi que les performances dynamiques du MCC a excitation séparer.

Dans le troisième chapitre, on donne des notions sur les hacheurs et leurs commandes.

Au quatrième chapitre, la commande de vitesse de la machine à courant continu par des régulateurs classiques de type PI et IP sont analysées. Les simulations sont présentées dans tous les chapitres pour valider les modelés et justifier les choix donnés

Enfin, nous clôturons ce document avec une conclusion générale.

Chapitre I
Modélisation et simulation
D'un hacheur - MCC

I.1 Introduction

Un moteur électrique à courant continu (MCC) est un convertisseur électromécanique permettant la conversion bidirectionnelle d'énergie entre une installation électrique parcourue par un courant continu et un dispositif mécanique. Il est très utilisé en industrie et nécessite une régulation précise de la vitesse de rotation. Ce chapitre traite la modélisation en vue de la simulation d'un moteur à courant continu à excitation séparée.

I.2 Moteur à courant continu

Le moteur à courant continu est utilisé dans les asservissements où la facilité de réglage de la vitesse, du moment, du couple, et du sens de rotation, permet une mise en œuvre aisée.

I.2.1 Structure de la machine à courant continu

La figure I.1 montre la structure générale d'une machine à courant continu.

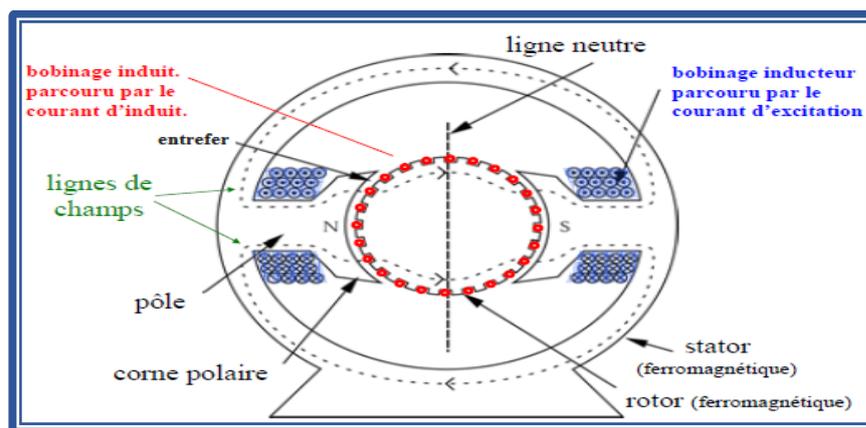


Figure I.1. Structure générale d'une MCC

Le moteur à courant continu est constitué principalement de stator, rotor, collecteur, et balais [1].

A. Stator (Inducteur)

Il est constitué de la carcasse du moteur et du circuit magnétique proprement dit. Un circuit magnétique est constitué d'une structure ferromagnétique qui canalise le flux magnétique, créé par une source de champ magnétique : aimant permanent ou électroaimant. Le circuit magnétique du stator crée le champ appelé : champ inducteur (B_s). L'inducteur magnétise en créant un flux magnétique (Φ) dans l'entrefer. L'entrefer est l'espace entre les pôles du stator

et le rotor. Le flux magnétique est maximal au niveau des pôles magnétiques [1]. Il est constitué principalement, de quatre (4) parties (Voir figure I.2) :

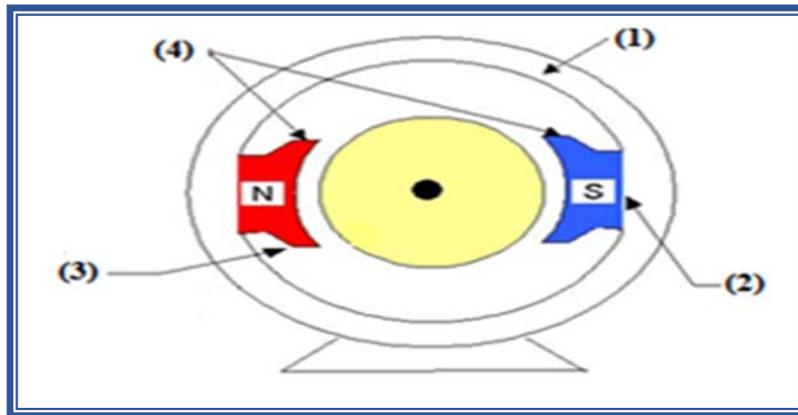


Figure I.2. Composition de l'inducteur

❖ **Culasse en acier coulé (1)** : C'est la carcasse de la machine qui supporte les parties fixes est aux extrémités les deux paliers dans lesquels tourne l'induit. Elle ferme le circuit magnétique de la machine.

❖ **Noyau polaire et Epanouissement polaire (2)** : Autour desquelles se trouvent les bobinages inducteurs.

❖ **Pièces polaires (3)** : Ou épanouissements polaires qui élargissent la section de passage du flux dans l'entrefer.

❖ **Pôles inducteur(4)** : intercalés entre les pôles principaux et portant des bobinages alimentés en série avec l'induit. Le courant qui parcourt le circuit inducteur est appelé courant d'excitation de la machine.

B. Rotor (Induit)

C'est la partie mobile de la machine, porte les conducteurs soumis au flux magnétique de l'inducteur. Il est constitué de tôle en fer au silicium isolé entre elles pour limiter les pertes par hystérésis les pertes par courants de Foucault. Le fer de l'induit comporte des encoches à la périphérie. et dans ces encoches qu'est logé le bobinage de l'induit parcouru par un courant continu. Le bobinage de l'induit est formé de sections. Une section est un groupe de spires isolées entre elles. Les extrémités du bobinage de l'induit sont reliées au collecteur.



Figure I.3. Composition de l'induit

C. Collecteur

Le collecteur est le constituant critique des machines à courant continu. C'est un ensemble de lames de cuivre, isolées latéralement les unes des autres et disposées suivant un cylindre, en bout de rotor. Ces lames sont réunies aux conducteurs de l'induit. Le collecteur a pour fonction d'assurer la commutation du courant d'alimentation dans les conducteurs de l'induit.

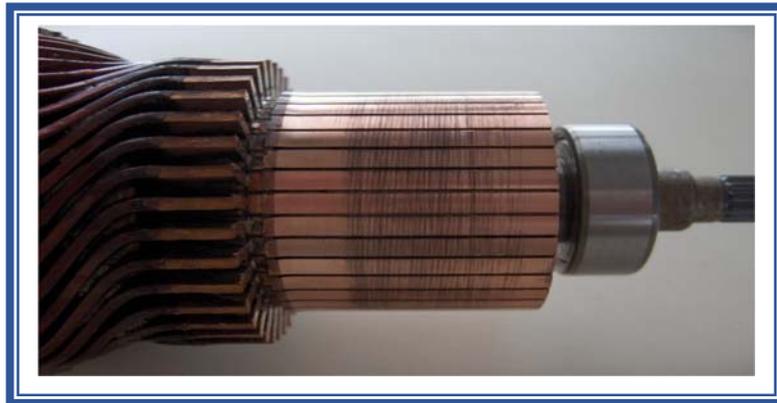


Figure I.4. Collecteur

D. Balais

Fixés sur la carcasse par le biais de portes balais, ils sont en carbone ou en graphite permettent l'alimentation de l'induit (partie en rotation) grâce à un contact glissant entre les lames du collecteur reliées aux conducteurs de l'induit et le circuit électrique extérieur. Ils sont constitués de petits cubes ayant une surface de contact de quelques mm² à quelques cm², en graphite pur ou en alliage, qui doivent résister à des conditions d'utilisation sévères (courants élevés, températures élevées, frottements, arc, atmosphères chargées ou très sèches).

Ils sont équipés d'une tresse de raccordement et maintenus en place par un porte-balais solidaire du stator. Un ressort exerce une pression constante sur la partie en graphite quelque soit le degré d'usure du balai et frottent sur le collecteur grâce à des ressorts.

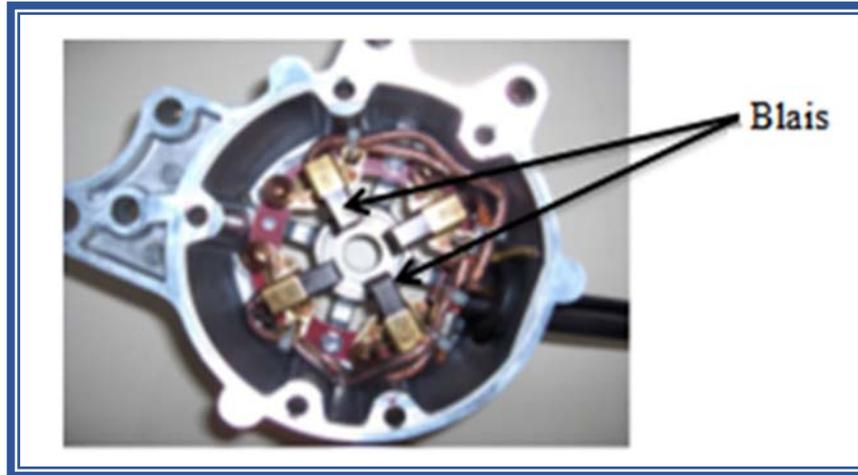


Figure I.5. Balais et porte balais

I.2.2 Principe de fonctionnement

Un conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique donne que l'interaction du courant avec le champ magnétique crée des forces électromagnétiques. Ces forces forment un couple électromagnétique moteur qui fera tourner l'induit. Le sens de ces forces électromagnétiques est donné par la règle des trois doigts de la main droite [2].

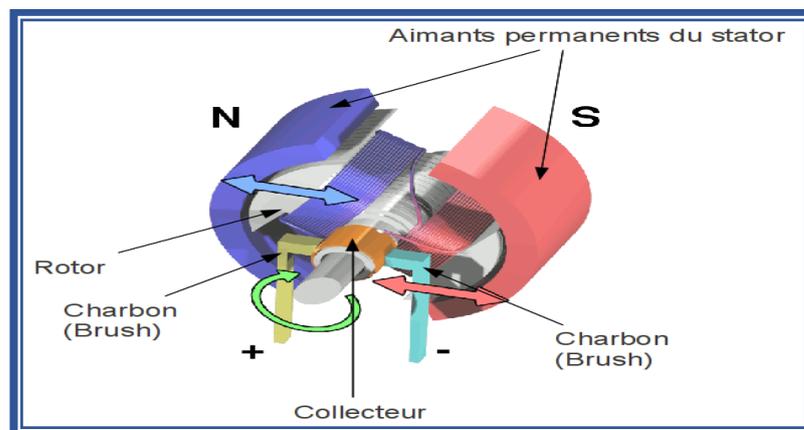


Figure I.6. Principe de fonctionnement de MCC

I.2.3 Circulation de flux magnétique

Le flux sort du pôle nord (N), s'épanouit un peu dans l'entrefer, traverse l'induit et entre dans le pôle sud (S). Il retourne au pôle nord (N) par les deux culasses et est donc égale à la moitié du flux sous un pôle. La perpendiculaire à l'axe des pôles est appelée ligne neutre.

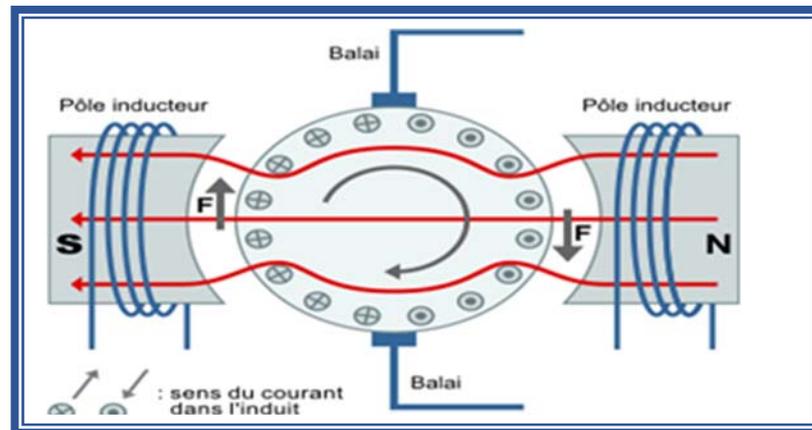


Figure I.7. Distribution de flux

Dans l'entrefer, les épanouissements polaires ne sont pas tout à fait concentriques à l'induit, l'entrefer est plus large sous les cornes polaires. Les lignes de force y sont moins serrées et l'induction décroît quand on va de l'axe vers les extrémités. Elle est nulle sur la ligne neutre.

L'épanouissement polaire est donc le siège de courant de Foucault, c'est pourquoi il est quelque fois feuilleté.

I.2.4 Régime de fonctionnement d'un MCC

La machine à courant continu est une machine réversible qui peut fonctionner en deux régimes [3] :

➤ **Fonctionnement en moteur :**

Un conducteur traversé par un courant, placé dans un champ magnétique est soumis à une force de Laplace ($\vec{F} = I \cdot \vec{l} \wedge \vec{B}$). Partant de ce principe de base, on peut comprendre la conversion d'énergie électrique en énergie mécanique dans le moteur à courant continu, lorsque l'inducteur est alimenté, il crée un champ magnétique (flux d'excitation) dans l'entrefer, dirigé suivant les rayons de l'induit. Ce champ magnétique rentre dans l'induit du côté du pôle Nord de l'inducteur et sort de l'induit du côté du pôle Sud de l'inducteur, en même temps, l'induit est alimenté, ses conducteurs situés sous un même pôle inducteur (d'un même côté des balais) sont

parcourus par des courants de même sens et sont donc, d'après la loi de Laplace, soumis à une force. Les conducteurs situés sous l'autre pôle sont soumis à une force de même intensité et de sens opposé. Les deux forces créent un couple qui fait tourner l'induit du moteur.

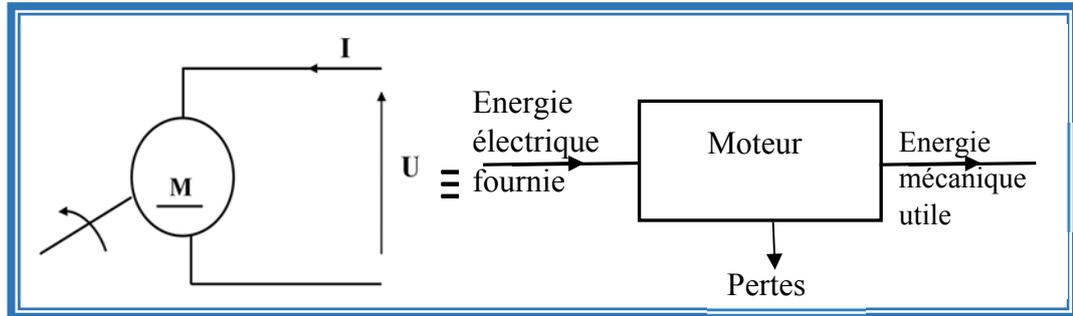


Figure I.8. Fonctionnement en moteur

➤ Fonctionnement en Génératrice

Un conducteur se déplaçant dans un champ magnétique va être le siège d'une f.é.m. induite. Il s'agit donc d'une conversion de sens inverse, d'énergie mécanique en énergie électrique.

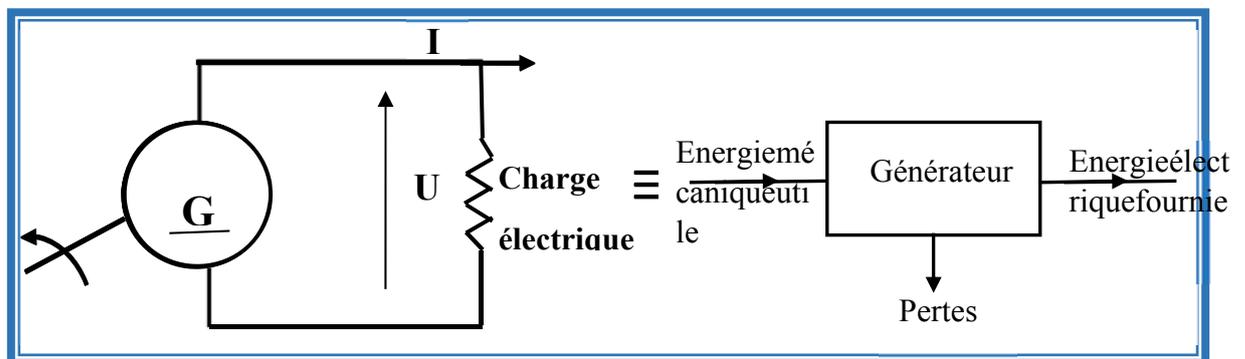


Figure I.9. Fonctionnement en Génératrice

I.2.5 Types de moteur à courant continu

Selon l'application et les différents modes de connexion entre les bobinages de l'inducteur et de l'induit, on distingue différents types de MCC [4]:

Tableau I.1. Différents types de moteurs à courant continu			
Type du moteur	Définitions et Caractéristiques	Domaine d'application	Schéma équivalent
Moteur à excitation séparée	<ul style="list-style-type: none"> -L'inducteur est alimenté par une source indépendante ; -Grande souplesse de commande ; -Large gamme de vitesse. Utilisé en milieu industriel, associé avec un variateur électronique de vitesse et surtout sous la forme moteur d'asservissement. 	<ul style="list-style-type: none"> machines-outils: moteur de broche, d'axe. Machines spéciales. 	
Moteur à excitation série	<ul style="list-style-type: none"> -L'inducteur connecté en série avec l'induit, le flux d'excitation y est donc implicitement asservi au couple fourni ; -Le bobinage inducteur comporte, dans ce cas, peu de spires, mais il est réalisé avec du fil de gros diamètre (robustesse) ; - Le moteur série est un autorégulateur de puissance ; - possède un fort couple de démarrage mais risque l'emballlement à vide ; - Le couple du moteur série ne dépend pas de la tension d'alimentation ; -Le couple résistant croit rapidement avec la vitesse ; - La vitesse décroît quand la charge augmente ; -Supporte bien les surcharges. 	<ul style="list-style-type: none"> engins de levage (grues, palans, ponts roulants) ventilateurs, pompes, centrifuges; traction. 	
Moteur à excitation composée	<ul style="list-style-type: none"> -L'inducteur est divisé en deux parties, l'une connectée en série et l'autre en parallèle ; - Entraînements de grande inertie ; - Couple très variable avec la vitesse. 	<ul style="list-style-type: none"> petit moteur à démarrage direct, ventilateur, pompes, machines de laminoirs, volants d'inertie 	
Moteur à excitation parallèle (shunt)	<ul style="list-style-type: none"> -L'inducteur et l'induit sont branchés en parallèle ; -Vitesse constante quel que soit la charge ; - Le moteur shunt est un autorégulateur de vitesse. 	<ul style="list-style-type: none"> machines-outils, appareil de levage (ascenseur). 	

I.2.6 Applications industrielles des machines à courant continu [5]

Tableau 1.2. Différents Applications des machines à courant continu	
<p>Application nécessitant des puissances et des couples beaucoup plus élevés (Moteur à Excitation série, Moteur à Excitation composée)</p>	 <p>Figure I.10. Une grue de chantier naval et des ponts de levage</p>
<p>Application nécessitant couple de démarrage important et capacité de freinage (Moteur à Excitation parallèle (shunt))</p>	 <p>Figure I.11. Remontées mécaniques</p>
<p>Trois exemples d'applications typiques de la variation de vitesse à courant continu (Moteur à Excitation séparée, Moteur à Excitation parallèle (shunt))</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>Figure I.12. Chaîne de tréfilage de câbles</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Figure I.13 Machine rotative d'imprimerie</p> </div> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 20px;">  <p>Figure I.14. Machine d'enroulage pour film plastique transparent</p> </div>

I.2.7 Moteur à Excitation séparée

L'inducteur d'un moteur à excitation séparée est alimenté par une source indépendante (figure I.15).

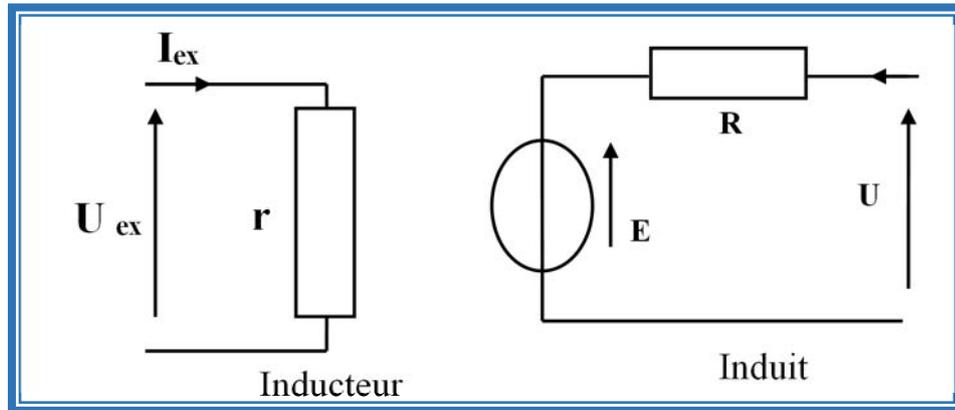


Figure I.15. Schéma électrique du MCC à excitation séparée

❖ Equations électriques

D'après le schéma électrique d'un MCC à excitation séparée (figure I.15), on peut déduire les expressions suivantes :

- Pour l'induit

$$U = E + R_{\text{ind}} \cdot I_{\text{ind}} \quad (\text{I.1})$$

$$E = K\Phi W \quad (\text{I.2})$$

- Pour l'inducteur

$$U_{\text{ex}} = R_{\text{ex}} \cdot I_{\text{ex}} \quad (\text{I.3})$$

- **Equation mécanique**

On déduit l'expression générale de la vitesse d'un moteur à courant continu

$$W = U/K\Phi - R_{\text{ind}} \cdot I_{\text{ind}}/K\Phi \quad (\text{I.4})$$

$$C = K\Phi I_{\text{ind}} \quad (\text{I.5})$$

Avec

$$K = P \cdot n / a \quad (I.6)$$

Où,

P : nombre de paires de pôles ;

n : nombre de conducteur ;

a : nombre de voies d'enroulements branchés en parallèles.

I.2.8 Simulation du MCC à excitation séparée

Le moteur considéré en simulation à comme données :

- Paramètres de l'enroulement de l'induit : $R= 0,78$ Ohm, $L=0,016$ H ;
- Paramètres de l'enroulement d'excitation $R_f= 150$ Ohm, $L_f=112$ H, $M_{fd}= 1.234$ H ;
- Somme des moments d'inertie de la machine : $J=0. 5$ (Kg.m²) ;
- Coefficient de frottement visqueux $f_r=0.01$ N.m.s ;
- Coefficient de frottement à sec : $k_{fc}= 0$;
- Vitesse nominale $V_n=1750$ tr/min ;
- Puissance nominale $P_n= 5$ HP.

On effectue les derniers réglages sur le schéma ci-dessus avec le temps de simulation de 1 à 10 seconde, en alimentant l'inducteur et l'induit sous une tension $U_f=150$ V et $U_n=240$ V, respectivement, on démarre le moteur à vide ($C_r=0$), puis à $t=0.5$ s, on applique un couple résistant de 20 N.m.

I.2.8.1 Caractéristiques statiques et différents modes de réglage de la vitesse du MCC

On remarque qu'on peut faire modifier la vitesse d'un moteur à courant continu en agissant sur les trois paramètres suivants :

- Résistance du circuit d'induit ;
- Flux d'excitation ;
- Tension d'induit du réseau appliqué au moteur.

➤ **Réglage Rhéostatique**

Ce mode de réglage est basé sur la variation de la résistance totale de l'induit. On peut diminuer la vitesse en augmentant la résistance d'induit avec un rhéostat branchée en série avec l'induit.

$$C_e = K\Phi I \quad (I.7)$$

$$W = \frac{U - RI}{K\Phi} \quad (I.8)$$

Donc :

Pour $C = 0$ donc $I = 0$

$$W_0 = U / K\Phi \quad (I.9)$$

Pour $W = 0$ donc $I = U / (R_{ind} + R_{ad})$

$$C = K\Phi U / (R_{ind} + R_{ad}) \quad (I.10)$$

$$L \cdot \frac{dI_q}{dt} = U_a - R \cdot I_q + K \cdot \omega_r \quad (I.11)$$

Sachant que : $K = M_{fd} \cdot I_f$

Ce mode de réglage est simple à réaliser mais sur le plan technique et économique est également mauvais car le rhéostat consomme autant d'énergie que le moteur.

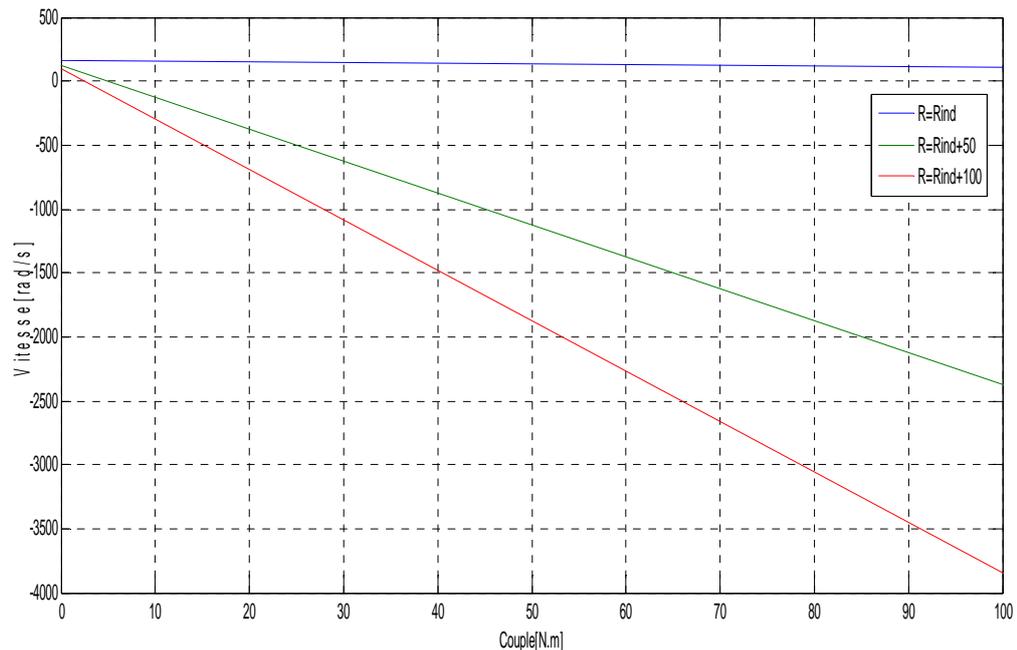


Figure I.16. Caractéristiques mécaniques pour variation de rhéostat

➤ **Réglage par variation des flux (R, U constantes)**

Le démarrage de ce type de moteur est assuré à flux maximal, une fois la vitesse nominale est atteinte il sera possible de réduire le flux en utilisant des résistances variables ou un convertisseur complètement commandé et par conséquent augmenter la vitesse du moteur. Par contre le couple que peut développer le MCC est faible à un courant I_s qui correspond aux couples résistant donné.

Ce mode de réglage est bon du point de vue technique et aussi économique car la puissance dissipée dans l'inducteur est très faible par rapport à la puissance absorbée.

Si le couple résistant est constant, l'intensité du courant augmente, en diminuant le flux, le moteur risque de chauffer, dans ces conditions, on doit dimensionner en conséquence le moteur.

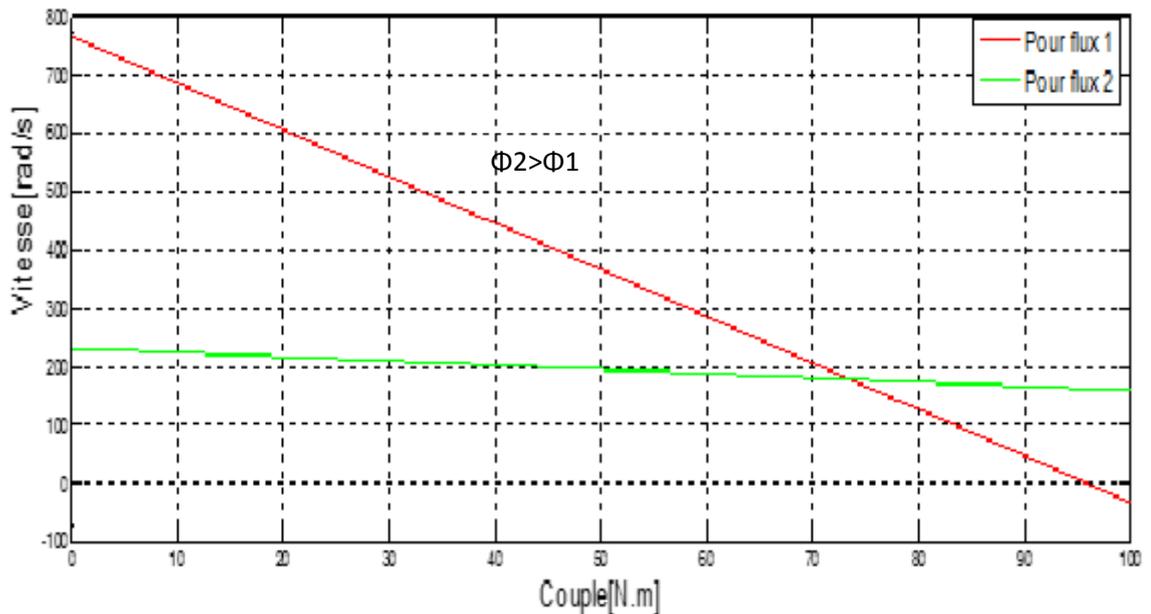


Figure I.17. Caractéristiques mécaniques pour variation de flux

On règle le flux à sa valeur nominale en mettant en court-circuit le rhéostat du champ pour que le courant d'induit soit réduit à une valeur minimale l'excitation étant maintenue constante.

➤ Réglage par variation de la tension

A l'aide de ce procédé, on peut réduire à volonté la vitesse d'un groupe « moteur- mécanisme entraîné ». Ce mode de réglage est excellent de point de vue technique et économiques.

D'une part les caractéristiques conservent leurs allures (c'est à dire qu'elles ne sont pas modifiées), et d'autre part aucune puissance n'est dissipée dans des rhéostats ce qui implique que le rendement demeure élevé à toute variation de vitesse. Mais le seul inconvénient de ce procédé est qu'il nécessite une tension continue réglable. Cette dernière peut être assurée soit par convertisseur statique. Grâce à l'évolution de la technologie, on a presque remplacé les convertisseurs tournants par des convertisseurs statiques qui sont moins coûteux meilleurs rendements, moins de bruit et de petites dimensions.

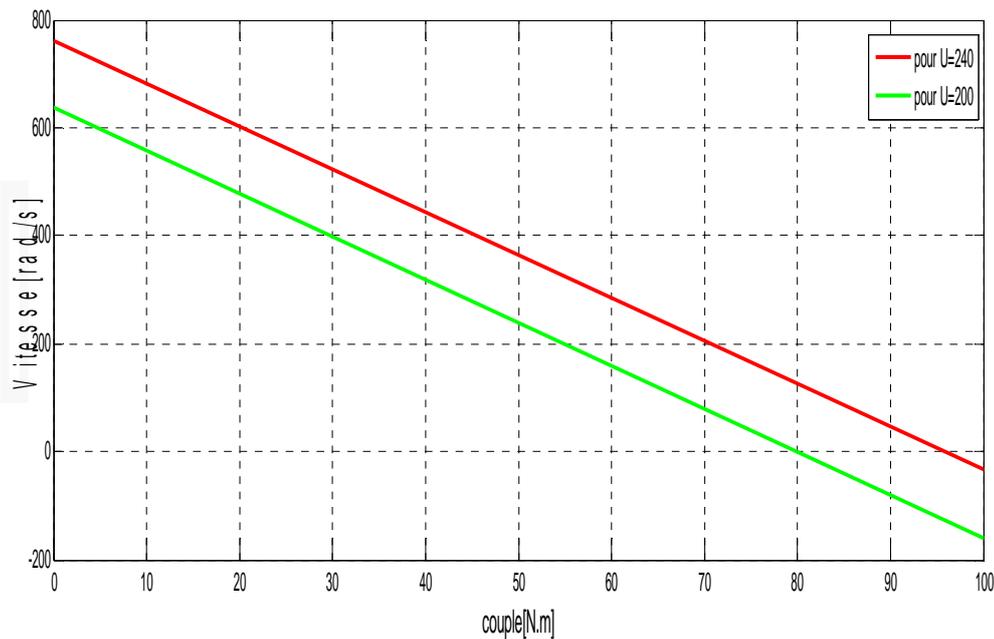


Figure I.18. Caractéristiques mécaniques avec variation de tension

Pour réaliser ce mode de réglage, ils existent deux techniques :

- L'emploi du groupe tournant « système GM ».
- L'emploi d'un montage redresseur à tension réglable « Convertisseur statique »

I.2.8.2 Caractéristiques dynamiques

A la suite de la visualisation des caractéristiques statiques, nous avons considéré les caractéristiques en régimes dynamique de MCC. Les figures (I.19), (I. 20) et (I.21) montrent, respectivement, le courant de l'induit, le couple et la vitesse de rotation pour un démarrage suivi d'un couple de charge à l'instant 0,5 seconde.

- Au démarrage, le courant observe un pic de valeur importante qui ≈ 180 A, produisant ainsi un couple de 220 N.m durant un temps assez court $t=0.3s$ (figure (I.19) et (I.20)), après le régime transitoire, le courant est peu conséquent, le couple s'annule. La vitesse commence de zéro pour se stabiliser autour de 193rad/s, la courbe à une forme exponentielle, ce qui correspond à la présence de phénomènes transitoires dans les enroulements de la machine.

- A $t=0.5s$ le moteur étant chargé, la vitesse diminue pour atteindre son régime permanent à $t=0.6s$ (figure (I.21)). Le couple augmente puis passe du régime transitoire au régime établi

pour se stabiliser autour de 22 N.m, qui correspond au couple résistant imposé par la charge (C_r).

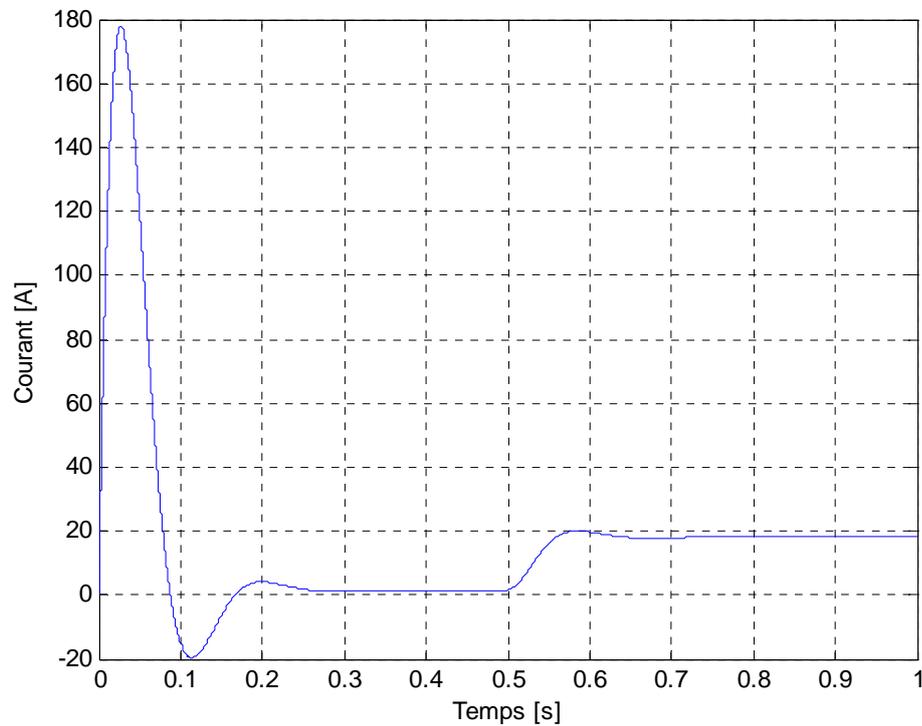


Figure I.19. Courant d'induit

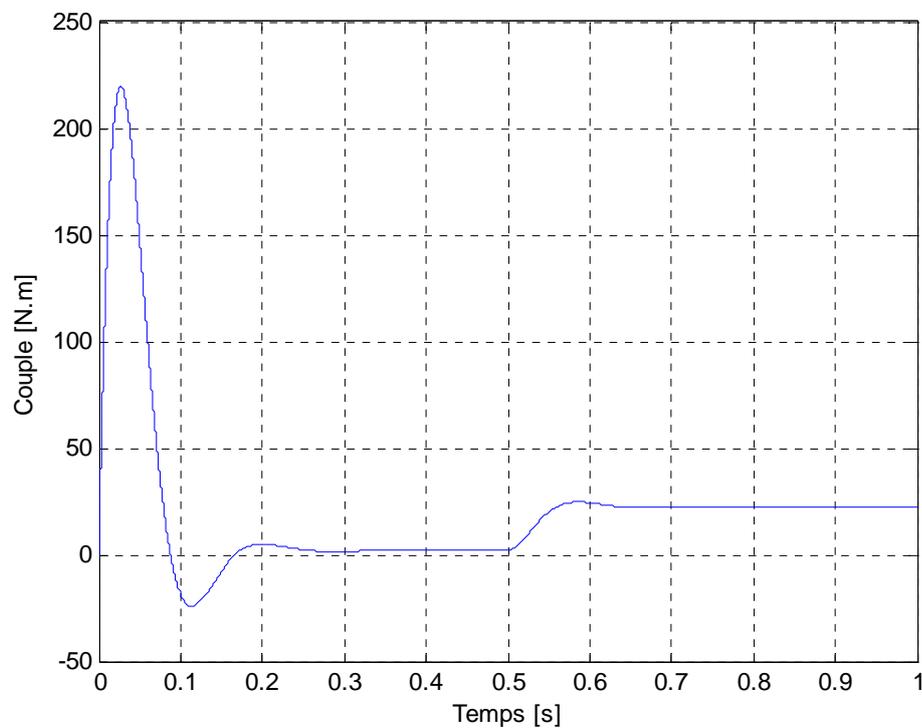


Figure I.20. Couple électromagnétique

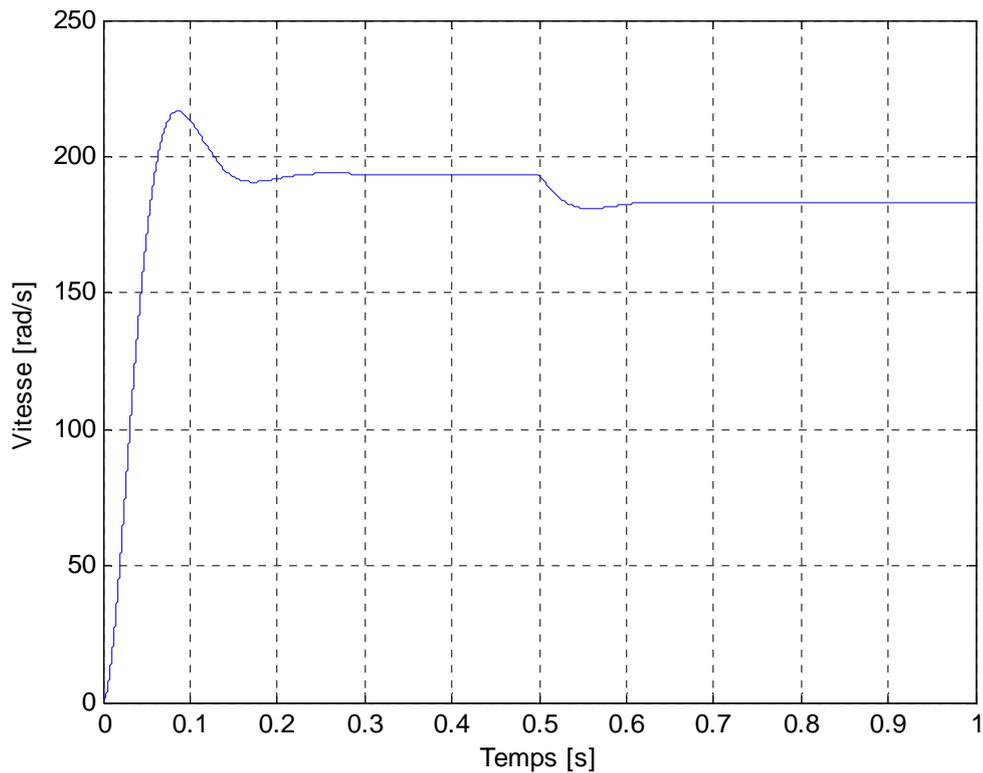


Figure I.21. Vitesse de rotation ω_r

I.3 Conclusion

Le moteur à courant continu est idéal pour un bon nombre d'applications industrielles. Alors, dans ce chapitre nous avons amplement considéré la construction et les différents types de connexions du moteur à courant continu. Une synthèse des domaines d'application en correspondance avec le type de moteur est présentée. Malgré ses quelques inconvénients, cette machine à courant continu est restée la plus utilisée. Seulement, après nous avons retenu le courant continu à excitation indépendante pour la suite de notre étude.

Chapitre II
Régulation d'un moteur
À courant continu MCC

II.1. Introduction

La régulation est l'action de régler automatiquement une grandeur de telle sorte que celle-ci garde constamment sa valeur ou reste proche de la valeur désirée, quelque soient les perturbations qui peuvent subvenir [6].

L'objectif global de la régulation peut se résumer par ces trois mots clefs : mesurage, algorithme, commande, comme l'illustre la figure II.1.

- *Mesurage* : Le mesurage englobe le capteur, l'acquisition par l'automate et le traitement de la mesure.
- *L'algorithme* : Il correspond à la partie calcul de la commande, en respectant les consignes.
- *La commande* : Représente l'écriture sur la carte de sortie ainsi que l'actionneur.

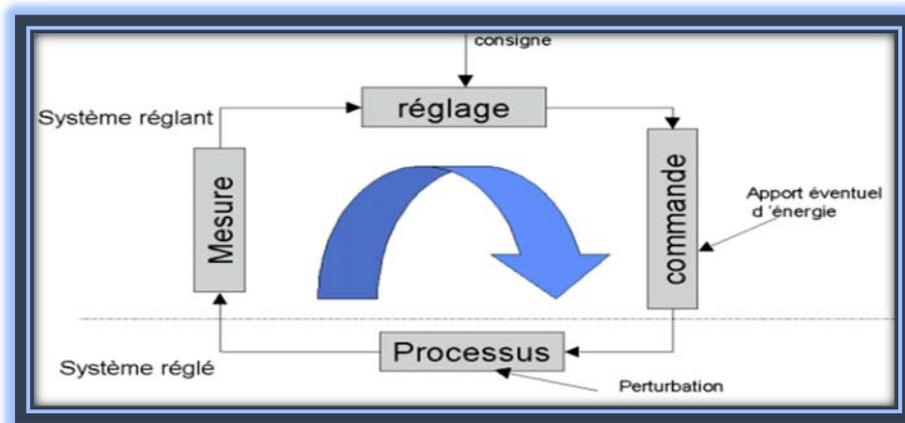


Figure II.1. Chaîne de traitement de l'information

II.2 Conception d'un système de commande

La commande d'un processus consiste à déterminer la commande appropriée, de manière à assurer aux variables à contrôler (sorties) un comportement défini. L'action de la commande est une action susceptible de changer l'état du système à commander. Ces commandes sont délivrées par un organe de commande ; le processus et son organe de commande constituent le système de commande (figure II.2) [7].

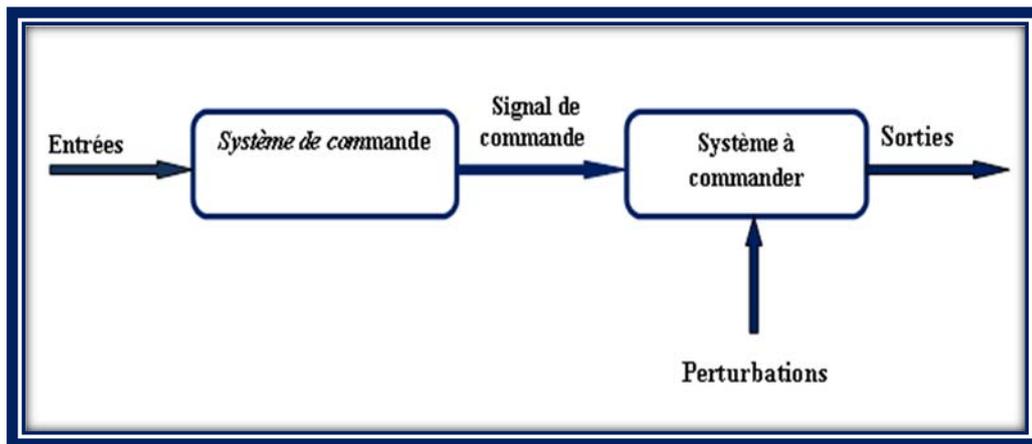


Figure II.2. Système de commande

Le système de commande comprend un élément nécessaire qui est le régulateur qui effectue le calcul de la commande à appliquer au processus à partir de la consigne et de l'état du processus. Lorsqu'il y a un retour d'information de la grandeur observée sur le régulateur, on parle d'un asservissement du système ou d'une régulation du système.

a. Asservissement

La consigne, traduisant l'objectif désiré du procédé, n'est pas constante et les grandeurs perturbatrices n'existent pas ou sont très peu influentes sur la grandeur à régler.

b. Régulation

La consigne, traduisant l'objectif désiré du procédé, est constante et les grandeurs perturbatrices influencent fortement sur la grandeur à régler.

II.3. Principe général de la régulation

Dans la plupart des appareils dans des installations industrielles et domestiques, il est nécessaire de maintenir des grandeurs physiques à des valeurs déterminées, en dépit des variations extrêmes ou internes influant sur ces grandeurs. Par exemple, la vitesse et la position des moteurs, étant par nature variables, doivent donc être réglés par des actions convenables sur le processus considéré. Si les perturbations influant sur la grandeur à contrôler sont lentes ou négligeables, un simple réglage dit en boucle ouverte, permet d'obtenir et de maintenir la valeur demandée (par exemple : action sur un robinet d'eau). Dans la majorité des cas, ce type de réglage n'est pas suffisant, car trop grossier ou instable. Il faut alors comparer, en permanence, la valeur mesurée de la grandeur réglée à celle que l'on souhaite obtenir et agir en conséquence sur la grandeur d'action, dite grandeur réglant.

On a, dans ce cas, constitué une boucle de régulation et plus généralement une boucle d'asservissement.

Cette boucle nécessite la mise en oeuvre d'un ensemble de moyens de mesure, de traitement de signal ou de calcul, d'amplification et de commande d'actionneur, constituant une chaîne de régulation ou d'asservissement. La consigne est maintenue constante se produit sur le procédé une modification des entrées perturbatrices. L'aspect régulation est considéré comme le plus important dans le milieu industriel, car les valeurs des consignes sont souvent fixes.

Néanmoins, pour tester les performances et la qualité d'une boucle de régulation, on s'intéresse à l'aspect asservissement.

II.4. Performances des systèmes réglés [8]

Les performances des systèmes réglés définies dans un cahier des charges, sont illustrées par la figure (II.3).

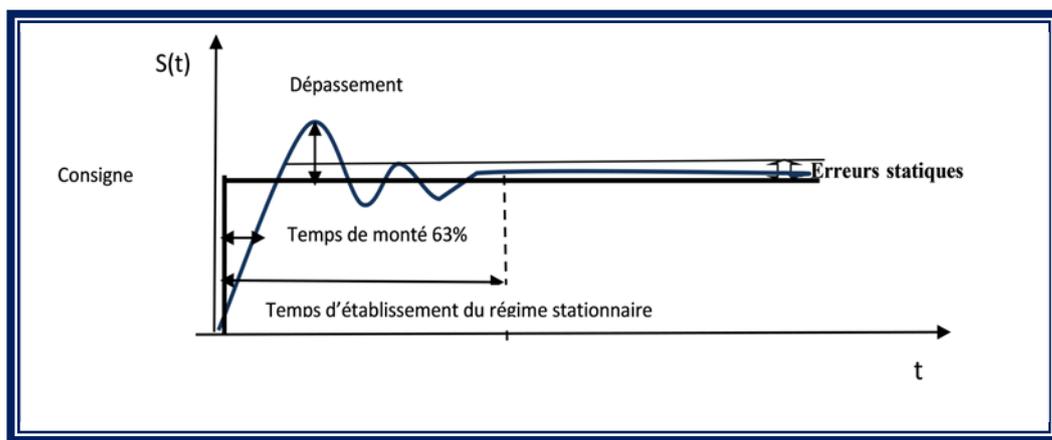


Figure II.3. Performances d'un système de commande



Rapidité

La rapidité quantifie le temps de réponse du système. Elle correspond au temps de réaction de la sortie par rapport à la consigne.

Le temps mis par la réponse pour ne plus dépasser 5% de la valeur finale. Ce temps est retenu comme critère de rapidité 5%.

◆ Précision

La précision quantifié l'erreur lorsque l'équilibre est atteint, Avec l'entrée $e(t)$ et la sortie $s(t)$ de même nature. Autrement, un système est précis si la sortie suit la consigne en toutes circonstances avec un écart inférieur à la valeur définie dans un cahier des charges.

◆ Stabilité

On dit qu'un système est stable lorsque celui-ci tend à revenir à son état d'équilibre pour une consigne constante, la sortie doit être constante.

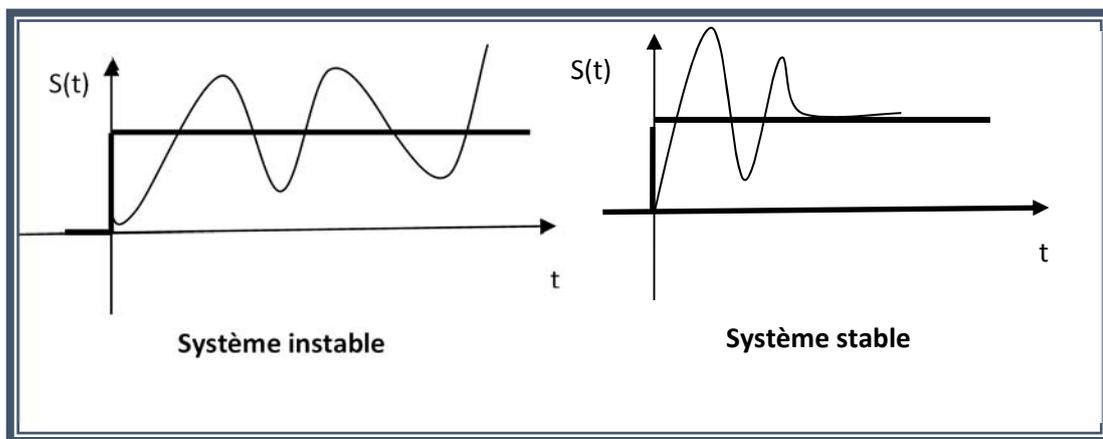


Figure II.4. Stabilité du système

II.5. Système en boucle ouverte

Un système est dit en boucle ouverte lorsque la commande est élaborée sans l'aide de la connaissance des grandeurs de sortie. Au niveau des inconvénients, il n'y a aucun moyen de contrôler, à plus forte raison de compenser les erreurs, les dérives, autrement dit, il n'y a pas de précision et surtout de fidélité qui dépendent de la qualité intrinsèque des composants. Enfin, le système en boucle ouverte ne compense pas les signaux de perturbation, le schéma bloc de système en boucle ouverte est donné par la figure suivante.

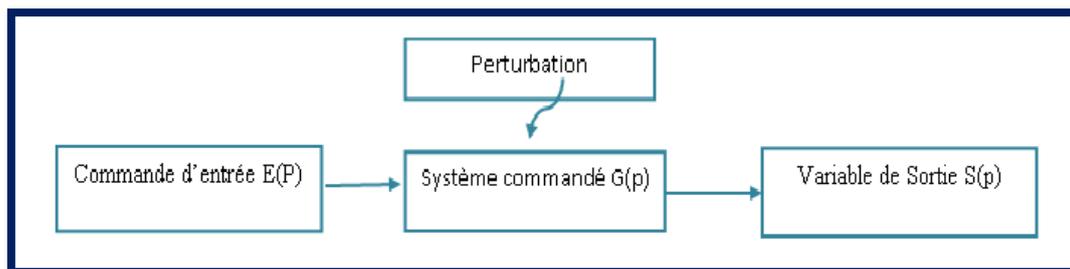


Figure II.5. Schéma bloc d'un système en boucle ouverte

Avec

$S(p)$: grandeur de (sortie)

$E(p)$: grandeur d'entrée.

$G(p)$: fonction de transfert.

II.6. Système en boucle fermée

La boucle fermée (contre réaction) est capable de stabiliser un système instable en boucle ouverte. Dans une régulation en boucle fermée, une bonne partie des facteurs perturbateurs externes sont automatiquement compensés par la contre-réaction à travers le procédé.

L'utilisation du retour d'information est le principe fondamental en commande électrique. La commande appliquée au système est élaborée en fonction de la consigne et de la sortie. On peut représenter une régulation de la manière suivante :

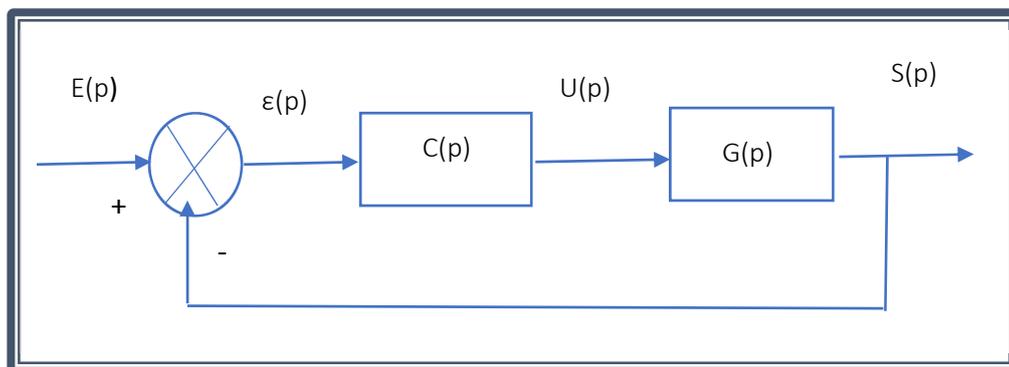


Figure II.6. Schéma bloc d'un système en boucle fermée

Avec

$C(s)$ est la fonction de transfert du régulateur ;

$G(s)$ est le processus à commander (moteur à courant continu) ;

$E(p)$ est la grandeur d'entrée ;

$S(p)$ est la grandeur de sortie.

$\varepsilon(p)$ est l'erreur, $\varepsilon(p) = E(p) - S(p)$.

II.7. Influence des perturbations

Une perturbation est une entrée supplémentaire au système qu'on ne peut pas contrôler ou maîtriser. Ces perturbations ont une influence sur la régulation des systèmes, voir la (figure II.7)

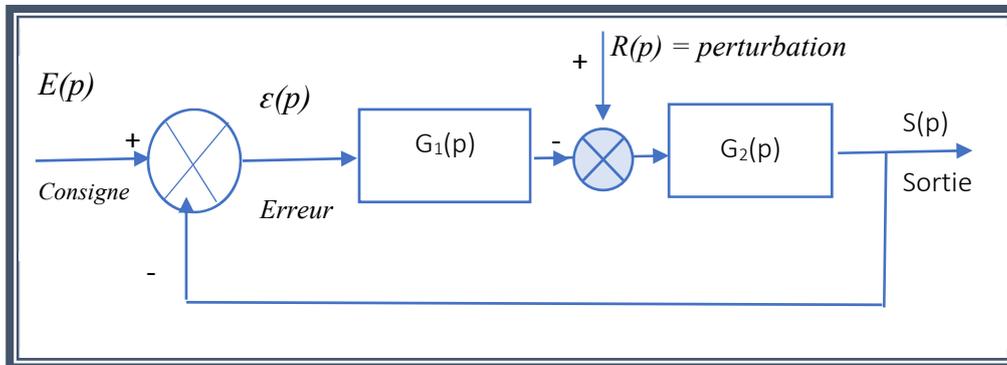


Figure II.7. Schéma bloc d'une régulation avec une perturbation

La fonction de transfert du bloc de régulation est représentée comme suit :

Calculons $S(p)$ en fonction de $R(p)$, (En posant $E(p)=0$) :

$$S_r(p) = \frac{G_2(p)}{1 + G_1(p)G_2(p)} R(p) \quad (\text{II.1})$$

Calculons $S(p)$ en fonction de $E(p)$, (En posant $R(p)=0$) :

$$S_E(p) = \frac{G_1(p)G_2(p)}{1 + G_1(p)G_2(p)} E(p) \quad (\text{II.2})$$

La sortie totale est :

$$S_r(p) = \frac{G_2(p)}{1 + G_1(p)G_2(p)} R(p) + \frac{G_1(p)G_2(p)}{1 + G_1(p)G_2(p)} E(p) \quad (\text{II.3})$$

II.8 Configurations de correction

En général, la dynamique d'un système commandé peut être représentée par le schéma fonctionnel de la figure II.7.

L'objectif est que la variable commandée, représentée par la sortie $s(t)$, ait un comportement désiré sur un intervalle de temps donné. Il s'agit alors de déterminer le signal de commande $u(t)$ qui dans cet intervalle, garantisse la sortie $s(t)$ désirée.

a. Correcteur en série

On peut réaliser la compensation en insérant, dans une chaîne, un régulateur directement en série avec les autres éléments (Figure II.8).

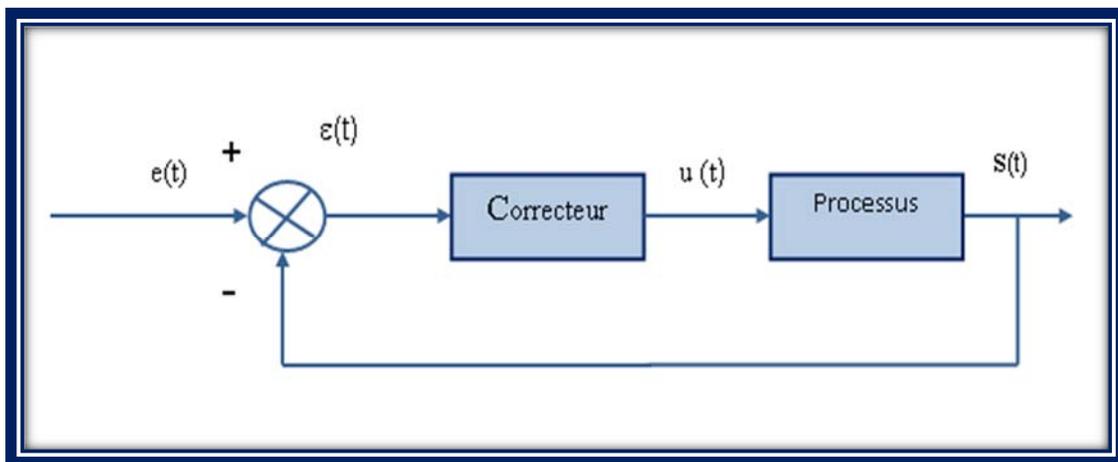


Figure II.8. Correction en série

b. Correction en parallèle

On peut placer ces correcteurs en parallèle sur un élément d'une chaîne, dans ce cas c'est un correcteur en réaction qui constitue alors une boucle secondaire, comme le montre la figure II.9.

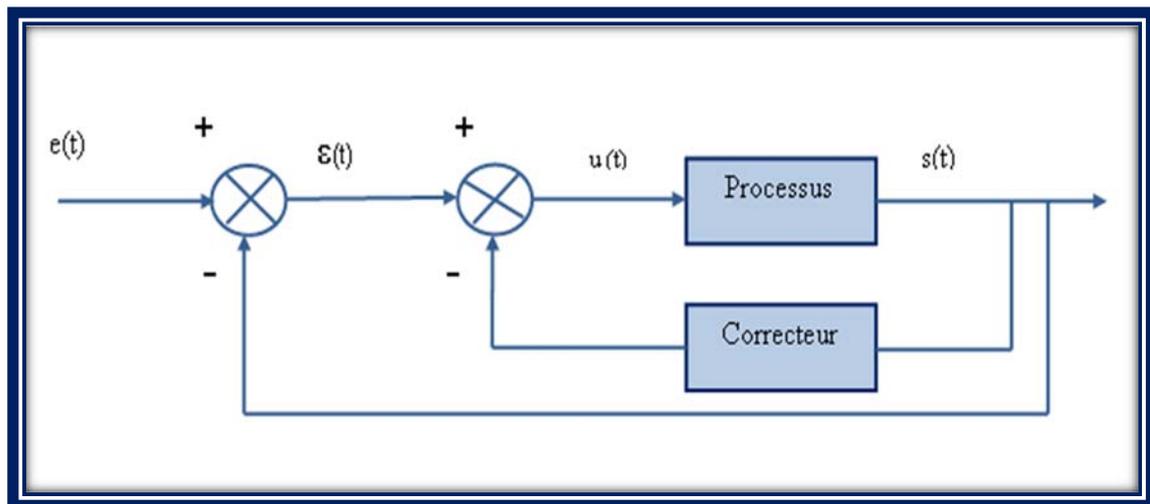


Figure II.9. Correction en réaction ou parallèle

D'autres configurations sont également très utilisées, telles que :

c. Correction série- réaction

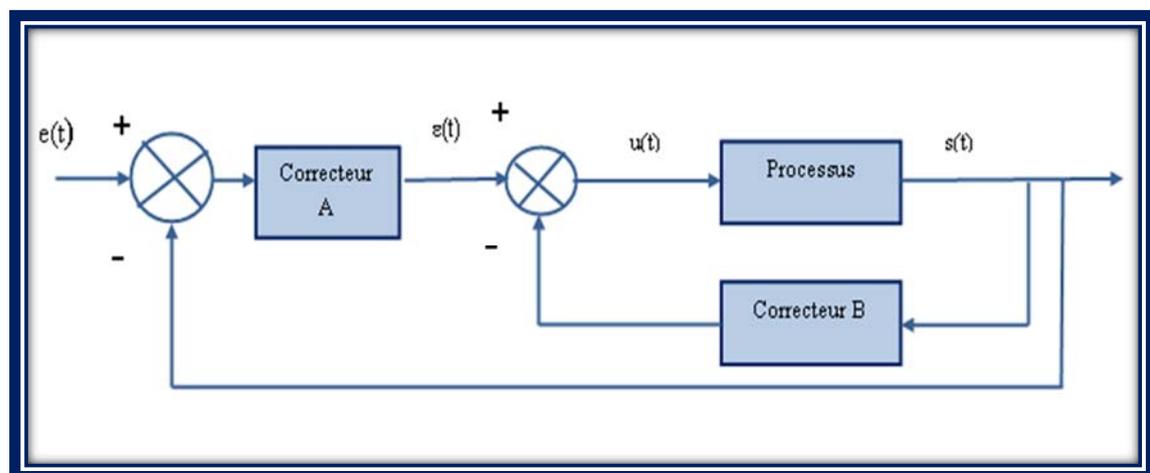


Figure II.10. Correction série parallèle

d. Correction en série parallèle par rapport au signal d'entrée

Dans la figure II.11 (a) le correcteur anticipatif (G_{CA}) est placé en série avec le système en boucle fermée qui dispose lui-même d'un correcteur (G_C) dans sa chaîne directe.

Dans la figure II.11 (b) le correcteur anticipatif (G_{CA}) est placé en parallèle avec la chaîne directe.

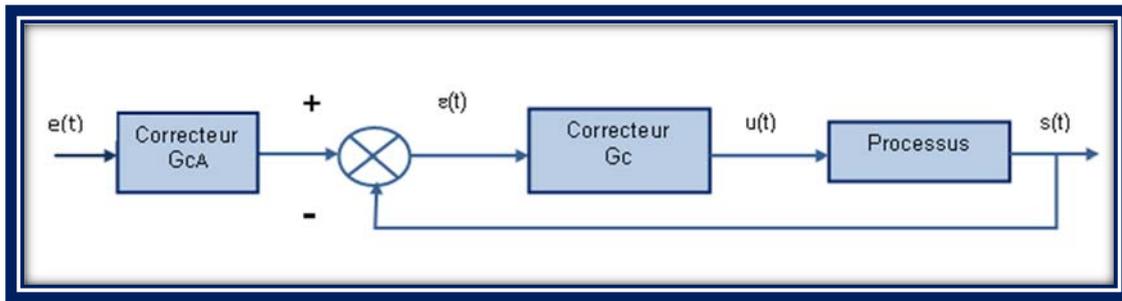


Figure II.11 (a). Correction en série

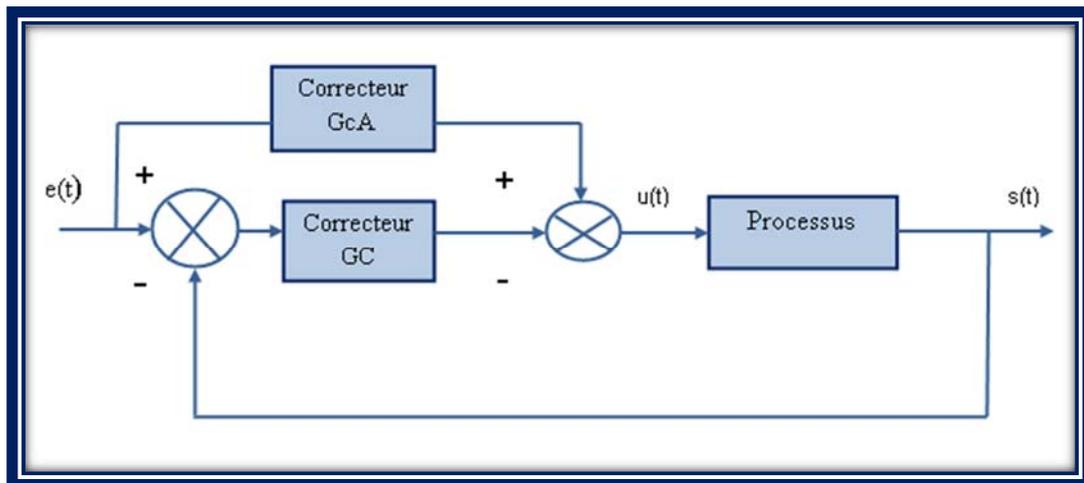


Figure II.11 (b). Correction en parallèle

Les configurations de correction sont à un seul degré de liberté au sens qu'elles ne disposent que d'un seul correcteur dans chaque système, bien que ces correcteurs puissent avoir plusieurs paramètres à faire varier. Cependant l'inconvénient avec la correction à un seul degré de liberté est que les critères de performances réalisables sont limités. Par exemple, si les racines de l'équation caractéristique sont sélectionnées de manière à produire une certaine valeur d'amortissement, le dépassement obtenu pour une réponse indicielle peut encore être excessif à cause des zéros de la fonction de transfert en boucle fermée.

Les configurations des figures II.10, II.11(a), et II.11(b) sont toutes à deux degrés de liberté.

II.8 Différents types de régulateurs

Le réglage d'une boucle de régulation (choix de structure et calcul des paramètres du régulateur) doit permettre de répondre au plus grand nombre de contraintes exigées par le cahier des charges du procédé à réguler. De nombreuses méthodes de réglage d'une boucle sont possibles selon les besoins en régulation.

Les exigences du cahier des charges sont décrites soit dans le domaine temporel, soit dans le domaine fréquentiel. Le critère de réglage est alors fixé à partir soit de la forme de la réponse temporelle souhaitée pour un type d'entrée (par exemple un échelon), soit à partir des marges de stabilité (marge de gain et de phase, facteur de résonance).

II.9 Régulateur PID

Un régulateur *PID* remplit essentiellement trois fonctions :

- Il fournit un signal de commande $U(t)$ en tenant compte de l'évolution du signal de sortie $S(t)$ par rapport à la consigne $E(t)$.
- Il élimine l'erreur statique grâce au terme intégrateur.
- Il anticipe les variations de la sortie grâce au terme dérivateur.

La sortie d'un régulateur PID, égale à l'entrée de commande de la centrale, dans le domaine temporel est la suivante :

$$S(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$\varepsilon(i)$: Représente l'erreur de suivi, la différence entre la valeur d'entrée désirée (v) et la sortie réelle(s);

$e(t)$: Signal de commande ;

K_p : Gain Proportionnel ;

K_i : Gain Intégral ;

K_d : Gain Dérivative ;

La fonction de transfert d'un régulateur PID est donnée par la relation suivante.

$$K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = \frac{K_d s^2 + K_p + K_i}{s} \quad (\text{II.5})$$

Les effets de chacun des paramètres du contrôleur, K_p , K_i et K_d sur un système en boucle fermée sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Tableau II.1. Intérêt des actions K_p , K_i , K_d				
	Temps de réponse	Dépassement	Temps de stabilisation	Erreur statique
K_p	Réduire	Augmente	Small Change	Réduire
K_i	Réduire	Augmenter	Augmenter	Éliminer
K_d	<i>Small Change</i>	Réduire	Réduire	Pas de changement

II.10 Schéma électronique du correcteur

II.10.1 Schéma électronique du correcteur proportionnel

Dans le schéma électronique de correcteur proportionnel (P), en utilisant des circuits passifs et actifs sont montrées sur la figure II.12.

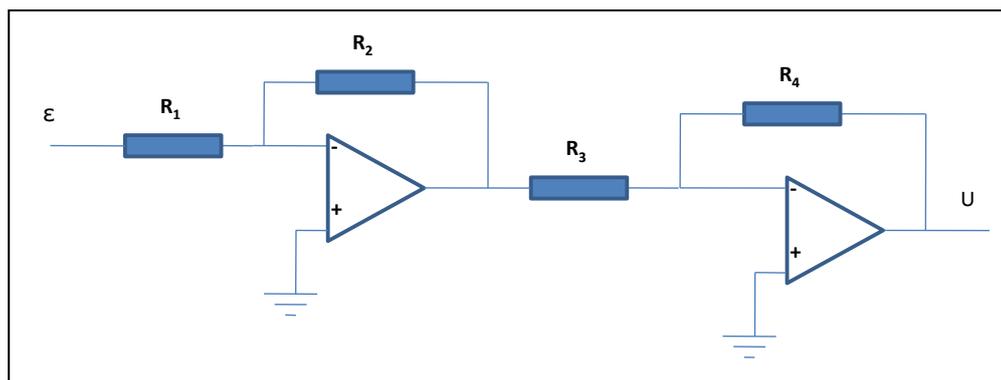


Figure II.12. Schéma électronique du correcteur P avec 2 amplificateurs opérationnels

$$G_c(p) = \frac{U(p)}{\varepsilon(p)} = \frac{R_2 R_4}{R_1 R_3} = K_p \quad (\text{II.6})$$

Avec

$$K_p = R_2/R_1 \text{ si } R_4 = R_3,$$

Le circuit de la figure II.12 utilise 2 amplificateurs (le second servant d'inverseur, avec un gain de valeur 1 en prenant $R_4 = R_3$).

II.10.2 Schéma électronique du correcteur intégral

Dans le schéma électronique de ce correcteur à base de circuits passifs et actifs est montré par la figure II.13.

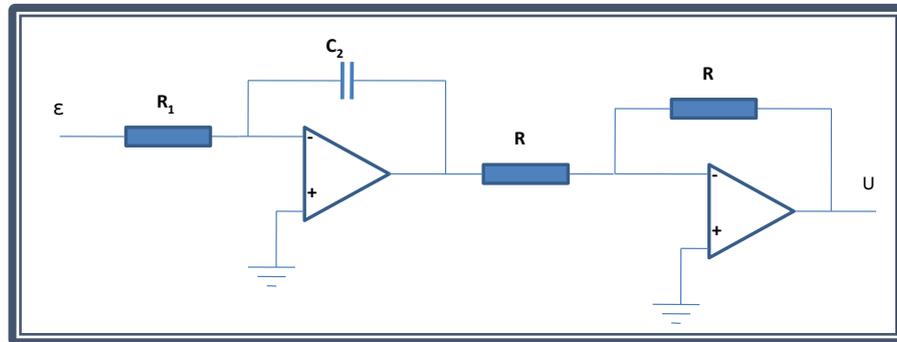


Figure II.13. Schéma électronique du correcteur I avec 2 amplificateurs opérationnels.

$$G_c(p) = \frac{U(p)}{\varepsilon(p)} = \frac{1}{R_1 C_2 p} = \frac{K_i}{p} \quad (\text{II.7})$$

Avec

$$K_i = 1/R_1 C_2$$

Le circuit de la figure II.13 utilise deux amplificateurs (le second servant d'inverseur avec un gain de valeur unitaire).

II.10.3 Schéma électronique du correcteur proportionnel intégral

Le schéma électronique est montré par la figure suivante.

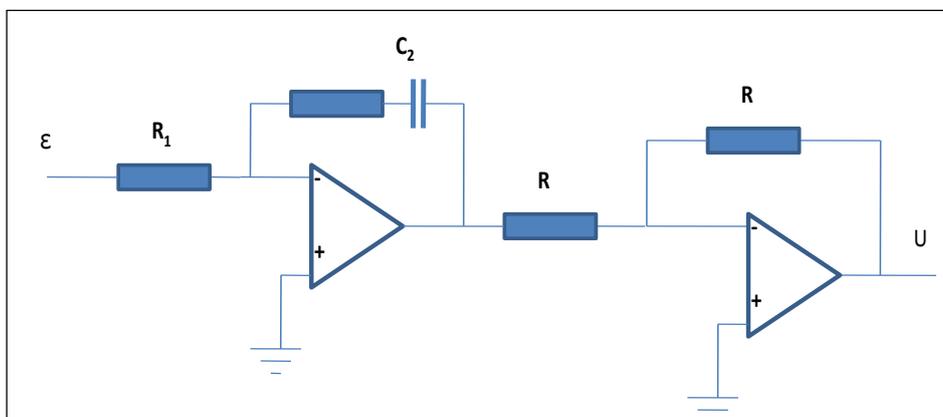


Figure II.14. Schéma électronique du correcteur PI avec deux amplificateurs opérationnels

Avec

$$K_p = R_2/R_1 \text{ et } K_i = 1/R_1C_2.$$

L'avantage du circuit de la figure II.14 n'utilise que deux amplificateurs (le second servant d'inverseur avec un gain de valeur 1). Cependant, ce circuit ne permet pas une sélection indépendante de K_p et K_i , puisque ceux-ci dépendent tous les deux de R_1 .

Une deuxième réalisation, avec trois amplificateurs (Voir figure II.15).

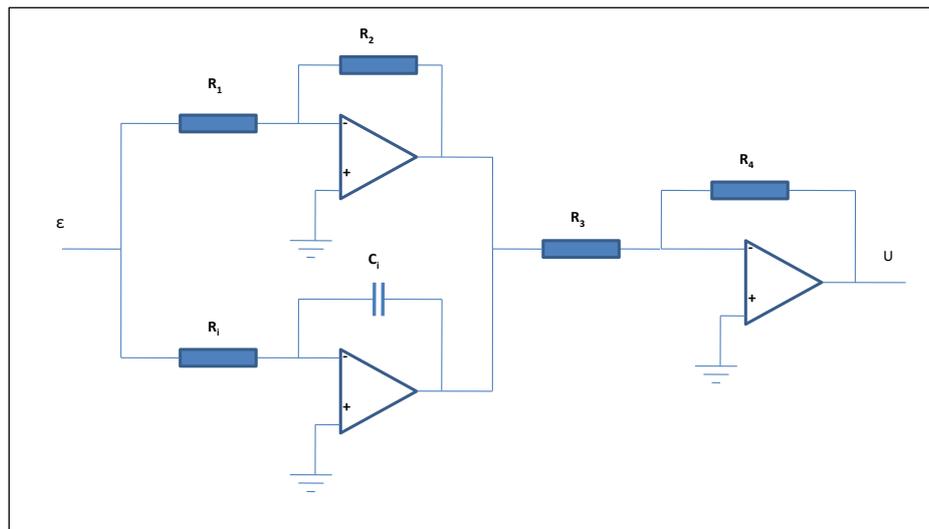


Figure II.15. Réalisation du correcteur PI avec trois amplificateurs opérationnels.

$$G_c(p) = \frac{U(p)}{\varepsilon(p)} = \frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{R_1 C_i p} = K_p + \frac{K_i}{p} \quad (\text{II.8})$$

Avec

$$K_p = R_2/R_1 \text{ et } K_i = 1/R_1C_i$$

Pour ce circuit, K_p et K_i peuvent être réglés séparément. Cependant, pour un tel circuit, K_i est inversement proportionnel à la valeur du condensateur. Malheureusement, en général, les correcteurs PI exigent de faibles valeurs de K_i . Cela conduit à de larges valeurs de C_i , ce qui n'est pas très pratique.

II.10.4 Schéma électronique du correcteur dérivé (D)

Le schéma électronique de ce correcteur en utilisant des circuits passifs et actifs est montré sur la figure suivante

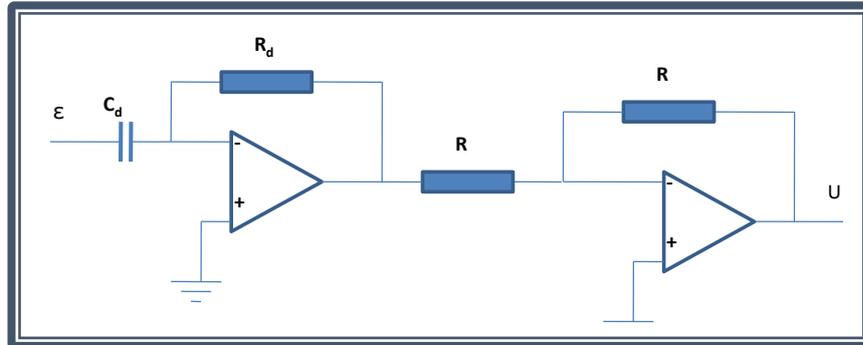


Figure II.16. Schéma électronique du correcteur D avec 2 amplificateurs opérationnels.

$$G_c(p) = \frac{U(p)}{\varepsilon(p)} = R_d C_d p = K_d p \quad (\text{II.9})$$

Avec

$$K_d = R_d C_d$$

Le circuit de la figure II.16 utilise deux amplificateurs (le second servant d'inverseur avec un gain de valeur 1).

II.10.5 Schéma électronique du correcteur proportionnel et dérivée

Dans le premier schéma électronique de ce correcteur représenté par la figure II.17, on utilise des circuits passifs et actifs.

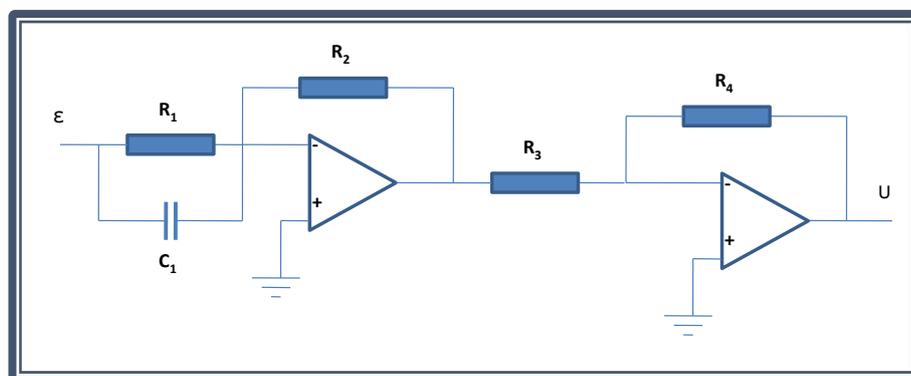


Figure II.17. Schéma électronique du correcteur PD avec deux amplificateurs opérationnels

$$G_c(p) = \frac{U(p)}{\varepsilon(p)} = \frac{R_2}{R_1} + R_2 C_1 p = K_p + K_d p \quad (\text{II.10})$$

Avec

$$K_p = R_2/R_1 \text{ et } K_d = R_2 C_1$$

L'avantage du circuit de la figure II.17 est qu'il n'utilise que deux amplificateurs (le second servant d'inverseur avec un gain de valeur 1). Cependant, ce circuit ne permet pas une sélection indépendante de K_p et K_d , puisque ceux-ci dépendent tous les deux de R_2 . D'autre part, une valeur importante de K_d exigerait une large valeur de C_1 , ce qui n'est pas très pratique.

Une deuxième réalisation, avec trois amplificateurs cette fois-ci, est celle de la figure 8.

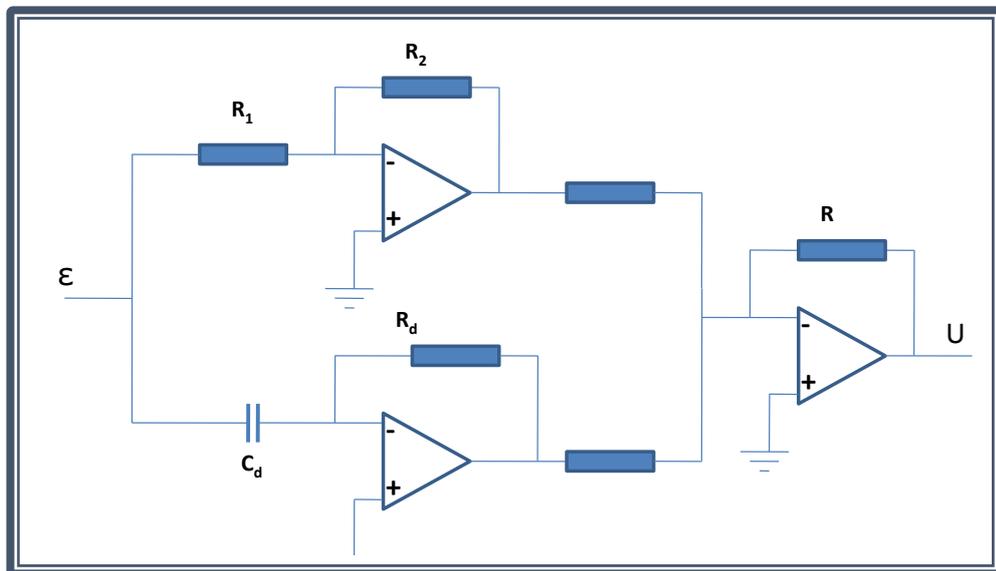


Figure II.18. Schéma électronique du correcteur PD avec trois amplificateurs opérationnels

$$G_c(p) = \frac{U(p)}{\varepsilon(p)} = \frac{R_2}{R_1} + R_d C_d p = K_p + K_d p \quad (\text{II.11})$$

Avec

$$K_p = R_2/R_1 \text{ et } K_d = R_d C_d$$

Pour ce circuit, K_p et K_d peuvent être réglés séparément. Les valeurs importantes de K_d sont obtenues en jouant sur R_d et en maintenant C_d dans des proportions raisonnables.

II.10.6. Schéma électronique du correcteur proportionnel, intégral et dérivée

Dans le schéma électronique de ce correcteur, en utilisant des circuits passifs et actifs, est illustré par la figure II.19.

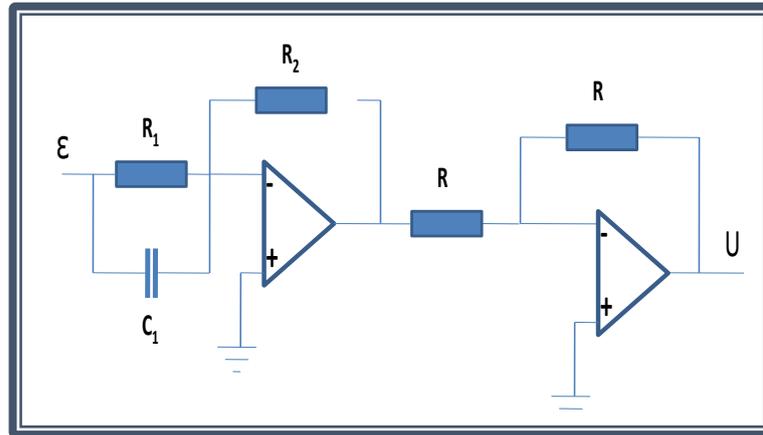


Figure II.19. Schéma électronique du correcteurs PID avec deux amplificateurs opérationnels

$$G_c(p) = \frac{U(p)}{\varepsilon(p)} = \frac{R_2 (1+R_1 C_1 p)(1+R_2 C_2 p)}{R_1 R_2 C_2 p} \quad (\text{II.12})$$

$$G_c(p) = \frac{U(p)}{\varepsilon(p)} = \left(\frac{R_2}{R_1} + \frac{C_1}{C_2} \right) + \frac{1}{R_1 C_2 p} + R_2 C_1 p = K_p + \frac{K_i}{p} + K_d p \quad (\text{II.13})$$

Avec

$$K_p = \left(\frac{R_2}{R_1} + \frac{C_1}{C_2} \right), K_i = \left(\frac{1}{R_1 C_1} \right) \text{ et } K_d = R_2 C_1 \quad (\text{II.14})$$

L'avantage du circuit de la figure II.19 est qu'il n'utilise que deux amplificateurs (le second servant d'inverseur avec un gain de valeur 1). Cependant, ce circuit ne permet pas une sélection indépendante de K_p , K_i et K_d .

Une deuxième réalisation, avec 3 amplificateurs cette fois-ci, est celle de la figure II.20.

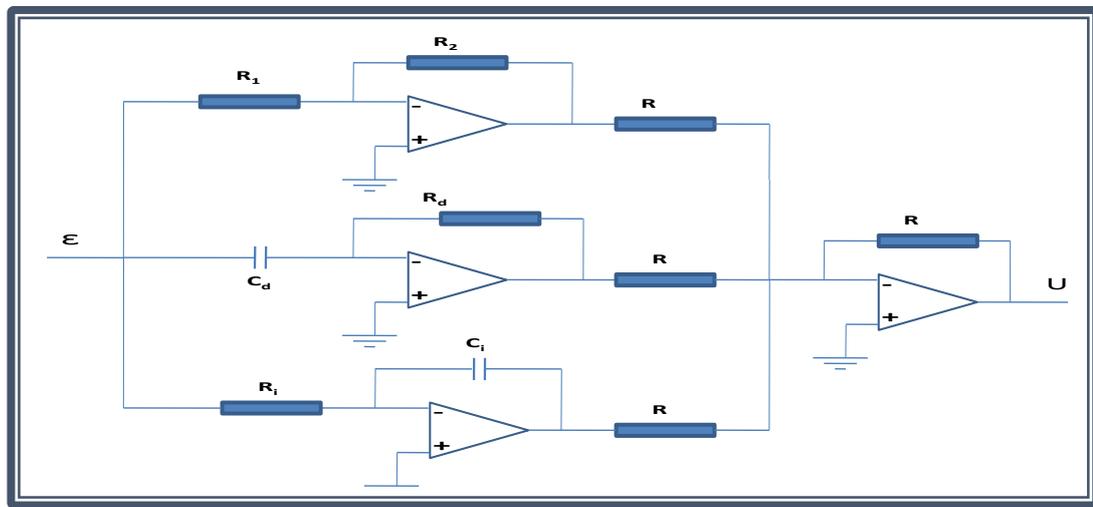


Figure II.20. Schéma électronique du correcteurs PID avec trois amplificateurs opérationnels

$$G_c(p) = \frac{U(p)}{\varepsilon(p)} = \frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{R_i C_i p} + R_d C_d p = K_P + \frac{1}{K_i p} + K_d p \quad (\text{II.15})$$

Avec

$$K_p = R_2/R_1, K_d = R_d C_d \text{ et } K_i = R_i C_i.$$

Pour ce circuit, K_p, K_i et K_d peuvent être réglés séparément.

- **Conseils généraux pour la conception d'un régulateur PID**

Pour obtenir une bonne régulation d'un système donné à travers le contrôleur PID en doit suivre

Les étapes indiquées ci-dessous :

- Obtenir une réponse en boucle ouverte et de déterminer ce qui doit être amélioré ;
- Ajoutez un contrôle proportionnel pour améliorer le temps de montée ;
- Ajoutez un contrôle dérivé d'améliorer le dépassement ;
- Ajouter une commande intégrale pour éliminer l'erreur de régime permanent ;
- Réglez chacun des K_p, K_i et K_d jusqu'à obtention d'une réponse globale souhaitée.

Enfin, gardez à l'esprit que vous n'avez pas besoin de mettre en œuvre tous les trois régulateurs (proportionnelle, dérivée et intégrale) dans un seul système, si ce n'est pas

nécessaire. Par exemple, si un régulateur *PI* ou *IP* donne une bonne réponse assez (comme dans l'exemple de la MCC), alors vous n'avez pas besoin de mettre en œuvre un régulateur dérivé sur le système. Gardez le contrôleur le plus simple possible.

II.10 Conclusion

La régulation est la technique utilisée pour contrôler une ou plusieurs grandeurs physiques d'un système telles que la vitesse, la position, etc., en vue d'en imposer le comportement et de maintenir ces grandeurs à des niveaux prédéfinies. On s'est intéressé à l'étude des actions du régulateur PID composé par les trois actions de base.

Chapitre III
Modélisation et simulation
D'un hacheur-MCC

III.1. Introduction

Un convertisseur statique est à base de semi-conducteurs de puissance permettant grâce à une commande convenable de ces derniers de régler le transfert d'énergie entre son d'entrée et une sa sortie, comme le montre la figure III.1.

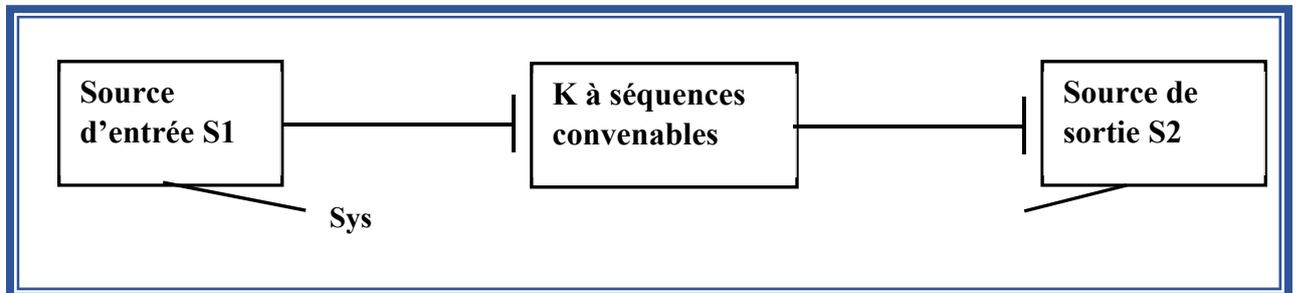


Figure III.1 Montage d'un convertisseur statique

La source d'entrée peut être un générateur ou un récepteur (idem pour la source de sortie). La synthèse des convertisseurs statiques repose sur les seuls éléments connus que sont les sources d'entrée et de sortie.[9]

- -conversion alternatif/alternatif (gradateur) ;
- -Conversion continu/ alternatif (l'onduleur) ;
- -Conversion alternatif/continu (redresseur) ;
- -Conversion continu/ continu (hacheur) ;

Nous nous intéressons dans ce chapitre a la modélisation et la simulation d'un hacheur de puissance.

III.2 Définition des hacheurs

Un hacheur est un convertisseur statique continu – continu, qui convertit une tension continue fixe " U " (en provenance d'une alimentation) en une tension continue réglable V par un signal de commande variable " Ucomd " dit rapport cyclique [10].

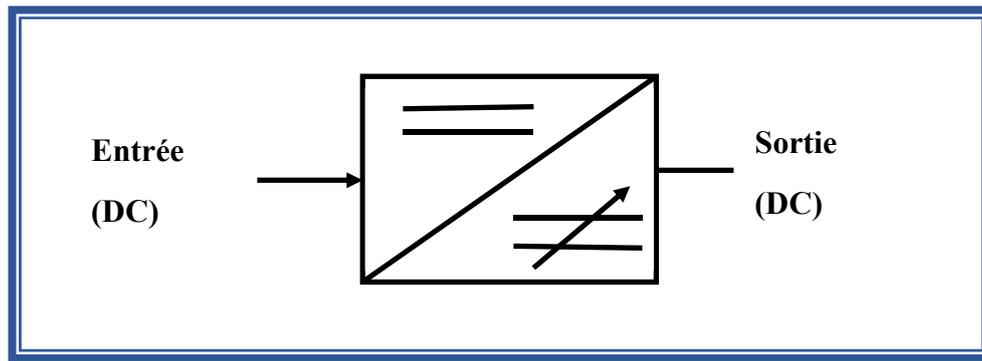


Figure III.2. Convertisseur Continu(DC)-Continu(DC).

La source de tension d'entrée peut être la sortie d'un réseau alternatif redressé et filtré, une batterie d'accumulateurs, une alimentation stabilisée, etc.

III.2.1 Critères de choix

Ces hacheurs sont utilisés pour faire varier la vitesse de rotation des moteurs à courant continu, les interrupteurs sont réalisés par des transistors bipolaires, transistors MOS, thyristor, triac, etc. Les critères de choix d'hacheur sont :

- Types des interrupteurs utilisés ;
- Mode d'utilisation selon l'application ;
- Technique de commande appliquée au MCC.

III.2.2 Hacheur série (abaisseur de tension)

A. Principe :

Le schéma de principe du hacheur série est donné par la figure (III.3). Le circuit est construit d'un interrupteur "I" à amorçage et blocage commandés (Thyristor avec circuit d'extinction, transistor bipolaire, transistors MOS ou IGBT...) et un interrupteur à blocage et amorçage spontanés (diode D). La charge est par exemple un moteur à courant continu.

Le cycle de fonctionnement, de période de hachage T ($T=1/f$) et de rapport cyclique (α compris entre 0 et 1), comporte deux étapes :

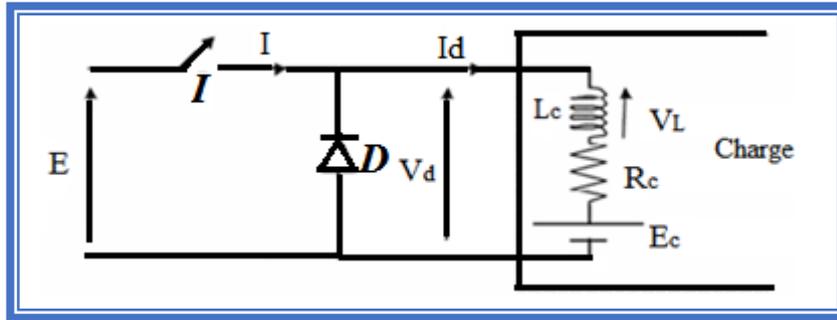


Figure III.3. Hacheur série

- De 0 à αT , "I" est passant et la diode est polarisée en inverse, donc bloquée, alors:

$$V_d(t) = E \quad (\text{III.1})$$

- De αT à T , "I" est ouvert. On a alors : $I=0$ et le courant I_d circule à travers la diode D

Donc :

$$V_d(t) = 0 \quad (\text{III.2})$$

Tant que la diode D conduit, soit tant que le courant $I_d(t)$ est non nul.

A l'ouverture de I , il n'y aura pas d'étincelle puisque le courant imposé par la bobine pourra passer par la diode de roue libre (D), car elle est active lorsque la charge n'est pas alimentée. Elle est nécessaire pour un bon fonctionnement du montage.

B. Effet de l'inductance sur la forme d'ondes :

On distingue deux types de fonctionnement selon la valeur de l'inductance L que le courant $I_d(t)$ est ininterrompu ou interrompu.

1. Fonctionnement à courant dans la charge ininterrompu (conduction continue)

La valeur moyenne de $V_d(t)$ vaut :

$$V_{d0} = \int_0^{\alpha T} E dt = \alpha E \quad (\text{III.3})$$

La f.é.m. (E_c) de la charge et la valeur moyenne I_{d0} du courant $I_d(t)$ sont liés par :

$$V_{d0} = E_c + R_c I_{d0} \quad (\text{III.4})$$

- Si la charge est une batterie (E_c est imposée par la charge), cette relation définit I_{d0} .
- Si la charge est un moteur à courant continu, cette relation fixe E_c (et donc la vitesse du moteur car $E_c = K\omega_r$ (ω_r en rad/s)), sachant que " I_{d0} " dépend du moment du couple du moteur ($C = K I_{ind}$ si l'on néglige les pertes mécaniques et les pertes par hystérésis et courants de Foucault).

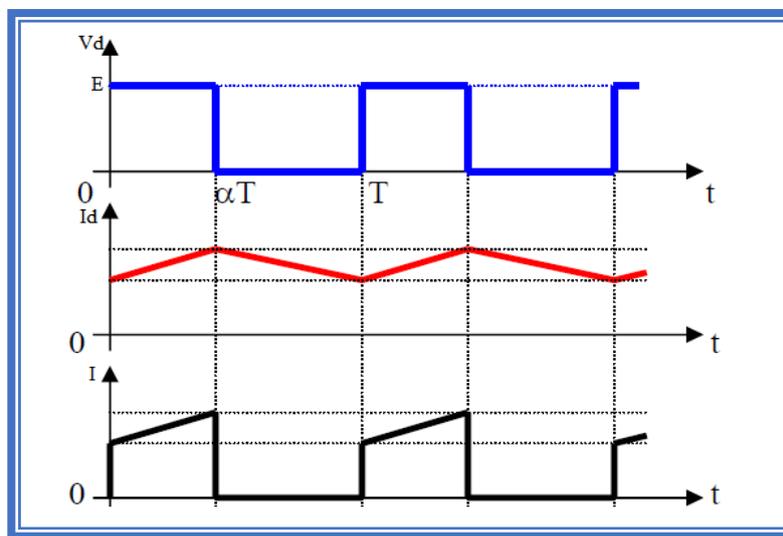


Figure III.4. Hacheur série (Fonctionnement à courant ininterrompu dans la charge)

2 Fonctionnement à courant dans la charge interrompu (conduction discontinue)

Lorsque l'interrupteur s'ouvre, à $t = \alpha T$ le courant $I_d(t)$ décroît. Si la constante de temps $\tau = \frac{L_c}{R_c}$ est suffisamment faible devant T , ce courant s'annule avant que l'interrupteur ne redevienne passant à $t = T$.

En considérant que le courant $I_d(t)$ est nul entre l'intervalle $[\beta T, T]$ (voir la figure III.5), la valeur moyenne de $V_d(t)$ vaut alors :

$$V_{d0} = \frac{1}{T} \left\{ \int_0^{\alpha T} E dt + \int_{\beta T}^T E_c dt \right\} = \alpha E + (1 - \beta) E_c \quad (\text{III.6})$$

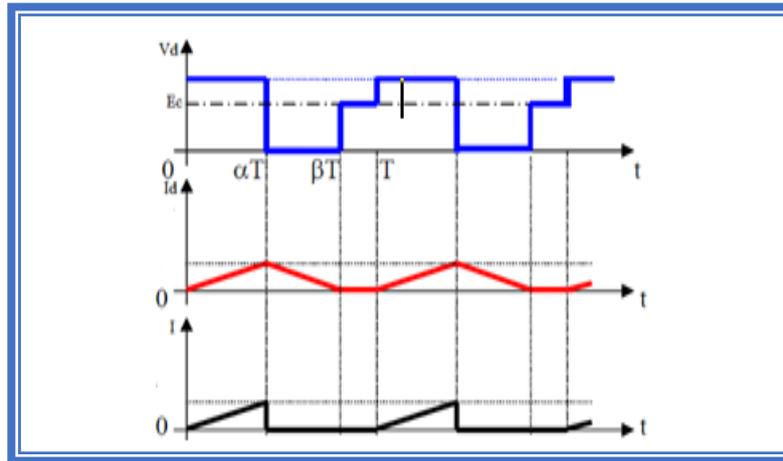


Figure III.5. Fonctionnement à courant interrompu dans la charge

Dans les deux cas de fonctionnement, on voit que la valeur moyenne V_{d0} de la tension disponible aux bornes de la charge est en fonction du rapport cyclique (α). On réglera la valeur de V_{d0} en modifiant le rapport cyclique (α):

- Soit en modifiant la durée de conduction de l'interrupteur " T " sans modifier la période " T " de commande (Modulation de Largeur d'Impulsion, MLI) ;
- Soit en modifiant la fréquence de commande ($f = \frac{1}{T}$) sans modifier la durée de conduction de l'interrupteur.

La première solution, est de loin la plus utilisée en pratique car elle permet un filtrage aisé de la tension $V_d(t)$ par un filtre passe-bas comme le décrit la figure (III.6). Ce filtre passe-bas permet d'éliminer les harmoniques élevés de $V_d(t)$.

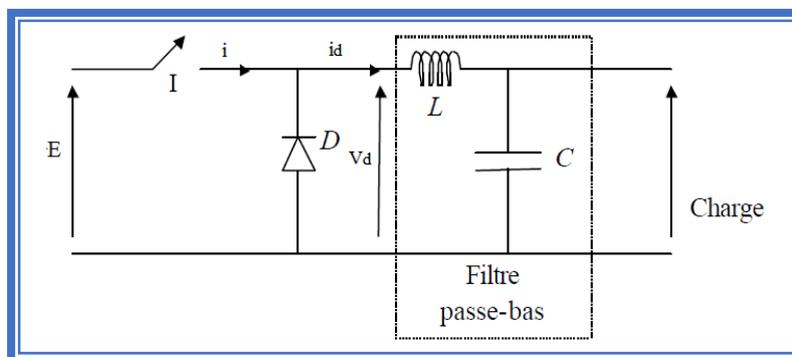


Figure III.6. Hacheur série avec filtre passe-bas

III.2.3 Hacheur parallèle (élevateur de tension)

A. Principe :

Le hacheur parallèle est aussi appelé hacheur survolteur permet de fournir une tension de sortie dont la valeur moyenne est supérieure à celle de la tension d'entrée.

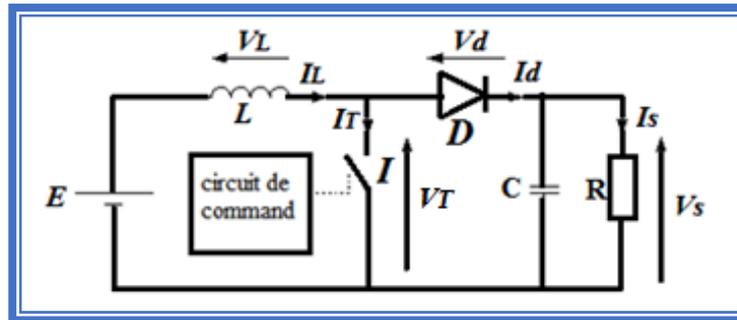


Figure III.6. Hacheur parallèle

Les applications principales du hacheur parallèle sont les alimentations de puissance régulées et le freinage par récupération des moteurs à courant continu.

D'après la figure (III.6) On distingue 2 phases de fonctionnement :

- Durant l'intervalle $[0 \alpha T]$ l'interrupteur commandé "I" est fermé et la diode D bloquée. Seule l'inductance L se trouve connectée à la source ; elle emmagasine alors une certaine énergie sous forme de courant.
- Pendant l'intervalle $[\alpha T T]$, l'interrupteur est bloqué. L'énergie emmagasinée sera restituée à la charge via la diode D. La tension visible en sortie sera $V_s = E - V_L$ dépassant de loin la valeur E.

B. Effet de l'inductance sur la forme d'ondes :

On distingue deux types de fonctionnement selon la valeur de l'inductance L que le courant $I_d(t)$ est ininterrompu ou interrompu.

- **Fonctionnement à courant dans la charge interrompu (conduction continue)**
- Pour $0 < t < \alpha T$, l'interrupteur I est fermé et l'intensité $I_L(t)$ croît linéairement :

$$E = L \frac{dI_L}{dt} \Rightarrow I_L(t) = \frac{1}{L} \int E dt = \frac{E}{L} t + I_L(0) \quad (\text{III.7})$$

On a : $V_T = 0; I_d = 0; V_L = E$

- Pour $\alpha T < t < T$, l'interrupteur I est ouvert, l'inductance L se démagnétise et le courant $I_L(t)$

Décroît :

$$E = L \frac{dI_L}{dt} + V_s \Rightarrow I_L(t) = \frac{E - V_s}{L} (t - \alpha T) + I_L(\alpha T) \quad (\text{III.8})$$

Avec :

$$I_L(\alpha T) = \frac{E}{L} \alpha T + I_L(0) \quad (\text{III.9})$$

Et : $E < V_s$ car $I_L(t)$ doit décroître.

On a:

$$V_T = V_s; I_d = I_L; V_L = E - V_s \quad (\text{III.10})$$

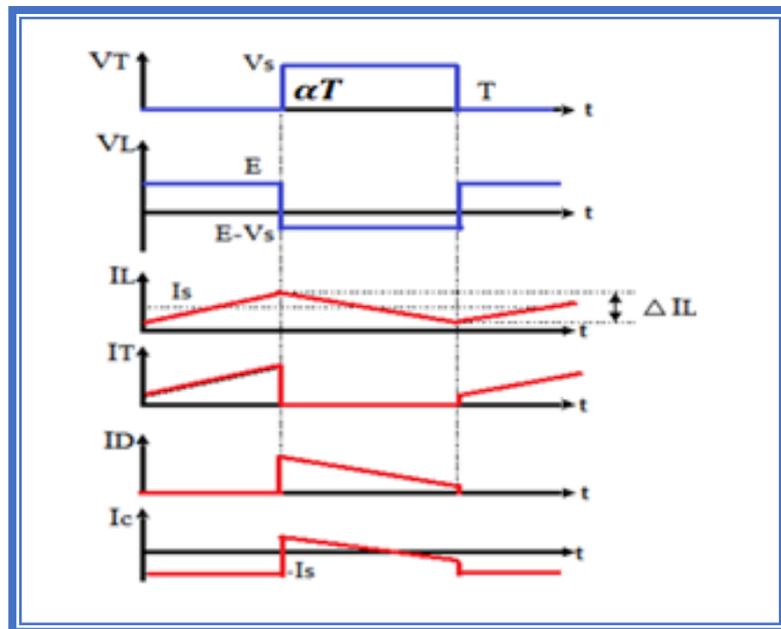


Figure III.7. Fonctionnement à courant ininterrompu dans la charge

- **Fonctionnement à courant interrompu dans la charge interrompu (conduction discontinue)**

Lorsque le courant dans l'inductance s'annule, la tension à ses bornes s'annule aussi. La diode est forcée à se bloquer et seul le condensateur (C) alimente la charge. Cette situation ne doit pas durer longtemps puisque le condensateur (C) ne sera pas capable d'assurer le courant demandé par la charge.

Puisque $V_{Tmoy} = E$ on pourra écrire :

$$E = V_s(\alpha E - \alpha) + E(1 - \alpha E) \quad (\text{III.11})$$

Il vient alors que :

$$V_s = \frac{E}{1 - \alpha/\alpha E} \quad (\text{III.12})$$

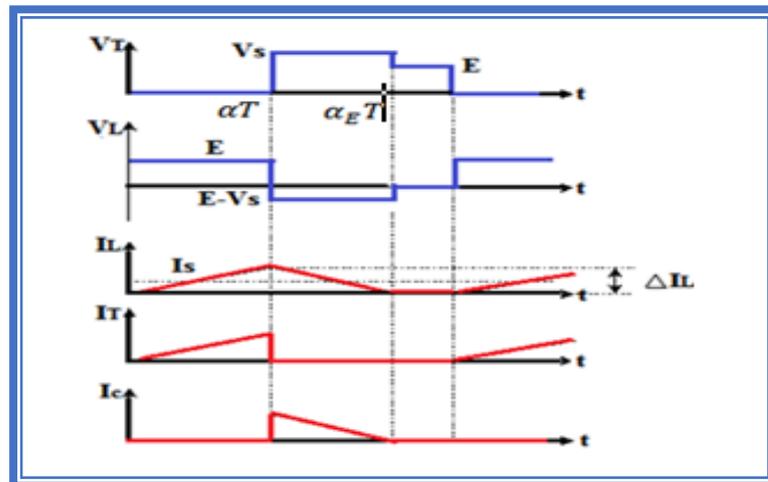


Figure III.8. Fonctionnement à courant interrompu dans la charge

III.2.4 Différents types d'hacheur et leurs applications [11]

Tableau III.1. Différents types d'hacheur		
Type d'hacheur	Objectif et Application	Schéma
Hacheur série (Abaisseur de tension)	Son objectif est de transformer une tension continue fixe en une tension continue variable permettant de constituer un variateur de vitesse par variation de la tension d'induit.	
Hacheur parallèle (Élévateur de tension)	Son objectif est de permettre, lorsque la machine fonctionne en génératrice, une récupération énergétique dans la source continue alors que la f.é.m. de la génératrice E est inférieure à U .	
Hacheur réversible	Le hacheur réversible est constitué par un hacheur série (la diode D_2 et de l'interrupteur I_1) et un hacheur (la diode D_1 et de l'interrupteur I_2). Son objectif est de permettre, lorsque la machine fonctionne en moteur lorsqu'elle est alimentée par le hacheur série ou en génératrice La machine fonctionne en génératrice (phase de freinage) et alimente la source E lorsque le hacheur parallèle est utilisé	
Hacheur à quatre quadrants sans inversion de flux	Ce montage à quatre interrupteurs T et quatre diodes D est le préféré des industriels, par exemple dans la machine-outil, en commande numérique, pour faire la chasse aux temps morts, entre deux opérations d'usage, par des accélérations et des freinages très importants	

III.3 Simulation du hacheur dans l'environnement Matlab/Simulink

Dans les hacheurs, la tension de sortie doit en règle générale être régulée pour être constamment égale à une tension fixée, compte-tenu du fait que la tension d'alimentation E et les caractéristiques de la charge peuvent varier.

On considère le hacheur série qui voit la valeur moyenne de tension en sortie V_s donnée par $V_s = \alpha E$. Une méthode pour réguler la tension de sortie consiste à ajuster en permanence le rapport cyclique de commande de l'interrupteur $\alpha = \frac{T_{ON}}{T}$ sans modifier T .

Cette méthode qui consiste à faire varier la largeur des impulsions de commande de l'interrupteur est appelée méthode de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) ou encore PWM pour «Pulse Width Modulation».

Le signal de contrôle de l'interrupteur V_{ctrl} devra être élaboré par comparaison entre la tension de la porteuses disponible V_p et la tension de référence V_r .

La tension d'écart V_{diff} :

$$V_{diff} = V_r - V_p \quad (III.13)$$

Sera ensuite comparée à une tension en dent de scie V_p de période T afin de générer la tension de commande de l'interrupteur V_{ctrl} comme la montre la figure (III.9):

- ❖ Lorsque $V_{diff} > V_p$, l'interrupteur I est commandé à la fermeture (état ON).
- ❖ Lorsque $V_{diff} < V_p$: $V_{ctrl} = 0$, l'interrupteur I est commandé à l'ouverture (état OFF).

On voit clairement que si la tension différentielle V_{diff} augmente (V_p diminue), le rapport cyclique augmente également.

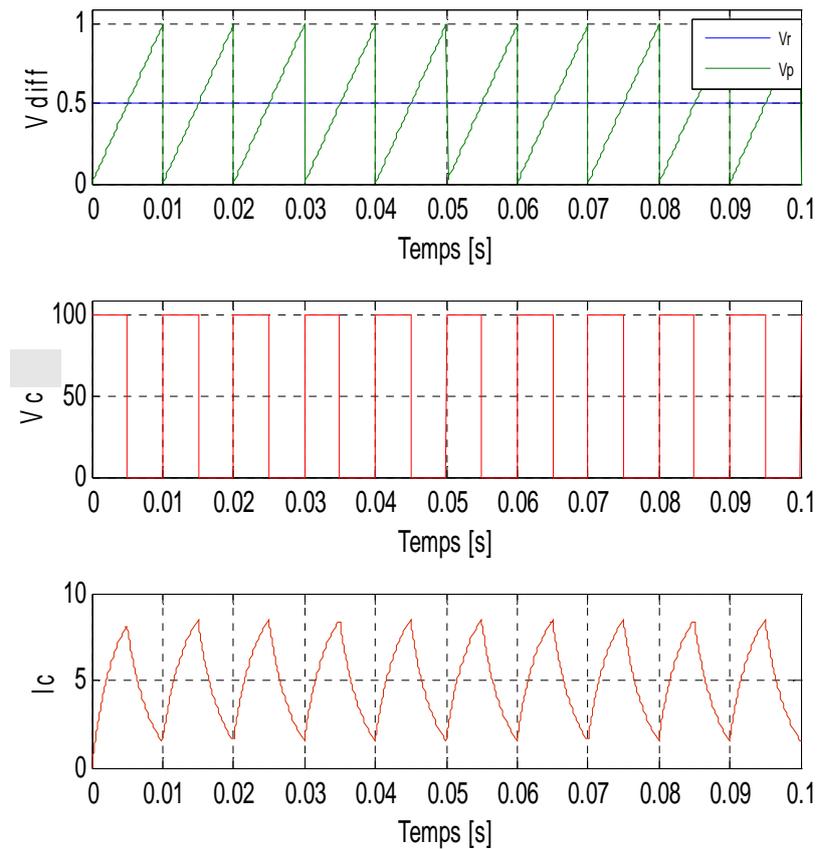


Figure III.9. Résultat de simulation du hacheur

- **L'effet de l'inductance et du rapport cyclique(α) sur le courant de la charge**

D'après les résultats ci-dessus on peut dire que la valeur l'inductance et du rapport cyclique (α) ont des effets sur le temps de charge et de décharge et sur la forme d'onde.

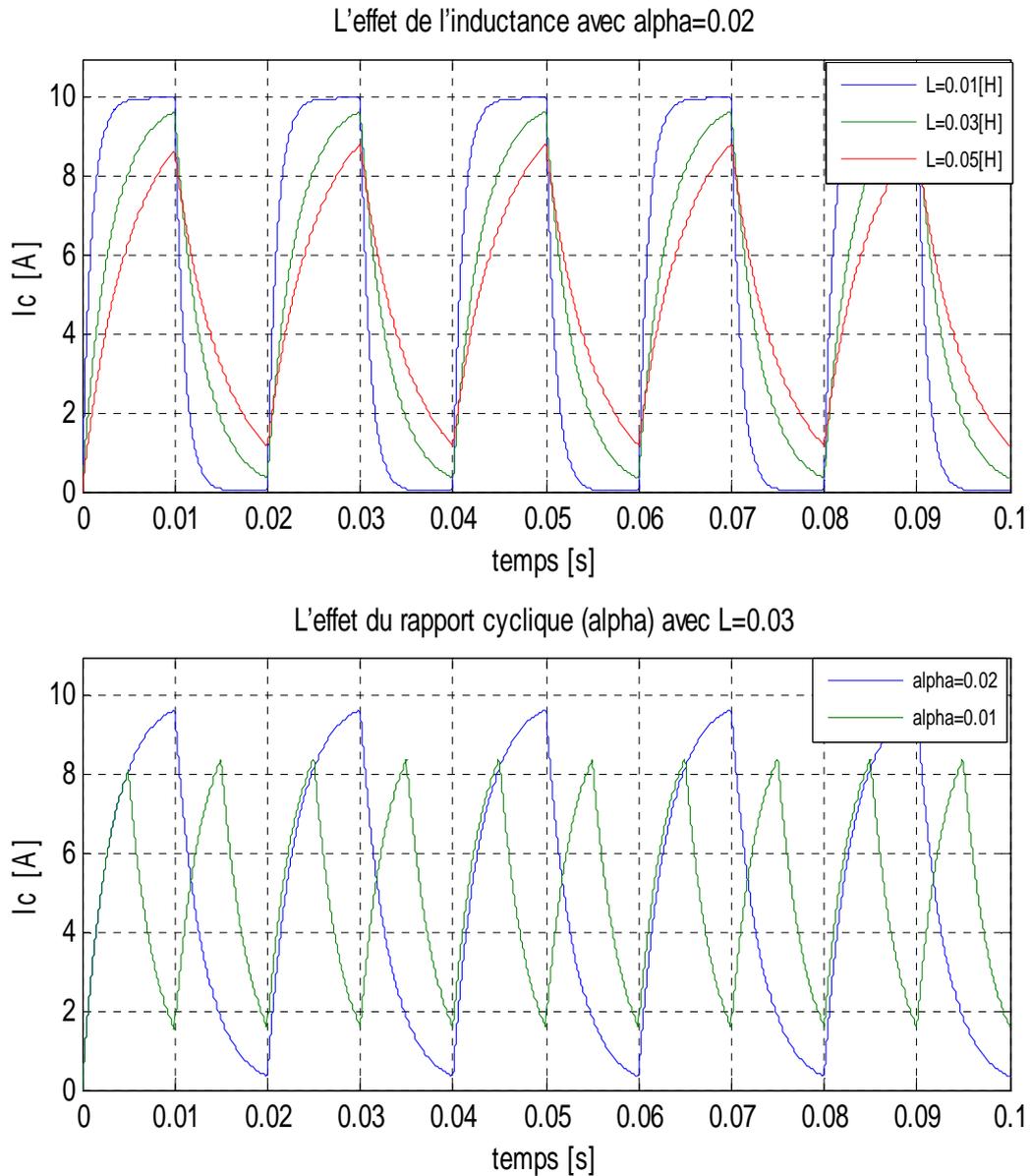


Figure III.10. Les effets de l'inductance et du rapport cyclique α sur le courant de la charge

III.3 Conclusion

Le principal avantage de moteur à courant continu réside dans le fait qu'ils se prêtent facilement à un contrôle souple continu et presque instantané de leur vitesse.

La simulation du modèle mathématique du moteur à courant continu à excitation séparé, permet d'obtenir les différentes caractéristiques statiques et dynamiques de ce moteur.

La simulation du modèle d'hacheur, permet d'obtenir l'allure des grandeurs électrique (U, I), ainsi que l'effet du rapport cyclique et de l'inductance sur ces grandeurs.

Chapitre IV

Réglage de vitesse de la MCC

IV.1 Introduction

Dans la plupart des processus industriels, en particulier les moteurs électriques, il est indispensable de maîtriser certains paramètres physiques (vitesse, position, angle...etc.), il est donc très souvent nécessaire d'avoir recours à une commande. La commande Proportionnelle-Intégrale (PI) est une méthode qui a fait ses preuves et qui donne de bons résultats grâce à l'action proportionnelle qui améliore la rapidité, l'intégrale pour la précision.

IV.2 Synthèse des régulateurs *PI* et *IP*

IV.2.1 Structure de la commande *PI*

Chaque boucle de régulation est dotée d'un régulateur proportionnel intégral *PI* classique, présenté sur la figure (IV.1), il comporte une action proportionnelle qui sert à régler la rapidité avec laquelle la régulation doit avoir lieu et une action intégrale qui sert à éliminer l'erreur statique entre la grandeur régulée et sa propre consigne [12].

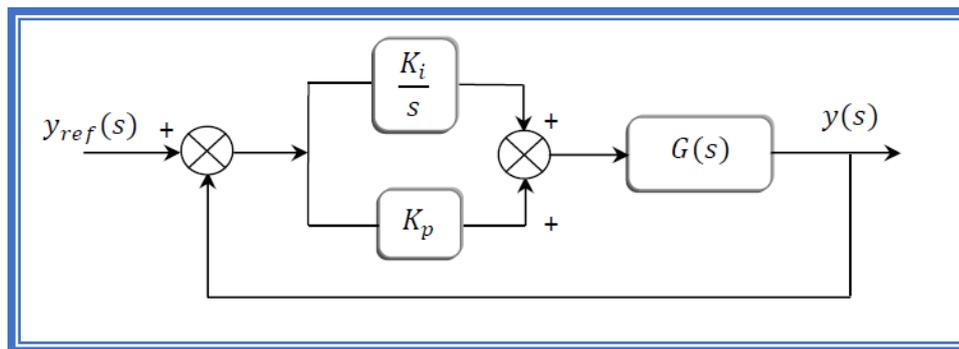


Figure IV.1. Schéma de commande utilisant la structure PI

Soit $G(s)$ un système de premier ordre peut être donné par une des fonctions suivant :

$$\begin{cases} G(s) = \frac{G_1}{s+\tau_1} \\ G(s) = \frac{G_0}{1+\tau s} \end{cases} \quad (\text{IV.1})$$

Avec

$$\tau_1 = 1/\tau$$

On considère deux méthodes pour déterminer les paramètres K_p et K_i du régulateurs *PI* :

IV.2.2 la méthode de placement des pôles [13]

La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$F(s) = \frac{G_1 K_p s + G_0 K_i}{s^2 + (\tau_1 + G_1 K_p)s + G_1 K_i} \quad (\text{IV.2})$$

Le calcul des paramètres K_p et K_i ne peut être fait que par la méthode de placement des pôles.

La fonction de transfert en boucle fermée, peut être mise sous la forme de celle d'un modèle de second ordre standard de l'équation suivante :

$$H(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\varepsilon\omega_n s + \omega_n^2} \quad (\text{IV.3})$$

A partir de l'équation caractéristique, on impose les pôles du système en boucle fermée de sorte que le système soit sous-amorti ($0.7 \leq \varepsilon < 1$),

Les pôles de $H(s)$ sont :

$$\begin{cases} s_1 = \omega_n(-\varepsilon + j\sqrt{1-\varepsilon^2}) = -\frac{1}{\tau_p} + j\omega_a \\ s_1 = \omega_n(-\varepsilon - j\sqrt{1-\varepsilon^2}) = -\frac{1}{\tau_p} - j\omega_a \end{cases} \quad (\text{IV.4})$$

Ou :

$$\tau_p = \frac{1}{\omega_n} \text{ et } \omega_a = \omega_n \sqrt{1-\varepsilon^2}$$

La réponse transitoire est alors donnée par l'oscillation de pseudo-période $\frac{2\pi}{\omega_a}$ amortie par une exponentielle de constante de temps.

$$\begin{cases} \tau_1 + G_1 K_p = 2\varepsilon\omega_n \\ G_1 K_i = \omega_n^2 \end{cases}$$

Les paramètres du régulateur sont alors donnés par :

$$\begin{cases} K_p = \frac{2\varepsilon\omega_n - \tau_1}{G_1} \\ K_i = \frac{\omega_n^2}{G_1} \end{cases} \quad (\text{IV.5})$$

IV.2.3 la méthode de compensation des pôles

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 et 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 et une constante du temps τ_{bf} répondant aux objectifs fixés.

La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$F(s) = \frac{G_0 K_i \left(\frac{K_p}{K_i} s + 1 \right)}{(\tau s + 1) \left(s + \left(K_p s + K_i \right) \frac{G_0}{\tau s + 1} \right)} \quad (\text{IV.6})$$

D'où,

$$\begin{cases} \left(\frac{K_p}{K_i} s + 1 \right) = (\tau s + 1) \Rightarrow \tau = \frac{K_p}{K_i} \\ F(s) = \frac{G_0 K_i}{s + G_0 K_i} \Rightarrow \tau_{bf} = \frac{1}{G_0 K_i} \end{cases} \quad (\text{IV.7})$$

Les paramètres du régulateur sont alors donnés par :

$$\begin{cases} K_p = \frac{1}{G_0 \tau_{bf}} \\ K_i = \frac{\tau}{G_0 \tau_{bf}} \end{cases} \quad (\text{IV.8})$$

IV.2.4 Structure de commande *IP*

La commande des machines électriques à l'aide des régulateurs *PI* dimensionnés par les méthodes de compensation des pôles ou de placement des pôles, présente les inconvénients suivants :

- La méthode de placement des pôles permet d'imposer n'importe quelle dynamique à la boucle fermée, néanmoins elle présente l'inconvénient d'introduire un zéro (non contrôlable) qui peut modifier la dynamique imposée.
- La méthode de compensation des pôles permet de remédier à ce problème, mais elle ne permet d'imposer qu'une dynamique du premier ordre, de plus le comportement de la régulation vis-à-vis du couple résistant est médiocre, car la dynamique du rejet du couple résistant n'est pas imposée par le régulateur. La structure de commande *IP* permet de remédier à tous ces inconvénients.

La structure du régulateur Intégral proportionnelle *IP* est schématisée par la figure IV.2, est une association d'une boucle interne munie du régulateur proportionnel et d'une boucle externe commandée par un régulateur intégrateur.

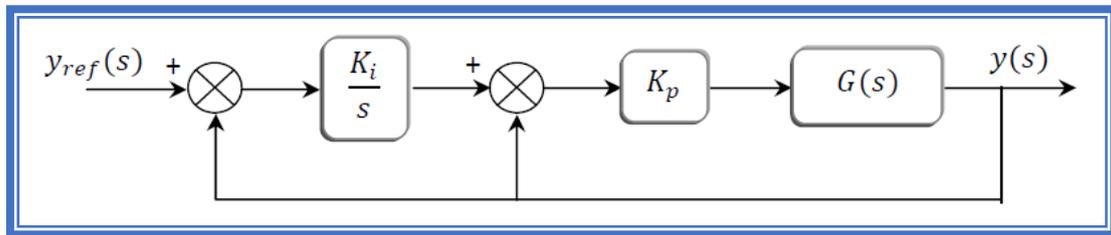


Figure IV.2. Schéma de commande utilisant la structure IP

Lorsque $G(s)$ est du premier ordre, la fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$F(s) = \frac{K_i K_p G_0 / \tau}{s^2 + \left(\frac{1 + K_p G_0}{\tau}\right)s + \left(\frac{K_i K_p G_0}{\tau}\right)} \quad (IV. 9)$$

L'application de la méthode de placement des pôles permet de calculer des paramètres K_p et K_i .

La fonction de transfert en boucle fermée, peut être mise sous la forme de celle d'un modèle de second ordre standard de l'équation IV.4, on trouve.

$$\begin{cases} \frac{1 + K_p G_0}{\tau} = 2\varepsilon\omega_n \\ \frac{K_i K_p G_0}{\tau} = \omega_n^2 \end{cases}$$

Les coefficients du régulateur sont alors calculés par les relations :

$$\begin{cases} K_p = \frac{2\varepsilon\omega_n\tau - 1}{G_0} \\ K_i = \frac{\omega_n^2\tau}{2\varepsilon\omega_n\tau - 1} \end{cases} \quad (IV. 10)$$

Dans la section suivante nous allons voir les avantages qu'apporte un régulateur de type *IP* par rapport au régulateur de type *PI* appliqués à des systèmes de premier ordre, en choisissons le modèle de la machine à excitation sépare qui est étudiée dans chapitre précédent. Afin de tester et comparer ces deux régulateurs associés à la machine à courant continu, nous allons les soumettre aux mêmes conditions de fonctionnement.

IV.2.5 Dimensionnement des régulateurs et simulations

A. Régulation de vitesse

Puisque les boucles de courant sont contrôlées à l'aide de régulateurs contenant la fonction d'intégration, alors la valeur finale des courants est égale à celle de référence imposée, par les régulateurs de vitesse. De plus, la dynamique des courants est très faible comparée à celle de la vitesse. Par conséquent, pour calculer le régulateur de vitesse on peut négliger la dynamique de la boucle interne de courant.

Dans ce cas, à partir des équations (IV.9) et (IV.10) en supposant que le couple résistant est nul donc la fonction de transfert qui décrit la dynamique de la vitesse est donnée par :

$$G_{\omega_r}(s) = \frac{\omega_r(s)}{I(s)} = \frac{K/J}{s+f/J} = \frac{K/f}{1+(J/f)s} \quad (\text{IV.11})$$

Avec

$$\begin{cases} G_{\omega_r} = \frac{K}{f} \\ \tau_{\omega_r} = \frac{J}{f} \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} G_{\omega_r} = \frac{K}{J} \\ \tau_{1\omega_r} = \frac{f}{J} \end{cases}$$

Régulateur IP, sont montrées par la figure IV.3. On remarque, celle a bouclé ouverte et celles en boucle fermées pour un PI et IP.

On note que la réponse à boucle fermé avec un PI présente un dépassement mais elle est plus rapide. Par contre la réponse à boucle fermée avec un IP, ne présente pas de dépassement et elle est plus au moins lente.

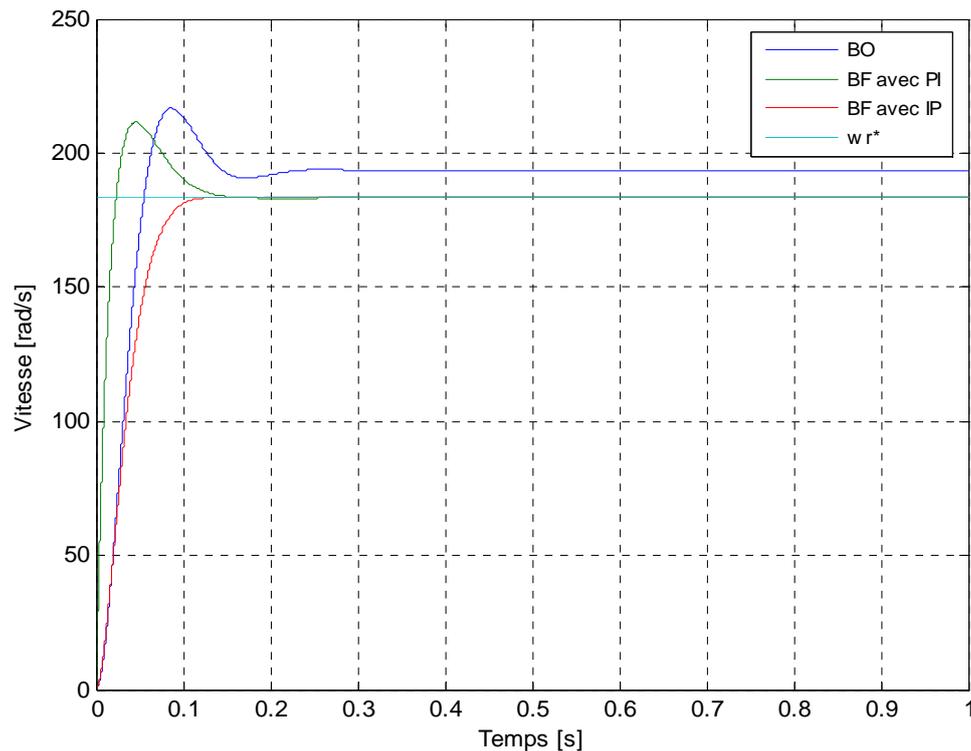


Figure IV.3. Résultat de simulation de la Boucle de vitesse

B. Régulation de courant

En supposant que le couple résistant est nul ($C_r = 0$), on déduit la fonction de transfert de premier ordre, qui est utilisée pour calculer les régulateurs de courant, soit :

$$G_1(s) = \frac{\omega_r(s)}{U(s)} = \frac{1}{R(1+(L/R)s)} = \frac{G_{0I}}{1 + \tau_e s} \quad (\text{IV. 12})$$

IV.3 Commande de vitesse de la machine à courant continu alimenté par un hacheur

Un variateur de vitesse est un dispositif permettant de réaliser l'alimentation et la commande d'un moteur. Son schéma de principe est donné à la figure IV.4.

Il s'agit de faire tourner une charge mécanique à une vitesse donnée (sortie) conformément à la loi d'évolution d'une grandeur d'entrée (consigne) [14-16]. L'écart entre la consigne et la vitesse du moteur est pré amplifié et éventuellement écrêté avant d'attaquer l'amplificateur de puissance du moteur à courant continu et excitation constante.

La mesure de la vitesse est transformée en tension par une dynamo tachymétrie. La mesure du courant absorbé par le moteur est transformée en tension par un transformateur d'intensité.

La boucle secondaire de courant permet de limiter le courant dans le moteur pendant les phases transitoires et a un effet stabilisateur donc on peut dire que le courant est l'image du couple absorbé et par conséquent la variation de courant est l'image de la variation de vitesse.

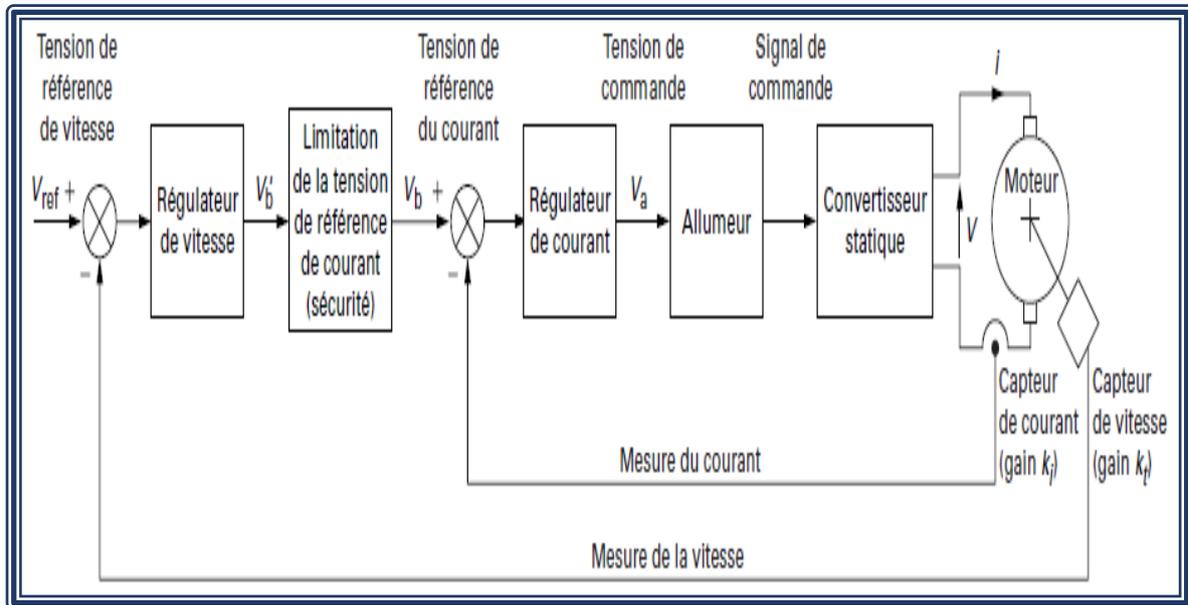


Figure IV.4. Structure d'un variateur de vitesse à régulations

IV.3.1 Simulation du variateur de vitesse à régulations en cascade

La figure IV.5 montre le résultat de simulation du courant pour un réglage PI et IP. On remarque que le courant d'induit pour le réglage IP répond d'une manière plus performante que celui du PI. Par ailleurs, la figure IV.6 présente les allures des couples électromagnétiques pour les mêmes conditions procédèrent.

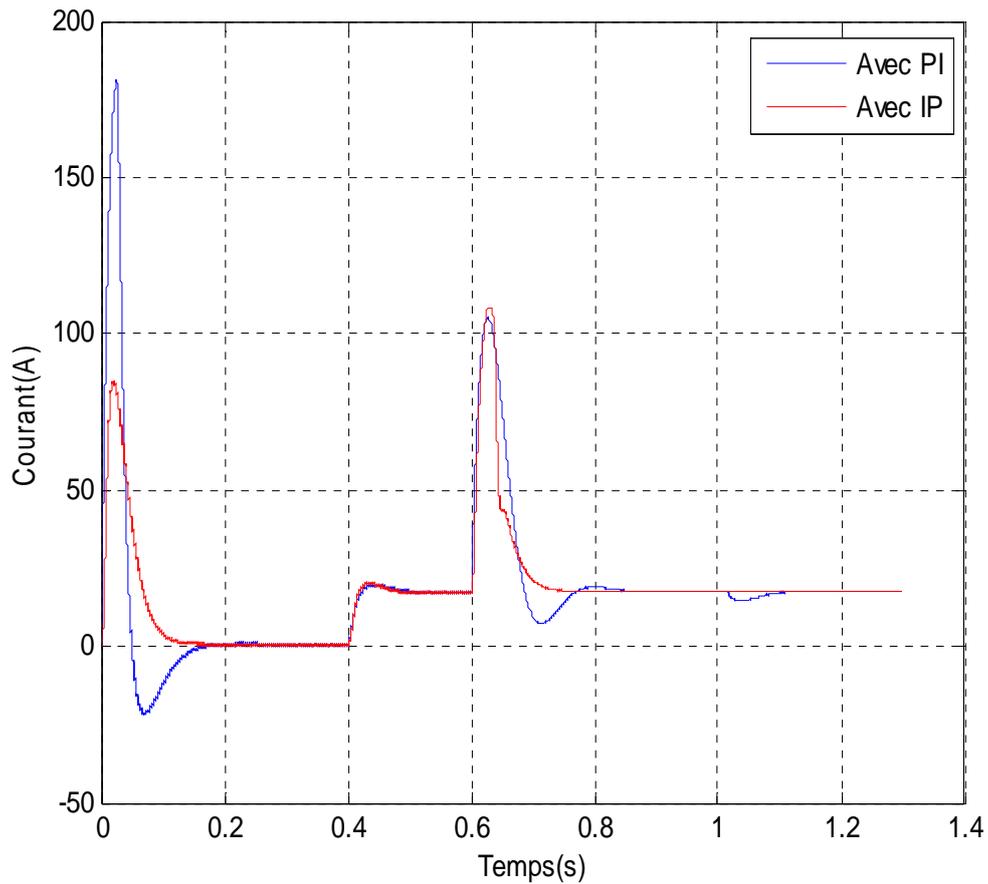


Figure IV.5. Résultat de simulation de courant

- Couple électromagnétique (C_e)

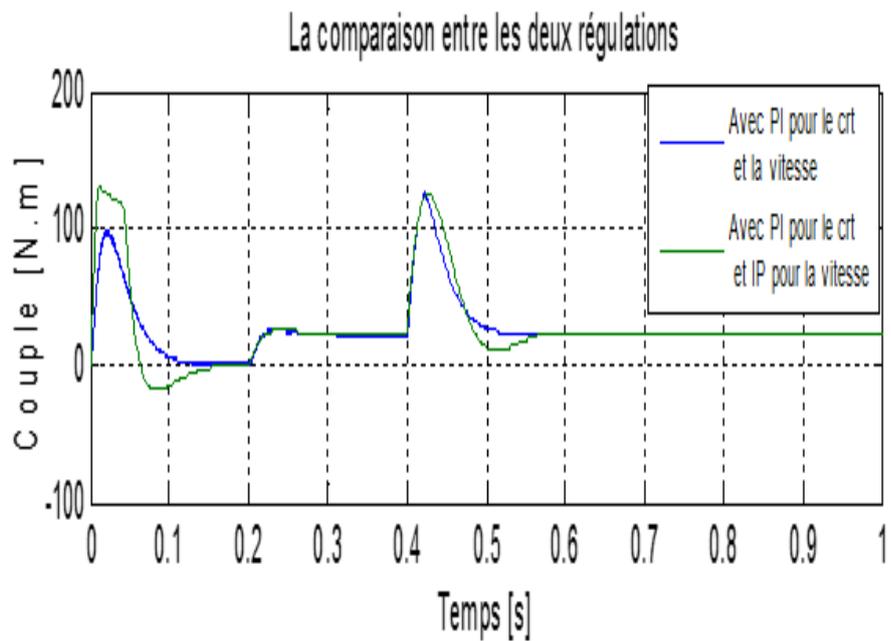


Figure IV.6. Résultat de simulation de couple

La figure VI.7 présente les réponses de vitesses et de couples pour une combinaison : régulateur de vitesse et du courant avec régulateur proportionnel Intégral et les mêmes réponses pour la boucle de vitesse et du courant avec régulateur Intégral Proportionnel. De même la figure IV.8 montre les allures vitesses et courant pour régulateur défini par la légende de la figure, soit ; PI (vitesse)- IP (courant) / IP (vitesse)- PI (courant).

D'après les résultats précédant on peut dire que la régulation en cascade à travers le régulateur *PI* pour la boucle de courant et le régulateur *IP* pour la boucle de vitesse est mieux adapte que la régulation en cascade avec le régulateur *PI* pour les deux boucles.

Pour cela on a choisi la régulation en cascade à travers le régulateur *PI* (boucle de courant) et le régulateur *IP* (boucle de vitesse) pour utiliser la commande de vitesse de la machine à courant continu alimenté par un hacheur.

- **Configuration : PI(vitesse)-PI(courant)/IP(vitesse)-IP(courant)**

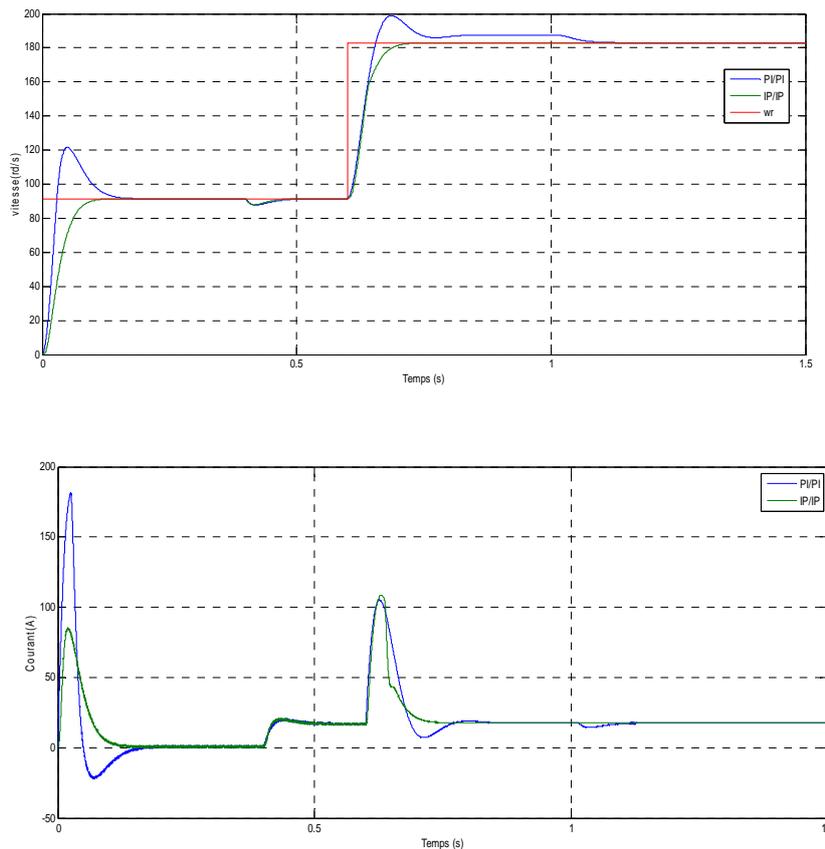


Figure IV.7. Résultat de simulation de vitesse

- Configuration : PI(vitesse)-IP(courant)/IP(vitesse)-PI(courant)

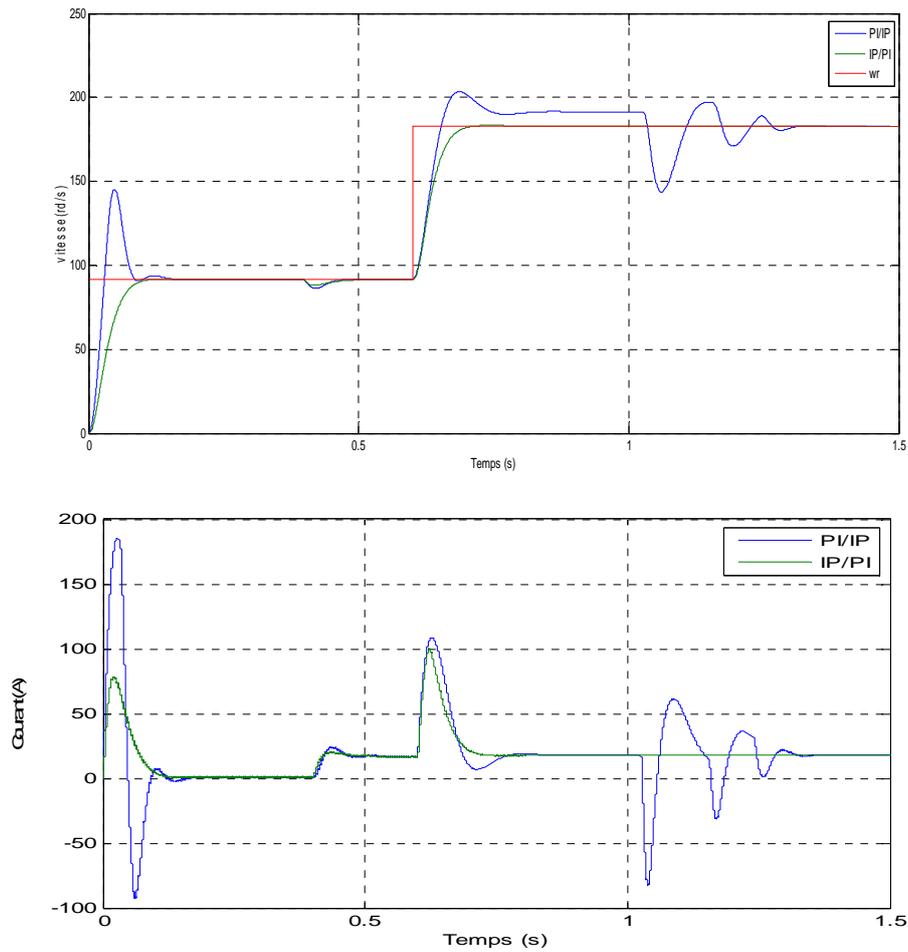


Figure IV8. Résultat de simulation de vitesse et courant.

IV.4 Conclusion

Nous avons appliqué deux types de régulateur (*PI*, *IP*), pour élaborer une commande du moteur à courant continu à base de régulateur classique, une comparaison entre les deux méthodes, a été établie dans l'environnement Matlab/Simulink, en vue de décider lequel est le plus approprié pour une association Hacheur-moteur à courant continu à excitation indépendant.

Conclusion générale

Le principal avantage de moteur à courant continu réside dans le fait qu'ils se prêtent facilement à un contrôle souple continu et presque instantané de leur vitesse. Grâce au développement des modèles en régimes statiques et dynamiques du moteur à courant continu à excitation séparé les différentes caractéristiques statiques et dynamiques de ce moteur ont été visualisées.

Pour un fonctionnement à vitesse variable l'utilisation d'un hacheur s'est avérée nécessaire. Dans ce cas les allures des grandeurs électriques (U , I), ainsi que l'effet du rapport cyclique et de l'inductance sur ces grandeurs ont été discutées.

La régulation est la technique utilisée pour contrôler une ou plusieurs grandeurs physiques d'un système telles que la vitesse, la position, etc., en vue d'en imposer le comportement et de maintenir ces grandeurs à des niveaux prédéfinies. On s'est intéressé à l'étude des actions du régulateur PID composé par les trois actions de base.

Dans la plupart des processus industriels, en particulier les moteurs électriques, il est indispensable de maîtriser certains paramètres physiques (vitesse, position, angle...etc.), il est donc très souvent nécessaire d'avoir recours à une commande. La commande Proportionnelle-Intégrale (PI) est une méthode qui a fait ses preuves et qui donne de bons résultats grâce à l'action proportionnelle qui améliore la rapidité, l'intégrale pour la précision

Nous avons appliqué deux types de régulateur (PI , IP), pour élaborer une commande du moteur à courant continu à base de régulateur classique, une comparaison entre les deux méthodes, a été établie dans l'environnement Matlab/Simulink, en vue de décider lequel est le plus approprié pour une association Hacheur-moteur à courant continu à excitation indépendant.

Références bibliographiques

- [1] GUY SYGUIER, ROBERT BOUSIER, FRANCIS LABRIQUE, « électronique de puissance-structure de base, principale application», 8^{ème} édition.
- [2] Résumé sur moteur à courant continu (document proposé sur le site « Sciences physiques en BTS » www.nicole.cortial.net).
- [3] Cour d'électrotechnique « sciences Industrielles pour l'ingénieur ».
- [4] Krinah Mohammed, 2013, « commande de vitesse de la machine courant continu. » Mémoire pour l'obtention de diplôme de Master 2 en électrotechnique, université Badji Mokhtar Annaba.
- [5] Philippe LEBRUN Machine à courant continu : technologie choix et alimentation des machines à courant continu.
- [6] Mohammed-Karim FELLAH, 2007, « Cours d'Asservissements Linéaires » Continus, Université Djillali Liabès – Sidi Bel-Abbès.
- [7] BEDOUD KHOULOU, 2010, « Modélisation et diagnostic de défaillance d'une électrovanne pneumatique », Magister, Université Badji Mokhtar-Annaba.
- [8] Henri Bourles, Hervé Guillard, 2012, commande des systèmes, Performance et robustesse, Ellipses.
- [9] A. Rufer ; P. Barrade, Cour d'électronique de puissance conversion DC/DC « Ecole polytechnique de France.
- [10] Yannick MOREL, 2006, « le hacheur série », <http://fisik.free.fr/ressources/hacheurserie.swf>.
- [11] V. Chollet, 2014, « Définition d'hacheur Mesure Physiques », <http://mpeea.free.fr/data/labview/COURS%20LabVIEW%202014.pdf>.
- [12] Emmanuel Gdoy, 2014, Régulation industrielle « Outils de modélisation, méthodes et architectures de commande », 2^{ème} EDITION.
- [13] K.J. A. ström, T. Hägglund, C.C. Hang, W.K. Ho, 1993, «AUTOMATIC TUNING AND ADAPTATION FOR PID CONTROLLERS - A SURVEY», Control Eng. Practice, Vol. 1, No. 4, pp. 699-714.
- [14] C.C. Hang, K.J. A. ström, T. Hägglund, W.K. Ho, 1992, 4th IFAC Symposium on Adaptive Systems in Control and Signal Processing, 1992 In Adaptive Systems in Control and Signal Processing.
- [15] Emmanuel Gdoy, 2014, Régulation industrielle « Outils de modélisation, méthodes et architectures de commande-2eme EDITION ».