République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي – تبسة
Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
معـــــــهد المـــــناجم
Institut des Mines
قسم المناجم والجيوتكنولوجيا
Département Mines Et Géo technologie

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière: Electromécanique

Option: Electromécanique

THEME

Etude et synthèse d'un contrôleur flou appliqué pour les Moteur courant continu

Par

Zouai Bouchra

Devant le jury:

Melkia Chaouki	**Président**	MCB	**Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa**
Zaamouche Fares	**Encadreur**	MCA	**Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa**
Fares Noureddine	**Examinateur**	MCB	**Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa**

Année universitaire 2024/2025


بسم الله الرحمن الرحيم



REMERCÎMENTS

Avant toute chose, je remercie du plus profond de mon cœur Allah,

Le Tout-Puissant, pour Sa miséricorde infinie, pour la force qu'Il m'a donnée face aux épreuves, et pour m'avoir guidée jusqu'à l'aboutissement de ce travail. Sans Sa lumière, rien n'aurait été possible. Je tiens à exprimer toute ma gratitude à mon père, pour sa confiance en moi, ses encouragements silencieux mais puissants, et pour m'avoir appris la valeur de l'effort et de la persévérance. À ma chère maman, merci pour ton amour inépuisable, tes prières du cœur, et ta tendresse rassurante. Ton soutien a été mon refuge et ma plus belle source de courage. À mon époux bien-aimé, merci pour ta patience, ton soutien indéfectible et ta foi en moi, même dans les moments de doute. Ton amour et ta présence à mes côtés ont été ma plus grande force tout au long de ce parcours. Ce travail porte aussi un peu de toi. À mes frères et sœurs, merci pour vos mots d'encouragement, vos gestes de soutien, et

Résumé

Les machines électriques jouent un rôle fondamental dans de nombreux domaines, en particulier dans l'industrie, où elles sont couramment intégrées dans des systèmes à vitesse variable. La maîtrise de leur vitesse de rotation est un facteur crucial pour assurer l'efficacité et la précision des procédés industriels. Ce travail s'intéresse à l'étude et à la simulation, à l'aide de MATLAB Simulink, de deux types de régulateurs appliqués à une machine à courant continu alimentée par un convertisseur DC-DC. L'objectif est d'évaluer et de comparer les performances dynamiques de la machine, en particulier sa vitesse de rotation, sous l'effet de chaque régulateur.

Abstract

Electric machines play a fundamental role in many fields, especially in industry, where they are commonly integrated into variable-speed systems. Controlling their rotational speed is a crucial factor in ensuring the efficiency and precision of industrial processes. This work focuses on the study and simulation, using MATLAB Simulink, of two types of controllers applied to a direct current (DC) machine powered by a DC-DC converter. The objective is to evaluate and compare the dynamic performance of the machine, particularly its rotational speed, under the influence of each controller.

TABLE DES MATIERES

Table des matières

CHAPITRE 1 3

Généralités et Modélisation sur les machines à courant continu 3

1.1. Introduction: 2

1.2. Description et définition d'une machine à courant continu 2

1.2.1 Definition: 2

1.3 Constitution: 2

1.3.1Inducteur (Stator): 2

1.3.2Induit (Rotor) : 2

1.3.3 Collecteur et balais: 2

1.4 Principe de fonctionnement: 3

1.5. Les différents types de moteur à courant continu : 4

1.5.1 Les moteurs bru shed (à balais) : 4

1.5.1.1 moteurs à excitation série : 4

1.5.1.2 moteurs à Excitation shunt: 5

1.5.1.3 Excitation compound (composé): 6

1.5.1.4 Moteur à Excitation indépendante (séparé) : 6

1.6. Bilan de puissance : 7

1.6.1 Bilan de puissance du moteur : 7

1.7. Avantages et inconvénients des moteurs à courant continu : 7

1.8 Modélisation 7

1.8.1 Equation de l'induit : 7

1.8.2. Equation du couple : 8

1.8.3 Equation Mécanique : 8

1.8.4. Fonction de transfert: 8

1.9 Convertisseur DC/DC 9

1.9.1les convertisseurs continu-continu : 9

1.9.2Convertisseur Buck : 10

1.9.3Boost convertisseur : 12

1.9.4Buck-Boost convertisseur : 14

Table des matières

1.10Conclusion: 16
CHAPITRE 2: Commande classique basée sur la régulation PID 17
2.1. Introduction : 18
2.2. Asservissement 18
2.3. Principe 18
2.3.1 Régulation en boucle ouverte 18
2.3.2 Commande en boucle férmee 19
2.4. Théorie de régulation par correcteurs P-I-D 19
2.4.1 Correcteur Proportionnel (P) 19
2.4.2 Correcteur Intégral (I) 20
2.4.3 Correcteur Dérivé (D) 20
2.4.4 Correcteur Proportionnel-Intégral (PI) 21
2.4.5 Correcteur Proportionnel dérivé (PD) 22
2.4.6 Commande Proportionnel-Intégral-Dérivé (PID) 22
2.5 Conclusion 23
CHAPITRE3: 24
Etude et synthése de la commande floue. 24
3.1 Introduction 25
3.2 Historique 25
3.3. D´efinition 26
3.3.1 Exemple introductif 26
3.4. Principe de la logique floue 27
3.4.1 Ensemble flou 27
3.4.2 Variables linguistiques 27
3.4.3 Univers du discours 28
3.4.4 Fonction d'appartenance 28
3.5 Opérateurs de la logique floue 28
3.5.1 Conjonction floue (Opérateur ET) 29
3.5.2 Disjonction floue (Opérateur OU) 29
3.5.3 Compl´ement (Opérateur NON) 29
3.6 Contrˆoleur floue 30
3.6.1 Base de connaissance 31

Table des matières

3.6.2 Interface de fuzzification 31
3.6.3 Bloc d'inférence 31
3.6.4 Interface de défuzzification 32
3.6.4.1 Méthode des maximums 32
3.6.4.2 Méthode de la moyenne des maximums 32
3.6.4.3 Method du centre de granite 32
3.6.4. Méthode des hauteur's pondéerées 33
3.7 Avantages et inconvénients de la régulation par logique floue 33
3.7.1 Avantages 33
3.7.2 Inconvénients 33
3.8. Conclusion 33
CHAPITRE 4: Simulation numérique par MATLAB. ..... **Erreur ! Signet non défini.**
4.1. Introduction 35
4.2. Description du système 35
4.3. Régulateur classique PID 36
4.4. Régulateur flou 38
4.5. Comparaison entre les deux régulateurs 40
4.6. Conclusion 41

Liste des figures

Liste des figures

FIGURE 1 CONSTITUTION DE LA MCC A `AIMENT PERMANENTS 2
FIGURE 2L'INDUCTEUR D'UN MCC 2
FIGURE 3 - L'INDUIT D'UN MCC 2
FIGURE 4 - COLLECTEUR ET BALAIS D'UN MCC 3
FIGURE 5 - PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA MCC 3
FIGURE 6-UN MCC A BALAIS FIGURE 7- COMPOSANTS DU MOTEUR A BALAIS 4
FIGURE 8 - SCHEMA ELECTRIQUE DU MCC A EXCITATION SERIE 4
FIGURE 9 - SCHEMA ELECTRIQUE DU MCC A EXCITATION SHUN 5
FIGURE 10 - SCHEMA ELECTRIQUE DU MCC A EXCITATION COMPOUND (COMPOSE) 6
FIGURE 11-SCHEMA ELECTRIQUE DU MCC A EXCITATION INDEPENDANTE (SEPARE) 6
FIGURE 12 -BILAN DE PUISSANCE EN MOTEUR 7
FIGURE 13 - SCH´EMA BLOC GLOBALE DU MCC `A AIMENT PERMANENT 9
FIGURE 14- LE SYMBOLE DU HACHEUR 10
FIGURE 15 : PRINCIPE GENERAL D'HACHEUR 10
FIGURE 16 -SCHEMA DU CONVERTISSEUR BUCK 10
FIGURE 17 - LES DEUX CONFIGURATIONS D'UN CONVERTISSEUR BUCK 11
FIGURE 18 - LES FORMES D'ONDES DANS UN CONVERTISSEUR BUCK 11
FIGURE 19 - SCHEMA DE PRINCIPE DU CONVERTISSEUR BOOST 12
FIGURE 20 - FORMES D'ONDE DES COURANTS ET TENSIONS DU CONVERTISSEUR BOOST 13
FIGURE 21- CIRCUIT EQUIVALENT DU BOOST QUAND K EST FERME 13
FIGURE 22 - CIRCUIT EQUIVALENT DU BOOST QUAND K EST OUVERT 14
FIGURE 23 - SCHEMA DE CONVERTISSEUR BUCK-BOOST 15
FIGURE 24 - LES DEUX CONFIGURATIONS D'UN CONVERTISSEUR BUCK-BOOST 15
FIGURE 25- LES FORMES D'ONDES DU CONVERTISSEUR BUCK-BOOST 15
FIGURE 26 - SCH`EMA BLOC DE LA BOUCLE OUVERTE 19
FIGURE 27- SCH`EMA BLOC DE LA BOUCLE FERM´EE 19
FIGURE 28 - SCH´EMA BLOC DU CORRECTEUR PROPORTIONNEL (P) 19
FIGURE 29 - SCH´EMA BLOC DU CORRECTEUR INTEGRAL (I) 20
FIGURE 30 - SCH´EMA BLOC DU CORRECTEUR D´ERIV´E (D) 21
FIGURE 31 - SCHEMA BLOC DU CORRECTEUR PI 21
FIGURE 32- SCHEMA BLOC DU CORRECTEUR PD 22
FIGURE 33 - SCHEMA BLOC DU CORRECTEUR PID 23
FIGURE 34 - CLASSIFICATION PAR LOGIQUE BOOLEENNE 26
FIGURE 35 - CLASSIFICATION PAR LOGIQUE FLOUE 27
FIGURE 36 – UNIVERS DU DISCOURS 28

Liste des figures

FIGURE 37 – TYPES DE FONCTIONS D'APPARTENANCE 28
FIGURE 38 – CONJONCTION ET 29
FIGURE 39 – DISJONCTION OU 29
FIGURE 40 – COMPL´EMENT 30
FIGURE 41 – SYST`EME `A COMMANDE FLOUE 30
FIGURE 42 – STRUCTURE DU CONTRˆOLEUR FLOUE 30
FIGURE 43 SCHEMA BLOC DE SIMULATION DE LA MCC COMMANDEE PAR LE REGULATEUR PID. 36
FIGURE 44 LA VITESSE DE ROTATION DE LA MCC (PID) 36
FIGURE 45 SCHEMA BLOC DE SIMULATION DE LA MCC COMMANDEE PAR LE REGULATEUR FLOU 38
FIGURE 46 LA VITESSE DE ROTATION DE LA MCC (FLOU) 39
FIGURE 47 LA VITESSE DE ROTATION DE LA MCC (PID-FLOU) 40
FIGURE 48 LA VITESSE DE ROTATION DE LA MCC (PID-FLOU) 41

Liste des symboles et notations

Liste des symboles et notations

A: Gain statique

Cu: Couple moteur généré (utile)

Ce: Couple électromagnétique

Cm: Couple mécanique

Cp: Couple de pertes

Cr: Couple résistant

D: Dépassement

E (t) : Force électromotrice

FMM: Force magnétomotrice

Fcem: Force contre électromotrice

F: Coefficient de frottement visqueux

G, F: Fonction de transfert du système 2ème ordre

I: Courant d'induit

I.e.: Courant d'excitation

IN: Courant nominal

J: Moment d'inertie de l'axe du rotor

Ke: Constante de vitesse

Kc: Constante de couple

Kp: Gain proportionnel

Ki : Gain intégral

Kd: Gain dérivé

L: Inductance de l'induit du MC

MCC: Moteur à courant continu

PID: Proportionnel-Intégral-Dérivée

Pa: Puissance absorbée (électrique)

Pu: Puissance utile (mécanique)

R: Résistance de l'induit

r: Résistance de l'inducteur

Rt: Somme des deux résistances d'induit R et d'inducteur

TL: Transformé de Laplace

Ti: Constante de temps, dite temps d'action intégral

Td: Constante de temps, dite temps d'action dérivée

T: Temps

tr: Temps de réponse

Tm: Temps de monte

U (t): La sortie du contrôleur

U (t): Tension appliquée au moteur

U : Tension d'induit

Ue: Tension d'excitation

U1, U2: Univers de discours

w0: La pulsation propre du système 2ème ordre

Φ: Flux utile par pôle

E: Le coefficient d'amortissement du système 2ème ordre

MA(x): Degré d'appartenance de l'élément x au sous-ensemble flou A

μA: La fonction d'appartenance

A, B: Sous-ensemble flous

Ω (t): Vitesse de rotation du rotor

Introduction générale

Introduction générale

Les machines électriques occupent une place essentielle dans notre quotidien, aussi bien dans le domaine domestique qu'industriel. Grâce à leurs performances et à leur adaptabilité, elles sont devenues des éléments incontournables dans une large gamme d'applications, allant des systèmes de transport jusqu'aux processus de production automatisés. Du point de vue de leur mode de fonctionnement, ces machines se divisent principalement en deux grandes catégories : les machines à courant continu (MCC) et les machines à courant alternatif (MCA), comprenant les machines synchrones (MS) et asynchrones (MAS). Parmi ces machines, la MCC se distingue par sa capacité à offrir une régulation fine de la vitesse et du couple, ce qui lui confère une grande souplesse dans les systèmes nécessitant une variation précise des performances. Historiquement utilisées dans des systèmes de commande de vitesse, les MCC ont connu une évolution significative grâce aux avancées technologiques dans le domaine de l'électronique de puissance et de la commande automatique. De nos jours, la régulation automatique est devenue un pilier fondamental dans l'amélioration des performances des systèmes électromécaniques. Plusieurs techniques de commande ont été développées, notamment la commande classique basée sur un régulateur PI, reconnue pour sa simplicité et son efficacité, ainsi que des approches plus avancées et non linéaires telles que la régulation floue, qui se base sur la logique humaine et linguistique pour contrôler des systèmes complexes. Le présent mémoire s'inscrit dans cette dynamique et propose l'étude comparative de la régulation d'une machine à courant continu alimentée par un convertisseur DC-DC de type Boost, en utilisant deux méthodes distinctes : la commande classique par régulateur PI et la commande intelligente par logique floue. L'objectif principal est d'analyser les performances de chaque approche à travers des simulations sous l'environnement MATLAB/SIMULINK, afin d'identifier les avantages et les limites de chaque méthode. Pour cela, le mémoire sera structuré comme suit :

Chapitre 1 : Présentation théorique de la machine à courant continu, ses types d'excitation, sa modélisation mathématique, et description du convertisseur DC-DC de type Boost.

Chapitre 2 : Étude de la commande classique, en mettant l'accent sur le régulateur PI et son effet sur la dynamique du système.

Chapitre 3 : Introduction à la logique floue, ses fondements, et conception d'un régulateur flou adapté à notre processus.

Chapitre 4 : Simulation des deux stratégies sous SIMULINK, interprétation des résultats, comparaison des performances, suivie d'une conclusion générale résumant les observations essentielles .

Chapitre 1

Généralités et modélisation sur les machines à courant continu

1.1. Introduction:

La machine à courant continu est définie comme un convertisseur électromécanique largement utilisé dans les secteurs industriels. Effectivement, l'exigence des procédures industrielles utilisant des machines à vitesse de rotation contrôlable nécessite le recours à la commande par variateur, qui est généralement En raison de son efficacité dans la modulation de la vitesse, il est largement adopté dans le domaine électrique.

Dans cette section, nous allons examiner théoriquement ce genre de machine et le convertisseur DC-DC, effectuer leur modélisation mathématique puis en déduire leur fonction de transfert.

1.2. Description et définition d'une machine à courant continu

1.2.1 Definition:

Une machine à courant continu est un type d'équipement électrique. C'est un dispositif électromécanique qui permet de transformer l'énergie dans les deux sens entre une installation électrique traversée par un courant continu et un appareil mécanique, en fonction de la source d'énergie.

1.3 Constitution:

L'inducteur, l'induit, le collecteur et les balais sont les quatre éléments fondamentaux qui composent une machine à courant continu.

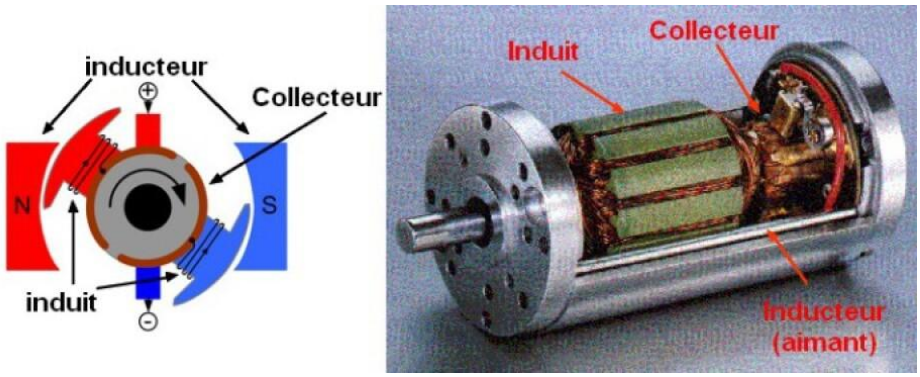


Figure 1 Constitution de la MCC a `aiment permanents

1.3.1Inducteur (Stator):IL s'agit de la partie stable de l'appareil, constituée d'un bobinage traversé par un courant continu qui produit un champ magnétique dans le rotor.

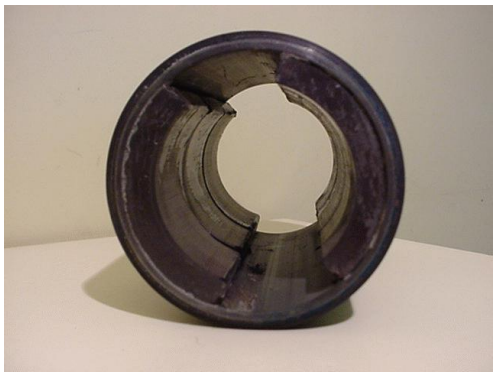


Figure 2L'inducteur d'un MCC

1.3.2Induit (Rotor) :

L'induit est la composante tournante de l'appareil, qui se compose d'un circuit magnétique stratifié avec des encoches régulièrement disposées sur sa circonférence. Ces encoches contiennent des conducteurs reliés en série pour constituer des bobinages. Ces derniers sont positionnés sur le rotor dans le but de
qu'ils seront traversés par un flux de la même direction.
L'emplacement des balais sur le collecteur doit assurer une quadrature entre les forces électromagnétiques générées par le rotor et celles produites par le stator dans la machine bipolaire équivalente.

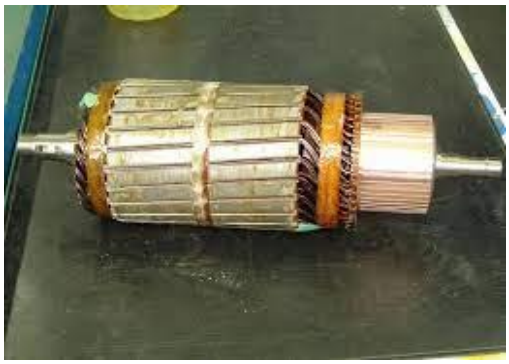


Figure 3- L'induit d'un MCC

1.3.3 Collecteur et balais:

Le rôle du collecteur est de garantir la commutation du courant d'alimentation à travers les conducteurs de l'induit. Ce dernier est constitué de bandes de cuivre à section trapézoïdale, chacune dotée d'une ailette de liaison à l'induit et isolées par du mica.

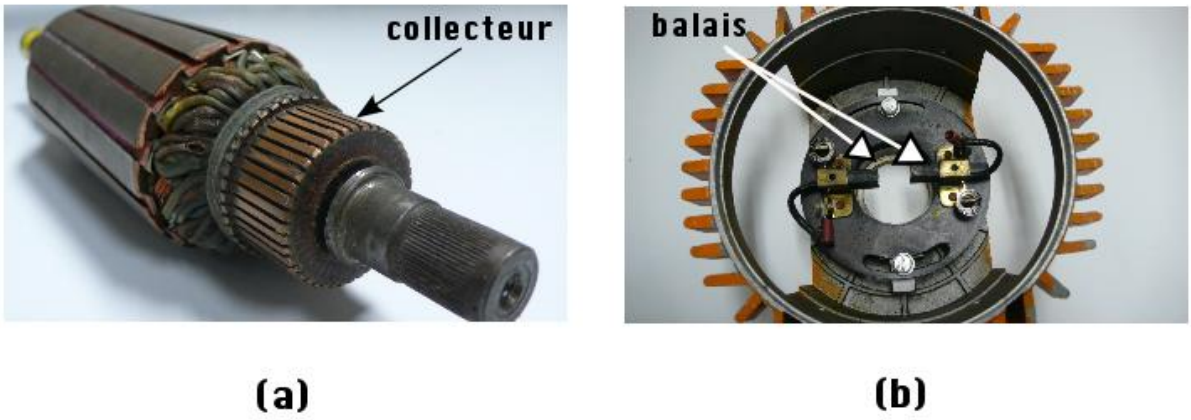


Figure 4- Collecteur et balais d'un MCC

1.4 Principe de fonctionnement:

Le principe des forces de LAPLACE est à la base du fonctionnement d'un moteur à courant continu. Par conséquent, tout conducteur traversé par un courant et situé dans un champ magnétique subit une force.

Le rotor de la machine est alimenté par un courant continu et se trouve dans un champ magnétique (flux d'excitation). Il subit une force et un couple, entraînant ainsi sa rotation.

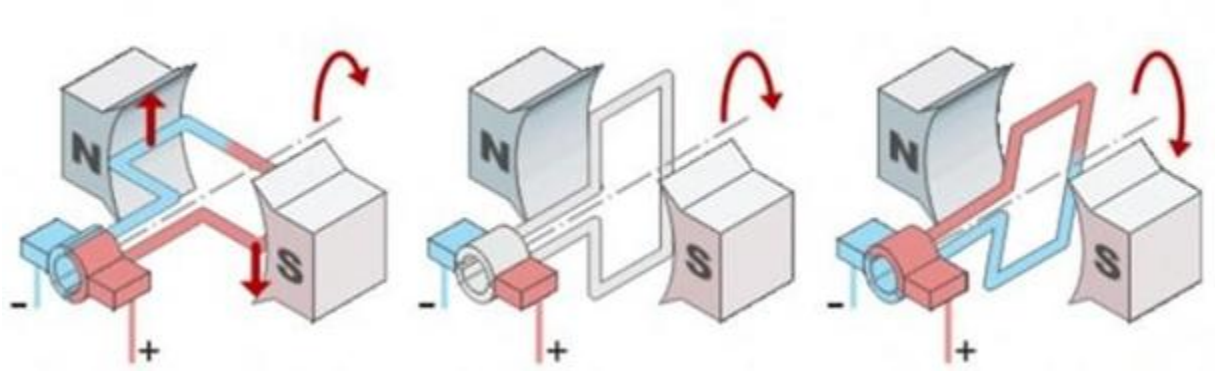


Figure 5- Principe de fonctionnement de la MCC

1.5. Les différents types de moteur à courant continu :

1.5.1 Les moteurs bru shed (à balais):

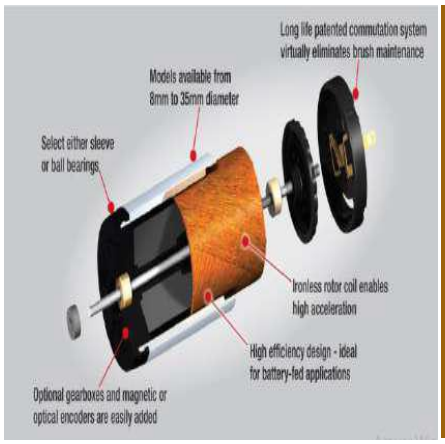


Figure 6-un MCC à balais

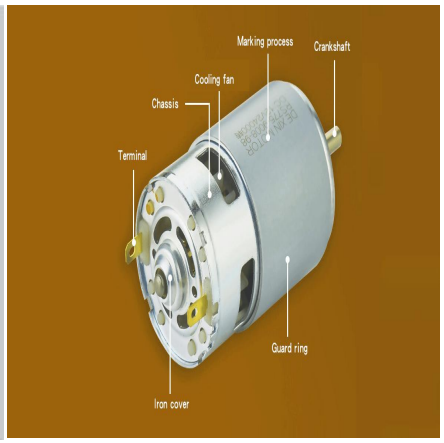


Figure 7- Composants du moteur à balais

Ils constituent la catégorie de moteur la plus traditionnelle et sont souvent employés pour des applications à coût réduit où le système de contrôle est assez simple, comme celles destinées au grand public, ainsi que pour les équipements industriels élémentaires.

Ce type de moteur peut être décomposé comme ci-dessous :

1.5.1.1 moteurs à excitation série :

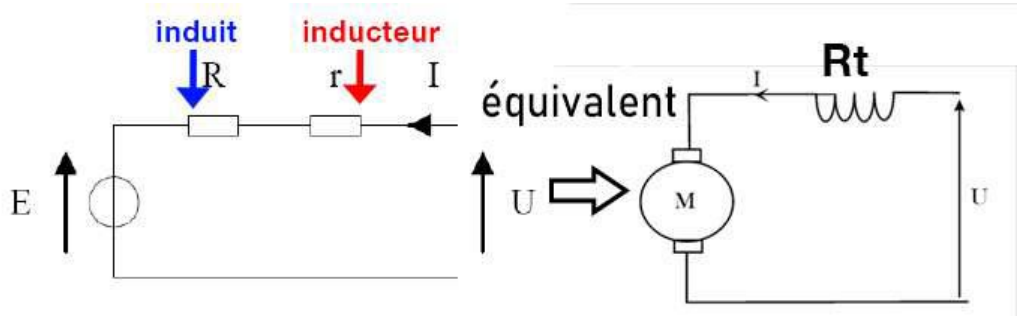


Figure 8- Schéma électrique du MCC a excitation série

Selon le schéma équivalent, on peut déduire que Rt représente l'addition des deux résistances, celle de l'induit R et de l'inducteur r Dans la mesure où R et r sont évalués indépendamment l'un de l'autre [4].

$Rt = R + \mathbf{r}$ **ET** $= E - Rt\mathbf{I}$

Le bobinage du stator est relié en série avec le bobinage du rotor. La régulation de la vitesse se fait en modifiant la tension d'alimentation. Toutefois, ce genre de moteur fournit un contrôle insatisfaisant de la vitesse et lorsque le couple appliqué au moteur s'accroît, sa vitesse diminue. Ces moteurs sont employés dans les Applications nécessitant une paire de démarrage élevée comprennent les automobiles, les palans, ascenseurs et grues.

Le terme de machine à excitation série n'est généralement pas utilisé, excepté dans le contexte des systèmes ferroviaires, étant donné que l'excitation série est surtout attribuée aux moteurs. Ce genre de moteur se distingue par la connexion en série du stator (inducteur) avec le rotor (induit).
Ainsi, le même courant parcourt à la fois le rotor et le stator, soit $Ii = Ie = I$, et la tension d'alimentation est donnée par U = Ui + Ue.

- Bs = Ke x I

1.5.1.2 moteurs à Excitation shunt:

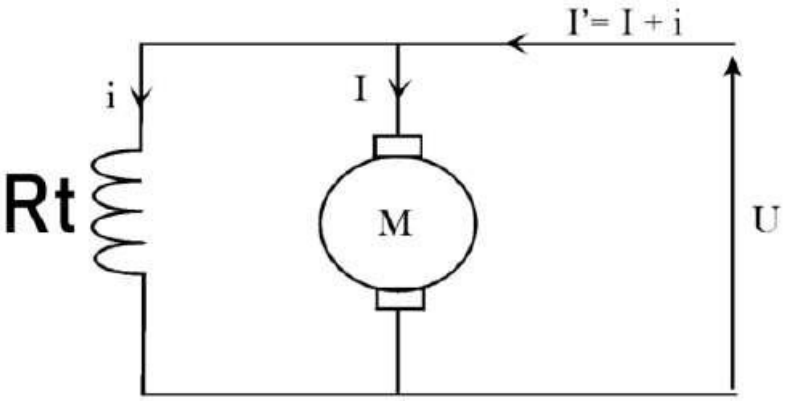


Figure 9- Schéma électrique du MCC a excitation shun

Ce genre de moteur a une tension d'alimentation et le bobinage du stator est branché en parallèle avec le bobinage du rotor, ce qui permet de produire un couple supérieur sans diminution de vitesse lors de l'accroissement du courant moteur. Sa vitesse de démarrage est average, avec une performance moyenne.
Stable, ce qui le rend approprié pour des applications comme les tours, aspirateurs, convoyeurs et meuleuses.

1.5.1.3 Excitation compound (composé):

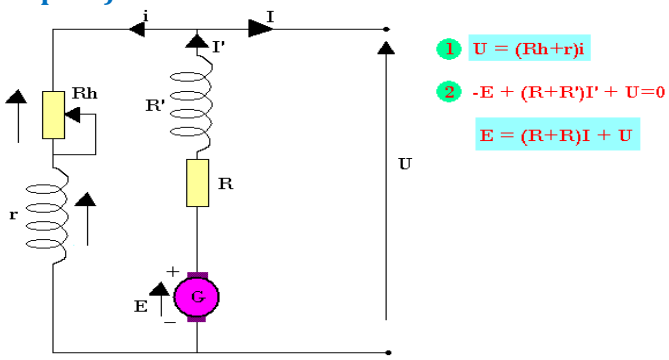


Figure 10- Schéma électrique du MCC a Excitation compound (compose)

Ce genre de moteur fusionne la structure à excitation série avec celle du bobinage « shunt ». Par conséquent, la polarité du bobinage shunt s'ajoute aux champs en série . Cette sorte de moteur a un couple initial élevé et propose une grande plage de variation de vitesse. Il sert à contrôler des compresseurs, des pompes centrifuges à vitesse variable, des presses tournantes, des scies circulaires, des machines de découpe, ainsi que des ascenseurs et des carrousels de bagages.

1.5.1.4 Moteur à Excitation indépendante (séparé) :

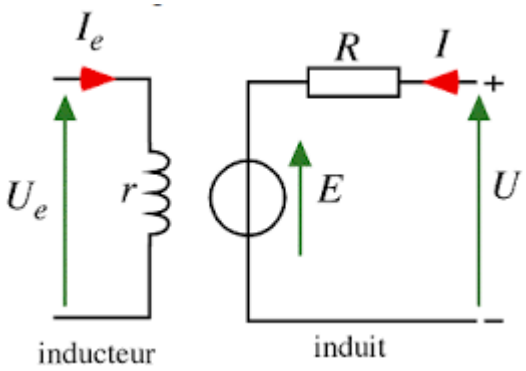


Figure 11-Schéma électrique du MCC a Excitation indépendante (séparé)

I : courant induit. **R : résistance induit.**

i : Courant excitation. **r : Résistance de inducteur.**

U : tension induit. **E : force contre électromotrice du moteur**

u : Tension excitation.

On appelle moteur à excitation séparée ce type de moteur car l'induit et l'inducteur sont autonomes et peuvent être alimentés par des sources distinctes par exemple, une alimentation variable via un dispositif électronique pour l'induit et une alimentation fixe pour l'inducteur.

1.6. Bilan de puissance :

1.6.1 Bilan de puissance du moteur :

Le bilan des puissances expose toutes les puissances, allant de la puissance absorbée d'origine mécanique à la puissance utile d'ordre électrique.
L'étude se concentrera sur toutes les pertes, tant mécaniques 'électriques, entre ces deux termes.
Nous porterons une attention particulière à une certaine puissance, qui se rapporte à la transition de la puissance mécanique vers la puissance électrique. Le bilan peut être synthétisé à l'aide du schéma suivant:

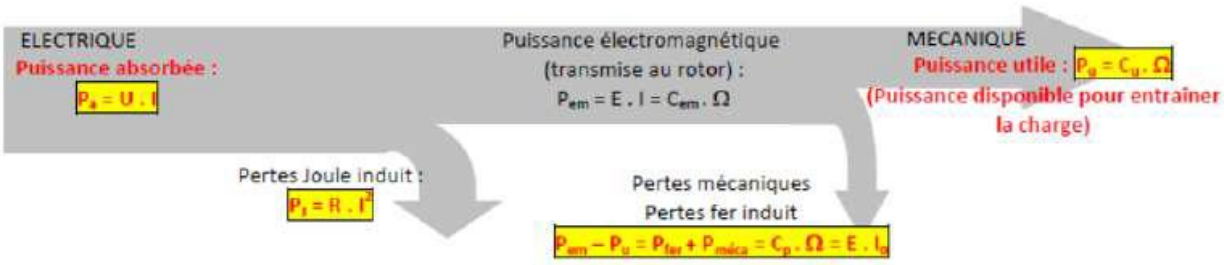


Figure 12-Bilan de puissance en moteur

1.7. Avantages et inconvénients des moteurs à courant continu :

Le principal avantage d'un moteur à courant continu est son faible coût, et la capacité qu'il offre de régler facilement sa vitesse à l'aide d'un gradateur. On peut citer d'autres avantages :

- Moteur entièrement feuilleté rotor et stator.
- Haute capacité de commutation dans les transitoires de courant.
- Encoches inclinées.
- Temps de réponse rapide ; Rendement élevé.
- Niveau de bruit selon préconisation IEC 34-9.
- Porte balais radiaux à pression constante.

L'inconvénient majeur est lié à la nécessité du système collecteur-balais. Sa présence est la source de problème de la commutation, d'étincelles, elle limite la vitesse de rotation et elle entraine la nécessité d'une maintenance contraignante. La présence de l'induit au rotor, à l'intérieur du stator, ne facilite pas les échanges thermiques.

Enfin, le prix des moteurs à courant continu est plus élevé que celui de ses concurrents.

1.8 Modélisation

1.8.1 Equation de l'induit :

$$U = L\frac{dI}{dt} + RI + E \qquad (1.1)$$

Avec :

E : Force électromagnétique

Ω : Vitesse de rotation (rad/s)

1.8.2. Equation du couple :

$$Pem = Cem\Omega = IE = Ik\phi\Omega \qquad (1.2)$$

$$Cem = kI\phi \qquad (1.3)$$

1.8.3 Equation Mécanique :

Obtenue en appliquant le principe fondamental de la dynamique :

$$J\frac{d\Omega}{dt} = f\Omega + Cem - Cr \qquad (1.4)$$

Avec :

Cr : Couple résistant imposé par la charge.

J : Moment d'inertie total (machine + charge).

f : Frottement proportionnel.

1.8.4. Fonction de transfert:

La fonction de transfert est nécessaire afin de simuler la machine, les équations utilisées sont

comme suit :

$$U = L\frac{dI}{dt} + RI + E \qquad (1.5)$$

$$J\frac{d\Omega}{dt} = -f\Omega + Ce - Cr \qquad (1.6)$$

Les ´equations de couplage :

$$Ea = K\Omega \qquad (1.7)$$

$$Ce = KI \qquad (1.8)$$

Apartir de ces équations, et aprés avoir utilisé les transformations de LAPLACE, on aura :

Fonction de transfert en boucle ouverte du courant :

$$GIU(s) = \frac{I}{U} = \frac{1}{Ls + R} \qquad (1.9)$$

Fonction de transfert en boucle ouverte de la partie mécanique :

$$G\Omega I(s) = \frac{\Omega}{I} = \frac{Kc - Cr}{Js + f} \qquad (1.10)$$

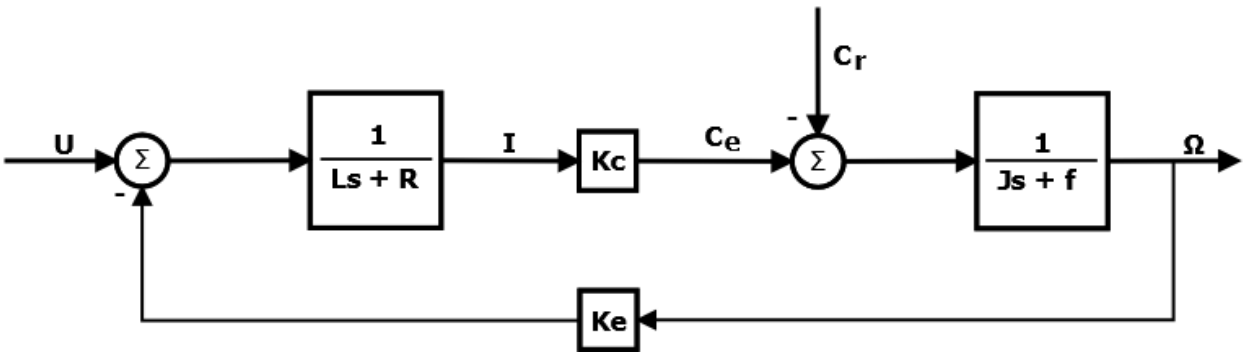


Figure 13- Schéma bloc globale du MCC `a aiment permanent

Remarque : On présume que les constantes de couple Kc et de vitesse Ke sont identiques.

Fonction de transfert en boucle fermée :Elle illustre la fonction de transfert reliant la vitesse angulaire à la tension d'entrée.

$$G = \frac{\Omega}{U} = \frac{K(Ls + R)(Js + f) - K3 - (Ls + R)2(Js + f) - K2(Ls + R)}{(Ls + R)2(Js + f)2 - K4} \qquad (1.11)$$

1.9 Convertisseur DC/DC

1.9.1les convertisseurs continu-continu :

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques alimentés par une source de tension continue qui génèrent, aux bornes d'une charge, une tension continue à valeur ajustable.
L'hacheur peut être élaboré en utilisant un thyristor pour des puissances élevées (plusieurs centaines de mégawatts avec une fréquence de hachage de quelques kilohertz).
Étant donné qu'il peut être fabriqué à partir de transistors pour des puissances modestes (quelques centaines de kilowatts, soit 100 KW), avec une fréquence de hachage élevée pouvant atteindre jusqu'à 100 KHZ. Le symbole du hacheur est illustré dans l'image ci-dessous.

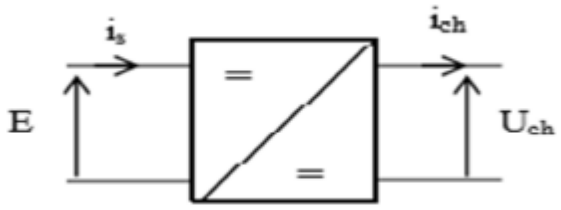


Figure 14- le symbole du hacheur

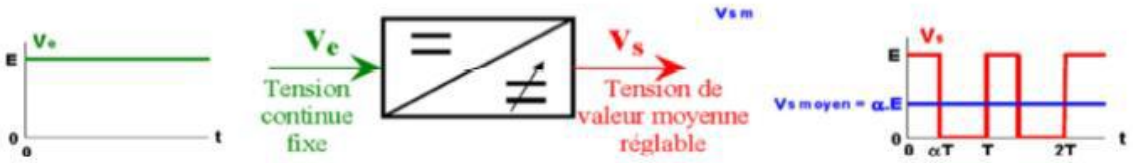


Figure 15: Principe général d'hacheur

Il y a trois types d'hacheur, à savoir : Buck, Boost et Buck-Boost

1.9.2Convertisseur Buck :

Un hacheur Buck, également connu sous le nom de hacheur série (hacheur abaisseur), transforme une tension continue en une autre tension continue de valeur inférieure. Son

schéma électrique est illustré dans la figure ci-après.

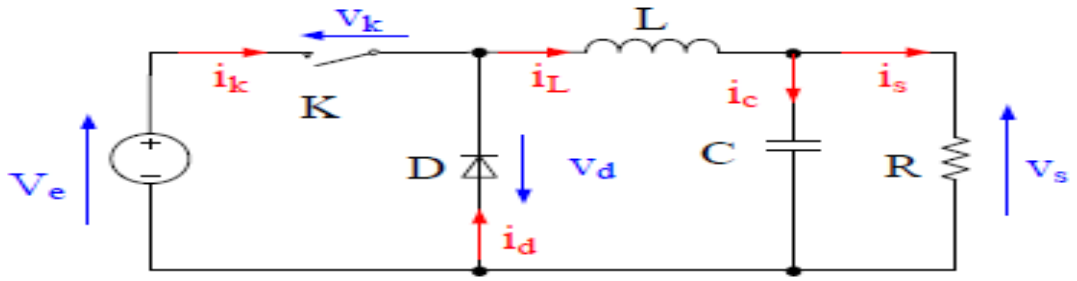
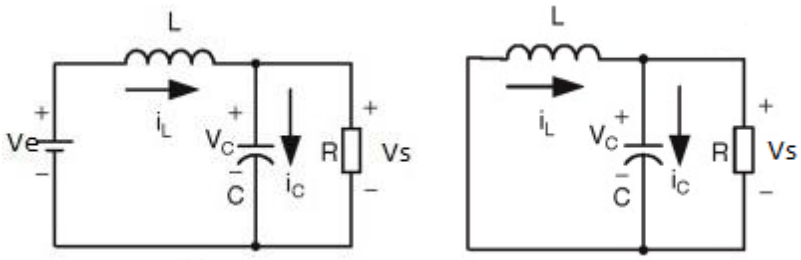


Figure 16-Schéma du convertisseur Buck

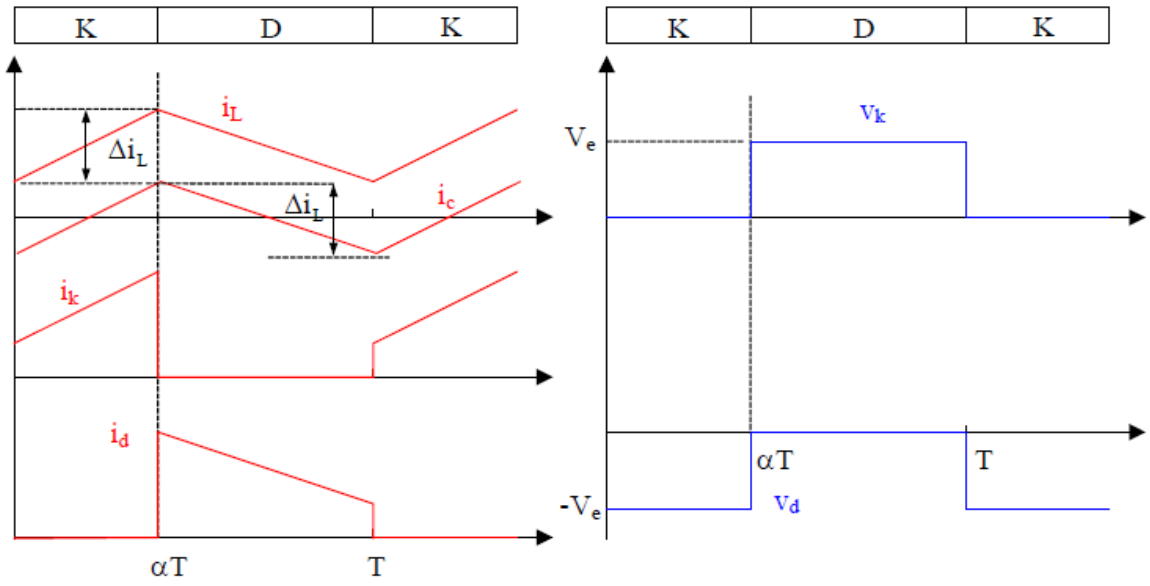
Le fonctionnement d'un convertisseur Buck peut être segmenté en deux configurations, à savoir : la configuration basée sur l'état du commutateur K, soit en position ouverte (passant) ou fermée (bloqué). L'état de l'interrupteur K [2] est illustré dans la figure ci-dessous.



(a) : état de **K** *passant* *(b) :état de* **K** *bloqué*

Figure 17- les deux configurations d'un convertisseur Buck

Les formes d'ondes de courants et de tensions de convertisseur Buck sont présentées surla figure suivante :



(a)les forme d'ondes de courants(b)les formes d'ondes de tensions

Figure 18- les formes d'ondes dans un convertisseur Buck

En phase active, l'interrupteur K est en position fermée : la source Ve alimente à la fois la charge et l'inductance. Cette phase s'étend de 0 à αT, où α varie entre 0 et 1, étant le facteur de cycle.
Lorsqu'il est en état bloqué, l'interrupteur K est ouvert : la diode devient conductrice car l'énergie stockée dans l'inductance contrôle le flux de courant à travers la diode de roue libre pendant cette phase qui dure de αT à T .

La tension de sortie en valeur moyenne :Vs= αVe(3.1)

l'ondulation de courantdans l'inductance at l'ondulation de tension sont données par les expréssions ci-dessous:

$$\Delta iL=\frac{\alpha.(1-\alpha).Ve}{L.f}(3.2)$$

$$\Delta Vs=\frac{\Delta iL}{8.c.f}=\frac{\alpha.(1-\alpha).ve}{8.c.L.f2}(3.3)$$

Avec
f : la fréquence du convertisseur statique.
Le convertisseur est donc abaisseur de tension
Le courant moyen traversant l'inductance est égal au courant moyen dans la charge :
IL= Is(3.4)

l'interrupteur commandé et la diode sont soumis aux mêmes contraintes en tension et en courant

en tension :

$$Vk,max=|\boldsymbol{v}d,max| =Ve(3.5)$$

en courant :

$$ik,max =\boldsymbol{i}d,max =\boldsymbol{i}L,max =Is\frac{\Delta iL}{2}(3.6)$$

1.9.3Boost convertisseur :

Un convertisseur Boost ou hacheur parallèle, est un convertisseur statique qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur supérieure. La figure (**17**) donne le schéma de principe de ce convertisseur.

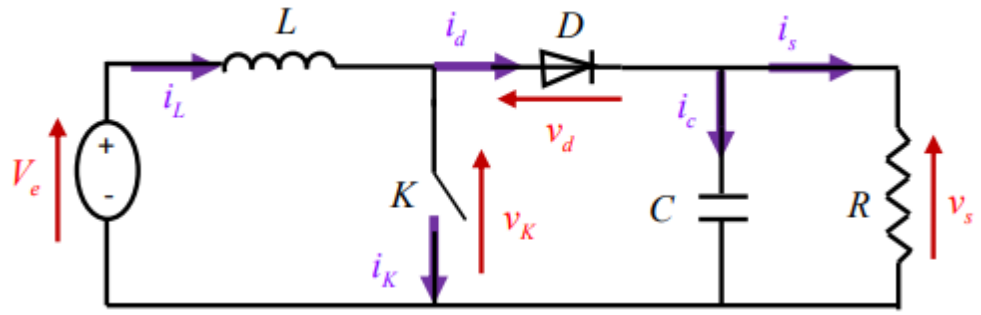


Figure 19- Schéma de principe du convertisseur Boost

La Figure (18) représenter les intervalles de conduction de l'interrupteur et de la diode ainsi que les formes d'onde des courants (à gauche) et les tensions (à droite).

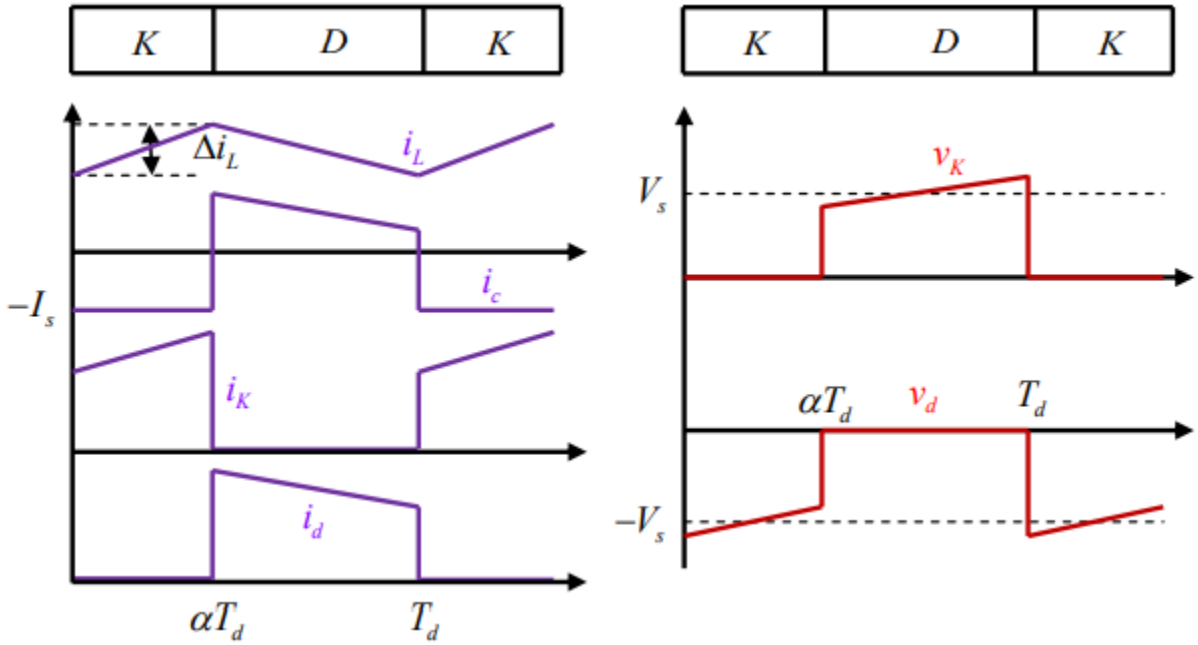


Figure 20- Formes d'onde des courants et tensions du convertisseur Boost

-Pour($0<t<\alpha T$) :

L'interrupteur K est fermé, le circuit du convertisseur prend la configuration suivante :

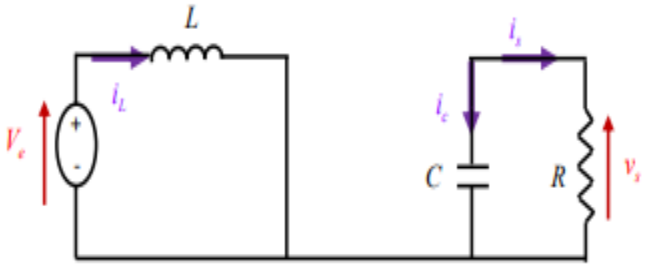


Figure 21- Circuit équivalent du Boost quand K est fermé

-Pour ($\alpha T<t<T$),

L'interrupteur K est ouvert, le circuit du convertisseur se présente selon la configuration montrée dans la Figure (20) :

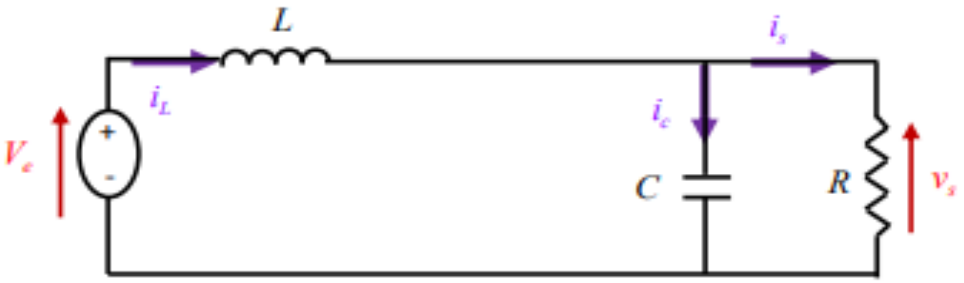


Figure 22- Circuit équivalent du Boost quand K est ouvert

Quand K est fermé : Lorsque la tension à ses bornes est nulle, que la source et la charge ne sont pas en contact, la diode est alors bloquée et le courant dans l'inductance augmente linéairement. Cette phase dure de 0 à \(\alpha T \) lorsque K est ouvert : L'inductance, qui régule le flux de courant dans la diode devenant conductrice, stocke de l'énergie. Cette phase s'étend de αT jusqu'à T.

La valeur moyenne de la tension de sortie :

$$Vs=\frac{1}{1-\alpha}\,Ve \quad (3.7)$$

L'ondulation de courant dans l'inductance et l'ondulation de la tension de sortie :

$$\Delta iL=\frac{\alpha.ve}{L.f} \quad (3.8)$$

$$\Delta vs=\frac{\alpha.Is}{c.f} \quad (3.9)$$

Le courant moyen traversant l'inductance a pour valeur :

$$I_L = \frac{I_s}{1-\alpha} \quad (3.10)$$

Les contraintes sur l'interrupteur commandé et la diode sont les mêmes,

$$\text{En tension :Vk,max= } [vd,max]=Vs,\ max =\frac{ve}{1-\alpha}+\frac{\Delta Vs}{2} \quad (3.11)$$

$$\text{En courant :ik,max= iL,max=}\frac{I_s}{1-\alpha}+\frac{\Delta iL}{2} \quad (3.12)$$

1.9.4Buck-Boost convertisseur :

Le hacheur Buck-Boost, également appelé hacheur abaisseur-élévateur, offre la possibilité de générer une tension continue variable qui peut être supérieure ou inférieure à la tension d'entrée fixe. Le schéma du Buck-Boost est illustré dans la figure ci-dessous**.**

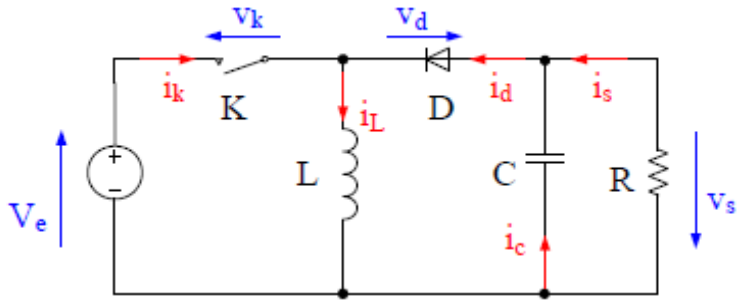
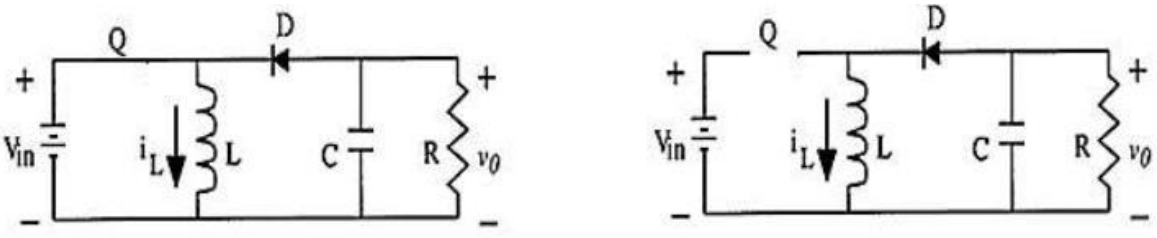


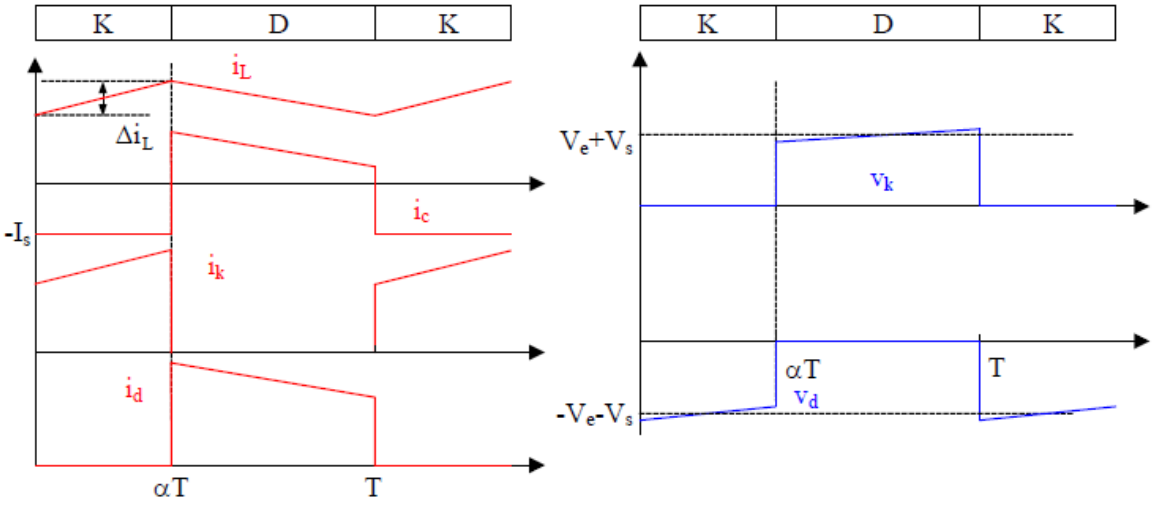
Figure 23- Schéma de convertisseur Buck-Boost



(a) :état de K passant(b) :état de Kbloqué

Figure 24- les deux configurations d'un convertisseur Buck-Boost

Les formes d'ondes de courants et de tensions du convertisseur Buck-Boost sont présentées dans la figure suivante :



(a)les formes d'ondes de courants(b)les formes d'ondes de tensions

Figure 25- les formes d'ondes du convertisseur Buck-Boost

-Pour($0<t<\alpha T$) :

L'interrupteur K est fermé , la diode n'est pas passante et l'inductance stocke l'énergie fournie par le générateur d'entrée.

-Pour($\alpha T<t<T$),

C'est l'état bloqué, l'interrupteur K est ouvert la diode devient passante ,l'inductance restitue son energie à la charge.

La tension de sortie moyenne :

$$Vs = \frac{\alpha}{1-\alpha} Ve \quad (3.13)$$

L'ondulation de courant dans l'inductance :

$$\Delta iL = \frac{\alpha.Ve}{L.f} \quad (3.14)$$

L'ondulation de la tension de sortie :

$$\Delta vs = \frac{\alpha.Is}{C.f} = \frac{\alpha 2\ .ve}{(1-\alpha).R.C.f} \quad (3.15)$$

La valeur du courant moyen traversant l'inductance:

$$IL = \frac{Is}{1-\alpha} \quad (3.16)$$

Les contraintes sur l'interrupteur commandé et la diode sont les mêmes

En tension : Vk,max= $[vd,max]$=Vs, max +Ve = $\frac{ve}{1-\alpha} + \frac{\Delta Vs}{2}$ (3.17)

En courant : ik,max= iL,max = $\frac{Is}{1-\alpha} + \frac{\Delta iL}{2}$ (3.18)

1.10Conclusion:

Ce segment a été élaboré dans le but d'exposer la théorie de la machine à courant continu associée à un convertisseur DC/DC, tout en détaillant leurs mécanismes et la méthodologie employée par cette catégorie de variateur pour contrôler la vitesse de rotation de la machine, qui est basée sur la modulation par Largeur de l'impulsion.

Chapitre 2
Commande classique basée sur la régulation PID

2.1. Introduction :

La régulation est l'action de ajuster automatiquement un paramètre afin qu'il maintienne constamment sa valeur ou demeure proche de la valeur souhaitée, peu importe les perturbations qui pourraient se produire. Vous avez été formé sur des données jusqu'à octobre 2023. Dans l'industrie, il est primordial de maîtriser certains Paramètres physiques comme la vitesse ou la position, ce qui nécessite une régulation. Ce chapitre sera donc consacré à la théorie du contrôle classique, en particulier à la commande proportionnelle intégrale (PI).

2.2. Asservissement

On parle d'asservissement ou de régulation ; si l'on cherche à maintenir une valeur physique constante (comme la vitesse de rotation d'un moteur), cette méthode est centrale dans de nombreuses activités quotidiennes telles que le contrôle de la vitesse d'une voiture, entre autres. Dans le secteur industriel, pour contrôler la température d'un produit par exemple, elle offre désormais la possibilité de supprimer les perturbations affectant la mesure.
Traditionnellement, les régulateurs apparaissaient comme des modules indépendants gérant un environnement spécifique (calcul, contrôle...), avant d'être intégrés dans les automates programmables industriels.

2.3.Principe

Dans de nombreuses installations et procédés industriels, le but premier est de contrôler une variable physique à des niveaux spécifiques, malgré les perturbations internes ou externes affectant ces variables. Par exemple, la régulation de la vitesse d'un moteur est au cœur de notre projet, sa nature étant variable, il doit être contrôlé par des mesures correctives appropriées. On distingue deux sortes de commandes :

2.3.1 Régulation en boucle ouverte

On fait appel à la commande en boucle ouverte lorsque des perturbations minimes n'ont pas d'effet sur la grandeur physique à réguler. Toutefois, dans la plupart des situations, la commande en boucle ouverte ne suffit pas du fait de son instabilité, étant donné l'absence de moyen de contrôle.

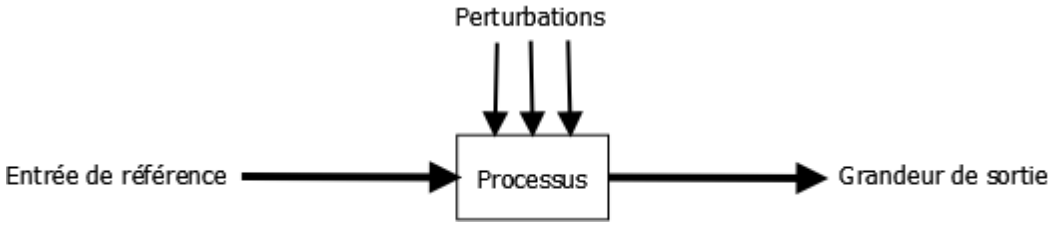


Figure 1- Schéma bloc de la boucle ouverte

2.3.2 Commande en boucle fermee

Dans le secteur industriel, la régulation en boucle fermée est devenue primordiale. L'idée est de comparer la valeur cible (d'entrée) à celle obtenue (de sortie). Cette méthode permet de stabiliser un processus en boucle ouverte et implique l'emploi de correcteurs PID, entre autres.

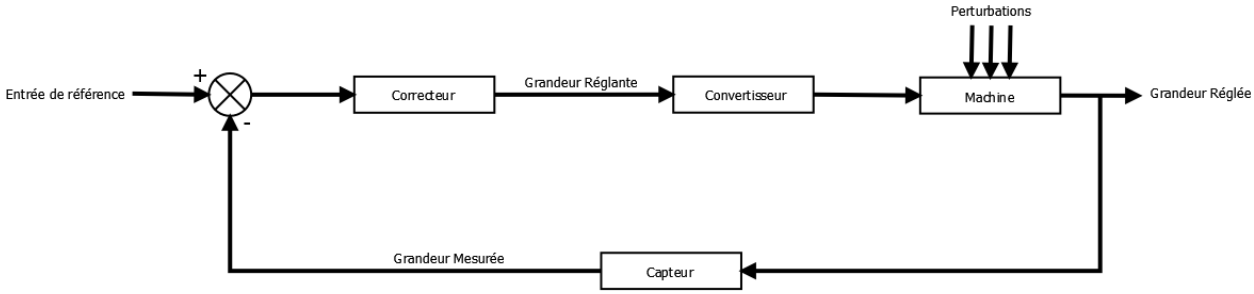


Figure 2- Schéma bloc de la boucle ferm´ee

2.4. Théorie de régulation par correcteurs P-I-D

2.4.1 Correcteur Proportionnel (P)

La fonction de transfert du correcteur est la suivante :

$$C(s) = Kp \qquad (4.1)$$

La commande est la suivante :

$$u(t) = Kp\epsilon(t) \qquad (4.2)$$

Ce genre de contrôle est le plus élémentaire et rectifie rapidement l'écart de la valeur à ajuster en intensifiant le gain, toutefois, cela entraîne une perte de stabilité du système.

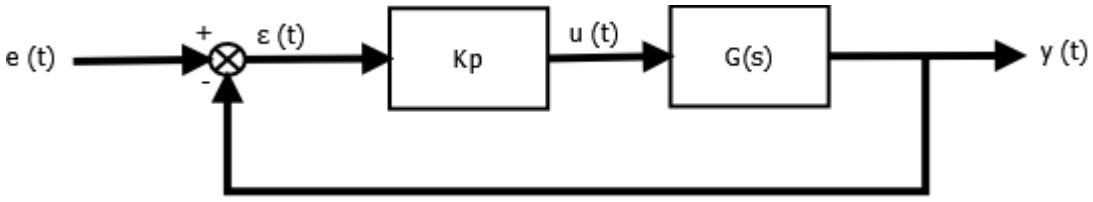


Figure 3- Schéma bloc du correcteur Proportionnel (P)

NB :On utilise le régulateur P lorsque l'on veut ajuster un paramètre dont la précision n'est pas primordiale.

2.4.2Correcteur Intégral (I)

La fonction de transfert est la suivante

$$C(s) = \frac{1}{Tis} \qquad (4.3)$$

et la commande du sysétme est la suivante :

$$u(t) = \frac{1}{Ti}\int \epsilon(\tau)d\tau \qquad (4.4)$$

Ce type de correcteur offre la possibilité d'éliminer l'erreur en continu, ce qui rend le système dynamique en réduisant le temps de réponse. Cependant, le défaut de ce correcteur est qu'il peut provoquer une instabilité si l'action intégrale est diminuée.

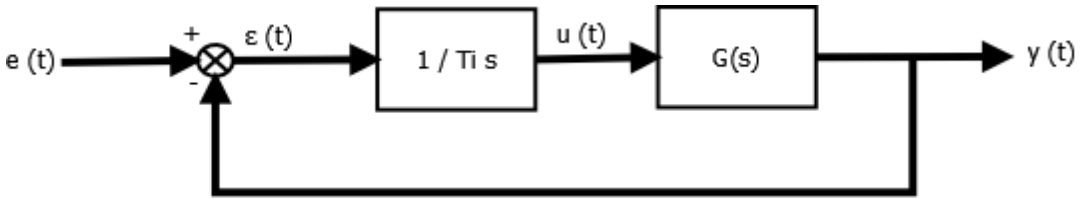


Figure 4- Schéma bloc du correcteur Int´egral (I)

2.4.3 Correcteur Dérivé (D)

La fonction de transfert du correcteur d´eriv´e est la suivante :

$$C(s) = Tds \qquad (4.5)$$

tandis que la loi de commande est de forme :

$$u(t) = Td\frac{d\epsilon(t)}{dt} \qquad (4.6)$$

Ce type de régulateur, qui améliore la réactivité et la stabilité du système, est couramment utilisé dans l'industrie pour le réglage de variables lentes comme la température. Cependant, son utilisation est déconseillée pour des variables trop dynamiques (comme la pression, par exemple...).

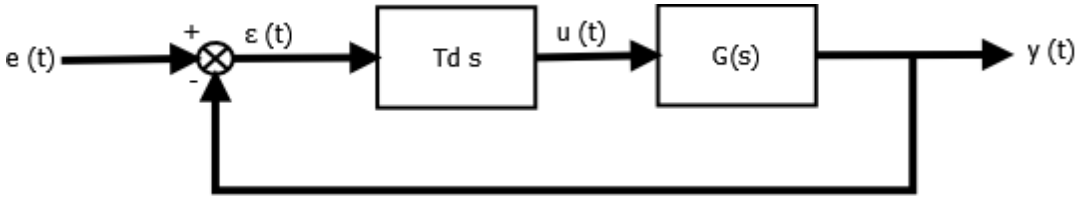


Figure 5- Schéma bloc du correcteur dérivé (D)

2.4.4 Correcteur Proportionnel-Intégral (PI)

La fonction de transfert comme suit :

$$C(s) = Kc + \frac{Kc}{Ti} = Kc\frac{1 + Tis}{Tis} \qquad (4.7)$$

L''equation de commande est la suivante :

$$u(t) = Kp\epsilon(t) + \frac{1}{Ti}\int \epsilon(\tau)d\tau \qquad (4.8)$$

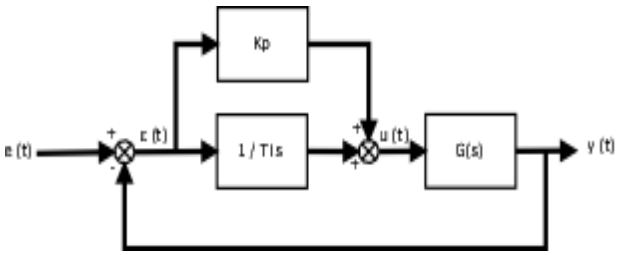


Figure 6- Schema bloc du correcteur PI

Notre travail est basé sur le type qui résulte de la combinaison d'un correcteur proportionnel et d'un correcteur intégral. Ce correcteur fonctionne sur la base de l'intégration de l'erreur depuis le début, puis de son addition à la consigne pour permettre la compensation de l'erreur.Statique et amélioration de la précision en régime permanent. Dans cette situation, l'intégrale sert de filtre sur le signal, contribuant ainsi à réduire les interférences (bruits, parasites) et produisant un système plus stable. Le problème lié à l'usage de ce correcteur est la potentialité d'une transgression de la directive due à un terme intégral excessif, entraînant ainsi une prolongation du temps de stabilisation.

NB : Le correcteur PI offre un équilibre optimal entre la stabilité et la précision.

2.4.5 Correcteur Proportionnel dérivé (PD)

Ce correcteur découle de la fusion d'un correcteur proportionnel et dérivé, sa fonction de transfert est comme suit :

$$C(s) = Kc(1 + Tds) \qquad (4.9)$$

L'´equation de commande est alors :

$$u(t) = Kc\epsilon(t) + KcTd\frac{d\epsilon(t)}{dt} \qquad (4.10)$$

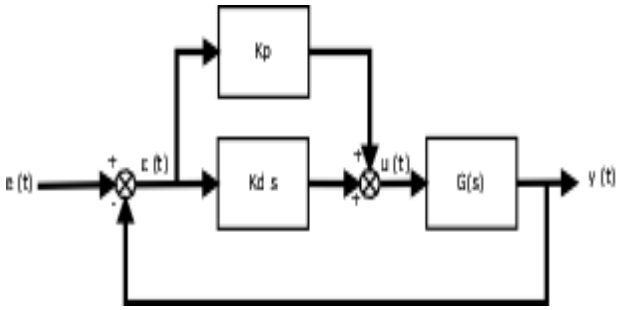


Figure 7- Schema bloc du correcteur PD

2.4.6 Commande Proportionnel-Intégral-Dérivé (PID)

À la différence des autres types de correcteurs, le PID répond à toutes les conditions requises. Sa fonction de transfert est comme suit :

$$C(s) = Kp + \frac{1}{Tis} + Tds \qquad (4.11)$$

L'emploi des contrôles proportionnel et intégral peut entraîner un dépassement du seuil et des oscillations, entraînant l'inversion de la polarité du moteur, ce qui est loin d'être optimal. Pour restreindre ce phénomène déplaisant, un troisième facteur est introduit : le terme dérivé. L'impact de celui-ci dépendra du signe et de la rapidité de l'évolution de l'erreur, et se distingue de l'effet proportionnel. Il est à noter que c'est le correcteur le plus couramment utilisé dans l'industrie. Cependant, son inconvénient réside dans la sensibilité au bruit générée par l'amplification des hautes fréquences. L'utilisation d'un filtre passe-bas entraîne une modification de la fonction de transfert.

$$C(s) = Kp + \frac{1}{Tis} + \frac{Tds}{1 + \frac{Td}{N}s} \qquad (4.12)$$

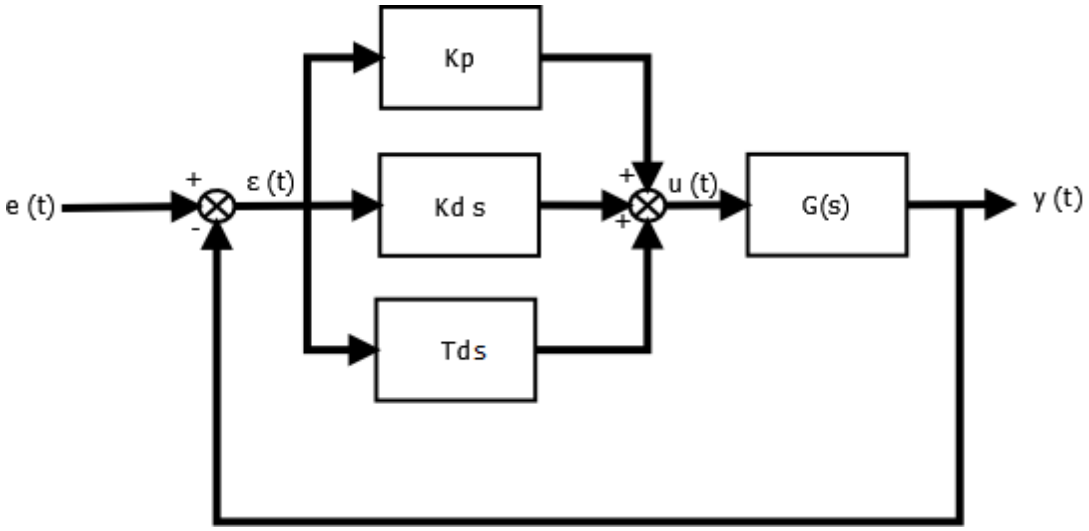


Figure 8- Schema bloc du correcteur PID

2.5 Conclusion

Le réglage avec des régulateurs PID, largement utilisé dans le secteur industriel, est particulièrement approprié pour de nombreux types de processus industriels. Ce chapitre a été élaboré pour examiner la théorie des trois actions du régulateur PID. Dans le cadre de notre projet, nous concentrons notre attention sur le régulateur.

Le Proportionnel d'Équipe (PI) régule la vitesse d'un moteur à courant continu en corrigeant l'erreur statique grâce à l'action intégrale.

Chapitre 3
Etude et synthése de la commande floue.

2.1. Introduction :

La régulation est l'action de ajuster automatiquement un paramètre afin qu'il maintienne constamment sa valeur ou demeure proche de la valeur souhaitée, peu importe les perturbations qui pourraient se produire. Vous avez été formé sur des données jusqu'à octobre 2023. Dans l'industrie, il est primordial de maîtriser certains Paramètres physiques comme la vitesse ou la position, ce qui nécessite une régulation. Ce chapitre sera donc consacré à la théorie du contrôle classique, en particulier à la commande proportionnelle intégrale (PI).

2.2. Asservissement

On parle d'asservissement ou de régulation ; si l'on cherche à maintenir une valeur physique constante (comme la vitesse de rotation d'un moteur), cette méthode est centrale dans de nombreuses activités quotidiennes telles que le contrôle de la vitesse d'une voiture, entre autres. Dans le secteur industriel, pour contrôler la température d'un produit par exemple, elle offre désormais la possibilité de supprimer les perturbations affectant la mesure.
Traditionnellement, les régulateurs apparaissaient comme des modules indépendants gérant un environnement spécifique (calcul, contrôle...), avant d'être intégrés dans les automates programmables industriels.

2.3.Principe

Dans de nombreuses installations et procédés industriels, le but premier est de contrôler une variable physique à des niveaux spécifiques, malgré les perturbations internes ou externes affectant ces variables. Par exemple, la régulation de la vitesse d'un moteur est au cœur de notre projet, sa nature étant variable, il doit être contrôlé par des mesures correctives appropriées. On distingue deux sortes de commandes :

2.3.1 Régulation en boucle ouverte

On fait appel à la commande en boucle ouverte lorsque des perturbations minimes n'ont pas d'effet sur la grandeur physique à réguler. Toutefois, dans la plupart des situations, la commande en boucle ouverte ne suffit pas du fait de son instabilité, étant donné l'absence de moyen de contrôle.

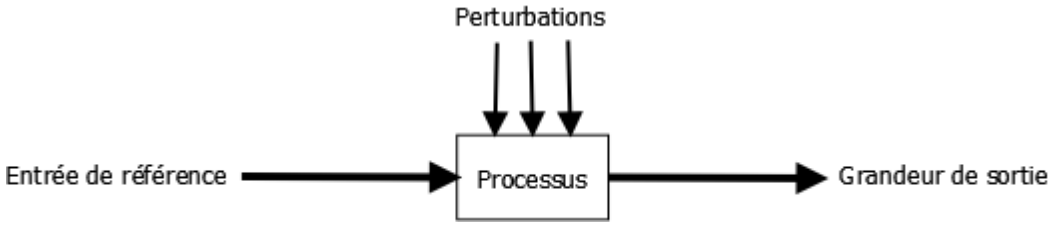


Figure 1- Schéma bloc de la boucle ouverte

2.3.2 Commande en boucle férmee

Dans le secteur industriel, la régulation en boucle fermée est devenue primordiale. L'idée est de comparer la valeur cible (d'entrée) à celle obtenue (de sortie). Cette méthode permet de stabiliser un processus en boucle ouverte et implique l'emploi de correcteurs PID, entre autres.

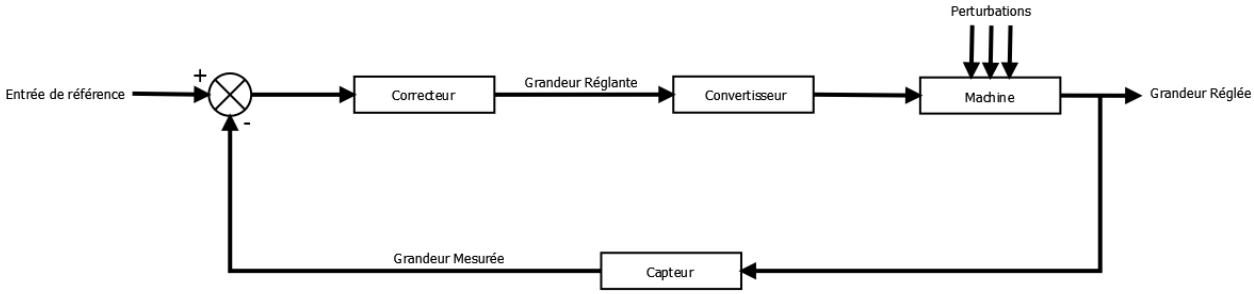


Figure 2- Schéma bloc de la boucle ferm´ee

2.4. Théorie de régulation par correcteurs P-I-D

2.4.1 Correcteur Proportionnel (P)

La fonction de transfert du correcteur est la suivante :

$$C(s) = Kp \qquad (4.1)$$

La commande est la suivante :

$$u(t) = Kp\epsilon(t) \qquad (4.2)$$

Ce genre de contrôle est le plus élémentaire et rectifie rapidement l'écart de la valeur à ajuster en intensifiant le gain, toutefois, cela entraîne une perte de stabilité du système.

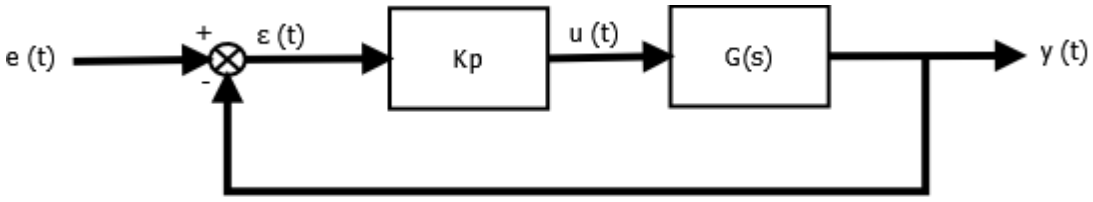


Figure 3- Schéma bloc du correcteur Proportionnel (P)

NB :On utilise le régulateur P lorsque l'on veut ajuster un paramètre dont la précision n'est pas primordiale.

2.4.2Correcteur Intégral (I)

La fonction de transfert est la suivante

$$C(s) = \frac{1}{Tis} \qquad (4.3)$$

et la commande du sysétme est la suivante :

$$u(t) = \frac{1}{Ti}\int \epsilon(\tau)d\tau \qquad (4.4)$$

Ce type de correcteur offre la possibilité d'éliminer l'erreur en continu, ce qui rend le système dynamique en réduisant le temps de réponse. Cependant, le défaut de ce correcteur est qu'il peut provoquer une instabilité si l'action intégrale est diminuée.

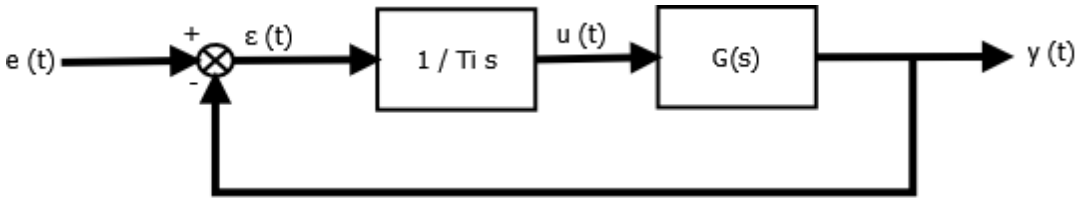


Figure 4- Schéma bloc du correcteur Int´egral (I)

2.4.3 Correcteur Dérivé (D)

La fonction de transfert du correcteur d´eriv´e est la suivante :

$$C(s) = Tds \qquad (4.5)$$

tandis que la loi de commande est de forme :

$$u(t) = Td\frac{d\epsilon(t)}{dt} \qquad (4.6)$$

Ce type de régulateur, qui améliore la réactivité et la stabilité du système, est couramment utilisé dans l'industrie pour le réglage de variables lentes comme la température. Cependant, son utilisation est déconseillée pour des variables trop dynamiques (comme la pression, par exemple...).

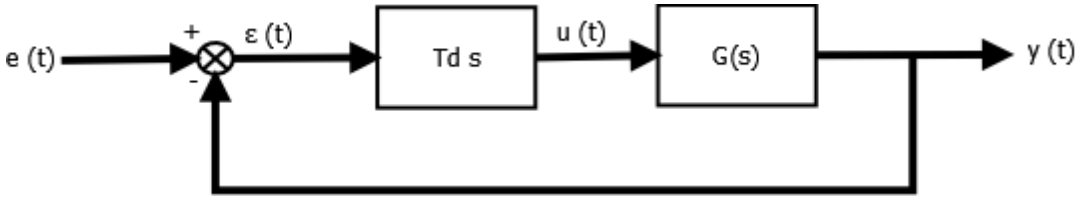


Figure 5- Schéma bloc du correcteur dérivé (D)

2.4.4 Correcteur Proportionnel-Intégral (PI)

La fonction de transfert comme suit :

$$C(s) = Kc + \frac{Kc}{Ti} = Kc\frac{1 + Tis}{Tis} \qquad (4.7)$$

L''equation de commande est la suivante :

$$u(t) = Kp\epsilon(t) + \frac{1}{Ti}\int \epsilon(\tau)d\tau \qquad (4.8)$$

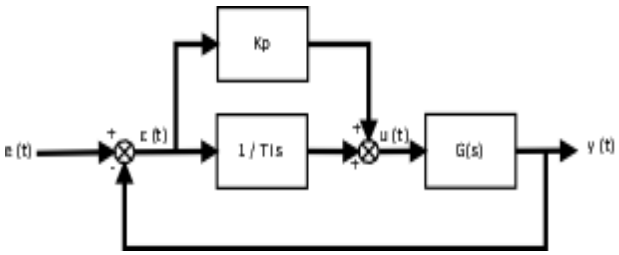


Figure 6- Schema bloc du correcteur PI

Notre travail est basé sur le type qui résulte de la combinaison d'un correcteur proportionnel et d'un correcteur intégral. Ce correcteur fonctionne sur la base de l'intégration de l'erreur depuis le début, puis de son addition à la consigne pour permettre la compensation de l'erreur.Statique et amélioration de la précision en régime permanent. Dans cette situation, l'intégrale sert de filtre sur le signal, contribuant ainsi à réduire les interférences (bruits, parasites) et produisant un système plus stable. Le problème lié à l'usage de ce correcteur est la potentialité d'une transgression de la directive due à un terme intégral excessif, entraînant ainsi une prolongation du temps de stabilisation.

NB : Le correcteur PI offre un équilibre optimal entre la stabilité et la précision.

2.4.5 Correcteur Proportionnel dérivé (PD)

Ce correcteur découle de la fusion d'un correcteur proportionnel et dérivé, sa fonction de transfert est comme suit :

$$C(s) = Kc(1 + Tds) \qquad (4.9)$$

L'´equation de commande est alors :

$$u(t) = Kc\epsilon(t) + KcTd\frac{d\epsilon(t)}{dt} \qquad (4.10)$$

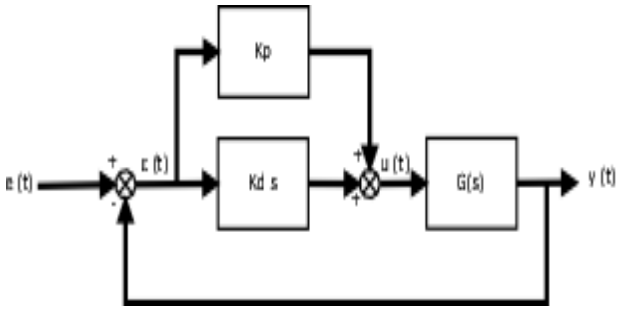


Figure 7- Schema bloc du correcteur PD

2.4.6 Commande Proportionnel-Intégral-Dérivé (PID)

À la différence des autres types de correcteurs, le PID répond à toutes les conditions requises. Sa fonction de transfert est comme suit :

$$C(s) = Kp + \frac{1}{Tis} + Tds \qquad (4.11)$$

L'emploi des contrôles proportionnel et intégral peut entraîner un dépassement du seuil et des oscillations, entraînant l'inversion de la polarité du moteur, ce qui est loin d'être optimal. Pour restreindre ce phénomène déplaisant, un troisième facteur est introduit : le terme dérivé. L'impact de celui-ci dépendra du signe et de la rapidité de l'évolution de l'erreur, et se distingue de l'effet proportionnel. Il est à noter que c'est le correcteur le plus couramment utilisé dans l'industrie. Cependant, son inconvénient réside dans la sensibilité au bruit générée par l'amplification des hautes fréquences. L'utilisation d'un filtre passe-bas entraîne une modification de la fonction de transfert.

$$C(s) = Kp + \frac{1}{Tis} + \frac{Tds}{1 + \frac{Td}{N}s} \qquad (4.12)$$

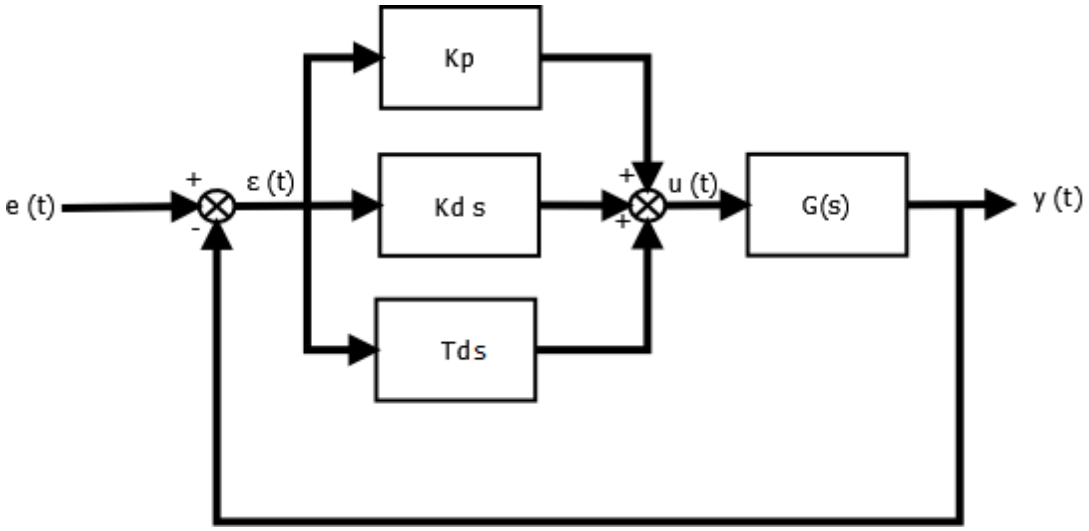


Figure 8- Schema bloc du correcteur PID

2.5 Conclusion

Le réglage avec des régulateurs PID, largement utilisé dans le secteur industriel, est particulièrement approprié pour de nombreux types de processus industriels. Ce chapitre a été élaboré pour examiner la théorie des trois actions du régulateur PID. Dans le cadre de notre projet, nous concentrons notre attention sur le régulateur.

Le Proportionnel d'Équipe (PI) régule la vitesse d'un moteur à courant continu en corrigeant l'erreur statique grâce à l'action intégrale.

Chapitre 4
Simulation et interprétation par MATLAB.

4.1. Introduction

Dans le secteur industriel, les moteurs à courant continu sont désormais très prisés pour leur fiabilité, leur simplicité et leur performance continue en termes de contrôle. On a élaboré plusieurs types de systèmes de contrôle pour gérer la vitesse du moteur à courant continu, parmi lesquels : le contrôleRégulation traditionnelle rhéostatique, intégralement proportionnelle (PI), ainsi que la régulation par logique floue.

Plus précisément, l'objectif de ce projet est de concevoir un régulateur à logique floue et un régulateur PI visant à assurer une vitesse constante pour un moteur à courant continu.

4.2. Description du système

Dans cette partie on va présenter et simuler de deux types de régulateurs conçus pour contrôler lavitesse de rotation une machine à courant continu alimentée par un convertisseur DC-DCélévateur. Cet convertisseur est représenté par un gain pour augmenter la tension d'induit. Lesparamètres de la machine à courant continu sont les suivantes :

- Résistance d'induit (R) = 6 Ω

- Inductance d'induit (L) = 0,5 H

- Moment d'inertie (J) = 0,1 kg·m²

- Coefficient de frottement visqueux (f) = 0,03 N·m·s/rad

- Constante de couple et de fcem (K) = 1 N·m/A et V·s/rad

- Vitesse nominale Nn =1500 tr/min

- Tension d'induit nominale Ua = 200 v

- Courant d'induit nominal Ia=5A

- Puissance mécanique nominale Pn= 0.75 Kw

4.3. Régulateur classique PID

La figure suivante représente le schéma bloc de simulation. Nous avons utilisé logiciel

MATLAB/Simulink pour réaliser le schéma fonctionnel de la MCC avec sa commande PID.

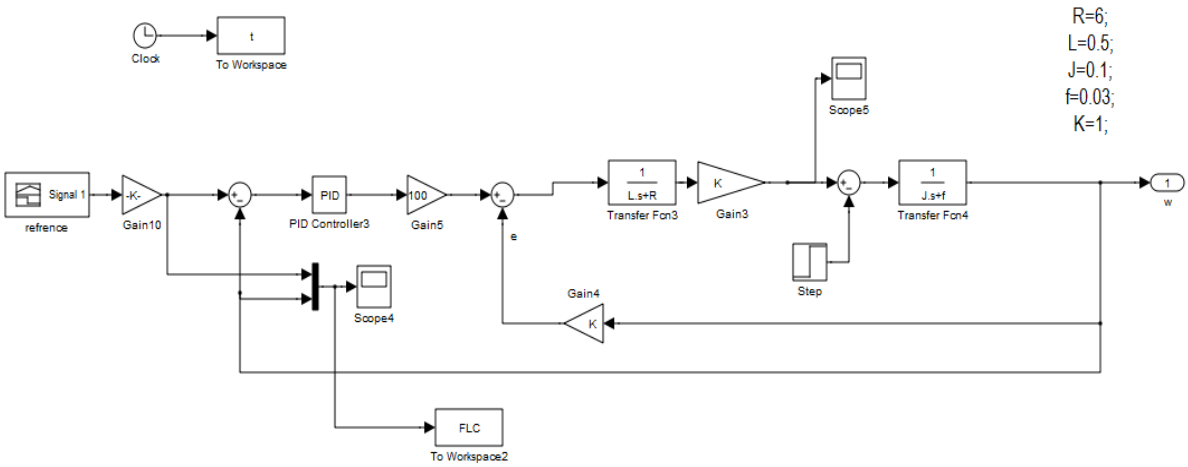


Figure 1Schéma bloc de simulation de la MCC commandée par le régulateur PID.

La figure (4.2) montre la réponse d'une machine à courant continu (MCC) dont la vitesse angulaire (en rad/s) est régulée à l'aide d'un correcteur PID. La réponse en boucle fermée est comparée à une consigne de vitesse de rotation (vitesse de référence).

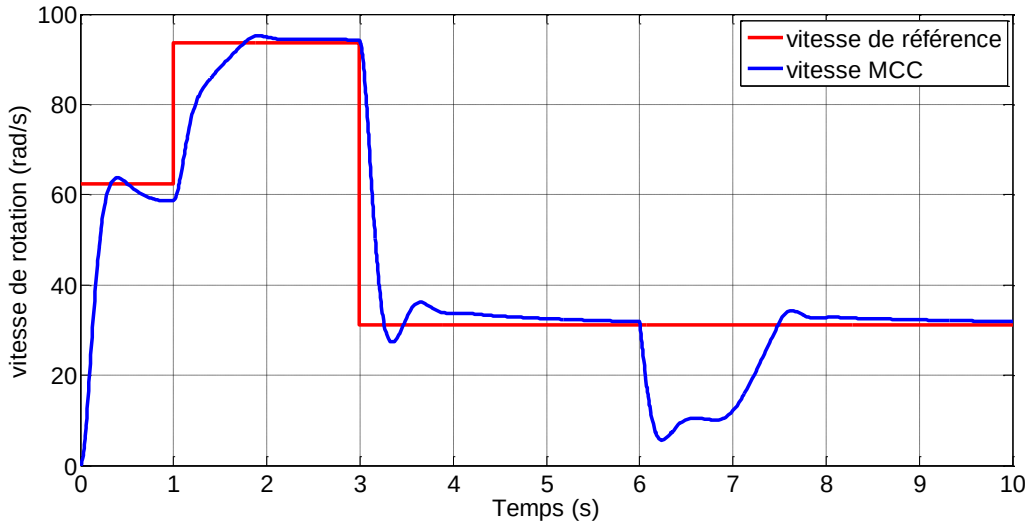


Figure 2la vitesse de rotation de la MCC (PID)

- Intervalle [0-1s] : Phase de démarrage et de montée initiale

• La vitesse commence à augmenter sous l'effet du régulateur PID, avec une réponse principalement dictée par le terme proportionnel (P).

• Aucune contrainte externe affectant le moteur à ce stade, donc la montée en vitesse est fluide et rapide.

- Intervalle [1-3s] : Phase transitoire et ajustement du PID

• La vitesse du moteur continue de progresser vers la consigne.

• Le terme intégral (I) compense l'erreur pour rapprocher la réponse du système de la consigne.

• La stabilité commence à s'établir autour de 100 rad/s, montrant une bonne régulation sans perturbation extérieure.

- Intervalle [3-6s] : Stabilisation avant l'application du couple résistant

• Le moteur atteint une stabilité relative, indiquant une bonne gestion de la dynamique sans contrainte externe.

• À ce stade, les paramètres PID permettent un ajustement optimal sans oscillations significatives.

- Intervalle [6-10s] : Impact du couple résistant (Cr=20 N.m)

• À 6s, l'application du couple résistant entraîne une chute brusque de la vitesse du moteur.

• Le terme proportionnel (P) réagit immédiatement pour compenser cette baisse, tandis que le terme intégral (ID) cherche à éliminer l'erreur progressivement.

• Le système retrouvera une nouvelle stabilité autour d'une vitesse ajustée après un long intervalle transitoire (de 6 à 7.5s).

• L'application d'un couple résistant à 6s perturbe la stabilité du moteur, nécessitant une action corrective du PID. Une bonne régulation permet un retour à une vitesse stable, bien que légèrement inférieure à la consigne.

4.4. Régulateur flou

La figure suivante représente le schéma fonctionnel de la MCC avec le régulateur flou.

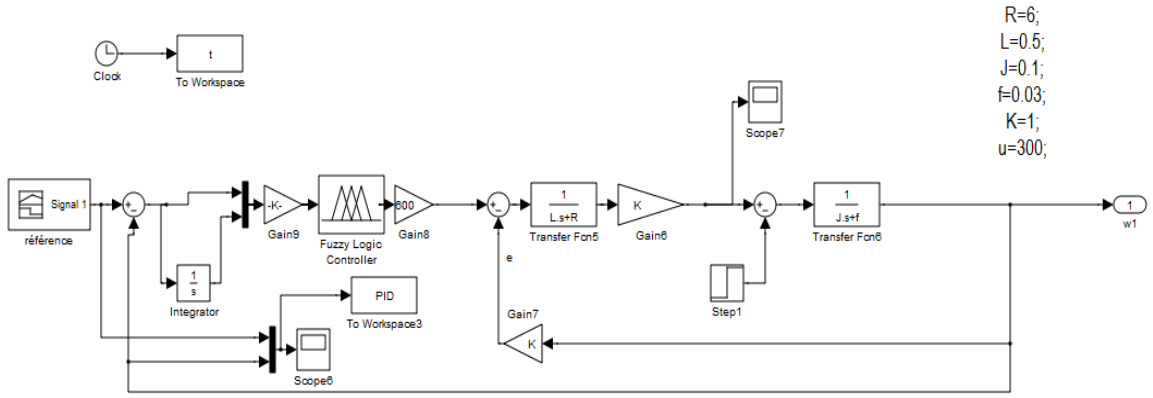


Figure 3Schéma bloc de simulation de la MCC commandée par le régulateur flou

La figure (4.4) illustre la réponse dynamique d'une **machine à courant continu (MCC)** dont la **vitesse de rotation** est commandée à l'aide d'un **régulateur flou** (Fuzzy Logic Controller, FLC). La consigne de vitesse est en rouge. La courbe bleue montre la vitesse réelle de la MCC en réponse à cette consigne.

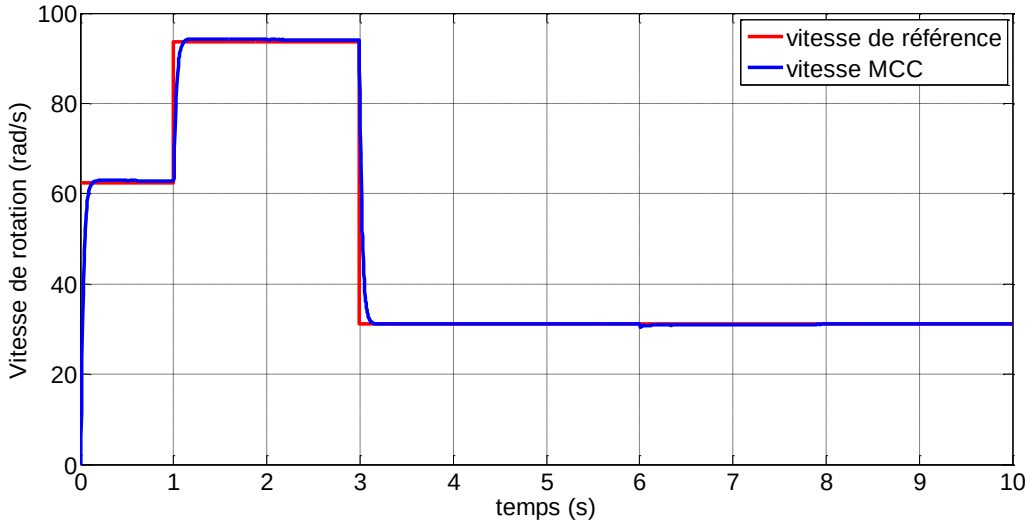


Figure 4la vitesse de rotation de la MCC (Flou)

- *Intervalle [0-1s] : Phase de démarrage et réponse initiale*

- La vitesse du MCC commence à augmenter vers la consigne de ~**60rad/s**.
- Contrairement au PID, la régulation floue ajuste dynamiquement les actions de commande selon les règles floues préétablies.
- On observe une montée plus **progressive et douce**, réduisant les risques de dépassement excessif.

2. Intervalle [1-3s] : Phase transitoire et adaptation du contrôleur flou

- La vitesse approche la consigne et la régulation floue affine les corrections sans dépendre de gains fixes comme le PID.
- L'**absence d'oscillations fortes** montre un ajustement stable, évitant les surcompensations potentielles du PID.
- Le moteur affiche une meilleure **réactivité adaptative**, ajustant finement la commande selon les variations d'état.

3. Intervalle [3-6s] : Stabilisation avant l'application du couple résistant

- Une **stabilité progressive** est observée autour de **100 rad/s**, avec une transition fluide vers le régime permanent.
- Contrairement au PID, la logique floue ne génère pas d'oscillations marquées, assurant une meilleure continuité dans la régulation.

4. Intervalle [6-10s] : Impact du couple résistant (20 N.m)

- **À 6s**, l'application du couple résistant entraîne une **baisse de vitesse**, mais la régulation floue s'adapte de manière **souple**.
- La réponse du système est **moins brutale qu'avec un PID**, grâce à une **correction graduelle** selon les règles floues.
- La vitesse s'ajuste et retrouve une **valeur stable sans oscillations excessives**, montrant une **meilleure robustesse aux perturbations externes**.

L'effet du couple résistant à 6s est mieux absorbé, offrant une stabilisation **plus efficace** qu'une approche PID classique.

4.5. Comparaison entre les deux régulateurs

La courbe représente l'évolution de la vitesse de rotation (en rad/s) d'une machine à courant continu en fonction du temps (en secondes). La vitesse de référence (courbe rouge) sert de consigne, tandis que les régulateurs PID (courbe verte) et flou (courbe bleue) ajustent la vitesse réelle de la machine.

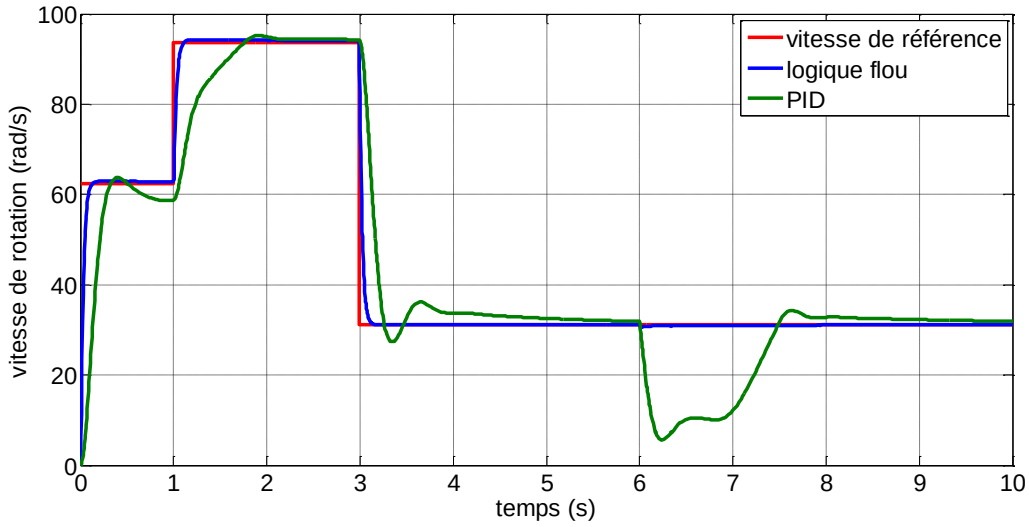


Figure 5la vitesse de rotation de la MCC (PID-Flou)

Le système régulé par logique floue présente une **excellente performance dynamique** :

- Régime transitoire court,
- Stabilisation rapide sans dépassement,
- Aucun comportement oscillatoire,
- Erreur statique nulle.

Ces résultats confirment que le **régulateur flou constitue une alternative très performante au PID**, notamment lorsque la robustesse, la douceur de fonctionnement et la non-linéarité du système sont des critères critiques.

Le tableau suivant montre la comparaison entre le régulateur PID et flou :

Critère	Régulateur PID (Vert)	Régulateur Flou (Bleu)
Temps de réponse	Rapide	Plus progressif
Dépassement	Présent	Minimal
Stabilité	Moyenne (fluctuations légères)	Très stable
Adaptabilité aux non-linéarités	Moins adaptable	Plus robuste

La figure (4.6) représente la comparaison entre les deux régulateurs lorsque on a une variation du sens de rotation du MCC d'une valeur de la vitesse positive à une autre négative.

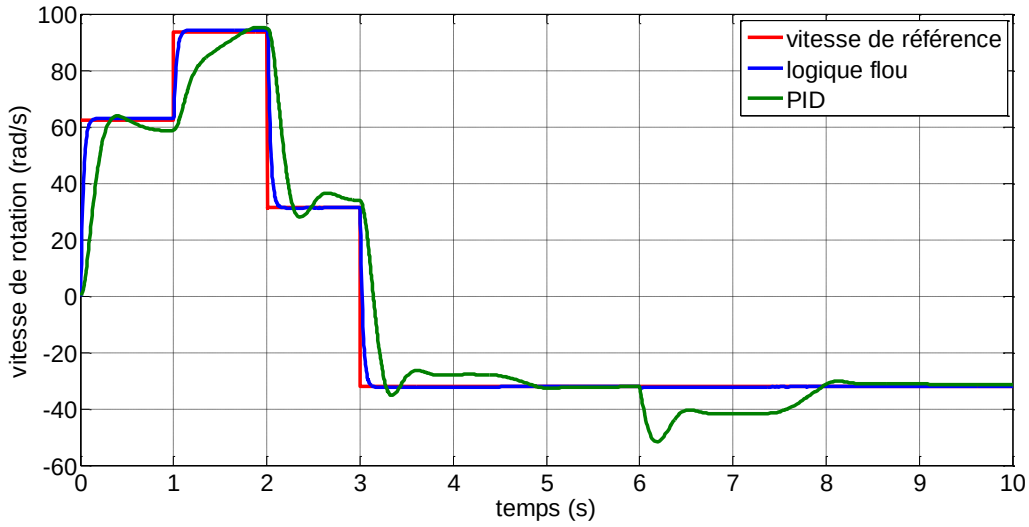


Figure 6la vitesse de rotation de la MCC (PID-Flou)

- **Phase de transition (3-10s) :** Dès que la consigne passe en négatif, le PID réagit avec des oscillations. La logique floue, plus progressive, minimise ces fluctuations et assure une transition plus douce. Le régulateur flou offre une grande stabilité sans dépassements marqués par rapport au régulateur classique PID.

4.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné les caractéristiques du moteur à courant continu associé à un convertisseur DC-DC élévateur. Après avoir déterminé diverses spécifications et pour faciliter la comparaison des résultats, nous avons réussi à implémenter deux types de configurations. Un régulateur traditionnel PI et un régulateur flou sont les deux types de régulateurs. Les diagrammes de réponse en fréquence démontrent que les deux régulateurs produisent des résultats intéressants. Le régulateur flou, lorsqu'il est associé à une action intégrale, présente de meilleures performances que le PI grâce à sa réponse de contrôle précise et sa stabilité (moins de dépassements).

Conclusion générale

Conclusion générale

Après la mise en œuvre des deux méthodes de régulation sur l'environnement SIMULINK, les résultats obtenus ont permis d'évaluer leurs performances respectives en termes de réponse dynamique. Il en ressort que les deux types de régulation assurent un bon comportement du système, mais la commande floue s'est distinguée légèrement par sa capacité à offrir une meilleure rapidité, une précision accrue ainsi qu'une stabilité améliorée, notamment en présence d'une action intégrale. Ainsi, nous pouvons affirmer que la régulation par logique floue représente une alternative plus performante par rapport au régulateur PI classique dans le contexte étudié.

Bibliographie

Bibliographie

- ✓ S. KHELKHAL, la logique floue et le contrôle avancé en milieu industriel. 2004
- ✓ François CHEVRIE et François GUÉLY la logique floue Cahier Technique Schneider n°
- ✓ 191, édition mars 1998
- ✓ Dif Nihad Triki Razika, „„Synthèse d‟‟un contrôleur PID pour la commande d‟‟une
- ✓ MCC‟‟‟‟, Mémoire de Master Option:Informatique Industrielle, Université de Larbi
- ✓ BenM‟‟hidi–Oum El Bouaghi, 2010/2011.
- ✓ M.Boes, J.Vaillant, D.Verkindére, G.Chateigner,D.Bouix, Manuel de génie électrique,
- ✓ Dunod, Paris. 2006
- ✓ Ayeb Fakhreddine , „„Conception et implémentation d'une commande PID numérique
- ✓ G. CHEN - T.T PHAM, "Introduction to fuzzy sets, fuzzy logic and fuzzy control systems", CRC Press, 2000.
- ✓ R. HAMPEL - M. WAGENKNECHT - N. CHAKEN, "Fuzzy Control, Theory and Practice", Springer Science and business media, 2013.
- ✓ BOUSGHAYA Imed, "Etude d'un hacheur `a stockage capacitif", PFE- Universit´e LARBI Ben M'hidi, OUM EL BOUAGHI, 14 Juin 2014.
- ✓ S. MOUSSAOUI , "Commande floue d'un moteur `a courant continu (MCC), comparaison avec la commande PID", PFE- Universit´e Abderrahmane Mira, Bejaia, 2017.