

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Electrotechnique

Spécialité : Commandes électriques

Par : Sihem AOUIMER

Et Dounia KEFIF

Sujet

**Commande adaptative et prédictive de la
machine à courant continu à excitation séparée**

Soutenu en vidéo conférence, le 06 / 07 / 2021 devant le jury composé de :

Abdelmadjid BOUMEDIENE	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
Mohamed Haithem LAZREG	Maitre assistant 'B'	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
Mourad LOUCIF	Maitre de conférences 'B'	Univ. Tlemcen	Examineur 1

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

In the name of Allah, the Beneficent, the Merciful

Dedicaces 1

Avec l'aide de Dieu tout puissant, nous avons achevé ce modeste travail que je dédie :

- À ma très chère mère qui m'a donnée la force d'affronter la vie, c'est grâce à ses sacrifices et ses précieuses conseils que je suis ici fièrement, que Dieu la garde pour toujours.

- À mon cher père ,qui m'a soutenu de loin.
Je les remercie de leurs soutiens permanents durant toutes mes années d'études.

- À mon adorable sœur ,et à mes frères.

- À ma sœur de réalisation de ce travail "KEFIF Dounia" .

- Et je remercie de tout mon cœur à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour réaliser ce projet.

- Que Dieu vous garde en vie et vous bénisse .

Sihem AOUIMER
Tlemcen, Juillet 2021

Dedicaces 2

Avec l'aide de Dieu tout puissant, nous avons achevé ce modeste travail que je dédie :

À mon cher Papa :

Grâce à toi je réussis d'atteindre ce moment. En guise de reconnaissance, trouve ici mon amour filial.

Ma réussite est la tienne ! Qu'Allah t'accorde longue vie dans la santé !

À ma chère Mama :

Pour les inestimables sacrifices que tu as consentis pour moi, tu as tant souhaité que je parvienne à ce but.

Je te serai reconnaissant toute ma vie, Qu'Allah t'accorde longue vie dans la santé !

À mes chers frères "Brahim" et "Sid-Ahmed" :

Ma source de joie et de bonheur.

À ma sœur "AOUIMER Sihem" :

Ma compagne dans la réalisation de ce travail.

À toute la famille "KEFIF", "BENTALEB" et "BELARBI" :

Ma source d'espoir et de motivation.

À mon encadreur LAZREG Mohamed Haithem :

Ton générosité et ton soutien m'obligent à te remercier sur ce dédicace.

- À tous mes amis de près et de loin .

Dounia KEFIF
Tlemcen, Juillet 2021

Remerciements

Ce document présente les travaux effectués dans le cadre de notre projet de fin d'étude de Master au Département de Génie Électrique et Électronique de la Faculté de Technologie de l'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen.

En premier lieu, nous tenons à exprimer notre gratitude à notre encadrant, le Docteur Mohamed Haithem LAZREG, Maître Assistant B à l'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, pour nous avoir proposé et dirigé ce travail, nous le remercions pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion pour nous avoir fait profiter de leur expérience, pour orientations qui nous ont permis de mener à bien ce travail.

Nous sommes sensibles à l'honneur que nous a fait monsieur Abdelmadjid BOUMEDIENE, Professeur à l'Université Abou Bekr Belkaïd, pour avoir accepté de présider et de nous honorer de sa présence au sein du jury de soutenance du présent mémoire ; qu'il trouve ici l'expression de notre reconnaissance et de notre respect.

Nous tenons également à adresser nos vifs remerciements au Docteur Mourad LOUCIF, Maître de Conférence B à l'Université Abou Bekr Belkaïd, nous le remercions chaleureusement pour avoir accepté d'examiner le présent mémoire et pour ses observations et remarques pertinentes et constructives.

Enfin, nous portons de remerciements nos parents, pour leur soutien constant et leurs encouragements.

Merci enfin à tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont aidé et donc ont contribué au succès de ce travail.

Sihem AOUIMER Dounia KEFIF
Tlemcen, Juillet 2021

TABLE DES MATIÈRES

DEDICACES 1	i
DEDICACES 2	ii
REMERCIEMENTS	iii
NOMENCLATURE	ix
GLOSSAIRE	xii
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
I L'ETAT DE L'ART DE LA COMMANDE AVANCÉE	2
I.1 INTRODUCTION :	3
I.2 DIFFÉRENTS TYPES DE LA COMMANDE AVANCÉE :	3
I.2.1 La commande adaptative :	3
I.2.1-a Définition :	3
I.2.1-b Domaines d'applications :	6
I.2.1-c Les avantages de la Commande adaptative :	7
I.2.2 La commande prédictive :	7
I.2.2-a Définition :	7
I.2.2-b Domaines d'applications :	7
I.2.2-c Les avantages de la Commande prédictive :	7
I.2.3 La commande optimale :	7
I.2.3-a Définition :	7
I.2.3-b Domaines d'applications :	8
I.2.3-c Les avantages de la commande optimale :	8
I.2.4 La commande neuronale :	8
I.2.4-a Définition :	8
I.2.4-b Domaines d'applications :	9
I.2.4-c Les avantages de la commande neuronale :	10
I.3 CONCLUSION :	10
II MODÉLISATION DE LA MCC	11
II.1 INTRODUCTION	12
II.2 DESCRIPTION D'UNE MACHINE À COURANT CONTINU :	12
II.2.1 Constitution de la MCC :	12
II.2.2 Les types de la MCC :	13

II.2.2-a	Machine à aimants permanents :	13
II.2.2-b	Moteurs à inducteur bobiné :	14
II.2.3	Domaines d'applications de la MCC :	15
II.2.4	Les avantages et les inconvénients de la MCC :	16
II.2.5	Modélisation de MCC :	16
II.2.5-a	Equation différentielle :	16
II.2.5-b	Equation d'état :	17
II.2.5-c	Fonction de transfert d'un MCC :	18
II.2.6	Résultat de simulation de MCC :	19
II.2.7	Interprétation des résultats :	19
II.3	HACHEUR :	20
II.3.1	Hacheur série :	21
II.3.1-a	Les interrupteurs électroniques :	21
II.3.2	Principe du Hacheur :	22
II.3.2-a	Application au moteur :	22
II.4	RÉGULATEUR :	24
II.4.1	Régulateur PI :	24
II.4.2	Résultats de simulation :	26
II.4.3	Interprétation des résultats :	26
II.5	CONCLUSION :	28
III	LA COMMANDE ADAPTATIVE DE LA MCC	29
III.1	INTRODUCTION :	30
III.2	COMMANDE ADAPTATIVE :	30
III.2.1	Concept de la commande adaptative :	30
III.3	COMMANDE ADAPTATIVE AVEC MODÈLE DE RÉFÉRENCE :	31
III.3.1	Historique et principe de base :	31
III.3.2	Définition :	32
III.3.3	Structures de système MRAC :	32
III.4	AVANTAGE DE SYSTÈME MRAC :	33
III.5	APPLICATION DE LA COMMANDE ADAPTATIVE SUR LE MOTEUR À COU- RANT CONTINU :	33
III.6	RÉSULTAT DE SIMULATION :	37
III.7	CONCLUSION :	39
IV	LA COMMANDE PRÉDICTIVE DE LA MCC	40
IV.1	INTRODUCTION :	41
IV.2	LA COMMANDE PRÉDICTIVE :	41
IV.2.1	Définition :	41
IV.2.2	Principe de la commande prédictive :	41
IV.2.3	Éléments d'une commande prédictive :	42
IV.3	LA COMMANDE PRÉDICTIVE GÉNÉRALISÉ :	42
IV.3.1	Historique :	42
IV.3.2	Définition :	42
IV.3.3	Principe de la commande prédictive généralisé :	42

IV.3.4	Modélisation de la commande prédictive généralisé :	43
IV.3.4-a	Le cas sans contrainte :	43
IV.3.4-b	Le cas avec contrainte :	45
IV.3.5	Application de la GPC sur la MCC :	47
IV.3.6	Avantages de modèle de CARIMA :	47
IV.4	RÉSULTAT DE SIMULATION	47
IV.5	ETUDE COMPARATIVE :	49
IV.6	CONCLUSION :	50
	CONCLUSION GÉNÉRALE	51
	BIBLIOGRAPHIE	53
	ANNEXE	1

TABLE DES FIGURES

I.1	La commande adaptative directe	4
I.2	La commande adaptative indirecte	4
I.3	Commande par gain programée	5
I.4	Commande à modèle de référence	5
I.5	Commande par contrôleur auto-ajustable	6
I.6	Commande dual	6
I.7	Réseau de neurone	9
II.1	Principe de fonctionnement de la MCC	12
II.2	Constitution de MCC	13
II.3	Machine à aiment permanents	13
II.4	Moteur à excitation shunt	14
II.5	Moteur à excitation série	15
II.6	Moteur à excitation composée	15
II.7	Modèle électrique et mécanique	16
II.8	Schéma block de MCC	19
II.9	La vitesse rotorique	19
II.10	Le couple électromagnétique	19
II.11	Le courant	20
II.12	Convertisseur continu(DC)-continu(DC)	20
II.13	Hacheur série	21
II.14	1 èr cas	21
II.15	2ème cas	22
II.16	Modèle électrique complet de moteur et de bobine de lissage	22
II.17	Modèle électrique complet de moteur et de bobine de lissage	24
II.18	Asservissement par régulateur PI	25
II.19	Schéma global	25
II.20	La vitesse rotorique de la commande PI	26
II.21	L'erreur de vitesse de commande PI	26
II.22	Le couple électromagnétique de commande PI	26
II.23	Le courant de commande PI	27
II.24	La tension continue de commande PI	27
II.25	La tension d'alimentation de commande PI	27
II.26	Les impulsions de commande PI	28
III.1	Principe générale de la commande adaptative	30
III.2	Structure de la commande adaptative à modèle de référence	32

III.3	Structure parallèle de système MRAC	32
III.4	Structure série de système MRAC	33
III.5	Structure série parallèle de système MRAC	33
III.6	Schéma de commande MRAC de la M.C.C	37
III.7	Résultat de vitesse rotorique	37
III.8	La courbe de couple électromagnétique	38
III.9	La courbe de courant	38
III.10	La courbe de l'erreur	38
IV.1	Principe de la commande prédictive	41
IV.2	La stratégie de la commande prédictive	42
IV.3	Schéma principe du GPC	43
IV.4	Modèle CARIMA	44
IV.5	Valeur de N1 pour un système à phase non minimale	46
IV.6	Valeur de N2 pour un système à phase non minimale	46
IV.7	Résultat de vitesse rotorique	48
IV.8	La courbe de couple électromagnétique	48
IV.9	La courbe de courant	48
IV.10	La courbe de l'erreur	49
IV.11	Comaparaision entre les différents techniques de commande	49
12	Schma bloc PI de MCC	2
13	Schéma bloc de la commande adaptative	3
14	Programme de la commande prédictive	3

Nomenclature

Les principales notations et abréviations utilisées dans cette thèse sont explicitées ci-dessous, sous leur forme la plus couramment employée dans le domaine du génie électrique.

Indices et exposants

Constantes

Nom	Symbole	Valeur	Unité
Couple de charge	C_r	25	N.m

Grandeurs électriques et mécaniques

Nom	Symbole	Unité
Sortie de système	$Y(t)$	V Temps
t	s	
Tension	U	V
Courant	I	A
Couple électrom gnitique	$C_e m$	N.m
Couple moteur	$C(m)$	N.m
Couple résistant	$C(r)$	N.m
Couple de frottement	$C(f)$	N.m
Fréquence	f	Hz
Pulsation électrique	ω	rad/s
Pulsation mécanique de rotation	$\Omega(m)$	rad/s
Moment d'un couple	C	mN °
Angle (position)	θ	, rad
Période	T	s
Période d'échantillonnage	T_e	s
Vitesse de rotation	w	rad/s
Fréquence de porteuse	f_p	Hz
Coefficient de frottement de visqueux	f
Incrément de commande	$\Delta(u)$	V
Référence (ou consigne)	W	rad/s
Erreur de poursuite	e	/
Consigne	w	rad/s
Pulsation	w_0	rad/s
Coefficient d'amortissement	ξ	/
Fonction de Lyapunov	V	/
Degré relatif	r	/
Ordre e contrôle	ρ	/
Matrice d'état	A	/
Matrice de commande	B	/
Critère quadratique	J	/
Matrice quadratique	Q	/
Dynamique de l'errere statique	e	/
Opérateur retard	Z^{-1}	/

Nom	Symbole	Unité
Bruit blanc	$\xi(t)$	/
Opérateur de différence	$\Delta(Z^{-1} - 1)$	/
Coefficient de pondération	λ	/
Horizon de prédiction minimal	$N(1)$	/
Horizon de prédiction maximal	$N(1)$	/
Horizon de commande	$N(1)$	/
Sortie prédit	\hat{Y}	/

Paramètres

Nom	Symbole	Unité
Impédance	Z	Ω
Réactance	X	Ω
Résistance	R	Ω
Inductance	L	H
Moment d'inertie	J	kg.m ²
Coefficient de frottement	f_v	N.s/rad
Courant d'induit	I_a	A
Résistance d'induit	R_a	Ω

Glossaire

Acronyme	Signification
MCC	Moteur a courant continu
MIAC	Modèle de commande adaptative indirect
MRAC	Commande adaptative a modèle de référence
PID	Correcteur(Proportionnel-Integrale-Dérivée)
STR	Méthode gestion de l'énergie(Short-Tendem-Repeat)
LQR	Linéar-Quadratique-Régulateur
barage-EDF	Barage d'eau produit l'électricité
ABS	Anti block system
EMF	Force électromagnétique
FCEM	Force contre électromotrice
PLC	Programmable logic controller
GPC	Commande prédictive généralisé
CARIMA	Modèle de commande prédictive
CA	Commande adaptative
CP	Commande prédictive

Introduction générale

Dans la plupart des procédés industriels, en particulier les moteurs électriques, il est la maîtrise de certains paramètres physiques (vitesse, position, angle, etc.) est essentielle on doit donc recourir aux commandes.

La commande adaptative et la commande prédictive sont des commandes d'automatique avancé. Il est né des besoins réels de l'industrie. Une sorte de besoin d'un système de réglage plus performant que le contrôleur traditionnellement PI, tout en observant des restrictions d'exploitation et de production de plus en plus élevées.

La stratégie qui on a résulté a conduit à la mise en oeuvre de deux principales technologies adaptatives , il a été mis en oeuvre dans la pratique et largement utilisé. L'une s'appelle commande direct modèle de référence (MRAC), la second implique le contrôle reconnaissance indirecte de modèle adaptatif (MIAC).

Dans ce travail, nous intéresserons au commande adaptative direct sur la base du modèle de référence minimisé (MRAC) et la commande prédictive généralisée.

La commande adaptative direct sur la base du modèle de référence minimisé (MRAC) des indicateurs de performance, stratégie (MRAC) spécifiez la forme souhaitée de la réponse du processus au signal de commande en l'intermédiaire du modèle de référence défini par les paramètres, donc performance idéale en boucle fermée. Ensuite, en fonction de la sortie du processus et la sortie du modèle est conçue avec un ensemble de paramètres afin que la différence entre les deux la sortie tend vers zéro.

La philosophie du la commande prédictive se résume à utiliser des modèles pour prédire le comportement du système et choisir la meilleure décision dans un certain sens du coût, et respect des contraintes . Commande prédictive (ou compensation ou correction anticipator) est conçu pour contrôler des systèmes industriels complexes. principe de cette technique est réalisée en utilisant un modèle dynamique du processus interne du contrôleur prédisent le comportement futur du processus en temps réel.

Ce mémoire est présenté en quatre chapitres :

- Le premier chapitre introduit l'état de l'art de différents types de la commande avancée ;
- le deuxième chapitre traité une étude de la MCC et sa modélisation avec simulation ;
- le troisième chapitre concerne a la commande adaptative et son concept et on précisé sur le modèle de référence MRAC ;

— le quatrième chapitre présente la commande prédictive avec ses principes, on a précisé sur l'étude GPC.

Enfin, on termine ce mémoire par une conclusion général

Chapitre I

L'état de l'art de la commande avancée

SOMMAIRE

I.1	INTRODUCTION :	3
I.2	DIFFÉRENTS TYPES DE LA COMMANDE AVANCÉE :	3
I.2.1	La commande adaptative :	3
I.2.2	La commande prédictive :	7
I.2.3	La commande optimale :	7
I.2.4	La commande neuronale :	8
I.3	CONCLUSION :	10

I.1 Introduction :

Le monde connaît un grand développement ces derniers temps et touche plusieurs domaines, et l'un des domaines de recherche les plus actifs est celui des techniques de contrôle avancées. En même temps, nous disposons de calculatrices puissantes et de divers outils logiciels. Cela facilite la synthèse de l'exécution de lois de commande avancées sans difficultés en temps réel.

L'étude présentée dans ce chapitre a pour objectif de connaître les différents types de la commande

I.2 Différents types de la commande avancée :

I.2.1 La commande adaptative :

I.2.1-a Définition :

L'adaptation d'un système à son environnement réside dans la possibilité de réagir face aux variations que peut subir cet environnement. Avec les développements successifs de l'automatique moderne, on s'est aperçu qu'un régulateur fixe ne pouvait pas toujours fournir un comportement acceptable du système en toute situation. En particulier, lorsque les processus à commander possèdent des paramètres variant dans le temps, la conception d'un régulateur fixe satisfaisant toujours les spécifications requises s'avère très difficile.

La commande adaptative est une commande dont le but est de réagir à tout instant dans le sens désiré (en générale minimisation de l'erreur entre la consigne et la sortie) face aux variations que subit le système [2].

Les approches de commande adaptative peuvent être classées en deux classes :

- La commande adaptative directe ;
- La commande adaptative indirecte.

LA COMMANDE ADAPTATIVE DIRECTE :

L'idée est de calculer les paramètres du régulateur, mais il n'est pas nécessaire d'identifier clairement les paramètres du système, il suffit donc d'une étape pour prouver qu'il est raisonnable de contrôler directement la chaleur. Cette technique introduit généralement des algorithmes plus rapides et est propice aux applications en temps réel. La figure suivante illustre ce type de commande : pour ce type de commande, la performance en boucle fermée est spécifiée par le Y_m du modèle de référence sélectionné par l'utilisateur, de manière cohérente avec les possibilités inhérentes au système [7].

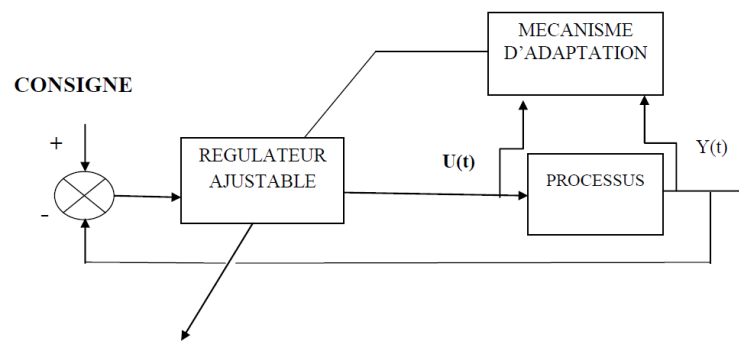


FIGURE I.1 – La commande adaptative directe

LA COMMANDE ADAPTATIVE INDIRECTE :

Le principe du contrôle adaptatif indirect repose sur la reconnaissance modèles de systèmes en ligne et en temps réel. Ensuite, utiliser ce nouveau modèle après calcul, le régulateur répond à la spécification nominale est nouvellement développé. Pour cette raison, la technologie adaptative indirecte à grande échelle à adopter est largement utilisée. En pratique, ces contrôles adaptatifs indirects avec reconnaissance de modèle (MIAC) [15].

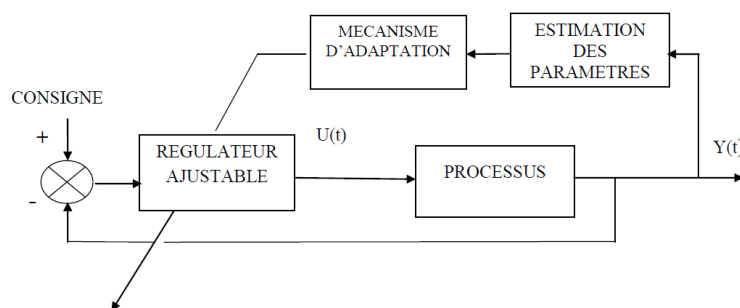


FIGURE I.2 – La commande adaptative indirecte

Il existe quatre principaux types d'approche de commande adaptative [2] :

a) Commande par gain programmé (Gain scheduling) :

La commande adaptative à gain préprogrammée consiste en une table de traitement et une logique appropriée pour détecter le point de fonctionnement et choisir la valeur correspondante des gains du régulateur à partir de la table de traitement. Avec cette approche, les variations des paramètres du système peuvent être compensées en modifiant les gains du régulateur en fonction des mesures d'entrée, et sortie et mesures auxiliaires.

L'avantage de la programmation du gain est que les gains du régulateur peuvent être modifiés aussi rapidement que les mesures répondent aux changements de paramètres. Cependant, des changements fréquents et rapides des gains du régulateur peuvent entraîner une instabilité ; par conséquent, il y a une limite à la fréquence et à la rapidité avec laquelle le régulateur peut être modifié .

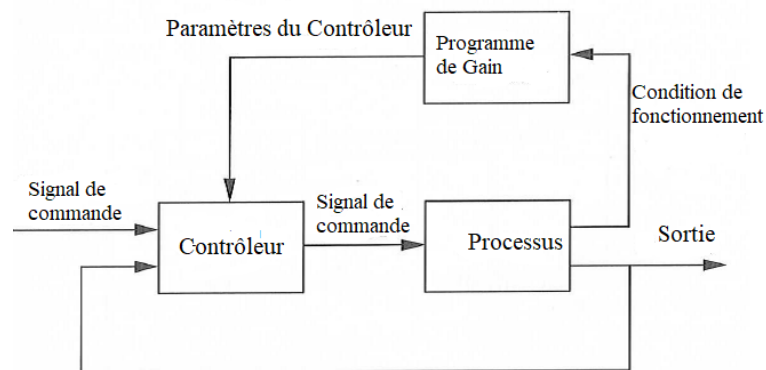


FIGURE I.3 – Commande par gain programmée

b) Commande adaptative à modèle de référence (MRAC) :

La commande adaptative avec le modèle de référence consiste à adopter le contrôleur d'une manière pour le processus de se comporter en tant que modèle de référence. La détermination de la loi de contrôle adaptative permet à la réponse du système de suivre le modèle même en présence de perturbations lors de l'agissant sur l'activité dynamique du système.

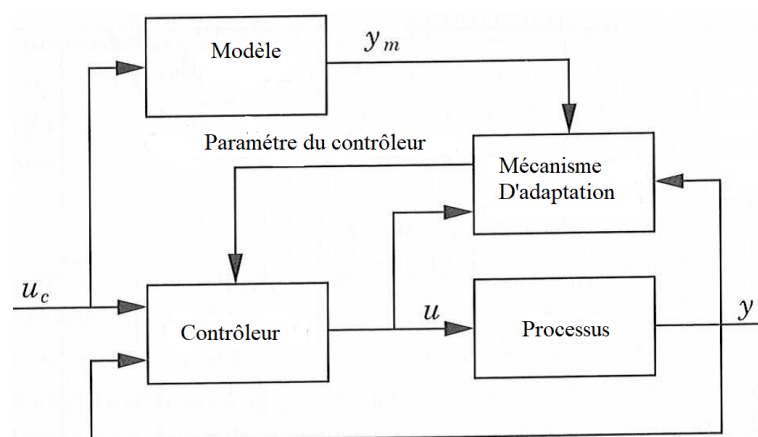


FIGURE I.4 – Commande à modèle de référence

c) Contrôleurs auto-ajustable (Self-Tuning) : Cette commande fait partie des contrôles d'adaptation indirects. Les paramètres du système sont estimés et utilisés dans le calcul des paramètres du contrôleur. L'architecture de contrôle contient deux boucles : une boucle de contrôleur interne et une boucle de réglage externe de ses paramètres. Cette commande est appelée en raison du fait que le contrôleur ajuste automatiquement sa configuration pour obtenir les propriétés de boucle fermée souhaitée, cette approche est très flexible dans

le choix du contrôleur et l'estimateur, ainsi que plusieurs combinaisons ont émergé (PID-STR, LQR-STR, etc.)

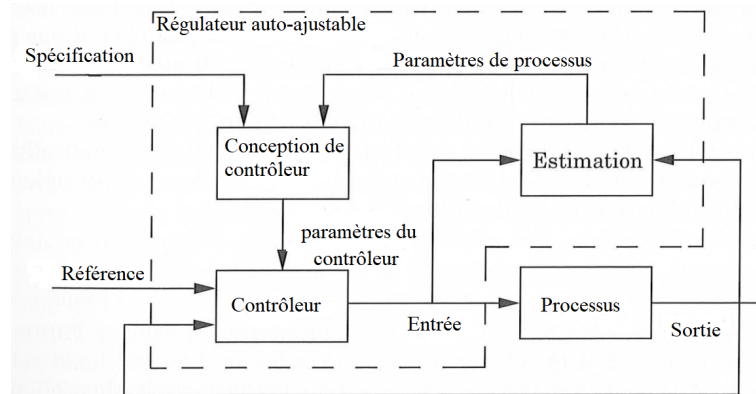


FIGURE I.5 – Commande par contrôleur auto-ajustable

d) Commande duale (Dual control) : Dans les approches précédentes, les paramètres d'estimation des paramètres (contrôleur ou système) ne sont pas assurés et ces incertitudes sont considérées comme stochastiques. L'approche est tellement compliquée qu'elle n'a pas été appliquée dans la pratique.

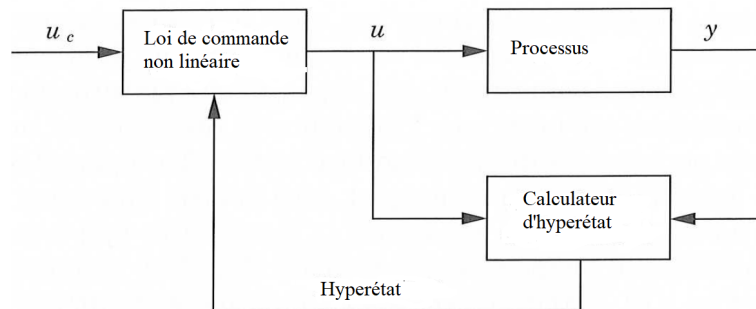


FIGURE I.6 – Commande duale

I.2.1-b Domaines d'applications :

Lorsqu'il est techniquement nécessaire et économiquement réalisable, la commande adaptative peut être utilisée. La technologie de la commande adaptative a été utilisée avec succès dans de nombreuses applications, par exemple : Entraînement par moteur électrique ; Robot de manipulation ; Réacteur de cimenterie ; Machine à papier de tour de distillation chimique ; Réglage Ph ; Système d'arme ; Echangeur de chaleur.

Aujourd'hui et à cause du développement des cartes à microprocesseurs qui servent de support pour la mise en œuvre, le système de CA connaît un essor certain à cause de la complexité raisonnable. En ce qui concerne la rentabilité, les éléments suivants sont à prendre en compte :

- Amélioration de la qualité des produits.

- Augmentation de la production.
- Economie dénergie.
- Espacement des arrêts dentretien et détection précoce des anomalies [2].

I.2.1-c Les avantages de la commande adaptative :

La commande adaptative apporte une solution à la commande des systèmes à paramètres variables et inconnues

I.2.2 La commande prédictive :

I.2.2-a Définition :

La commande prédictive à base de modèle cest une approche de commande avancée. De toutes les commandes qui portent cette appellation, la commande prédictive est la plus utilisée dans l'industrie, aussi bien pour les qualités techniques et ses performances ainsi que sa facilité de mise en uvre. Son champ d'application s'étend à tous les domaines industriels, notamment aux cas où la régulation PID n'est pas efficace [15].

I.2.2-b Domaines d'applications :

La commande prédictive est utilisée avec succès pour un grand nombre d'applications, par exemple :

- Industrie pétrolière (Commande des actionneurs électromécaniques ; Robotique).
- Industrie chimique (Commande de la poursuite de trajectoire des systèmes de navigation aérienne navale) [9].

I.2.2-c Les avantages de la commande prédictive :

- La commande prédictive peut être utilisée pour commander une grande variété de processus, ceux avec des dynamiques simples à ceux plus complexes, par exemple les systèmes à grand retard, à phases non minimales ou instables.
- Le concept de la commande est facile à comprendre car il est intuitif.
- Son principe intuitif et le réglage relativement facile de ses paramètres la rendent accessible aux personnes avec des connaissances limitées en automatique [9].

I.2.3 La commande optimale :

I.2.3-a Définition :

La commande optimale est née dans les années 1960 dans le domaine de l'aéronautique [Åström et Wittenmark, 1994] [15] . L'objectif était de déterminer les paramètres optimaux pour le pilotage automatique. Un contrôle optimal cherche à maximiser le rendement d'un système pour le coût minimum. En termes généraux, le problème de contrôle optimal est de trouver une commande u qui s'appliquera au système .

$$\dot{x} = g(x(t), u(t), t) \tag{I.1}$$

Le problème est celui de la minimisation des fonctions, et il existe plusieurs méthodes. Le calcul variationnel, Dreyfus 1962, peut être utilisé pour obtenir un ensemble équations différentielles avec certaines propriétés des conditions aux limites est appelé le nom de l'équation d'Euler-Lagrange. Le principe maximum de Pontryagin de 1962 peut également être fournir les mêmes conditions aux limites en utilisant des fonctions Hamilton. Une autre méthode est la méthode de programmation dynamique Bellman. En 1957, il reposait sur des principes optimaux et des méthodes intégrées. En principe l'optimalité donne l'équation différentielle partielle de Hamilton Jacobi, et sa solution produire meilleure stratégie de contrôle. Equation lagrangienne et équation de Pontryagin et la règle d'Euler sont appliqués aux systèmes avec des équations non linéaires et variables d'état normes de performance temporelles et non quadratiques et variables dans le temps [15] [21].

I.2.3-b Domaines d'applications :

Dans les industries modernes où la notion de rendement est prépondérante, le rôle de l'automaticien est de concevoir, de réaliser et d'optimiser, tout au moins d'améliorer les méthodes existantes. Ainsi les domaines d'application sont multiples : aérospatiale, automobile, robotique, aéronautique, internet et les communications en général, mais aussi le secteur médical, chimique, génie des procédés, etc.

Aujourd'hui, le système d'automatisation est complètement devenu notre vie quotidienne (nous n'en savons généralement rien), visant à nous améliorer notre qualité de vie et l'accomplissement de certaines tâches : le système de freinage ABS, assistance à la conduite, servomoteur, thermostat, contrôle d'humidité, circuit frigorifique, contrôle du trafic routier, ferroviaire et aérien, rivière, barrage EDF, photographie numérique, filtrage et reconstruction Images, lecteurs CD et DVD, réseaux informatiques, moteurs de recherche Sur Internet, circuits, électronique, télécommunications général, contrôle des procédés chimiques, raffinage du pétrole, chaîne industrielle assembler, réconcilier les personnes et autres systèmes médicaux automatisés, faire fonctionner Lasers, robotique, satellites, guides aérospatiaux, bioréacteurs, distillation ; La liste est infinie et l'application implique n'importe quel système sur lequel vous pouvez exécuter Agissez pour obtenir les meilleures performances [21] [12].

I.2.3-c Les avantages de la commande optimale :

- Rejeter les perturbations avec une stabilisation de système.
- La commande dun système dynamique avec un cout minimum.
- Amélioration de l'indice de performance [12].

I.2.4 La commande neuronale :

I.2.4-a Définition :

Un réseau de neurone est une structure organisée autour d'un ensemble de neurones interconnectés, selon une certaine topologie, par des liaisons affectées de poids. Ces liaisons offrent à chaque neurone un canal pour émettre et recevoir des signaux venant d'autres neurones. Dans cette structure chaque neurone fonctionne indépendamment des autres, de telle sorte que l'ensemble forme un système massivement parallèle.

- Les neurones reçoivent des signaux (impulsions électriques) par les dendrites et envoient l'information par les axones.
- Les contacts entre deux neurones (entre axone et dendrite) se font par l'intermédiaire des synapses.
- Les signaux n'opèrent pas de manière linéaire : effet de seuil [18].

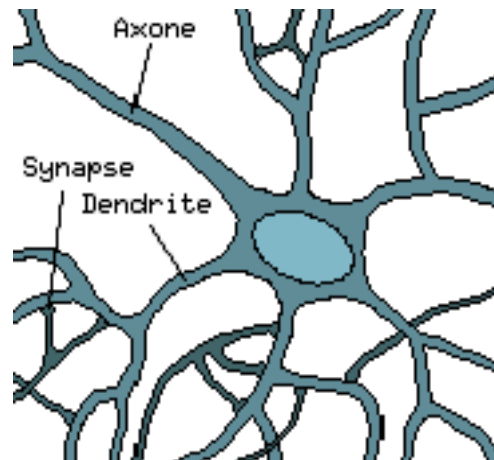


FIGURE I.7 – Réseau de neurone

Aujourd'hui de nombreux termes sont utilisés dans la littérature pour désigner le domaine des réseaux de neurones artificiels, comme connexionnisme ou neuromimétique. Pour notre part, il nous semble qu'il faut associer à chacun de ces noms une sémantique précise. Ainsi, les réseaux de neurones artificiels ne désignent que les modèles manipulés ; ce n'est ni un domaine de recherche, ni une discipline scientifique. Connexionnisme et neuromimétique sont tous deux des domaines de recherche à part entière, qui manipulent chacun des modèles de réseaux de neurones artificiels, mais avec des objectifs différents. L'objectif poursuivi par les ingénieurs et chercheurs connexionnistes est d'améliorer les capacités de l'informatique en utilisant des modèles aux composants fortement connectés. Pour leur part, les neuromiméticiens manipulent des modèles de réseaux de neurones artificiels dans l'unique but de vérifier leurs théories biologiques du fonctionnement du système nerveux central. Notons qu'en France, dès 1982, des réunions de ces deux communautés ont été organisées, ce sont les Journées Neurosciences et Sciences de l'Ingénieur.

Les réseaux de neurones biologiques réalisent facilement un certain nombre d'applications telles que la reconnaissance de formes, le traitement du signal, l'apprentissage par l'exemple, la mémorisation, la généralisation. Ces applications sont pourtant, malgré tous les efforts déployés en algorithmique et en intelligence artificielle à la limite des possibilités actuelles. C'est à partir de l'hypothèse que le comportement intelligent émerge de la structure et du comportement des éléments de base du cerveau que les réseaux de neurones artificiels se sont développés.

Les principales caractéristiques des réseaux de neurones artificiels sont la faculté d'apprentissage, la généralisation et la propriété d'approximation universelle parcimonieuse qui stipule que : « pour toute fonction bornée suffisamment régulière, il existe au moins un réseau de neurones non bouclé possédant une couche de neurones cachée en nombre fini avec la même fonction d'activation, et un neurone de sortie linéaire, qui réalise une approximation

de cette fonction et de ses dérivées successives avec une précision arbitraire» [15].

I.2.4-b Domaines d'applications :

- **Contrôle** : diagnostic de pannes, commande de processus, contrôle qualité, robotique.
- **Optimisation** : allocation de ressources, planification, régulation de trafic, gestion, finance..
- **Simulation** : : simulation boîte noire, prévisions météorologiques,
- Classification d'espèces animales étant donnée une analyse ADN,
- Modélisation de l'apprentissage et perfectionnement des méthodes de l'enseignement,
- Approximation d'une fonction inconnue ou modélisation d'une fonction connue mais complexe à calculer avec précision [17] .

I.2.4-c Les avantages de la commande neuronale :

- Permet l'optimisation en temps réel ;
- Permet d'éviter les prévisions manuelles à chaque modification de données ;
- Permet de gagner du temps lors du paramétrage du réseau ;
- Intuitif et aisé à manipuler (interface connue) ;
- Étend la gamme des phénomènes qui peuvent être analysés [17] .

I.3 Conclusion :

Dans ce chapitre, plusieurs lois des commandes avancées ont été présentées, son développement a été motivé par le développement de la performance des organes de traitement plus efficaces.

Il existe différentes techniques, conviennent aux contextes et aux besoins spécifiés.

SOMMAIRE

II.1	INTRODUCTION	12
II.2	DESCRIPTION D'UNE MACHINE À COURANT CONTINU :	12
II.2.1	Constitution de la MCC :	12
II.2.2	Les types de la MCC :	13
II.2.3	Domaines d'applications de la MCC :	15
II.2.4	Les avantages et les inconvénients de la MCC :	16
II.2.5	Modélisation de MCC :	16
II.2.6	Résultat de simulation de MCC :	19
II.2.7	Interprétation des résultats :	19
II.3	HACHEUR :	20
II.3.1	Hacheur série :	21
II.3.2	Principe du Hacheur :	22
II.4	RÉGULATEUR :	24
II.4.1	Régulateur PI :	24
II.4.2	Résultats de simulation :	26
II.4.3	Interprétation des résultats :	26
II.5	CONCLUSION :	28

II.1 Introduction

Le développement de la technologie a conduit à l'utilisation de machines nécessitant de la vitesse. Par exemple, des équipements de contrôle de conduite précis et variables. Dans ce chapitre, nous allons décrire les principes de fonctionnement de la MCC. Ensuite, nous présenterons la modélisation de la MCC aussi les avantages et les inconvénients de cette machine et le domaine d'application de la MCC. Ainsi nous avons étudié la modélisation de la MCC avec un hacheur au aussi avec un régulateur proportionnel intégral (PI).

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

Une machine à courant continu est une machine électrique. Il s'agit d'un convertisseur électromécanique qui offre la possibilité de la conversion du système d'électricité bidirectionnel parcouru par un courant continu et un système mécanique. Elle s'appelle aussi Dynamo.

La machine à courant continue est réversible c'est-à-dire :

- En fonctionnement moteur, l'énergie électrique est transformée en énergie mécanique ;
- En fonctionnement générateur, l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique. La machine se comporte comme un frein [6].

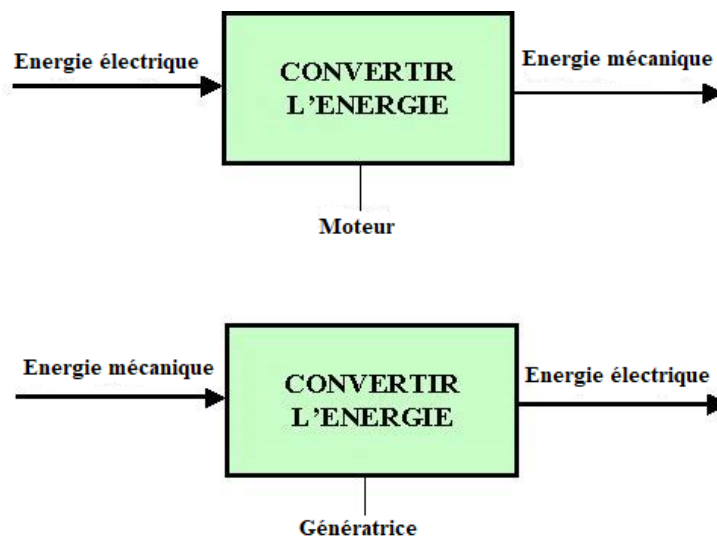


FIGURE II.1 – Principe de fonctionnement de la MCC

II.2.1 Constitution de la MCC :

La machine à courant continue comporte les parties principales suivantes :

- Circuit magnétique, comprenant la partie fixe, le stator, la partie tournante, le rotor et l'entrefer l'espace entre les deux parties ;
- Source de champ magnétique appelée inductance (stator) produite par bobine ;
- Le circuit d'induction (rotor) est affecté par le champ magnétique ;

— Les collecteurs et les balais permettent d'accéder au circuit du rotor.

a) Inducteur : Il peut être formé par des aimants en ferrite ou des bobines d'inductance connectées en série. (Électro-aimant). La bobine est placée autour du noyau polaire, si la machine est bipolaire il n'y a qu'un seul pôle Nord et un seul pôle Sud.

b) Induit : Elle se compose d'un conducteur installé dans une fente.

c) Collecteur et Balais : Le collecteur est un ensemble de barres de cuivre isolées latéralement les unes des autres et reliées entre elles connectez-vous au conducteur d'induit à certains points.

Les balais, portés par le stator, frottent sur les lames du collecteur, et permettent d'établir une liaison électrique entre l'induit qui tourne et l'extérieur de la machine.

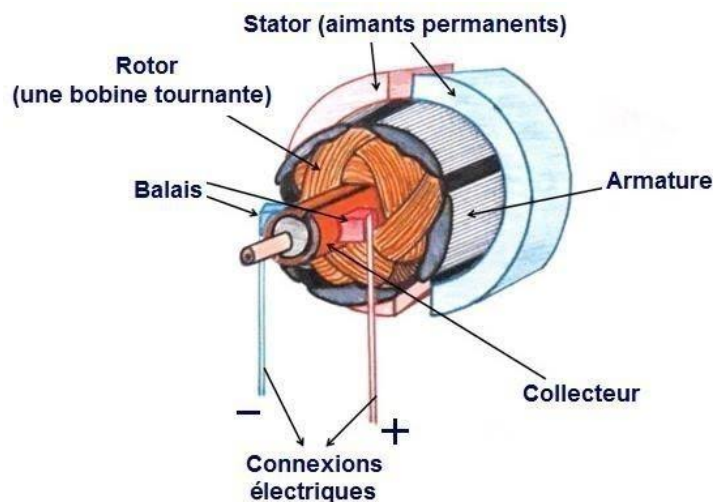


FIGURE II.2 – Constitution de MCC

II.2.2 Les types de la MCC :

On distingue deux types de moteurs à courant continu [5] [10] :

II.2.2-a Machine à aimants permanents :

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

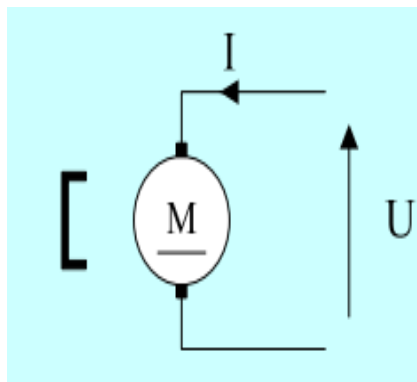


FIGURE II.3 – Machine à aimant permanents

II.2.2-b Moteurs à inducteur bobiné :

Il existe quatre types de moteurs différents, ils sont classés par type d'excitations utilisées :

A) Le moteur à excitation séparé : Comme un générateur à excitation indépendante, l'enroulement inductif le groupe de moteurs d'excitation est connecté à l'alimentation courant continu séparé. Lorsque le courant d'induit augmente, le couple est au fur et à mesure que le rapport augmente, la chute de tension aux bornes de l'armature augmente également. Ce dernier fait chuter le back-EMF. Par conséquent, la vitesse est réduite parce qu'il est proportionnel à f.e.m, ce stimulus est souvent utilisé lorsque vous souhaitez modifier la vitesse entre des limites plus larges par le couple du moteur constant.

Dans ce cas, le flux reste constant et la tension change un générateur de tension réglable est utilisé pour alimenter l'armature.

B) Le moteur à excitation Shunt : Dans un moteur à excitation en dérivation, le circuit inducteur est branché en parallèle avec l'induit et de ce fait alimenté sous la même tension. Ce moteur a les mêmes caractéristiques que le moteur à excitation indépendante, il est utilisé sur des machines-outils démarrant à vide et sur des pompes de circulation. La figure suivante vous montre le schéma d'un moteur à excitation en dérivation :

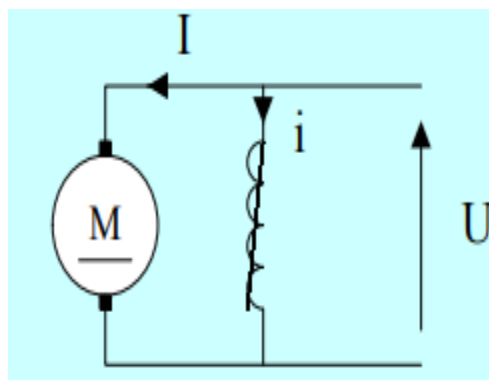


FIGURE II.4 – Moteur à excitation shunt

C) Le moteur à excitation série : Dans un moteur d'excitation en série, le circuit inducteur qui produit le champ est connecté en série avec armature. Si la charge augmente, le courant augmente proportionnellement. Quant au couple il augmente sur la base du carré du courant induit, étant donné que la vitesse est inversement proportionnelle au débit elle diminue.

Ce moteur est bien adapté pour commencer avec de grandes charges dont l'inertie est élevée. Il est particulièrement utile en tant que moteur d'entraînement, détruire et systèmes de haute puissance.

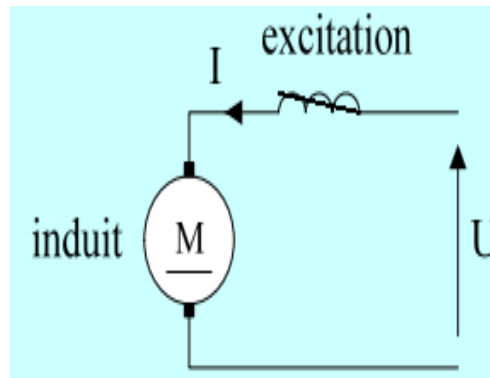


FIGURE II.5 – Moteur à excitation série

D) Le moteur à excitation composée : Le moteur d'excitation composée a une inductance standard et une inductance de dérivation. Comme dans le cas des générateurs, lorsque le flux d'inducteur série est ajouté à celui de l'inducteur de dérivation, le moteur est appelé une arbitration composée d'un débit additif. D'autre part, si l'inducteur en série est connectée de manière à ce que son courant soit dans la direction du débit de l'inducteur de dérivation, le moteur est excitant composé d'un flux sous-traitant. Ce genre de moteur peut être branché en longue dérivation ou en courte dérivation .

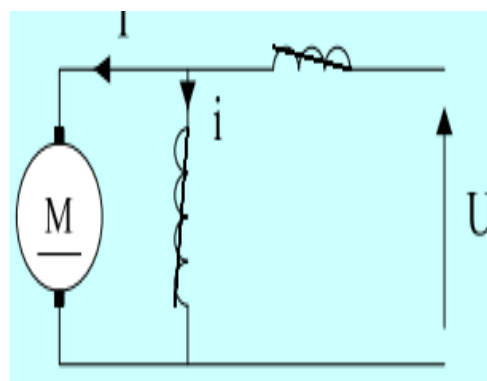


FIGURE II.6 – Moteur à excitation composée

II.2.3 Domaines d'applications de la MCC :

Il ya plusieurs utilisation des machines à courant continu :

- Démarreur (automobile ...),
- Moteur de traction (locomotive, métro ...),
- Appareils de levage,
- Ventilateurs, -Pompes centrifuges, - Compresseurs, -Pompes à piston,
- Machines-outils à couple variable ou à mouvement alternatif (étaux limeurs, raboteuses);
- Le dynamo [8].

II.2.4 Les avantages et les inconvénients de la MCC :

L'avantage principal des machines courant continu réside dans son simple adaptation aux moyens utilisés pour ajuster ou fluctuer sa vitesse, votre couple et sa direction de rotation : les unités de vitesse, ou ensuite sa connexion directe à la source d'alimentation : piles d'alimentation, ... etc.

Le principal problème de ces machines provient de la connexion entre les balais ou le (charbon) et le collecteur rotatif. Mais aussi le collecteur lui-même comme indiqué ci-dessus et la complexité de sa réalisation. En outre, il faut prendre en compte que :

- Plus la vitesse de rotation est importante, plus la pression du balai augmente donc le contact avec le collecteur. Par conséquent, plus de frottement sont importants ;
- Aux vitesses élevées, les balais doivent par conséquent, être remplacés régulièrement ;
- L'imposant collecteur de pause de contact provoque des arcs qui utilisent rapidement le commutateur et générer des parasites dans le circuit d'alimentation, mais également par rayonnement électromagnétique

Un autre problème limite les vitesses de fonctionnement élevées de ces moteurs lorsque le rotor est blessé, il s'agit du phénomène "défretage", la force centrifuge qui finit par casser les liens qui garantissent la possession des tours (le filtrage) [6].

II.2.5 Modélisation de MCC :

II.2.5-a Equation différentielle :

Le MCC étant un système électromécanique, les equations dynamiques résultent de la combinaison des modélisations mécanique et électrique du moteur, schématiquement décrites à la figure suivante [15] :

Pour la partie électrique, on calcule la tension aux bornes de l'induit. L'équation électrique, liant la tension $u(t)$ aux bornes de l'induit et le courant d'induit $i(t)$ s'écrit :

$$U(t) = U_L(t) + U_R(t) + U_E(t) \quad (\text{II.1})$$

$$U(t) = L \frac{dI(t)}{dt} + R.I(t) + U_E(t) \quad (\text{II.2})$$

Où R est la résistance de l'induit du moteur , L son inductance et $e(t)$ (la force électromotrice, qui est proportionnelle à la vitesse de rotation du rotor) :

$$U_E(t) = K_E(t).\omega(t) \quad (\text{II.3})$$

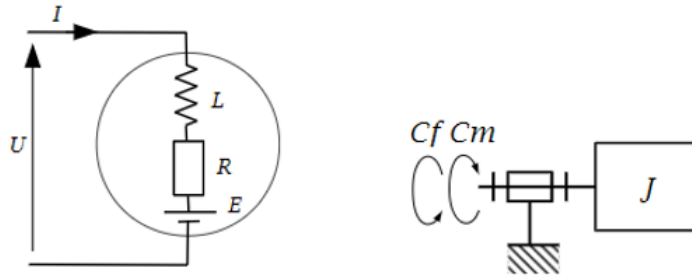


FIGURE II.7 – Modèle électrique et mécanique

Où K_e est la constante de force électromotrice qui relie cette FCEM à la vitesse de rotation de l'arbre moteur $\omega(t)$

Pour la partie mécanique, simplifié consiste à représenter le rotor par un volant d'inertie J soumis à un couple moteur provient de champ magnétique tel que :

$$C_m = K_c \cdot I(t) \quad (\text{II.4})$$

où K_c est le constant de couple.

Un couple de frottement proportionnel à la vitesse de rotor tel que :

$$C_f = f \cdot \omega(t) \quad (\text{II.5})$$

où f est le coefficient de frottement visqueux.

On applique le principe fondamental de la dynamique autour de l'axe de rotation, L'équation mécanique rendant compte des couples agissant sur le rotor s'écrit :

$$C_m - C_f = J \frac{d\omega(t)}{dt} \Rightarrow K_c \cdot I(t) - f \cdot \omega(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} \quad (\text{II.6})$$

En règle générale les coefficients K_e et K_c sont si proches qu'il est raisonnable de les considérer égaux, négligeant alors les pertes durant la conversion électromécanique de puissance. En posant $K_e = K_c = K$ donnent :

$$K i(t) - C_r(t) = f \omega(t) - J \frac{d\omega(t)}{dt} \quad (\text{II.7})$$

En dérivant (II.7), il devient :

$$K \frac{d\omega(t)}{dt} = f \frac{d\omega(t)}{dt} + J \frac{d^2\omega(t)}{dt^2} \quad (\text{II.8})$$

Finalement, en ordonnant (II.8) de façon à avoir un coefficient de un devant le degré de dérivation le plus élevé, il vient :

$$\frac{d^2\omega(t)}{dt^2} + \frac{Rf + Lf}{LJ} \frac{d\omega(t)}{dt} + \frac{Rf + K^2}{Lf} \omega(t) = \frac{K}{LJ} u(t) \quad (\text{II.9})$$

II.2.5-b Equation d'état :

Le modèle d'état du MCC c'est facile a déterminé . On considère que l'entrée du système est sa tension d'induit $u(t)$ alors que sa sortie est représentée par la vitesse de rotation $\omega(t)$ du rotor. On choisit deux variables indépendantes du système : la vitesse de rotation $x_1 = \omega(t)$ et le courant d'induit $x_2 = i(t)$.L'équation électrique s'écrit alors :

$$U(t) = Rx_2 + \frac{Ldx_2}{dt} + Kx_1 \quad (\text{II.10})$$

Alors que l'équation mécanique donne :

$$Kx_2 - fx_1 = J\frac{dx_1}{dt} \quad (\text{II.11})$$

En déduit l'équation d'état du MCC :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{f}{K} & \frac{K}{J} \\ -\frac{K}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} u(t)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

II.2.5-c Fonction de transfert d'un MCC :

$U(t)$ est l'entrée de système et $\omega(t)$ est la sortie, On considère que les condition initiale sont nulle.

— **Transformation de Laplace :**

Equation électrique :

$$U(p) = LpI(p) + R.I(p) + U_E(p) \quad (\text{II.12})$$

$$U_E(p) = K_E\omega(p) \quad (\text{II.13})$$

$$U(p) = LpI(p) + R.I(p) + K_e\omega(p) \quad (\text{II.14})$$

Equation mécanique :

$$K_e.I(p) - f.\omega(p) = J.p.\omega(p) \quad (\text{II.15})$$

— **Fonction de Transfert :**

À partir de l'équation électrique :

$$U(p) - K_E.\omega(p) = I(p)(L_p + R) \Rightarrow I(p) = \frac{U(p) - K_E.\omega(p)}{L_p + R} \quad (\text{II.16})$$

En remplaçant dans l'équation mécanique :

$$K_c \cdot \frac{U(p) - K_E \cdot \omega(p)}{L_p + R} - f \cdot \omega(p) = J \cdot p \cdot \omega(p) \quad (II.17)$$

$$\Rightarrow K_c \frac{U(p)}{L_p + R} = (J \cdot p \cdot f + \frac{K_c \cdot K_e}{L_p + R}) \omega(p) \quad (II.18)$$

$$\Rightarrow \frac{\omega(p)}{U(p)} = \frac{K_c}{(J \cdot p \cdot f)(L_p + R) + K_c \cdot K_e} \quad (II.19)$$

$$H(p) = \frac{\omega(p)}{U(p)} = \frac{K_c}{J \cdot L \cdot p^2 + (J \cdot R + L \cdot f)p + R \cdot f + K_c \cdot K_e} \quad (II.20)$$

il s'agit d'un système du second ordre, cette fonction de transfert peut se mettre sous forme canonique :

$$H(p) = \frac{\frac{K_c}{R \cdot f + K_c \cdot K_e}}{\frac{J \cdot L}{K_c \cdot K_e + R \cdot f} p^2 + \frac{J \cdot R + L \cdot f}{R \cdot f + K_c \cdot K_e} p + 1} \quad (II.21)$$

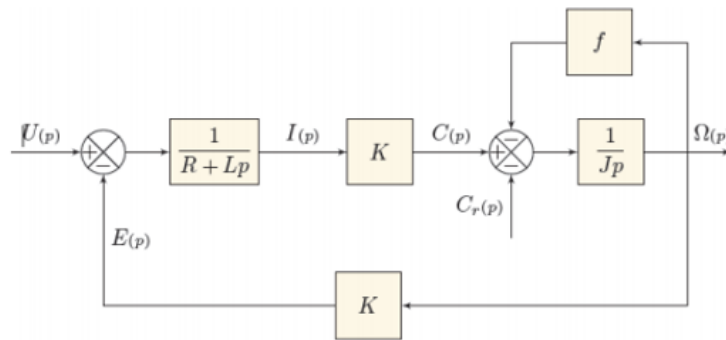


FIGURE II.8 – Schéma block de MCC

II.2.6 Résultat de simulation de MCC :

Les simulation est représenté dans l'annexe

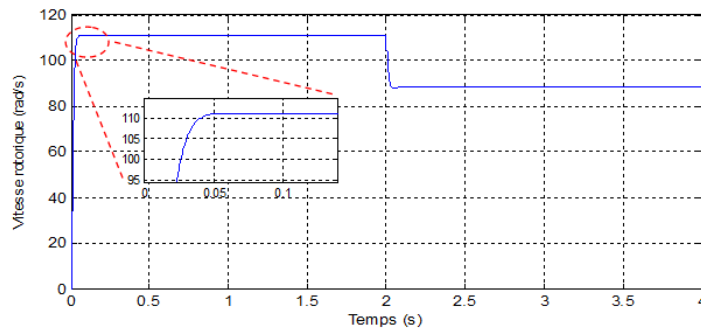


FIGURE II.9 – La vitesse rotorique

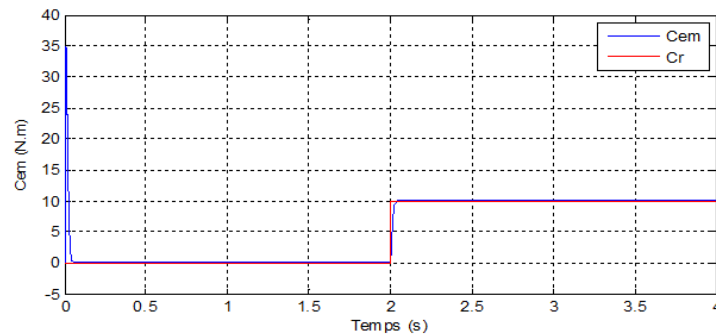


FIGURE II.10 – Le couple électromagnétique

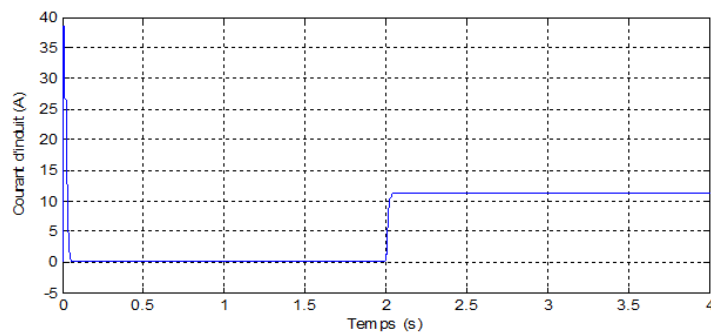


FIGURE II.11 – Le courant

II.2.7 Interprétation des résultats :

La figure II.9 montre que au démarrage de moteur la vitesse commence par une valeur nulle pour se stabilise et pris une valeur nominale de (110 rad/s) dans le régime permanent. Au moment de moteur étant en charge à $t = 2s$ avec $Cr = 10N.m$, la vitesse est diminué jusqu'a (90 rad/s) et reste constante sur cette valeur pendant ce régime.

Dans la figure II.10 quand le moteur démarre, le couple à vide prend un pic max de $C_{em} \approx 35N.m$ pendant 0.05s après s'annule en toute la période de régime permanente.

A l'application de la charge à l'instant ($t = 2s$) on note une augmentation de la valeur du couple de (10N.m) qui montre que le moteur fonction en charge.

La figure II.11 montre que la trajectoire de courant est suit la trajectoire de couple électromagnétique dans les deux régimes car le couple c'est l'image de courant et donc ils sont proportionnelles. Mais dans ce cas on remarque que on a un découplage ce qui produit grâce à le coefficient de gain (k_e) tel que : $C_{em} = k_e * I$

II.3 Hacheur :

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques qui permettent d'obtenir une tension continue constante, avec un rendement voisin de l'unité. Ils jouent le même rôle que les transformateurs en courant alternatif.

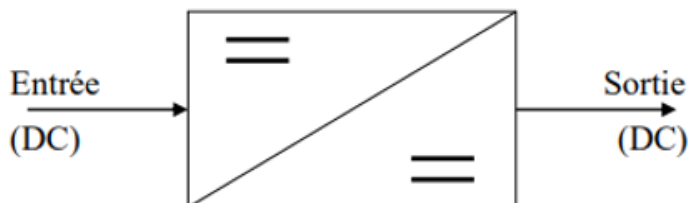


FIGURE II.12 – Convertisseur continu(DC)-continu(DC)

Ils sont principalement utilisés pour les changements de vitesse des moteurs courant continu et des alimentations courant continu à découpage. Ces convertisseurs permettent de contrôler le transfert d'énergie entre la source d'alimentation et la charge, qui peut être capacitif (source de tension) ou inductif (source de courant) [14].

II.3.1 Hacheur série :

II.3.1-a Les interrupteurs électroniques :

La figure II.11 est composée d'une source de tension continue fixe E , d'un interrupteur unidirectionnel H et d'une charge [22].

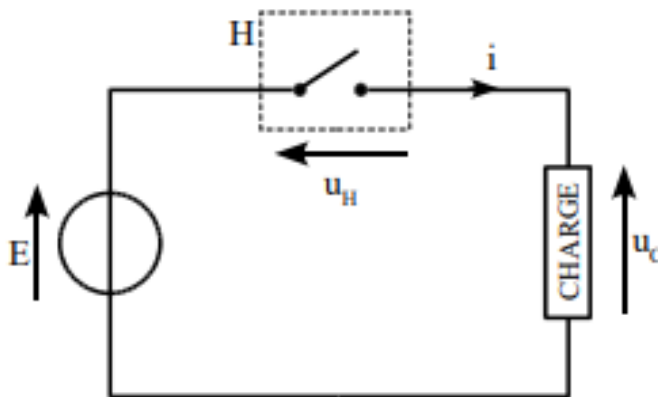


FIGURE II.13 – Hacheur série

L'interrupteur H est en fait un transistor qui fonctionne en mode de commutation, c'est-à-dire que son comportement est similaire à la fermeture d'un interrupteur ou à l'ouverture d'un interrupteur. Le transistor est commandé par son courant de base i_B .

Lorsque $i_B = 0$, le transistor est bloqué ; il se comporte comme un interrupteur ouvert et dans ce cas, la tension $u_H = E$ II.14.

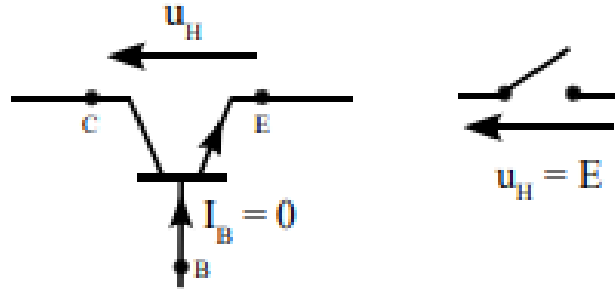


FIGURE II.14 – 1 èr cas

Lorsque i_B est suffisamment important (courant de saturation), $I_B = i_{BSAT}$, le transistor est saturé ; il se comporte comme un interrupteur fermé et dans ce cas, la tension $u_H = 0$ II.15.

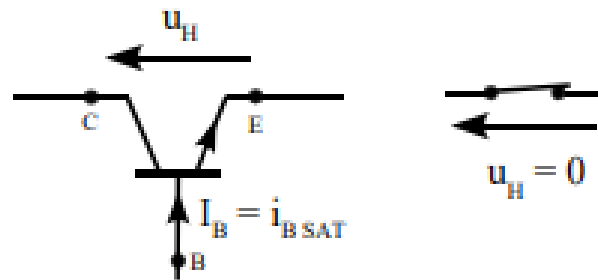


FIGURE II.15 – 2ème cas

L'interrupteur H s'ouvre et se ferme périodiquement. On appelle T cette période et

$$f = \frac{1}{T} \quad (\text{II.22})$$

la fréquence de hachage. La durée pendant laquelle l'interrupteur H est fermé s'appelle t_F . On définit le rapport cyclique α par :

$$\alpha = \frac{t_F}{T} \quad (\text{II.23})$$

avec

$$0 \leq \alpha \leq 1$$

On peut ainsi écrire que :

$$t_F = \alpha.T \quad (\text{II.24})$$

II.3.2 Principe du Hacheur :

II.3.2-a Application au moteur :

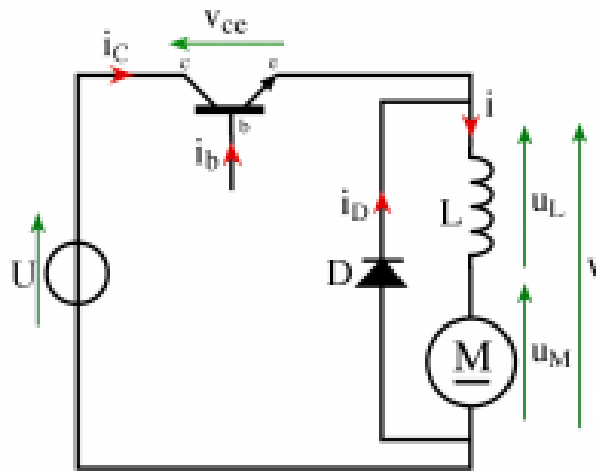


FIGURE II.16 – Modèle électrique complet de moteur et de bobine de lissage

Le hacheur série est souvent employé pour commander un moteur à courant continu. On rappelle que la vitesse d'un tel moteur est proportionnel à la tension d'alimentation [4].

Commentaire :

Afin de faire fonctionner le moteur normalement, il est préférable de rendre le courant aussi régulier que possible. Par conséquent, il y a une bobine lisse. Si son inductance est suffisamment importante, on peut considérer que le courant est constant.

Loi des mailles :

$$V = U_M + U_L \quad (\text{II.25})$$

On passe au valeur moyenne :

$$\bar{V} = \bar{U}_M + \bar{U}_L \quad (\text{II.26})$$

Et comme pour un signal périodique

$$\bar{U}_L = 0 \quad (\text{II.27})$$

Nous obtenons pour le moteur :

$$U_M = E = \bar{V} = \alpha U \quad (\text{II.28})$$

Finalement la f.e.m du moteur et donc la vitesse peuvent être régler grace au rapport cyclique par la relation :

$$E = \alpha U \quad (\text{II.29})$$

On définit la vitesse maximum pour $\alpha = 1$

$$E = U = K' n_M \quad (\text{II.30})$$

(On néglige les résistances de l'induit et de la bobine)

Pour une valeur de α quelconque :

$$E = \alpha U = \alpha K' n_M \quad (\text{II.31})$$

et

$$E = K' n \quad (\text{II.32})$$

D'où la vitesse en fonction de α

$$n = \alpha.n_M \quad (\text{II.33})$$

Dans tout les résultat, nous avons négligé les résistances de l'induit et de la bobine

Remarque :

Le modèle électrique complet de moteur et de bobine de lissage est représenté :

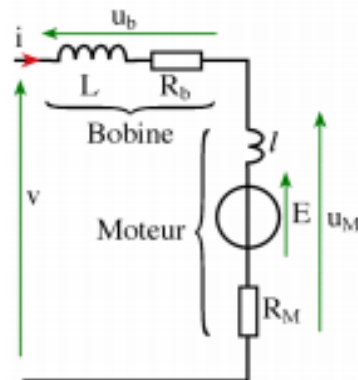


FIGURE II.17 – Modèle électrique complet de moteur et de bobine de lissage

$$V = U_b + U_M = U_L + U_l + E + (R_M + R_b).i \quad (\text{II.34})$$

En passant aux valeurs moyennes : U_L, U_l sont nulles

$$\bar{V} = E.R.\bar{i} \quad (\text{II.35})$$

avec

$$R = R_M + R_b \quad (\text{II.36})$$

II.4 Régulateur :

La régulation est l'action d'ajuster automatiquement la quantité afin qu'elle conserve toujours sa valeur ou la garde proche de la valeur souhaitée, indépendamment des interférences possibles. L'objectif global de la supervision peut être résumé par les trois mots clés suivants : mesure, Algorithmes, commandes .

a) Mesure : la mesure comprend le capteur, l'acquisition et le traitement PLC Les mesures.

b) Algorithme : il correspond à la partie calcul de la commande, respect Instructions.

c) Commande : représente l'écriture sur la carte de sortie et l'actionneur.

Le rôle du régulateur dans un système en boucle fermée est de s'assurer que la réponse présente des caractéristiques dynamiques et statiques appropriées.

Le contrôleur peut être jugé selon les critères suivants :

- Le contrôleur doit être capable de maintenir la variable contrôlée à sa valeur de consigne ;
- L'influence des interférences doit être minimale ;
- La réponse aux modifications de la valeur de consigne doit être rapide et douce ;
- Le système de contrôle doit être robuste : il ne doit pas être affecté par les changements de processus et les erreurs de modèle de processus. Le type de système de contrôle[3].

II.4.1 Régulateur PI :

Le but de la correction de type intégral est de rendre l'erreur statique nulle. En fait, si le système comprend un intégrateur et se stabilise au point d'équilibre, tous les signaux sont constants. Cependant, pour rendre la sortie de l'intégrateur constante, son entrée doit être nulle. Si l'entrée de l'intégrateur est liée à l'erreur de réglage, la fonction du terme intégral est d'éliminer l'erreur. Veuillez noter que même s'il y a des interférences, l'erreur sera éliminée. Inverser les erreurs en régime permanent est une chose, mais aller vite en est une autre. Par conséquent, il est nécessaire de pouvoir ajuster le correcteur de manière appropriée.

L'équation dans le domaine temporel de ce correcteur PI est écrite par l'expression :

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (\text{II.37})$$

Où $e(t)$, $u(t)$, $K_p(t)$, $K_i(t)$ et désignent respectivement l'erreur à l'instant t , la commande générée et les gains du correcteur. La fonction de transfert du contrôleur correspondante est donnée par[16] :

$$C(p) = K_p + \frac{K_i}{p} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i p}\right) \quad (\text{II.38})$$

Avec :

$$T_i = \frac{K_p}{K_i}$$

La fonction de transfert est :

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \cdot \frac{1 + s.T_i}{s.T_i} \quad (\text{II.39})$$

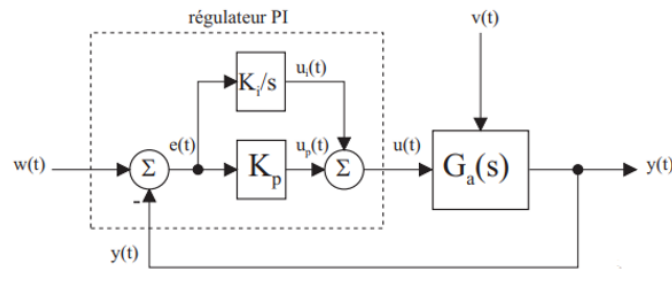


FIGURE II.18 – Asservissement par régulateur PI

Schéma global :

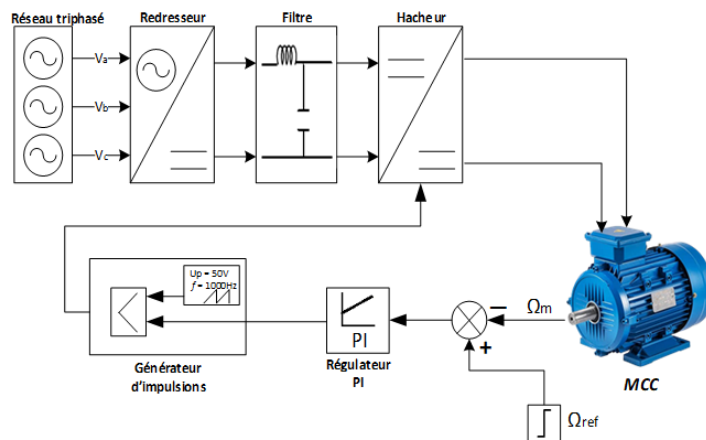


FIGURE II.19 – Schéma global

II.4.2 Résultats de simulation :

II.4.3 Interprétation des résultats :

La figure II.20 présente les caractéristiques de la vitesse rotorique de la commande PI, on remarque que la courbe de la vitesse mesurée suite la courbe de la vitesse de référence. Au démarrage à vide on observe que l'allure atteint une valeur de (300rad/s) avec un dépassement acceptable et un temps de réponse ($t = 0.007\text{s}$) puis se stabilise à une valeur constante de (300rad/s) cela déterminer sur la figure II.21 qui montre que l'allure de l'erreur commence par la valeur max de consigne et elle prend une valeur nulle dans le régime permanent (erreur statique).

On applique une charge de ($C_r = 25\text{N.m}$) à l'instant ($t = 0.2\text{s}$) on note une perte de vitesse

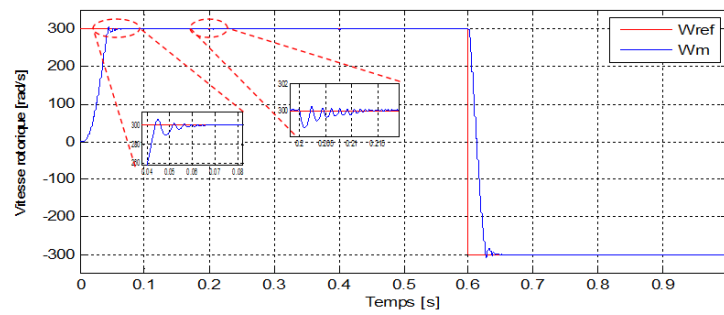


FIGURE II.20 – La vitesse rotorique de la commande PI

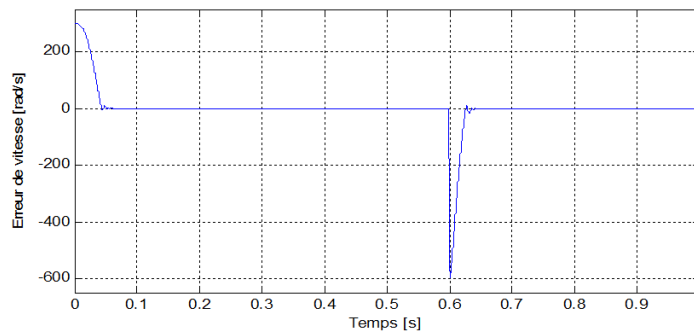


FIGURE II.21 – L'erreur de vitesse de commande PI

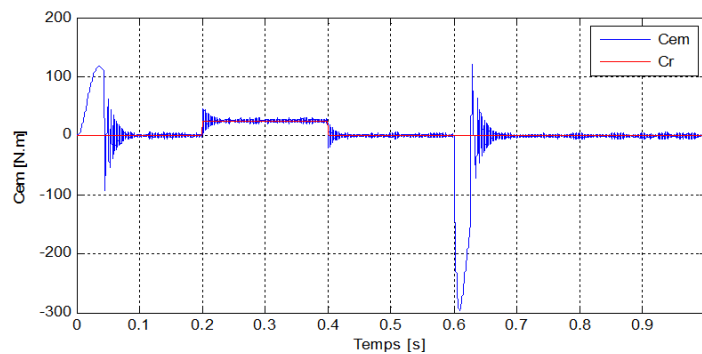


FIGURE II.22 – Le couple électromagnétique de commande PI

qui très rétablie (temps de réponse de $(t = 0.02s)$ et revenir à sa valeur initiale et l'erreur s'annule. Si on inverse le sens de rotation, la vitesse prend une valeur de $(-300rad/s)$ avec un dépassement n'est pas important et un temps de réponse $(t = 0.07s)$ après cela elle devient stable.

Le dépassement produit à cause de réglage des paramètres de PI ou bien le fort courant appliqué.

La figure II.22 montre que la courbe de C_{em} est identique à la courbe de C_r en les deux régimes. Lorsque le moteur démarre, le C_{em} prend un pic d'une grande valeur ; ensuite, il commence à osciller autour de zéro dans le R.P.

On applique une charge de $(C_r = 25N.m)$ entre $[0.2s \text{ à } 0.4s]$ on remarque que le C_{em} com-

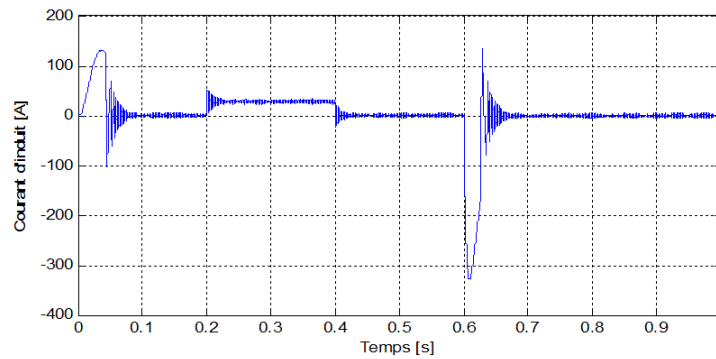


FIGURE II.23 – Le courant de commande PI

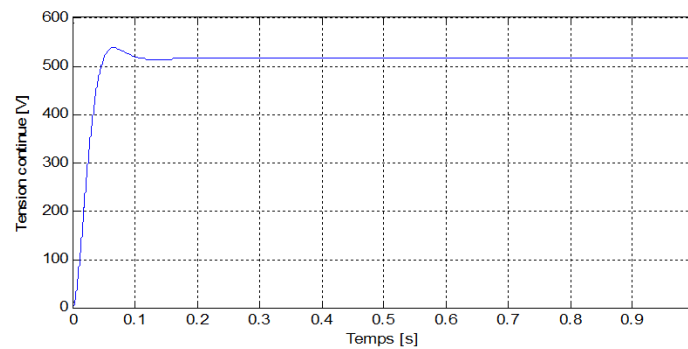


FIGURE II.24 – La tension continue de commande PI

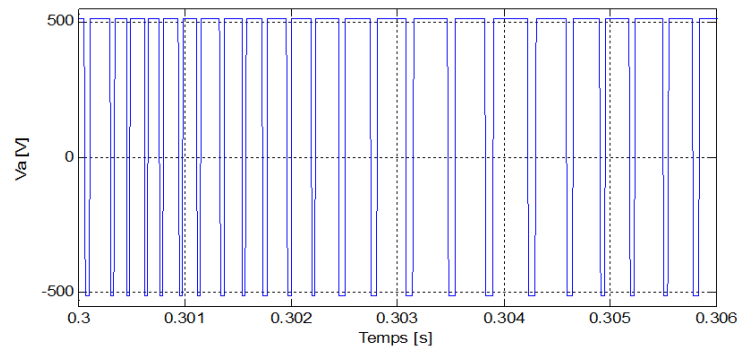


FIGURE II.25 – La tension d'alimentation de commande PI

ponse C_r avec des oscillations instantanées très perturbées. Au moment de l'inversement de sens de rotation, le couple observe une valeur minimale de $(-300N.m)$ et se revient à la vitesse initiale oscillée.

Comme on sait que le couple est proportionnel au courant on dit que le courant c'est l'image de couple, donc on peut déduire que les courbes de C_{em} et I_a sont identiques est cela définie dans la figure II.23. Les ondulations sont apparus à cause des harmoniques générés par les convertisseurs statiques (Hacheur - Redresseur).

La figure II.24 montre que dans le régime transitoire a un temps de réponse de $t = 0.1s$ avec un dépassement n'est pas important, mais en R.P la tension est bien contrôlée car elle

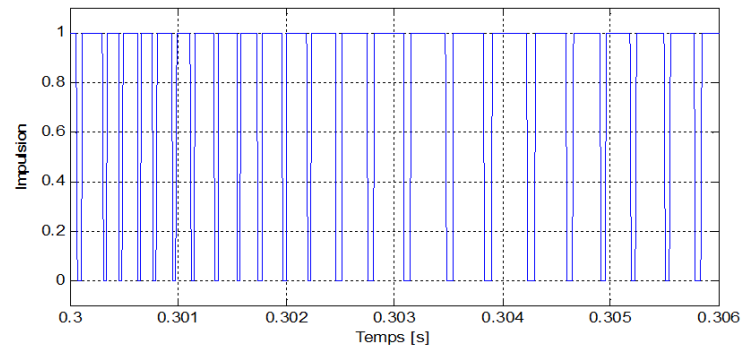


FIGURE II.26 – Les impulsions de commande PI

est parfaitement filtrée par le filtre (LC). Cette tension est la tension d'entrée de l'hacheur. Les résultats de simulation de la figure II.25 présentent clairement la vitesse d'alimentation de moteur (vitesse de sortie de l'hacheur) et ses impulsions qui sont créées par l'intersection entre le signal de tension avec le signal de posteuse. Ces impulsions donnent à l'interrupteur de l'hacheur (transistor) qui génère une tension sous forme d'un signal carré de $[510V - 510V]$ qui alimente le moteur à courant continu.

II.5 Conclusion :

Le régulateur PI peut directement dériver sa réponse en fréquence, ce qui montre qu'aux basses fréquences, la différence de phase de tous les signaux est de -90° . L'action intégrale est très lente, elle ralentira donc la vitesse de propagation du signal dans la boucle. Par conséquent, cela augmente le risque d'instabilité inhérent à tout système de rétroaction. Donc, pour un système parfait, nous utilisons une autre commande moderne, telle que la commande adaptative.

Chapitre III

La commande Adaptative de la MCC

SOMMAIRE

III.1 INTRODUCTION :	30
III.2 COMMANDE ADAPTATIVE :	30
III.2.1 Concept de la commande adaptative :	30
III.3 COMMANDE ADAPTATIVE AVEC MODÈLE DE RÉFÉRENCE :	31
III.3.1 Historique et principe de base :	31
III.3.2 Définition :	32
III.3.3 Structures de système MRAC :	32
III.4 AVANTAGE DE SYSTÈME MRAC :	33
III.5 APPLICATION DE LA COMMANDE ADAPTATIVE SUR LE MOTEUR À COURANT CONTINU :	33
III.6 RÉSULTAT DE SIMULATION :	37
III.7 CONCLUSION :	39

III.1 Introduction :

La plupart des techniques actuelles de conception de systèmes de contrôle Basé sur une bonne compréhension du système de recherche et de son environnement.

Les variations paramétriques d'un processus réel dans le temps suivant les changements de l'environnement influent sur la régulation du système bouclé avec des contrôleurs a paramètres fixe, alors il est nécessaire de recourir à la commande adaptative.

III.2 Commande adaptative :

La commande adaptative est basé sur l'ajustement en ligne des paramètres du contrôleur. Suivez le régulateur utilisé, la méthode de réglage et le type de système utilisé pour le contrôle, plusieurs stratégies de contrôle adaptatif ont été développées, et Utilisées dans différents domaines .

Le système de commande adaptative mesure les performances du système à contrôler, et comparer-les avec les performances requises. Les performances attendues et les performances réelles seront résolues grâce à des mécanismes d'adaptation. La sortie de mécanisme d'adaptation affectera les paramètres du régulateur ou agira directement sur le régulateur commande pour modifier les performances du système de manière appropriée.

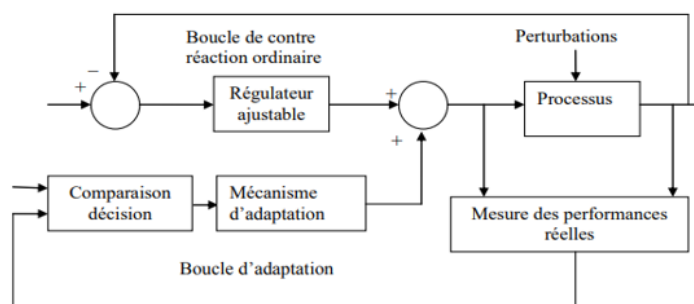


FIGURE III.1 – Principe générale de la commande adaptative

III.2.1 Concept de la commande adaptative :

Généralement, le système à contrôler a des paramètres incertains au début de l'opération de contrôle. Bien que l'impact de ce paramètre, l'incertitude puisse être disparaître dans le temps grâce à un certain mécanisme de réglage entraînera une instabilité du système. Dans d'autres cas, le phénomène inverse se produira, nous commençons avec quelques paramètres connus, mais pendant le fonctionnement, ces paramètres perdront leurs valeurs initiales et deviendront incertains. Par conséquent, si le régulateur n'est pas constamment mis à jour, cela prouvera le régulateur initial est invalide. Dans de nombreux cas, les systèmes de contrôle conventionnels sont basés sur les modèles à paramètres fixes, car ils ne peuvent pas supporter des changements lents ou rapides de la dynamique du système, il est nécessaire d'introduire le concept de systèmes de contrôle adaptatifs pour garantir les performances requises. A cette fin, les paramètres du régulateur (contrôleur) sont automa-

tiquement ajustés en fonction des informations collectées à partir du système. L'adaptation est souhaitable pour deux raisons principales :

- Effectuez les réglages initiaux du système de contrôle au fil du temps.
- Compte tenu des changements des paramètres du système à contrôler.

Il existe plusieurs approches de la commande adaptative , et on a choisi la commande avec modèle de référence pour notre étude .

III.3 Commande adaptative avec modèle de référence :

C'est l'une des approches de la commande adaptative les plus utilisées, et appelé aussi la commande adaptative (directe) avec modèle de référence (MRAC), joue un rôle très important et fait l'objet de diverses enquêtes.

III.3.1 Historique et principe de base :

Le premier article sur les systèmes adaptatifs avec modèles de référence est Par M.P. Whitaker, J. Publié en 1958 par Yamron et A. Keser. Depuis, plusieurs recherches ont été menées a été développé pour conduire à diverses structures basées sur des systèmes adaptatifs référence. Ce dernier est largement utilisé pour résoudre divers problèmes Rencontré de nombreux problèmes dans la commande, l'identification et l'estimation des conditions [13].

Cette technique consiste à estimer et ajuster directement les paramètres du régulateur en fonction de l'erreur entre le procédé et le modèle de référence. Ses principes de base sont les suivants :

- La sortie du système doit suivre la trajectoire de référence ;
- L'erreur de poursuite $e(t) = x(t) - x_m(t)$ représente une déviation de la sortie de système par rapport à la sortie de modèle de référence ;
- Le système en boucle fermée est basée sur une loi de commande par feedback ;
- La commande comporte un contrôleur et un mécanisme d'ajustement ;
- Le mécanisme d'ajustement génère des estimés des paramètres du contrôleur ;
- La synthèse du contrôleur comporte la conception de la loi de commande et le mécanisme d'adaptation.

Pour concevoir ce contrôle de modèle de référence adaptatif (MRAC), le modèle de référence doit être un modèle d'un système linéaire dont le temps ne change pas. La commande adaptative de modèle de référence (MRAC) est principalement basé sur l'utilisation de modèles de référence pour spécifier les performances attendues du système. La fonction du contrôleur est d'éliminer toute différence entre la réponse du modèle d'entrée et la réponse du système dans toutes les conditions.

La méthode MRAC peut adopter deux méthodes. Si l'on considère que tous les paramètres du système sont accessibles, la loi de commande d'ajustement direct des paramètres peut être réalisée. En pratique, cela n'est pas toujours réalisable. Si le gain du contrôleur est ajusté, seules les entrées du système sont accessibles.

La structure d'un système d'une commande adaptative directe à modèle de référence est donnée par III.2 :

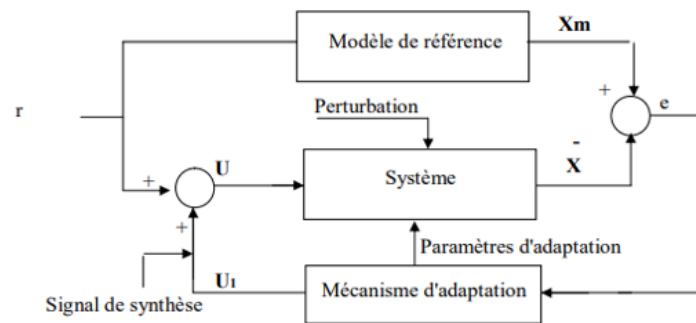


FIGURE III.2 – Structure de la commande adaptative à modèle de référence

La différence entre la sortie du procédé et la sortie du modèle de référence est une mesure de la différence entre la performance réelle et la performance désirée. Cette information est utilisée par le mécanisme d'adaptation qui reçoit aussi d'autres informations (entrée de commande et la sortie du procédé) pour ajuster automatiquement les paramètres du régulateur [19].

III.3.2 Définition :

La commande adaptative avec un modèle de référence implique l'utilisation d'un contrôleur pour que le processus se comporte de manière similaire au modèle de référence. La détermination de la loi de commande adaptative, même en présence d'interférences, peut également agir sur les performances dynamiques du système pour faire en sorte que la réponse du système suive la réponse du modèle.

III.3.3 Structures de système MRAC :

On peut considérer trois structures des systèmes adaptatives à modèle de référence [1] :

a) Structure parallèle :

C'est la structure la plus connue et utilisé , le modèle de référence est en parallèle avec le système ajustable III.3.

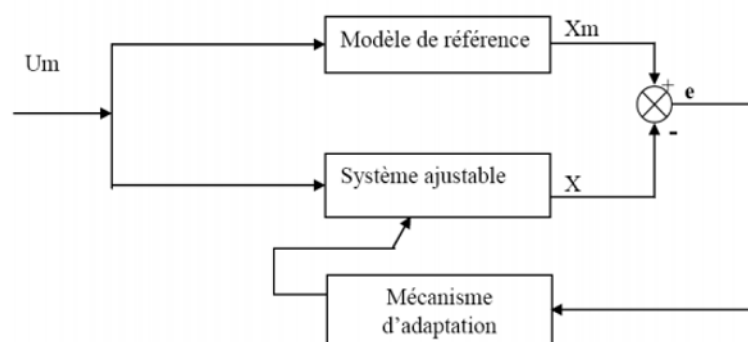


FIGURE III.3 – Structure parallèle de système MRAC

b) Structure série :

Dans ce cas le modèle de référence et le système ajustable sont en série III.4.

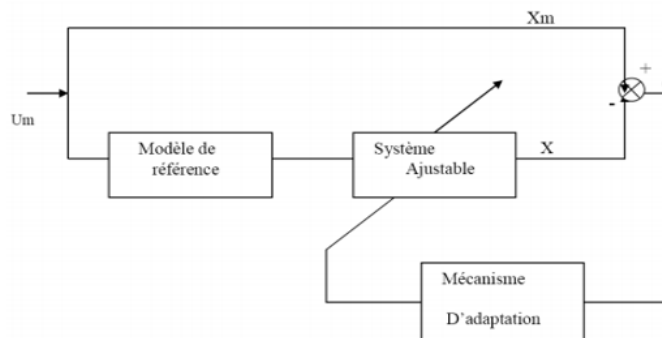


FIGURE III.4 – Structure série de système MRAC

c) Structures série parallèle :

Le modèle de référence est placé d'une part en série avec le système ajustable d'autre part en parallèle avec celui-ci III.5.

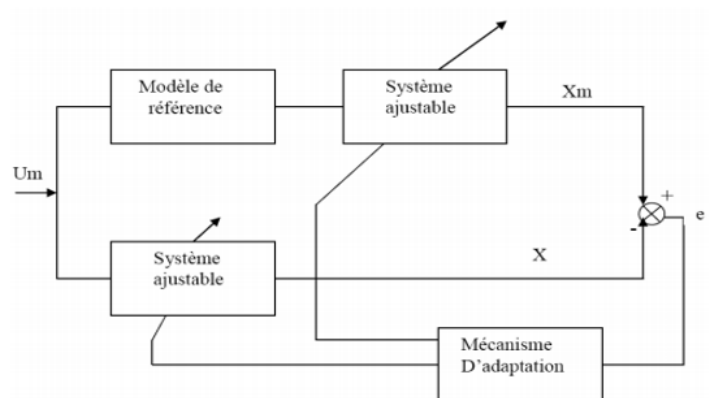


FIGURE III.5 – Structure série parallèle de système MRAC

III.4 Avantage de système MRAC :

La commande adaptative à modèle de référence présente certains avantages tels que [1] :

- Elle permet d'utiliser un modèle simplifié lors de la conception ;
- Elle maintient des bonnes performances en présence des variations paramétriques et des perturbations ;
- Elle permet d'avoir une adaptation rapide pour des entrées définies.

III.5 Application de la commande adaptative sur le moteur à courant continu :

Modèle de la machine courant continu représenté par :

$$\dot{\theta} = \omega$$

$$J\dot{\omega} = -f\omega + K_a I_a - C_r$$

$$L_a \dot{I}_a = R_a I_a - K_a \omega + V_a$$

(III.1)

La partie mécanique de la machine est :

$$\dot{\theta} = \omega$$

$$\dot{\omega} = -\frac{f}{J}\omega + \frac{K_a}{J}I_a - \frac{1}{J}C_r$$

(III.2) La partie mécanique sous la forme d'état écrit comme suite :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} b I_a - \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} C_0$$

Avec :

$$x_1 = \theta, x_2 = \omega, a = \frac{f}{J}, b = \frac{K_a}{J}, C_0 = \frac{C_r}{J}$$

L'équation d'état LTI permet de définir le modèle de référence suivante :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{m1} \\ \dot{x}_{m2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_0^2 & -2\zeta\omega_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{m1} \\ x_{m2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \omega_0^2 r$$

Où ζ et ω_0 sont les paramètres de la conception.

Tout d'abord, la soustraction de l'équation d'état donne la dynamique d'erreur de poursuite suivante :

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_0^2 & -2\zeta\omega_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{m1} \\ x_{m2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} b I_a - \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \omega_0^2 r - \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} C_0$$

En ajoutant et soustrayant le terme :

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_0^2 & -2\zeta\omega_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

Selon la loi dynamique de l'erreur de poursuite, il peut être arrangé comme :

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_0^2 & -2\zeta\omega_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \omega_0^2 & -(a - 2\zeta\omega_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} b I_a - \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \omega_0^2 r - \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} C_0$$

Qui peut être écrire :

$$\begin{vmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_0^2 & -2\zeta\omega_0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} e_1 \\ e_2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \end{vmatrix} (\omega_0^2 x_1 - (a - 2\zeta\omega_0)x_2 + bI_a - \omega_0^2 r - C_0)$$

Ou encore comme :

$$\begin{vmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_0^2 & -2\zeta\omega_0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} e_1 \\ e_2 \end{vmatrix} + b \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \end{vmatrix} \left(I_a + \frac{\omega_0^2}{b} x_1 - \frac{a - 2\zeta\omega_0}{b} x_2 - \frac{\omega_0^2}{b} r - \frac{C_0}{b} \right)$$

Aussi comme :

$$e = A_m e + bB \left(I_a + \frac{\omega_0^2}{b} x_1 - \frac{a - 2\zeta\omega_0}{b} x_2 - \frac{\omega_0^2}{b} r - \frac{C_0}{b} \right) \quad (\text{III.3})$$

En notant que :

$$e = \begin{vmatrix} e_1 \\ e_2 \end{vmatrix}, A_m = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_0^2 & -2\zeta\omega_0 \end{vmatrix}, B = \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \end{vmatrix}$$

Maintenant, nous proposons que la loi de commande du retour d'état soit définie comme :

$$I_{ref} = k_1 x_1 + k_2 x_2 + k_3 r + k_4 \quad (\text{III.4})$$

Alors , la dynamique de l'erreur de poursuite en boucle fermée sera donnée par :

$$e = A_m e + bB \left(\left(k_1 + \frac{\omega_0^2}{b} \right) x_1 + \left(k_2 - \left(\frac{a - 2\zeta\omega_0}{b} \right) \right) x_2 + \left(k_3 - \frac{\omega_0^2}{b} \right) r + \left(k_4 - \frac{C_0}{J} \right) \right) \quad (\text{III.5})$$

Il est clair, que si on peut annuler le deuxième terme alors il reste que la dynamique :

$$\dot{e} = A_m e \quad (\text{III.6})$$

Elle est stable et converge vers zéro de façon exponentielle. Si nous choisissons le gain de retour d'état comme :

$$k_1 = -\frac{\omega_0^2}{b} \quad (\text{III.7})$$

$$k_2 = \left(\frac{a - 2\zeta\omega_0}{b} \right) \quad (\text{III.8})$$

$$k_3 = \frac{\omega_0^2}{b} \quad (\text{III.9})$$

$$k_4 = \frac{C_0}{b} \quad (\text{III.10})$$

C'est la condition de la poursuite idéale, mais malheureusement, parce que a et b sont inconnus, ces conditions ne peuvent pas être directement réalisées. Afin de résoudre ce problème, nous utiliserons la règle d'ajustement adaptatif pour estimer la valeur de k_1, k_2, k_3, k_4

Remarque :

$$\tilde{k}_1 = k_1 + \frac{\omega_0^2}{b}, \tilde{k}_2 = k_2 - \left(\frac{a - 2\zeta\omega_0}{b} \right), \tilde{k}_3 = k_3 - \frac{\omega_0^2}{b}, \tilde{k}_4 = k_4 - \frac{C_0}{b}$$

Tout comme l'erreur d'estimation du gain de la loi de commande, on peut écrire la dynamique de l'erreur de poursuite en boucle fermée :

$$\dot{e} = A_m e + bB(\tilde{k}_1 x_1 + \tilde{k}_2 x_2 + \tilde{k}_3 r + \tilde{k}_4) \quad (\text{III.11})$$

Pour vérifier la stabilité en boucle fermée et obtenir la loi de réglage des paramètres, on utilise la fonction de Lyapunov :

$$V = \frac{1}{2b} e^T P e + \frac{1}{2\gamma_1} \tilde{k}_1^2 + \frac{1}{2\gamma_2} \tilde{k}_2^2 + \frac{1}{2\gamma_3} \tilde{k}_3^2 + \frac{1}{2\gamma_4} \tilde{k}_4^2 \quad (\text{III.12})$$

ou $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4 > 0$ sont les paramètres de conception, et P matrice définie positive donnée par la solution de l'équation de Lyapunov :

$$A_m^T P + P A_m = -Q \quad (\text{III.13})$$

Avec Q une matrice définie positive.

La dérivée de l'équation de Lyapunov et la trajectoire donne :

$$\dot{V} = \frac{1}{2b} e^T P \dot{e} + \frac{1}{2b} \dot{e}^T P e + \frac{1}{\gamma_1} \tilde{K}_1 \dot{\tilde{k}}_1 + \frac{1}{\gamma_2} \tilde{K}_2 \dot{\tilde{k}}_2 + \frac{1}{\gamma_3} \tilde{K}_3 \dot{\tilde{k}}_3 + \frac{1}{\gamma_4} \tilde{K}_4 \dot{\tilde{k}}_4 \quad (\text{III.14})$$

Avec :

$$e^T = e^T A_m^T + bB^T(\tilde{K}_1 x_1 + \tilde{K}_2 x_2 + \tilde{K}_3 r + \tilde{K}_4) \quad (\text{III.15})$$

$$\tilde{K}_1 = \dot{\tilde{k}}_1, \tilde{K}_2 = \dot{\tilde{k}}_2, \tilde{K}_3 = \dot{\tilde{k}}_3, \tilde{K}_4 = \dot{\tilde{k}}_4 \quad (\text{III.16})$$

Nous avons :

$$\dot{V} = \frac{1}{2b} (e^T A_m^T P e + bB^T P e (\tilde{K}_1 x_1 + \tilde{K}_2 x_2 + \tilde{K}_3 r + \tilde{K}_4))$$

$$+ \frac{1}{2b} (e^T A_m e P + b e^T P B (\tilde{K}_1 x_1 + \tilde{K}_2 x_2 + \tilde{K}_3 r + \tilde{K}_4))$$

$$+ \frac{1}{\gamma_1} \tilde{K}_1 \dot{\tilde{k}}_1 + \frac{1}{\gamma_2} \tilde{K}_2 \dot{\tilde{k}}_2 + \frac{1}{\gamma_3} \tilde{K}_3 \dot{\tilde{k}}_3 + \frac{1}{\gamma_4} \tilde{K}_4 \dot{\tilde{k}}_4$$

Peut être arrangé comme :

$$\dot{V} = \frac{1}{2b} e^T (A_m^T P + P A_m) e + \frac{1}{2} B^T P e (\tilde{K}_1 x_1 + \tilde{K}_2 x_2 + \tilde{K}_3 r + \tilde{K}_4)$$

$$+ \frac{1}{2} e^T P B (\tilde{K}_1 x_1 + \tilde{K}_2 x_2 + \tilde{K}_3 r + \tilde{K}_4)$$

$$+ \frac{1}{\gamma_1} \tilde{K}_1 \dot{\tilde{k}}_1 + \frac{1}{\gamma_2} \tilde{K}_2 \dot{\tilde{k}}_2 + \frac{1}{\gamma_3} \tilde{K}_3 \dot{\tilde{k}}_3 + \frac{1}{\gamma_4} \tilde{K}_4 \dot{\tilde{k}}_4$$

Comme la 2ème et la 3ème terme sont identiques, nous avons :

$$\dot{V} = \frac{1}{2b} e^T (A_m^T P + P A_m) e + B^T P e (\tilde{K}_1 x_1 + \tilde{K}_2 x_2 + \tilde{K}_3 r + \tilde{K}_4) + \frac{1}{\gamma_1} \tilde{K}_1 \dot{\tilde{k}}_1 + \frac{1}{\gamma_2} \tilde{K}_2 \dot{\tilde{k}}_2 + \frac{1}{\gamma_3} \tilde{K}_3 \dot{\tilde{k}}_3 + \frac{1}{\gamma_4} \tilde{K}_4 \dot{\tilde{k}}_4 \quad (\text{III.17})$$

En utilisant l'équation de Lyapunov donc :

$$\begin{aligned}\dot{V} &= \frac{1}{2b}e^T Qe + \frac{1}{\gamma_1}\tilde{K}_1(\dot{K} + \gamma_1 B^T P e x_1) \\ &+ \frac{1}{\gamma_2}\tilde{K}_2(\dot{K} + \gamma_2 B^T P e x_2) \\ &+ \frac{1}{\gamma_3}\tilde{K}_3(\dot{K} + \gamma_3 B^T P e r) \\ &+ \frac{1}{\gamma_4}\tilde{K}_4(\dot{K} + \gamma_4 B^T P e)\end{aligned}$$

Le choix des lois d'ajustement des paramètres suivants :

$$\dot{K}_1 = -\gamma_1 B^T P e x_1, \dot{K}_2 = -\gamma_2 B^T P e x_2, \dot{K}_3 = -\gamma_3 B^T P e r, \dot{K}_4 = -\gamma_4 B^T P e, \quad (\text{III.18})$$

Permet d'avoir :

$$\dot{V} = -\frac{1}{2b}e^T Qe \quad (\text{III.19})$$

Qui se définit comme négatif. C'est la conclusion tirée par la stabilité asymptotique de la boucle MRAC et la convergence de l'erreur de poursuite e vers zéro.

Pour le calcul de la commande V_a on utilise la partie électrique de la MCC :

$$\dot{I}_{ref} = -\frac{R_a}{L_a}I_{ref} - \frac{K_a}{L_a}\omega + \frac{1}{L_a}V_a \quad (\text{III.20})$$

La commande est :

$$V_a = L_a \dot{I}_{ref} + R_a I_{ref} - K_a \omega \quad (\text{III.21})$$

L'implémentation de cette commande est illustrée sur figure III.6 :

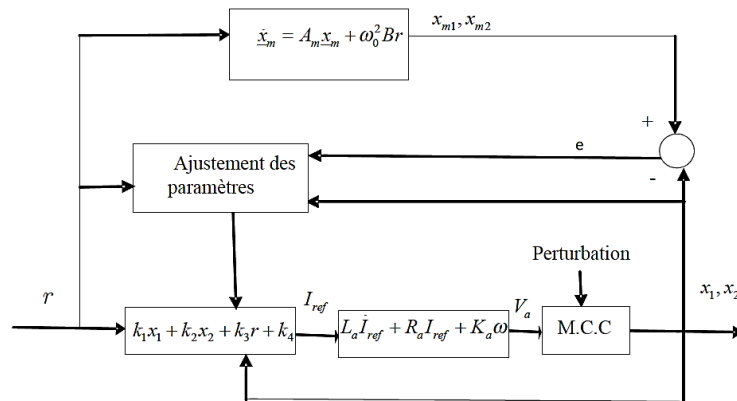


FIGURE III.6 – Schéma de commande MRAC de la M.C.C

III.6 Résultat de simulation :

Schéma de simulation se trouver dans l'annexe.

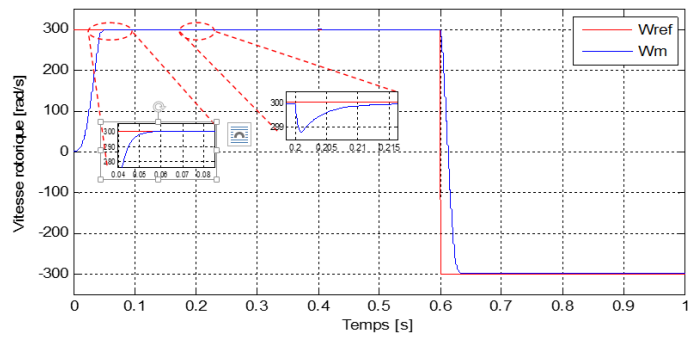


FIGURE III.7 – Résultat de vitesse rotorique

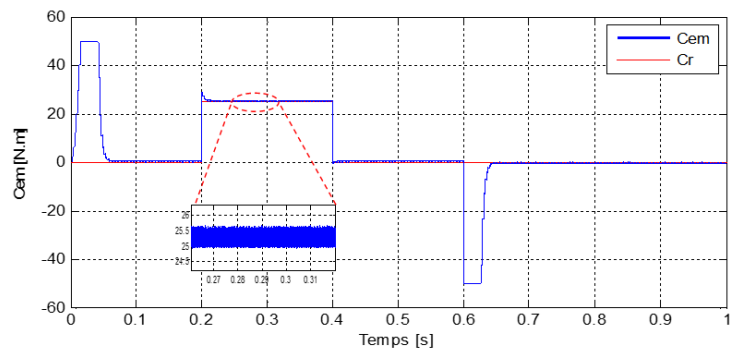


FIGURE III.8 – La courbe de couple électromagnétique

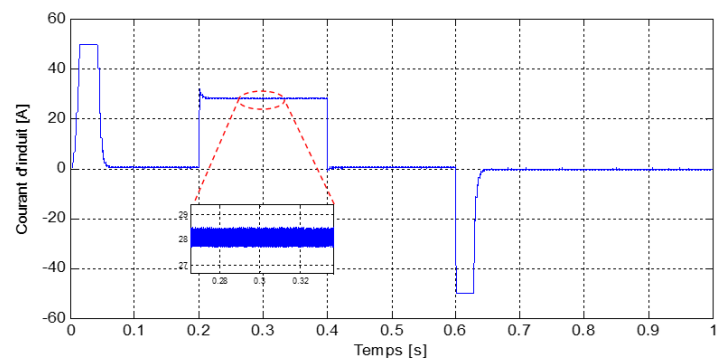


FIGURE III.9 – La courbe de courant

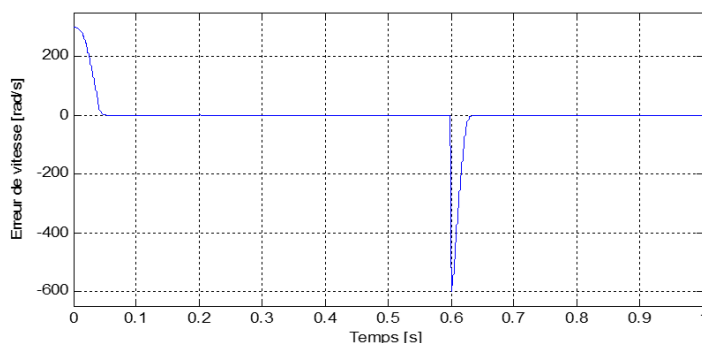


FIGURE III.10 – La courbe de l’erreur

Interprétation des résultats :

La figure III.7 représente la caractéristique de la vitesse rotorique de la commande adaptative.

-Au démarrage le moteur atteint sa valeur de référence (300rad/s), la vitesse suit sa consigne avec un temps de réponse de $t = 0.06s$ sans dépassement. Entre [0.2s-0.4s], on a appliqué une charge de $C_r=25N.m$ avec un temps de réponse (0.215s), on observe que l’erreur de vitesse provoqué par l’application du couple résistant qu’à chaque passage d’une référence à une autre l’erreur devient importante puis tend vers zéro comme elle est représenté dans la figure III.10.

- l’inversement de sens de rotation a $t = (0.6s)$, prendre une valeur inverse de -300rad/s n’influe pas à la réponse de système, on a toujours un suivi parfait.

- On remarque que le temps de réponse réduit, l’absence de dépassement et la rapidité de vitesse grâce à l’effet de la mécanisme d’adaptation de la commande adaptative qui permet d’éliminer les perturbations.

Les figure III.8, III.9 représentant le couple électromagnétique et son image en courant.

-Au moment de l’application du couple résistant entre $t=0.2s$ et $0.4s$, le couple électromagnétique suit le couple résistant et par conséquent, le courant augmente à une valeur de 28A, celle la prouve la robustesse du régulateur adaptatif face aux incertitudes et perturbations externe.

Nous constatons que l’effet de convection, l’inversion du sens de rotation et les perturbations externe sont entièrement pris en charge par cette commande.

III.7 Conclusion :

la commande adaptative est une solution potentielle pour améliorer les performances du système pour les grandes variations des paramètres, néanmoins, deux problèmes importants restent à résoudre pour la commande adaptative :

- Le régime transitoire causé par le changement rapide de la consigne ne peut pas être toléré par le système de commande.
- L’absence d’un signal d’excitation rend le système instable.

Chapitre IV

La commande Prédicative de la MCC

SOMMAIRE

IV.1 INTRODUCTION	41
IV.2 LA COMMANDE PRÉDICTIVE :	41
IV.2.1 Définition :	41
IV.2.2 Principe de la commande prédictive :	41
IV.2.3 Éléments d'une commande prédictive :	42
IV.3 LA COMMANDE PRÉDICTIVE GÉNÉRALISÉ :	42
IV.3.1 Historique :	42
IV.3.2 Définition :	42
IV.3.3 Principe de la commande prédictive généralisé :	42
IV.3.4 Modélisation de la commande prédictive généralisé :	43
IV.3.5 Application de la GPC sur la MCC :	47
IV.3.6 Avantages de modèle de CARIMA :	47
IV.4 RÉSULTAT DE SIMULATION	47
IV.5 ETUDE COMPARATIVE :	49
IV.6 CONCLUSION :	50

IV.1 Introduction

La mise en oeuvre de la commande prédictive est présentée dans ce chapitre pour résoudre le problème de poursuite de trajectoire. Ce chapitre a pour but d'introduire la modélisation de la commande prédictive et son principe générale et d'afficher les application de la commande prédictive sur la machine à courant continu , on passe a la théorie et la simulation de la commande prédictive et en fin on fait tester la robustesse.

IV.2 La commande Prédictive :

IV.2.1 Définition :

La commande prédictive est une technologie de commande avancé utilisé pour la commande automatique. L'objectif est de contrôler des systèmes industriels complexes. Le principe de cette technologie est d'utiliser le modèle dynamique du processus interne du contrôleur en temps réel afin de prédire le comportement futur du processus.

La différence entre la commande prédictive et les autres technologies de contrôle est qu'il doit être résolu en ligne, ce qui inclut le comportement futur attendu du modèle interne du système dans un intervalle de temps limité pris en compte a partir de l'optimisation d'entrée / sortie du système appelé l'horizon de prévision. La solution au problème d'optimisation est le vecteur de contrôle, et le premier terme de la séquence optimale du vecteur de contrôle est injecté dans le système [11].

IV.2.2 Principe de la commande prédictive :

Le principe du commande prédictive repose sur la prédiction du comportement futur du système, et en minimisant l'écart par rapport à ces prédictions, le système à contrôler crée un effet attendu par rapport a la trajectoire a connaître à l'avance. Respecter la trajectoire au sens d'une certaine fonction de coût, tout en respectant les contraintes opérationnelles. L'idée est très simple et elle est pratiquée très systématiquement dans la vie quotidienne. Par exemple, le conducteur d'un véhicule connaît à l'avance la trajectoire de référence requise (route) dans une plage de contrôle limitée (son champ de vision), et prend en compte les caractéristiques du véhicule (le modèle mental du véhicule comportemental) pour décider suivre la trajectoire souhaitée Action (accélérer, freiner ou tourner le volant). Seule la première action de conduite est effectuée à tout moment, et le processus est répété à nouveau pour l'action suivante [11] :

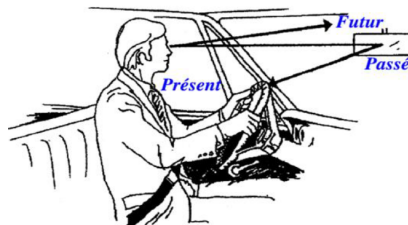


FIGURE IV.1 – Principe de la commande prédictive

IV.2.3 Éléments d'une commande prédictive :

Tous les algorithmes de la commande prédictive ont les mêmes éléments et différentes options, peuvent être envisagées pour chaque élément, ce qui entraîne de nombreux algorithmes. Ces éléments sont :

- Modèle du système (pour la prédiction) ;
- Norme de performance (prévision) ;
- Algorithme d'optimisation (déterminer l'ordre des commandes).

Pour l'implémentation de la stratégie prédictive, la structure de base de la figure précédant IV.1 est mise en oeuvre. Un modèle sert à prédire les futures sorties du système, grâce aux valeurs courantes et passées de la commande et aux commandes optimales futures.

Ces dernières sont calculées par une méthode d'optimisation, qui prend en compte la fonction de coût (qui dépend aussi des consignes futures), et éventuellement des contraintes. Donc, le modèle du système à commander joue un rôle central dans la commande prédictive. Le modèle choisi doit être capable de prendre en compte la dynamique du processus pour prédire précisément les sorties futures [9].

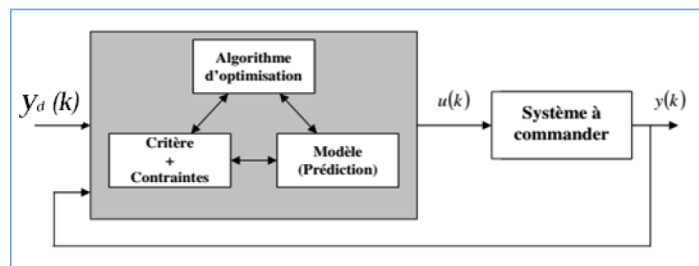


FIGURE IV.2 – La stratégie de la commande prédictive

IV.3 La commande Prédictive Généralisé :

IV.3.1 Historique :

C'est en 1987 que D.W. Clarke et al, ont présenté la première version de la Commande Prédictive Généralisée (Generalised Predictive Control, GPC), par la suite cette méthode a connu le plus grand nombre d'applications [20].

IV.3.2 Définition :

La commande prédictive généralisée (GPC :Generalized Predictive Control) de Clarke, est considérée comme étant la plus populaire des méthodes de prédiction, particulièrement pour les processus industriels. Elle combine la prédiction du comportement futur du procédé avec la commande de rétroaction [20].

IV.3.3 Principe de la commande prédictive généralisé :

La commande prédictive est un problème qui est résolu de manière répétée à chaque pas de temps du problème de commande optimal : "comment passer de manière optimale

de l'état actuel au but tout en satisfaisant les contraintes". Pour cette raison, il est nécessaire d'utiliser des outils d'analyse numérique pour comprendre l'état du système à chaque itération [15].

Le schéma de principe du commande prédictive général est présenté dans la figure IV.3 :

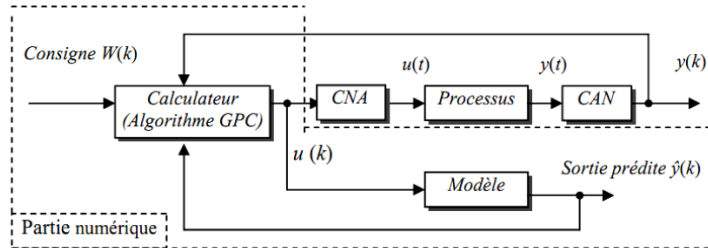


FIGURE IV.3 – Schéma principe du GPC

Si on veut faire coïncider dans le futur la sortie du processus avec une consigne ou avec une trajectoire de référence, il est nécessaire :

- A l'aide du modèle numérique du système, la sortie future du processus peut être prédite dans une plage clairement définie ;
- Calculer l'ordre des commandes futures en minimisant le standard quadratique de l'erreur entre la sortie prédite et le point de consigne ;
- N'appliquez que la première commande sur le système, puis répétez le processus dans la période d'échantillonnage suivante en fonction de la stratégie de champ de vision insaisissable.

IV.3.4 Modélisation de la commande prédictive généralisé :

IV.3.4-a Le cas sans contrainte :

1) Modèle de prédiction et la fonction coût :

La commande GPC utilise pour la prédiction du comportement un modèle entrée/sortie par fonction de transfert de type CARIMA (Controlled Auto Regressive Integrated Moving Average).

Dans le cas de la GPC, le modèle de prédiction est donné par :

$$A(z^{-1}).Y(k) = B(z^{-1}).U(t-1) + C(z^{-1}).e(k)/\Delta \quad (\text{IV.1})$$

Où :

$$C(z^{-1}) = 1 + C_1z^{-1} + C_2z^{-2} + \dots + C_{nc}z^{-nc} \quad (\text{IV.2})$$

Avec : (nc est le degré de C)

A et B sont les polynômes de degrés n_a et n_b dans l'opérateur de retard z^{-1} respectivement. $\Delta = 1 - z^{-1}$ s'appelle l'opérateur de différence, sa fonction est d'assurer l'effet intégral sur le contrôleur élimine les effets des interférences.

$e(k)$ est un bruit blanc gaussien de moyenne nulle. Le modèle représenté par l'équation (IV.1) qui représente le système à contrôler est appelé modèle CARIMA, qui constitue le modèle de base du système de contrôle. La méthode GPC, à partir de laquelle l'expression

de la loi de contrôle peut être dérivée.

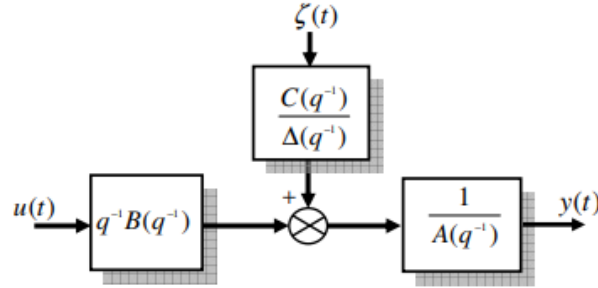


FIGURE IV.4 – Modèle CARIMA

Le but recherché avec l'introduction d'un intégrateur est l'annulation de toute erreur statique vis-à-vis d'une consigne ou d'une perturbation constante. On prendra par la suite $C(z^{-1}) = 1$

Pour déterminer les commandes appliquées au système à l'instant k , la méthode GPC minimise les critères suivants :

$$j(k) = \sum_{j=N_1}^{N_2} [Y(k+j) - W(k+j)]^2 + \sum_{j=N_1}^{N_{u1}} \lambda [\Delta u(k+j)]^2 \quad (\text{IV.3})$$

Avec : $\Delta u(k+j) = 0$ pour $j \geq N_u$

Où :

- N_1 : l'horizon minimal de prédiction.
- N_2 : l'horizon maximal de prédiction.
- N_u : l'horizon de commande.
- λ : le facteur de pondération du signal de commande ($\lambda > 0$)
- $W(k+j)$: la trajectoire future de référence connue à l'avance.
- $\Delta u(k+j)$: l'incrément de contrôle.

Pour simplifier le calcul de la loi de commande GPC on va poser : $C(z^{-1}) = 1$, On détermine que le prédicteur s'écrit sous la forme matricielle :

$$\hat{Y} = G \cdot U + F$$

Où : \hat{Y} , U et F sont vecteurs de dimensions $N \times N$ avec :

$$\hat{Y} = [y(k+1), y(k+2), \dots, y(k+N)]^t \quad (\text{IV.4})$$

$$\check{U} = [\Delta u(k) + \Delta u(k+1), \dots, \Delta u(k+N-1)]^t \quad (\text{IV.5})$$

$$F = [f(k+1), f(k+2), \dots, f(k+N)]^t \quad (\text{IV.6})$$

Et

$$f(k+j) = [g(j, j)Z^{-j} + g(j, j+1)Z^{-(j+1)} + \dots + g(j, nb+j-1)Z^{-(nb+j-1)}] \cdot \Delta u(k+j-1) + F_j \cdot y(k) \quad (\text{IV.7})$$

Pour : $N_1 = 1$ et $N_2 = N$

$$G = \begin{bmatrix} g(1,0) & 0 & 0 & \dots & 0 \\ g(2,1) & g(2,0) & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ g(N, N-1) & g(N, N-2) & g(N, N-3) & \dots & g(N, 0) \end{bmatrix} \quad (\text{IV.8})$$

2) Loi de la commande prédictive :

On calcule la loi de commande pour minimiser le critère quadratique suivant :

$$j(k) = \sum_{j=1}^{N2} [Y(k+j) - W(k+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_{u1}} \lambda * [\Delta u(k+j)]^2 \quad (\text{IV.9})$$

Avec : $\Delta u(k+j) = 0$ pour $j \geq N_u$

Le terme $[Y(k+j) - W(k+j)]^2$ représente la somme pondérée de l'erreur future entre la sortie future et le signal de valeur de consigne $W(k+j)$ ($j = 1 \dots N2$)

Le terme $[\lambda * \Delta u(k+j)]^2$ représente de coût de l'effort de commande.

Le critère (3) on peut écrire sous la forme matricielle suivante :

$$J = (Y - W)^T \cdot (Y - W) + \lambda \cdot U^T \cdot U \quad (\text{IV.10})$$

On remplace la résultat $Y = G \cdot U + F$ dans l'équation précédente (10)

On obtenir :

$$J = (G \cdot U + F - W)^T \cdot (G \cdot U + F - W) + \lambda \cdot U^T \cdot U \quad (\text{IV.11})$$

J est minimum si : $\frac{\delta j}{\delta u} = 0$, qui nous donne :

$$U = [G^T \cdot G + \lambda \cdot I]^{-1} \cdot G^T \cdot (W - F) \quad (\text{IV.12})$$

Avec I est une matrice identité. La dernière équation peut fournir les incréments futures de contrôle pour les instants (k) jusqu'à $(k + N_u - 1)$, basé sur les informations à (k)

On peut appliquer juste $\Delta u(k)$ au système et la commande.

Alors :

$$u(k) = \Delta u(k) + u(k-1) \quad (\text{IV.13})$$

Le critère de minimisation sera répété pour chaque échantillon afin de calculer la nouvelle commande à appliquer au système.

IV.3.4-b Le cas avec contrainte :

Dans toutes les technologies de commande prédictive, les variables d'entrée, d'état et de sortie du système sont généralement limitées par son domaine. Il existe de nombreux types de ces contraintes : limitations physiques des actionneurs, spécifications de qualité des produits, exigences de sécurité et domaine de tolérance de sortie. Par exemple, en pratique, le signal de commande doit répondre aux contraintes du domaine effective de l'actionneur (son domaine de travail). Dans ce cas, si l'on suppose que l'intervalle $[U_{min}, U_{max}]$ est le domaine effective à partir de l'angle de l'actionneur, alors on peut écrire les contraintes de contrôle sur $u(t)$ comme suite :

$$u_{min} \leq u \leq u_{max}$$

Cette contrainte peut aussi s'exprimer par l'incrément de commande $\Delta u(k)$

$$\Delta U_{min} \leq \Delta U \leq \Delta U_{max}$$

Le problème de la GPC avec contraintes dans ce cas est de minimiser le critère J , donc on peut écrire J sous cette forme :

$$J = \frac{1}{2}U^TQU + d^TU + C \quad (IV.14)$$

Avec :

$$Q = G^TG + \lambda I \quad (IV.15)$$

$$d = 2(f_{conu} - W)^TG \quad (IV.16)$$

$$C = (f_{conu} - W)^T - (f_{conu}) \quad (IV.17)$$

Remarque sur le choix des paramètres du GPC :

— **Choix de l'horizon minimal de prédiction N1 :**

Pour les systèmes sans délai, $N1 = 1$, sinon $N1$ prend la valeur du délai de processus pur. Pour les systèmes à déphasage non minimum, $N1$ est égal au nombre maximum d'échantillons dans lesquels ce phénomène se produit. Si le retard du système est inconnu ou variable, nous acceptons de choisir $N1 = 1$.

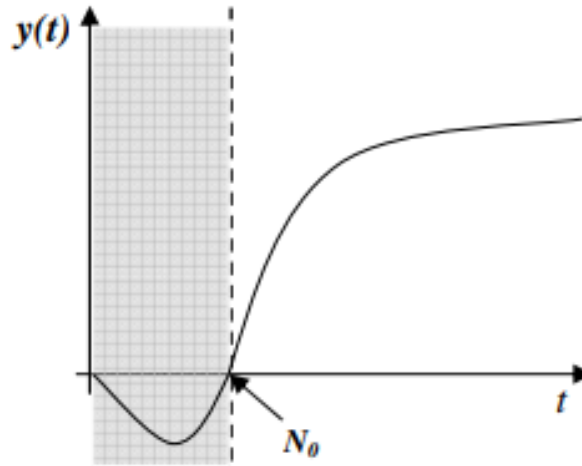
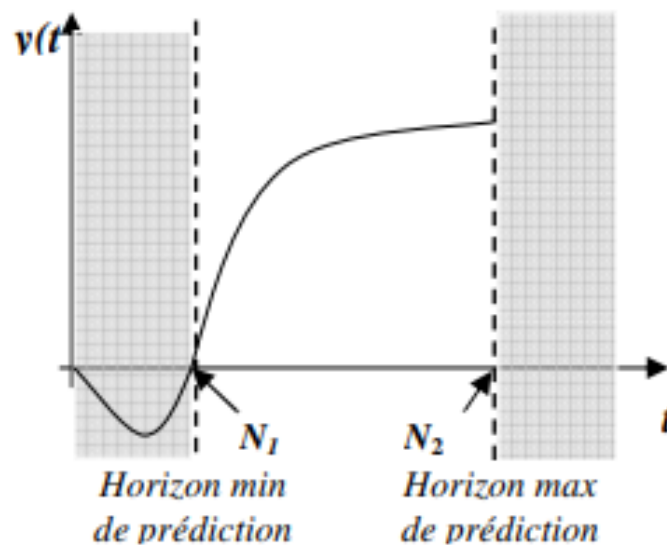


FIGURE IV.5 – Valeur de $N1$ pour un système à phase non minimale

— **Choix de l'horizon minimal de prédiction N2 :**

On choisit $N2$ pour que le produit $N2$ et T_e (période d'échantillonnage T_e) soit égal au temps de réponse requis par le système. Notez que plus le $N2$ est grand, plus le temps de calcul est long [IV.6](#).

— **Choix de l'horizon minimal de prédiction N_u :**

FIGURE IV.6 – Valeur de N_2 pour un système à phase non minimale

Choisissez généralement une gamme relativement courte de marches nues. En raison du champ de vision croissant cependant, les commandes ont des problèmes de conditionnement et de temps de calcul. En fait, N_u a fixé la dimension de la matrice à inverser dans le calcul u_{op} .

— **Choix de l'horizon minimal de prédiction λ :**

C'est le paramètre d'ajustement le plus compliqué car il affectera la stabilité du système circulaire. En effet, si λ est très élevé, l'influence de la commande peut être pondérée dans l'optimisation, de sorte que plus ou moins de correcteurs d'énergie peuvent être générés, lesquels peuvent être générés plus ou moins rapidement [20] .

IV.3.5 Application de la GPC sur la MCC :

— **Commande prédictive généralisé mono-variable :**

Envisageons dès lors l'application de l'ensemble de la méthodologie développée ci-dessus à un système double intégrateur et constante de temps (correspondant par exemple à la fonction de transfert d'un moteur à courant continu en sortie position, pour laquelle les frottements visqueux seraient négligeables). Ce type de système a été retenu car l'obtention d'un comportement entrée/sortie sans dépassement en réponse à un échelon de consigne nécessite un choix de paramètres de réglage de la loi de commande très pénalisant en termes de temps de réponse. Cet exemple a donc pour but d'illustrer comment, à partir d'un réglage initial pour lequel le comportement entrée/sortie présente un certain dépassement, il est possible d'élaborer des autres paramètres de synthèse permettant de respecter un comportement entrée/sortie souhaité. On arrive ainsi à un comportement entrée/sortie sans dépassement, avec la dynamique de poursuite désirée et garantir des bonnes caractéristiques de robustesse.

— **Commande prédictive généralisé multi-variable :**

Dans ce problème en va examiner la capacité de cette stratégie de commande multi variable de poursuivre la consigne, respecter les restrictions, rejeter les perturbations, réunir des

objectifs économiques en présence des temps morts longs, gain incertain de modèle, des contraintes multiples et des réponses rapides et lentes mélangées [20] .

IV.3.6 Avantages de modèle de CARIMA :

- L'amélioration de la qualité d'identification des paramètres de modèle de processus à contrôler.
- L'effet d'éliminer l'influence des oscillations de perturbation non désirées.

IV.4 Résultat de simulation

Les simulations représente dans l'annexe.

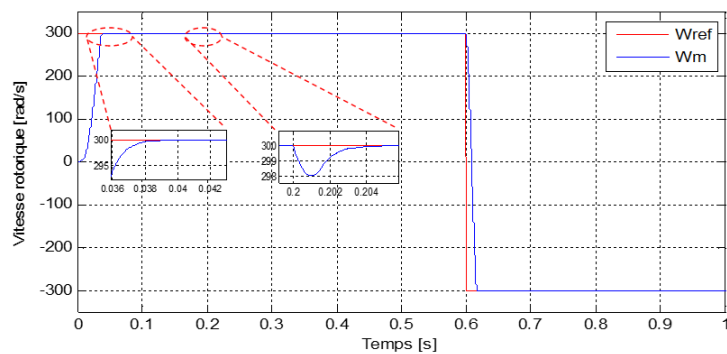


FIGURE IV.7 – Résultat de vitesse rotorique

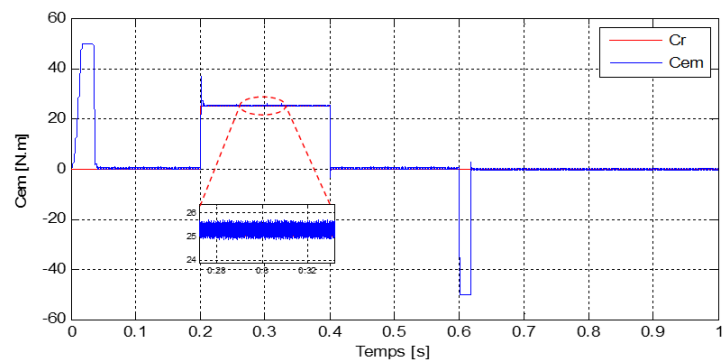


FIGURE IV.8 – La courbe de couple électromagnétique

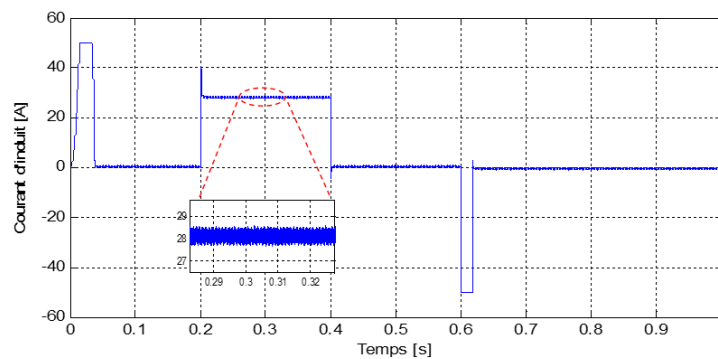


FIGURE IV.9 – La courbe de courant

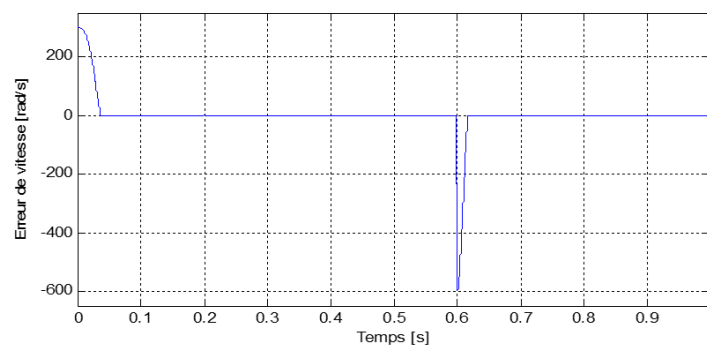


FIGURE IV.10 – La courbe de l'erreur

Interprétation des résultats :

La figure IV.7 présente l'évolution de la vitesse du moteur à courant continu commandée par GPC.

Le résultat de simulation de la commande par GPC de la MCC, la vitesse suit sa consigne avec un temps de réponse 0.038 second, sans dépassement et avec une erreur statique presque nulle. Après l'application d'un couple résistant de ($C_r = 25 \text{ N.m}$) à l'instant $t = 0.2\text{s}$ à 0.4s , nous remarquons que l'application de la charge entraîne une variation de vitesse pendant un bref de temps (la vitesse suit sa consigne après une très petite perturbation), puis elle se stabilise à la même valeur qu'avant.

On peut remarquer que la stratégie de commande par GPC est plus performante (plus rapide et sans dépassements) et robuste vis-à-vis aux perturbations externe.

D'après les figures IV.8, IV.9 on remarque qu'on a des petites ondulations tels que le courant proportionnelle au couple, ils sont identique avec les courbes obtenu par la commande adaptative III.8, III.9.

On notant que l'inversement de sens de rotation n'impacte pas à la réponse de système avec la consigne de vitesse.

IV.5 Etude comparative :

Le but ici est de comparer les performances des commandes PI, MRAC et GPC. On peut remarquer que la stratégie de MRAC et GPC est plus efficace (plus rapide, moins de dépassement). Vous pourriez penser que les paramètres sont très bien réglés et permettront un régulateur MRAC et GPC mieux que le régulateur PI. Au régulateur PI, il y a un dilemme de dépassement de vitesse.

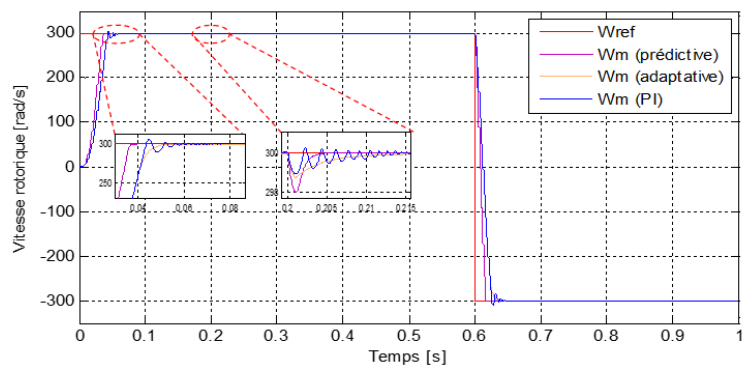


FIGURE IV.11 – Comaparaison entre les différents techniques de commande

Ces tableaux représente une étude comparative entre les commandes qui on a étudié :

TABLE IV.1 – Comparaison entre les régulateurs PI, MRAC et GPC

Indice de performance	PI	MRAC	GPC
Rejet de perturbation	0.015s	0.015s	0,004s
Temp de réponse	0.065s	0.055s	0,038
Dépassement	1.66%	0%	0%

TABLE IV.2 – Comparaison entre les régulateurs PI, MRAC et GPC

<i>PI</i>	<i>MRAC</i>	<i>GPC</i>
-Calcul simple dans le cas d'un régulateur PI conventionnel. - La commande du processus PI reste plus longtemps sur sa contrainte en comparaison avec MRAC.	- Utilisation de la méthode de stabilité de Lyapunov. Assurer la stabilité en boucle fermé	- Utilisation la représentation CARIMA. - le traitement des contraintes est conceptuellement simple.

<i>PI</i>	<i>MRAC</i>	<i>GPC</i>
	<ul style="list-style-type: none"> - L'obtention de la loi de commande demande beaucoup effort de calcul. - Possibilité d'améliorer la dynamique du procédé avec les paramètres de réglage. - Basée essentiellement sur l'emploi du modèle de référence afin de désigner la performance désire du système. 	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne continuation du chemin de référence lors des changements d'instructions.

L'étude qui on a fait montre que la GPC est plus efficace que la MRAC et PI.

IV.6 Conclusion :

La technique de la commande prédictive qui ont été présenté dans cette étude ont connu un grand développement dans ces dernières années.

Dans ce chapitre nous avons porté une étude sur la commande prédictive généralisée (GPC).

Nous avons donné les concepts de base et le principe de la commande prédictive .

Nous avons fait un etude comparative entre les différents techniques de commande.

Conclusion générale

Dans notre travail, nous avons étudié la technologie de commande adaptative et prédictive appliquée aux moteur à courant continu à excitation séparée.

Premièrement, nous avons cité les différentes stratégies de commande et leurs principes de fonctionnement (commande adaptative, commande prédictive, commande optimal et commande neuronal).

Deuxièmement, nous avons modélisé le MCC, nous avons retenu la représentation interne du système (modèle d'état et la fonction de transfert) et visualisé les résultats de la simulation du MCC. L'application de la commande PI sur la MCC lui permet de contrôler sa position et d'éliminer les interférences statiques qui affectent les paramètres nominaux.

Ensuite, On a étudiés la commande adaptative du modèle de référence et la commande prédictif généralisé du MCC. La MRAC a montré son efficacité dans le contrôle des MCC. D'autre part, il peut éliminer les effets des interférences aux perturbation externe, en assurant que le modèle de référence est parfaitement suivi dans des conditions de poursuite. La commande GPC indique de bonnes performances de poursuite, une suppression des interférences et une robustesse aux changements de paramètres. Il a été montré que les performances de sortie du processus de contrôle peuvent être améliorées par les paramètres agissant sur le régulateur, qui ont un impact direct sur les commandes générées par le régulateur adaptatif et prédictif.

Bibliographie

- [1] SETTI Mohamed ABDELHAK : Commande sans modèle et à modèle restreint d'une machine à courant continu. Mémoire de D.E.A., université Larbi Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi - Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées Département de Génie Electrique Filière électrotechnique Mémoire de fin d'études En vue de l'obtention du Diplôme de Master Spécialité : Commande Electrique, 2018.
- [2] CHEMORI AHMED : *Note de cours : Commande adaptative, Introduction à la commande adaptative*, 2015/2016.
- [3] YKHELFOUNE Nedjmeddine BOUTANA WALID : Etude comparative en simulation entre un régulateur pid et un régulateur flou. Mémoire de D.E.A., Université Mohammed Seddik BENYAHIA - Jijel Faculté des Sciences et de la Technologie Département d'Electronique Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Master en Electronique, 2019.
- [4] DIVOUX CLAUDE : *Terminale STI Hacheur série*, 1999.
- [5] ELECTROTECHNIQUE : *Type de moteur à courant continu*.
- [6] ELECTROTECHNIQUE : Electrotechnique. [http ://www.electrosup.com/index.php](http://www.electrosup.com/index.php), 2010.
- [7] BENALI Dihia et BAKEL IMEN : Commande adaptative floue d'un système non-linéaire. Mémoire de D.E.A., Université Tizi-Ouzou Mémoire de fin d'étude, 2009.
- [8] Bali Ali et BOUGHAZALA HAMAD HAITHAM : Commande en vitesse par placement de pôles d'un moteur à cc (base datmega). Mémoire de D.E.A., Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued Faculté de Technologie Mémoire de Fin d'Étude En vue de l'obtention du diplôme de MASTER ACADEMIQUE, 2018.
- [9] BENCHICHA Amira-Saadia et DIABATE FODE : *Commande prédictive du moteur à courant continu*. Thèse de doctorat, université Timouchent, 2018/2019.
- [10] Sincere FABRICE : *Electrotechnique*, 2017.
- [11] Yacine FERDJOUKH : *Commande Prédictive Généralisée : Application Au Moteur A Excitation Séparée*. Thèse de doctorat, université Msila, 2015/2016.
- [12] Jean-Marc GIRAULT : *La commande optimale*, Décembre 2011.
- [13] Zerfa hibat ALLAH : Commande adaptative de la machine à courant continu. Mémoire de D.E.A., université Larbi Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi - Mémoire de fin d'études En vue de l'obtention du Diplôme de Master Spécialité : Informatique industrielle, 2014/2015.

-
- [14] Imed HIDRI : *Institut supérieur des études technologiques de Nabeul Département : Génie Electrique Support de cours Délectronique de puissance Les convertisseurs DC-DC et DC-AC Classe concernée : EI2 L2 S2*, 2015/2016.
- [15] Mhaned KEBBICHE : *Commande prédictive dun actionneur électromécanique. Mémoire de D.E.A., université Bejaia MEMOIRE Présenté pour lobtention du diplôme de MASTER, 2017/2018.*
- [16] LAROCHE : *Régulateur PI : Commande des Machines*, 2008/2009.
- [17] A. MECHERNENE : *Notes de cours : Techniques d'intelligence Artificielle , Master M2-ELT-CE, Semestre S1 - EC921*, 2019.
- [18] Gélard PETITJEAN : *Cours introduction aux réseaux de neurons.*
- [19] Hocine Lazouzi Fouchal RAZIKA : *Commande adaptative des systèmes á paramètres localisées : application á la régulation insuline-glucose. Mémoire de D.E.A., université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou Mémoire de Fin dEtude de MASTER ACADEMIQUE Spécialité : Automatique et Système*, 2018.
- [20] Meziane SALIMA : *Commandes Adaptative et Prédicitive de la machine Asynchrone. Thèse de doctorat, Université MENTOURI CONSTANTINE ,Pour obtenir le diplôme de DOCTORA en Science en Electrotechnique Spécialité Machine électrique*, 2009.
- [21] Ménigot SÉBASTIEN : *Commande optimale appliquée aux systèmes dimagerie ultrasonore. Thèse de doctorat, université Francois-Rabelais de Tours*, 2011.
- [22] Hacheur série TP.

Conditions de simulations

Les différentes simulations réalisées lors de ce travail ont été faites à l'aide du logiciel MATLAB (version 2014) et son outil de simulation SIMULINK. Les conditions adoptées lors des simulations sont les suivantes :

Paramètre de la MCC :

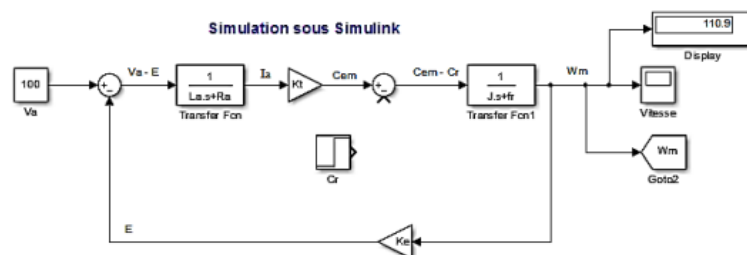
Puissance nominale : 10 KW.

Vitesse nominale : 3820 tr/min.

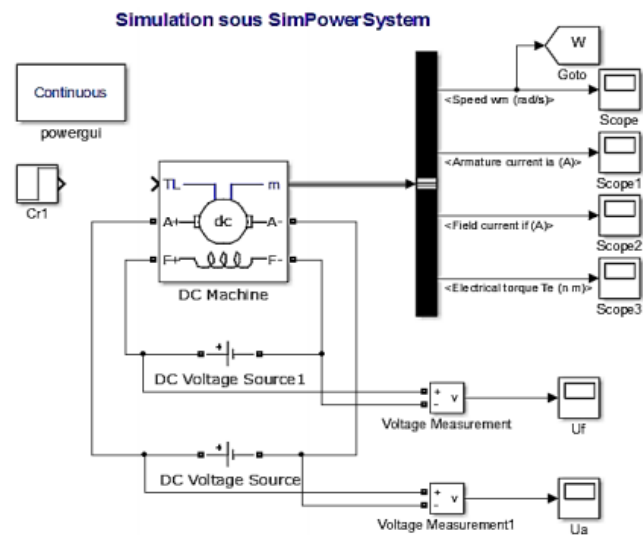
Charge constante : 25 N.m (application en régime permanent).

Modèles Simulink construit pour les différentes simulations

Simulation de la MCC sous Simulink :



Simulation de la MCC sous SimPowerSystem :



Simulation de Schéma bloc de régulateur PI de la MCC :

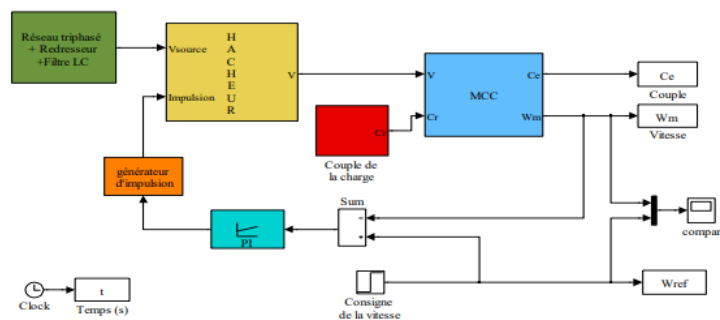


FIGURE 12 – Schéma bloc PI de MCC

Simulation de commande Adaptative :

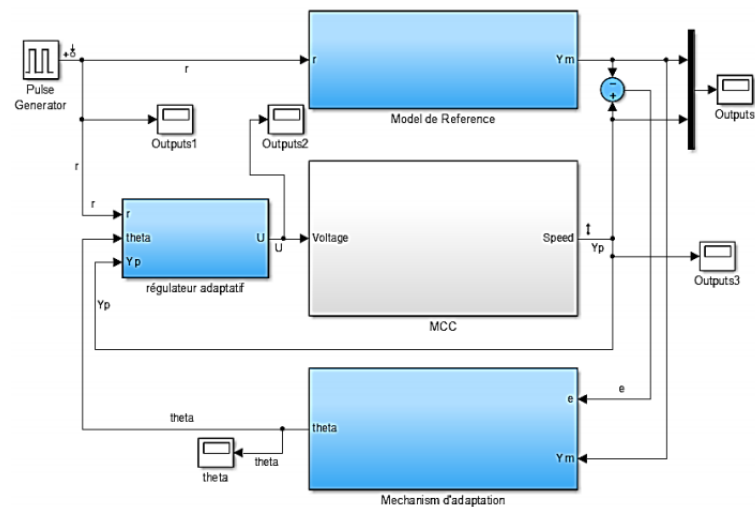


FIGURE 13 – Schéma bloc de la commande adaptative

Programme de la commande prédictive :

```

clc
R=4.88;% résistance de l'induit
L=0.0384;%inductance de l'induit
F=0.0131;%coefficient de frottement
J=0.0091;%moment d'inerti
K=0.9533;%raoport entre le couple et le courant
num1=K;
num2=[L R];
den=[J*L J*R F*L (F*R+K^2)];
sys1=tf(num1,den);
[A1,B1,C1,D1] = tf2ss(num1,den);
sys2=tf(num2,den);
[A2,B2,C2,D2] = tf2ss(num2,den);
Ts=0.001;

MV=struct('Min',-inf,'Max',Inf,'RateMin',-inf,'RateMax',inf);
OV=struct('Min',-inf,'Max',1);

p=120;
m=35;
%mpcccon=mpc(ss(A1,B1,C1,D1),Ts,p,m);
mpcccon=mpc(ss(A1,B1,C1,D1),Ts,p,m,[],MV,OV);

Tstop=5;
xo=[0 0 0]';

```

FIGURE 14 – Programme de la commande prédictive

Commande adaptative et prédictive de la machine à courant continu à excitation séparée

Résumé

Le but de ce travail dans un premier lieu est de présenter une multitude de techniques de régulation alternatif à la régulation conventionnelle PI, à savoir (la commande adaptative et la commande prédictive). Puis la mise en œuvre d'une loi de commande, prédictive et adaptative de haute performance appliquée à la machine courant continu, avec comme objectif d'améliorer la poursuite de trajectoire, garantir la stabilité, la robustesse et le rejet de perturbation. Des tests de simulations numériques sont effectués par le logiciel MATLAB / SIMULINK, les résultats obtenus démontrent l'efficacité et les performances dynamiques et statiques des stratégies proposées.

Mots clés

Moteur à courant continu ; Hacheur ; Régulateur PI ; Commande adaptative ; Commande prédictive.

Adaptive and predictive control of DC machine

Abstract

The goal of this work first is to present a multitude of alternative regulation techniques to conventional PI regulation, namely (adaptive control and predictive control). Then the implementation of a high-performance control, predictive and adaptive law applied to the direct current machine, with the objective of improving the pursuit of trajectories, guaranteeing stability, robustness and the rejection of disturbance. Numerical simulation tests are performed by MATLAB SIMULINK software, the results obtained demonstrate the efficiency and the dynamic and static performance of the proposed strategies.

Keywords

DC motor ; DC/DC converter ; PI regulator ; Adaptive control ; Predictive control.

التحكم التكيفي والتنبئي لألة التيار المستمر

الملخص:

الهدف من هذا العمل أولاً هو تقديم العديد من تقنيات التنظيم البديلة للتنظيم التقليدي، وهي (التحكم التكيفي والتحكم التنبئي). ثم يتم تطبيق قانون التحكم، التنبؤ والتكيف، عالي الأداء المطبق على آلة التيار المستمر، بهدف تحسين تتبع مسار السرعة، وضمان الاستقرار والمتانة ورفض الاضطرابات. يتم إجراء اختبارات المحاكاة بواسطة برنامج MATLAB SIMULINK، وتظهر النتائج التي تم الحصول عليها الكفاءة والأداء الديناميكي والثابت للاستراتيجيات المقترحة.

الكلمات المفتاحية:

آلة التيار المستمر، محول مستمر/مستمر، منظم PI، التحكم التكيفي؛ التحكم التنبئي.