

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبو 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 :

MADI MADJEDA

BENAISSI IKRAM

Intitulé du mémoire

**Etude comparative des servomoteurs à CC de faibles puissances
fabriquées en série**

Soutenu publiquement, le / 06 /20 23 , devant le jury composé de :

**M BOUMEDIENE
Abdelmadjid**

Professeur

Université de Tlemcen

Président

M DRIS Younes

Maitre-assistant 'B'

Université de Tlemcen

examinateur

Mme GHLAM Karima

Maitre de conférence 'B'

Université de Tlemcen

Encadreur

Année Universitaire : 2022 / 2023

Dédicace

Je tiens à dédier ce mémoire de fin d'études à toutes les personnes qui m'ont soutenu et encouragé tout au long de ce parcours académique.

Tout d'abord, je souhaite exprimer ma gratitude à mes parents pour leur soutien inconditionnel, leurs encouragements constants et leur amour. Leur soutien financier et moral ont été essentiels pour que je puisse réaliser mes études et atteindre cet objectif.

J'adresse également mes remerciements à mes professeurs et encadrants académiques qui m'ont guidé, enseigné et partagé leur expertise tout au long de ce parcours. Leurs conseils, leur patience et leur passion pour l'enseignement ont grandement contribué à ma formation et à la réussite de ce mémoire.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers mes amis et camarades de classe qui ont été présents à chaque étape de ce voyage. Leur soutien, leur collaboration et leur motivation partagée ont rendu cette expérience d'apprentissage plus enrichissante et agréable.

Dédicace :

- **BENAISSI BOUZIYEN**
- **SLIMANI AMEL**
- **Mon marie SLIMANI ABDELKADIR**
- **BOUABDALLAH SAMIRA**
- **Mes cher soeurs et frères**

Dédicace :

- MADI ABBES**
- BOUCHNAFA NACIRA**
- Mes cher soeurs**
- MOUSSA AYMEN YOUNES**

Remerciements

Tout d'abord, nous exprimons notre gratitude au Dieu Tout-Puissant pour nous avoir donné la force et la patience nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.

Le présent mémoire a été réalisé sous la direction de Madame GHLAM Karima, Maître de conférence 'B' à l'université Abou BekrBelkaid de Tlemcen, qui a eu l'honneur de superviser ce travail. Nous tenons à lui exprimer notre profonde reconnaissance et nos vifs remerciements pour son soutien, ses précieux conseils, ses sacrifices et la confiance qu'elle nous a accordée tout au long de la réalisation de ce travail.

Nous souhaitons adresser nos sincères remerciements à chacun des membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de le enrichir par leurs propositions :

Monsieur, BOUMEDIENEAbdelmadjid, à l'Université Abou BekrBelkaid de Tlemcen, pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de présider le jury.

Monsieur Dris Younes, à l'Université Abou BekrBelkaid de Tlemcen, pour avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail. Leur participation a été précieuse et nous leur sommes reconnaissants

Table des matières

Dédicace

Remerciements

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Introduction Générale :	1
<i>CHAPITRE I: servomoteurs à faible puissance</i>	3
1.1 Introduction	4
I.2 . Différents types de servomoteur	5
I.2.1. Servomoteur standard (à rotation de position)	5
I.2.2. Servomoteur à rotation continu	5
I.2.3. Servomoteur à rotation linéaire	5
I.2.4. Servomoteur analogique avec signal de feedback	5
I.3 .Servomoteur(ou servo-moteur)	5
I.4 .Servomoteurs CC PM à balais	6
I.5. Servomoteur CC sans balais	9
I.6. Composants d'un servomoteur	10
I.6.1 Micromoteur à courant continu (MCC)	11
I.6.2 Train d'engrenages	11
I.6.3 Potentiomètre et la carte électronique	11
I.7. Applications d'un servomoteur	13
I.7.1.Fauteuils roulant	13
I.7.2. Véhicules robotique Mars	15
I.8. Micromoteur	16
I.9.Micromoteurs CC à aimant permanent	16
I.9.I. Moteurs cylindriques à bobine mobile	19
I.9.2. Moteur à disque	25

I.10. Conclusion	26
CHAPITRE II :Micromoteur cc en série de Faulhaber et Maxon	27
II.1. Introduction :	28
II.2. Moteur CC de FAULHABER	28
II.2.1.Les avantages	30
II.3. Moteur CC MAXON	31
II.3.1. Avantages	32
II.4.Comparaissant entre le micromoteur à cc Faulhaber et Maxon	33
II.5 Conclusion	41
CHAPITRE III : Simulation de servomoteur à courant continu.	43
III .1.Introduction	44
III .2.Généralité sur Matlab	45
III.3 Modélisation d'un micromoteur à CC	46
III.3.1 Caractéristiques électriques	46
III.3.2 Caractéristiques mécaniques	47
III.4. Schémas blocs du moteur	48
III.5. Modélisation d'un moteur à CC	51
III.6. Modélisation d'un servomoteur à CC	52
III.6.1.Equation de mouvement	52
III.7. Fonction de transfert d'un micromoteur a cc	55
III.8. Fonction de transfert d'un servomoteur	55
III .9. Modèle du système micromoteur	56
III.10. Modèle du système Servomoteur	59
III.11. Simulation et régulation en cascade de Serovmoteur	62
III.11.1.Résultats de la simulation	63
III .12.Généralite sur le régulateur	65
III .12.1.Synthèse des régulateurs	
PI.	65

III.12.2.Résultats de la simulation.....	69
III.12.3.Résultats de la simulation et de la régulation en cascade.....	71
III .13.conclusion	69
Conclusion générale :	72
<i>Référence bibliographique</i>	73

تلخيص

Résumé

Abstract

Liste des figures

Figure. I.1: Commande de vitesse par variation de la tension au borne de l'induit d'un moteur PM cc ($V1 < V2 < V3 < V4$)	7
Figure I.2 : Vue agrandie d'un noyau cylindrique de type champ intérieur PM. CC servomoteur collecteur	8
Figure I.3: Caractéristiques mécaniques $t=f(v)$ à $\alpha = \text{constant}$ et caractéristique de contrôle $v = f(\alpha)$ à $t=\text{constant}$ d'un PM CC servomoteur à balais.	8
Figure I.4: Servomoteur cc sans balais	10
Figure I.5 : Architecture d'un servomoteur	10
Figure. I.6 : Schéma bloc fonctionnel	12
Figure .I.7: Schéma fonctionnel d'un système d'entraînement de fauteuil roulant avec deux. moteur d.c. à collecteur PM	14
Figure I.8 :Véhicules robotiques pour les mission smartiennes	15
Figure I.9 :Rotor à encoches	18
Figure I.10 : Rotor sans encoches	18
Figure 1.11.Moteurs à collecteur PM à bobine de type de champ extérieur	20
Figure I.12. Rotor à bobines mobiles cylindriques de type de champ intérieur	22
Figure I.13. Caractéristique en régime permanent du moteur courant continu sans noyau à collecteur avec bobine à enroulement oblique Faulhaber	23
Figure I.14.Enroulement cylindrique sans noyau à bobine mobile selon la publication de demande de brevet U.S.2007/0103025	24

Figure II.1 : Micromoteur cc Faulhaber SR	29
Figure II.2 : Micromoteur cc Faulhaber CR	29
Figure II.3 :Micromoteur cc Maxon A-max et RE-max	32
Figure II.4 :.Moteurs DC de haute précision depuis 1961	34
Figure II.5 :Courbe du rendement en fonction de la puissance nominale des micromoteurs	39
Figure II.6 :Courbe du poids par unité de puissance en fonction de la puissance nominale des micromoteurs CC	40
Figure .III.1 : Environnement MATLAB	46
Figure .III.2 : Schéma bloc du micromoteur MCC	48
Figure .III.3 : Schémas blocs du micromoteur CC complet	49
Figure .III.4 : courbe de la vitesse en fonction du temps du micromoteur CC	49
Figure .III.5: Courbe de la vitesse en fonction du temps d'un modèle du micromoteur CC complet	50
Figure .III.6: la courbe de courant d'un modèle complet de micromoteur à cc	51
Figure III.7 : La courbe de couple d'un modèle complet de micromoteur à cc	52
Figure. III .8 : Schéma bloc du servomoteur CC	54
Figure. III .9 : Subsysteme d'un servomoteur à cc	54
Figure. III .10 : Courbe de la position en fonction du temps	58
Figure. III .11 : courbe de la vitesse en fonction du temps	58

Figure.III .12 : represente la position de servomoteur	60
Figure.III.13 : represente la position de servomoteur	61
Figure .III.14 : represente position de servomoteur	61
Figure.III.15: Schéma bloc d'un servomoteur avec une régulation en cascade.	63
Figure. III.16 : la courbe de courant d'un servomoteur avec régulation en cascade	63
Figure. III.17 : la courbe de position d'un servomoteur avec régulation en cascade	64
Figure. III.18 : Schéma bloc de regulateur PI pour controler le courant	69
Figure. III.19: Schéma bloc de regulateur pour controler la vitesse de systeme	69
Figure. III.20 : Courbe du courant de l'induit du moteur utilisant un régulateur PI	70
Figure. III.21 : Courbe de la vitesse utilisant un regulateur PI.	70
Figure. III.22 :. Courbe de courant I utilisant une régulation en cascade.	71
Figure. III.23 :Courbe de la vitesse utilisant une régulation en cascade	71

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Spécifications des moteurs Maxon avec Ndfcb PM et balais en métal précieux.	16
Tableau .II.1 Micromoteur à courant continue gamme (range) moteurs à balais DCX Maxon à bobinage sans fer	35
Tableau. II.2 Séries RE Maxon Micromoteur à courant continue gamme (range) moteurs à balais RE Maxon à bobinage sans fer, équipés de puissance moteur à aimants permanents	36
Tableau. II.3 ECX SPEED brushless, moteur BLDC	37
Tableau .II.4 Commutation des métaux précieux	38
Tableau. II.5 Micromoteurs CC plats	38
Tableau III.1 Les paramètres de micromoteur a cc	53
Tableau III.2 Les paramètres de servomoteur a cc	56

Nomenclature

MCC : Micromoteur à courant continu

PMDC : Moteur courant continu à aimant permanent

PWM : Modulateur de largeur d'impulsion

CA : Courant alternatif

BLDC : Moteurs CC sans balais

η : Rendement du moteur

EDI : Environnement de développement intégré

To : Couple de perte par frottement

I_{ash} : Courant d'induit de démarrage

E(t) : Source de tension commandé

K : Constant de couple

E : Force électromotrice

CC : Courant continu

J : Moment d'inertie

B : coefficient de frottement

T : le couple résistant

W : vitesse angulaire

U : la tension appliquée au moteur

I : l'intensité traversant le moteur

E : la force électromotrice

n: la vitesse de rotation

H(s) : la fonction de transfert

K : le gain statique de la fonction de transfert,

τ : la constante de temps électromécanique du moteur

S : la variable de Laplace.

θ : Accélération angulaire du rotor (en radians par seconde carré)

J : l'inertie du rotor (en kilogramme mètre carré).

Introduction générale

Introduction Générale :

La technologie des microsystèmes a progressé rapidement au cours des dernières décennies et joue un rôle de plus en plus important dans le développement de technologies innovantes des produits. Dans les microsystèmes, les capteurs et les actionneurs sont intégrés avec des composants de traitement de l'information, ce qui donne des dispositifs compacts et légers, qui offrent d'autres avantages tels qu'une faible consommation d'énergie, une grande fiabilité, adaptabilité et amélioration du rapport coût-bénéfice. Les microsystèmes couvrent une large éventail de domaines d'application tels que la construction automobile, l'ingénierie biomédicale, la technologie des communications et la protection de l'environnement. Un important facteur ici est le fait que les microsystèmes sont utilisés pour ajouter de la valeur beaucoup plus élevé que la valeur des microsystèmes eux-mêmes.

Les micros actionneurs magnétiques présentent des avantages considérables tels qu'une grande forces, grandes déviations, faibles impédances d'entrée et donc, l'implication de basse tension uniquement. Cependant, la structure de base des micros actionneurs magnétiques a imposé des limites à leur large adaptation. Les éléments clés sont micro bobines tridimensionnelles et microstructures magnétiques dures et douces complexes, qui correspondent respectivement aux bobines de l'induit et aux aimants en vrac (inducteur). De plus, afin d'obtenir des forces élevées (Couples), les conducteurs électriques des micro bobines et le flux magnétique du circuit magnétique doivent être fabriqués de manière à permettre suffisamment de courant élevé et de flux magnétique élevé. Ces contraintes nécessitent de la technologie pour faciliter la fabrication de microsystèmes hybrides en matériaux complexes microstructures tridimensionnelles avec des rapports d'aspect élevés.

La taille totale d'un microsystème est généralement de l'ordre de plusieurs centimètres alors que les structures essentielles sont de l'ordre du micromètre. Un tel microsystème hybride typique est constitué de plusieurs composants et types de matériaux différents. Pour le développement réussi de systèmes basés sur des actionneurs magnétiques, d'autres technologies et processus sont nécessaires pour la fabrication de micro bobine et de micro dispositifs magnétiques. Il s'agit notamment de la manipulation et bon technique et méthodes d'ingénierie de conception.

L'utilisation de servomoteurs à courant continu (CC) est courante dans de nombreuses applications, et il existe deux types principaux de micromoteurs CC utilisés : les micromoteurs à balais et les micromoteurs sans balais.

Les micromachines, y compris les micromoteurs CC, sont des dispositifs miniatures conçus pour fournir un mouvement mécanique précis et contrôlé dans des espaces restreints. Les micromoteurs à balais utilisent des contacts électriques (balais) pour commuter le courant et créer un mouvement de rotation. Ils sont souvent utilisés dans des applications où la taille compacte et le coût abordable sont des facteurs importants, tels que les appareils électroniques portables, les instruments médicaux et les jouets.

D'autre part, les micromoteurs sans balais, également connus sous le nom de moteurs brushless, fonctionnent grâce à un système d'aimants permanents et de bobines d'induction. Ces moteurs offrent plusieurs avantages par rapport aux micromoteurs à balais, notamment une plus grande durabilité, une plus grande efficacité énergétique et une plus grande précision de contrôle. Ils sont largement utilisés dans des applications nécessitant un fonctionnement continu et fiable, telles que les drones, les robots industriels et les dispositifs d'automatisation.

Ce mémoire est dévisé en trois chapitres : dans le premier chapitre, nous aborderons les aspects généraux des micromachines, y compris leurs types, leurs applications et leurs méthodes de fabrication. Ensuite, au deuxième chapitre, nous nous concentrerons sur une étude comparative de différentes gammes de micromoteurs CC fabriqués en série par les fabricants Faulhaber et Maxon, en mettant l'accent sur l'évaluation du rendement et de la puissance massique des servomoteurs CC de faible puissance. Le rendement est une mesure de l'efficacité énergétique du moteur, tandis que la puissance massique représente la puissance produite par unité de masse du moteur. Ces facteurs sont essentiels pour optimiser les performances des systèmes utilisant ces servomoteurs dans des environnements où la taille et le poids sont critiques.

Enfin, dans le dernier chapitre nous aborderons la simulation du servomoteur à courant continu. Le servomoteur est un contrôleur de position, qui permet de commander précisément la position en fonction des entrées fournies. Nous examinerons les principes de base du contrôle de position du servomoteur, les différentes techniques utilisées et les avantages qu'il peut offrir en termes de précision et de stabilité du mouvement.

En terminera ce manuscrit par une conclusion générale sur cette étude ainsi que des perspectives envisageables pour un travail futur.

*Chapitre I: servomoteurs à
faible puissance*

1.1 Introduction

Un servomoteur est un système d'asservissement composé de plusieurs éléments, qui surveille les informations réelles (vitesse, position), et compare ces valeurs aux valeurs souhaitées et apporte les corrections nécessaires pour minimiser la différence. Un servo d'entraînement par moteur est un entraînement avec un retour de vitesse ou de position pour un contrôle précis où le temps de réponse et la précision avec laquelle le moteur suit les commandes de vitesse et de position sont extrêmement importantes.

Les servomoteurs à faible puissance sont utilisés dans une plage de puissance faible. Leur tâche est pour positionner des éléments mécaniques à une position donnée dans un temps donné et avec une précision donnée. Les servocommandes sont soumises à de fortes exigences en matière de dynamique, la précision de positionnement, le couple maximal (jusqu'à quatre fois le couple nominal), la plage de la régulation de la vitesse (jusqu'à 1:10 000), le rendement, la protection contre les explosions, la protection contre les influences environnementales, etc. Ces exigences s'appliquent non seulement au moteur, mais aussi aux autres composants de l'entraînement, tels que les amplificateurs de puissance, les capteurs, l'électronique de commande et les éléments de transfert mécanique. Pour obtenir une dynamique de commande optimale, les constantes de temps de toutes les composantes doivent être aussi faibles que possible. Souvent, ces moteurs sont utilisés en fonctionnement à quatre quadrants, ce qui signifie que les moteurs peuvent être entraînés et freinés dans les deux sens. Dans la plage.

Il y a quelques années, seuls les moteurs à collecteur à courant continu étaient utilisés comme servomoteurs en raison de leur facilité de réglage. Bien que dans la plage de puissance inférieure, de nombreux servo-actionneurs sont encore des moteurs à courant continu. Dans les moteurs à courant continu avec un champ d'excitation constant, le couple dépend linéairement du courant d'induit, de sorte que la régulation et le contrôle par le courant est très facile. L'avantage d'un moteur CC à collecteur est qu'une seule valeur doit être mesurée et contrôlée. Par conséquent, le contrôle est plus simple.

Si le moment d'inertie est faible, des moteurs à rotor cloche sans fer sont utilisés jusqu'à une puissance de sortie de 100 W ; pour des puissances supérieures à 20 W, des rotors sans fer à disque sont utilisés. Les rotors sans fer ont des constantes de temps mécaniques et électriques particulièrement faibles [1].

I.2 . Différents types de servomoteur

Il existe de nombreux types de servomoteurs, dont les suivants :

I.2.1. Servomoteur standard (à rotation de position)

Il s'agit du type de servomoteur le plus répandu, où l'arbre de sortie effectue un demi-tour complet (180°). Il est équipé de butées intégrées dans son mécanisme d'engrenage pour éviter de dépasser ses limites, garantissant ainsi la protection du capteur de rotation (potentiomètre). Ces servomoteurs sont extrêmement courants et se retrouvent dans de nombreuses applications telles que les voitures, les avions, les robots, et bien d'autres.

I.2.2. Servomoteur à rotation continu

Ce type de servomoteur présente des similitudes avec le servomoteur standard, mais il possède la capacité de tourner indéfiniment dans les deux sens, fonctionnant ainsi comme un moteur à courant continu avec réducteur. Contrairement au servomoteur standard, celui-ci n'est pas contrôlé en termes de position, mais plutôt en termes de vitesse. Dans ce mode de fonctionnement, la vitesse du servomoteur est proportionnelle à la largeur des impulsions qui lui sont envoyées.

I.2.3. Servomoteur à rotation linéaire

Ce type de servomoteur est également similaire au servomoteur standard, mais il est équipé d'engrenages supplémentaires. Il utilise généralement un mécanisme de pignon et crémaillère pour convertir le mouvement rotatif en un mouvement linéaire aller-retour. Il est souvent utilisé comme actionneur dans les modèles d'avions de grande taille.

I.2.4. Servomoteur analogique avec signal de feedback

Le positionnement réel du servomoteur peut être déterminé grâce à un signal analogique qui dépend de sa position. Ce signal contribue à améliorer la précision et la stabilité du servomoteur. Ce type de servomoteur est largement utilisé dans des domaines tels que la robotique, l'apprentissage de mouvements, l'enregistrement de positions, et bien d'autres. Le signal de retour analogique est généralement transmis via un quatrième fil.

I.3 .Servomoteur(ou servo-moteur)

Un servomoteur est spécialement conçu pour produire un mouvement précis d'un élément mécanique en réponse à une commande externe. Il est capable d'atteindre des

positions déterminées et de les maintenir. La position peut être une position angulaire pour un moteur rotatif ou une position linéaire pour un moteur linéaire. Les servomoteurs peuvent être de type électrique ou hydraulique, et le démarrage et le maintien de la position déterminée sont contrôlés par un dispositif de réglage. Pour assurer un ajustement précis de la position, le moteur et son dispositif de réglage sont équipés d'un dispositif de mesure qui détermine la position actuelle du moteur, telle que l'angle de rotation par rapport à une position de référence. Cette mesure est réalisée à l'aide d'un dispositif de réglage rotatif, tel qu'un résolveur, un codeur incrémental ou un codeur absolu (par exemple, un potentiomètre).

Le dispositif de réglage, souvent électronique, compare le signal de position mesuré à une valeur prédéfinie de consigne. En cas d'écart, le moteur est commandé dans la direction qui garantit le chemin le plus court pour atteindre la valeur de consigne, réduisant ainsi l'écart. Ce processus est répété jusqu'à ce que la valeur actuelle se situe dans les limites de tolérance de la valeur de consigne. Alternativement, la position du moteur peut être une valeur numérique et comparée à une valeur prédéfinie à l'aide d'un ordinateur approprié.

Il existe une large gamme de servomoteurs, allant des modèles industriels volumineux de plusieurs kilogrammes à courant alternatif avec des boîtiers et des carters d'engrenages en métal, aux minuscules servomoteurs en plastique pesant quelques grammes à courant continu, que l'on trouve dans les modèles réduits d'avions, de voitures, de bateaux et d'hélicoptères [2]. Dans ce mémoire, nous nous concentrerons sur les derniers modèles mentionnés.

I.4 .Servomoteurs CC PM à balais

les servomoteur CC à aimant permanent à balais (PM CC) sont contrôlé par la variation de la tension aux bornes de l'induit (**fig. .1.3**).en plus de la faible inertie du rotor et du démarrage très rapide, les servomoteurs CC doivent avoir des caractéristique tension-vitesse linéaire et des caractéristiques courant-couple linéaires. Ces exigences peuvent être satisfaites par les moteurs à balais PM CC sans noyau (non ferreux ne possède pas de noyau de fer), c.-à-d. des moteurs cylindriques de type à champ intérieur avec des bobines à enroulement oblique Faulhaber (**fig. .1.12**)ou des moteurs à disque avec bobinage rotorique imprimé(**fig.1.11.c**).Un servomoteur PM CC à balais est illustré a la (**fig.1.2**) [3].

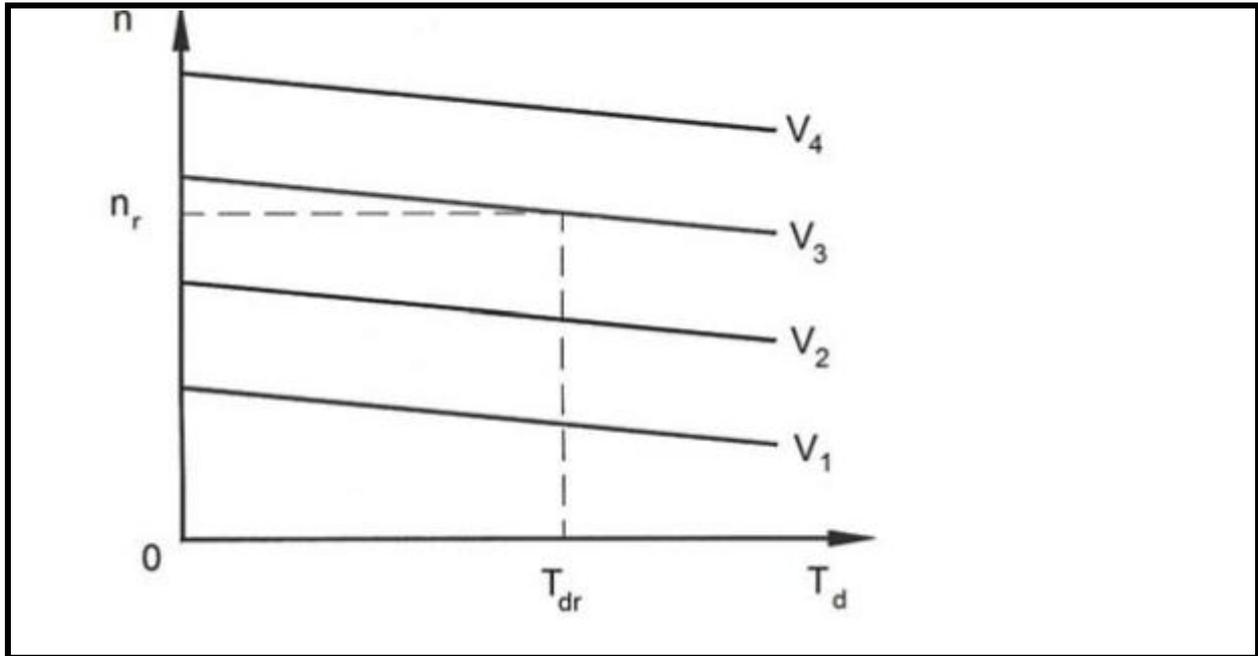


Fig.I.1: Commande de vitesse par variation de la tension au borne de l'induit d'un moteur PM CC ($V_1 < V_2 < V_3 < V_4$).

L'étude de la commande de l'induit est basée sur les équations des caractéristiques mécaniques et de réglage. Ces équations sont généralement exprimées en unités relatives

$$[4,6] : \alpha = \frac{U_{com}}{U_{nom}} \quad \mathbf{I.1}$$

α est appelé le facteur de signal, U_{com} est la tension de commande aux bornes de l'induit, U_{nom} est la tension nominale aux bornes du moteur.

Couple relatif
$$t = \frac{T}{T_{dem}} \quad \mathbf{I.2}$$

Vitesse relative
$$v = \frac{n}{n_0} \quad \mathbf{I.3}$$

OU T_{dem} ; est le couple de démarrage, n_0 est la vitesse à vide.

Caractéristique mécanique $t=f(v)$ à $\alpha = \text{constant}$ et caractéristique de contrôle : $v = f(\alpha)$ à $t = \text{constante}$ sont représentés sur la **figI.3**.

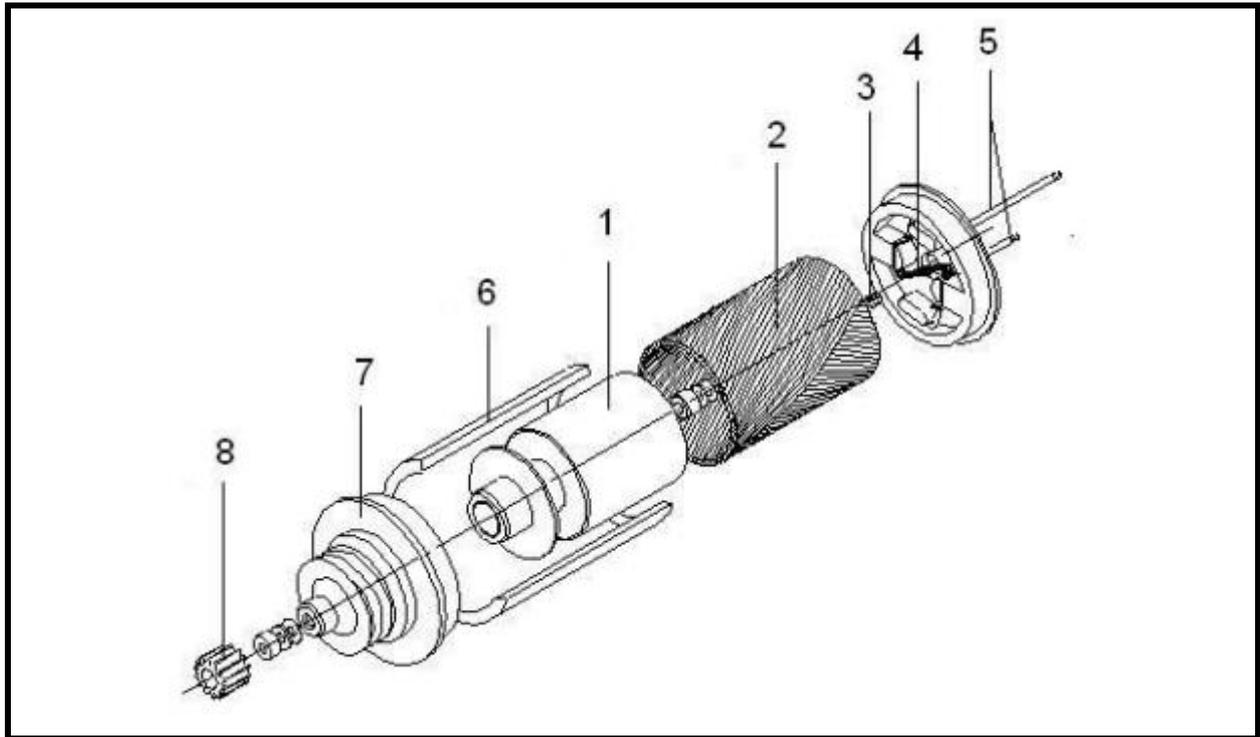


Figure I.2 : Vue détaillée d'un moteur servo à courant continu à collecteur, sans noyau et à aimant permanent, de type à champ intérieur cylindrique. 1 - Aimant permanent, 2 –Bobinage oblique de l'induit, 3 - Collecteur, 4 - Balais, 5 - Câbles de raccordement, 6 - Boîtier (enceinte), 7 - Couvercle d'extrémité, 8 - Pignon. Source : Faulhaber Micro Drive Systems and Technologies - Bibliothèque technique, Croglio, Suisse.

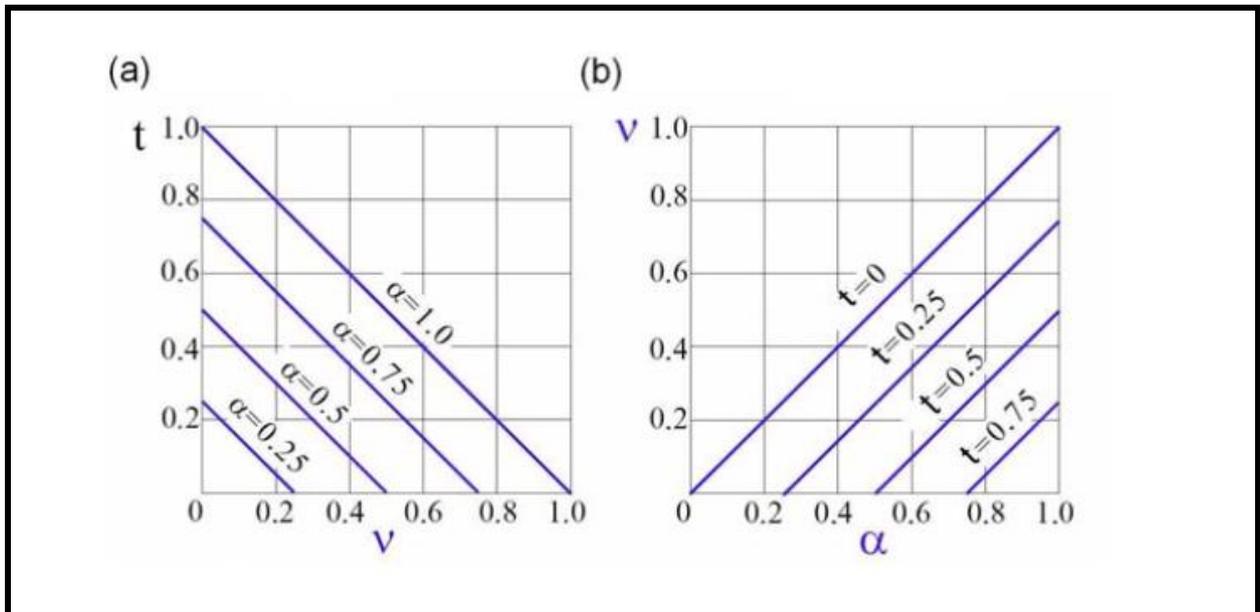


Figure I.3: Caractéristiques mécaniques $t=f(v)$ à $\alpha = \text{constant}$ et caractéristique de contrôle $v = f(\alpha)$ à $t = \text{constant}$ d'un PM CC servomoteur à balais.

I.5. Servomoteur CC sans balais

Comme son nom l'indique, un servomoteur brushless CC(BLDC), n'a pas de balais ou de segments de commutation pour commuter le courant à travers les enroulements afin de produire un champ tournant. La conception du moteur à courant continu sans balais est inversée par rapport à celle du servomoteur à courant continu, en ce sens que les enroulements du moteur sont situés dans le stator et que les aimants permanents sont situés sur le rotor du moteur. Ce type de conception est avantageux car il remplace le fil de cuivre lourd du rotor par des aimants permanents beaucoup plus légers. Ceci réduit l'inertie de rotation du rotor, ce qui lui permet d'accélérer et de décélérer beaucoup plus rapidement qu'un moteur à balais. Dans le monde du contrôle de mouvement, la capacité à accélérer et décélérer plus rapidement permet d'obtenir une machine beaucoup plus performante.

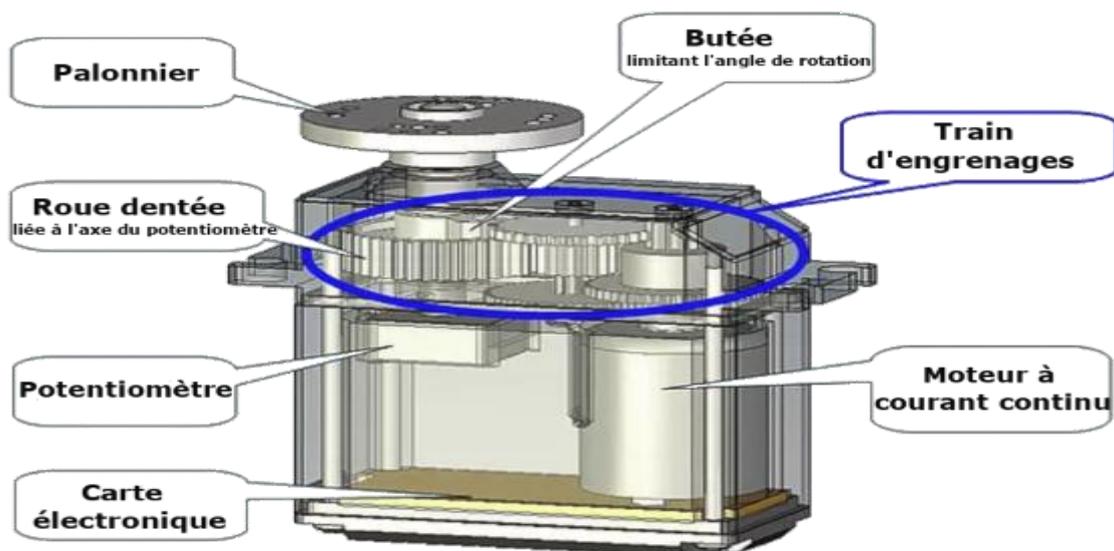
L'inconvénient des moteurs à courant continu sans balais est qu'ils nécessitent une certaine forme de signaux de commutation électriques produits par des capteurs à effet Hall ou par un codeur à "pistes Hall". Ces signaux fournissent des données de position du rotor à l'entraînement du moteur, de sorte que l'entraînement peut commuter le courant à travers les enroulements du stator pour créer un champ magnétique tournant. Avec l'avènement des codeurs kit multitours magnétiques à haut rendement et à faible coût KCD de POSITAL, les variateurs s'éloignent des traditionnelles "pistes de commutation" pour utiliser l'information de position absolue du codeur pour commuter les courants de phase du moteur sans balais. En utilisant le retour codeur absolu, les informations de position du codeur peuvent être utilisées pour la commutation du moteur et le contrôle de position de la boucle d'asservissement.



Figure I.4: Servomoteur cc sans balais

I.6. Composants d'un servomoteur

Les servomoteurs se composent de composants électroniques et mécaniques assemblés dans un petit boîtier, donc c'est un mécanisme électromécanique. Les servomoteurs sont utilisés pour faire tourner ou pousser des pièces mécaniques avec une grande précision et à une certaine vitesse. Le servomoteur vérifie et corrige continuellement sa position. Donc c'est un système asservi. Commençons par représenter les constituants élémentaires d'un servomoteur, la figure ci-dessous montre comment ces constituants sont placés dans le boîtier du servomoteur. **fig1.5**



FigI.5 : architecture d'un servomoteur

I.6.1 Micromoteur à courant continu (MCC)

Le micromoteur CC est utilisé avec une alimentation constante de quelques volts. Le principe de fonctionnement d'un moteur pour actionner les servomoteurs à courant continu est que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la tension d'alimentation, du moins dans une première approximation. Dans un servomoteur typique, alimenté sous 5 volts, le moteur tourne à une vitesse élevée, atteignant plusieurs milliers de tours par minute.

I.6.2 Train d'engrenages

Le train d'engrenage est constitué de plusieurs étages, chacun composé d'une paire de roues dentées. Chaque étage a son propre rapport de réduction, qui correspond au rapport entre le nombre de dents des deux roues ou pignons. En totalité, le rapport de réduction est le produit de tous les rapports individuels et peut atteindre une valeur typique de l'ordre de 400 ou 500.

I.6.3 Potentiomètre et la carte électronique

Le potentiomètre et la carte électronique jouent un rôle important dans le système. Le potentiomètre agit en tant que capteur de position du palonnier, fournissant une tension proportionnelle à la position angulaire. Cette tension est ensuite exploitée par la carte électronique dans la boucle de rétroaction du système.

Pour décrire le principe général d'une boucle d'asservissement ou de régulation, nous pouvons nous référer au schéma bloc fonctionnel ci-dessous.

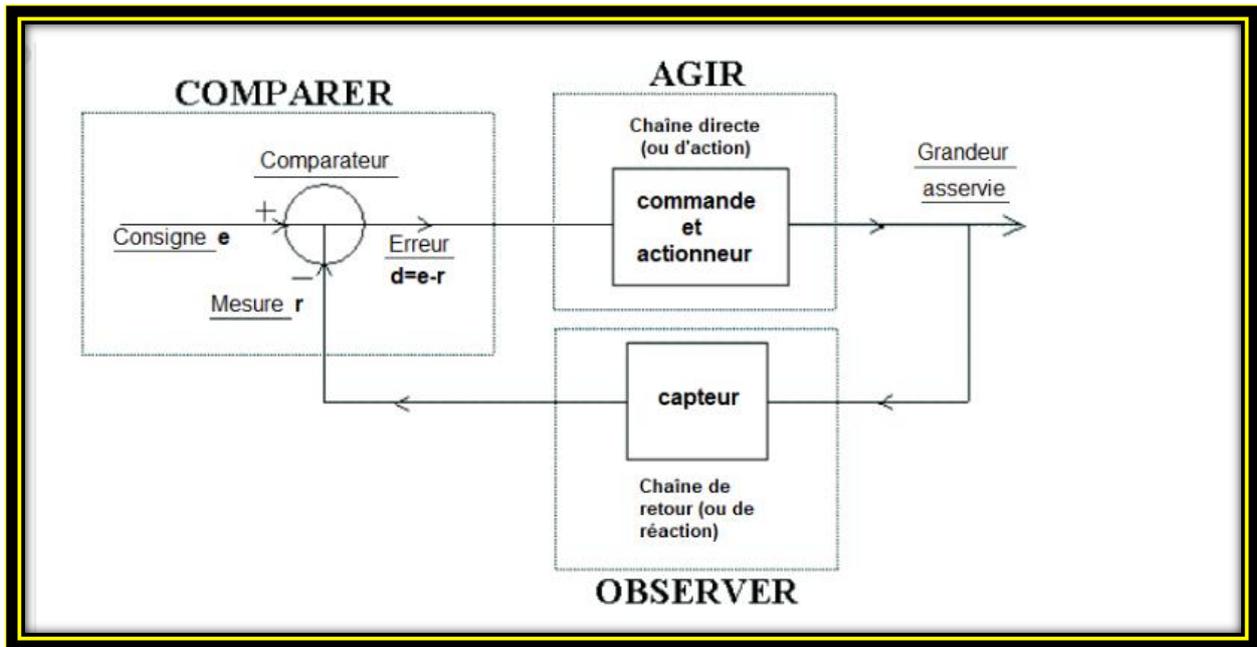


Fig. I.6 : Schéma bloc fonctionnel

Cependant, si l'on ignore les réalités physiques, notamment la nature réelle des grandeurs physiques qui représentent les variables de l'asservissement - en l'occurrence l'angle de consigne et l'angle réel du palonnier - on peut interpréter le schéma ci-dessus de la manière suivante :

- **La consigne** est donnée sous forme d'un angle en degrés, représentant la position que l'on souhaite maintenir pour le servomoteur, par exemple pour contrôler un aileron d'un modèle réduit d'avion.
- **Le bloc intitulé "agir" ou "chaîne directe"** est composé du moteur et du train d'engrenages. L'ensemble est contrôlé par la valeur "Erreur", qui est calculée comme la différence entre l'angle de consigne et l'angle mesuré, qui joue ici le rôle de "capteur" dans la boucle, ou "chaîne de retour". Lorsque cette différence est nulle, cela signifie que le palonnier a atteint la valeur de consigne, et l'écart est nul. Le moteur ne tourne pas. En revanche, lorsque les deux angles ne coïncident pas, l'écart est non nul, et le moteur se met en mouvement. L'angle réel du palonnier évolue alors vers la consigne.

Les performances d'une boucle d'asservissement est principalement évaluée selon deux critères :

- **La vitesse**, qui représente le temps nécessaire pour que la valeur réelle atteigne la consigne. Il est souhaitable que ce temps soit aussi court que possible.
- **La précision**, qui est définie comme l'erreur résiduelle, c'est-à-dire la différence entre la valeur réelle et la consigne lorsque la valeur réelle ne varie plus. Cette erreur doit être aussi faible que possible, voire idéalement nulle.

Afin d'améliorer les performances, il est possible d'ajouter à la boucle de contrôle présentée précédemment un correcteur entre le comparateur d'entrée et le bloc "système" [4].

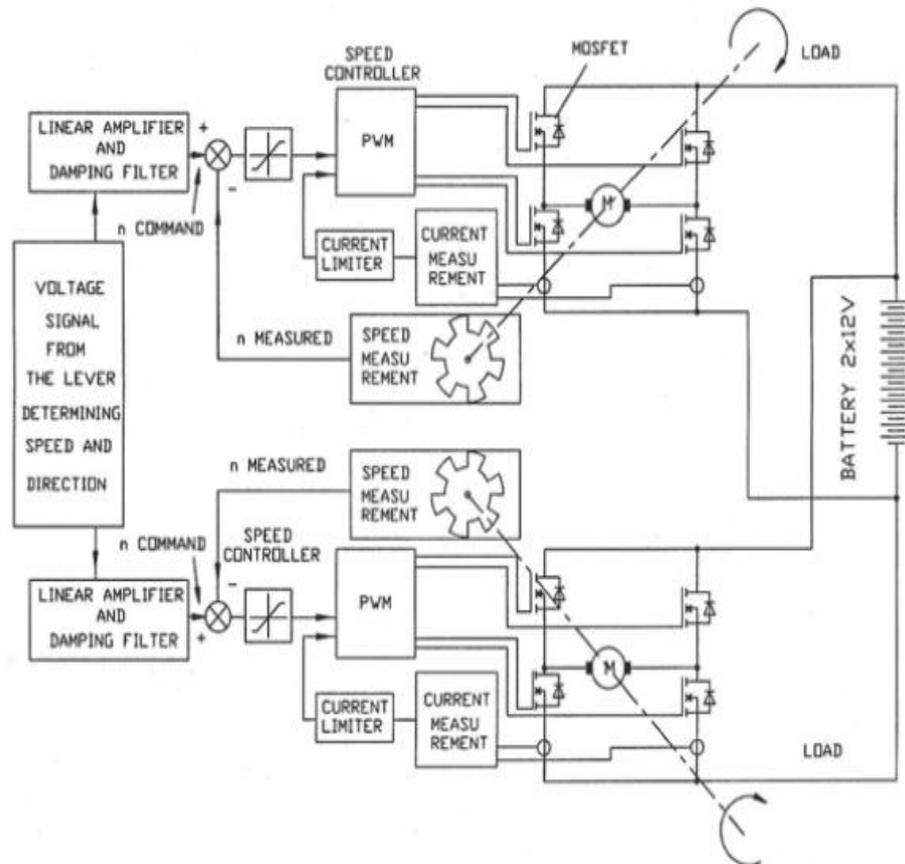
I.7. Applications d'un servomoteur

I.7.1. Fauteuils roulant

Un fauteuil roulant est un fauteuil à quatre roues dont deux (plus grandes) sont des roues motrices et les deux autres petites, qui sont des roues directrices. Un entraînement de fauteuil roulant doit répondre aux exigences suivantes :

- Source d'énergie électrique autonome ,adaptée au fonctionnement intérieure, qui ne doit émettre aucune pollution .capacité De la batterie d'un minimum de 5h de fonctionnement ou 30km de distance, deux ou trois plages de vitesse : 0 à 1.5m/s pour le conduit en intérieure 0 à 3m/s pour la conduite sur trottoir et 0 à 6m/s pour la conduite sur route. Bonne pour la conduite dans de petites pièces avec des meubles.

Le schéma fonctionnel d'un système d'entraînement de fauteuil roulant est illustre à la fig.I.7. deux moteurs d.c. collecteurs PM de 200 w, 24 v, 3000tr/min ont été utilisés. La vitesse et le courant de l'induit du moteur sont des fonctions linéaires de couple.



FigI.7: Schéma fonctionnel d'un système d'entraînement de fauteuil roulant avec deux.moteure d.c. à collecteur PM

Deux système d'entraînement indépendants sont commandés à l'aide d'un signale de tension de levier proportionnel à la vitesse et la direction de mouvement le système de commande et alimentation comprennent :

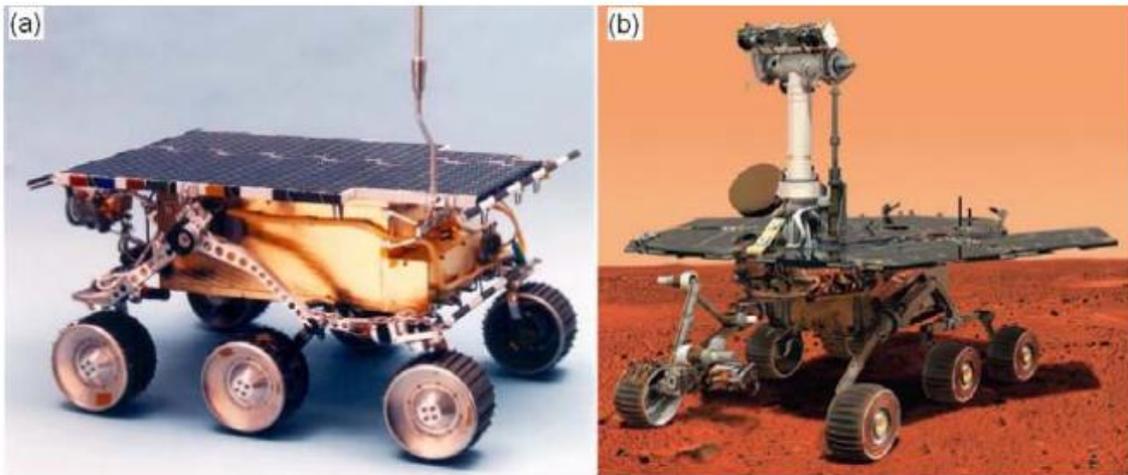
- amplificateur linéaire et filtre d'amortissement
- contrôleur de vitesse
- unité de mesure du courant
- unité de mesure de la vitesse
- modulateur de largeur d'impulsion(PWM)

La commande de mouvement du fauteuil roulant se fait par le signal de tension du levier qui déterminé la vitesse et la direction.

I.7.2. Véhicules robotique Mars

Un véhicule robotique à six roues appelé Sojourner conduit par maxon cc. les moteur à collecteur ont été utilisés dans la mission 1996/97 de la NASA Mars pathafinder,le véhicule est illustré à la **figI.8a** et ses spécifications sont données au **tableau I.1**.

Les spécification des moteurs Maxon avec Ndfeb PM et balais en métal précieux sont répertoriées.



FigureI.8 :Véhicules robotiques pour les missions martiennes (a) Sojourner (1996/97) ;(b) les rovers d'explorations spirit et opportunity (2003 en cours) . Photo publiée avec l'aimable autorisation de la NASA.

Tableau I.1. Spécifications des moteurs Maxon avec Ndféb PM et balais en métal précieux[5].

Hauteur	Sojourner (astromobile)	Spirit et Opportunity (atromobile ou rover)
Poids (kg)	11	185
Hauteur, m	0.32	1.57
Hauteur au –dessus du sol, m	0.25	1.54
communication	Processeur 8bits	Processeurs 32 bits
Appareils photo	3(768x484)	9(1024x1024)
Spectromètres	1	3
Vitesse, m/h	3.6	36 à 100
Moteurs Maxon	11 RE16	17 RE20 22 RE25

Les deux véhicules robotiques des deux missions étaient également équipés de moteurs à courant continu avec collecteur de la marque Maxon (Tables I.1).

I.8. Micromoteur

Le micro moteur à courant continu présente les avantages d'un petit volume, d'un rendement élevé, d'un couple élevé et d'un contrôle pratique et à faible coût. Il a été largement utilisé dans les domaines de la consommation, du bureau, de l'ordinateur, de l'électroménager, traitement médical et contrôle industriel[6].

I.9. Micromoteurs CC à aimant permanent

La construction d'un moteur à collecteur à courant continu à aimants permanents (PM) est similaire à celle d'un moteur à courant continu, à l'exception du système d'excitation électromagnétique qui est remplacé par des aimants permanents. Les moteurs à courant continu sans balais PM et les moteurs synchrones à courant alternatif (CA) ont des conceptions presque identiques : ils sont dotés d'un stator polyphasé et d'aimants permanents situés sur le rotor. La principale différence réside dans le contrôle et la forme de la tension

d'excitation : un moteur synchrone à courant alternatif est alimenté par des formes d'onde plus ou moins sinusoïdales qui créent un champ magnétique tournant. En revanche, dans les moteurs sans balais à aimants permanents CC, le courant d'induit adopte la forme d'une onde carrée (trapézoïdale). Seuls deux enroulements de phase (pour la liaison en étoile) conduisent le courant simultanément, et le schéma de commutation est synchronisé avec la position angulaire du rotor (commutation électronique).

En général, les moteurs rotatifs à aimants permanents pour un fonctionnement continu sont classés comme suit :

- Moteurs à collecteur à balais à courant continu (CC)
- Moteurs CC sans balais (BLDC)
- Moteurs synchrones à courant alternatif

Les configurations du circuit magnétique des différents types de moteurs à courant continu à collecteur à aimants permanents sont illustrées dans les figures I.9 à I.12. Il existe quatre structures fondamentales de l'induit (rotor) :

- Rotor à encoches conventionnel (Fig. I.9)
- Rotor sans encoches (Fig. I.10)
- Rotor cylindrique à bobine mobile (Fig. I.11a)
- Rotor en forme de disque à bobine mobile (Fig. I.11b et c)

Les moteurs à collecteur à aimants permanents avec rotor à encoches et sans encoches ont des bobinages d'induit fixés au noyau laminé. Le bobinage d'induit, le noyau d'induit et l'arbre forment une seule partie intégrée.

Le moteur à courant continu à bobine mobile a des bobinages d'induit fixés à un cylindre isolant ou à un disque qui tourne entre des aimants permanents ou entre des aimants permanents et un noyau laminé. Dans un moteur à bobine mobile, l'inertie du rotor est très faible car tous les noyaux ferromagnétiques sont fixes ; c'est-à-dire qu'ils ne se déplacent pas dans le champ magnétique et ne produisent pas de pertes par courants de Foucault ou d'hystérésis. L'efficacité d'un moteur à bobine mobile est meilleure que celle d'un moteur à rotor à encoches.

En raison de la faible inertie, les constantes de temps mécaniques des moteurs à bobine mobile sont beaucoup plus petites que celles des moteurs à armature à noyau d'acier [7].

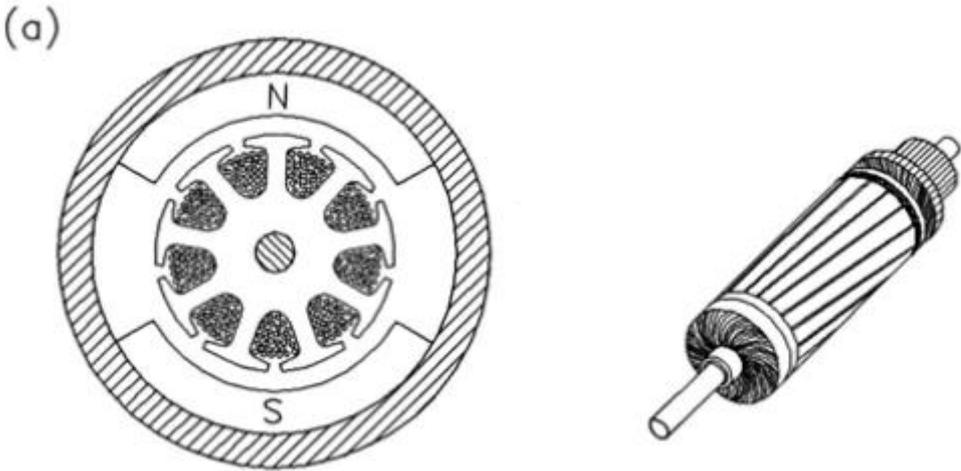


Figure I.9 :Rotor à encoches conventionnel

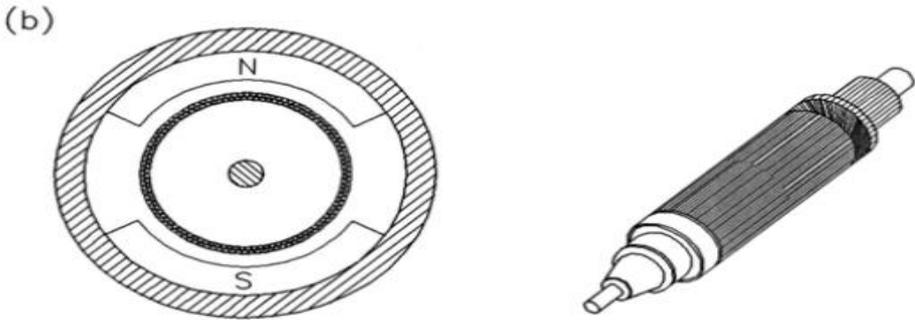


Figure I.10 :Rotor sans encoches

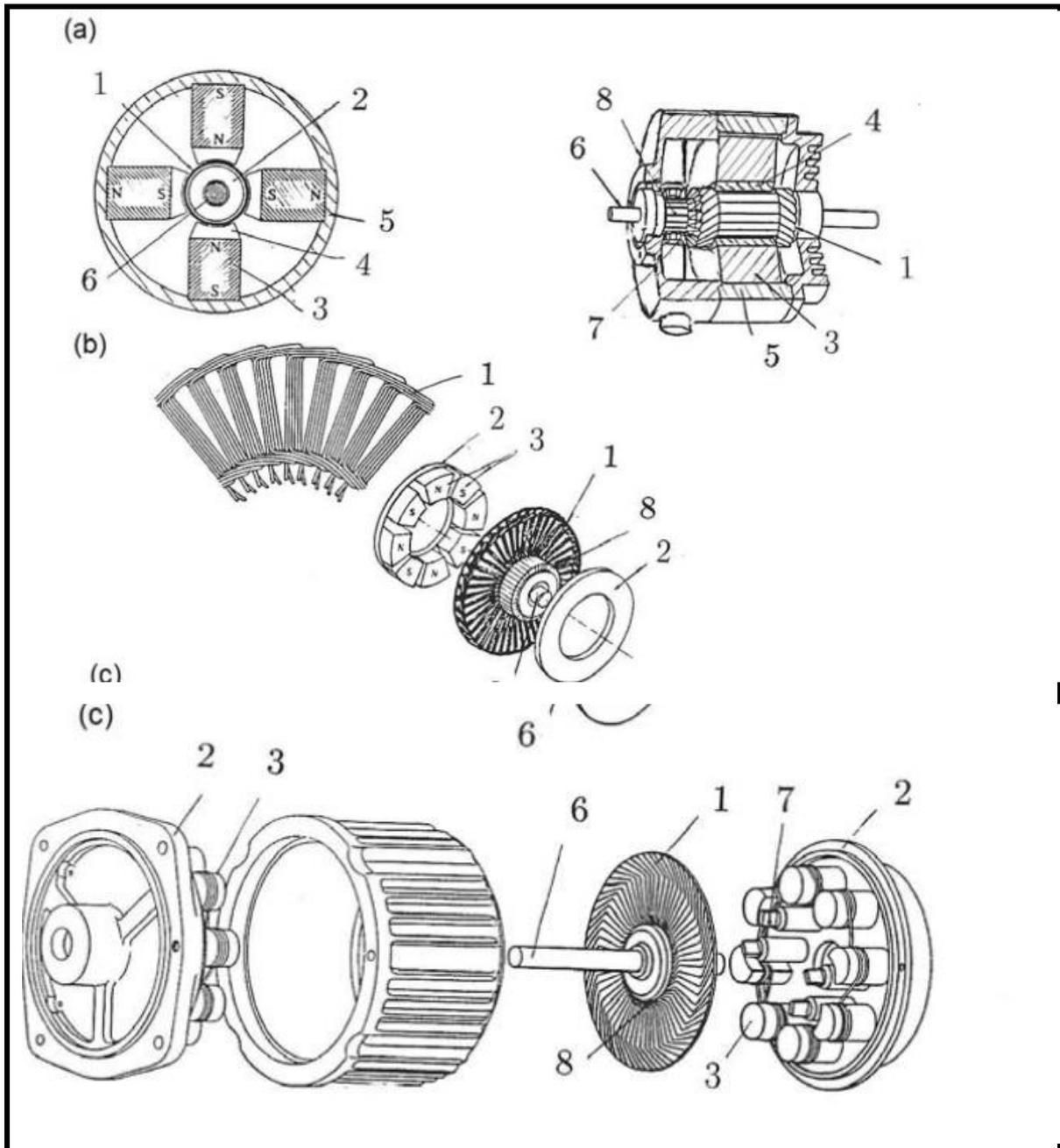
I.9.I. Moteurs cylindriques à bobine mobile**a. Moteur cylindrique à champ extérieur**

Dans ce type de moteur, le rotor est constitué d'une bobine mobile qui est placée à l'extérieur d'un noyau fixe. Le noyau peut être composé d'aimants permanents ou d'un matériau ferromagnétique.

Le fonctionnement de ce moteur repose sur le principe de l'interaction entre le champ magnétique produit par la bobine mobile et le champ magnétique statique généré par les aimants permanents ou le noyau ferromagnétique. Lorsqu'un courant électrique est appliqué à la bobine mobile, elle crée un champ magnétique qui interagit avec le champ magnétique du noyau ou des aimants permanents, ce qui entraîne la rotation du rotor.

Les moteurs cylindriques à bobine mobile offrent plusieurs avantages, notamment une construction compacte et légère, une faible inertie du rotor et une excellente réponse dynamique. Ils sont couramment utilisés dans diverses applications nécessitant un mouvement précis et rapide, tels que les robots, les machines d'impression et les systèmes de positionnement.

Ce type de moteur (Fig. 11 a) présente une très petite constante de temps mécanique T_m , parfois $T_m < 1$ ms. Afin d'obtenir un T_m réduit, le rapport Φ_g/J doit être aussi grand que possible, où Φ_g est le flux magnétique de l'entrefer et J est le moment d'inertie du rotor. Un flux plus important est produit à partir d'aimants permanents en Alnico ou en terres rares, qui ont une aimantation rémanente élevée B_r , par rapport à un aimant permanent en ferrite. Étant donné que les aimants en Alnico sont faciles à démagnétiser, on utilise un aimant en Alnico long, aimanté dans le sens de la longueur, afin d'éviter la démagnétisation. Une conception moderne utilise un circuit magnétique du stator avec des aimants permanents en terres rares.



FigI.11.Moteurs à collecteur PM à bobine de type de champ extérieur :(a)moteur cylindrique ,(b) moteur à disque avec rotor bobiné ,(c) moteur à disque avec enroulement de rotor imprimé et système d'excitation hybride.enroulement d'induit à 1 bobine mobile culasse en acier doux 2 , 3 PM , 4 pole, cadre en acier doux 5,6 arbres, 7 balais ,8 collecteur .

a. Moteur cylindrique à champ intérieur

Les moteurs à bobine mobile de type champ intérieur, également connus sous le nom de moteurs sans noyau, sont souvent utilisés pour des applications de moins de 10 W, très rarement

jusqu'à 225 W. Dans ce type de moteur, l'aimant permanent est à l'intérieur de l'induit à bobine mobile. Bien que le moment d'inertie de ce rotor soit faible, la constante de temps mécanique n'est pas toujours faible car le flux magnétique produit par un aimant permanent de petite taille placé à l'intérieur de l'induit est faible. Les moteurs à balais à courant continu sans noyau avec aimants permanents ont été largement utilisés pour entraîner des cabestans de lecteurs de cassettes audio, des magnétoscopes, des objectifs zoom d'appareils photo, etc., en raison de leurs caractéristiques exceptionnelles : (a) puissance élevée par volume, (b) rendement élevé (absence de pertes ferromagnétiques), (c) couple de répulsion ou de réaction, (d) faible coefficient d'amortissement. Aujourd'hui, les applications des moteurs à balais à courant continu à aimant permanent de type champ intérieur comprennent les équipements médicaux et de laboratoire, la robotique et l'automatisation, l'optique, les instruments techniques, les équipements de bureau, la vie publique, le prototypage, etc.

La composante mécanique du coefficient d'amortissement est en partie due au frottement causé par les composants de lubrification des paliers et les joints d'étanchéité des paliers. Un autre effet mécanique qui peut se manifester à grande vitesse est l'effet de ventouse dû aux pièces en rotation rapide. Les composantes électromagnétiques de l'effet d'amortissement consistent en : (a) un courant circulant causé par les courants circulant dans les bobines commutées en présence de champs parasites et (b) des courants de Foucault induits dans les conducteurs de l'induit, qui se déplacent dans le champ magnétique.

Les moteurs cylindriques à bobine mobile de type champ intérieur sont illustrés à la figure I.12. Les enroulements de l'induit sont classés comme suit : (a) enroulement avec des bobines enroulées en diagonale, (b) enroulement rhombique, (c) enroulement en cloche, (d) enroulement en boule.

L'enroulement avec des bobines enroulées en diagonale, également connu sous le nom d'enroulement Faulhaber (brevet américain 3360668), a été le premier type d'enroulement (1965) utilisé dans les moteurs sans noyau largement utilisés.

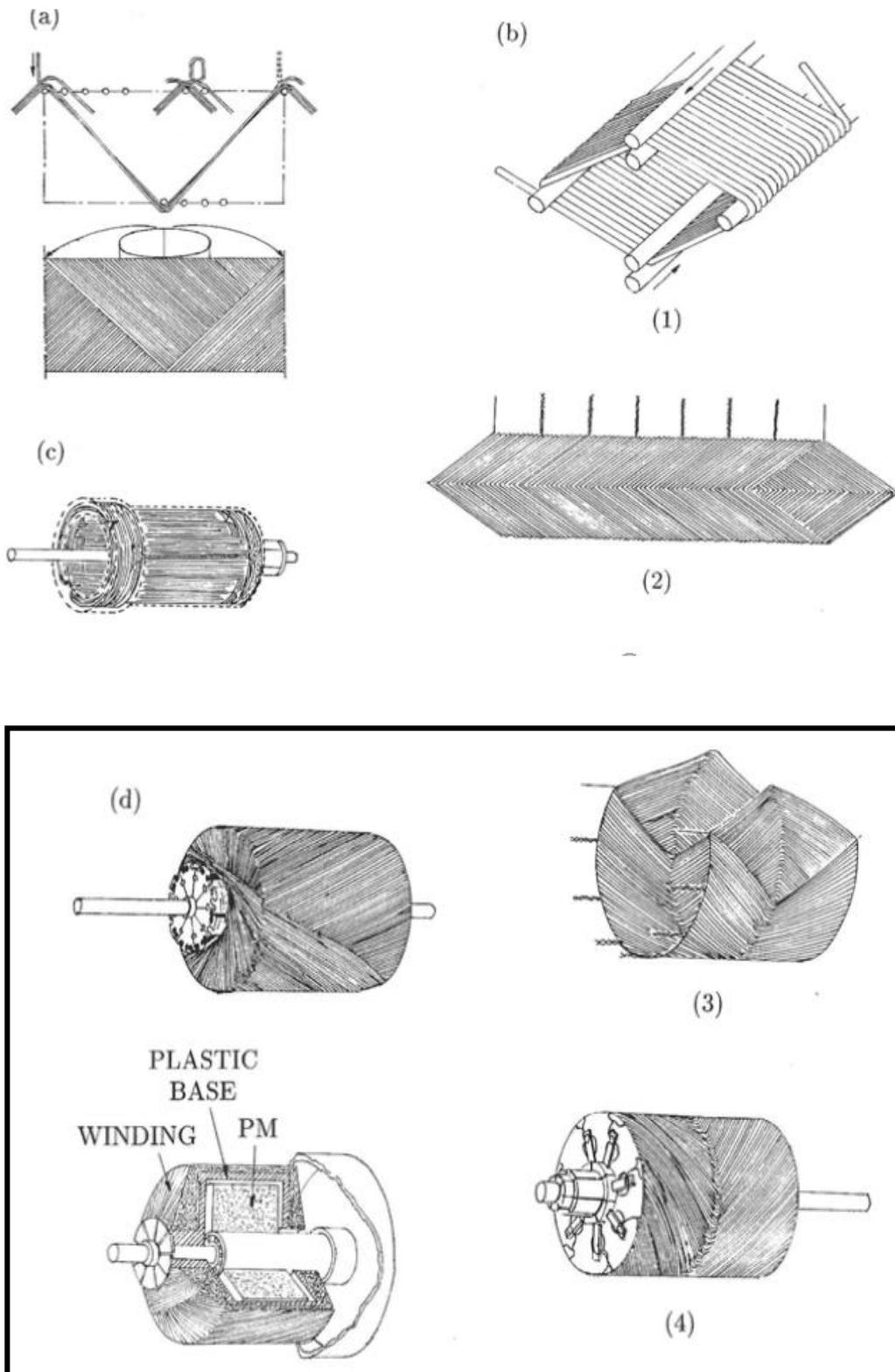


fig.I.12. Rotor à bobines mobiles cylindriques de type de champ intérieur avec : (a) enroulement avec des bobines à enroulement oblique (enroulement en nid d'abeille) selon le brevet américain 3360668, (b) enroulement rhombique selon la publication de

la demande de brevet américain 2007/0103025,(c) enroulement en cloche selon brevet US 3467847,(d) enroulement à billes.

La bobine à rotor sans fer, autoportante et à bobinage oblique est au cœur de chaque moteur C.C. FAULHABER. Inventée à l'origine par Fritz Faulhaber Sr. et brevetée en 1958.

Le bobinage d'induit à bornes de bobine inventé par F.Faulhaber. Les moteurs C.C. FAULHABER sont construits avec deux types différents de systèmes de commutation: la commutation métaux précieux et la commutation graphite. Les moteurs C.C. FAULHABER sont conçus avec différents types d'aimants qui correspondent aux différentes puissances des types de moteur. Ces éléments comprennent des aimants AlNiCo et des types ultraperformants à terres rares comme le SmCo et le NdFeB.

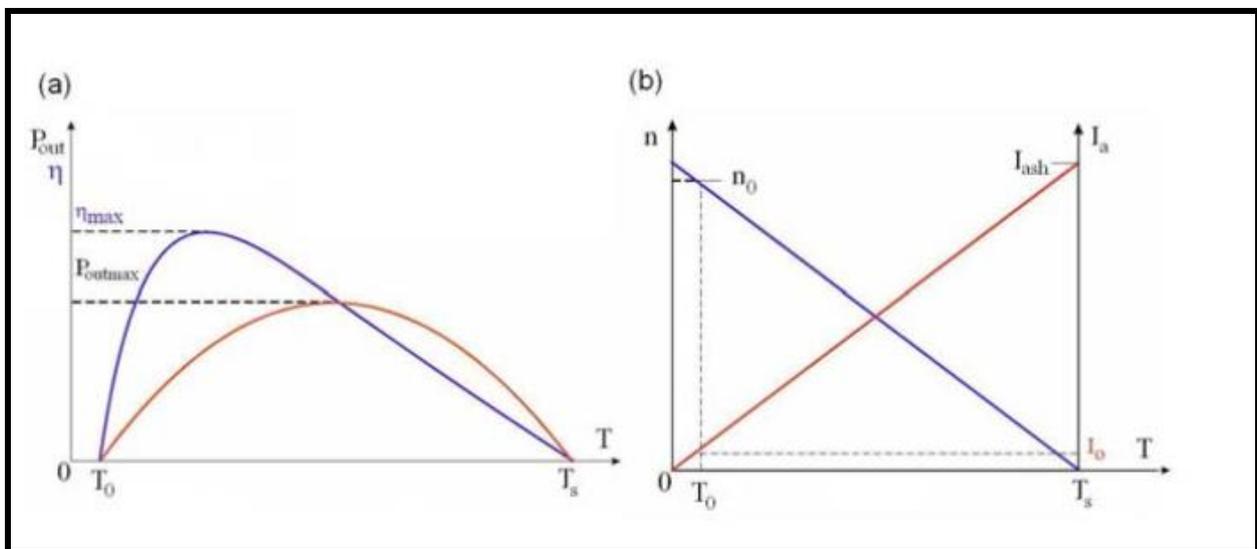


Fig.I.13. Caractéristique en régime permanent du moteur courant continu sans noyau à collecteur avec bobine à enroulement oblique Faulhaber (a) rendement η et puissance de sortie P_{out} en fonction du couple T ;(b) vitesse et courant d'induit en fonction du couple T Symboles n_0 est la vitesse à vide , T_0 est le couple de perte par friction, I_{ash} et le courant d'induit de démarrage à $n=0$ ($E=0$), et T_s est le couple de d'écorage .

Pour les moteurs de Faulhaber, ainsi que d'autres moteurs sans noyau (à rotor non ferreux), les collecteurs sont de petite taille pour les raisons suivantes.

- (a) Le collecteur et les balais fabriqués à partir de métaux précieux (or, argent, platine et/ou palladium), qui résistent aux processus électrochimiques pendant le fonctionnement .Les métaux précieux étant chers, la taille des balais doit être la plus petite possible.
- (b) La vitesse linéaire du collecteur pour une commutation stable doit être faible.

(c) La taille de la machine doit être la plus petite possible.

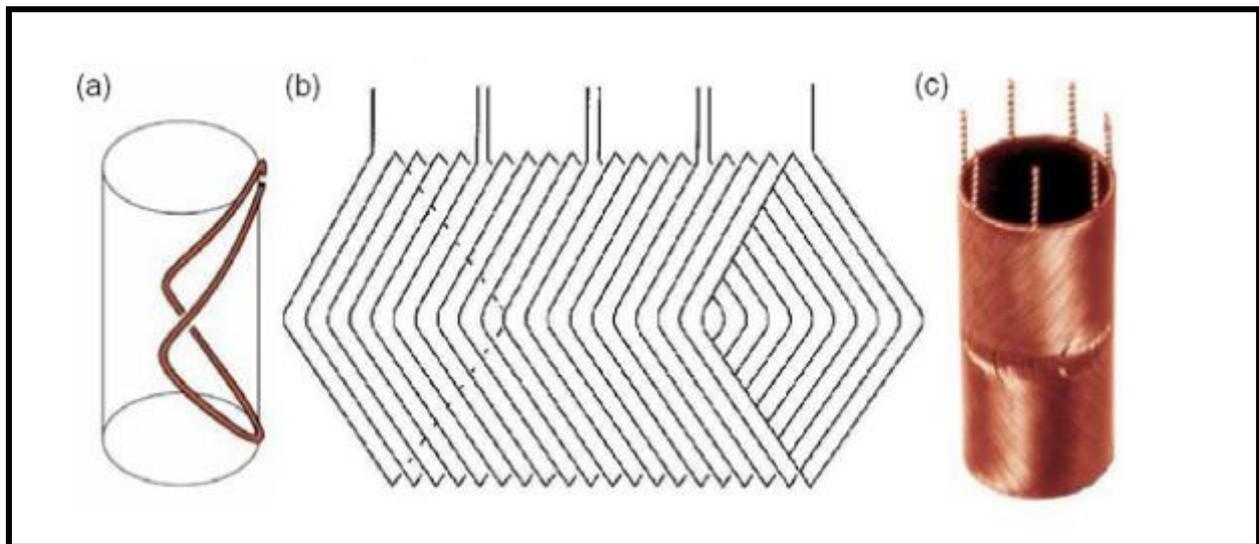


Figure.I.14.Enroulement cylindrique sans noyau à bobine mobile selon la publication de demande de brevet U.S.2007/0103025 :(a) forme, (b) disposition des couches(c) enroulement rhombique cylindrique complet.

Les caractéristiques du moteur CC sans noyau à collecteur avec bobines à enroulement oblique faulhaber sont illustrées à la (**figI.14**). L'efficacité maximale dépend de couple de décrochage et couple de frottement, et est fonction de la tension aux bornes de l'induit.

L'enroulement de type cloche (**fig.I.12.**) inventé également par F.Faulhaber.Le (brevet américain 3467847) utilise des bobines rectangulaires droites ou rectangulaire oblique. Un enroulement de type cloche comporte un disque denté assemblé avec un collecteur.

En comparaison avec d'autre moteurs CC PM à collecteur, les moteurs PM sans noyau de type Faulhaber présentent les avantages suivantes :

- Haute densité de puissance
- Faible tension de démarrage (très faibles pertes par frottement)
- Faible inertie du rotor
- Démarrage très rapide
- Haute efficacité
- Caractéristiques tension-vitesse linéaires
- Caractéristiques linéaires courant-couple

- capable de supporter des surcharges élevées pendant une courte période de temps
- Haute précision assure une longue durée de vie

Les types de moteur CC à champ intérieur fabriqués par Maxon, ont des caractéristiques similaires. La construction de l'enroulement rhombique est représentée sur les (fig I.12.b et I.13). La méthode d'enroulement à billes donne au rotor la forme d'une boule (fig I.12.d). Le PM produisant le flux magnétique est placé à l'intérieur de l'enroulement en boule. Il y a un cylindre en plastique entre l'aimant et l'enroulement, comme illustré dans la vue en coupe de la (Fig. I.12.d).

I.9.2. Moteur à disque

Il existe trois principaux types de moteurs à disque (pancake) : le moteur à rotor bobiné, le moteur à enroulement rotor imprimé et le moteur à trois bobines.

Dans le moteur à rotor bobiné de type pancake, l'enroulement est composé de fils de cuivre et moulé avec de la résine (Fig. I.11b). Le collecteur est similaire à celui du type conventionnel. Ces moteurs sont utilisés, par exemple, dans les ventilateurs de radiateur.

Le moteur à enroulement d'armature imprimé de type disque est illustré à la figure I.12c. Les bobines sont découpées dans des feuilles de cuivre puis soudées, formant un enroulement en vague. Lorsque ce moteur a été inventé par J. Henry Baudot, l'armature était fabriquée selon une méthode similaire à celle utilisée pour fabriquer les circuits imprimés. C'est pourquoi on l'appelle le moteur à enroulement imprimé. Le flux magnétique du moteur imprimé peut être produit à l'aide d'aimants en Alnico ou en ferrite.

Le moteur à trois bobines de type disque comporte trois bobines plates d'armature sur le rotor et un système d'aimants permanents à quatre pôles sur le stator. La connexion des bobines est différente de celle d'un enroulement en vague ordinaire. Les moteurs à trois bobines sont généralement conçus comme des micromoteurs.

I.10. Conclusion

En conclusion, les micromoteurs à courant continu (CC) sont des composants essentiels utilisés dans de nombreuses applications de servomoteurs. Ces applications peuvent faire appel à des micromoteurs à balais ou sans balais, en fonction des besoins spécifiques de chaque situation. Les micromoteurs à balais sont appréciés pour leur simplicité de construction, leur coût abordable et leur fiabilité. Ils conviennent généralement aux applications où des performances de précision modérées sont requises, telles que les microsystèmes, les modèles réduits et les petits appareils électroniques. D'un autre côté, les micromoteurs sans balais offrent des avantages supplémentaires, tels qu'une plus grande durée de vie, une plus grande efficacité énergétique et une meilleure performance à haute vitesse. Ils sont couramment utilisés dans des applications qui exigent des performances de précision élevées, comme les robots industriels, les systèmes de positionnement, les drones et les équipements médicaux. La fabrication des micromoteurs comprend des processus complexes tels que l'usinage de précision, l'assemblage minutieux des composants, ainsi que la validation et les tests de qualité rigoureux.

Les moteurs à courant continu à commutateur à aimant permanent (PM) présentent différentes configurations de circuit magnétique pour les rotors d'induit. Les quatre structures fondamentales des rotors comprennent le rotor à encoche conventionnelles, le rotor sans encoche (surface d'enroulement), le rotor cylindrique à bobine mobile et le rotor à disque (pancake) à bobine mobile.

Les différentes configurations de circuit magnétique et de rotor dans les moteurs à courant continu à commutateur à aimant permanent offrent des performances et des caractéristiques spécifiques adaptées à diverses applications industrielles, médicales, robotiques et d'automatisation. La sélection du type de rotor dépend des exigences spécifiques de chaque application en termes de couple, de puissance, de réponse dynamique et d'efficacité.

***CHAPITRE II :Micromoteur
cc en série de Faulhaber et
Maxon***

Chapitre II : Micromoteur cc en série de Faulhaber et Maxon

II.1. Introduction :

Les fabricants de moteurs en grande série se divisent en deux catégories : les équipementiers qui considèrent les moteurs comme des composants "stratégiques" et les spécialistes des moteurs de grande diffusion. Dans le premier groupe, on trouve de nombreux équipementiers automobiles tels que Delco Remy, NipponDenso, Bosch, Ford, TRW, Valeo, MagnetiMarelli, Lucas, etc. Ils considèrent les moteurs comme faisant partie intégrante de leurs produits. Quant au deuxième groupe, des spécialistes comme Mabuchi, qui produit plus d'un milliard et demi de moteurs par an, principalement des petits moteurs à collecteur, soit environ 50 moteurs chaque seconde.

Voici quelques marques de moteurs à courant continu proposées par le site Axes Industries :

- ✓Moteurs à Courant Continu GE moteurs
- ✓Moteur électrique à courant continu SNT
- ✓Moteur électrique à courant continu HN MOTOR
- ✓Micro Moteurs à Courant Continu de BUHLER
- ✓Moteur à courant continu de Maxon
- ✓Micro moteurs courant continu FAULHABER

c'est par milliards que sont annuellement fabriqués les petits moteurs à cc dans des usines de productions très automatisées et, de plus en plus Asie du Sud-Est ou en Amériques Centrale et du Sud [8]. Dans ce qui suit nous allons présenter deux marques de moteur à courant continue fabriqué en série, qui sont les moteurs des compagnies FAULHABER et MAXON.

II.2. Moteur CC de FAULHABER

Un micromoteur Faulhaber est un moteur de petite taille fabriqué par la société Faulhaber Group. Ces moteurs sont spécialement conçus pour offrir des performances élevées dans un format compact. Ils sont souvent utilisés dans des applications où l'espace est limité, mais où une puissance et une précision élevées sont nécessaires.

Ces micromoteurs se distinguent également par leur conception robuste et leur fiabilité. Ils sont fabriqués avec des matériaux de haute qualité et une construction soignée pour résister aux conditions de fonctionnement les plus exigeantes. Les moteurs Faulhaber sont réputés pour leur longue durée de vie et leur capacité à maintenir des performances constantes même dans des environnements difficiles.

Chapitre II : Micromoteur cc en série de Faulhaber et Maxon

En raison de leur petite taille, les micromoteurs Faulhaber sont utilisés dans de nombreuses applications, notamment les dispositifs médicaux, les instruments scientifiques, les robots, les systèmes d'automatisation, les équipements de précision, les appareils électroniques et bien d'autres. Ils offrent un contrôle de mouvement précis, une grande efficacité énergétique et une excellente performance dans un format compact, ce qui en fait un choix privilégié pour de nombreuses industries et applications nécessitant des moteurs de petite taille et de haute Performance.



Fig. II.1 : Micromoteur cc Faulhaber SR



fig. II.2: Micromoteur cc faulhaber CR

Chapitre II : Micromoteur cc en série de Faulhaber et Maxon

II.2.1. Les avantages

Les moteurs de Faulhaber présentent également de nombreux avantages notables :

1. Haute précision : Faulhaber est réputé pour sa technologie de moteur de haute précision. Leurs moteurs offrent un contrôle de mouvement précis, avec un positionnement et une régulation précis, ce qui les rend idéaux pour les applications nécessitant une grande précision.
2. Taille compacte : Les moteurs Faulhaber sont caractérisés par leur petite taille et leur poids léger. Cela les rend adaptés aux applications où l'espace est limité ou lorsque des moteurs compacts sont nécessaires.
3. Efficacité énergétique : Les moteurs Faulhaber sont conçus pour être hautement efficaces sur le plan énergétique. Ils offrent une conversion d'énergie efficace, ce qui permet de réduire la consommation d'énergie et d'optimiser l'autonomie des dispositifs alimentés par ces moteurs.
4. Personnalisation : Faulhaber propose des moteurs personnalisables pour répondre aux besoins spécifiques des clients. Ils offrent des options de personnalisation en termes de tailles, de performances, de fonctionnalités et d'interfaces, ce qui permet une adaptation précise aux exigences particulières de chaque application.
5. Large plage de vitesses : Les moteurs Faulhaber sont capables de fonctionner sur une large plage de vitesses, offrant une flexibilité dans le choix de la vitesse de rotation appropriée pour une application donnée.
6. Durabilité : Les moteurs Faulhaber sont conçus pour être durables et fiables. Leur construction de haute qualité, combinée à des matériaux robustes, leur confère une longue durée de vie et une résistance à l'usure, ce qui réduit les coûts de maintenance et assure une utilisation fiable à long terme.
7. Expertise technique : Faulhaber bénéficie d'une expertise technique solide et d'une longue expérience dans le domaine des moteurs électriques. Leur équipe d'ingénieurs qualifiés offre un support technique et une assistance personnalisée aux clients, l'aidant à choisir le moteur approprié et à optimiser ses performances dans leur application spécifique.

Chapitre II : Micromoteur cc en série de Faulhaber et Maxon

II.3. Moteur CC MAXON

Les micromoteurs Maxon sont des moteurs électriques de petite taille fabriqués par la société Maxon Motor. Ces moteurs sont spécialement conçus pour offrir des performances élevées dans des applications où l'espace est limité mais où une puissance, une précision et une fiabilité maximales sont requises. Les micromoteurs Maxon sont réputés pour leur technologie de pointe et leur qualité exceptionnelle. Ils sont largement utilisés dans des domaines tels que l'automatisation industrielle, la robotique, les dispositifs médicaux, les instruments scientifiques, les drones, les équipements de précision et bien d'autres.

Ces micromoteurs se distinguent par leur conception compacte et leur puissance élevée. Malgré leur petite taille, les micromoteurs Maxon offrent une combinaison unique de couple élevé, de vitesse élevée et de précision de mouvement. Ils sont capables de fournir un contrôle de mouvement précis, une réactivité rapide et une grande efficacité énergétique.

Les moteurs Maxon sont fabriqués avec des matériaux de haute qualité et une technologie de pointe pour garantir une longue durée de vie et une fiabilité exceptionnelle. Ils sont conçus pour résister aux conditions de fonctionnement les plus exigeantes et maintenir des performances constantes même dans des environnements difficiles.

En raison de leur excellence technique, les micromoteurs Maxon sont utilisés dans diverses applications où la performance et la fiabilité sont primordiales. Que ce soit pour la robotique médicale, les prothèses, les instruments de mesure, les drones de haute précision ou les systèmes d'automatisation industrielle, les micromoteurs Maxon offrent des solutions de moteur fiables et performantes.

Chapitre II : Micromoteur cc en série de Faulhaber et Maxon



Fig. II.3 : micromoteur cc Maxon A-max et RE-max

II.3.1. Avantages

Les moteurs à courant continu de Maxon offrent plusieurs avantages significatifs :

1. **Fiabilité** : Les moteurs Maxon sont réputés pour leur fiabilité exceptionnelle. Ils sont conçus et fabriqués avec des matériaux de haute qualité, ce qui les rend durables et résistants à l'usure, garantissant ainsi un fonctionnement fiable sur une longue durée.
2. **Précision** : Les moteurs DC de Maxon offrent une grande précision de positionnement et de vitesse. Grâce à leur conception avancée, ils peuvent atteindre des performances de contrôle de mouvement très précises, ce qui les rend idéaux pour les applications nécessitant un positionnement et une régulation précis.
3. **Compacité** : Les moteurs Maxon sont réputés pour leur compacité. Ils sont disponibles dans des tailles réduites, ce qui les rend adaptés aux applications où l'espace est limité. Leur petite taille permet une intégration facile dans des dispositifs compacts sans compromettre les performances.
4. **Hautes performances** : Malgré leur taille réduite, les moteurs Maxon offrent des performances élevées. Ils sont capables de fournir un couple élevé et une puissance de sortie considérable par rapport à leur taille, ce qui les rend adaptés aux applications exigeantes nécessitant une forte puissance.

Chapitre II : Micromoteur cc en série de Faulhaber et Maxon

5. Large gamme de produits : Maxon propose une vaste gamme de moteurs à courant continu, offrant une variété de tailles, de caractéristiques et d'options de personnalisation. Cette diversité permet aux clients de trouver facilement un moteur adapté à leurs besoins spécifiques.
6. Intégration aisée : Les moteurs Maxon sont conçus pour une intégration aisée dans diverses applications. Ils sont accompagnés de supports de fixation, de connecteurs et d'options d'interface compatibles, ce qui facilite leur intégration dans des systèmes existants
7. Expertise et support technique : Maxon bénéficie de nombreuses années d'expérience dans le domaine des moteurs électriques et des systèmes d'entraînement. Ils offrent un excellent support technique et une assistance aux clients, aidant ainsi à résoudre les problèmes et à optimiser les performances des moteurs dans différentes applications.



Fig. II.4. Moteurs DC de haute précision depuis 1961

II.4.Comparissant entre le micromoteur à cc Faulhaber et Maxon

En tant que servomoteurs on utilise les micromoteurs à courant continu à excitation par aimant. L'avantage des moteurs à aimants permanents consiste en ce que leur excitation n'exige aucune source d'alimentation et que leur flux magnétique ne dépend que très peu de la température du moteur.

Chapitre II : Micromoteur cc en série de Faulhaber et Maxon

La commercialisation rapide de micromoteurs fabriqués à partir de nouvelles techniques de micro-usinage prouve le besoin à ces moteurs. Le micromoteur magnétique de dimensions de quelques millimètres est une option intéressante dans les applications, pour les moteurs en série nous nous concentrons sur les plus petits moteurs à CC fabriqué par Maxon et Faulhaber.

Les principaux critères qui définissent le choix du micromoteur dans l'entraînement des microsystèmes électriques sont : la puissance utile ou couple requis tel que calculé par le chargement maximum de l'appareils. Le moteur convertit la puissance électrique absorbée (P_a):

$$P_a = V * I \text{ (II.1)}$$

I est le courant d'induit et V la tension d'alimentation du moteur.

La puissance de sortie mécanique est :

$$P_U = \Omega * T = \eta * P_a \text{ (II.2)}$$

Où T est le couple au bout de l'arbre du rotor (de sortie) et η est le rendement du moteur.

En ce qui concerne les puissances nominales, il faut préciser pour un moteur (à courant alternatif ou à courant continu), il s'agit de la puissance mécanique disponible sur l'arbre du moteur, exprimée en kW. La forte dépendance du rendement du moteur par rapport à la puissance nominale est utilisée pour la classification des moteurs.

Une étude comparative est réalisé entre plusieurs micromoteurs des fabricants Faulhaber et Maxon. Dans le but d'analyser et comparer les technologies, notamment par la mise en place de modèles de régression [10]. L'objectif est d'estimer l'influence de la masse des moteurs électriques sur le besoin en puissance et pour aider au choix d'un rapport entre la masse et la puissance.

Les dimensions et le poids de ces moteurs sont en moyenne de 4 mm à 26 mm et de 0,35 g à 16,1 g respectivement.

Les données des micromoteurs sont présentées dans les tableaux suivants :

Tableau .II.1 Micromoteur à courant continue gamme (range) moteurs à balais DCX Maxon à bobinage sans fer

Chapitre II : Micromoteur cc en série de Faulhaber et Maxon

taper	Vitesse nominale (tr/min)	Couple nominale(Nm.m)	Le rendement (%)	Poids de moteur(g)	dimensions (mm)	Puissance(w)
DCX6M	4950	0,309	58	2.4	∅ 6x15.6	0.1601
	5940	0,332	61	2.4	∅ 6x15.6	0.2064
	5730	0,326	60	2.4	∅ 6x15.6	0.1955
	5690	0,325	60	2.4	∅6 x15.6	0.1936
DCX8M	4780	0,653	74	4.4	∅ 8x16	0.3267
	4950	0,649	74	4.4	∅ 8x16	0.3362
	4190	0,641	73	4.4	∅ 8x16	0.2811
	4820	0,62	73	4.4	∅ 8x16	0.3128
	5190	0,652	74	4.4	∅ 8x16	0.3542
	5800	0,614	74	4.4	∅ 10x17.7	0.3727
DCX10S	4530	0,918	58	6.3	∅ 10x17.7	0.4353
	4690	0,948	58	6.3	∅ 10x17.7	0.4654
	4270	0,944	58	6.3	∅ 10x17.7	0.4219
	3310	0,993	58	6.3	∅ 10x17.7	0.3440
	3930	0,909	56	6.3	∅ 10x17.7	0.3739
	3890	0,905	56	6.3	∅ 10x17.7	0.3685

Tableau. II.2 Séries RE Maxon Micromoteur à courant continue gamme (range) moteurs à balais RE Maxon à bobinage sans fer, équipés de puissance moteur à aimants permanents.

taper	Vitesse nominale (tr/min)	Couple nominale(Nm.m)	Maxe efficacité(%)	Poids de moteur(g)	Taille (mm)
RE6	4680	0,302	54	2,3	06-15,6
	5670	0,324	56	2,3	
	5400	0,318	56	2,3	
	5340	0,316	56	2,3	
RE8	4320	0,63	67	4	08-16
	4480	0,624	67	4	

Chapitre II : Micromoteur cc en série de Faulhaber et Maxon

	3500	0,616	67	4	
	4220	0,596	66	4	
	4760	0,626	68	4	
	5410	0,589	67	4	
RE10	1630	0,757	66	7	010-17
	1990	0,789	67	7	
	1500	0,784	66	7	
	2950	0,787	68	7	
	4670	0,784	69	7	
	3150	0,8	68	7	
	3340	0,784	68	7	
	2300	0,718	66	7	
	2000	0,757	66	7	
	2790	0,746	67	7	

Tableau. II.3: ECX SPEED brushless, moteur BLDC

taper	Vitesse Nominale (tr/min)	Couple nominale(Nm.m)	Max. efficacité [%]	Poids de moteur[g]	taille mm
ECX vitesse4 M	12100	0.229	58.1	1.2	Ø4×115.8
	13400	0.239	59.7	1.2	
ECX vitesse4 L	23000	0.338	62.6	1.8	Ø4×22.8
	13400	0.341	60	1.8	
ECXvitesse6 M	25500	0.334	55.6	3	Ø6×17.7
	13900	0.322	50.4	3	

Chapitre II : Micromoteur cc en série de Faulhaber et Maxon

ECX vitesse6 M	52300	0.413	65.5	3	Ø6×17.7
	44900	0.412	66.9	3	
	46800	0.425	68.5	3	
ECX vitesse8 M	24200	0.917	61	6	Ø8×23
	33100	0.874	63	6	
	32300	0.877	64	6	
ECX vitesse8 M	26700	1.23	66	6	Ø8×23
	21200	1.26	66	6	
	22800	1.26	67	6	

Tableau.II.4 : Commutation des métaux précieux

taper	Puissance de sortie[w]	Max. efficacité[%]	Poids de moteur[g]	Taille mm
Series 0615 ... S	0.0445	52	2	Ø6×15
	0.0419	50	2	
	0.0392	48	2	
Series 0816 ... S	0,17	52	3.5	Ø8×16
	0,16	51	3.5	
	0,18	50	3.5	
Series 0816 ... SR	0.1861	69	4.5	
	0.1921	69	4.5	
	0.2015	69	4.5	

Chapitre II : Micromoteur cc en série de Faulhaber et Maxon

	0.1596	67	4.5	
Series 1016 ... G	0,24	63	6.5	Ø10×15.7
	0,42	67	6.5	
	0,36	68	6.5	

Tableau. II.5 : Micromoteurs CC plats

taper	Puissance de sortie[w]	Max. efficacité[%]	Poids de moteur[g]	Taille mm
1506 ... SR	0.0950	54	4.3	Ø15×5.5
	0.0819	63	4.3	
	0.1162	68	4.3	
1506 ... SR1E2-8	0.0968	68	7.1	Ø15×7.8
	0.0759	66	7.1	Ø15×7
	0.1059	70	7.1	15
Series 2607 ... SR	0.8373	81	16.1	26
	0.8112	80	16.1	26
	0.8897	81	16.1	26

Les tableaux (1 à 5) montrent que les micromoteurs à cc de faible puissance possède un rendement relativement important qui atteint 50.4 à 74% pour les micromoteurs de Faulhaber et de 20 à 81% pour les micromoteurs de Maxon.

Les figures II.5 et II.6 compare la relation entre l'efficacité énergétique (le rendement) et la puissance nominale, et du poids par unité de puissance respectivement à base des données des catalogues des industriels Maxon et Faulhaber.

Chapitre II : Micromoteur cc en série de Faulhaber et Maxon

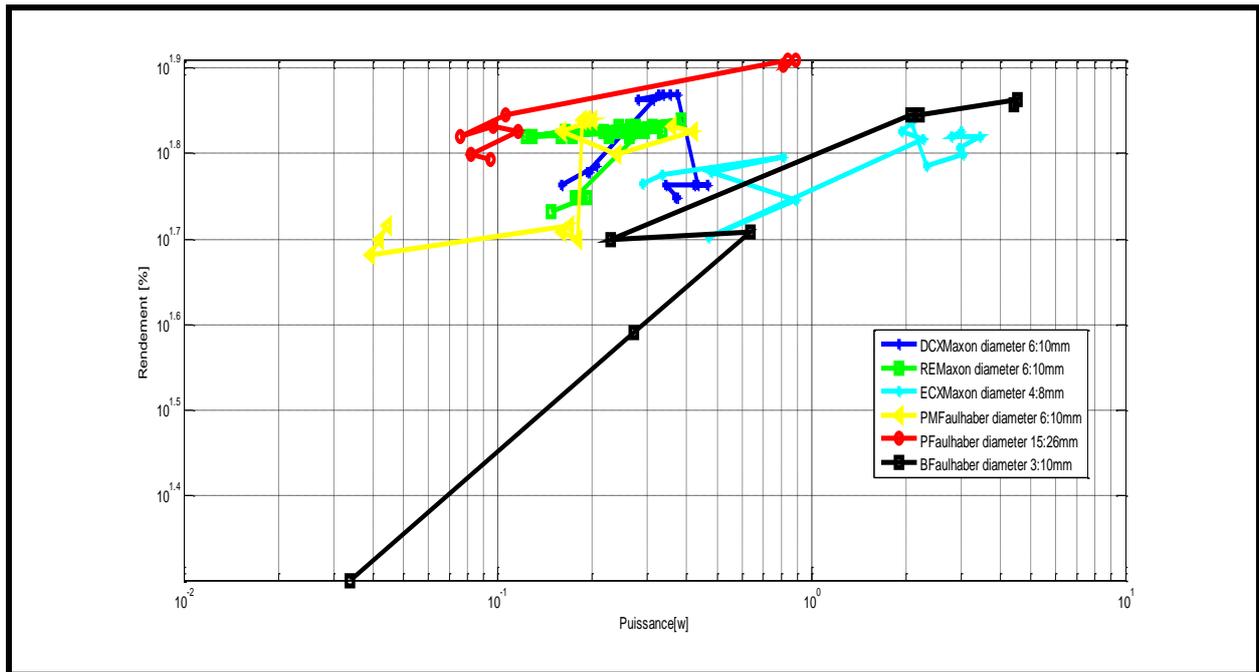


Figure II.5 : Courbe du rendement en fonction de la puissance nominale des micromoteurs.

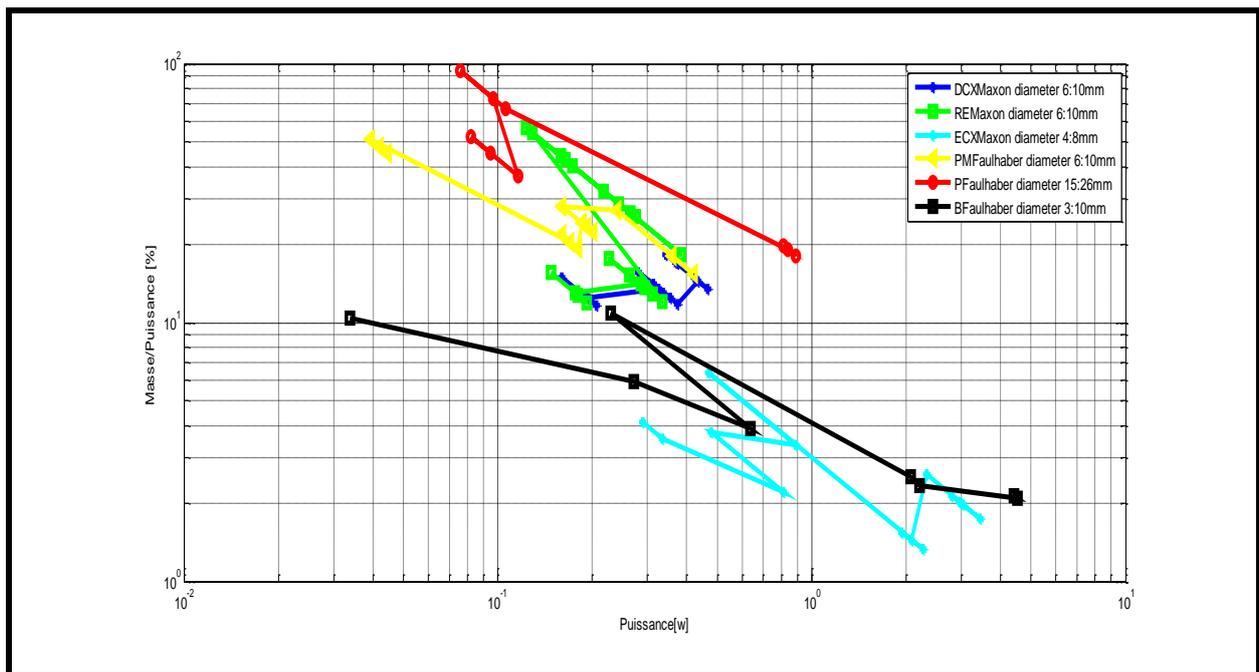


Figure II.5 : Courbe du poids par unité de puissance en fonction de la puissance nominale des micromoteurs CC.

Figure II.5 montre une proportionnalité entre la puissance et le rendement, plus la puissance diminue le rendement diminue, cela présente un inconvénient pour la fabrication des

Chapitre II : Micromoteur cc en série de Faulhaber et Maxon

micromoteurs. Les courbes des micromoteurs CC, RE Maxon et PM Faulhaber et aussi les courbes de EC Maxon et B Faulhaber se rapprochent d'autant plus de celle de P Faulhaber.

La puissance massique est le ratio d'une puissance (en W) par une masse (en kg). La puissance massique s'exprime donc dans le Système international d'unités en W/kg ; elle traduit la capacité d'un dispositif d'une masse donnée à développer une puissance. La puissance massique est couramment utilisée pour comparer des véhicules ou des moteurs. Le rapport puissance / masse est souvent utilisé comme un indicateur des performances vraisemblables d'accélération. Figure.2 montre que B Faulhaber et EC Maxon sont moins puissants que les autres types de micromoteurs.

L'analyse comparative des micromoteurs montre que :

1. Similaire aux moteurs à grande échelle, une efficacité de micromoteur est très importante pour atteindre des vitesses élevées.
2. En moyenne le rendement correspond aux poids du micromoteur.
3. Les courbes correspondent à une régression non linéaire, car c'est le domaine micro escale, et les pertes liées au frottement dominant lorsque le couple est faible.
4. Les figures montrent que les lois d'échelle peuvent fournir des ajustements pour les paramètres d'intérêt de ces micromoteurs.

II.5 Conclusion

La comparaison entre Faulhaber et Maxon est intéressante, car ce sont deux fabricants renommés de moteurs électriques et de systèmes d'entraînement. Bien qu'ils offrent des produits similaires, il existe des différences notables entre les deux marques.

Faulhaber est réputé pour sa technologie de moteur sans balais de haute précision. Leurs moteurs sont connus pour leur petite taille, leur poids léger et leur grande efficacité. Ils sont souvent utilisés dans des applications exigeant une précision extrême, telles que les dispositifs médicaux, les instruments scientifiques et les systèmes d'automatisation industrielle. Faulhaber est également reconnu pour ses moteurs personnalisables et sa capacité à répondre aux besoins spécifiques des clients.

D'autre part, Maxon est célèbre pour sa large gamme de moteurs à balais de qualité supérieure. Leurs produits sont réputés pour leur longévité, leur fiabilité et leur puissance élevée. Maxon est souvent choisi pour des applications exigeantes nécessitant une grande puissance de sortie, comme les robots industriels, les drones et les équipements de maintenance. Ils se distinguent également par leur expertise dans la conception de systèmes d'entraînement complets, comprenant des moteurs, des réducteurs et des capteurs intégrés.

En termes de prix, les moteurs Faulhaber tendent à être plus chers que les moteurs Maxon, en raison de leur haute précision et de leur fabrication personnalisée. Cependant, il convient de

Chapitre II : Micromoteur cc en série de Faulhaber et Maxon

noter que les deux marques offrent une qualité exceptionnelle et sont considérées comme des leaders dans leur domaine respectif.

En conclusion, choisir entre Faulhaber et Maxon dépend des besoins spécifiques de l'application. Faulhaber est idéal pour les applications nécessitant une précision extrême et une taille compacte, tandis que Maxon est préférable pour les applications exigeant une puissance élevée et une grande fiabilité. Il est recommandé de consulter les spécifications techniques, les recommandations des fabricants et les retours d'expérience des utilisateurs avant de prendre une décision finale.

Les Figure II.5 et II.6 valident les lois d'échelle par comparaison avec des gammes industrielles de micromoteurs.

Cependant, les lois d'échelle peuvent être utilisées même si une seule référence est disponible pour une série de gamme. En exprimons une masse M possible pour un moteur de couple T de technologie similaire en fonction de la masse M_{ref} et le couple T_{ref} pour un moteur connue.

***CHAPITRE III : Simulation
de servomoteur à courant
continu.***

Chapitre III : Simulation de servomoteur à courant continu

III .1.Introduction

La simulation d'un servomoteur à courant continu est un processus essentiel pour concevoir, optimiser et valider le fonctionnement d'un système de positionnement avant sa mise en œuvre réelle. Cette simulation permet de modéliser le fonctionnement du servomoteur afin de prédire et d'analyser le mouvement et la précision de positionnement du servomoteur.

Le servomoteur à courant continu est un dispositif qui convertit l'énergie électrique en mouvement mécanique. Il est largement utilisé dans de nombreuses applications industrielles, robotiques et de contrôle de mouvement où la précision de positionnement est cruciale.

La simulation du servomoteur à courant continu implique généralement les étapes suivantes :

1. Modélisation du micromoteur : Le micromoteur est modélisé en utilisant des équations mathématiques qui décrivent sa dynamique, y compris les caractéristiques électriques et mécaniques.
2. Modélisation du servomoteur :
3. Intégration du système : Le modèle du servomoteur et du micromoteur sont intégrés dans un environnement de simulation global. Cela peut inclure d'autres composants tels que des capteurs de position, et amplificateur.
4. Validation et analyse : Une fois le modèle du système complet, des scénarios de simulation sont exécutés pour évaluer les performances du servomoteur pour différentes valeurs de positionnement.

La simulation d'un servomoteur à courant continu permet d'optimiser le fonctionnement du système avant sa mise en œuvre réelle, ce qui peut réduire les coûts de développement et les risques associés aux erreurs de conception. De plus, cela permet d'explorer différentes configurations et paramètres pour atteindre les performances souhaitées et d'effectuer des ajustements itératifs pour améliorer continuellement le système.

Chapitre III : Simulation de servomoteur à courant continu

III .2.Généralité sur Matlab

Matlab est un logiciel de calcul numérique et de programmation largement utilisé dans le domaine de l'ingénierie, des mathématiques et des sciences. Il offre un environnement de développement intégré (EDI) convivial qui permet aux utilisateurs d'effectuer une variété de tâches, allant de l'analyse de données à la modélisation et la simulation de systèmes complexes.

Développé par Math Works, Matlab est réputé pour sa puissance et sa polyvalence. Il dispose d'une vaste bibliothèque de fonctions et d'outils spécialisés qui facilitent la manipulation et la visualisation des données, ainsi que la résolution de problèmes mathématiques et techniques.

L'un des points forts de Matlab est sa capacité à traiter des données numériques de manière efficace. Il permet l'analyse et la manipulation de matrices et de vecteurs de grande taille, ce qui en fait un outil particulièrement adapté aux calculs scientifiques et à l'exploration de données. De plus, Matlab offre des fonctionnalités avancées en matière de visualisation, ce qui facilite la représentation graphique des résultats et la compréhension des phénomènes étudiés.

Matlab est également largement utilisé dans le domaine de la modélisation et de la simulation. Il permet la création de modèles mathématiques et physiques, ainsi que l'implémentation de simulations numériques. Cette fonctionnalité est utilisée dans de nombreux domaines, tels que l'ingénierie, la physique, la biologie et l'économie, pour étudier le comportement de systèmes complexes et prendre des décisions éclairées.

En résumé, Matlab est un outil puissant et polyvalent utilisé par de nombreux professionnels et chercheurs pour résoudre des problèmes mathématiques et techniques, analyser des données, modéliser des systèmes et réaliser des simulations. Sa large gamme de fonctionnalités en fait un logiciel incontournable dans de nombreux domaines scientifiques et techniques.

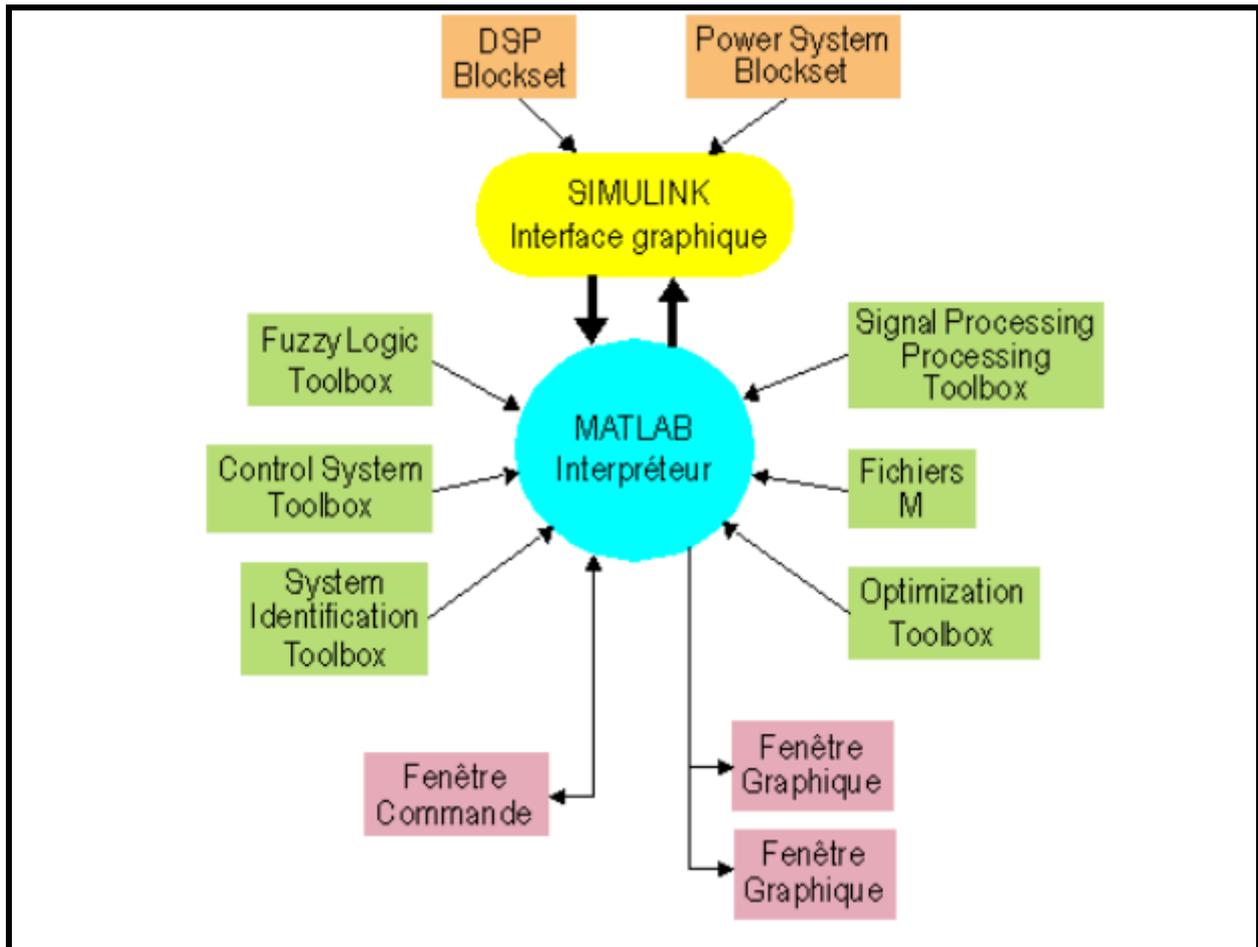


Figure .III.1. Environnement MATLAB

III.3 Modélisation d'un micromoteur à CC

Un micromoteur électrique à courants continu est régi par les équations physique découlant de c'est caractéristique électrique et mécanique.

III.3.1 Caractéristiques électriques

Les équations électriques d'un micromoteur à courant continu (CC) décrivent les relations entre la tension, le courant, la résistance et les propriétés électromagnétiques du moteur. Voici l'équation électrique aux bornes de l'induit:

$$k\omega + L \frac{dI}{dt} + RI = U(1.III)$$

- **I** est le courant circulant dans le rotor (en ampères),
- **V** est la tension d'alimentation du moteur (en volts),

Chapitre III : Simulation de servomoteur à courant continu

- E est la force contre-électromotrice (f_{cem}) du moteur (en volts),
- R est la résistance de l'induit (en ohms).

le régime de variation des grandeurs de la machine (courant, vitesse ...) est suffisamment lent pour que l'on puisse négliger l'inductance d'induit L dans les équations [12], l'équation (I.III) devient :

$$k\omega + RI = U(2.III)$$

2. Équation de couplage électromécanique:

$$E = k\omega(3.III)$$

Où :

- k est la constante de force électromotrice du moteur (V.s/rad),
- ω est la vitesse angulaire du rotor du moteur (rad/s).

III.3.2 Caractéristiques mécaniques

Les équations mécaniques d'un micromoteur à courant continu (CC) décrivent les relations entre le couple, la vitesse de rotation, et l'inertie. Voici les principales équations utilisées pour modéliser un micromoteur à CC :

Équation de couplage électromécanique:

$$C = kI(4.III)$$

Où :

- C est le couple généré par le moteur (en N.m),
- k est la constante du couple moteur (N.m/A).

La caractéristique mécanique du moteur à courant continu est la suivante :

$$J \frac{dw}{dt} = C_m - C_b \quad (5.III)$$

$$C_b = b * w \quad (6.III)$$

Avec : J : Moment d'inertie du moteur à courant continu (en Kg.m²)

C_m : Le couple moteur (en Nm).

C_b : Le couple de frottement (en Nm).

b : Coefficient de frottement créé par la rotation du moteur.

Chapitre III : Simulation de servomoteur à courant continu

Ces équations fournissent les relations fondamentales entre la tension, le courant, le couple et la vitesse d'un micromoteur à CC. La constante électromotrice (k) et la constante de couple (k) sont des paramètres spécifiques au moteur et dépendent de sa conception et de ses caractéristiques physiques.

Il convient de noter que ces équations représentent un modèle simplifié du comportement électrique d'un micromoteur à CC.

La simulation d'un micromoteur à courant continu offre un outil puissant pour l'analyse et la conception de systèmes mécaniques. Elle permet d'explorer virtuellement les performances du micromoteur dans différentes conditions et de prendre des décisions éclairées pour optimiser son fonctionnement. Grâce à la simulation, il est possible de développer des systèmes plus efficaces, plus fiables et mieux adaptés aux besoins spécifiques des applications. On applique la transformée de Laplace aux équations électriques et mécaniques pour trouver le schéma bloc du micromoteur.

III.4. Schémas blocs du moteur

Le modèle mathématique de la réponse en vitesse du moteur électrique pour différentes entrées (échelons de tensions) peut être établi grâce à l'utilisation des transformées de Laplace des équations III.1, 2, 3, et 5. Deux modèles sont présentés : le premier sans inductance et le deuxième avec inductance, qui sont représentés par les figures suivantes :

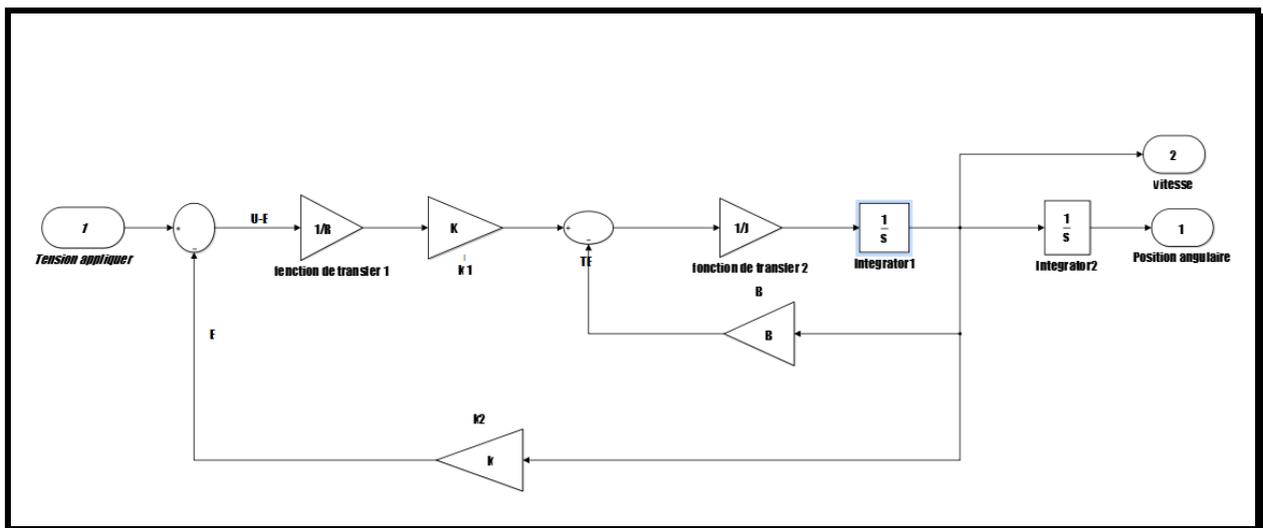


Fig.III .2:Schema bloc du micromoteurCC

Chapitre III : Simulation de servomoteur à courant continu

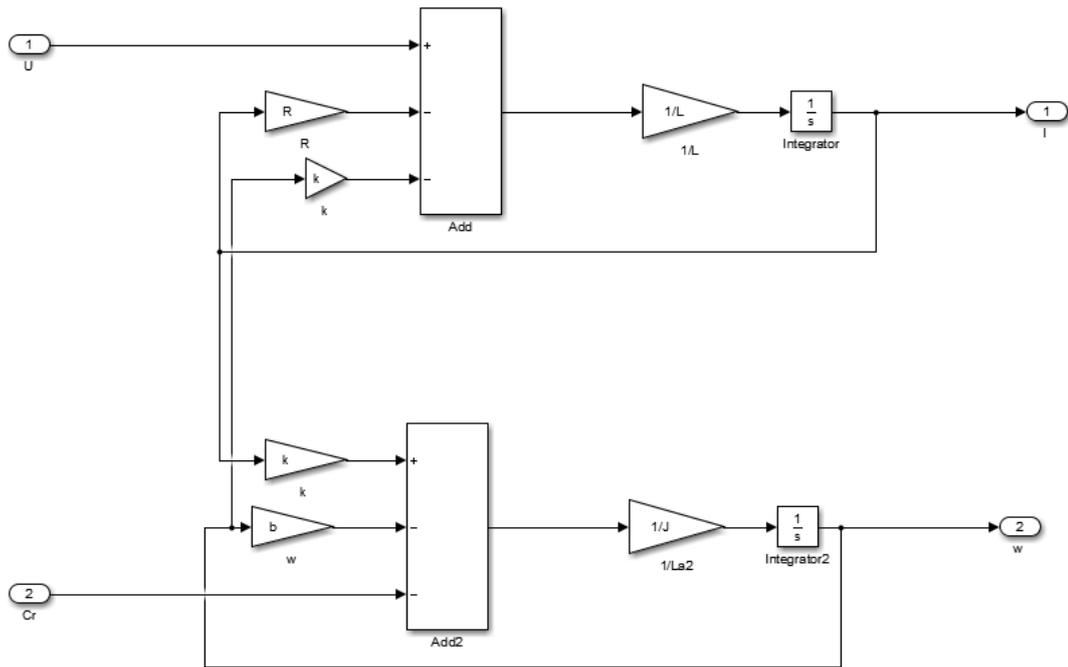
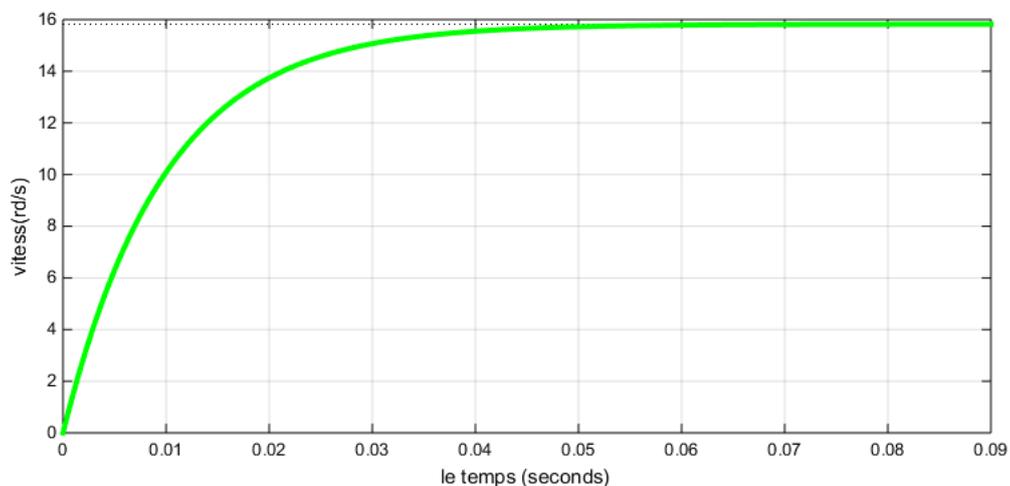


Fig. III .3: model complet d'un micromoteur CC

III.5. Les Courbes caractéristiques de moteur à courant continu :

Les courbes caractéristiques du moteur à courant continu sont des représentations graphiques qui décrivent les relations entre le couple, la vitesse et le courant dans le fonctionnement d'un moteur à courant continu. Elles fournissent des informations précieuses pour analyser les performances et le comportement du moteur dans différentes conditions de charge et de tension d'alimentation

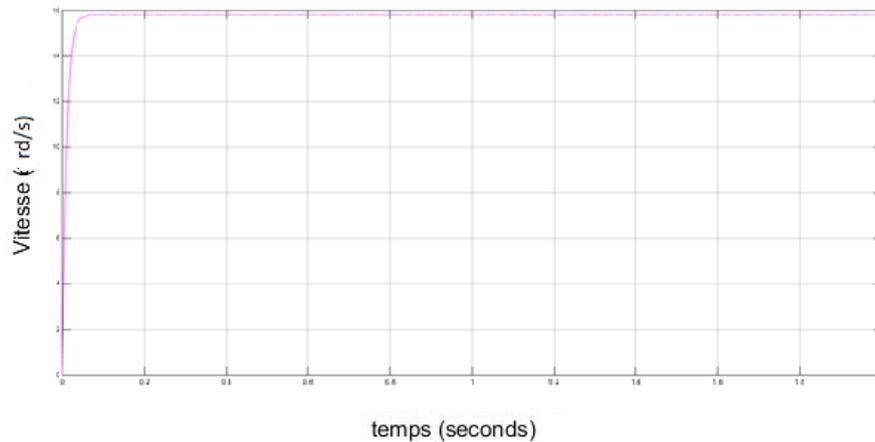
- courbe de la vitesse d'un micromoteur CC sans inductance L :



Chapitre III : Simulation de servomoteur à courant continu

Figure III.4: courbe de la vitesse en fonction du temps du micromoteur CC

- courbe de la vitesse d'un micromoteur CC avec inductance L :



figureIII.5: Courbe de la vitesse en fonction du temps d'un modèle du micromoteur CC complet

Nous remarquons que les courbes de la vitesse en fonction du temps pour les deux cas, avec et sans l'inductance d'induit (représentée par L), sont les mêmes, cela signifie que l'effet de l'inductance d'induit est négligeable dans la dynamique de la machine.

L'inductance d'induit affecte généralement la réponse dynamique d'une machine électrique, en particulier lorsqu'il y a des variations rapides du courant ou de la tension. Dans ces situations, l'inductance d'induit peut causer des retards ou des réactions transitoires dans la réponse de la machine.

Cependant, dans le cas où les variations du courant ou de la tension sont suffisamment lentes, l'inductance d'induit n'a pas suffisamment de temps pour influencer significativement la réponse de la machine. Par conséquent, les courbes de la vitesse en fonction du temps pour les deux cas, avec et sans l'inductance d'induit, se superposent et sont essentiellement les mêmes.

Chapitre III : Simulation de servomoteur à courant continu

Cela signifie que l'inductance d'induit peut être négligée dans ces conditions spécifiques, ce qui simplifie les équations et facilite l'analyse de la machine. Cependant, il est important de noter que cette simplification n'est valable que lorsque les variations du courant ou de la tension sont effectivement lentes par rapport au temps caractéristique de l'inductance d'induit. Dans des situations où les variations rapides sont importantes, l'inductance d'induit ne peut pas être négligée et aura un impact sur la dynamique de la machine.

- **Courbe de courant d'un micromoteur à cc :**

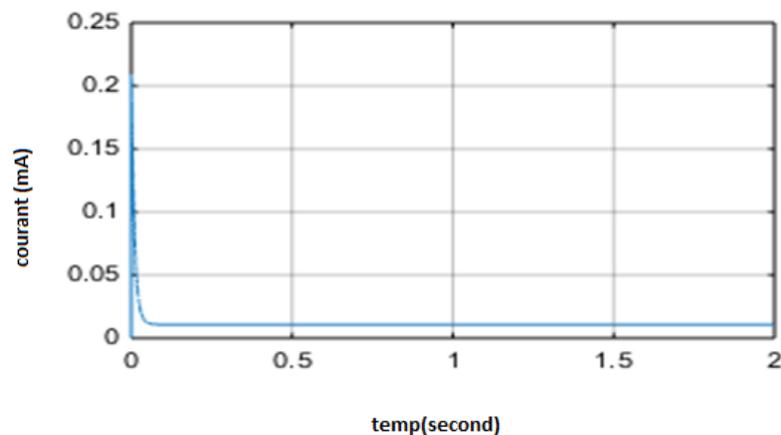


Figure .III.6: la courbe de courant d'un modèle complet de micromoteur à cc

Nous remarquons que la courbe de courant d'un modèle complet de micromoteur à CC est une représentation graphique de la relation entre le courant d'excitation et le couple mécanique. Elle permet d'analyser et de comprendre le comportement électrique du moteur, et elle est utilisée pour déterminer les paramètres importants du moteur dans le but de concevoir et de contrôler efficacement ses performances.

- **La courbe de couple d'un modèle complet de micromoteur à cc :**

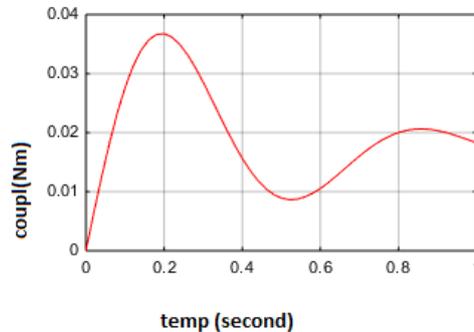


Figure .III.7 :La courbe de couple d'un modèle complet de micromoteur à cc

Nous remarquons que la courbe de couple d'un modèle complet de micromoteur à CC est un outil précieux pour évaluer les performances mécaniques du moteur. Elle fournit des informations sur la relation entre le couple mécanique et la charge appliquée, ce qui permet d'optimiser l'utilisation du moteur dans différentes applications et de garantir un fonctionnement efficace et fiable.

III.6. Modélisation d'un servomoteur CC standard

La simulation d'un servomoteur à CC est une méthode puissante pour comprendre et analyser le comportement d'un servomoteur, prévoir ses performances et optimiser sa conception. Cela peut contribuer à accélérer le processus de développement et à améliorer les performances des systèmes utilisant des servomoteurs à CC dans divers domaines tels que l'automatisation industrielle, la robotique, les systèmes de positionnement, etc.

III.6.1.Equation de mouvement

Trois équations de mouvement sont fondamentales pour présenter la fonction de transfert. Des relations entre couple et courant, tension et déplacement angulaire, couple et inerties du système sont utilisés.

1. Équation de couplage électromécanique : (fem) :

Chapitre III : Simulation de servomoteur à courant continu

La force électromotrice, également appelée tension induite, est générée dans les bobines du moteur lorsqu'elles sont en mouvement dans un champ magnétique. Elle est proportionnelle à l'angle de position du moteur.

$$E = k \frac{d\theta}{dt} \quad (6.III)$$

2. Équation de couplage électromécanique ::

Le couple électromagnétique est généré dans le servomoteur à CC en raison de l'interaction entre le champ magnétique produit par le courant dans les bobines et le champ magnétique produit par les aimants permanents.

$$C_{em} = k\Phi I \quad (7.III)$$

Où C_{em} est le couple électromagnétique, k est la constante du couple électromagnétique, Φ est le flux magnétique dans le moteur et I est le courant dans les bobines du rotor.

La caractéristique mécanique du moteur à courant continu est la suivante :

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = C_m - C_b \quad (8.III)$$

$$C_b = b * \frac{d\theta}{dt} \quad (9.III)$$

Le système de contrôle de la position présenté par la figure III.3 est un système à boucle fermé : L'opérateur ou le programme d'automate choisit une valeur de consigne $\theta(t)$ en fonction de la vitesse $\theta_c(t)$ qu'il souhaite obtenir. La valeur réelle $\theta(t)$ est mesurée et fournit le signal de contre-réaction $y(t)$, qui est comparé à la valeur de consigne. La différence entre ces deux valeurs est appelée écart de réglage $e(t)$, L'amplificateur de puissance ajuste en conséquence l'alimentation $u_a(t)$ du moteur. Le moteur s'arrête si le signal de l'erreur est nulle. C'est-à-dire lorsque la position de charge souhaitée est atteinte. Ce type de système est appelé servomécanisme. Le servo est un système de contrôle à boucle fermé, la grandeur mécanique de sortie est une position [11].

Chapitre III : Simulation de servomoteur à courant continu

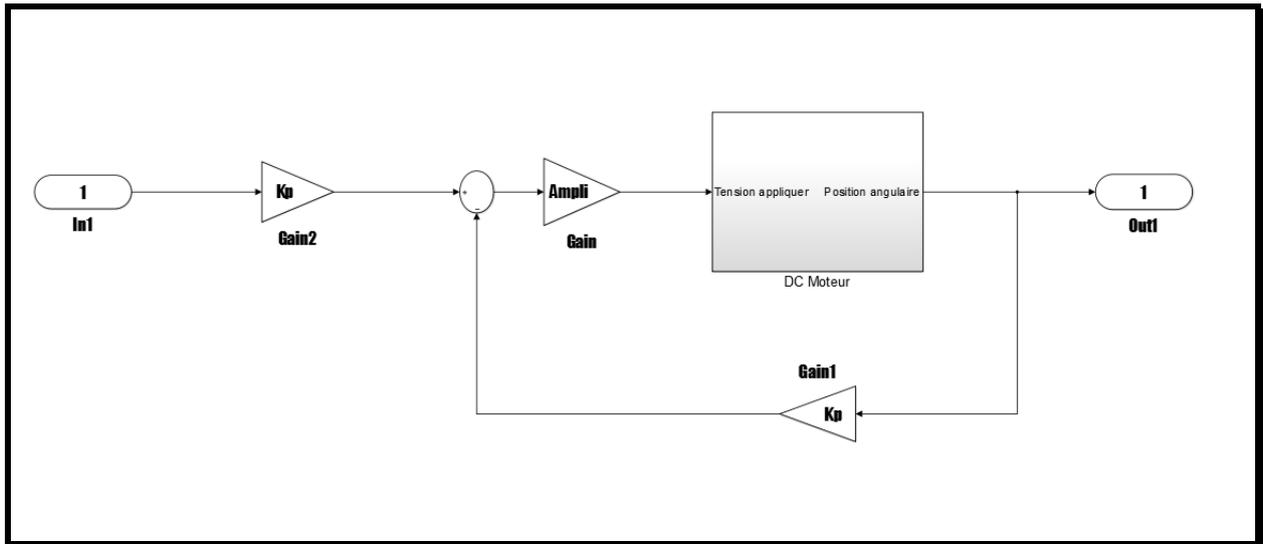


Fig. III .8: Schéma bloc du servomoteur CC

Le sous-système d'un servomoteur à courant continu est composé du moteur à CC, du système de rétroaction de position, du contrôleur et éventuellement d'un système de transmission. Ces composants interagissent harmonieusement pour permettre un contrôle précis du mouvement et du positionnement dans les applications nécessitant une performance de servomoteur de haute qualité.

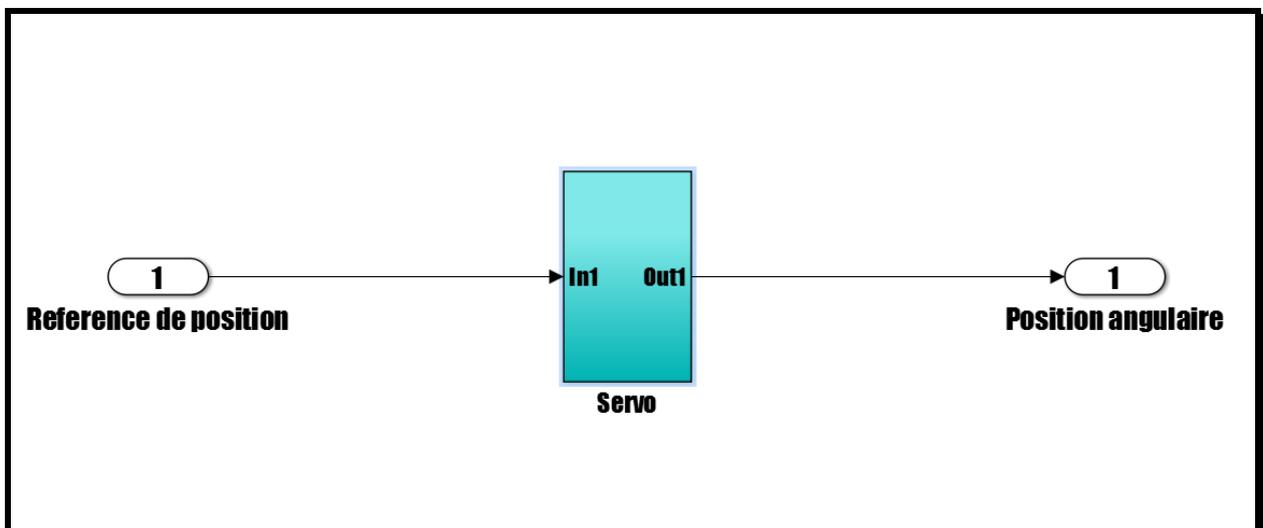


Figure III.9. : Subsysteme d'un servomoteur à cc

III.7. Fonction de transfert d'un micromoteur a cc

La fonction de transfert d'un micromoteur à courant continu (CC) est une représentation mathématique entre la tension d'entrée et la vitesse de rotation de sortie du moteur. La fonction de transfert est généralement exprimée sous la forme d'un rapport entre la transformée de Laplace de la sortie (vitesse angulaire) et la transformée de Laplace de l'entrée (tension). Cependant, pour obtenir une fonction de transfert précise, des modèles plus complexes et détaillés du moteur sont généralement nécessaires.

Un modèle simple de fonction de transfert d'un micromoteur à CC peut être exprimé comme suit :

$$\mathbf{H}(s) = \frac{k}{(\tau s + 1)}$$

Où :

La fonction de transfert ci-dessus est un modèle du premier ordre qui peut être utilisé pour représenter le comportement dynamique global du moteur.

Il est important de noter que la fonction de transfert d'un micromoteur à CC peut varier en fonction de sa conception spécifique, de ses caractéristiques physiques et des conditions de fonctionnement. Les spécifications fournies par le fabricant ou une caractérisation expérimentale du moteur peuvent aider à déterminer la fonction de transfert appropriée pour un modèle précis.

III.8. Fonction de transfert d'un servomoteur

La fonction de transfert d'un servomoteur à courant continu (CC) représente la relation mathématique entre la tension de commande appliquée au moteur et la vitesse de rotation de sortie. Cette fonction permet de modéliser le comportement dynamique du servomoteur en réponse aux signaux de commande.

Chapitre III : Simulation de servomoteur à courant continu

La fonction de transfert d'un servomoteur à CC est généralement exprimée sous la forme d'un système d'ordre 2 en raison de la présence d'inerties mécaniques et de frottements dans le système. Voici une représentation typique de la fonction de transfert d'un servomoteur à CC :

$$G(s) = \frac{k}{(T_m * T_l * s^2 + (T_m + T_l * B) * s + 1)}$$

où $G(s)$ est la fonction de transfert du servomoteur, K est le gain statique du système, T_m est la constante de temps mécanique, T_l est la constante de temps électrique, B est le coefficient de frottement visqueux et s est la variable de Laplace.

Les constantes de temps mécanique (T_m) et électrique (T_l) dépendent des caractéristiques du servomoteur, telles que l'inertie du rotor et l'inductance des bobines. Le coefficient de frottement visqueux (B) représente l'effet des frottements internes dans le système.

Cette fonction de transfert permet de caractériser le comportement dynamique du servomoteur à CC. Elle peut être utilisée pour concevoir des systèmes de contrôle appropriés et pour prédire la réponse du servomoteur à différentes commandes.

Il est important de noter que la fonction de transfert peut varier d'un modèle de servomoteur à un autre en fonction de leurs spécifications et de leur construction. Par conséquent, il est recommandé de se référer aux spécifications techniques du servomoteur spécifique ou de réaliser des mesures expérimentales pour obtenir une fonction de transfert précise pour un servomoteur à CC donné.

III .9. Modèle du système micromoteur

La modélisation de la tension d'entrée en fonction de la vitesse de sortie et la position angulaire de sortie sont présentées.

Nous utilisons les paramètres physiques du moteur donné dans le tableau suivant :

Tableau III.1 : Les paramètres de micromoteur à CC

La résistance d'induit	4.7 Ohm
Constante de couple	0.06 V/(tr/mn)

Chapitre III : Simulation de servomoteur à courant continu

Coefficient de frottement	$40.923 \cdot 10^{-6} \text{ rad/s}$
L'inertie	$7.95 \cdot 10^{-6} \text{ kg.m}^2$

Un script écrit sur Matlab pour donner les fonctions de transfert des deux sorties, qui sont la vitesse et le positionnement de l'arbre du micromoteur.

Le programme sur Matlab :

```
clc
%DETERMINER LA FONCTION DE TRANSFERT
[num,den] = linmod ('Motor DC');
num1=num (1, :);
num2=num (2, :);
system_1=ft (num1, den);
sstem_2=ft (num2, den);
system_1=minreal (system_1)
system_2=minreal (sstem_2)
%graphe
figure(1)
step (system_1)
grid
figure (2)
step(system_2)
grid
```

Système 1 :

$$\frac{1606}{s^2 + 101.5 s}$$

Système 2 :

$$\frac{1606}{s + 101.5}$$

Chapitre III : Simulation de servomoteur à courant continu

Nous traçons la position dans le graphe (figure III.5) et la vitesse dans le graphe (figure III.6) En fonction du temps.

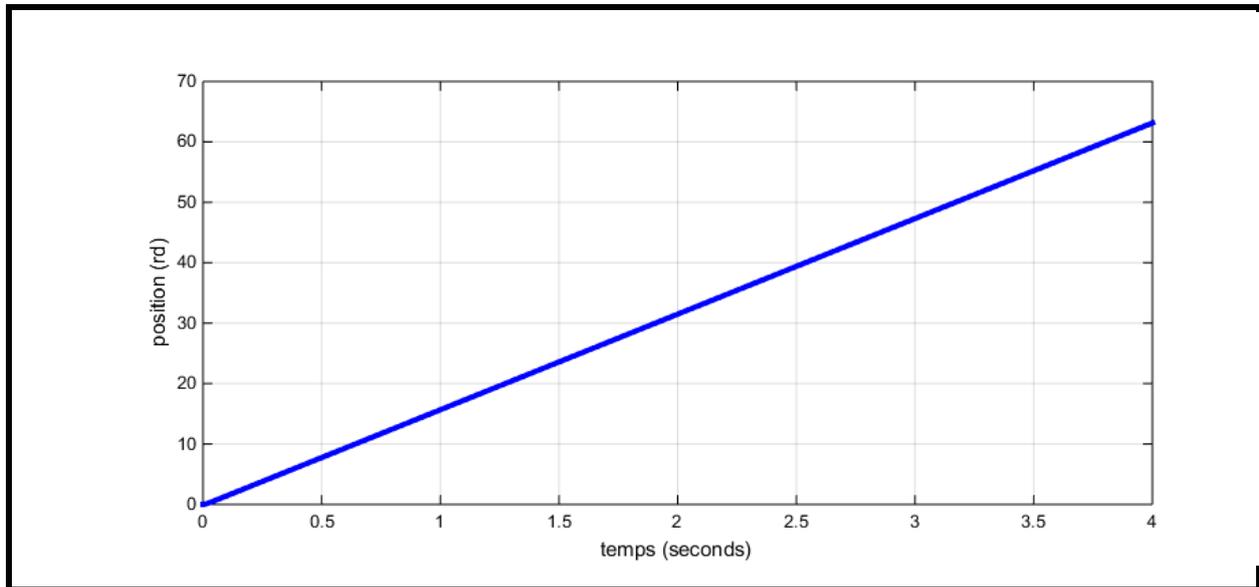
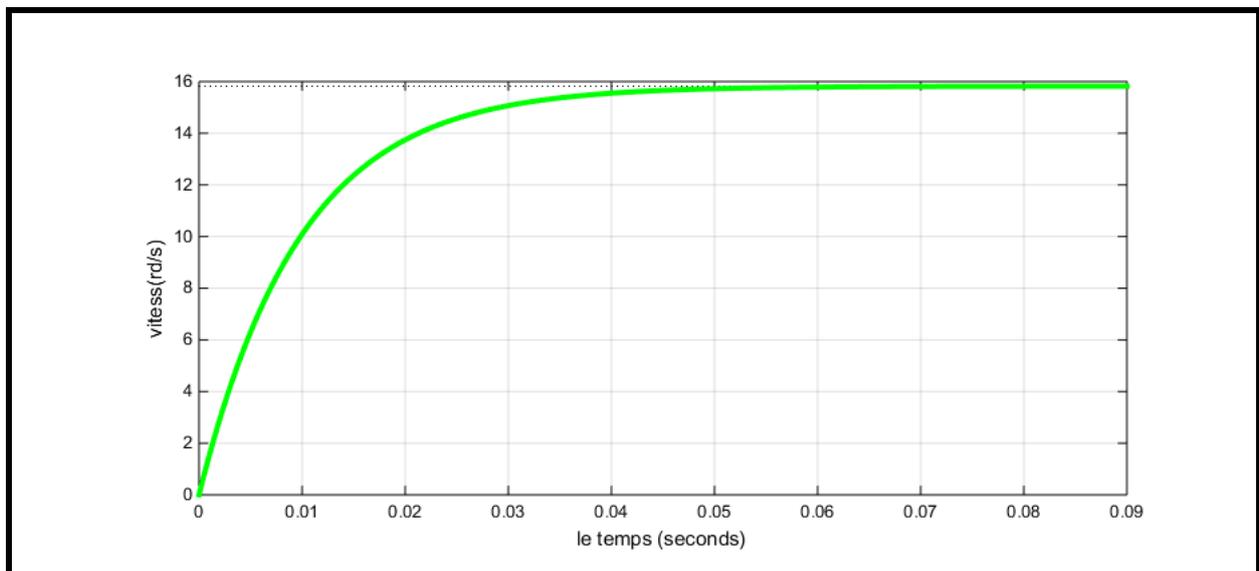


Figure III.10: Courbe de la position en fonction du temps

Selon la (figure.III.10) la courbe de position du micromoteur à courant continu est instable. Alors pour arriver à un système stable, il faut utiliser une régulation. La courbe de position du micromoteur à courant continu est un outil précieux pour évaluer la précision et la stabilité de la position du moteur dans différentes conditions. Elle permet de comprendre les performances du moteur, d'optimiser les paramètres de contrôle et de garantir un positionnement précis dans des applications où la précision de la position est critique.



Chapitre III : Simulation de servomoteur à courant continu

Figure III.11: courbe de la vitesse en fonction du temps

Nous remarquons selon le résultat de la figure III.9, la courbe de vitesse d'un micromoteur à courant continu fournit des informations précieuses sur la relation entre la tension d'alimentation et la vitesse de rotation. Son analyse permet d'optimiser les performances du moteur dans différentes applications, et elle est un outil essentiel pour les concepteurs et les ingénieurs soucieux d'atteindre des performances optimales dans leurs système.

III .10. Modèle du système Servomoteur

La modélisation de la tension d'entrée en fonction de la position angulaire de sortie est présentée. Nous utilisons les paramètres physiques du moteur donné dans le tableau suivant :

Tableau III.2 Les paramètres de servomoteur à CC

La résistance d'induit	4.7 Ohm
Constante du potentiomètre (kp)	0.75V/(V/rd)
Constante du couple (k)	0.06 V/(tr/mn)
Coefficient de frottement (B)	40.923 10^{-6} rad/s
L'inertie (J)	7.95 10^{-6} kg.m ²
Ampli	2
Référence	20

Un script écrit sur Matlab pour donner les fonctions de transfert de la sortie, qui est le positionnement angulaire de l'arbre du micromoteur.

Le programme sur Matlab :

```
clc
%DETERMINER LA FONCTION DE TRANSFERT
[num,den] = linmod('Servo');
```

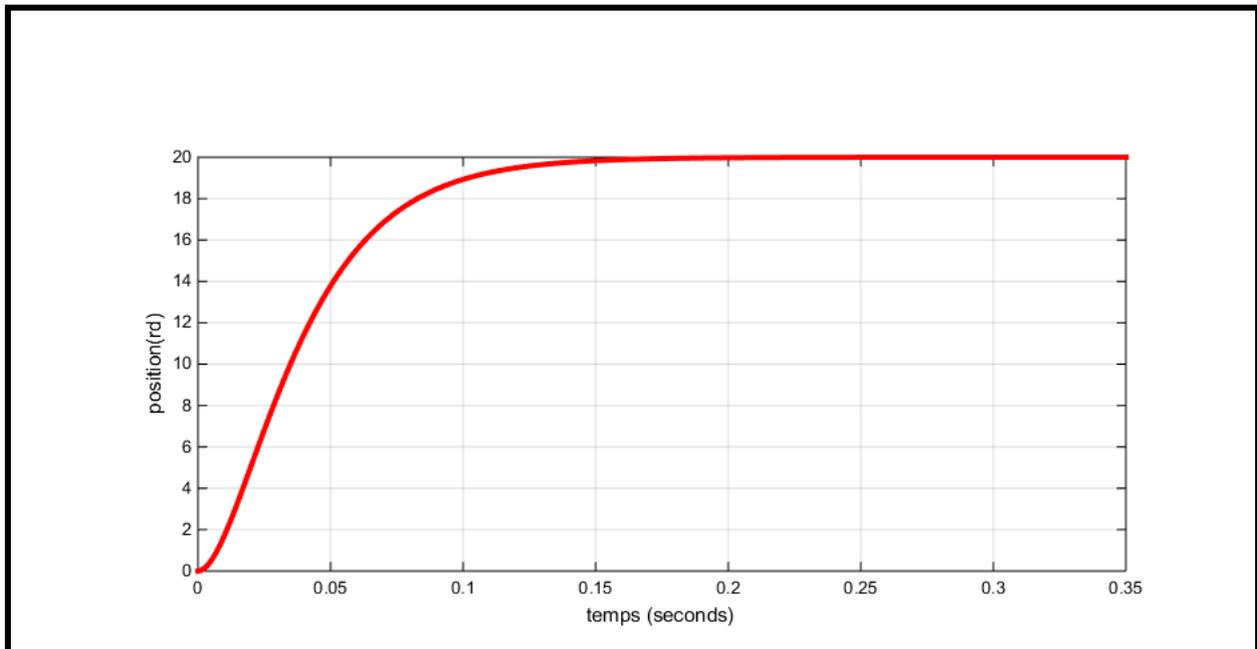
Chapitre III : Simulation de servomoteur à courant continu

```
num1=num(1,:);  
  
system_1=tf(num1,den);  
  
system_1=minreal(system_1)  
  
%graphe  
figure(1)  
step (reference*system_1)  
grid
```

la fonction de transfert du servo est comme suit:

$$\frac{2409}{s^2 + 101.5s + 2409}$$

La simulation de la position sur Matlab est présentée par la figure suivante :



figureIII.12: represente la position de servomoteur

Chapitre III : Simulation de servomoteur à courant continu

Nous remarquons selon le résultat de la (figure III .10) la courbe de position d'un servomoteur à courant continu est un indicateur crucial de sa capacité à atteindre et à maintenir une position précise dans des applications de contrôle de position et de mouvement. Elle est influencée par plusieurs facteurs, y compris les caractéristiques du servomoteur, les paramètres de contrôle et les conditions de fonctionnement. Une courbe de position optimale garantit un positionnement précis, une réponse rapide et une stabilité du servomoteur dans différentes situations. Nous changeons la reference de 20 à 20π et 10, qui sont présentés par les figures suivantes :

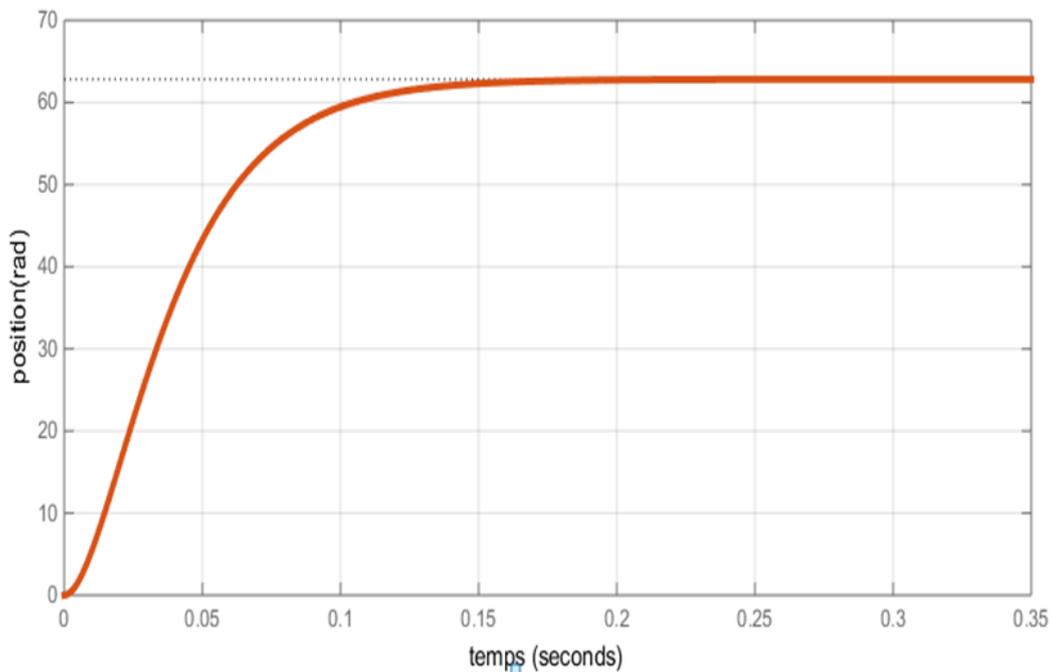
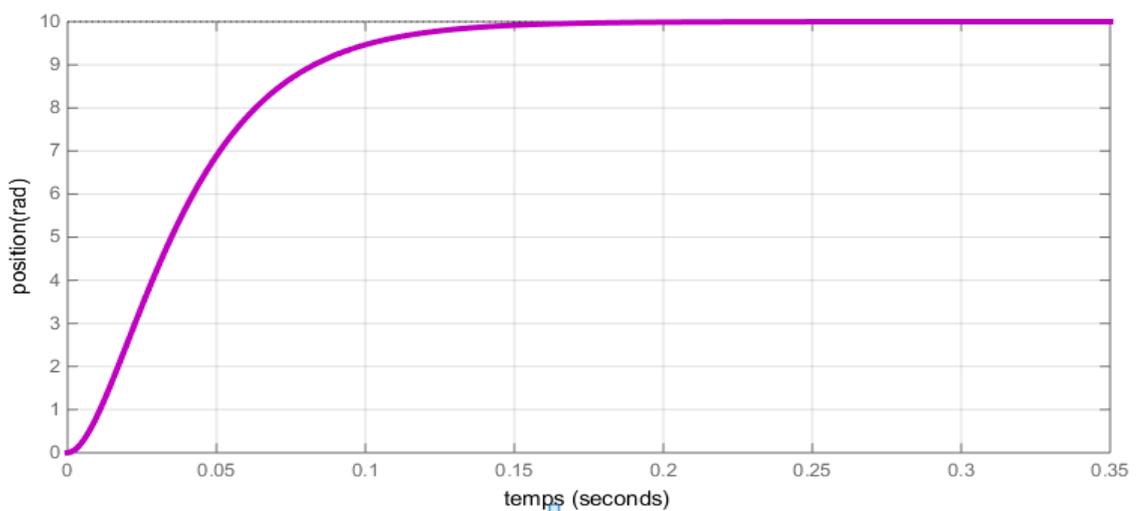


Fig. III .13 : represente la position de servomoteur



Chapitre III : Simulation de servomoteur à courant continu

la Fig. III .14 : represente position de servomoteur

On remarque que la sortie suit la référence donc on conclure que le servomoteur est bien asservit. Dans ce qui suit nous présentons réglage en cascade (courant) de la position d'un moteur CC.

III .11 : Simulation et régulation en cascade de Serov moteur:

La simulation et la régulation en cascade d'un servomoteur sont des techniques couramment utilisées pour contrôler et réguler la position d'un servomoteur. Un servomoteur est un moteur électrique utilisé pour contrôler précisément la position angulaire d'un axe ou d'un système mécanique. La mise en œuvre de la simulation et de la régulation en cascade d'un servomoteur consiste à modéliser les caractéristiques électriques, mécaniques et de contrôle du servomoteur figure III. les paramètres du moteur.

Le modèle est basé sur un micromoteur à courant continu Faulhaber série 0615 [13].

Produit	UN (V)	n0 (tr min ⁻¹)	MH (mNm)
0615N1.5S	1,5	19.100	0,24

Les paramètres de la machine sont présenté par le tableau suivant :

La résistance d'induit	3.9 Ohm
L'inductance (L)	$1.2 \cdot 10^{-6}$ H
Constante de la fem (k)	$7.2 \cdot 10^{-5}$ V/(rpm)
Coefficient de frottement (B)	10^{-8} Nm/(rad/s)
L'inertie (J)	0.01 g.cm^2

Des ajustements et des réglages peuvent être nécessaires pour optimiser les performances du servomoteur dans différentes applications

Chapitre III : Simulation de servomoteur à courant continu

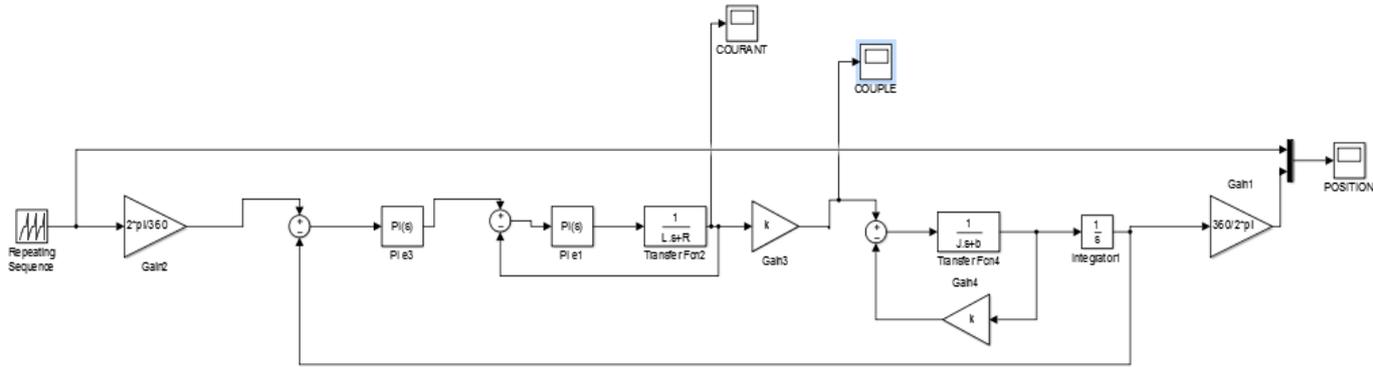
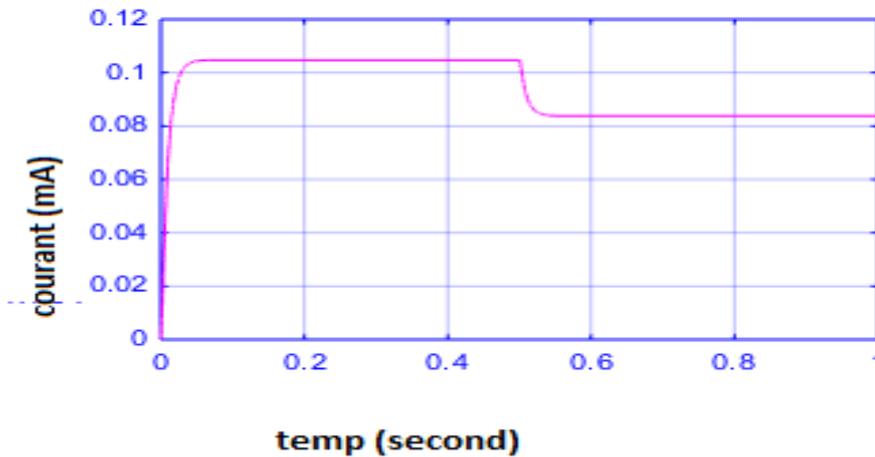


Fig. III.15: Schéma bloc d'un servomoteur avec une régulation en cascade.

III.11.1. Résultats de la simulation :

- Courbe de courant d'un servomoteur avec une régulation en cascade :



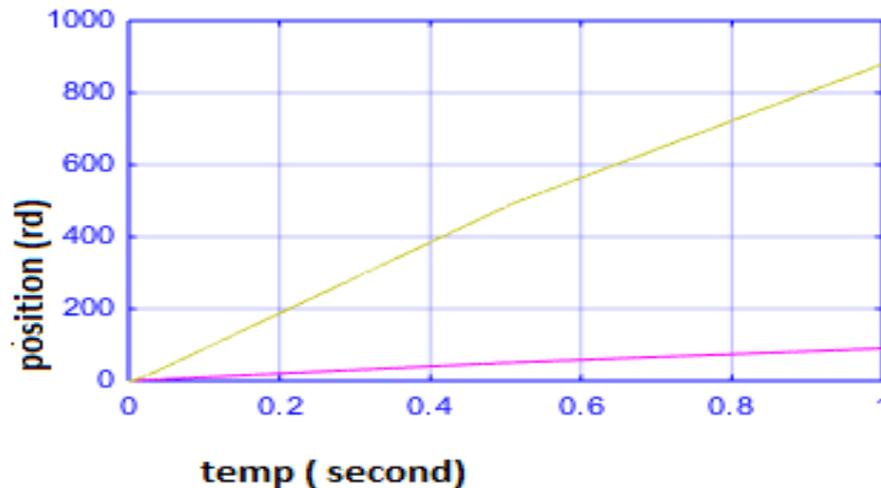
figures III.16 : la courbe de courant d'un servomoteur avec régulation en cascade

On remarque d'après les figures III.16 la courbe de courant d'un servomoteur avec régulation en cascade représente la relation entre le courant d'excitation et la position ou la charge appliquée. Elle offre un aperçu du comportement électrique du système de contrôle et permet d'évaluer la précision, la stabilité et la réactivité du moteur. La régulation en cascade

Chapitre III : Simulation de servomoteur à courant continu

améliore ces performances en ajustant de manière précise le courant d'excitation en fonction des variations de charge, contribuant ainsi à un contrôle plus efficace du servomoteur.

- **Courbe de position d'un servomoteur avec une régulation en cascade :**



figures III.17: la courbe de position d'un servomoteur avec régulation en cascade

On remarque d'après les figures III.17 que la courbe de position d'un servomoteur avec régulation en cascade représente la relation entre la position réelle du moteur et la position de référence souhaitée. Elle permet d'évaluer la précision, la stabilité et la réactivité du système de contrôle. La régulation en cascade améliore ces performances en ajustant la vitesse du moteur en fonction des variations de position, permettant ainsi un suivi précis et efficace de la trajectoire souhaitée.

- **Courbe de couple d'un servomoteur avec une régulation en cascade :**

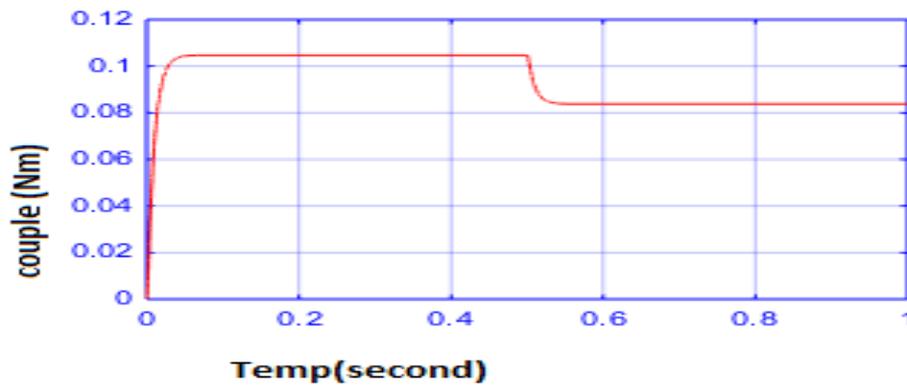


Fig. III.18 : Courbe de couple d'un servomoteur avec une régulation en cascade

On remarque d'après les figures III.18 que la courbe de couple d'un servomoteur avec régulation en cascade représente la relation entre le couple de sortie du moteur et la charge en fonction de la position. Elle permet d'analyser et de comprendre les performances du système, en mettant en évidence la précision de position, la réactivité et la capacité de suivi de trajectoire. La régulation en cascade permet d'améliorer ces performances en utilisant plusieurs boucles de régulation pour un contrôle plus précis du mouvement.

III .12.Généralité sur le régulateur

La régulation consiste à ajuster automatiquement une grandeur afin qu'elle maintienne constamment sa valeur ou reste proche de la valeur souhaitée, malgré les perturbations qui peuvent survenir. Les problèmes de régulation de position, vitesse, accélération, force et température sont courants dans divers secteurs industriels. Les régulateurs classiques basés sur une structure PID (Proportionnel-Intégral-Dérivé) sont généralement utilisés pour commander ces types de processus.

Le régulateur PI est un type de régulateur qui se compose des termes proportionnel (P) permettent d'éliminer l'erreur statique et de réduire le dépassement et le temps de réponse. Le régulateur PI est une forme simple de rétroaction et possède la capacité d'éliminer la compensation de l'état d'équilibre grâce à l'action intégrale.

III .12.1.Synthèse des régulateurs PI :

Chapitre III : Simulation de servomoteur à courant continu

Le régulateur PI est un système du premier ordre avec un pôle à l'origine. Il s'agit d'un asservissement de type P auquel on ajoute un terme intégral. Le terme intégral compense l'erreur statique et améliore la précision en régime permanent. Il intègre l'erreur depuis le début et l'ajoute à la consigne, ce qui permet de réduire l'erreur à mesure que l'on se rapproche de la valeur demandée. Le terme proportionnel agit principalement en début de réponse pour une meilleure réactivité. L'intégrale agit comme un filtre sur le signal intégré, atténuant les perturbations et rendant le système plus dynamique et stable. Cependant, un terme intégral trop important peut entraîner des dépassements, une stabilisation plus lente voire des oscillations divergentes.

Les équations d'un régulateur PI (Proportionnel-Intégral) peuvent être exprimées de la manière suivante :

$$PI = Kp + \frac{Ki}{s} \quad (10. III)$$

où Kp est le gain proportionnel et Ki est le gain intégral.

Nous avons les équations de la MCC (1.III) à (5.III). Nous avons exprimé ces équation dans le domaine de Laplace pour obtenir le schéma bloc de l'asservissement de position (figure III.2).

Ensuite nous représentons la fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) du système, où s est la variable de Laplace, telque :

$$PI = Kp + \frac{Ki}{s} \quad (11. III)$$

où Kp est le gain proportionnel et Ki est le gain intégral.

Ensuite, nous avons l'équation $U = RI + L \left(\frac{di}{dt} \right) + E$ (12. III)

qui décrit la relation entre la tension d'alimentation U , le courant d'armature I , l'inductance L , la résistance interne du moteur R et l force contre-électromotrice E du moteur.

En utilisant l'équation précédente, nous pouvons exprimer par :

$$U - E = U' = RI + L \left(\frac{di}{dt} \right) \quad (13. III)$$

tel que : $U' = (R + L * s)I$ (14. III)

Chapitre III : Simulation de servomoteur à courant continu

comme ce qui permet de simplifier certains calculs ultérieurs.

- L'équation $F_{Te} = \frac{I_a}{U'} = \frac{1}{R+L*s}$ (15. III)

représente la fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) du système, où s est la variable de Laplace, telle que :

$$FTBO = \left(kp + \frac{ki}{s} \right) \left(\frac{1}{R+L*s} \right) \quad (16. III)$$

$$FTBO = \frac{ki}{s} \left(\frac{kp}{ki} * s + 1 \right) \left(\frac{1}{R} \right) / \left(1 + \frac{L}{(R*s)} \right) \quad (17. III)$$

Pour déterminer les valeurs de K_p et K_i , nous proposons de fixer

$$\frac{K_p}{K_i} = \frac{L}{R} \quad (18. III)$$

$$FTBO = \frac{ki}{s} * \frac{1}{R} \quad (19. III)$$

Donc :

$$FTBO = \frac{ki}{R*s+ki} = \frac{1}{\frac{R*s}{ki}+1} \quad (20. III)$$

Enfin, la fonction de transfert en boucle fermée (FTBF) du système est exprimée

comme suit : $FTBF = \frac{\frac{ki}{R*s}}{1 + \frac{ki}{R*s}} = \frac{ki}{R*s+ki}$ (21. III)

où ki est le gain intégral du régulateur PI.

En considérant un temps de réponse désiré T_r de 3 ms et un temps de dépassement réduit τ' de 1 ms, nous pouvons exprimer τ' comme $\tau' = \frac{R}{K_i}$ (22. III)

En résolvant pour K_i , nous obtenons :

$$K_i = \frac{R}{\tau'}, \quad (23. III)$$

Chapitre III : Simulation de servomoteur à courant continu

et en utilisant la proposition $\frac{K_p}{K_i} = \frac{L}{R}$,

$$\text{nous pouvons déterminer : } K_p = \frac{L}{\tau'} \quad (24. III)$$

Ainsi, pour obtenir un régulateur PI optimal pour le système, nous avons trouvé les valeurs de K_p et K_i en fonction de l'inductance L , la résistance interne du moteur R et le temps de réponse. Cela nous permet d'ajuster la réponse du système en boucle fermée pour obtenir des performances désirées en termes de temps de réponse et de stabilité.

Pour la régulation de position du moteur on utilise la méthode suivante :

$$\text{On a : } FTBO = PI * \frac{1}{s} = \frac{kp}{s} + \frac{ki}{s^2} \quad (25. III)$$

$$\text{donc : } FTBO = FTBF = \frac{\frac{kp}{ki} * s + 1}{\frac{1}{ki} * s^2 + \frac{kp}{ki} * s + 1} \quad (26. III)$$

$$FTBF = \frac{\frac{kp}{ki} * s + 1}{\frac{1}{ki} * s^2 + \frac{kp}{ki} * s + 1} \quad (27. III)$$

$$\text{Eq2 2eme ordre} = \frac{1}{wn^2 * s^2} + \frac{2\xi}{(wn * s + 1)} \quad (28. III)$$

D'après l'équation (27. III) et (28. III) on obtient :

$$K_i = wn^2 \quad (29. III)$$

$$K_p = wn^2 * \xi \quad (30. III)$$

$$\xi = \frac{\sqrt{2}}{2} \quad (31. III)$$

Simulation et régulation des différents parties de servo moteur sont présenté dans ce qui suit :

- **Partie électrique**

le schéma bloc d'un régulateur PI pour contrôler le courant est une représentation visuelle des différents éléments et des interactions clés dans un système de contrôle de

Chapitre III : Simulation de servomoteur à courant continu

courant. Il combine les termes proportionnel et intégral pour ajuster le courant réel en fonction de l'erreur entre la consigne et la mesure. Ce schéma bloc est largement utilisé dans les applications de contrôle pour maintenir une valeur de courant souhaitée avec précision et stabilité.

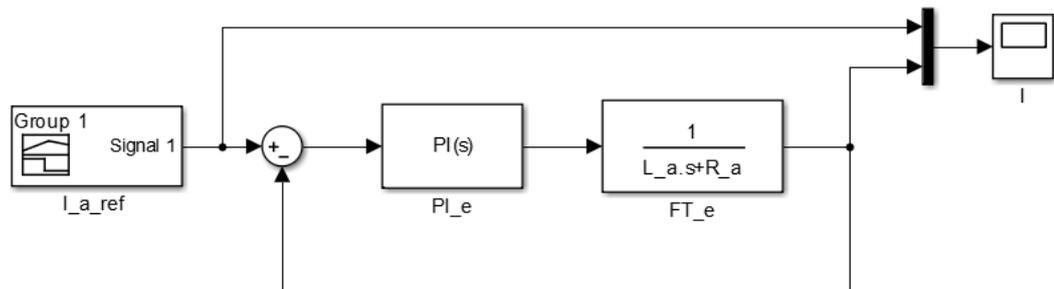


Fig.III.18: Schéma bloc de régulateur PI pour contrôler le courant

- **Partie mécanique**

le bloc régulateur pour contrôler la vitesse d'un système est un élément clé dans les systèmes de contrôle de vitesse. Il utilise des techniques de régulation de rétroaction, telles que la régulation PID, pour comparer la vitesse de référence avec la vitesse réelle et ajuster la commande en conséquence. Ce bloc régulateur permet de maintenir une vitesse cible avec précision, stabilité et réactivité dans une large gamme d'applications industrielles et électroniques.

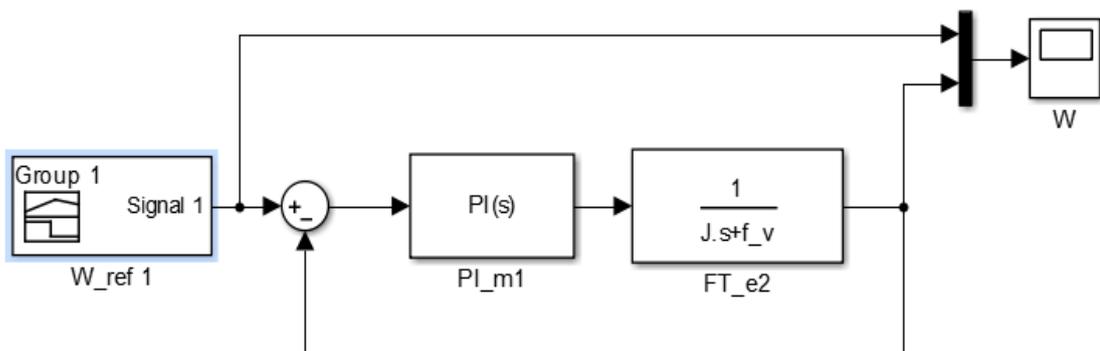


Fig.III.19 : Schéma bloc de régulateur pour contrôler la vitesse de système

III.12.2. Résultats de la simulation :

- **Régulation du courant**

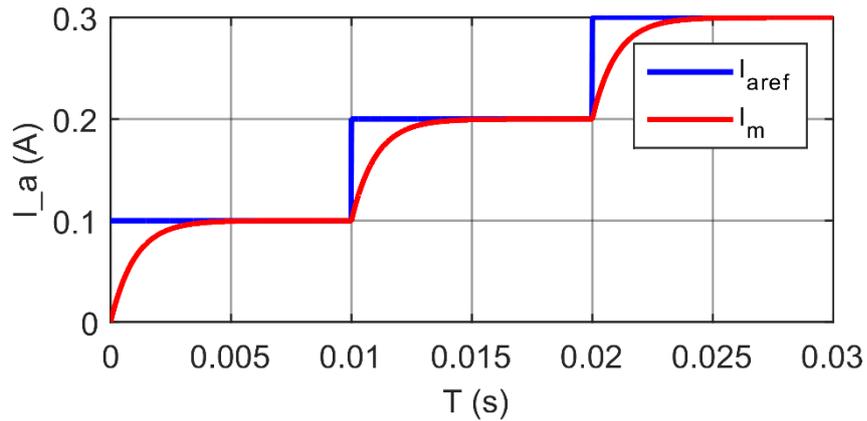


Fig.III.20: Courbe du courant de l'induit du moteur utilisant un régulateur PI.

- **Régulation de la vitesse**

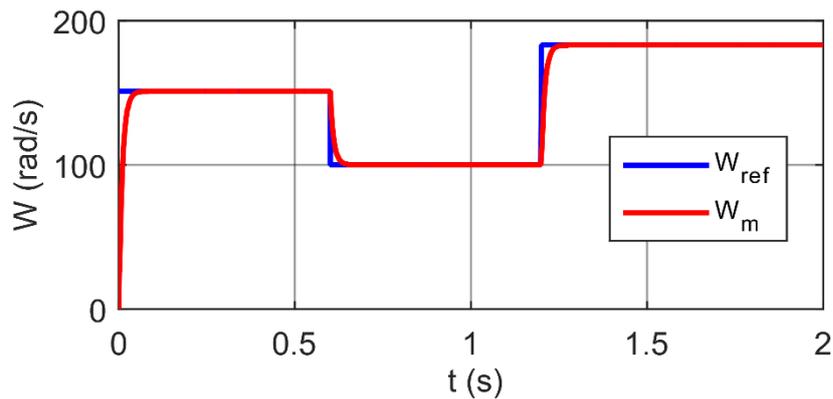


Fig III.21: Courbe de la vitesse utilisant un regulateur PI.

On remarque d'après les figures III.20,21. que Lorsqu'un régulateur est utilisé pour contrôler la réponse d'un système, il peut permettre d'atteindre et de maintenir la référence souhaitée avec précision. Le régulateur agit en ajustant la commande en fonction de l'erreur entre la valeur mesurée et la valeur de référence.

Si le régulateur est bien réglé, la courbe de sortie peut présenter une réponse rapide et précise. La réponse peut atteindre rapidement la référence sans dépasser de manière significative, et le système peut maintenir une sortie constante avec une faible fluctuation.

Chapitre III : Simulation de servomoteur à courant continu

Cependant, il est essentiel d'ajuster les paramètres du régulateur de manière appropriée pour obtenir une courbe de vitesse souhaitée. Cela peut impliquer un processus itératif de réglage et d'expérimentation pour trouver les valeurs optimales des paramètres du régulateur, tels que les gains proportionnel et intégral, afin d'obtenir la meilleure performance du système en termes de temps de réponse, de précision et de stabilité de la réponse.

III.12.3. Résultats de la simulation et de la régulation en cascade :

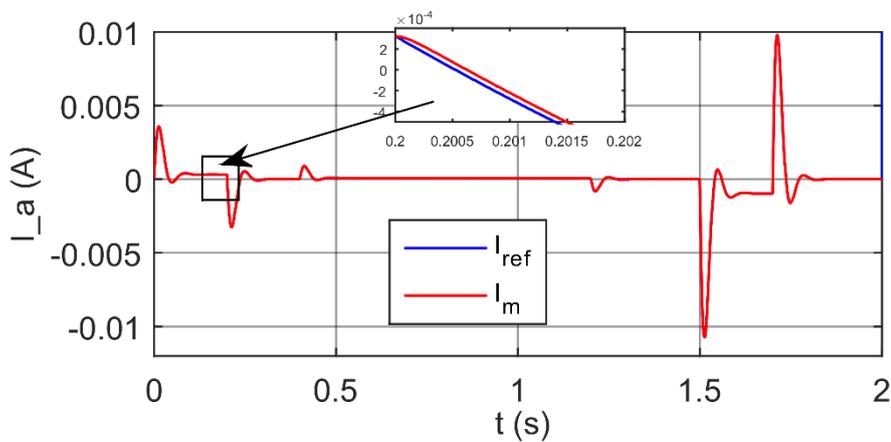


Fig. III.22. Courbe de courant I utilisant une régulation en cascade.

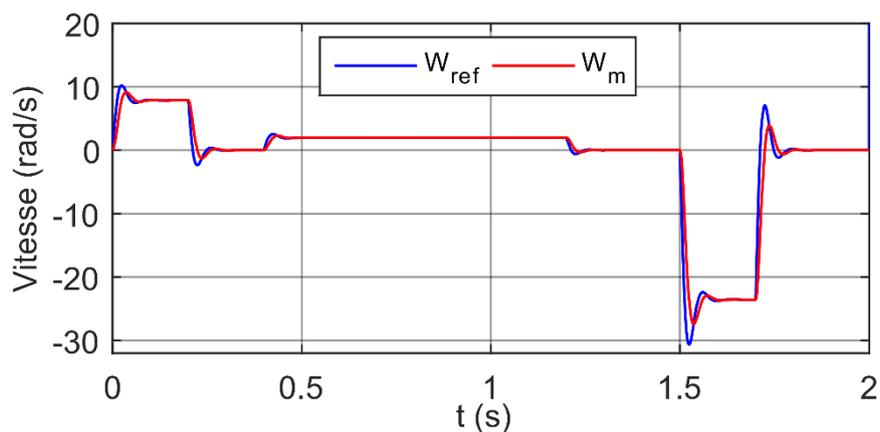


Fig. III.23 : Courbe de la vitesse utilisant une régulation en cascade..

Les boucles de régulation externe et interne travaillent ensemble pour minimiser l'erreur de position entre la consigne et la position réelle du servomoteur. Ainsi, les résultats de la

Chapitre III : Simulation de servomoteur à courant continu

simulation et de la régulation en cascade ont montré un positionnement précis et une capacité à maintenir la position souhaitée. La régulation en cascade a permis d'obtenir un temps de réponse rapides pour le servomoteur.

III .13.conclusion :

En conclusion, la simulation d'un contrôleur de position pour un servomoteur à courant continu est un outil essentiel dans le processus de développement et d'optimisation des systèmes de commande de position. Elle permet d'évaluer et de prévoir les performances du servomoteur, de tester différentes configurations et stratégies de contrôle, et les problèmes potentiels avant la mise en œuvre réelle.

La simulation offre de nombreux avantages, notamment la possibilité de modéliser le comportement du servomoteur dans des conditions variées, d'ajuster les paramètres du contrôleur et de trouver la configuration optimale pour atteindre les performances requises. Elle permet également d'analyser en détail les réponses du système, de détecter les instabilités ou les oscillations indésirables, et de prendre des décisions éclairées pour améliorer la conception et le fonctionnement du système de contrôle.

En utilisant la simulation, les concepteurs peuvent économiser du temps et des ressources en évitant les essais physiques coûteux et en optimisant le fonctionnement du servomoteur avant sa mise en production. Cela permet d'obtenir des solutions de contrôle de position plus efficaces, précises et fiables pour une variété d'applications industrielles, robotiques et de contrôle de mouvement.

La simulation du contrôleur de position pour un servomoteur à courant continu offre une approche pratique, flexible et précise pour le développement de systèmes de commande de position avancés. Elle facilite l'optimisation des performances, la résolution des problèmes et la prise de décisions éclairées, contribuant ainsi à des solutions de contrôle de position de haute qualité et à la réalisation d'applications plus performantes et efficaces.

Conclusion générale

Conclusion générale :

En conclusion, l'utilisation de servomoteurs à courant continu (CC) dans diverses applications est courante, et ces moteurs peuvent être de types différents tels que des micromoteurs à balais et des micromoteurs sans balais. Ce thème avait pour objectif de fournir un aperçu des micromachines, en mettant l'accent sur leurs types, leurs applications et leur fabrication.

Nous avons également réalisé une étude comparative en sélectionnant plusieurs gammes de micromoteurs CC fabriqués en série par des fabricants renommés tels que Faulhaber et Maxon. Cette étude avait pour but d'évaluer le rendement et la puissance massique de certains servomoteurs CC de faible puissance fabriqués en série. Cela nous a permis de comparer les performances et les caractéristiques de ces moteurs pour des applications spécifiques. Cependant, les lois d'échelle peuvent être exploités dans la prise de décision et de choix des micromoteurs CC, même si une seule référence est disponible pour une série de gamme. En exprimons une masse M possible pour un moteur de couple T de technologie similaire en fonction de la masse M_{ref} et le couple T_{ref} pour un moteur connue

Enfin, la simulation d'un contrôleur de position pour un servomoteur à courant continu a été abordée. Cette simulation est une étape essentielle pour évaluer les performances du système de contrôle, anticiper les problèmes potentiels et optimiser les réglages du contrôleur. Elle offre une approche pratique et économique pour tester différentes configurations de contrôle et atteindre des performances précises et fiables dans le positionnement du servomoteur.

Dans l'ensemble, cette étude et la simulation du contrôleur de position pour servomoteur à courant continu ont permis de mieux comprendre les micromachines et leur utilisation dans diverses applications. Elles ont également mis en évidence l'importance de l'évaluation comparative et de la simulation pour garantir des performances optimales et une fiabilité accrue des servomoteurs à courant continu dans les applications industrielles, robotiques et autres. Ces connaissances peuvent être précieuses pour les concepteurs et les ingénieurs souhaitant développer des systèmes de commande de position efficaces et performants. Comme perspective à ce travail, est l'étude et la conception d'un prototype à base d'un micromoteur pour une application donnée.

Référence bibliographique

- [1] Hartman Janoch actuator basics and application springer NewYork ,2004
- [2] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Servomoteur>
- [3] <https://openclassrooms.com/fr/courses/5224916-developpez-un-robot-mobile-connecte-par-bluetooth/5407346-decouvrez-la-constitution-des-servomoteurs>
- [4] JACEK F GIERAS, Permanent magnet motor technology,Hamilton Sundstrand Aerospace, Rockford, Illinois, U.S.A.University of Technology and Life Sciences, Bydgoszcz, Poland, Taylor 2010.
- [5] R.Djamal,commande de servomoteurs par une carte arduino, Université badjimokhtar–Annaba,2020/2021
- [6] Armenski E, Falk G, Micromachines électriques, Edition Mir Moscou, 1977 277 PP.
- [7] Hanxin Shen et al, Modeling and simulation for micro DC motor based on Simulink, 2017 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 242 012079.
- [9]Bernard Multon, Hamid Ben Ahmed, Nicolas Bernard, Pierre-Emmanuel Cavarec, Les Moteurs Electriques Pour Application De Grande Serie, Antenne De Bretagne De L'école Normale Supérieure De Cachan, Revue 3ei Juin 2000
- [10] Marc Budinger. Preliminary design and sizing of actuation systems. Mechanical engineering . UPS Toulouse, 2014. fftel-01112448f
- [11] WWW. Eseyay ingeneering.net
- [12] Michel Pinard, La Commande Electrique Des Machines, Livre, Paris 2013
- [13] Ghlam Karima , Oukli Mimouna, Characterization of the Direct Current Micromotor by Simscape, Journal of Intelligent Systems and Control, vol. 2, no. 1, pp. 47-53, 2023. <https://doi.org/10.56578/jisc020105>.

تلخيص:

الرسالة تتناول تطبيقات محركات التيار المستمر (DC) وتركز على المحركات الصغيرة ذات الفرشاة والبدون فرشاة. الهدف الرئيسي هو توفير نظرة عامة على الماكينات الصغيرة بما في ذلك أنواعها وتطبيقاتها وتصنيعها. بعد ذلك، تركز الدراسة على مقارنة مجموعات مختلفة من المحركات التيار المستمر المصنعة بشكل سلسلي من قبل الشركات المصنعة Faulhaber و Maxon. الهدف من هذه الدراسة المقارنة هو تقييم الكفاءة والقدرة الحجمية لبعض محركات التيار المستمر ذات الطاقة المنخفضة المصنعة بشكل سلسلي.

تبدأ الرسالة بمقدمة لمفهوم محركات التيار المستمر، حيث يتم شرح عملها وميزاتها الرئيسية. بعد ذلك، يقدم المؤلف الماكينات الصغيرة، ويصف أنواع مختلفة من المحركات ذات الفرشاة والبدون فرشاة، واستخداماتها في مختلف التطبيقات الصناعية.

بعد ذلك، تركز الدراسة على اختيار عدة مجموعات من المحركات التيار المستمر المصنعة بشكل سلسلي من قبل Faulhaber و Maxon. يشرح المؤلف معايير الاختيار والأسباب التي أدت إلى اختيار هذه الشركات المصنعة. ثم يتم تقييم المجموعات المحددة من المحركات التيار المستمر من حيث الكفاءة والقدرة الحجمية.

أخيراً، يناقش البحث محاكاة مراقب موضع لمحرك تيار مستمر. يصف المؤلف خطوات المحاكاة ويقدم النتائج المحصل عليها. تتيح هذه النتائج استنتاج كفاءة وأداء محركات التيار

Résumé

Le mémoire porte sur les applications des servomoteurs à courant continu (CC) et se concentre sur les micromoteurs à balais et sans balais. L'objectif principal est de fournir un aperçu des micromachines, y compris leurs types, leurs applications et leur fabrication. Ensuite, l'étude se concentre sur la comparaison de différentes gammes de micromoteurs CC fabriqués en série par les fabricants Faulhaber et Maxon. L'objectif de cette étude comparative est d'évaluer le rendement et la puissance massique de certains servomoteurs CC de faible puissance fabriqués en série.

Le mémoire commence par une introduction au concept des servomoteurs à courant continu, en expliquant leur fonctionnement et leurs caractéristiques principales. Ensuite, l'auteur présente les micromachines, en décrivant les différents types de micromoteurs à balais et sans balais, ainsi que leurs utilisations dans diverses applications industrielles.

Ensuite, l'étude se concentre sur la sélection de plusieurs gammes de micromoteurs CC fabriqués en série par Faulhaber et Maxon. L'auteur explique les critères de sélection et les

raisons pour lesquelles ces fabricants ont été choisis. Les gammes de micromoteurs sélectionnées sont ensuite évaluées en termes de rendement et de puissance massique.

Enfin, le mémoire aborde la simulation d'un contrôleur de position pour un servomoteur à courant continu. L'auteur décrit les étapes de la simulation et présente les résultats obtenus. Ces résultats permettent de conclure sur l'efficacité et les performances des servomoteurs CC. En résumé, ce mémoire présente une étude comparative des servomoteurs à courant continu de faibles puissances fabriqués en série. Il fournit un aperçu des micromachines, compare différentes gammes de micromoteurs CC et présente les résultats d'une simulation de contrôleur de position. Ces informations sont utiles pour comprendre les caractéristiques et les performances des servomoteurs CC dans des applications spécifiques.

Abstract

The thesis focuses on the applications of direct current (DC) servomotors, specifically brushed and brushless micromotors. The main objective is to provide an overview of micromachines, including their types, applications, and manufacturing. The study then focuses on comparing different ranges of series-manufactured DC micromotors from Faulhaber and Maxon. The aim of this comparative study is to evaluate the efficiency and power-to-weight ratio of certain low-power series-manufactured DC servomotors.

The thesis begins with an introduction to the concept of DC servomotors, explaining their operation and main characteristics. The author then presents micromachines, describing the different types of brushed and brushless micromotors, as well as their uses in various industrial applications.

Next, the study focuses on the selection of several ranges of series-manufactured DC micromotors by Faulhaber and Maxon. The author explains the selection criteria and the reasons for choosing these manufacturers. The selected ranges of micromotors are then evaluated in terms of efficiency and power-to-weight ratio.

Finally, the thesis addresses the simulation of a position controller for a DC servomotor. The author describes the simulation steps and presents the obtained results. These results allow for conclusions to be drawn regarding the efficiency and performance of the studied DC servomotors.

In summary, this thesis presents a comparative study of series-manufactured low-power DC servomotors. It provides an overview of micromachines, compares different ranges of DC micromotors, and presents the results of a position controller simulation. This information is valuable for understanding the characteristics and performance of DC servomotors in specific applications.

Mots-clés : Micromoteur électrique, micromoteur à aimant permanent, servomoteur, microsysteme