

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Akli Mouhand Oulhadj de Bouira
Faculté des Sciences et de Sciences Appliquées
Département de Génie Electrique

Mémoire de Fin d'Etudes pour l'obtention du Diplôme de Master 2 en
Électromécanique et Système de Commande

Thème

**Simulation et réalisation de la commande d'un
servomoteur à courant continu à base de la carte
ARDUINO**

Présenté par

Mr ZARIFI Adel
Mr SAADI Tarek

Encadré par

Mr DJIBIRI Moustafa
Dr AIT ABBAS Hamou

Année Universitaire : 2016-2017

Table des matières

Introduction générale	9
1 Généralité sur le servomoteur à courant continue	13
1.1 Introduction	13
1.2 Les capteurs associés à un moteur électrique	14
1.2.1 Capteurs pour des grandeurs électriques	14
1.2.2 Capteurs pour des grandeurs mécaniques	15
1.3 Généralités sur les machines à courant continu	16
1.3.1 Définition	16
1.3.2 Description de la machine à courant continu :	16
1.3.3 Divers types des machines a courant continu	18
1.3.4 Principe de fonctionnement du moteur à courant continu	19
1.4 Mise en équation du moteur à courant continu	19
1.4.1 Circuit équivalent	19
1.4.2 Équations électriques et mécaniques	20
1.4.3 Comportement global	21
1.4.4 Fonction de transfert de système	21
1.5 Schémas blocs	22
1.6 Point de fonctionnement	23
1.7 Procédé de freinage	23
1.7.1 Freinage avec résistance de dissipation	23
1.7.2 Freinage avec récupération d'énergie	24
1.8 Avantages et Inconvénients	24
1.9 Conclusion	24
2 Commande du moteur à courant continu en boucle ouverte	25
2.1 Introduction	25
2.2 Quadrants de fonctionnement d'un MCC	25

2.3	Alimentation par convertisseur électronique	26
2.3.1	Hacheur	27
2.3.2	Redresseur commandé	29
2.4	Le contrôle par MLI	30
2.4.1	Principe de la commande MLI	31
2.5	Simulation sous l'environnement MATLAB Simulink	32
2.5.1	Introduction sur MATLAB	32
2.5.2	Choix technologiques	32
2.5.3	Élaboration des schémas et résultats de simulation	33
2.6	Interprétations des résultats de simulation en boucle ouverte	37
2.7	Conclusion	37
3	Réalisation de la commande en boucle ouverte	38
3.1	Introduction	38
3.2	La partie Hard	39
3.2.1	La carte Arduino Mega 2560	39
3.2.2	Le pont H L298	40
3.3	La partie Soft	41
3.3.1	Matlab support package for Arduino Hardware	41
3.3.2	Matlab GUI	42
3.4	Résultats de la réalisation en boucle ouverte	43
3.5	Interprétations des résultats de réalisation en boucle ouverte	46
3.6	Conclusion	46
4	Commande en boucle fermée d'un moteur à courant continu	47
4.1	Introduction	47
4.2	La correction analogique	48
4.2.1	Caractérisation d'un système analogique bouclé	48
4.2.2	Les filtres analogiques d'un système bouclé	51
4.2.3	La méthode de Ziegler et Nichols pour la détermination des coefficients PID	54
4.3	La correction numérique	55
4.3.1	Le proportionnelle numérique $P(z)$	56
4.3.2	L'intégrateur numérique $I(z)$	56
4.3.3	Le correcteur $PI(z)$	57
4.3.4	Détermination des coefficients $PID(z)$	57
4.4	Simulation sous l'environnement Matlab Simulink	58

4.5	Interprétations des résultats de simulation en boucle fermée	60
4.6	Conclusion	60
5	Réalisation de la commande en boucle fermée	61
5.1	Introduction	61
5.2	Résultats de la réalisation expérimentale en boucle fermée	61
5.3	Interprétation des résultats de la réalisation en boucle fermée	64
5.4	Conclusion	64

Table des figures

1.1	servomoteur	13
1.2	Capteur de courant à effet Hall (6)	14
1.3	Transformation de l'énergie dans une machine MCC	16
1.4	Vue éclatée d'une machine à courant continu	17
1.5	Schéma de principe du moteur MCC	19
1.6	Circuit équivalent du moteur MCC	20
1.7	Schéma bloc tension-vitesse du moteur MCC	22
1.8	Schéma bloc tension-position du moteur MCC	22
1.9	Le point de fonctionnement d'un moteur à courant continu	23
1.10	Freinage avec résistance de dissipation	24
1.11	Freinage avec récupération d'énergie	24
2.1	Quadrants de fonctionnement MCC	26
2.2	Hacheur série	27
2.3	Hacheur réversible en courant	28
2.4	Alimentation avec résistance de dissipation	28
2.5	Hacheur en pont	29
2.6	Moteur à courant continu alimenté par un redresseur triphasé en pont mixte	29
2.7	Moteur à courant continu alimenté par un redresseur triphasé en pont à thyristors	30
2.8	Moteur à courant continu alimenté par un redresseur triphasé en montage tête-bêche.	30
2.9	Schéma de positionnement de l'étage MLI	31
2.10	Forme de signal MLI avec différent rapport cyclique	31
2.11	Circuit de simulation d'un codeur incrémental	33
2.12	Les Signaux des 3 voies de codeur	34
2.13	La mise en œuvre d'un circuit d'alimentation et commande de moteur à courant continu en pont H	34
2.14	Le signal PWM et la tension de sortie de pont H pour différent rapport cyclique	35
2.15	Simulation de la commande en boucle ouverte	35

2.16	Résultats de la simulation boucle ouverte à vide	36
2.17	Résultats de la simulation boucle ouverte en charge	36
3.1	Arduino Mega 2560	39
3.2	Module L298	41
3.3	Interface de GUIDE	42
3.4	Interface de commande du servomoteur	43
3.5	Résultats de réalisation de la boucle ouverte à vide	44
3.6	Résultats de réalisation de la boucle ouverte en charge	45
4.1	Critère de stabilité de Nyquist	49
4.2	Système en boucle fermée avec perturbation	49
4.3	Réponse indicielle d'un asservissement	50
4.4	Schéma bloc d'un système avec correcteur PI analogique	51
4.5	Schéma électronique du correcteur proportionnel	52
4.6	Schéma électronique du correcteur intégral	53
4.7	Schéma électronique du correcteur proportionnel Intégral	54
4.8	Schéma bloc d'un système avec correcteur numérique	56
4.9	Schéma sur le logiciel Simulink de la régulation de vitesse	58
4.10	Système oscillatoire	58
4.11	Résultats de simulation à vide	59
4.12	Résultats de simulation en charge	59
5.1	Résultats de réalisation de la boucle fermée à vide	62
5.2	Résultats de réalisation de la boucle fermée en charge	63

Liste des tableaux

- 1.1 les différents types des machines à courant continu 18
- 3.1 Les caractéristiques d'Arduino Mega 2560 40
- 3.2 Caractéristique de L298 41
- 4.1 Correction selon les deux méthodes de Ziegler et Nichols 55
- 4.2 Paramètres d'un correcteur selon Takahashi 57

Introduction générale

Un moteur est une machine qui est appelée à transformer de l'énergie quelconque sous forme d'une énergie mécanique. Suivant les différents types d'énergies que les moteurs transforment, nous distinguons les moteurs thermiques, les moteurs électriques, les moteurs hydraulique.

La première machine électrique inventée est le moteur à collecteur fut en 1871. L'histoire re-tient le nom de Zénobe Gramme pour sa première réalisation industrielle, peu après la version à induit cylindrique de cette machine a été proposer par Wernher von Siemens. Leur application rapide comme machine réversible (moteur et générateur) leur valut un franc succès. En 1880, des trains de mines furent électrifiés et un premier ascenseur électrique fut construit. Au début du 20 ème siècle, la traction électrique acquit ses lettres de noblesse, avec plusieurs vitesses record de 205 km/h. La première voiture à dépasser les 100 km/h était électrique (1).

Les découvertes dans le domaine des composants électroniques de puissance dans les années 1960, œuvrent les possibilités de variation de vitesse des moteurs électriques. Les moteurs sont de plus en plus souvent associés à des convertisseurs électroniques de puissance. Leurs caractéristiques doivent donc être adaptées à cet usage. Les évolutions concernent à la fois les machines elles-mêmes, l'électronique de puissance qui les alimente, mais encore plus l'électronique numérique qui réalise les commandes.

Dans les trois dernières décennies du XX^e siècle, l'électronique de puissance continue de se perfectionner avec l'apparition et le développement de nouveaux composants : thyristors blocables par la gâchette (GTO), IGBT cela permet son utilisation dans tous les domaines d'application des moteur électriques. Pour la commande, c'est l'apparition de processeurs rapides (Microcon-trôleur ,DSP) qui permet enfin de développer l'usage des moteurs électriques à vitesse variable (2).

Les moteurs électriques ont une très grande importance dans l'industrie. Et souvent leur vi-tesse de rotation intervient dans beaucoup d'application industrielle telle que la robotique, la manutention, l'entraînement des pompes, ainsi de suite.

Un objectif commun pour ces efforts de recherche a été le développement de méthodes de conception systématiques pour commander ces moteurs afin de réaliser une bonne poursuite des

trajectoires imposées, par ses sorties.

Ces approches de commande ont leurs mérites. Toutefois, elles présentent quelques limitations depuis que les incertitudes structurées telles que les variations paramétriques, et/ou des incertitudes non structurées telles les modèles dynamiques imprécis existent souvent dans ces systèmes et ils sont sources d'instabilité (3).

Par exemple, la technique du mode glissant est insensible aux variations de paramètres ainsi qu'aux perturbations, mais elle souffre toujours de l'effet du phénomène de "chattering".

Ainsi, la commande backstepping spécifiquement appliquée aux systèmes triangulaires peut faire face aux incertitudes paramétriques, mais cette commande a besoin de plus de calcul et plus de temps de décantation.

C'est ainsi qu'une identification imprécise ou une variation des paramètres de la machine influent considérablement sur les performances portées par les régulateurs classiques (PI), en plus ces derniers se comportent difficilement avec le régime dynamique dû à la variation de la charge (4; 5).

Autrement dit, ces méthodes avancées de la commandes sont étroitement liées à un modèle analytique du système dynamique, qui est, à la majorité des applications de commande, souvent imprécis ou pauvrement modélisé.

nous allons contribuer dans ce travail à l'étude et à la réalisation expérimentale de la commande PI numérique d'un servomoteur par ARDUINO.

Pour cela, on utilise un moteur a courant continue. Ainsi, pour le capteur de vitesse et position (angle) on utilise un codeur incrémental , et le microcontrôleur qui sera utilisé est l'Arduino. Dans ce contexte, on visera à implémenter un PI afin de commander notre système cohéremment et récupérer les Data de système par interface crée par MATLAB GUI.

En effet, la paramétrisation linéaire de la dynamique partiellement connue pose des problèmes sérieux pour l'introduction des algorithmes de commande dans des applications expérimentales, parce qu'il est pénible (voire impossible) de fixer la structure des non linéarités inconnues.

Ce fait a été le facteur de motivation derrière l'introduction des régulateurs PI avec des microcontrôleurs Arduino (en expérimental) dans le but d'améliorer les performances de notre système de commande.

Apport des microcontrôleurs Arduino

Un acquis fondamental de ces dernières années était l'immense utilisation des microcontrôleurs Arduino considérés comme des outils universels sophistiqués, et leurs capacités de faciliter la tâche de commande des systèmes complexes.

En outre, les codeurs incrémentaux (optique ou à effet hall) sont largement utilisés avec les moteurs électriques car ils permettent un asservissement ou une régulation de vitesse et position à la fois et une protection en vitesse contre le risque d'emballement.

Ainsi, les PID sont des outils puissants que ce soit pour améliorer la qualité des performances de commande quand le modèle analytique du système est partiellement connu, ou pour compenser pour un modèle du système lors de l'apparition des perturbations inconnues ou des incertitudes paramétriques.

A ce stade, et afin de pallier à ces problèmes décrits précédemment, nous suggérons de combiner le microcontrôleur ARDUINO MEGA qui montre un potentiel puissant, avec les stratégies de commande constructives existantes dans l'image des PID en vue d'éliminer l'effet des incertitudes existantes.

Objectifs et contributions

Le thème majeur des efforts de la recherche présentée dans cette thèse est d'établir de nouvelles structures de commande PI des servomoteur basée sur l'Arduino. Cet intérêt est justifié par les exigences des industrielles qui ne cessent de croître.

Les principales contributions de l'approche proposée sont brièvement énoncées comme suit, pour en nommer quelques-uns :

- Donner un aperçu sur les servomoteur à courant continu.
- Simulation et réalisation de la commande en boucle ouverte du servomoteur par la carte Arduino et un interface de commande réalisé par Matlab GUI.
- Simulation et réalisation de la commande en boucle fermée par un correcteur PI.

Organisation de le mémoire

Le reste de notre mémoire est organisé comme suit : Le premier chapitre consiste à faire une étude générale sur le servomoteur à courant continu. Ensuite, la commande de moteur à courant continu, son alimentation par convertisseur électronique et la commande par technique MLI sont détaillés dans le deuxième chapitre.

Ainsi, la réalisation de la commande en boucle ouverte par le microcontrôleur Arduino Mega et le module d'alimentation L298 sont explicitement donnés dans le troisième chapitre.

— Le quatrième chapitre est consacré de l'étude théorique et simulation de la commande par PI analogique et numérique.

— Le cinquième chapitre explique l'application pratique de la commande en boucle fermée avec correcteur PI.

— Enfin, nous tirons une conclusion générale qui résume l'ensemble de notre travail effectué ainsi que des perspectives.

Chapitre 1

Généralité sur le servomoteur à courant continu

1.1 Introduction

Un *servomoteur* provenant du latin *servus* qui signifie « esclave ». Un servomoteur est un système motorisé capable d'atteindre des positions et vitesses prédéterminées, puis de les maintenir. Selon l'utilisation, la position ou la vitesse sont les principales variables à contrôler. Il se compose de trois parties principales :

- a. **Un réducteur mécanique** : a pour but de modifier le rapport de vitesse et augmenter le couple entre l'axe d'entrée et l'axe de sortie du mécanisme.
- b. **Un actionneur** : en générale les actionneurs utilisés sont des moteurs électriques (continu, asynchrone, brushless) aussi bien que des moteurs hydrauliques ou thermiques.
- c. **Un capteur** : pour déterminer la vitesse et/ ou l'angle de rotation de moteur, les capteurs utilisés sont des codeurs incrémentales (optique, magnétique...).

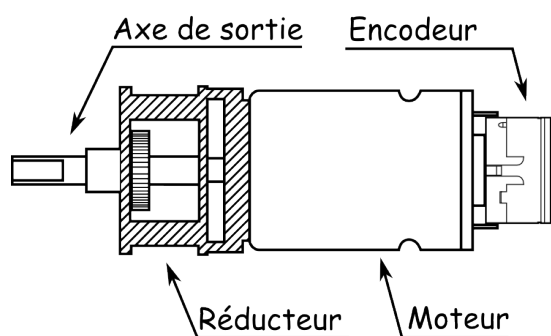


Fig. 1.1 – servomoteur

Dans ce présent projet, on s'intéresse à l'étude d'un servomoteur à courant continu vu qu'il est considéré comme le noyau de divers applications industrielles et systèmes automatiques, exemple ;vannes industrielles, portes automatiques, systèmes de contrôle de vitesse, les bras robotiques et de nombreuses autres applications.

1.2 Les capteurs associés à un moteur électrique

Dans le cas de mouvement, tous les moteurs électriques produisent des grandeurs physiques liées directement ou indirectement au fonctionnement du système. On distingue des grandeurs électriques, des grandeurs mécaniques, la température au niveau des bobinages ou du circuit magnétique du moteur, des grandeurs caractérisant une information transmise ou reçue (6).

1.2.1 Capteurs pour des grandeurs électriques

- Capteurs de courant ou de tension

On utilise l'effet magnétique agissant sur un composant à semi-conducteur, appelé effet Hall. Si un courant (i) traverse ce composant et si un champ magnétique d'induction (B) est appliqué perpendiculairement au courant, une tension électrique (V_H), proportionnelle a (B) et a (i), apparait perpendiculaire à la fois au champ et à la direction du courant :

$$V_H = K_H B i$$

La constante K_H ne dépend que du matériau utilisé (dopage et dimension).

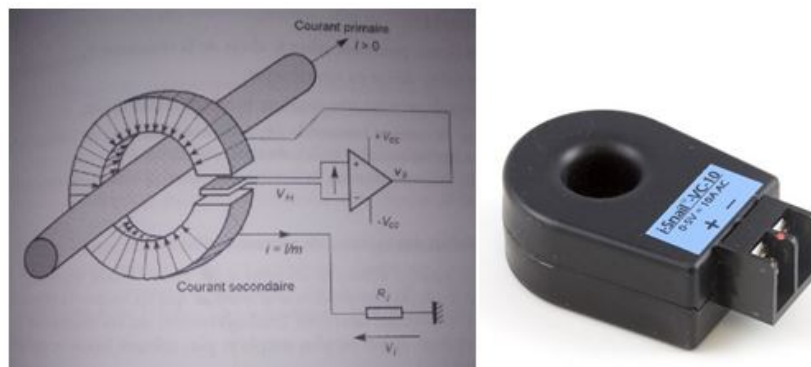


Fig. 1.2 – Capteur de courant à effet Hall (6)

- Capteurs de fréquence

On utilise certains capteurs incrémentaux qui fournissent des impulsions pour chaque variation d'angle ($\Delta\theta$). Le comptage périodique de ces impulsions donne une grandeur numérique propor-

tionnelle à la vitesse et le comptage absolu donne une information proportionnelle au déplacement angulaire.

- **Capteurs de phase**

Ce type de capteur est utilisé dans la commande autopilotée des machines synchrones qui possède un décalage en phase. La mesure du déphasage entre deux signaux périodiques de même fréquence consiste le plus souvent à utiliser la méthode de comparaison de phase incluse dans les boucles à verrouillage de phase : les signaux périodiques sont convertis en signaux logiques et envoyés sur une porte ou exclusif dont on mesure la valeur moyenne (V_{smoy}) de la tension de sortie (après filtrage passe-bas).

1.2.2 Capteurs pour des grandeurs mécaniques

- **Capteurs de vitesse**

Ces capteurs sont largement utilisés car ils permettent un asservissement ou une régulation de vitesse, ou bien une protection en vitesse contre le risque d’emballement ;

- **La génératrice tachymétrique** : est une dynamo à aimant permanent qui délivre une tension proportionnelle à la vitesse de rotation.
- **L’alternateur à aimant permanent** : La vitesse peut être mesurée de deux manières : soit en mesurant la valeur efficace vraie de la f.e.m, soit en mesurant la fréquence de tension alternative fournie par l’alternateur.

- **Capteurs de position**

- **Capteurs analogiques** : Le plus simple est le potentiomètre résistif qui fournit une tension continue proportionnelle à la position. Il existe ainsi des capteurs capacitifs et des capteurs inductifs qui sont les plus robustes et fiables.
- **Capteurs ou codeurs incrémentaux** : Ces dispositifs sont soit de nature optique, soit de nature magnétique. Deux types sont essentiellement employés : le codeur incrémental (optique) et le capteur à effet Hall. Ici, c’est le codeur incrémental qui intègre la vitesse par comptage.

1. **Codeur optique** : Un codeur optique utilise un disque solidaire du rotor et qui comporte deux pistes concentriques formées d’alternances de surfaces opaques et translucides. La deuxième piste est décalée par rapport à la première. Les pistes sont éclairées par une diode électroluminescente et un phototransistor est placé de l’autre côté du disque en face de chacune des deux pistes. Le comptage du nombre d’impulsions reçues par le phototransistor permet de connaître la position. La seconde piste distingue les deux sens de rotation.

2. **Capteur à effet Hall** : Un aimant est solidaire du rotor. Une sonde à effet Hall, fixe, détecte la présence du champ magnétique à chaque passage de l'aimant. La combinaison de plusieurs dispositifs de ce type permet de commander les commutations de courant à position voulue.

1.3 Généralités sur les machines à courant continu

1.3.1 Définition

La machine à courant continu est un convertisseur électromécanique réversible (bidirectionnelle). Elle fonctionne en MOTEUR ou GENERATEUR (1).

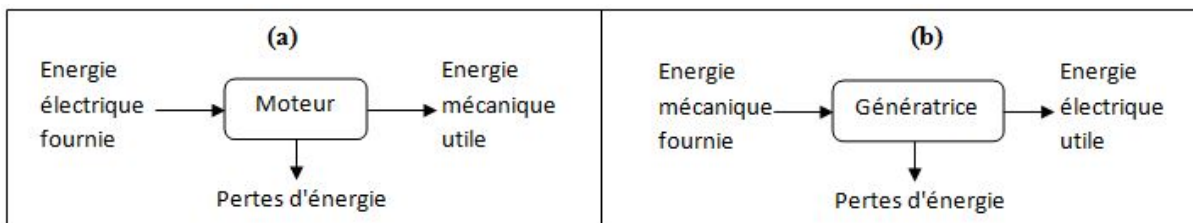


Fig. 1.3 – Transformation de l'énergie dans une machine MCC

Un moteur à courant continu (MCC) est une machine tournante et même convertisseur électromécanique qui réalise la conversion d'une énergie électrique fournie par le réseau en une énergie mécanique de rotation qui est l'énergie utile (Fig. 1.3.a).

Une génératrice à courant continu, est une machine tournante (convertisseur électromécanique) qui réalise la conversion d'une énergie mécanique fournie en une énergie électrique de rotation qui est l'énergie utile (Fig. 1.3.b).

1.3.2 Description de la machine à courant continu :

Les machines à courant continu sont constituées de 2 parties principales :

Le stator ou inducteur

c'est la partie fixe du moteur constitué d'une carcasse dans laquelle on fixe les pôles saillants. Cette carcasse, permet aussi la fixation du moteur à une fondation. Il est aussi constitué des pôles principaux, qui ont pour fonction de créer le champ magnétique, ils sont formés soit d'aimants permanents en ferrite soit des bobines placées au tour des noyaux polaires.

Le rotor ou induit

c'est la partie tournante du moteur. Noter bien que le noyau d'induit est en fer afin de canaliser les lignes de champ. Ainsi, les conducteurs sont logés dans des encoches sur le rotor dont deux conducteurs forment une spire. Il contient des éléments suivants :

1. **Un circuit magnétique** : constitué des tôles d'aciers de 0.5mm d'épaisseur isolées entre elles.
2. **Un collecteur** : Le moteur à courant continu, est une machine, dont l'enroulement de l'induit, est connecté à un réseau à courant continu, par l'intermédiaire, d'un convertisseur mécanique de fréquence. Pour simplifier la construction du convertisseur de fréquence, la machine doit être réalisée suivant la configuration inverse. L'enroulement d'excitation alimenté en courant continu, est porté par le stator et l'enroulement d'induit qui est lors de la rotation, le siège d'une force électromotrice induite alternative, est logé au rotor. Ceci permet de réaliser le convertisseur de fréquence, sous la forme d'un collecteur tournant aux lames duquel sont connectées les extrémités des sections de l'enroulement d'induit, et d'un système de balais fixes en contact avec les lames du collecteur. (7)
3. **Un enroulement d'induit** : le circuit magnétique du rotor, est aménagé par le dessus de lui, des rainures appelées encoches. C'est dans ces encoches que loges les conducteurs de l'induit. Ces enroulement sont placés en série, est forment un enroulement à deux encoches.
4. **Les balais** : pour faire une liaison entre l'enroulement de l'induit et l'alimentation du moteur, on se sert des balais. Ces derniers sont disposés de manière à frotter sur le collecteur en mouvement de rotation. Ils sont logés dans des portes balais.

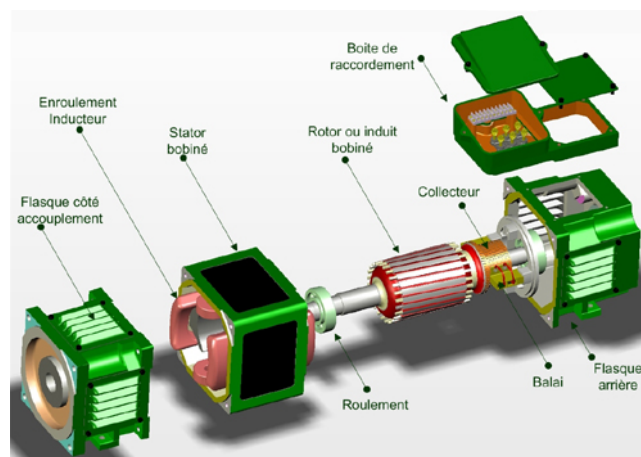


Fig. 1.4 – Vue éclatée d'une machine à courant continu

1.3.3 Divers types des machines a courant continu

Les machines à courant continu se diversifient par le moyen employé pour créer le champ inducteur.

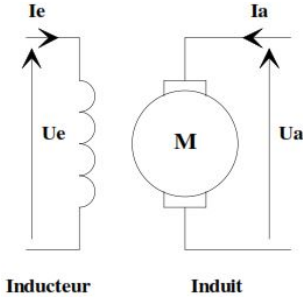
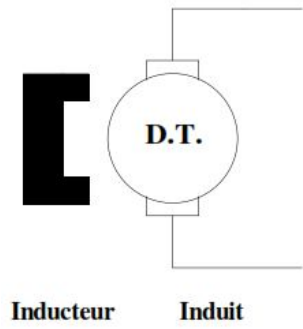
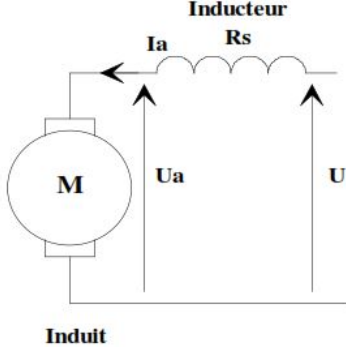
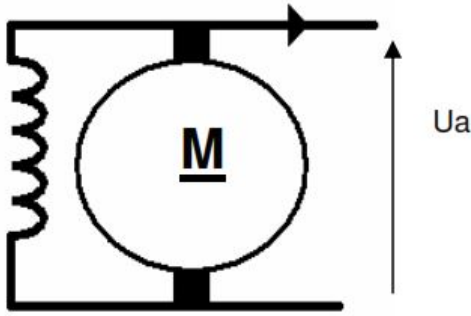
 <p style="text-align: center;">Inducteur Induit</p>	<p>MCC à Excitation indépendante : L'inducteur est alimenté par une source indépendante. Grande souplesse de commande. Utilisé en milieu industriel, associé avec un variateur électronique de vitesse et surtout sous la forme moteur d'asservissement. Large gamme de vitesse. Machines outils : Moteur de broche, d'axe.</p>
 <p style="text-align: center;">Inducteur Induit</p>	<p>MCC à Excitation par aimants permanents : On retrouve les caractéristiques de l'excitation indépendante sans action possible sur le flux. Les machines ne pourront pas dépasser la vitesse limite fixée par la tension d'alimentation maximale. Le développement de la technologie des aimants a permis la réalisation de machines de quelques mW à quelques kW.</p>
 <p style="text-align: center;">Inducteur Induit</p>	<p>MCC à Excitation série; moteur universel : Démarrage fréquent avec couple élevé; couple diminuant avec la vitesse. Traction ferroviaire, palans, ponts roulants, ventilateurs, pompes centrifuges. Pouvant être alimenté en courant alternatif, il sert à entraîner les appareils électroménagers pour lesquels une grande vitesse est requise (moulin à café, aspirateur, perceuse...).</p>
 <p style="text-align: center;">Ua</p>	<p>MCC à Excitation parallèle; moteur universel : La mise en parallèle des 2 enroulements permet d'alimenter une MCC sous tension alternative. Il s'agit alors d'un moteur universel. L'inversion simultanée du flux ϕ et de la tension d'induit U donne toujours le même signe pour le couple donc le sens de rotation. Il suffit de feuilleter le circuit magnétique pour réduire les pertes fer de cette machine. Électroménager, outillage portatif. . .</p>

TABLE 1.1 – les différents types des machines à courant continu

1.3.4 Principe de fonctionnement du moteur à courant continu

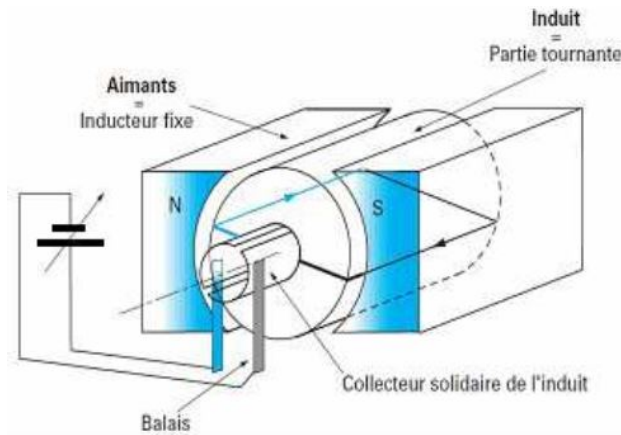


Fig. 1.5 – Schéma de principe du moteur MCC

Pour un moteur à aimant permanent, le champ créé dans l'inducteur est toujours fixe, pour un inducteur bobiné quand on applique une tension (tension d'excitation) à l'enroulement inducteur, il se crée un courant (courant d'excitation). Ce courant donne naissance à un champ fixe. Appliquons une tension (tension de l'induit) qui a son tour, fait circuler un courant (courant de l'induit) qui crée aussi un champ au rotor.

Les conducteurs de l'induit, sont alors parcourus par un courant, ces conducteurs étant situés dans le champ magnétique de l'inducteur, sont soumis à une force électromagnétique créée entre le champ magnétique de l'inducteur, et de l'induit.

Sous l'effet du couple électromagnétique dû à cette force d'interaction, le rotor se met à tourner. Il est à noter que le couple électromagnétique, se crée, grâce au déphasage des conducteurs.

1.4 Mise en équation du moteur à courant continu

1.4.1 Circuit équivalent

Le moteur est constitué d'une résistance (R) créée par les spires bobinées du rotor. Il peut être écrit avec la relation : $R = \frac{\rho L}{S}$ qui est en série avec une force électromotrice (E) provoquée par une variation de flux sur le bobinage induit, d'après la loi de Lenz : $E = -\frac{d\phi(t)}{dt}$ en série avec une

inductance (L) issue du bobinage induit.

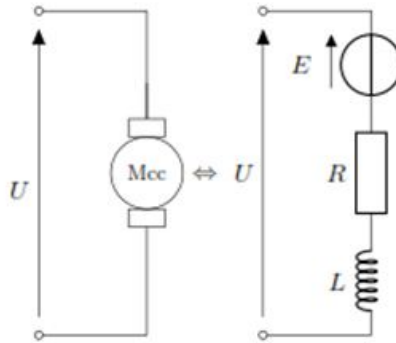


Fig. 1.6 – Circuit équivalent du moteur MCC

1.4.2 Équations électriques et mécaniques

— **Loi des mailles** : Par loi des mailles sur le modèle précédent, il vien

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

En régime permanent, le courant est considéré constant et la forme se simplifie. On

$$U(t) = E(t) + RI(t) \quad (1.2)$$

— **Force électromotrice** : La force électromotrice $E(t)$ est une tension induite par la variation de champ magnétique reçu par les bobinages. Cette variation est proportionnelle à la vitesse de rotation $\Omega(t)$

$$E(t) = K_e \Omega(t) \quad (1.3)$$

où K_e est la constante électromagnétique (en Vs/rad) caractéristique du moteur, donnée par le constructeur.

— **Couple** : Le couple $C(t)$ exercé par le stator sur le rotor est proportionnel au courant $I(t)$ qui alimente le moteur :

$$C(t) = K_c I(t) \quad (1.4)$$

en l'absence de perte, $K_e = K_c$

— **Puissance mécanique et électrique** : En l'absence de perte, il vient :

Paissance mécanique

$$P_{em}(t) = C(t)\Omega(t) \quad (1.5)$$

Paissance électrique

$$P_{em}(t) = E(t)I(t) = U(t)I(t) - RI(t)^2 \quad (1.6)$$

- **Principe fondamental de la dynamique :** Si on isole le rotor, le principe fondamental de la dynamique en rotation autour de l'arbre du moteur est donné par

$$C(t) - C_r(t) - f\Omega(t) = J \frac{d\Omega(t)}{dt} \quad (1.7)$$

avec : f représente les frottements fluides et J est le moment d'inertie du rotor.

1.4.3 Comportement global

Le comportement global d'un moteur à courant continu peut s'exprimer sous la forme suivante via les transformées de Laplace

$$\begin{aligned} U(t) &= E(t) + RI(t) + L \frac{dI(t)}{dt} & U(p) &= E(p) + (R + pL)I(p) \\ E(t) &= K_e \Omega(t) \Leftrightarrow & E(p) &= K_e \Omega(p) \\ C(t) &= K_c I(t) & C(p) &= K_c I(p) \\ C(t) - C_r(t) - f\Omega(t) &= J \frac{d\Omega(t)}{dt} & C(p) - C_r(p) - f\Omega(p) &= Jp\Omega(p) \end{aligned} \quad (1.8)$$

1.4.4 Fonction de transfert de système

La fonction de transfert d'un moteur à courant continu (sans couple résistant) est :

$$H_M(p) = \frac{K}{(Jp + f)(R + Lp) + K^2} \quad (1.9)$$

La forme canonique peut être exprimée comme produit de 2 premier ordre :

$$H_M(p) = \frac{K_0}{\tau\tau_e p^2 + (\tau + \alpha\tau_e)p + 1} \quad (1.10)$$

avec : $\tau = \frac{RJ}{(K^2 + Rf)}$, $\tau_e = \frac{L}{R}$, $K_0 = \frac{K}{(K^2 + Rf)}$ et $\alpha = \frac{Rf}{(K^2 + Rf)}$.

sachant que :

- τ : est le constante de temps électromécanique (d'autant plus grande que l'inertie J est grande).
- τ_e : est le constante de temps électrique (issue des composants électroniques, notamment l'inductance).

Après quelques simplification sur les ordres de grandeurs (non présentées), le moteur peut être considéré comme produit de deux fonctions du premier ordre :

- une fonction liée à la mécanique (de constante de temps τ).
- une fonction liée à l'électronique (de constante de temps τ_e).

$$H_m \approx \frac{K_0}{(1 + \tau p)(1 + \tau_e p)} \quad (1.11)$$

1.5 Schémas blocs

Grâce aux transformés de Laplace, on peut établir le modèle mathématique de la réponse en vitesse du moteur électrique pour différentes entrées (échelons de tensions) qui est donné par la figure suivante :

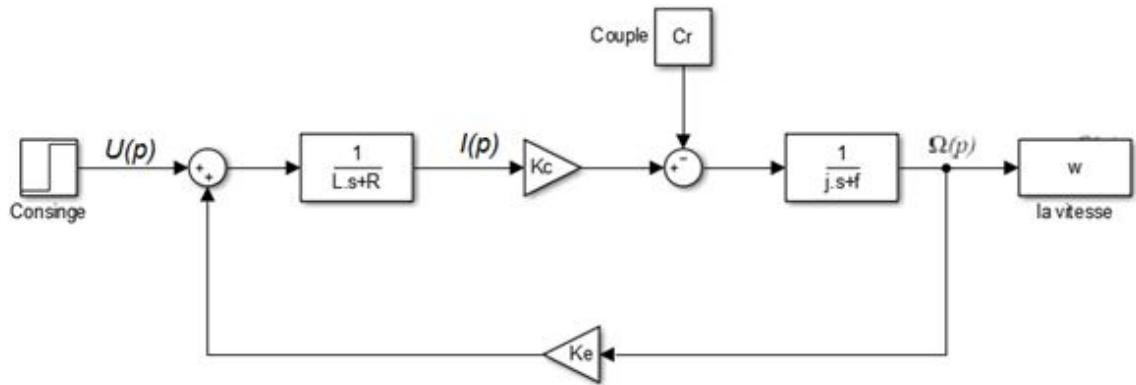


Fig. 1.7 – Schéma bloc tension-vitesse du moteur MCC

D’après l’équation (1.9), le système modélisé soit du second ordre, lorsque l’inductance interne est négligeable devant la résistance interne (ce qui est généralement le cas) il s’apparente à un système du premier ordre. On observe bien sur la Figure 1.7 que le moteur change de vitesse de rotation pour chaque valeur de la tension d’entrée, d’où la vitesse de rotation est proportionnelle à la tension d’entrée.

On peut établir le modèle mathématique de la réponse en position du moteur électrique qui est donné par la figure suivante Figure 1.8 :

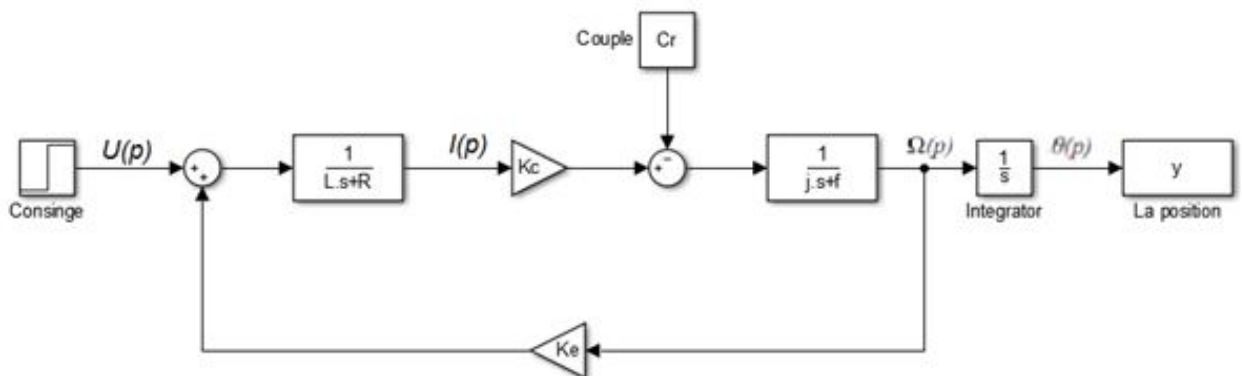


Fig. 1.8 – Schéma bloc tension-position du moteur MCC

1.6 Point de fonctionnement

Le point de fonctionnement P est l'intersection entre la courbe de couple utile délivré par le moteur et le couple résistant demandé par la charge, donc à l'équilibre $T_u = T_r$ comme illustré dans la Figure 1.9 :

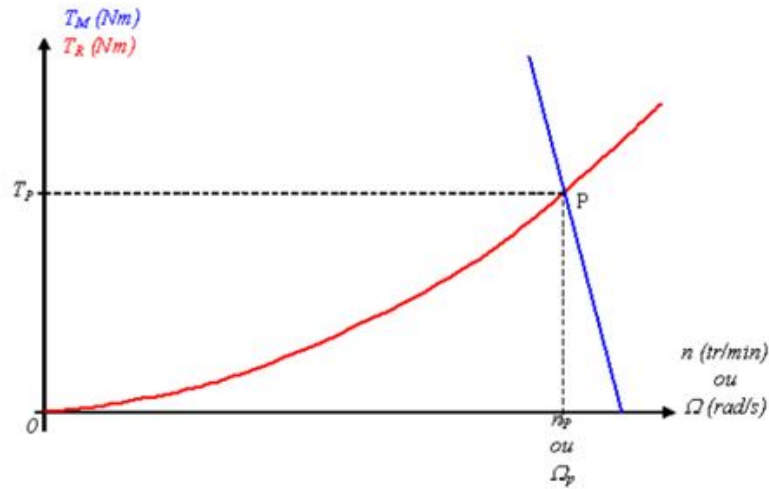


Fig. 1.9 – Le point de fonctionnement d'un moteur à courant continu

1.7 Procédé de freinage

Pour obtenir un freinage efficace, on doit être capable d'éliminer le plus rapidement possible l'énergie mécanique emmagasiné sur l'arbre du moteur. Deux procédés de freinage sont utilisés :

- Freinage avec résistance de dissipation
- Freinage avec récupération d'énergie

1.7.1 Freinage avec résistance de dissipation

Cette technique est utilisée pour les moteurs de faibles puissances dont les énergies mises en jeu ne sont pas importantes. Lors du freinage, le moteur fonctionne en génératrice et $W_{méca}$ est transformée tout d'abord en $W_{élec}$ puis cette $W_{élec}$ est dissipée dans une résistance en $W_{calorifique}$ (effet joule). Donc cette transformation de $W_{méca}$ en W_{calo} permet de contrôler le freinage du moteur. Plus la résistance de freinage sera faible plus le freinage sera rapide car $W_{calo} = RI^2t$. Si R diminue, I augmente donc W_{calo} augmente et le freinage sera plus rapide.

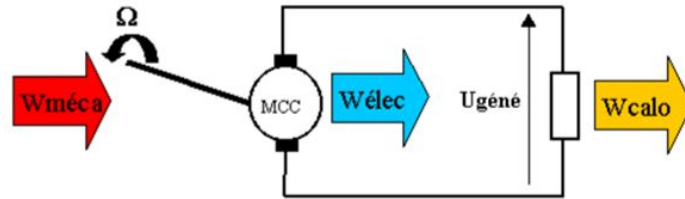


Fig. 1.10 – Freinage avec résistance de dissipation

1.7.2 Freinage avec récupération d'énergie

Cette technique est utilisée pour les moteurs de fortes puissances ou les énergies mises en jeu lors des phases de freinage ne sont pas négligeables. Exemple : TGV, ascenseur tramway... Lors du freinage, $W_{méca}$ est transformée en $W_{élec}$ pouvant servir à recharger des batteries, ou être renvoyée sur le réseau. Dans le cas du TGV, l'énergie est récupérée dans des batteries assurant le fonctionnement de systèmes auxiliaires tels que l'éclairage, la ventilation...

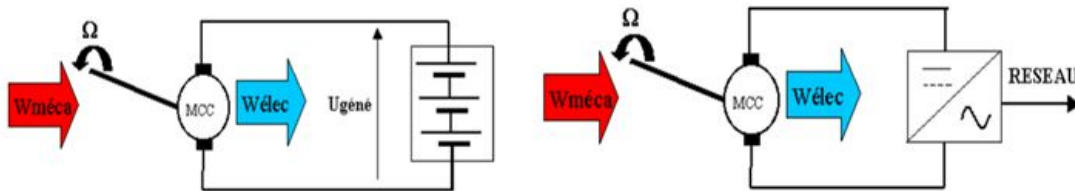


Fig. 1.11 – Freinage avec récupération d'énergie

1.8 Avantages et Inconvénients

L'avantage principal, qui a fait le succès du moteur à courant continu, est la facilité de la commande de sa vitesse. L'inconvénient majeur est lié à la nécessité du système collecteur-balais. Sa présence est source de problèmes de commutation, d'étincelles, elle limite la vitesse de rotation et elle entraîne la nécessité d'une maintenance contraignante.(2)

1.9 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté les différents capteurs associés à un moteur électrique. Ainsi, les divers types de moteurs à courant continu, et leur mise en équation, et cela dans le but de détailler sa commande (en boucle ouverte puis fermée) dans la partie qui suit.

Chapitre 2

Commande du moteur à courant continu en boucle ouverte

2.1 Introduction

Commander un système en boucle ouverte revient à agir à partir de ses caractéristiques établies et mesurées en laissant aux capteurs uniquement leur rôle d'observation et protection.

La commande d'un MCC n'est pas triviale car celui-ci peut adopter plusieurs comportements : parfois moteur, parfois générateur, dans un sens, dans l'autre, . . . Selon les cas, le circuit de commande doit être capable de gérer chacun de ces modes de fonctionnement. Ainsi, les moteurs à courant continu sont très utilisés dans les systèmes automatiques et robotique qui nécessitent une régulation précise de la vitesse et l'angle de rotation. Le principe de la régulation de vitesse consiste à choisir le bon convertisseur.

Nous allons présenter dans ce chapitre les différents dispositifs qui sont utilisés dans les processus de variation de vitesse du moteur à CC. Ensuite, nous donnerons une description de la technique MLI (modulation en largeur d'impulsion) utilisée pour la commande d'ouverture et de fermeture des interrupteurs électroniques installés au niveau du hacheur.

2.2 Quadrants de fonctionnement d'un MCC

Conventionnellement lorsque La f.e.m (E) et le courant d'induit I_a moyen sont positifs, la machine fonctionne dans le premier quadrant en mode moteur. L'inversion d'un de ces deux termes permet d'obtenir un mode générateur (Quadrants 2 ou 4). L'inversion simultanée des 2 termes permet d'obtenir un fonctionnement moteur avec un sens de rotation inversé (Quadrant 3).(1)

Le fonctionnement en mode générateur nécessite une charge mécanique entraînée soit :

- momentanément par restitution d'énergie cinétique ou potentielle lors respectivement d'un freinage ou de la descente d'une charge mécanique (levage).
- En permanence lors d'un entraînement par un couple moteur extérieur (éolienne, turbine...).

Les modes de fonctionnement du moteur dépendent :

- du sens de rotation $\Omega(t)$. En effet, le moteur peut tourner dans le sens positif ou négatif (selon la convention choisie).
- du sens du couple $C(t)$. En effet, indépendamment du sens, le moteur peut aider ou gêner le rotor dans sa rotation. On rappelle, d'après l'équation (1.4) que le couple est intimement lié au courant.

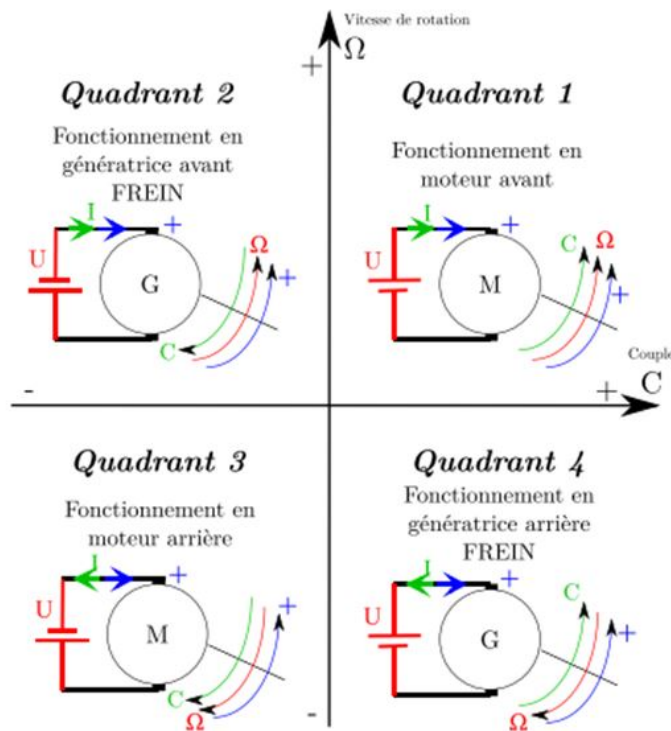


Fig. 2.1 – Quadrants de fonctionnement MCC

2.3 Alimentation par convertisseur électronique

Tous les moteurs à courant continu sont alimentés par des convertisseurs électroniques. Deux catégories de montages sont rencontrées : le hacheur et le redresseur commandé.(2)

2.3.1 Hacheur

Le hacheur est rencontré dans tous les domaines de puissance, des petits actionneurs de la robotique jusqu'aux moteurs de traction ferroviaire. La technologie change suivant la puissance à commander : montages à transistors MOS ou à IGBT pour les puissances faibles ou moyennes, montages à thyristors ou à GTO pour les puissances élevées. La présence ou non d'une bobine de lissage en série avec le moteur dépend de l'ordre de grandeur de la puissance du moteur : les interrupteurs utilisés pour les moteurs de puissance modeste sont assez rapides pour que la fréquence des commutations soit suffisante pour se passer de cet élément encombrant, alors que ce n'est pas le cas pour des puissances plus importantes. La tension présentée à l'entrée du hacheur peut être obtenue à partir d'une source de tension continue (batteries, caténaire alimentée en continu) ou par redressement et filtrage d'une source de tension alternative (secteur monophasé ou triphasé, caténaire alimentée en alternatif).

Hacheur série

Quand le moteur tourne toujours dans le même sens et que la puissance est toujours transmise de source au moteur (fonctionnement dans un quadrant), il suffit d'un simple hacheur série comme montre la Figure 2.2.

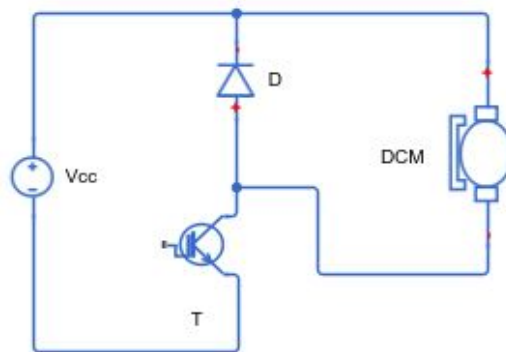


Fig. 2.2 – Hacheur série

Hacheur réversible en courant

Quand la machine fonctionne à certains moments comme génératrice (fonctionnement dans deux quadrants), il faut utiliser un hacheur réversible en courant ou hacheur série-parallèle comme montre dans la Figure 2.3.

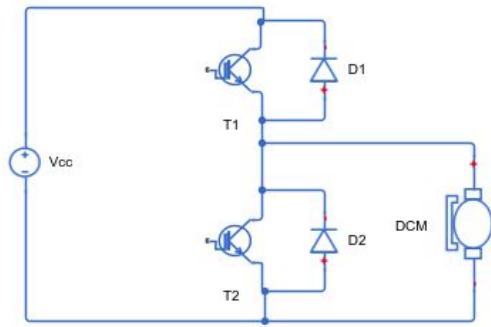


Fig. 2.3 – Hacheur réversible en courant

Alimentation avec résistance de dissipation

Si la source de tension continue placée à l'entrée n'est pas réversible, il faut prévoir un dispositif supplémentaire pour recevoir l'énergie fournie par la machine (Figure 2.4).

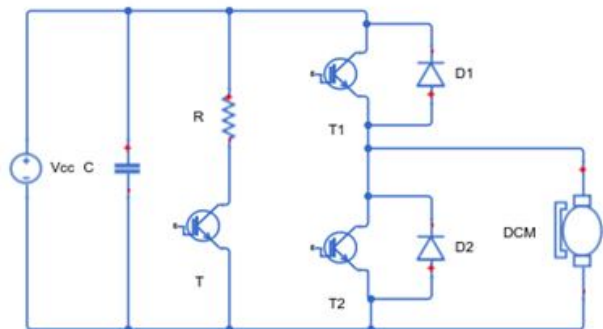


Fig. 2.4 – Alimentation avec résistance de dissipation

Hacheur en pont

Certains véhicules électriques utilisent une motorisation à courant continu. Le moteur est alimenté par un hacheur réversible en courant, ce qui permet un freinage par récupération de l'énergie.

Quand il est nécessaire d'inverser le sens de rotation et de prévoir la récupération de l'énergie (fonctionnement dans quatre quadrants), on utilise le hacheur en pont. Cette solution n'est rencontrée que pour des moteurs de faibles puissances.

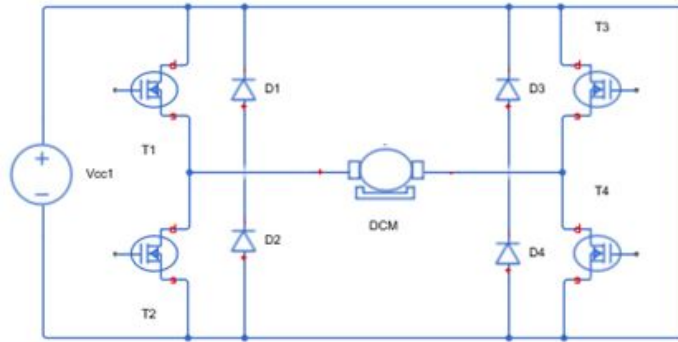


Fig. 2.5 – Hacheur en pont

2.3.2 Redresseur commandé

Les moteurs à excitation indépendante de puissance importante utilisés dans les processus industriels sont en général alimentés par un redresseur à thyristors. Le montage est toujours en pont et le plus souvent triphasé (redresseur parallèle double, PD3). Le redresseur parallèle simple (P3) n'est pas utilisé car il exige un transformateur et que ce dernier a faible facteur d'utilisation.

Redresseur triphasé en pont mixte

Quant le moteur tourne toujours dans le même sens et que la puissance est toujours transmise de source au moteur (fonctionnement dans un quadrant), on choisit un redresseur en pont mixte.

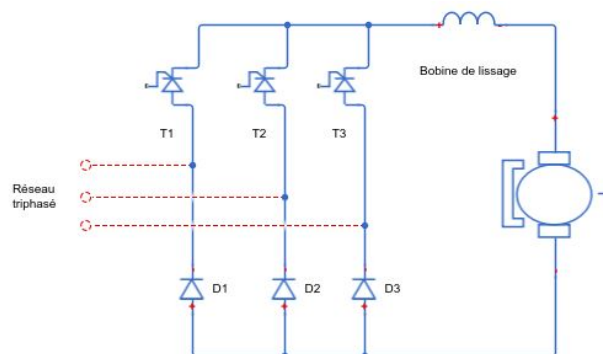


Fig. 2.6 – Moteur à courant continu alimenté par un redresseur triphasé en pont mixte

Redresseur triphasé en pont à thyristors

Avec un redresseur en pont n'utilisant que des thyristors, la valeur moyenne de la tension peut être positive ou négative, mais le courant est toujours du même sens (fonctionnement dans deux

quadrants). La puissance va dans un cas de source au moteur et dans l'autre cas du moteur à la source.

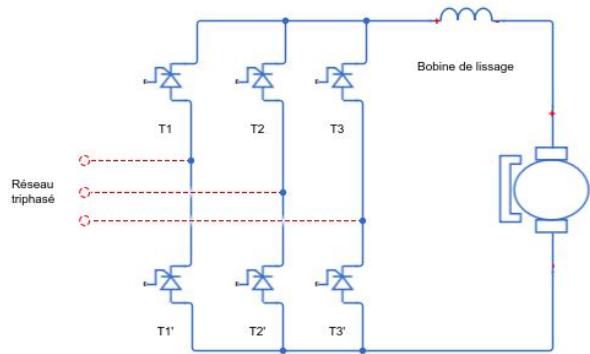


Fig. 2.7 – Moteur à courant continu alimenté par un redresseur triphasé en pont à thyristors

Redresseur triphasé en montage tête-bêche

Quand il est nécessaire d'inverser le sens de rotation et de prévoir la récupération de l'énergie (fonctionnement dans quatre quadrants), on utilise deux redresseurs à thyristors dans le montage tête-bêche.

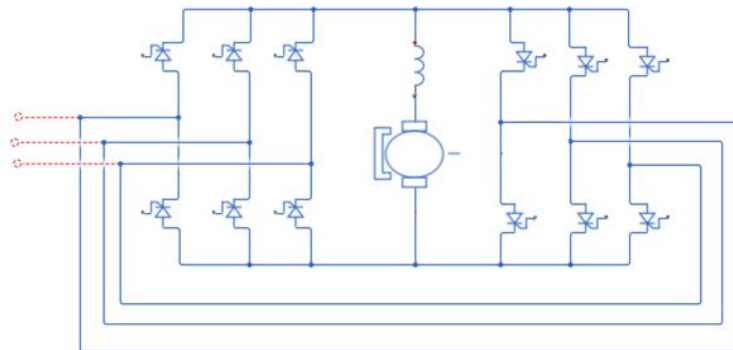


Fig. 2.8 – Moteur à courant continu alimenté par un redresseur triphasé en montage tête-bêche.

2.4 Le contrôle par MLI

La technique MLI (Modulation en Largeur d'Impulsion) ou PWM (Pulse Width Modulation) est une technique de pilotage pour les convertisseurs statiques servant d'interface entre une charge (machine électrique, ...) et son dispositif d'alimentation (hacheur, onduleur...). Elle est donc une technique utilisée pour la conversion de l'énergie et consiste à générer un signal carré avec

un rapport cyclique modulé en fonction d'un signal de commande. Le signal généré peut servir à commander un circuit de puissance à découpage (pont en H), associé à un filtrage passe-bas inductif, pour générer une onde sinusoïdale ou d'une autre forme. La technique est utilisée dans les onduleurs monophasés, diphasés ou triphasés (8).

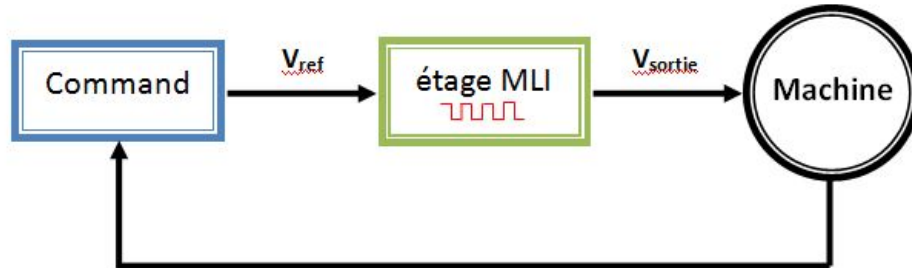


Fig. 2.9 – Schéma de positionnement de l'étage MLI

2.4.1 Principe de la commande MLI

La méthode de contrôle la plus courante de la vitesse de moteur à courant continu consiste à la commande MLI (9). La variation de vitesse du moteur est effectuée en augmentant ou en diminuant l'intervalle de temps lorsque le signal de commande a la valeur logique 1 (t_{ON}). Ainsi, à un rapport cyclique de 100%, le moteur aura le régime maximum, le (t_{ON}) sera maximal et le (t_{OFF}) sera nul. À un rapport cyclique de 50%, le moteur aura la moitié de la vitesse nominale, donc (t_{ON}) = (t_{OFF}). Dans le cas d'un rapport cyclique de 0%. Le moteur sera arrêté, donc (t_{ON}) sera nul. Le rapport cyclique est noté par α et peut être calculé à travers la relation :

$$\alpha = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} 100\% \quad (2.1)$$

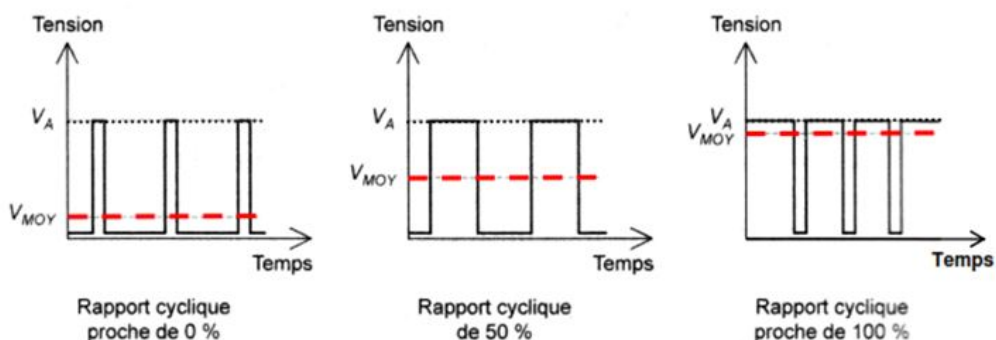


Fig. 2.10 – Forme de signal MLI avec différent rapport cyclique

En général, les signaux PWM sont générés par des microcontrôleurs. Dans un système de commande électrique, les microcontrôleurs forment la partie de commande logique ou de décision et les moteurs à courant continu forment la partie actionneurs. La partie de commande fonctionne avec des niveaux de tension de 5V et une faible puissance et la partie actionneur fonctionne avec des tensions et puissance plus élevés. Pour cette raison, une interface est nécessaire entre les deux parties du système. Une telle interface est composée d'un amplificateur qui a fréquemment le rôle de séparation galvanique entre les deux parties du système d'entraînement électrique.

2.5 Simulation sous l'environnement MATLAB Simulink

2.5.1 Introduction sur MATLAB

Matlab est un logiciel de calcul matriciel à syntaxe simple. Avec ses fonctions spécialisée Matlab peut être aussi considéré comme un langage de programmation adapté pour les problèmes scientifiques. Ainsi que Matlab intègre des diverses plateformes comme l'interface graphique GUI (Grafical User Interface) pour Construire des applications basées sur des figures avec support graphique 2 dimensions(2D) et 3 dimensions (3D), et Simulink pour créer des simulations multi-domaine et de modélisation de systèmes dynamiques. Simulink fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal.

2.5.2 Choix technologiques

le choix s'oriente vers la société "PARVEX" qui fournit les servomoteurs à courant continu, Dans ce travail de mémoire, on a décidé d'utiliser le servomoteur RS 110M fonctionnant sous 20 V. C'est un moteur à courant continu à aimant permanent céramique baryum-ferrite.(10)

La constante de (f.e.m). ou de couple est $K = 0.037Nm/A$.

La vitesse nominale est $3000tr/min$.

Le moment d'inertie du rotor est $J = 0.24 \times 10^{-5}kg.m^2$.

L'inductance du bobinage vaut $L = 1.6 mH$, et la résistance $R = 4.5\Omega$.

pour le pont H, on décide d'utiliser L298 RTR 60-8/16. La tension continue maximale d'alimentation est de 50 V.(11)

Tension d'alimentation logique 7 V.

Le courant de sortie nominal est de 2 A.

Puissance de dissipation totale 25 w.

2.5.3 Élaboration des schémas et résultats de simulation

Dans le chapitre précédent, nous avons donné un aperçu sur les capteurs associés à un moteur électrique, le moteur à courant continu et son alimentation, ainsi que sa commande en boucle ouverte avec la technique MLI.

Pour compléter notre étude, et faciliter la compréhension de ce qui à été fait précédemment, nous avons choisi, d'effectuer une simulation de chaque partie indépendamment, ensuite, une système globale de la commande en boucle ouverte.

Simulation du capteur de vitesse

Dans notre expérience, nous avons utilisé des codeurs incrémentaux pour calculer et visualiser la vitesse du moteur à CC.

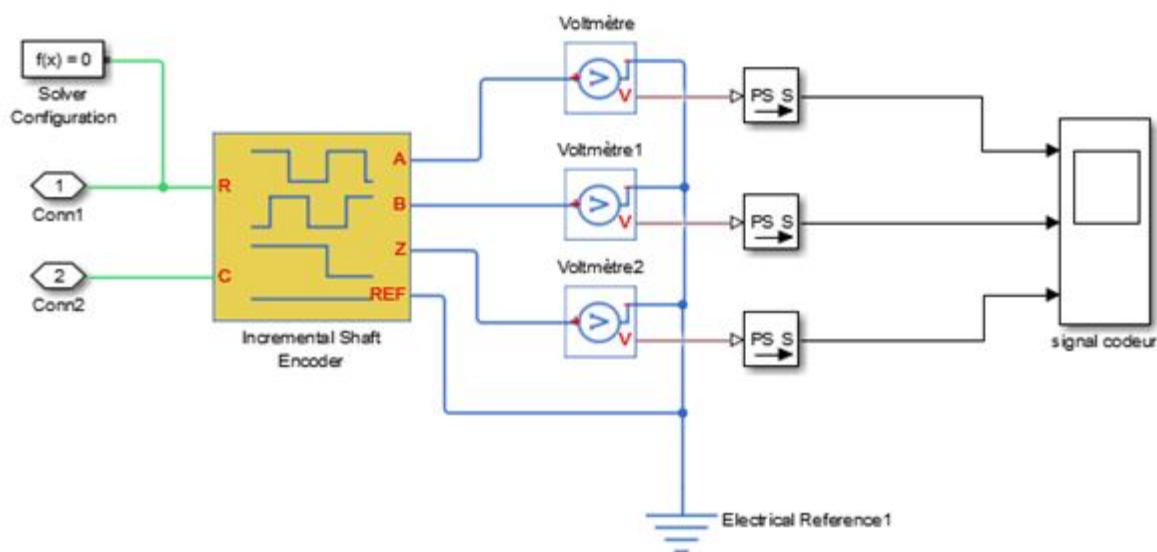


Fig. 2.11 – Circuit de simulation d'un codeur incrémental

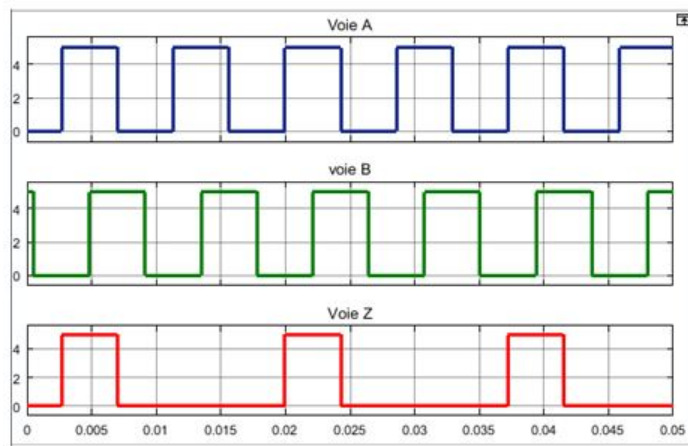


Fig. 2.12 – Les Signaux des 3 voies de codeur

Simulation de pont H et PWM

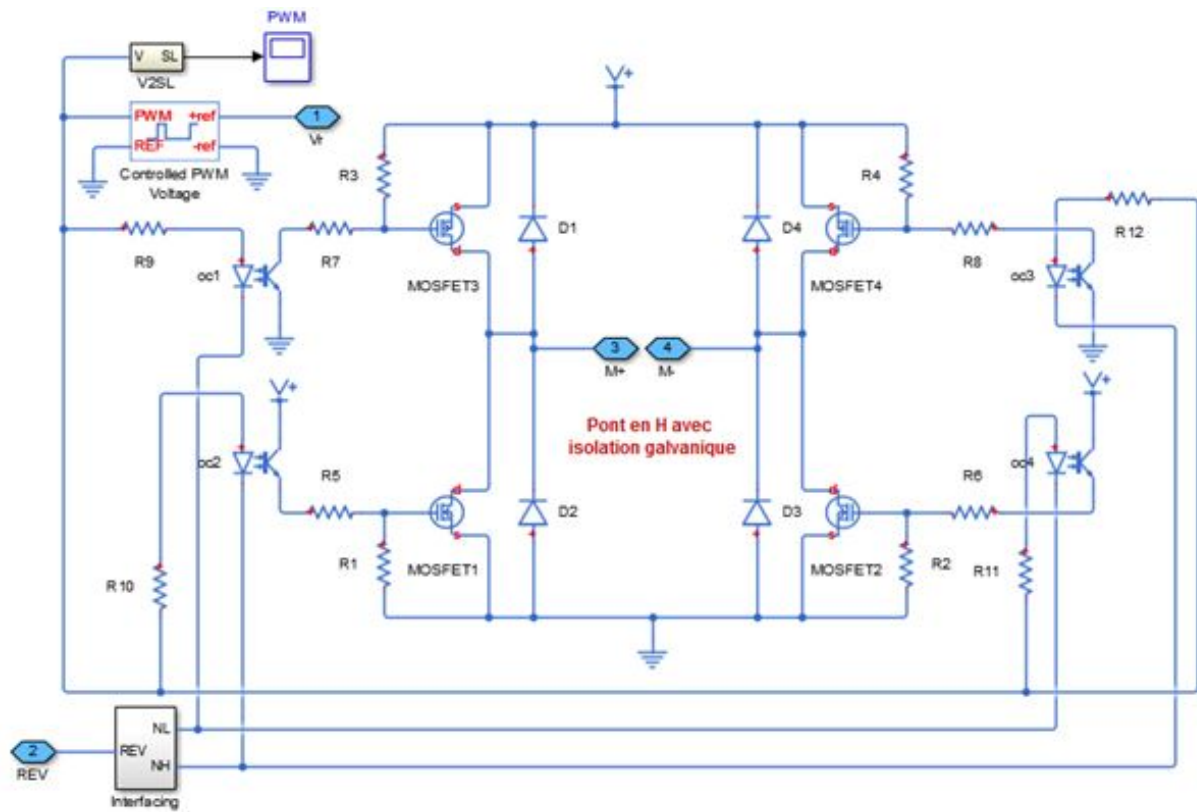


Fig. 2.13 – La mise en œuvre d’un circuit d’alimentation et commande de moteur à courant continu en pont H

pour une source d'alimentation est de valeur $V_{Max} = 24v$ on obtiens les résultats suivants.

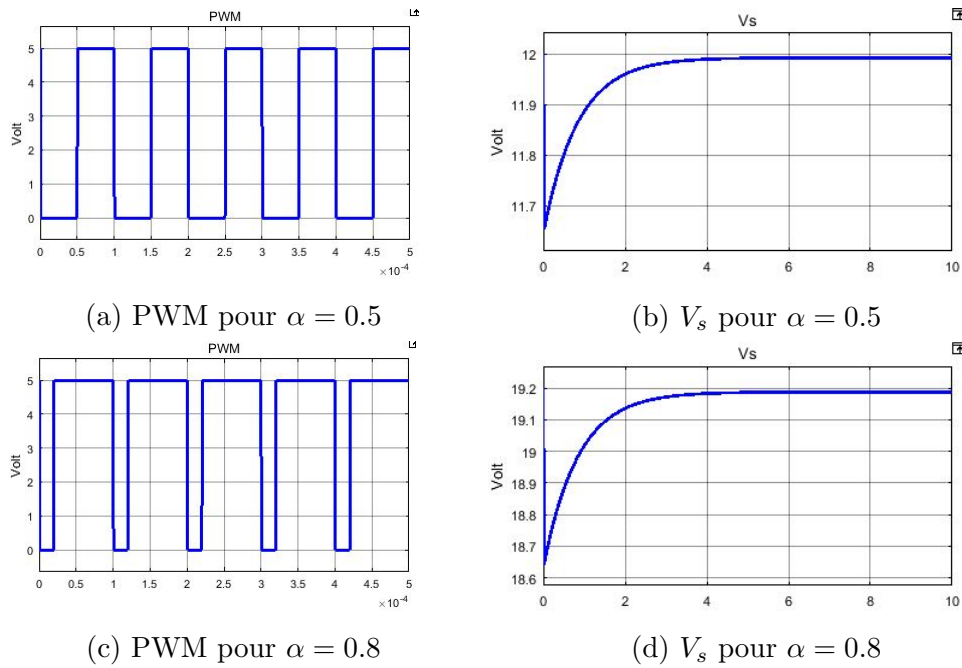


Fig. 2.14 – Le signal PWM et la tension de sortie de pont H pour différent rapport cyclique

Simulation de la commande en boucle ouverte

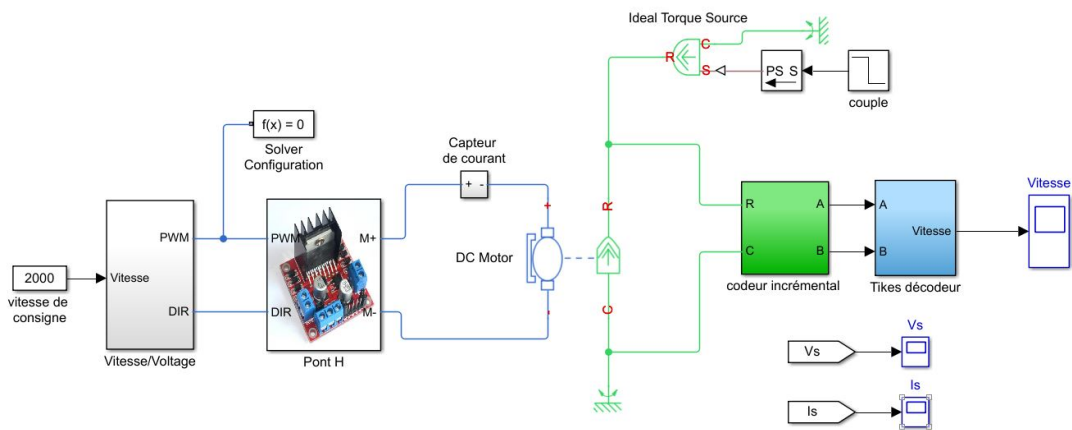


Fig. 2.15 – Simulation de la commande en boucle ouverte

1. **À vide** : On impose une consigne de vitesse avec un couple résistant nul $C_r = 0N.m$.

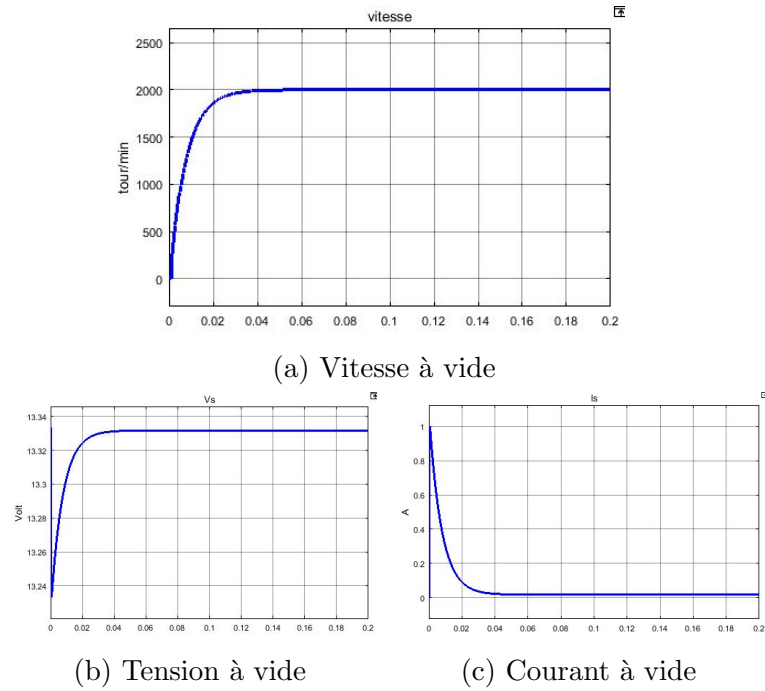


Fig. 2.16 – Résultats de la simulation boucle ouverte à vide

2. **En charge** : On impose la même consigne de vitesse, mais cette fois on applique un couple résistant $C_r = -0.04N.m$.

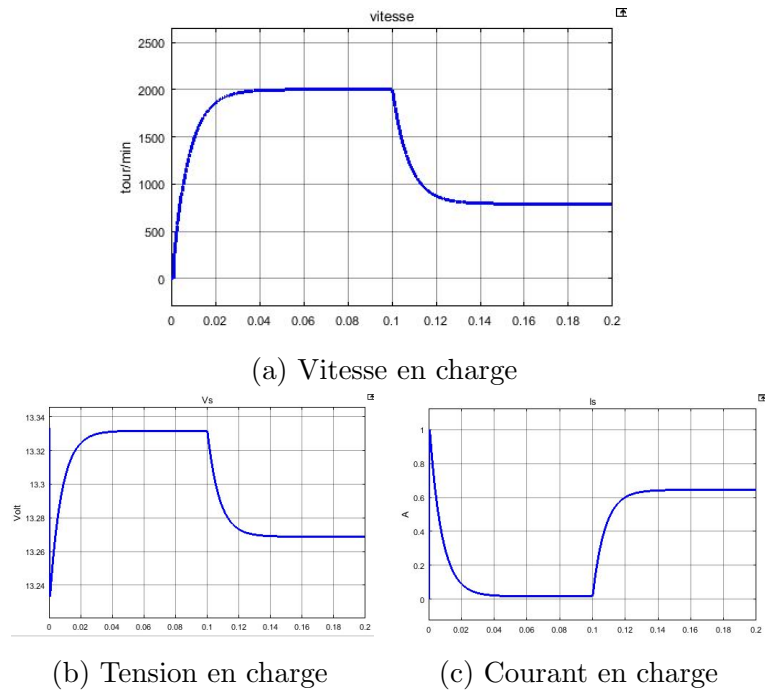


Fig. 2.17 – Résultats de la simulation boucle ouverte en charge

2.6 Interprétations des résultats de simulation en boucle ouverte

1. À vide :

La vitesse de rotation atteint, la vitesse nominale (2000 tour/min) après une période transitoire qui dure environs 0.04 sec (**Fig 2.16.a**). Ainsi, la partie transitoire du courant est équivalente à celle de la vitesse (0.04 sec) avec une valeur crête d'environ 1 A, ensuite, le courant reprend le régime nominal avec une valeur de 0.02 A (**Fig 2.16.c**).

2. En charge

On démarre le moteur à vide, puis on applique une charge $C_r = 0.04 N.m$ à $t = 0.1 \text{sec}$, par conséquent, la vitesse chute d'une valeur de 1300 tour/s puis se stabilise aux alentours de 700 tr/min (**Fig 2.17.a**). Pour le courant en charge, on constate la présence d'un pic qui atteint 1A, puis reprend son régime permanent après 0.04 s. Lors de l'introduction de la charge à $t=0.1 \text{sec}$, on remarque une augmentation considérable qui arrive jusqu'à 0,82 A (**Fig 2.17.c**). Cela est dû essentiellement à l'absence du feedback vu qu'on travaille en boucle ouverte. Pour rappel, les essais en boucle ouverte sont faits pour déterminer les caractéristiques de notre moteur.

2.7 Conclusion

Dans cette partie, nous avons présenté la simulation de notre servomoteur en boucle ouverte avec la technique MLI afin de distinguer le comportement de notre système. D'après les résultats obtenus par le logiciel MATLAB, on remarque que la vitesse du moteur à courant continu diminue quand la charge est appliquée, elle ne retourne jamais à sa valeur initiale. Par Ce qui suit, nous contribuons à la réalisation expérimentale de la commande du servomoteur avec MLI.

Chapitre 3

Réalisation de la commande en boucle ouverte

3.1 Introduction

Avant la montée des plates-formes matérielles ouvertes telles que Arduino, le prototypage matériel et logiciel était complexe et coûteux. Par conséquent, de nombreuses universités et centres de recherche ont commencé à développer des alternatives moins chères et plus faciles à la fin du *XX^e* siècle. Mais ces solutions n'étaient pas générales et elles n'étaient pas populaires à l'extérieur de l'établissement où elles étaient utilisées. Cela a été vrai jusqu'à ce que Arduino soit né en 2005 dans l'institut IVREA (Italie) en tant que projet étudiant dirigé par Massimo Banzi, qui a appliqué les concepts de matériel et de logiciels gratuits, ce qui représente un changement majeur (12). Le concept de matériel gratuit se rapporte à la conception d'un système électronique à base de microprocesseur disponible gratuitement.

De nos jours, il existe une grande variété de carte Arduino avec différents processeurs, tailles et fonctionnalités de connectivité. Le matériel Arduino est devenu peu coûteux et facile à acquérir. En ce qui concerne le logiciel pour programmer Arduino, le même IDE (Integrated Development Environment) est utilisé pour toutes les cartes, et il est disponible pour différents systèmes d'exploitation (13).

Cet IDE est ouvert et gratuit, ainsi que facile à obtenir, à démarrer et à utiliser. C / C ++ est utilisé comme langage de programmation, ce qui permet à l'utilisateur de créer à partir d'un programme simple basé sur des procédures dans un seul fichier, vers un programme complexe orienté objet dans plusieurs fichiers. D'autres aspects pertinents de la plate-forme Arduino sont la grande quantité d'informations disponibles à ce sujet, allant de la documentation de base sur le site Web officiel, à des livres complets pour différents champs d'application (15). Un autre fait qui montre le succès de la plate-forme Arduino est la quantité de cours spécifiques à ce sujet offerts aujourd'hui,

dont certains sont soutenus par des institutions exceptionnelles, comme le cours organisé par le comité espagnol de contrôle automatique. Des cours comme celui-ci, non seulement s'adressent aux personnes qui s'intéressent particulièrement à l'électronique et à la robotique, mais aussi aux enseignants qui veulent utiliser la plate-forme dans l'éducation.

3.2 La partie Hard

3.2.1 La carte Arduino Mega 2560

L'Arduino Mega 2560 est une carte de microcontrôleur basé sur l'ATmega2560. Il comporte 54 broches d'entrée / sortie numériques (dont 14 peuvent être utilisées comme sorties PWM), 16 entrées analogiques, 4 UART (ports série matériels), un oscillateur à cristaux liquides de 16 MHz, une connexion USB, une prise de tension, un en-tête ICSP, et un bouton de réinitialisation. Il contient tout le nécessaire pour supporter le microcontrôleur ; Il suffit de le connecter à un ordinateur avec un câble USB ou de l'alimenter avec un adaptateur AC-DC ou une batterie pour démarrer (13).



Fig. 3.1 – Arduino Mega 2560

Les caractéristiques d'Arduino Mega 2560

Microcontrôleur	ATmega2560
Tension de fonctionnement	5 V
Tension d'entrée (recommandée)	7 à 12 V
Tension d'entrée (limites)	6 à 20 V
Broches E/S numériques	54 (dont 14 fournissent la sortie PWM)
Broches d'entrée analogiques	16
Courant alternatif par broche d'E/S	20 mA
Courant continu pour la broche de 3.3 V	50 mA
Mémoire Flash	256 Ko (dont 8 Ko utilisés par le chargeur initial de programme)
SRAM	8 Ko
EEPROM	4 Ko
Vitesse de l'horloge	16 MHz

TABLE 3.1 – Les caractéristiques d'Arduino Mega 2560

3.2.2 Le pont H L298

Le L298 est un Double Pont-H destiné au contrôle de moteur continu (H-Bridge Motor Driver). Il est basé sur le composant L298N qui est un double Pont-H conçu spécifiquement pour ce cas d'utilisation.

C'est un module extrêmement utile pour piloter des charges inductives comme des relais, solénoïdes, moteurs à continus et moteurs pas-à-pas bipolaire (4 fils 2 phases). Les deux types de moteurs peuvent être contrôlés aussi bien en vitesse (PWM) et direction. Toutes les sorties en puissance sont déjà protégées par des diodes anti-retour. il est conçu pour supporter des tensions plus élevées, des courants importants tout en proposant une commande logique TTL (basse tension, courant faibles, idéal donc pour un microcontrôleur) (11).

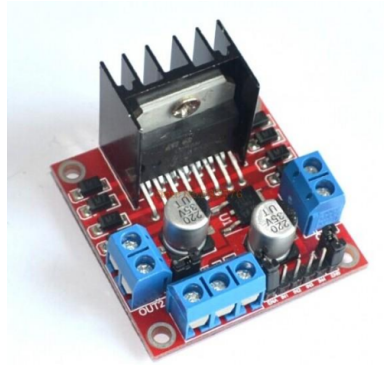


Fig. 3.2 – Module L298

Caractéristique de L298

Composant de contrôle en puissance	L298N
Alimentation de la charge	de +6V à +35V
Courant Max (en pointe)	2A
Tension de commande logique Vss	de +5 à +7V (alimentation interne de +5V)
Courant de commande logique	de 0 à 36 mA
Tensions pour contrôle du sens	Low -0.3V 1.5V, high : 2.3V Vss
Tensions pour contrôle "Enable"	Low -0.3V 1.5V, high : 2.3V Vss
Puissance Max	25W (Température 75°C)
Température de fonctionnement	de -25°C à +130°C

TABLE 3.2 – Caractéristique de L298

3.3 La partie Soft

Il y a plusieurs logiciels pour programmer l'Arduino ; l'Arduino IDE est le plus utilisé, ainsi, il est disponible sur le site officiel pour télécharger gratuitement (www.arduino.cc), Il existe d'autres programmes, parmi lesquels LabView, Atmel Studio et Matlab, pour notre projet on utilise Matlab pour programmer l'Arduino parce qu'il nous fournit les propriétés de l'interface graphique (Matlab GUI) et la visualisation des signaux en temps réel, mais pour être capable de programmer l'Arduino via Matlab il faut télécharger le "support package for Arduino Hardware".

3.3.1 Matlab support package for Arduino Hardware

Le support package pour Arduino Hardware vous permet d'utiliser MATLAB afin de communiquer avec une carte Arduino. Vous pouvez lire et écrire des données de capteurs via l'Arduino et

voir immédiatement les résultats dans MATLAB sans avoir à compiler. Il contient de nombreux bibliothèques et exemples prêtes à l'emploi, dans chaque version de Matlab ces bibliothèques et exemples sont renouvelés ou ajouter des nouvelles bibliothèques, pour cela, il est préférable d'utiliser la dernier version de Matlab.

3.3.2 Matlab GUI

GUI est un environnement de développement qui fournit un ensemble d'outils pour créer des interfaces utilisateur (IU). Ces outils simplifient le processus d'élaboration et de programmation des IUs.

À l'aide de GUI éditeur de mise en page (Layout Editor), vous pouvez remplir une interface utilisateur en cliquant et en faisant glisser les composants de l'interface utilisateur, tels que les axes, les panneaux, les boutons, les champs de texte, les curseurs, etc. dans la zone de mise en page. Vous pouvez également créer des menus et des menus contextuels pour l'interface utilisateur. À partir de l'éditeur de mise en page, vous pouvez dimensionner l'interface utilisateur, modifier l'aspect et la sensation des composants, aligner les composants, définir l'ordre des onglets, afficher une liste hiérarchique des objets composant et définir les options de l'interface utilisateur (14).

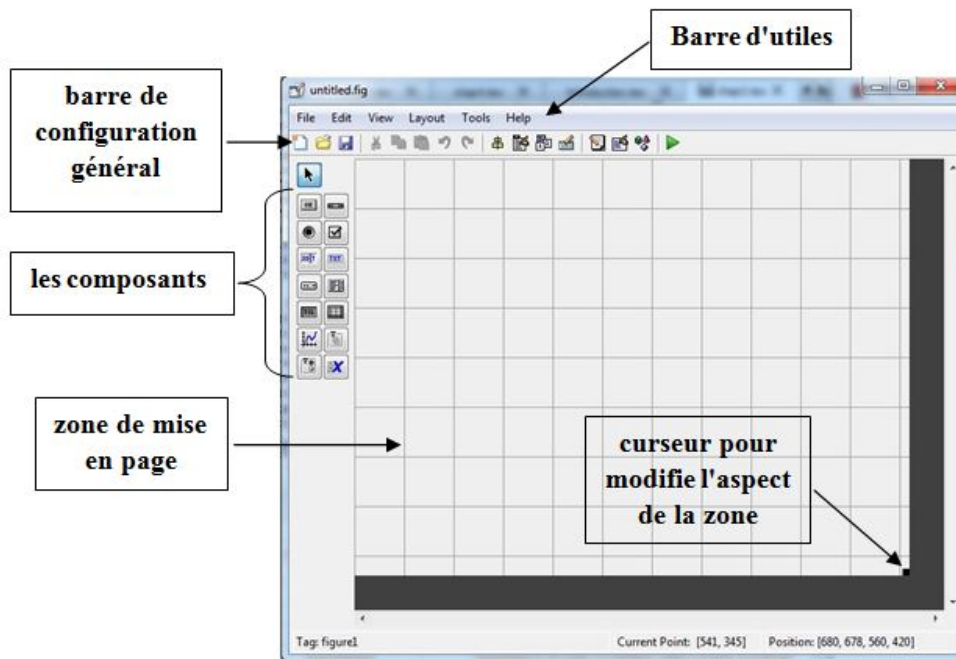


Fig. 3.3 – Interface de GUIDE

3.4 Résultats de la réalisation en boucle ouverte

l'interface de commande du servomoteur réalisée par Matlab GUI :

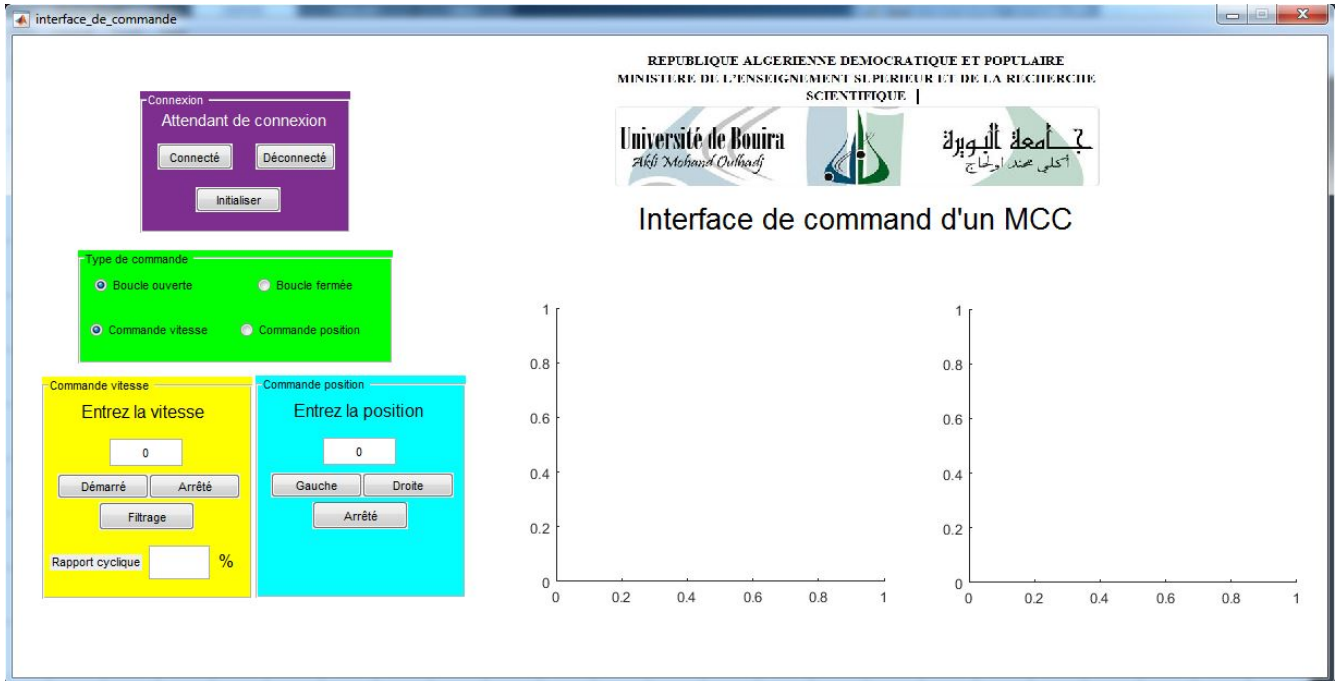


Fig. 3.4 – Interface de commande du servomoteur

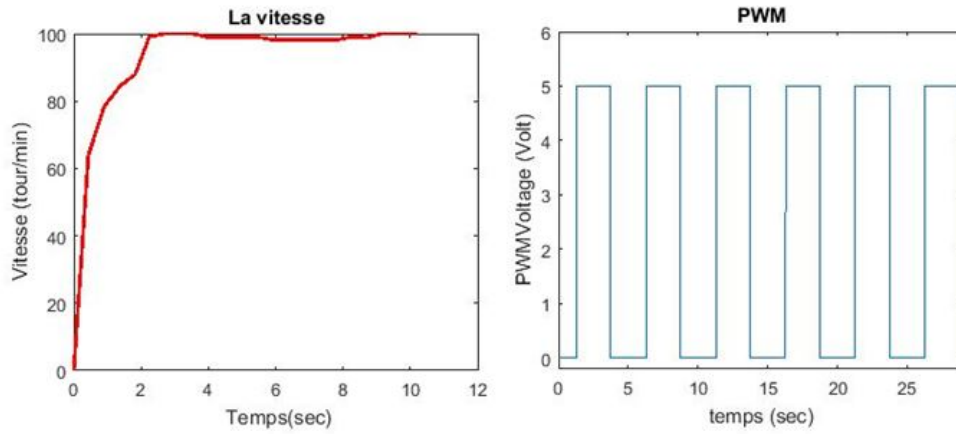
Remarque : Dans ce qui suit, le moteur à courant continu sera remplacé par un servomoteur DCM2 vu que le centre de recherche (CDTA-Baba Hassen, Alger) dont on a effectué notre stage dispose d'un servomoteur en panne (une voie du codeur incrémental ne fonctionne plus).

Caractéristiques DCM2 :

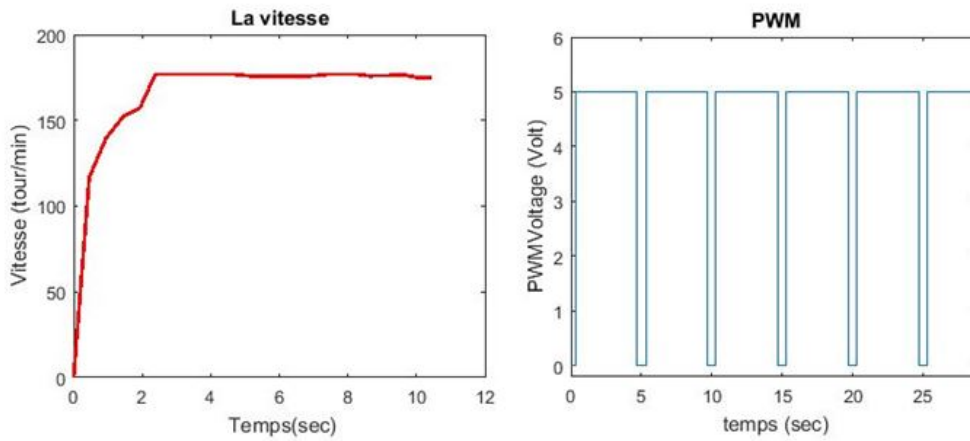
Les paramètres du servomoteur utilisé dans cette partie sont comme suit : (16)

- Moteur 12 V avec réducteur (rapport 1 :30)
- Consommation : 530 mA env. (et 150 mA à vide)
- Courant de blocage : 2,5 A
- Vitesse de rotation : 170 rpm (216 rpm à vide)
- Couple : 1,5 kg.cm.
- Encodeur : 360 impulsions par tour
- Dimensions : Ø28,5 x 86,6 mm
- Axe Ø 5 mm (4 mm sur méplat)

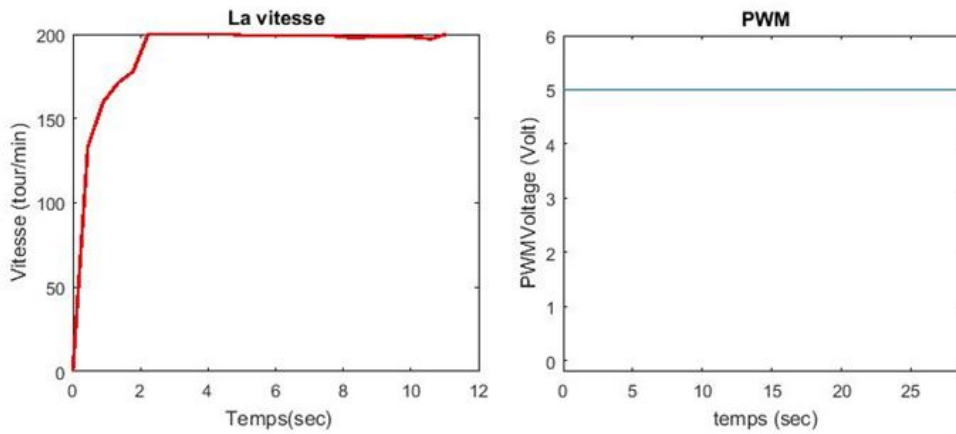
— A vide :



(a) consigne de 100tour/min



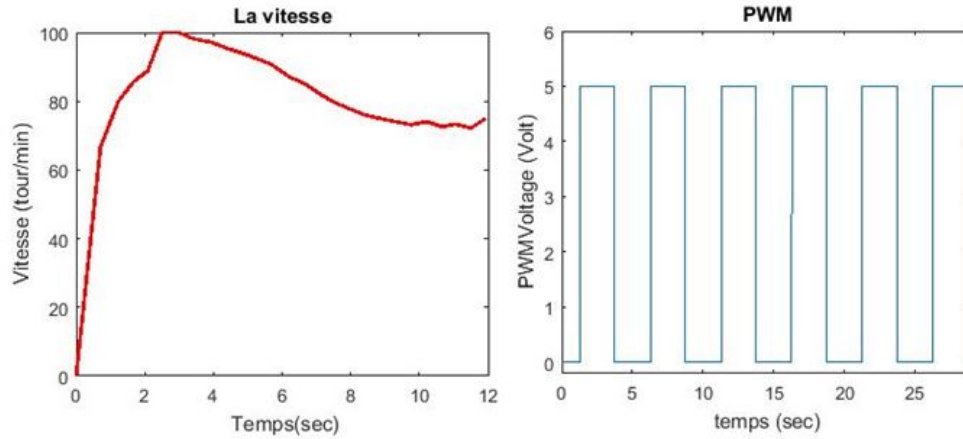
(b) consigne de 180tour/min



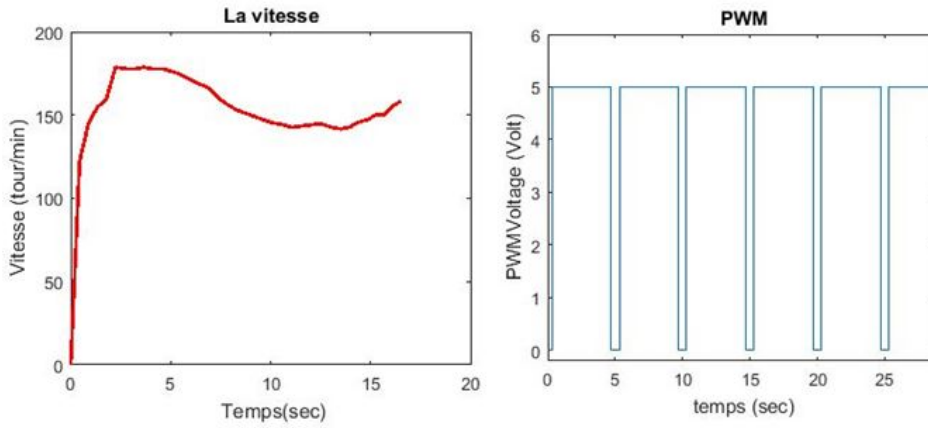
(c) consigne de 200tour/min

Fig. 3.5 – Résultats de réalisation de la boucle ouverte à vide

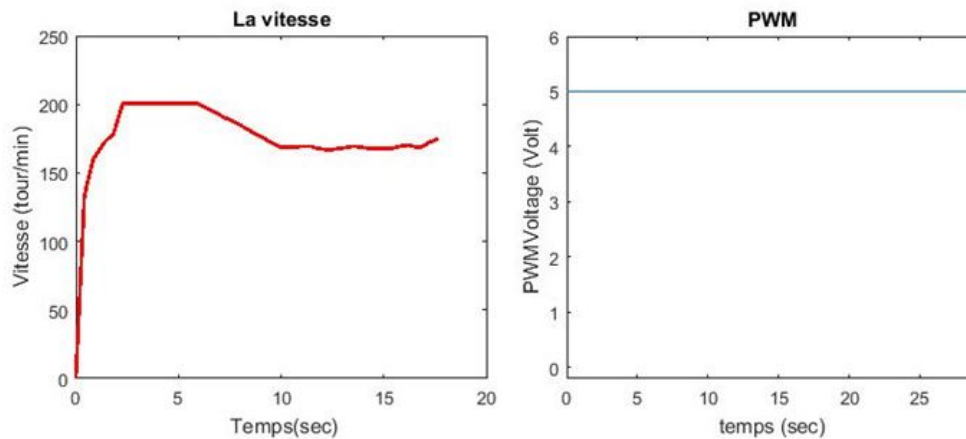
— En charge :



(a) consigne de 100tour/min



(b) consigne de 180tour/min



(c) consigne de 200tour/min

Fig. 3.6 — Résultats de réalisation de la boucle ouverte en charge

3.5 Interprétations des résultats de réalisation en boucle ouverte

1. À vide :

La figure (**fig. 3.5**) illustre les formes d'ondes de la vitesse de rotation et du PWM.

On remarque clairement que la vitesse suit convenablement le signal de référence. C'est-à-dire, une excellente poursuite de trajectoire est atteinte ce qui justifie le potentiel du système de commande qu'on a réalisé.

2. En charge :

On démarre le moteur à vide, puis on applique une charge (couple résistant) à $t=6$ s, on remarque que la vitesse diminue. On peut dire que cette commande n'est pas robuste lors de l'application de la charge vu que le retour d'information (Feedback) n'intervient pas en boucle ouverte. Le signal PWM reste toujours de même valeur lorsqu'on applique la charge (**voir fig. 3.6**).

3.6 Conclusion

Dans le chapitre en cours, on a pu réaliser et donner plus de détails sur la réalisation de la variation de la vitesse d'un servomoteur en utilisant l'Arduino et le pont H L298.

Des résultats ont été obtenus dont on a constaté que la vitesse du moteur à courant continu diminue lors de l'insertion de la charge, néanmoins elle ne rejoint jamais sa consigne. Pour contourner ce problème, nous contribuons à l'introduction d'un régulateur PI dont la mission principale est de maintenir la vitesse toujours près de sa consigne. Pour cela, le chapitre suivant sera consacré à l'étude (puis la réalisation) de la commande en boucle fermée du servomoteur avec un PI numérique.

Chapitre 4

Commande en boucle fermée d'un moteur à courant continu

4.1 Introduction

Une commande est davantage fiable et maîtrisable si on peut connaître et utiliser à chaque instant les données fournies par des capteurs d'un système en sortie.

La commande proportionnel intégral (PI) est parmi les méthodes les plus utilisés dans la commande en boucle fermée ; elle a d'abord été proposé en 1922 par Minorsky (17) et ensuite appliqué pour des applications industrielles en 1939 (18).

La commande PI est dite aussi (correcteur, régulateur), se compose de deux termes P et I, d'où le 'P' correspond au terme proportionnel et 'I' pour terme intégral de la commande. Le régulateur PI est une simple implémentation de retour d'information. Il a la capacité d'éliminer la compensation de l'état d'équilibre grâce à l'action intégrale.

Ce chapitre a pour but, d'implémenter la commande PI analogique et numérique pour un moteur à courant continu à aimant permanent, pour un seul objectif est d'annuler l'erreur statique, diminuer le dépassement, diminuer le temps de réponse et le temps de montée afin d'obtenir une réponse adéquate du procédé et de la régulation et d'avoir un système précis, rapide, stable et robuste.

On synthétise un correcteur appartenant à une classe de correcteurs bien connue que l'on appelle Proportionnel- Intégrateur (PI).

4.2 La correction analogique

Pratiquement, on utilise des composants électroniques réglables (des résistances, des capacités...), dans un asservissement de système le principe des correcteurs analogiques est la recherche d'un filtre d'un "retour d'état" qui agisse sur la commande $[u]$ afin d'optimiser les trois fondamentales d'un système en boucle fermée :

grande stabilité, précision et rapidité.

Dans une régulation, la consigne est généralement constante ou à variation lente, et seules deux exigences demeurent :

grande stabilité et précision.

4.2.1 Caractérisation d'un système analogique bouclé

Stabilité d'un système

Comme pour l'identification, il est généralement préférable d'étudier la stabilité d'un système en boucle ouverte. D'ailleurs, c'est la simple application du "principe de précaution" car si un système bouclé est instable, il est non commandable.

- **Critères de Routh-Hurwitz** : c'est le seul critère pour étudier la stabilité en boucle fermée, le système en boucle fermée est stable si $G(p) = \frac{H(p)}{1+H(p)}$ a des pôles à parties réelles négatives. Si n'est pas le cas, le filtre correcteur doit introduire une fonction de transfert $C_{corr}(p)$ pour obtenir un système a des pôles à parties réelles négatives telle que :

$$G(p) = \frac{C_{corr}(p)H(p)}{1 + C_{corr}(p)H(p)} = \frac{H_c(p)}{1 + H_c(p)} \quad (4.1)$$

- **Les critères graphiques** : il y a plusieurs critères graphiques pour étudier la stabilité des systèmes basée sur la boucle ouverte, on trouve le critère le plus classique le lieu de Nyquist, le principe du critère est d'utiliser la fonction de transfert $H(j\omega)$ déterminée par une analyse fréquentielle dans le plan complexe.

Le système sera stable si le parcours sur la courbe de Nyquist en suivant les valeurs croissantes de la pulsation (ω) laisse à gauche le point critique $(-1,0)$ (Figure 4.1). Le système monovariante peut être stable au strict sens mathématique, mais non suffisamment stable au sens de l'automatique. On définit alors à cet effet des marges de sécurité appelées marge de gain (M_G) et marge de phase (M_φ).

$$M_G = -20 \log |H(j\omega_\Pi)| = -20 \log(0N_G) \quad (4.2)$$

$$M_\varphi = -\Pi + \arctan |H(j\omega_T)| \quad (4.3)$$

En pratique, on imposera $M_\varphi \geq 45^\circ$ et $M_G \geq 6dB$ pour obtenir un système stable en boucle fermée.

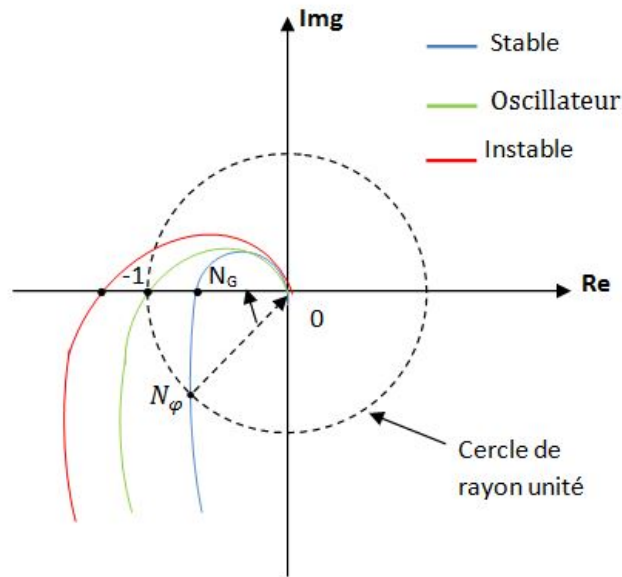


Fig. 4.1 – Critère de stabilité de Nyquist

Précision d'un système

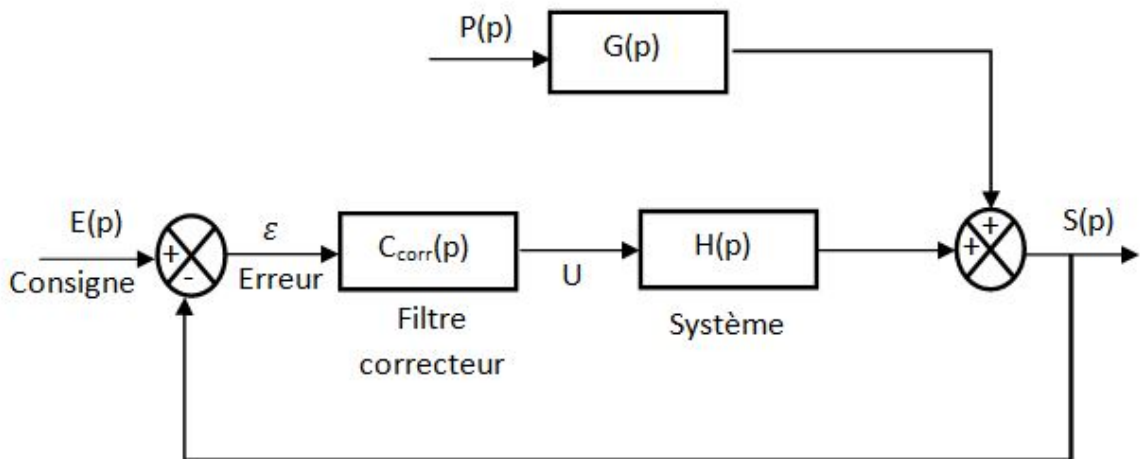


Fig. 4.2 – Système en boucle fermée avec perturbation

C'est l'écart entre la valeur de la consigne E et la valeur de sortie S . C'est donc la valeur à la sortie du soustracteur $|\varepsilon| = |E(p) - S(p)|$. Pour l'automaticien, l'important est que cette valeur

(l'erreur) rende vers zéro en réponse à une modification et/ou en présence de perturbation $P(p)$. La sortie du système est telle que :

$$S(p) = C_{corr}(p)H(p)\varepsilon + G(p)P(p) \quad (4.4)$$

Le calcul montre que :

$$\varepsilon = E(p) - S(p) = E(p) - H_c(p)\varepsilon - G(p)P(p) \quad (4.5)$$

ce qui donne :

$$\varepsilon = \frac{E(p)}{1 + H_c(p)} - \frac{G(p)P(p)}{1 + H_c(p)} \quad (4.6)$$

avec : $H_c(p) = C_{corr}(p)H(p)$.

L'erreur est due non seulement à la consigne $E(p)$ mais aussi à l'effet de la perturbation $P(p)$. Les critères de précision consisteront à déterminer dans quelle mesure l'erreur revient à 0, selon la classe de l'asservissement.

Rapidité d'un système

Le critère standard de rapidité utilisé est le temps de réponse à 5% de la sortie lorsque le système est soumis à une entrée en échelon. Pour un système bouclé c'est la fonction de transfert en boucle fermée qu'il faut considérer, l'entrée est la consigne $y_c(t)$ et la sortie est la mesure $y(t)$: grandeur réglée. La réponse à une entrée en échelon d'un système dynamique linéaire stable se présente en général sous la forme suivante :(19)

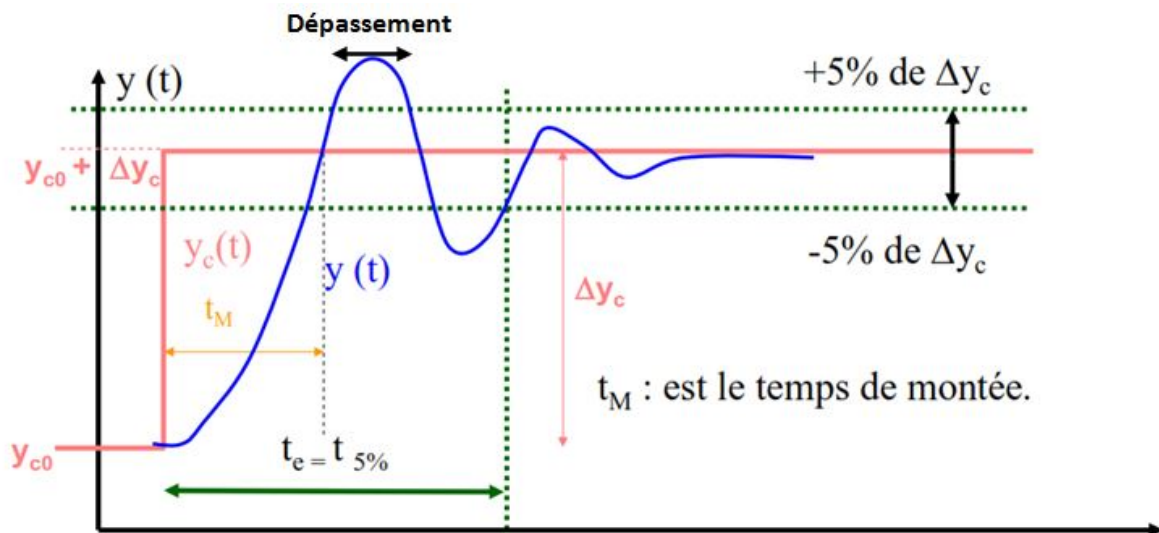


Fig. 4.3 – Réponse indicielle d'un asservissement

4.2.2 Les filtres analogiques d'un système bouclé

un système bouclé : stabilité, précision et rapidité. Vouloir corriger un système en introduisant un filtre correcteur consiste à lever le dilemme "précision-stabilité" ou "stabilité-rapidité".

Plusieurs méthode de correction sont possibles pour la correction d'un asservissement ou d'un régulation parmi les méthode on trouve le filtre correcteur analogique PI (proportionnel-intégral).

Le filtre PI est inséré dans la chaine directe de l'asservissement, en série avec le processus, comme indiqué dans la (Figure 4.4). Ce correcteur est élaboré à partir du signal d'erreur (ε). Ainsi, le signal de commande (u) est donné en fonction des deux actions proportionnelle (P) et intégrale (I).

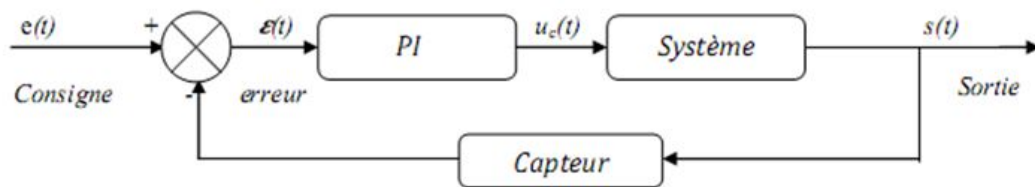


Fig. 4.4 – Schéma bloc d'un système avec correcteur PI analogique

Action proportionnelle (P)

Cette action est la plus classique. Elle consiste à appliquer une correction en rapport avec la différence instantanée entre la mesure et la consigne courante. Le rapport erreur/commande s'appelle le gain ou (Bande proportionnelle) notée K_p .

$$K_p = \frac{u(t)}{\varepsilon(t)} \quad (4.7)$$

La limite de cette commande arrive à partir du moment où l'erreur devient petite ou si la consigne n'est pas constante; en effet l'annulation de l'écart considère que la consigne à l'instant $(t + l)$ sera le même qu'à l'instant t .

Effets du correcteur proportionnel : L'action proportionnelle (P) crée un signal de commande (u) proportionnel au signal d'erreur (ε). Elle agit donc principalement sur le gain du système asservi et permet :

- D'améliorer notablement la précision.
- Entraîne une augmentation du gain, d'où une diminution de l'erreur statique.
- Augmente la bande passante du système.

— Améliore la rapidité du système et augmente l'instabilité du système.

Le correcteur proportionnel (P) n'est généralement pas utilisé seul. On verra que tout correcteur possède au moins l'action proportionnelle (20).

Schéma électronique du correcteur proportionnel :

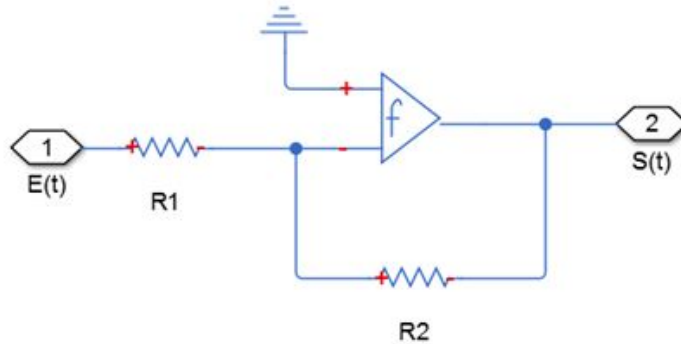


Fig. 4.5 – Schéma électronique du correcteur proportionnel

Action intégral (I)

Cette action calcule sa contribution à la commande sans utiliser l'écart instantané, mais en introduisant une mémoire des écarts intervenus lors des précédents échantillonnages. Ceci permet d'éliminer à la fois les erreurs statiques trop petites pour que l'action proportionnelle et les erreurs de suivi de consignes en pente (21; 22).

La limite de cette commande intervient à partir du moment où le système ne réagit plus à la commande passée (blocage d'organe, limitation de sécurité, etc.). Dans ce cas précis, le régulateur va amplifier à l'infini sa contribution intégrale. On parle de saturation d'intégrale. La résolution de problèmes passe de l'utilisation d'un PID à intégrale externe. La contribution intégrale se calcule en ajoutant tous les (T_i) secondes la valeur de l'entrée de l'intégrateur à l'ancienne valeur.

La relation entre la sortie $u(t)$ et le signal d'erreur $(\varepsilon(t))$ est :

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i \varepsilon(t) \quad (4.8)$$

Donc :

$$\frac{u(t)}{\varepsilon(t)} = \frac{K_i}{p} = \frac{1}{T_i} \quad (4.9)$$

Avec : K_i est le gain intégral et T_i est la constante de temps d'intégration.

Effets du correcteur intégral : L'intérêt principal de ce régulateur est d'ajouter dans la chaîne de commande une intégration. Nous savons que la présence d'une intégration augmente la classe du système et réduit ou annule, selon le type d'entrée, l'erreur statique du système. L'action intégrale pure :

- améliore la précision en réduisant ou annulant l'erreur statique.
- introduit un déphasage de -90° qui risque de déstabiliser le système (diminution de la marge déphasé).

Le régulateur à action exclusivement intégrale n'est pratiquement jamais utilisé, en raison de sa lenteur et de son effet déstabilisant. Il est, en général, associé au régulateur Proportionnel.

Schéma électronique du correcteur intégral :

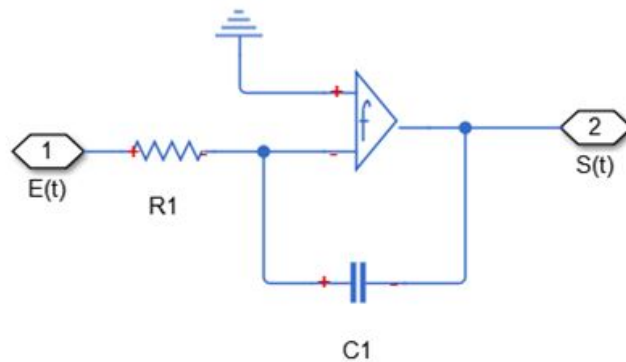


Fig. 4.6 – Schéma électronique du correcteur intégral

le filtre PI

Le filtre de type PI est un correcteur de type P auquel on a ajouté un terme intégral, il élabore alors une commande qui peut être donnée par la relation suivante :

$$u(t) = K_p \varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt \quad (4.10)$$

En appliquant la transformée de Laplace, l'équation devient :

$$U(p) = K_p \varepsilon(p) + T_i \frac{d\varepsilon(p)}{p} \quad (4.11)$$

Le terme intégral complète l'action proportionnelle puisqu'il permet de compenser l'erreur statique et d'augmenter la précision en régime permanent. L'idée est d'intégrer l'erreur depuis le début et d'ajouter cette erreur à la consigne, lorsque l'on se rapproche de la valeur demandée, l'erreur devient de plus en plus faible. Le terme proportionnel n'agit plus mais le terme intégral subsiste et reste stable, ce qui maintient le moteur à la valeur demandée.

L'intégrale agissant comme un filtre sur le signal intégré, elle permet de diminuer l'impact des perturbations (bruit, parasites), et il en résulte alors un système plus stable.

Effets du correcteur proportionnel-Intégral :

- Diminution du temps de montée.
- Élimination de l'erreur statique.
- Augmentation du temps de stabilisation.
- Augmentation du dépassement

Schéma électronique du Correcteur Proportionnel-Intégral :

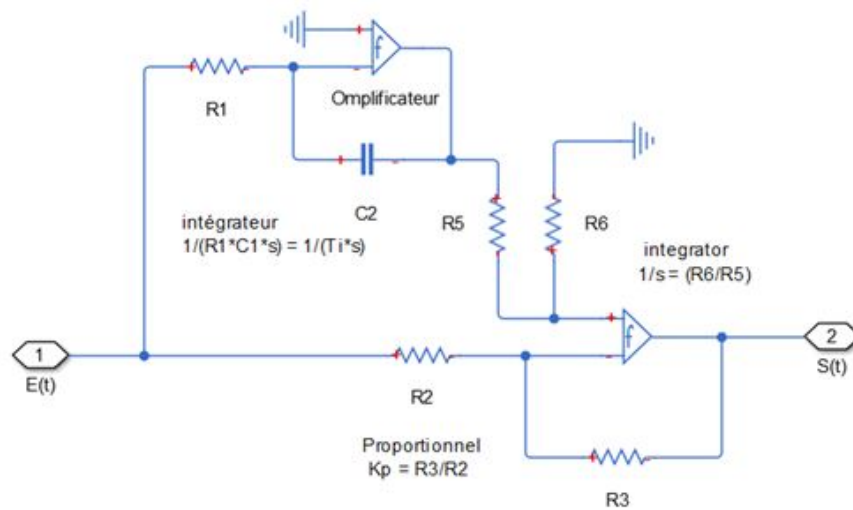


Fig. 4.7 – Schéma électronique du correcteur proportionnel Intégral

4.2.3 La méthode de Ziegler et Nichols pour la détermination des coefficients PID

Plutôt que de chercher à calculer le filtre, une approche expérimentale est souvent effectuée pour les corrections de régulateurs.

Méthode du pompage

Elle consiste à tester le régulateur en correction proportionnelle de niveau K en boucle fermée. La fonction de transfert sera donc :

$$H'(p) = \frac{KH(p)}{1 + KH(p)} \quad (4.12)$$

On monte la valeur de K jusqu'à obtenir des oscillations d'instabilité (ou pompage) de période t_0 . On note la valeur K_0 correspondante, ce qui permet de déterminer la valeur des filtres correcteurs (Tableau 4.1) (6).

Méthode de la réponse indicielle

La méthode de Ziegler et Nichols considère pour certains systèmes que la réponse indicielle provient d'une fonction intégrateur et retard

$$T_{ZN}(p) = \frac{T_0 e^{-p\tau_N}}{p} \quad (4.13)$$

avec : τ_N est un retard pur.

La réponse indicielle est alors une rampe décalée dans le temps $y = (T_0 - \tau_N)$. On choisit les filtres correcteurs P,PI et PID dans le (Tableau IV.1), selon la méthode utilisée.

$T(p)$ du correcteur	Essai indicial (T_0, τ_N)			Pompage (K_0, t_0)		
K_p	$K_p = \frac{1}{T_0 \tau_N}$			$K_p = 0.5K_0$		
$K_p(1 + \frac{1}{pT_i})$	$K_p = \frac{0.9}{T_0 \tau_N}$	$T_i = 3.3\tau_N$		$K_p = 0.45K_0$	$T_i = 0.83t_0$	
$K_p(1 + \frac{1}{pT_i} + pT_d)$	$K_p = \frac{1.2}{T_0 \tau_N}$	$T_i = 2\tau_N$	$T_d = 0.5\tau_N$	$K_p = 0.6K_0$	$T_i = 0.5t_0$	$T_d = 0.125t_0$

TABLE 4.1 – Correction selon les deux méthodes de Ziegler et Nichols

4.3 La correction numérique

On retrouve en commande numérique les correcteurs classiques P,PI et PID. Toute fonction d'un "appareil correcteur" $A(p)$ donne, après échantillonnage-blocage, la fonction suivante (6) :

$$G(z) = (1 - z^{-1})Z \left[\frac{A(p)}{p} \right] \quad (4.14)$$

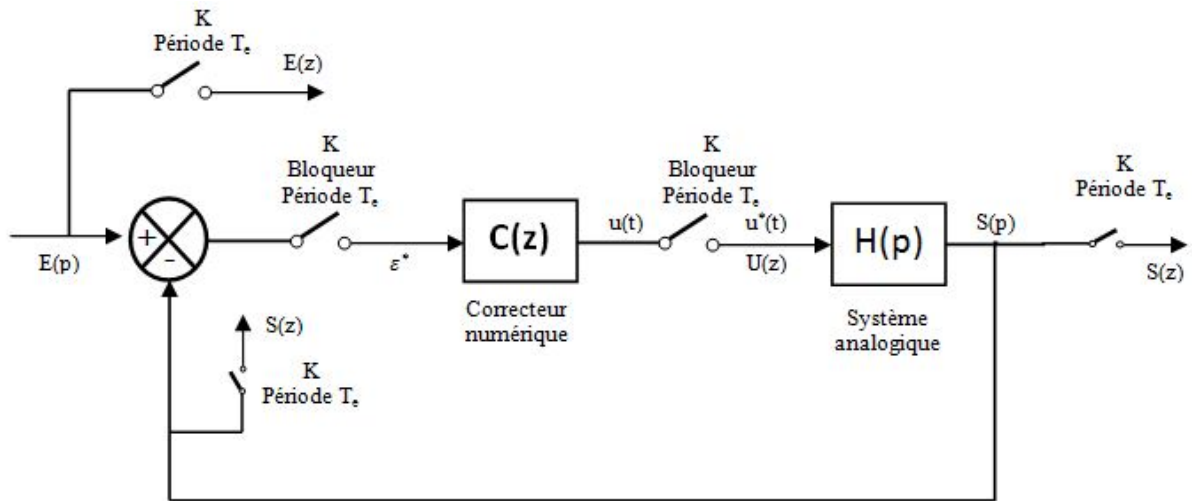


Fig. 4.8 – Schéma bloc d'un système avec correcteur numérique

La correction du système est numérique, introduite par le filtre de fonction de transfert $C(z)$. Avec le retour unitaire, on a :

$$\varepsilon(z) = E(z) - S(z) \quad (4.15)$$

$$H(z)_{corr} = C(z) \cdot (1 - z^{-1}) Z \left[\frac{H(p)}{s} \right] = C(z) G(z) = \frac{Y(z)}{\varepsilon(z)} \quad (4.16)$$

4.3.1 Le proportionnelle numérique P(z)

$A(p) = K_p$. On obtient alors :

$$K(z) = (1 - z^{-1}) Z \left[\frac{K_p}{p} \right] \quad (4.17)$$

Après utilisation du tableau de conversion en (z) (Annexe), on trouve :

$$K(z) = K_p = \frac{S(z)}{E(z)} \quad (4.18)$$

4.3.2 L'intégrateur numérique I(z)

Ça fonction de transfert est $A(p) = \frac{1}{pT_i}$. On obtient :

$$I(z) = (1 - z^{-1}) Z \left[\frac{1}{p^2 T_i} \right] \quad (4.19)$$

Ce qui donne, après utilisation du tableau de convection :

$$I(z) = (1 - z^{-1}) \left(\frac{T_e}{T_i} \right) \frac{z}{(z-1)^2} = \left(\frac{T_e}{T_i} \right) \frac{z}{(z-1)} = \frac{S(z)}{E(z)} \quad (4.20)$$

avec : T_e est le période d'échantillonnage.

4.3.3 Le correcteur PI(z)

On a : $A(p) = K_p \left(1 + \frac{1}{pT_i}\right)$. On obtient, en utilisant la linéarité de la transformation

$$C_{PI}(z) = K \left[1 + \left(\frac{T_e}{T_i}\right) \frac{z^{-1}}{(1 - z^{-1})}\right] = \frac{S(z)}{E(z)} \quad (4.21)$$

4.3.4 Détermination des coefficients PID(z)

On choisit les coefficients des filtres correcteurs P, PI et PID dans le (Tableau 4.2) les coefficients dits de Takahashi, selon les deux méthodes de Ziegler et Nichols.

Essai indiciel (T_0, τ_N)			
<i>P</i>	$K_p = \frac{0.27}{T_0(\tau_N + T_e)}$		
<i>PI</i>	$K_p = \frac{1}{T_0(\tau_N + 0.5T_e)} - 0.5T_i$	$K_i = \frac{0.27}{T_0(\tau_N + 0.5T_e)^2}$	
<i>PID</i>	$K_p = \frac{1.2}{T_0(\tau_N + T_e)} - 0.5T_i$	$K_i = \frac{0.6}{T_0(\tau_N + 0.5T_e)^2}$	$K_d = \frac{0.5}{T_0}$
Pompage (K_0, t_0)			
<i>P</i>	$K_p = 0.5K_0$		
<i>PI</i>	$K_p = 0.45K_0 - 0.5T_i$	$K_i = \frac{0.54K_0}{t_0}$	
<i>PID</i>	$K_p = 0.6K_0 - 0.5T_i$	$K_i = \frac{1.2K_0}{t_0}$	$K_d = \frac{3K_0t_0}{40}$

TABLE 4.2 – Paramètres d'un correcteur selon Takahashi

4.4 Simulation sous l'environnement Matlab Simulink

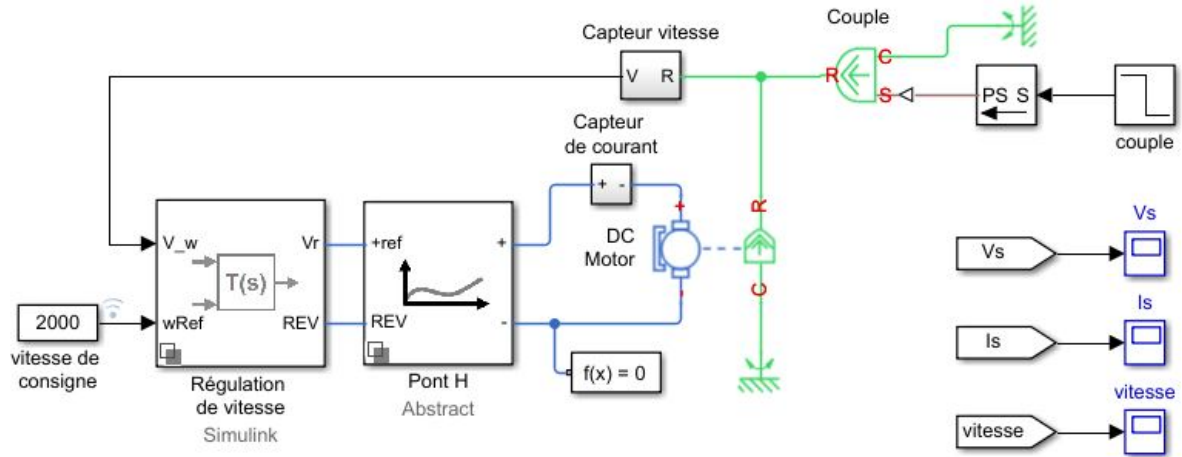


Fig. 4.9 – Schéma sur le logiciel Simulink de la régulation de vitesse

On utilise la 1^{ème} méthode de Ziegler et Nichols : la méthode de pompage pour déterminer les valeurs de filtre K_p et K_i .

Pour $K_0 = 0.6$ le système oscille avec une période $t_0 = 0.1ms$, a partir de tableau 4.1 on trouve les valeurs de filtre $K_p = 0.27$ et $K_i = 8.3$.

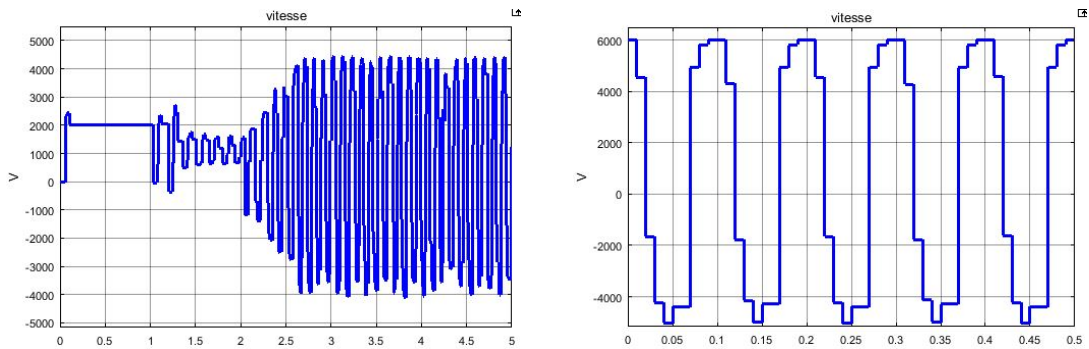
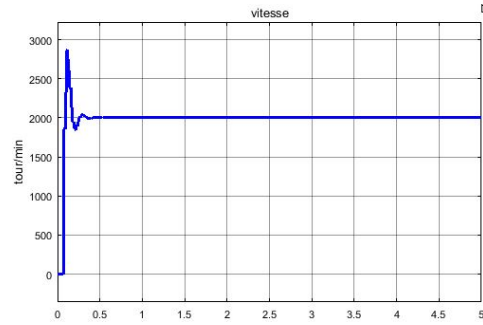
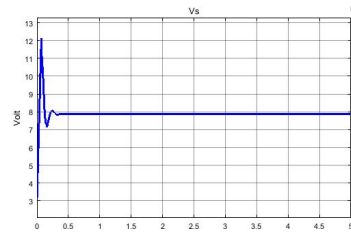


Fig. 4.10 – Système oscillatoire

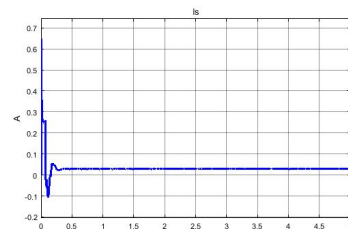
Pour ces valeurs on trouve les résultats suivantes :



(a) Vitesse à vide



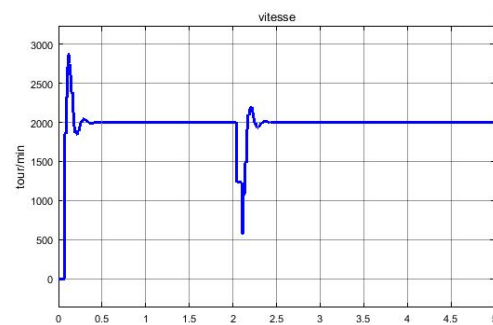
(b) Tension à vide



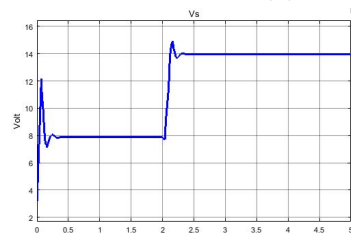
(c) Courant à vide

Fig. 4.11 – Résultats de simulation à vide

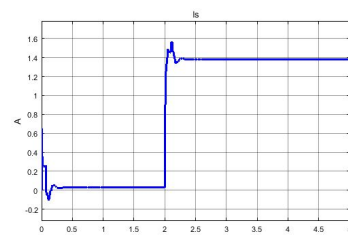
On applique une couple $C_r = -0.05Nm$ à $t = 2s$, on obtient les résultats suivantes :



(a) Vitesse en charge



(b) Tension en charge



(c) Courant en charge

Fig. 4.12 – Résultats de simulation en charge

4.5 Interprétations des résultats de simulation en boucle fermée

1. À vide :

L'analyse des courbes obtenues montre que la poursuite pour une consigne de vitesse de 2000 tour/min est satisfaisante avec un dépassement acceptable et un faible temps de réponse, 0.3s environ (**fig. 4.11.a**).

Le transitoire du courant a une durée équivalente au temps de démarrage avec une valeur de crête d'environ 0.65A. Ce courant atteint la valeur presque nulle (0.02 A) qui correspond au courant magnétisant (**fig. 4.11.c**).

2. En charge :

On applique une charge après 2 sec la vitesse chute puis retourne à sa valeur de référence (**fig. 4.12.a**).

D'après (**fig. 4.12.c**), on remarque que le courant augmente au moment de l'application de la charge à 2sec, afin de compenser le couple résistant.

4.6 Conclusion

D'après les différents résultats, nous avons conclu que la vitesse du moteur à courant continu diminue quand une charge est appliquée, mais grâce au régulateur PI, la vitesse retourne toujours à sa valeur initiale. Donc le régulateur PI est indispensable afin de contrôler notre système convenable, le rôle d'un régulateur est de maintenir une grandeur donnée à une valeur de consigne, l'idéal serait que la variable contrôlée soit exactement égale à la consigne.

Un régulateur Proportionnel Intégral (PI) est un organe de contrôle permettant d'effectuer une régulation en boucle fermée d'un système industriel. C'est le régulateur le plus utilisé dans l'industrie, et il permet de contrôler un grand nombre de procédés. Le réglage d'un PI consiste à déterminer les coefficients K_p et K_i afin d'obtenir une réponse adéquate du procédé et de la régulation. L'objectif est d'être robuste, rapide et précis.

Le chapitre qui suit fera l'objet d'une réalisation pratique de la commande par PI appliquée au moteur à courant continu.

Chapitre 5

Réalisation de la commande en boucle fermée

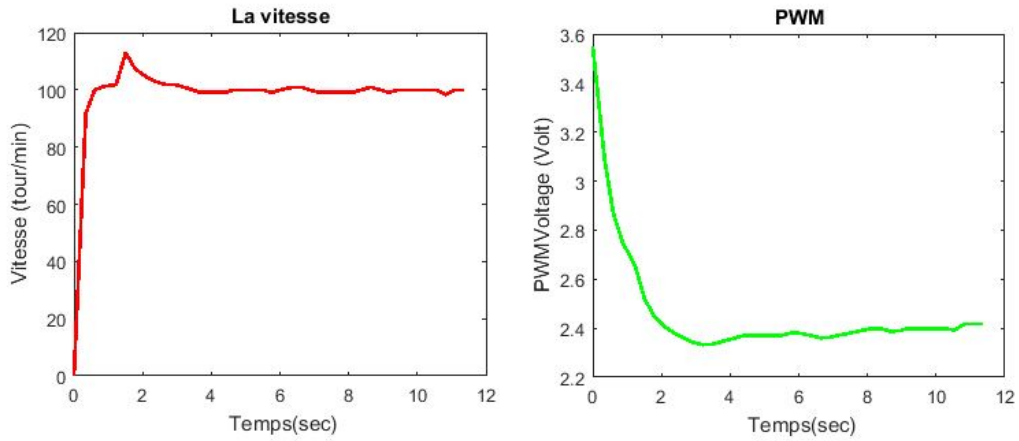
5.1 Introduction

Le but de ce travail est de faire une réalisation pratique destinée à mettre en évidence une commande PI d'un servomoteur à courant continu par la carte Arduino et logiciel Matlab GUI.

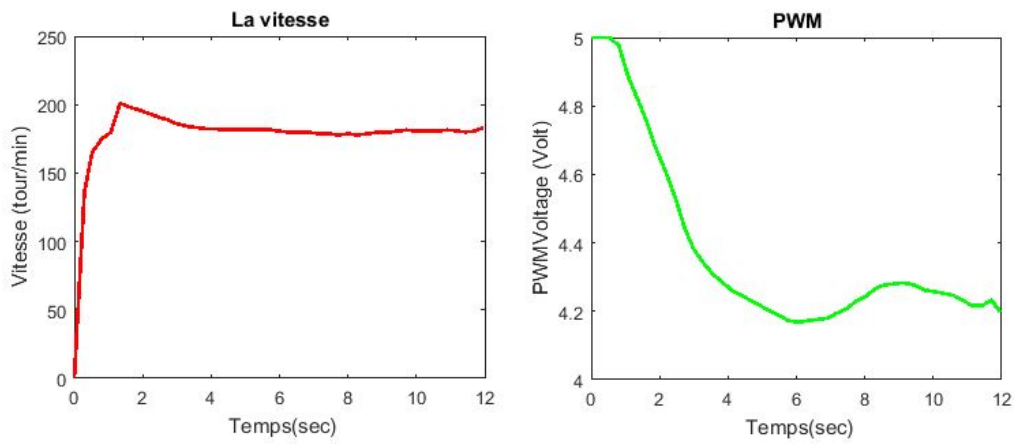
Cette réalisation est faite au sein du centre de développement des technologies avancées (CDTA), laboratoire Productique et Robotique en collaboration avec l'équipe de Systèmes Robotisés.

5.2 Résultats de la réalisation expérimentale en boucle fermée

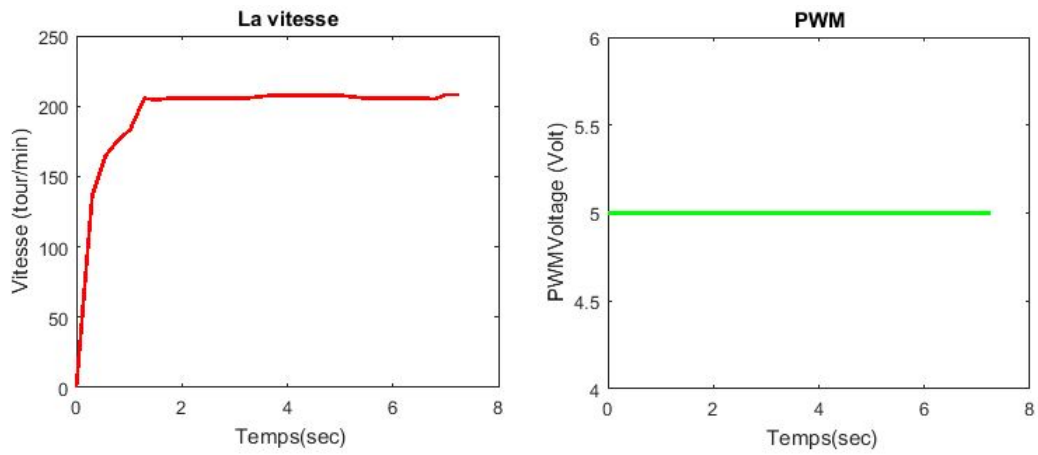
— A vide :



(a) consigne de 100tour/min



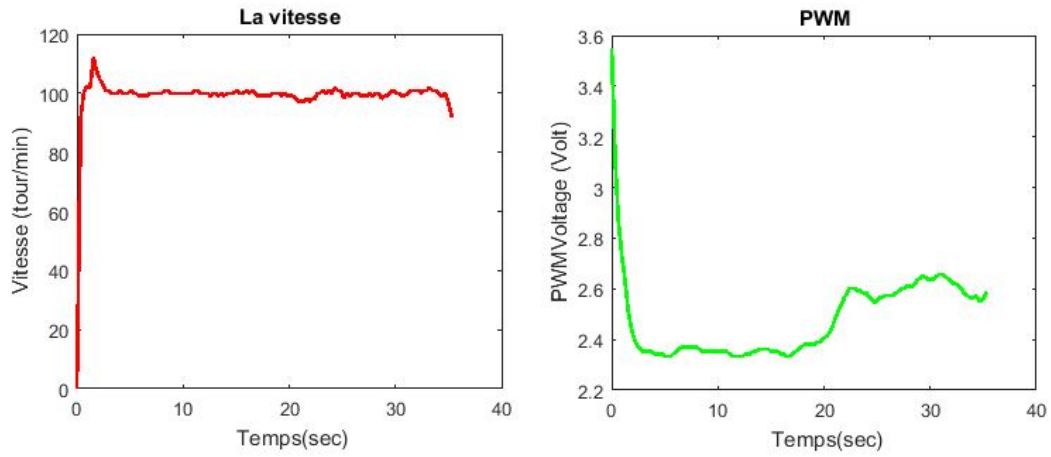
(b) consigne de 180tour/min



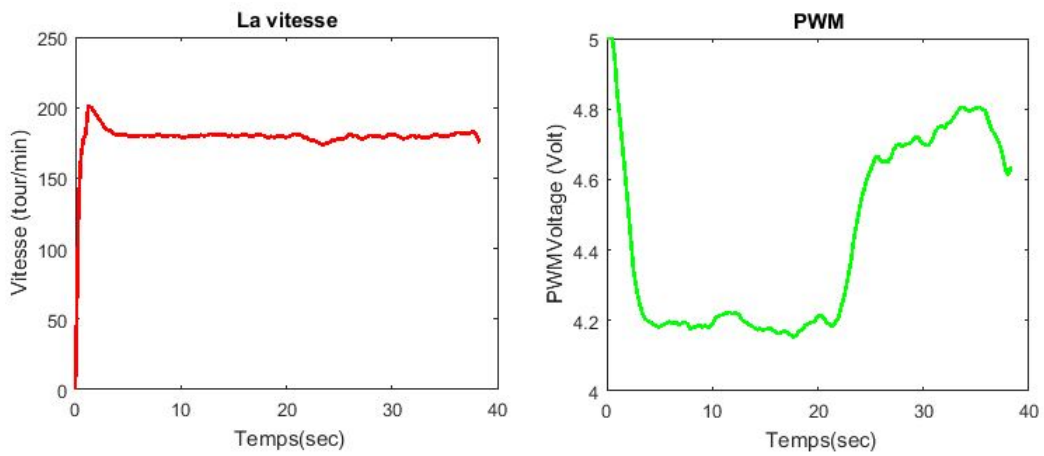
(c) consigne de 200tour/min

Fig. 5.1 – Résultats de réalisation de la boucle fermée à vide

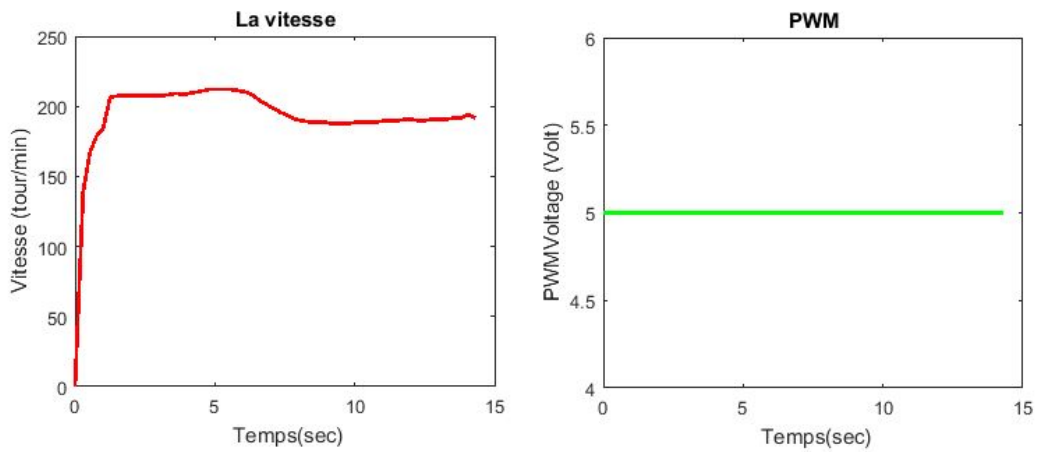
— En charge :



(a) consigne de $100\text{tour}/\text{min}$



(b) consigne de $180\text{tour}/\text{min}$



(c) consigne de $200\text{tour}/\text{min}$

Fig. 5.2 – Résultats de réalisation de la boucle fermée en charge

5.3 Interprétation des résultats de la réalisation en boucle fermée

1. À vide :

Au démarrage du moteur, la vitesse fait un dépassement acceptable puis elle suit convenablement la consigne avec un temps de réponse satisfaisant (0.4 s). Concernant le PWM, il fait un pic qui atteint (3.58 V) ensuite il rejoint la valeur (2.4 V environ, qui implique $\alpha = 48\%$) pour une consigne de vitesse égale à $v = 100\text{tour}/\text{min}$ (**voir fig. 5.1.a**).

2. En charge :

Lors de l'application de la charge à l'instant ($t=22\text{s}$), la vitesse diminue puis reprend immédiatement sa consigne. Pour le PWM, il augmente au moment de l'application de la charge, puis il revient à sa valeur initiale (référence) lorsqu'on enlève la charge (**fig. 5.2**).

Dans ce contexte, les sorties rejoignent avec succès nos consignes vu le travail excellent que fait notre PI. Ainsi, cela argumente clairement sur la puissance et le potentiel de notre système de commande.

5.4 Conclusion

D'après les résultats pratiques, on constate que la commande en boucle fermée par un régulateur PI est très robuste.

Ainsi, les résultats obtenus par réalisation montrent les avantages qu'apporte la technique de commande en boucle fermée proposée dans ce chapitre, par rapport à celle de la commande en boucle ouverte.

Conclusion générale

Le travail effectué de ce mémoire rentre dans le cadre de la simulation et réalisation d'une commande d'un servomoteur à courant continu à aimant permanent.

Pour ce faire, nous avons apporté une attention particulière à l'élaboration des différents types des capteurs associés à un moteur électrique et les équations des circuits constituant la machine à courant continu, en appréhendant de façon complète leurs avantages et leurs inconvénients.

Malgré le développement des moteurs à vitesse variable, les moteurs à courant continu sont très utilisés de nos jours, notamment dans les applications automobiles, dans des applications de faible puissance utilisant des batteries ou encore pour la traction électrique.

Le choix de ce genre du moteur parmi les autres types est basé sur l'avantage de découplage naturel qui existe entre le couple et le flux qui est dû à la séparation physique existant entre les deux circuits constituant ce moteur (l'inducteur et l'induit).

Les commandes sont principalement liées à la commande en vitesse et en couple. Toutefois, la mise en œuvre de ces stratégies de contrôle n'a pu se faire qu'avec l'évolution des composants de puissance. Dans ce mémoire, nous avons rappelé les différents convertisseurs statiques. Puis nous avons présenté les techniques de commande MLI ainsi que les montages d'électronique de puissance.

La commande de servomoteur se divise en deux parties la commande en boucle ouverte et la commande en boucle fermée avec correcteur PI numérique.

Dans ce noble travail, nous avons contribué à la commande du servomoteur DCM2 avec un PI numérique tout en travaillant avec un microcontrôleur Arduino MEGA 2560. De bons résultats ont été obtenus ce qui justifie l'efficacité de notre réalisation. Comme perspective, nous proposons d'implémenter prochainement des PI intelligents tel que le PI flou ou PI avec réseaux de neurones.

Bibliographie

- [1] J.C.ROLIN, Lycée G Eiffel Dijon, *Machine à courant continu*, (2013).
- [2] PIERRE MAYE, *Moteurs électriques industriels*, 2^{ème} édition, Dunod, ISBN 978-2-10-056730-0, paris,2005-2011.
- [3] ABBAS, Hamou Ait, BELKHEIRI, Mohammed, et ZEGNINI, Boubakeur. *Feedback linearisation control of an induction machine augmented by single-hidden layer neural networks*, International Journal of Control, 2016, vol. 89, no 1, p. 140-155.
- [4] Abbas, H. A., Zegnini, B., & Belkheiri, M. (2015, March). *Neural network-based adaptive control for induction motors*. In *Systems, Signals & Devices (SSD)*, 2015 12th International Multi-Conference on (pp. 1-6). IEEE.
- [5] Fliess, M., & Join, C. (2008, June). *Intelligent PID controllers*. In *Control and Automation*, 2008 16th Mediterranean Conference on (pp. 326-331). IEEE.
- [6] Michel Pinard, *Commande électronique des moteurs électriques*, 2^{ème} édition, paris, Dunod, (2004,2007).
- [7] A.Ivanov Smolenski, *Machines électriques* ,Volume 1,Techniques Soviétiques, édition de Moscou, Mir, HB N 3592, 1983.
- [8] Luc Lasne,*Electronique de puissance*, Dunod, 2015.
- [9] Pathik A. Kapadiya, Ishan R. Shah, Nirav D. Mehta, *STUDY AND IMPLEMENTATION OF DC DRIVE USING PIC16F877A MICROCONTROLLER*, International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET), Volume : 03 Issue : 05,2014.
- [10] RS DC SERVOMOTORS HIGH DYNAMIC 0.05 to 13 Nm, PARVEX, <https://inverterdrive.com/file/RS-Servo-Motor-Manual>.
- [11] LM298,*DUAL FULL-BRIDGE DRIVER*, https://www.sparkfun.com/datasheets/Robotics/L298_H_Bridge.pdf.
- [12] David Kushner, *The Making of Arduino*. *IEEE Spectrum*. *Online*,<http://spectrum.ieee.org/geek-life/hands-on/the-making-of-arduino>.

- [13] Arduino page web, Online (Juin 2017) : <http://www.arduino.cc>.
- [14] MathWercks page web, Online (Juin 2017) : <https://fr.mathworks.com/discovery/matlab-gui.html>
- [15] Massimo Banzi, *Getting Started with Arduino*. 2^{ème} édition. O'Reilly, USA, 2011.
- [16] site web : <https://www.lextronic.fr/P3102-moteur-rducteur-avec-encodeur.html>
- [17] Minorsky N : *Directional stability of automatically steered bodies*, American Society of Naval Engineering 1922 ; p 34 :284.
- [18] Bennett S : *Development of the PID controller*, IEEE Control System Magazine 1994 :58–65
- [19] Dr.M.Rabi : *Cours Régulation analogique industrielle – ESTF- G.Thermique*,2013-2014.
- [20] TIR Zoheir : *Modélisation et Simulation de la Machine à Courant Continu*, Mémoire Magister en électrotechnique, 2008.
- [21] Bapio BAYALA : *Machines à courant continu*, Edition Ellipse, 2010.
- [22] Prof. Mohammed-Karim FELLAH : *Cours d'Asservissements Linéaires Continus*, Université Djillali Liabès – Sidi Bel-Abbès, 2007.

Annexe

Table of Laplace and Z-transforms

	$X(s)$	$x(t)$	$x(kT)$ or $x(k)$	$X(z)$
1.	–	–	Kronecker delta $\delta_0(k)$ 1 $k = 0$ 0 $k \neq 0$	1
2.	–	–	$\delta_0(n-k)$ 1 $n = k$ 0 $n \neq k$	z^{-k}
3.	$\frac{1}{s}$	$1(t)$	$1(k)$	$\frac{1}{1-z^{-1}}$
4.	$\frac{1}{s+a}$	e^{-at}	e^{-akT}	$\frac{1}{1-e^{-aT}z^{-1}}$
5.	$\frac{1}{s^2}$	t	kT	$\frac{Tz^{-1}}{(1-z^{-1})^2}$
6.	$\frac{2}{s^3}$	t^2	$(kT)^2$	$\frac{T^2 z^{-1}(1+z^{-1})}{(1-z^{-1})^3}$
7.	$\frac{6}{s^4}$	t^3	$(kT)^3$	$\frac{T^3 z^{-1}(1+4z^{-1}+z^{-2})}{(1-z^{-1})^4}$
8.	$\frac{a}{s(s+a)}$	$1 - e^{-at}$	$1 - e^{-akT}$	$\frac{(1-e^{-aT})z^{-1}}{(1-z^{-1})(1-e^{-aT}z^{-1})}$
9.	$\frac{b-a}{(s+a)(s+b)}$	$e^{-at} - e^{-bt}$	$e^{-akT} - e^{-bkT}$	$\frac{(e^{-aT} - e^{-bT})z^{-1}}{(1-e^{-aT}z^{-1})(1-e^{-bT}z^{-1})}$
10.	$\frac{1}{(s+a)^2}$	te^{-at}	kTe^{-akT}	$\frac{Te^{-aT}z^{-1}}{(1-e^{-aT}z^{-1})^2}$
11.	$\frac{s}{(s+a)^2}$	$(1-at)e^{-at}$	$(1-akT)e^{-akT}$	$\frac{1-(1+aT)e^{-aT}z^{-1}}{(1-e^{-aT}z^{-1})^2}$
12.	$\frac{2}{(s+a)^3}$	$t^2 e^{-at}$	$(kT)^2 e^{-akT}$	$\frac{T^2 e^{-aT}(1+e^{-aT}z^{-1})z^{-1}}{(1-e^{-aT}z^{-1})^3}$
13.	$\frac{a^2}{s^2(s+a)}$	$at - 1 + e^{-at}$	$akT - 1 + e^{-akT}$	$\frac{[(aT-1+e^{-aT})+(1-e^{-aT}-aTe^{-aT})z^{-1}]z^{-1}}{(1-z^{-1})^2(1-e^{-aT}z^{-1})}$
14.	$\frac{\omega}{s^2+\omega^2}$	$\sin \omega t$	$\sin \omega kT$	$\frac{z^{-1} \sin \omega T}{1-2z^{-1} \cos \omega T + z^{-2}}$
15.	$\frac{s}{s^2+\omega^2}$	$\cos \omega t$	$\cos \omega kT$	$\frac{1-z^{-1} \cos \omega T}{1-2z^{-1} \cos \omega T + z^{-2}}$
16.	$\frac{\omega}{(s+a)^2+\omega^2}$	$e^{-at} \sin \omega t$	$e^{-akT} \sin \omega kT$	$\frac{e^{-aT} z^{-1} \sin \omega T}{1-2e^{-aT} z^{-1} \cos \omega T + e^{-2aT} z^{-2}}$
17.	$\frac{s+a}{(s+a)^2+\omega^2}$	$e^{-at} \cos \omega t$	$e^{-akT} \cos \omega kT$	$\frac{1-e^{-aT} z^{-1} \cos \omega T}{1-2e^{-aT} z^{-1} \cos \omega T + e^{-2aT} z^{-2}}$
18.	–	–	a^k	$\frac{1}{1-az^{-1}}$
19.	–	–	a^{k-1} $k = 1, 2, 3, \dots$	$\frac{z^{-1}}{1-az^{-1}}$
20.	–	–	ka^{k-1}	$\frac{z^{-1}}{(1-az^{-1})^2}$
21.	–	–	$k^2 a^{k-1}$	$\frac{z^{-1}(1+az^{-1})}{(1-az^{-1})^3}$
22.	–	–	$k^3 a^{k-1}$	$\frac{z^{-1}(1+4az^{-1}+a^2 z^{-2})}{(1-az^{-1})^4}$
23.	–	–	$k^4 a^{k-1}$	$\frac{z^{-1}(1+11az^{-1}+11a^2 z^{-2}+a^3 z^{-3})}{(1-az^{-1})^5}$
24.	–	–	$a^k \cos k\pi$	$\frac{1}{1+az^{-1}}$

$x(t) = 0$ for $t < 0$

$x(kT) = x(k) = 0$ for $k < 0$

Unless otherwise noted, $k = 0, 1, 2, 3, \dots$