



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Électrotechnique
Commande Électrique

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :
HOUHOU GHOFRA NE DOUA - KHERCHOUCHE CHAIMA

Le : mardi 3 juin 2025

La commande adaptative d'un moteur BLDC

Jury :

Dr.	MOHAMED SAHRAOUI	Pr	Université de Biskra	Président
Dr.	OMAR CHARROUF	MCA	Université de Biskra	Rapporteur
Dr.	ISHAQ AMARANI	MCB	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2024/2025



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Électrotechnique
Commande Électrique

Réf. : Entrez la référence du document

La commande adaptative d'un moteur BLDC

Le : mardi 3 juin 2025

Présenté par :

- HOUHOU GHOFRANE DOUA - KHERCHOUCHE CHAIMA

Avis favorable de l'encadreur :

- Dr. OMAR CHARROUF

Signature Avis favorable du Président du Jury

Dr.MOHAMED SAHRAOUI

Cachet et signature

REMERCIEMENTS

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant, le clément le miséricordieux de nous avoir donné la force, la foi et le courage pour réaliser ce modeste travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à **DR.OMAR CHARROUF** , pour sa gentillesse, sa disponibilité, son accueil aimable, sa bienveillance et son guidage qu'il n'a cessé de nous offrir au long de cette étude. Ses encouragements et critiques m'ont permis de surmonter plusieurs désorientations scientifiques au parcours.

Nous remercions aussi **DR. FADI KHETHIRI**, pour son aide généreuse, ses orientations pertinentes et son esprit de collaboration, ainsi que la clarté dans ses explications et son sérieux dans le suivi du projet.

Nos sincères remerciements s'adressent aussi aux membres du jury d'avoir accepté de juger notre travail.

Nous tenons également à exprimer nos reconnaissances envers nos familles, pour leur soutien moral, leurs encouragements constants et leur patience durant cette période cruciale. Sans leur aide précieuse ce travail n'aurait pas été possible.

Enfin, nous adressons nos remerciements à toute autre personne, qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Dédicaces

À mes chers parents pour qui aucune dédicace ne saurait exprimer mon amour éternel, mon plus profond respect et mon immense gratitude. Maman tu es précieuse dans ma vie et indispensable, merci pour tout ce que tu fais pour moi. Papa merci pour ton développement personnel, ta confiance en moi et pour ton encouragement, puisse Dieu, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive. Ce travail est le fruit de vos efforts, et je vous le dédie avec tout mon cœur.

*À mes frères et sœurs sources de ma joie et secret de ma force,
vos encouragements et votre présence rassurante à chaque étape de mon parcours.
Que cette réussite soit aussi la vôtre. Je vous aime profondément.*

À mes belles-sœurs, à vous qui êtes bien plus que des membres de la famille, Merci pour votre douceur, votre gentillesse ! Vous m'avez offert de la chaleur, de l'écoute, et un véritable soutien dans les moments de doutes et de fatigue. Vous êtes dans mon cœur et précieuses.

*À toute la grande famille **HOUHOU ET KHERCHOUCHE**,
pour votre bienveillance, vos encouragements sincères et votre soutien moral.*

À mes meilleures amies, Celles qui m'ont soutenue, écoutée et encouragée dans les moments de doute comme dans les moments de joie. Votre amitié m'est précieuse au-delà des mots.

Ce mémoire est dédié à toutes les personnes chères à mon cœur, qui m'ont portée avec amour et loyauté jusqu'à cette étape de ma vie.

Avec toute notre reconnaissance Houhou Ghofrane et Kherchouche Chaima.

الملخص :

رُكِّزَ هذا العمل المعروف في هذه المذكرة على وصف ونمذجة محرك تيار مستمر بدون فُرُش. لقد تم تطبيق استراتيجية التحكم التكيفي المبنية على النموذج المرجعي من أجل تثبيت سرعة المحرك.

يُعتبر محرك التيار المستمر بدون فُرُش نوعًا من المحركات المتزامنة ذات المعاطب الدائمة، وقد أصبح عنصرًا أساسيًا في العديد من التطبيقات بفضل أدائه العالي. لهذا السبب، قمنا باعتماد استراتيجية التحكم التكيفي المبنية على النموذج المرجعي في هذا العمل. تتيح هذه الاستراتيجية تحليل معلمات وحدة التحكم بشكل ديناميكي حسب ظروف تشغيل النظام. رُكِّزَ هذا العمل المعروف في هذه المذكرة على وصف ونمذجة محرك تيار مستمر بدون فُرُش. لقد تم تطبيق استراتيجية التحكم التكيفي المبنية على النموذج المرجعي من أجل تثبيت سرعة المحرك.

Résumé :

Les travaux présentés dans ce mémoire portent sur la description et la modélisation d'un moteur à courant continu sans balais (BLDC). Nous avons appliqué une commande adaptative de type MRAC (Model Reference Adaptive Control) pour la stabilisation de la vitesse.

Le moteur BLDC, assimilé à un moteur synchrone à aimant permanent, est aujourd'hui largement utilisé dans de nombreuses applications grâce à ses performances supérieures. C'est pourquoi nous avons opté, dans ce travail, pour la mise en œuvre d'une commande adaptative MRAC. Cette stratégie permet d'adapter dynamiquement les paramètres du contrôleur en fonction des conditions de fonctionnement du système. La simulation a été réalisée à l'aide du logiciel Matlab/Simulink. Mots-clés : Moteur BLDC, capteur à effet Hall, régulateur PI, MRAC

Abstract :

The work presented in this thesis focuses on the description and modeling of a Brushless DC (BLDC) motor. A Model Reference Adaptive Control (MRAC) strategy was applied to stabilize the motor speed. The BLDC motor, considered as a permanent magnet synchronous machine, has become an essential component in various applications due to its superior performance. For this reason, we have chosen to implement an adaptive MRAC strategy in our work. This control approach dynamically adjusts the controller parameters according to the operating conditions of the system. The simulation was carried out using the Matlab/Simulink software.

Key words : BLDC motor, Hall Effect sensor, PI regulator, MRAC.

Table des matières

REMERCIEMENTS	1
Dédicaces	2
Résumé	3
Introduction Générale	9
Généralité sur les moteurs électriques de la commande	10
I.1 Introduction	10
I.2 Définition et principe de fonctionnement des moteurs électriques	10
I.2.1 Classification des moteurs électriques	11
I.2.1.1 Machines à courant continu (DC)	11
I.2.1.2 Machines à courant alternatif (AC) :	11
I.3 Le moteur BLDC (Brushless DC Motor) :	12
I.3.1 Principe de fonctionnement d'un moteur BLDC	12
I.4 La Différence entre moteur BLDC et moteur à courant continu classique et pas à pas	13
I.5 Applications industrielles des moteurs BLDC	14
I.5.1 Les moteurs BLDC dans l'Automobile	14
I.5.2 Les Moteur BLDC dans l'industrie	14
I.5.3 Moteur BLDC dans l'aérospatiale	14
I.6 Techniques de commande :	14
I.6.1 La commande vectorielle FOC	15
I.6.2 La Commande directe du couple DTC	15
I.6.3 La Commande à hystérésis	16
I.6.4 La Commande adaptative	17
I.6.4.1 Historique et principe de base	17
I.6.4.2 La Commande par gain programmé (Gain Scheduling)	19
I.6.4.3 Commande adaptative à modèle de référence (MRAC)	20
I.6.5.4 Contrôleurs auto-ajustables (Self-Tuning) :	20
I.6.5.5 Commande duale (Dual control)	21
I.7 Conclusion	21
Modélisation d'un moteur BLDC	22
II.1 Introduction	22
II.2 Structure physique et composants d'un moteur BLDC	22
II.3 Constitution du Moteur BLDC	23
II.4 Le Système de détection de la Position du rotor	24
II.4.1 Capteurs à effet Hall	24
II.5 Principes de fonctionnement moteur BLDC	24
II.6 Modélisation mathématique des moteurs BLDC	25
II.6.1 Les Équations électriques	25
II.6.2 Modélisation mécanique d'un moteur BLDC	28
II.6.3 La Force électromotrice	29
II.7 L'onduleur 3 niveaux (Triphasé) et son fonctionnement avec un moteur BLDC	29

II.8.1 Équations des Tensions de Sortie	30
II.8.1.1 Tension phase-neutre	30
II.8.1.2 Tensions entre phases (ligne-ligne)	30
II.11 Conclusion :	30
Approche de la commande adaptative appliquée au moteur bldc	31
III.1 Introduction	31
III.2 La commande à hystérésis	31
Despription de la commande à hystérésis appliqué au moteur BLDC	31
III.4 Le contrôleur de courant à hystérésis	34
III.5 Conception d'un régulateur de vitesse PI	35
III.5.1 Méthode de Ziegler-Nichols pour le réglage de Kp et Ki	35
III.5 La Commande adaptative	36
III.6 Concept de la commande adaptative	37
III.8 Domaines d'application de la commande adaptative	37
III.9 Commande Adaptative à Modèle de Référence (MRAC)	38
III.9.1 Structures de système MRAC :	39
III.9.2 Conception du controlleur MRAC	40
III.10 La Règle MIT :	40
III.10 Conclusion	42
Résultat du simulation et discussion	43
IV.1 Introduction	43
IV.2 Simulation du commande adaptative d'un moteur BLDC	43
IV.4 Résultat	44
IV.4.1 Essai à vide	44
IV.4.1.1 La réponse de la vitesse en accélération	44
IV.4.1.2 La réponse de la vitesse en décélération	45
IV.4.1.3 L'allure du couple électromagnétique	46
IV.4.1.4 Les allures des signaux à effet hall	46
IV.4.1.5 des courants statoriques	48
IV.4.1.6 Les allures de la force électromotrice	49
IV.4.2 Essai en charge	50
IV.4.2.1 La réponse de la vitesse en accélération	50
IV.4.1 La réponse de la vitesse en décélération	50
IV.4.2.3 L'allure du couple électromagnétique	51
IV.4.2.4 Les allures du signaux à effet HALL	52
IV.4.2.6 Les allures du courant statorique	53
IV.4.2.6 Les allures du force électromotrice	55
IV.5 Discussion et comparaison :	56
IV.6 Conclusion :	56
Conclusion Générale	57
BIBLIOGRAPHY	58

Tableau des figures

I.1 :Le stator et le rotor dans un moteur électrique	11
I.2 Classification des moteurs électriques	12
I.3 : Fonctionnement d'un moteur BLDC	13
I.4 :Types de moteurs utilisés dans les véhicules électriques BLDC	14
I.5 : La Commande vectorielle	15
I.6 : La Commande DTC	16
I.7 La commande à hystérésis	17
I.8 : Le développement de la commande adaptative	18
I.9 La commande adaptative directe	19
I.10 La commande adaptative indirecte	19
I.11 Commande adaptative à modèle de référence (MRAC)	20
I.12 Contrôleurs auto-ajustables	21
II.1 :Les Composant d'un moteur BLDC	23
II.2 Parties principales du moteur BLDC	23
II.3 Capteur à effet hall	24
II.4 Section transversale du moteur BLDC	25
II.5 :Modèle électrique simplifié du BLDC	27
II.6 :Circuit équivalent d'un moteur BLDC triphasé.	27
II.7 :Formes typiques des courants et des FEMs	29

Liste de tableaux

1	I.1 Comparaison entre moteur BLDC,moteur à courant continu classique	
	et moteur pas à pas	13
2	IV.1 Les paramètres du motor BLDC	44

Liste des abréviations

- BLDC : Moteur à courant continu sans balais
- DC : courant continu
- CA : courant alternatif
- FOC : Commande vectorielle
- DTC : Commande directe du couple
- PWM : Modulation de largeur d'impulsion
- MRAC : Commande adaptative à référence de modèle
- PID : régulateur PID
- STR : régulateur auto adaptatif
- LQR : régulateur quadratique linéaire
- Kp : gain proportionnel
- Ki : gain intégral

Introduction Générale

Dans un contexte industriel en constante évolution, où l'efficacité énergétique, la précision de commande et la fiabilité constituent des exigences incontournables, les moteurs électriques jouent un rôle central dans l'automatisation et la motorisation des systèmes. Parmi les différentes technologies de motorisation, les moteurs à courant continu sans balais, plus connus sous le nom de moteurs BLDC (Brushless DC Motors), se distinguent par leurs performances élevées, leur compacité, leur durée de vie accrue et leur maintenance réduite.

L'adoption croissante des moteurs BLDC dans des secteurs variés tels que l'automobile, l'aérospatiale, l'électronique de puissance et la robotique, s'explique principalement par leur capacité à répondre aux exigences modernes de contrôle dynamique tout en offrant un rendement énergétique optimal. Toutefois, la commande de ces moteurs reste un défi majeur en raison de leur nature non linéaire et de la complexité de leur modélisation, notamment dans des environnements soumis à des incertitudes ou à des perturbations.

C'est dans ce cadre que s'inscrit ce travail, qui vise à étudier, modéliser et simuler la commande adaptative appliquée au moteur BLDC, en mettant en évidence l'intérêt de ces techniques pour assurer des performances robustes, quelles que soient les conditions de fonctionnement. La commande adaptative, et plus particulièrement la stratégie MRAC (Model Reference Adaptive Control), se révèle pertinente pour faire face aux variations de paramètres et aux dynamiques complexes des moteurs.

Ce mémoire est structuré de manière progressive :

- Le premier chapitre présente les généralités sur les moteurs électriques et un focus détaillé sur le moteur BLDC, ses principes de fonctionnement, ses applications et les différentes techniques de commande associées.
- Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation du moteur BLDC, en abordant aussi bien les aspects électriques que mécaniques, ainsi que l'intégration de l'onduleur triphasé.
- Le troisième chapitre introduit la commande adaptative, ses concepts fondamentaux, ses différentes structures, ainsi que sa mise en œuvre appliquée au moteur BLDC à travers la technique MRAC.
- Enfin, le quatrième chapitre présente les résultats de simulation obtenus, accompagnés d'une analyse approfondie sur les performances du système en régime transitoire et permanent, en fonctionnement à vide et en charge.

CHAPITRE I : Généralité sur les moteurs électriques de la commande

I.1 Introduction :

Les moteurs électriques convertissent l'énergie électrique en énergie mécanique pour entraîner divers systèmes. Ils sont largement utilisés pour leur efficacité, leur fiabilité et leur capacité à être contrôlés avec précision.

Dans ce premier chapitre, nous présentons les moteurs électriques utilisés dans les systèmes de commande. Nous débuterons par une étude des principes de fonctionnement généraux des machines électriques. Une attention particulière sera accordée au moteur à courant continu sans balais (BLDC). Ensuite, on va voir les différentes techniques de commande sera présentée, à la fin la commande adaptative la stratégie de commande adoptée dans ce mémoire.

I.2 Définition et principe de fonctionnement des moteurs électriques :

Les moteurs électriques sont des dispositifs électromécaniques conçus pour convertir l'énergie électrique en énergie mécanique. Cette conversion est rendue possible par l'interaction entre un champ magnétique et un courant électrique, exploitant ainsi les principes de l'électromagnétisme pour générer un mouvement rotatif ou linéaire. Le fonctionnement d'un moteur électrique repose sur l'interaction entre deux composants principaux : le stator et le rotor.

-Stator : Il s'agit de la partie fixe du moteur, composée de bobines conductrices qui créent un champ magnétique lorsqu'un courant électrique les traverse. Ce champ magnétique peut être statique ou rotatif, selon le type de moteur utilisé.

-Rotor : C'est la partie mobile du moteur, qui tourne à l'intérieur du stator. Le rotor peut être constitué d'aimants permanents ou de bobines alimentées en courant. Lorsque le champ magnétique du stator interagit avec celui du rotor, cela entraîne la rotation du rotor. Les moteurs électriques peuvent fonctionner avec du courant continu (CC) ou du courant alternatif (CA), chacun ayant ses propres applications et caractéristiques. Voici une figure qui représente le stator et le rotor dans un moteur électrique.

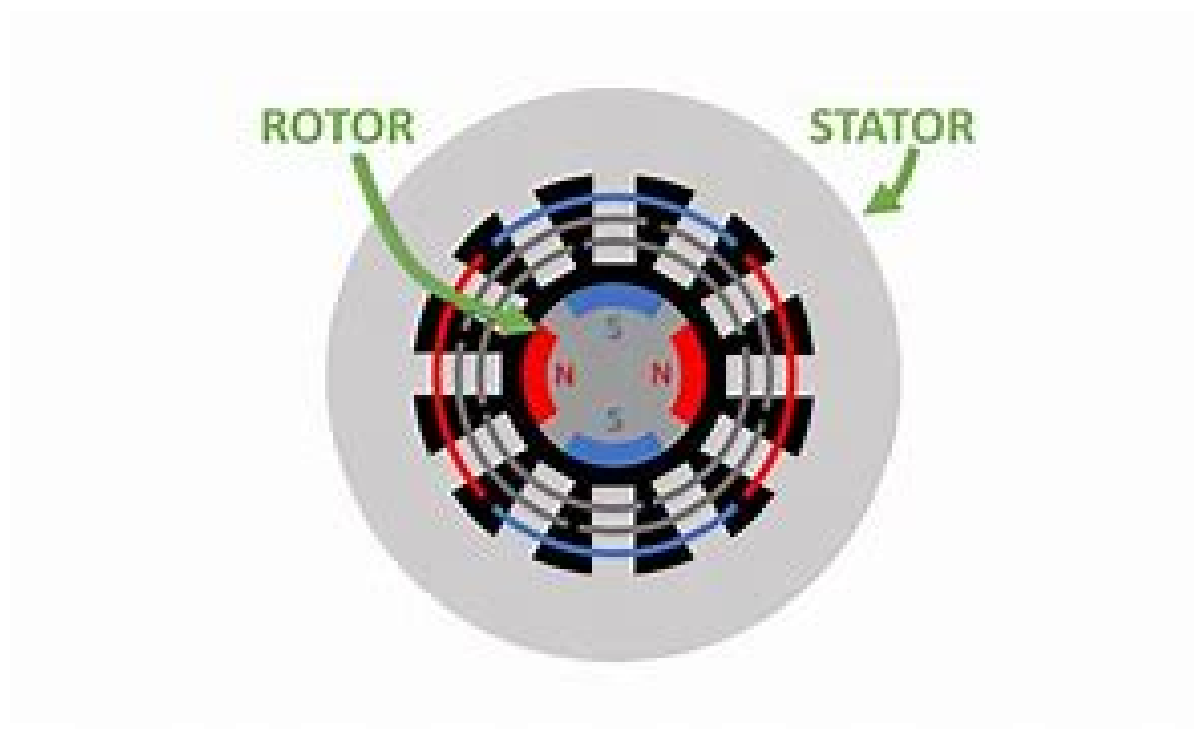


FIGURE – I.1 :Le stator et le rotor dans un moteur électrique

I.2.1 Classification des moteurs électriques :

Les moteurs électriques peuvent être regroupés en deux grandes familles : les machines à courant continu et les machines à courant alternatif, chacune subdivisée selon son principe de fonctionnement et ses caractéristiques spécifiques [1].

I.2.1.1 Machines à courant continu (DC) :

Les moteurs à courant continu sont alimentés par un courant unidirectionnel. Ils sont largement appréciés pour leur facilité de commande, notamment dans les applications nécessitant un contrôle précis de la vitesse et un couple élevé à faible vitesse. Leur vitesse peut être ajustée en modulant la tension d'alimentation ou le flux d'excitation [2].

On distingue principalement quatre types selon le mode d'excitation :

- Moteur à excitation indépendante.
- Moteur à excitation série.
- Moteur à excitation parallèle.
- Moteur à excitation composée.

I.2.1.2 Machines à courant alternatif (AC) :

Les moteurs à courant alternatif sont les plus courants dans l'industrie grâce à leur simplicité, leur robustesse et leur faible coût d'entretien. Ils sont alimentés en courant monophasé ou triphasé et se déclinent en deux grandes catégories : les moteurs asynchrones et les moteurs synchrones [3].

- Moteurs asynchrones :

Le moteur asynchrone tire son nom du fait que la vitesse de rotation de son rotor est différente de celle du champ magnétique tournant du stator. Il existe trois variantes :

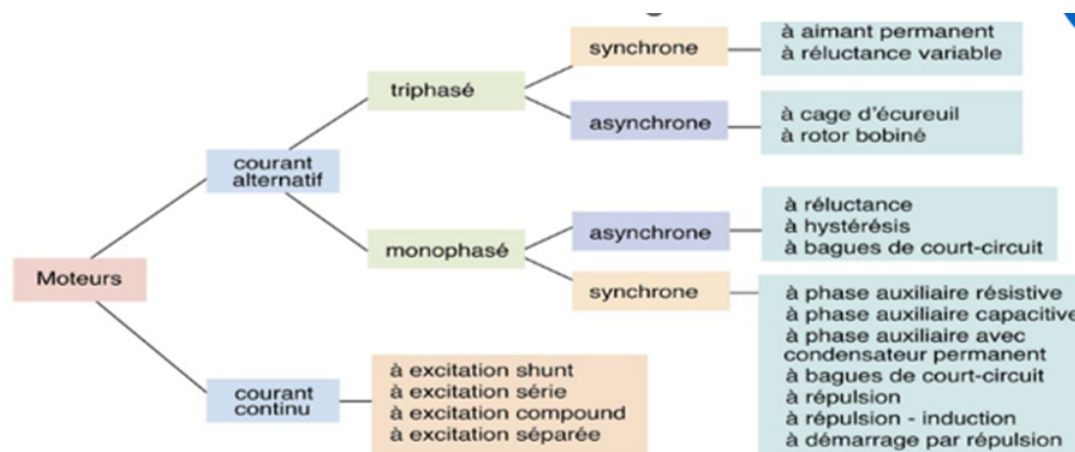


FIGURE – I.2 Classification des moteurs électriques

- Moteur à rotor en court-circuit (cage).
- Moteur à rotor bobiné.
- Moteur à rotor massif.

Ces moteurs sont largement utilisés pour leur fiabilité, leur simplicité de conception et leur faible coût. Toutefois, le contrôle de leur vitesse et de leur couple nécessite souvent l'utilisation de variateurs électroniques.

- Moteurs synchrones :

Le moteur synchrone fonctionne à une vitesse constante, exactement égale à celle du champ tournant. Cette propriété le rend particulièrement adapté aux applications nécessitant une régulation fine de la vitesse. Le rotor peut être à aimants permanents ou bobiné. Ce type de moteur est de plus en plus présent dans les domaines des énergies renouvelables, de la robotique et de la traction électrique [4].

I.3 Le moteur BLDC (Brushless DC Motor) :

De nos jours, les moteurs à courant continu sans balais à aimants permanents (BLDC) gagnent en popularité. Ils s'imposent comme une solution idéale pour répondre aux exigences croissantes des applications modernes, que ce soit en termes de durée de vie, de fiabilité, de compacité, de légèreté, de rendement énergétique, de faible niveau sonore ou encore de précision dans le contrôle du débit (asservissement). En anglais, on les désigne sous le nom de Brushless Direct Current (BLDC).

I.3.1 Principe de fonctionnement d'un moteur BLDC :

Le moteur brushless fonctionne à partir de trois sources de tensions variables, fournies par un onduleur, et permettant de générer un champ magnétique tournant. Le rotor, généralement équipé d'un aimant permanent, tend à suivre le champ magnétique tournant.

Dans le cas simple du moteur BLDC, à chaque commutation, deux phases sont reliées respectivement à la tension d'alimentation et à la masse, et une phase n'est pas connectée. Prenons l'exemple de la figure, la phase A n'est pas reliée, la phase B est reliée à la tension d'alimentation et la phase C est reliée à la masse. Un courant parcourt les bobines de B vers C et génère un champ magnétique statorique $\vec{B}$ dans le moteur dirigé suivant $\vec{y}_s$. Le rotor supporte un aimant dont le moment magnétique $\vec{m}$, orienté du sud vers le

nord, tend à s'aligner avec le champ magnétique statorique en tournant dans le sens trigonométrique. Dès que le rotor s'approchera de $\vec{y}_s$, la commutation sera modifiée pour faire circuler le courant de B vers A, le champ magnétique statorique $\vec{B}$ tourne de $\pi/6$, de façon à attirer le rotor et pour suivre la rotation dans le sens trigonométrique.

L'angle entre $\vec{m}$ et $\vec{B}$ à un couple magnétique. Voici une figure qui représente le moteur BLDC comment il fonctionne

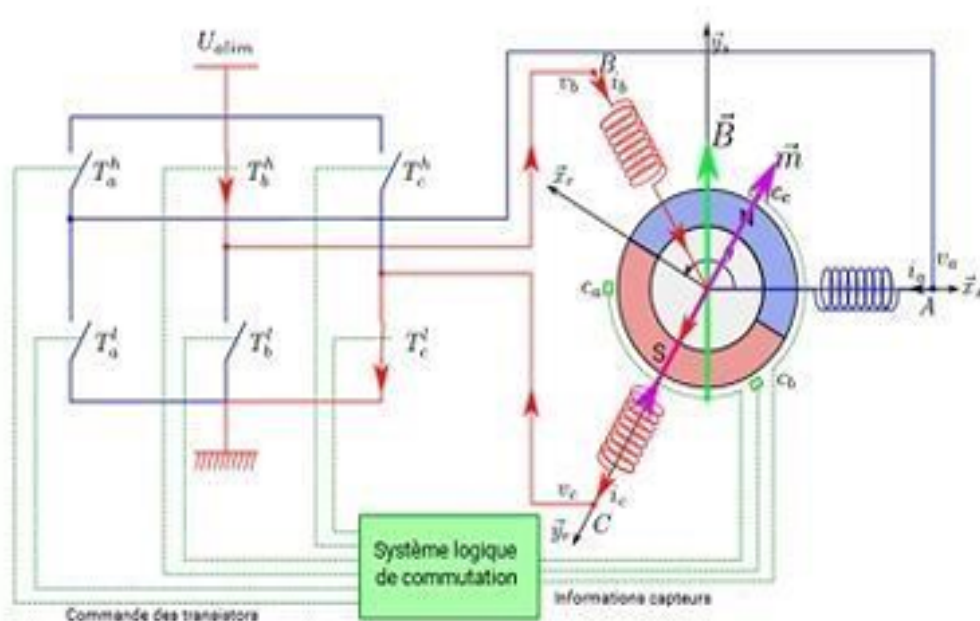


FIGURE – I.3 : Fonctionnement d'un moteur BLDC

I.4 La Différence entre moteur BLDC et moteur à courant continu classique et moteur pas à pas :

Voici le tableau I.1 qui représente la différence entre le moteur BLDC , moteur CC. et moteur pas à pas .

TABLE 1 – I.1 Comparaison entre moteur BLDC, moteur à courant continu classique et moteur pas à pas

Caractéristiques	Moteur à courant continu classique	Moteur BLDC (brushless DC)	Moteur pas à pas
Commutation	Mécanique (balais+ collecteur)	Electronique	Electronique
Présence de balais	Oui	No	No
Durée de vie	Plus courte	Plus longue	Longue
Efficacité énergétique	Moyenne	Élevée	Modérée
Bruit de fonctionnement	Plus élevée (frottements)	Faible (pas de balais)	Elevée
Structure des enroulements	Rotor bobiné	Stator bobiné	Complexe
Coût initial	Moins cher	Plus cher	Faible

I.5 Applications industrielles des moteurs BLDC :

Les moteurs, BLDC, sont utilisés dans plusieurs domaines d'application. On prend soins de citer certains d'entre eux qui sont :

I.5.1 Les moteurs BLDC dans l'Automobile :

Les véhicules automobiles intègrent de plus en plus de moteurs BLDC pour améliorer leur efficacité énergétique et répondre aux exigences environnementales. Ces moteurs sont utilisés dans divers systèmes comme la climatisation, les essuie-glaces ou les sièges motorisés. En particulier, la climatisation bénéficie d'une meilleure performance grâce à ces moteurs. L'évolution de l'électronique de puissance et de l'automatisation a permis d'optimiser la commande des BLDC. Cependant, les capteurs de position posent des problèmes de coût, fiabilité et encombrement. Ainsi, les commandes sans capteurs apparaissent comme une solution prometteuse pour l'automobile.



FIGURE – I.4 :Types de moteurs utilisés dans les véhicules électriques BLDC

I.5.2 Les Moteur BLDC dans l'industrie :

Les moteurs BLDC sont de plus en plus utilisés dans l'industrie pour leurs performances et leur efficacité, remplaçant les moteurs pas à pas et les servomoteurs DC. Ils sont particulièrement adaptés aux applications à haute puissance et aux environnements exigeants. On les retrouve dans les systèmes robotiques, les ascenseurs sans engrenage et les laminoirs. Ils offrent une réponse rapide, une bonne régulation de vitesse et une faible erreur de suivi.

I.5.3 Moteur BLDC dans l'aérospatiale :

Dans l'aérospatiale, les moteurs BLDC remplacent les systèmes pneumatiques et hydrauliques grâce à leur compacité, simplicité et capacité à fonctionner sans capteurs. Ils sont idéaux pour les applications où l'espace et le poids sont limités, comme les pompes ou caméras embarquées. Capables d'atteindre plus de 100 000 tr/min, ils offrent une régulation précise et une réponse rapide. Toutefois, leur usage requiert une rigueur accrue sur les plans mécanique et électrique pour garantir fiabilité et performance.

I.6 Techniques de commande :

Plusieurs techniques de commande peuvent être utilisées pour générer la tension alternative à partir de l'onduleur à deux niveaux. Ces techniques jouent un rôle crucial

dans le contrôle efficace et précis des machines électriques, en particulier les moteurs BLDC. Voici les principales méthodes utilisées :

I.6.1 La commande vectorielle FOC :

La commande vectorielle est une technique plus avancée, souvent utilisée pour les moteurs synchrones, les moteurs BLDC avec détection de position ou capteurs de Hall. Elle repose sur la transformation des grandeurs triphasées (abc) vers un référentiel tournant (dq) à l'aide des transformations de Clarke et Park. Les avantages clés de la commande vectorielle sont : -Contrôle indépendant du couple et du flux : ce qui permet des performances dynamiques similaires à celles des moteurs à courant continu.

-Amélioration de la réponse dynamique : en permettant une régulation plus rapide du couple et de la vitesse.

-Compatibilité avec le contrôle adaptatif : la commande vectorielle est souvent la base pour implémenter des contrôles plus intelligents comme les régulateurs PI, DTC (Direct Torque Control), ou même des techniques de commande prédictive.

Cependant, cette méthode nécessite :

-Une bonne connaissance des paramètres du moteur ;

-Une mesure précise de la position du rotor (ou une estimation fiable)

-Une puissance de calcul plus élevée. Voici une figure qui représente la commande vectorielle .

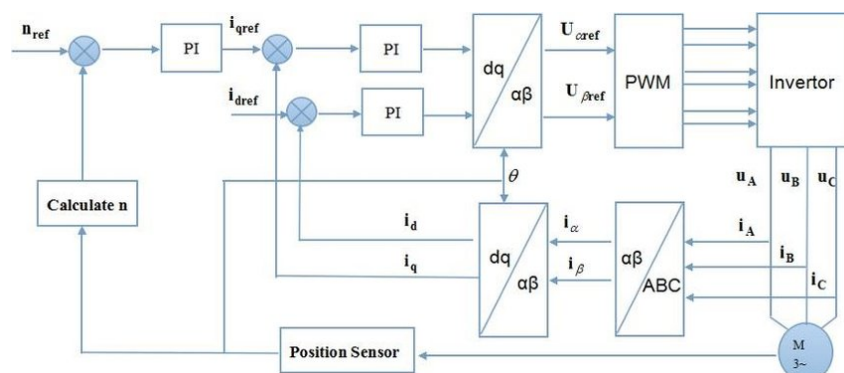


FIGURE – I.5 : La Commande vectorielle

I.6.2 La Commande directe du couple DTC :

La commande directe du couple est une stratégie avancée qui vise à contrôler directement le couple et le flux magnétique du moteur, sans passer par une modulation classique comme la PWM. Elle se base sur l'évaluation instantanée de ces deux grandeurs à partir des mesures de tension et de courant, puis sur le choix optimal des états de commutation de l'onduleur. Les caractéristiques principales de la DTC sont :

-Réponse très rapide : grâce au contrôle direct sans boucle de régulation intermédiaire.

-Absence de transformation complexe : contrairement à la commande vectorielle, elle n'utilise pas nécessairement les transformations de Park/Clarke.

-Meilleure robustesse face aux variations des paramètres moteurs, car elle ne dépend pas fortement de leur modélisation précise. Voici une figure qui représente la commande DTC .

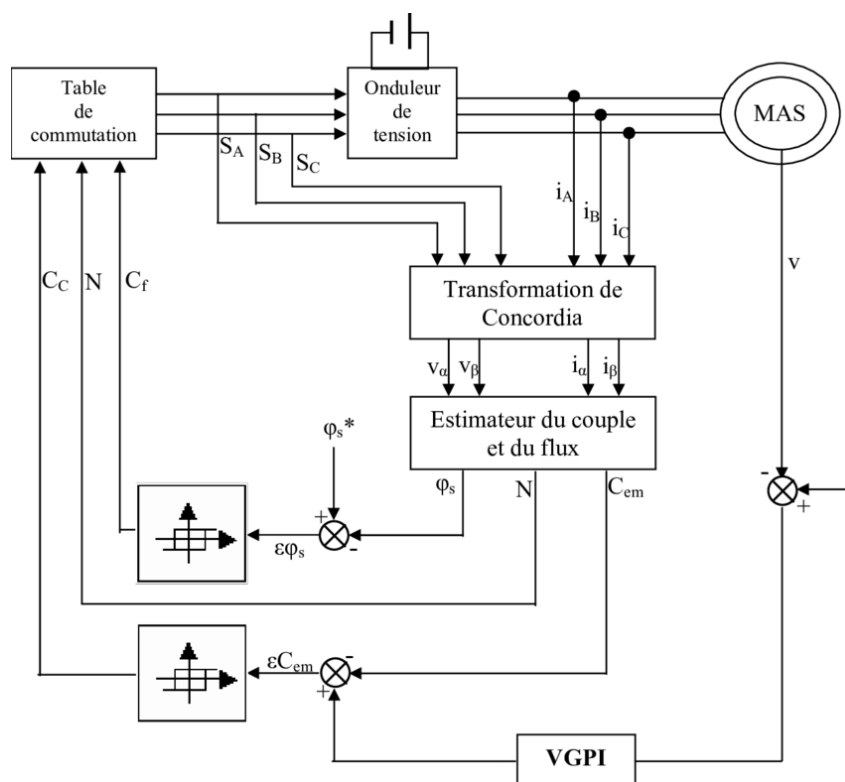


FIGURE – I.6 : La Commande DTC

I.6.3 La Commande à hystérésis :

La commande à hystérésis est une méthode simple de contrôle du courant ou du couple qui repose sur un comparateur à seuils. Le principe est de maintenir la grandeur (courant ou couple) dans une bande prédéfinie autour de la consigne. Ses avantages sont :

- Simplicité de mise en œuvre : pas besoin de modulateur complexe.
- Très bonne réponse dynamique : en particulier pour des variations rapides de charge.

Cependant :

- La fréquence de commutation est variable : ce qui complique la conception des filtres et peut rendre la méthode incompatible avec certaines exigences EMI.
- Génère un bruit de commutation plus élevé, et est généralement moins efficace en termes de rendement énergétique.

Voici une figure qui représente la commande à hystérésis(I.8)

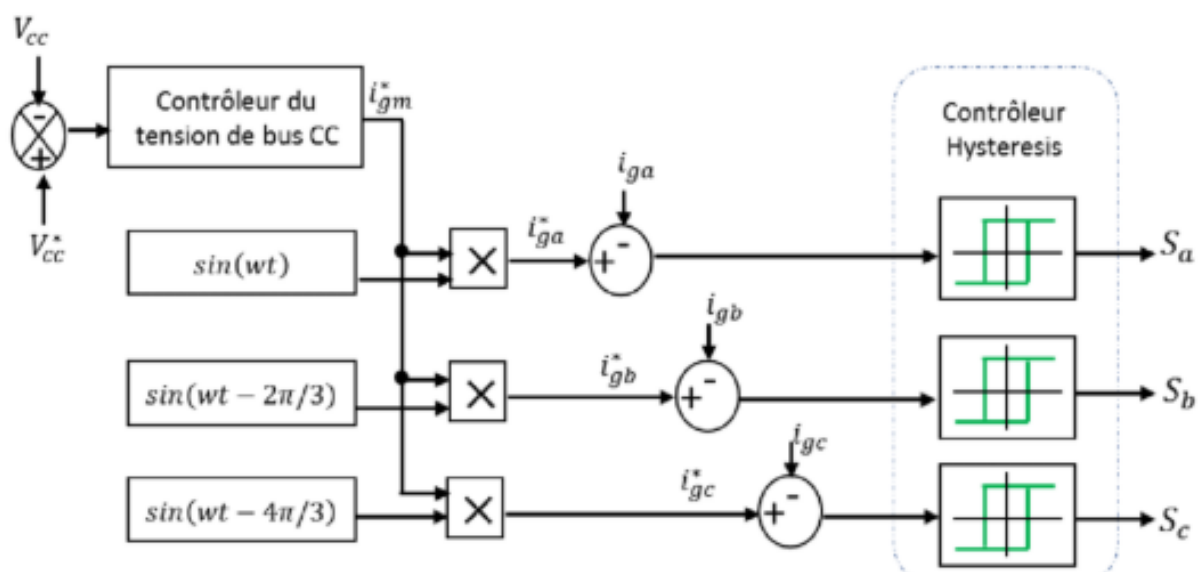


FIGURE – I.7 La commande à hystérésis

I.6.4 La Commande adaptative :

I.6.4.1 Historique et principe de base :

La commande adaptative a vu le jour dans les années 1950 en réponse à la nécessité de contrôler des systèmes évoluant dans des environnements dynamiques et incertains. Son développement s'est accéléré dans les années 1960, soutenu par d'importantes avancées théoriques, notamment en analyse dans l'espace d'état, en théorie de la stabilité, en commande stochastique et en programmation dynamique. Dans les années 1970, l'intégration de techniques d'estimation a renforcé l'efficacité des stratégies adaptatives. Puis, à partir des années 1980, les recherches se sont concentrées sur l'analyse de la stabilité des lois de commande adaptative, tandis que les progrès rapides en microélectronique ont rendu possible leur implémentation sur des systèmes embarqués, notamment à l'aide de microprocesseurs.[6] La figure (I.9) résume le développement de la commande adaptative.

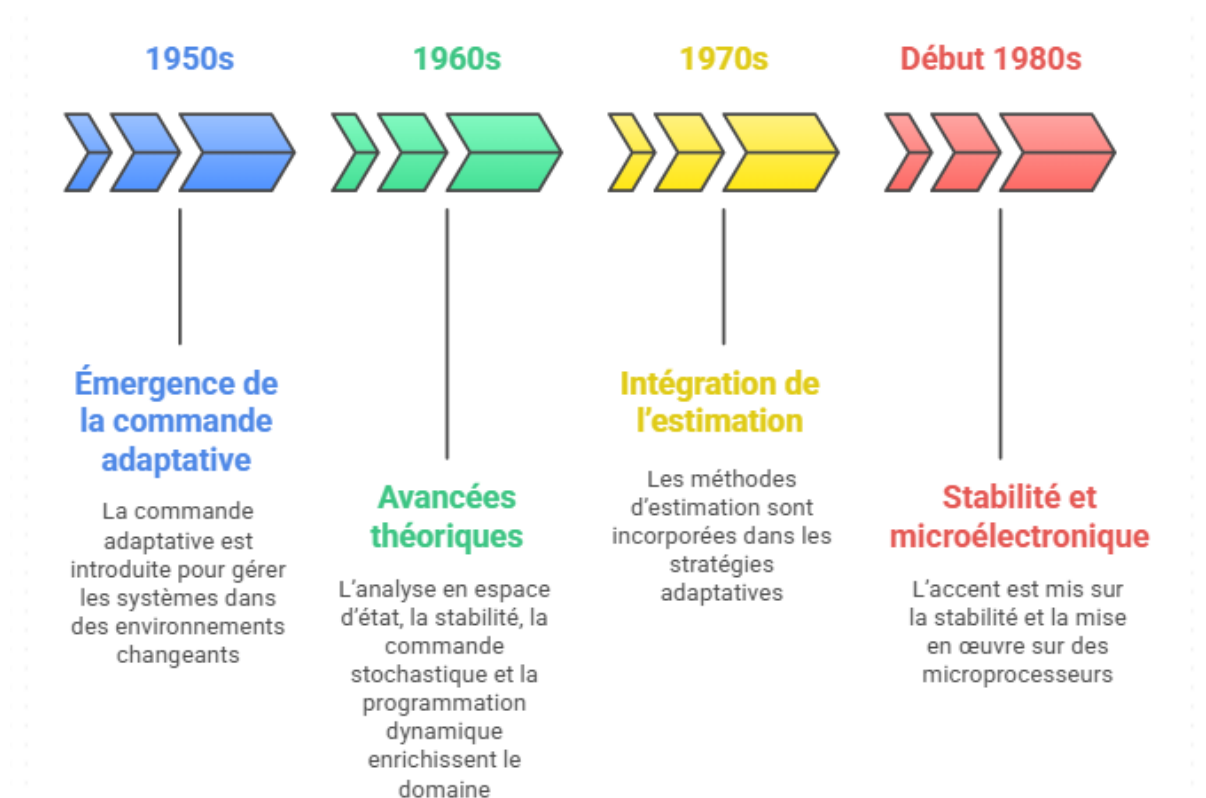


FIGURE – I.8 : Le développement de la commande adaptative

L'adaptation d'un système à son environnement consiste à sa capacité à réagir aux changements ou perturbations qui peuvent affecter cet environnement. Avec l'évolution de l'automatique moderne, il est devenu évident qu'un régulateur fixe ne permet pas toujours d'obtenir un comportement satisfaisant du système dans toutes les situations. Cela est particulièrement vrai lorsque les paramètres du processus à contrôler varient au cours du temps. Dans de tels cas, concevoir un régulateur fixe capable de répondre en permanence aux spécifications devient une tâche complexe.

La commande adaptative vise justement à pallier ce problème. Elle a pour objectif d'ajuster en temps réel le comportement du système afin de maintenir une performance optimale généralement en minimisant l'écart entre la consigne et la sortie malgré les variations internes ou externes. On distingue principalement deux grandes approches dans les stratégies de commande adaptative : [6]

- La commande adaptative directe
- La commande adaptative indirecte

1-Commande adaptative directe :

La commande adaptative directe ajuste directement les paramètres du régulateur sans passer par une identification explicite des paramètres du système. Une seule étape suffit pour adapter la commande en fonction de l'erreur. Cette méthode est généralement plus rapide et bien adaptée aux applications en temps réel.

La performance du système est définie par un modèle de référence choisi à l'avance. L'objectif est de faire suivre au système le comportement de ce modèle de manière cohérente avec ses capacités.

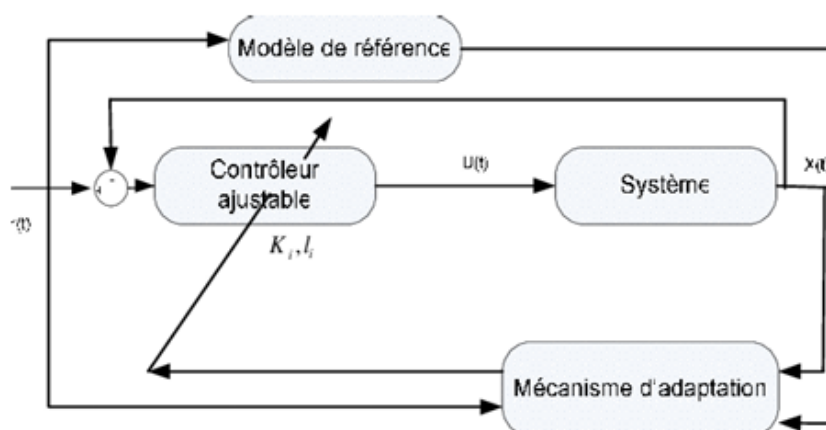


FIGURE – I.9 La commande adaptative directe

2-La commande adaptative indirecte :

Cette méthode repose sur l'estimation en temps réel du modèle du système. Une fois le modèle identifié, il est utilisé pour recalculer un régulateur répondant aux spécifications souhaitées.

Le régulateur est donc ajusté de manière indirecte, à partir du modèle mis à jour. Ce type de commande est largement utilisé en pratique, notamment dans les systèmes à grande échelle. On parle souvent de commande adaptative indirecte avec reconnaissance de modèle (MIAC).[7]

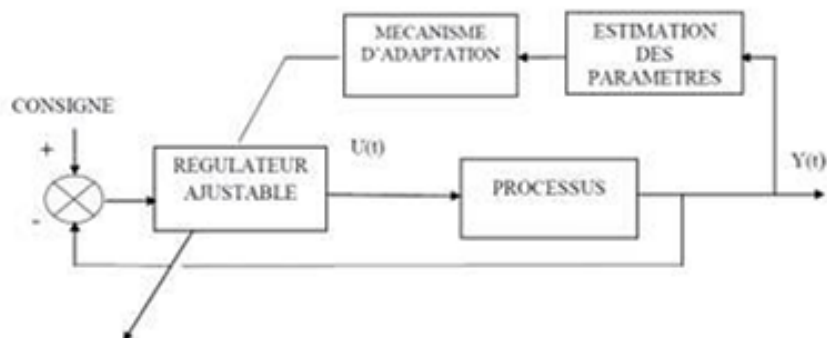


FIGURE – I.10 La commande adaptative indirecte

Il existe quatre principaux types d'approche de commande adaptative

I.6.4.2 La Commande par gain programmé (Gain Scheduling) :

Cette méthode consiste à utiliser une table de correspondance et une logique de décision pour détecter le point de fonctionnement du système, puis sélectionner les gains du régulateur adaptés à ce point. Les variations du système sont ainsi compensées en ajustant les gains en fonction des mesures d'entrée, de sortie ou autres variables. Son principal avantage est la rapidité d'adaptation.

Toutefois, des ajustements trop fréquents ou rapides peuvent provoquer de l'instabilité, ce qui impose des limites sur la vitesse de modification des gains.

I.6.4.3 Commande adaptative à modèle de référence (MRAC) :

Dans cette approche, le régulateur est ajusté de façon à ce que le système suive le comportement d'un modèle de référence prédéfini. La loi de commande adaptative est conçue pour minimiser l'écart entre la sortie réelle et celle du modèle. Cela permet au système de conserver une performance souhaitée, même en présence de perturbations ou de variations dynamiques. L'objectif est donc d'imiter fidèlement la réponse du modèle de référence. Ce type de commande est courant dans les systèmes soumis à des incertitudes.[7]

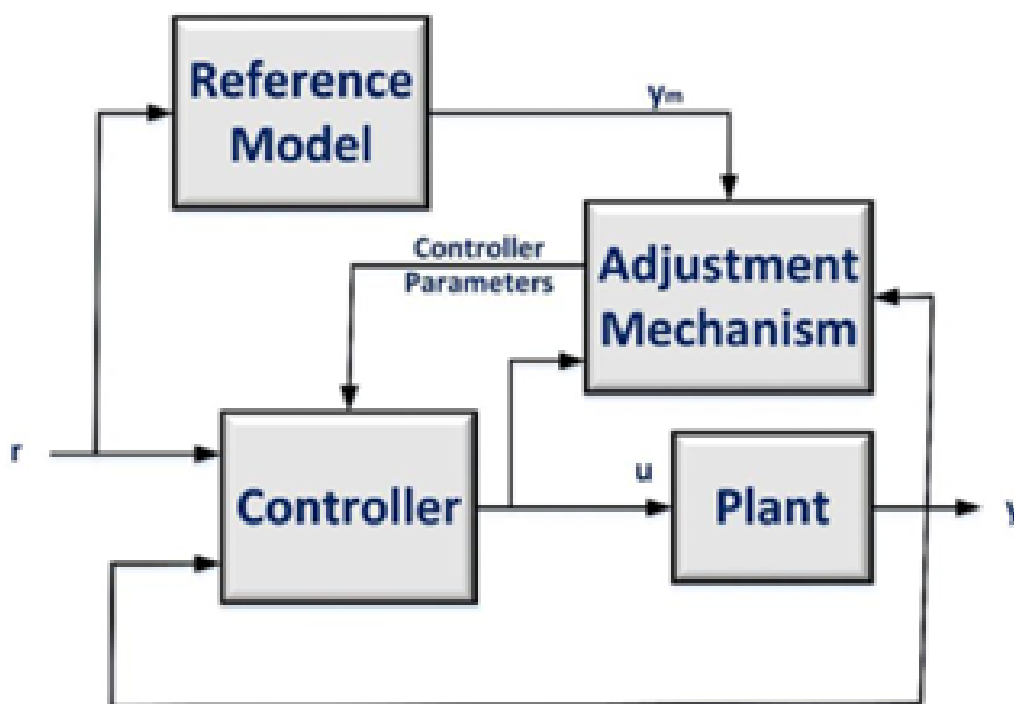


FIGURE – I.11 Commande adaptative à modèle de référence (MRAC)

I.6.4.4 Contrôleurs auto-ajustables (Self-Tuning) :

Ce type de commande, classé parmi les approches adaptatives indirectes, repose sur l'estimation des paramètres du système pour ajuster ceux du régulateur. L'architecture comprend deux boucles : une boucle de commande interne et une boucle externe dédiée à l'ajustement automatique des paramètres. Le contrôleur se reconfigure ainsi en temps réel pour garantir la performance en boucle fermée. Cette approche est flexible, permettant de combiner différents types de contrôleurs et estimateurs, comme PID-STR ou LQR-STR. [8]

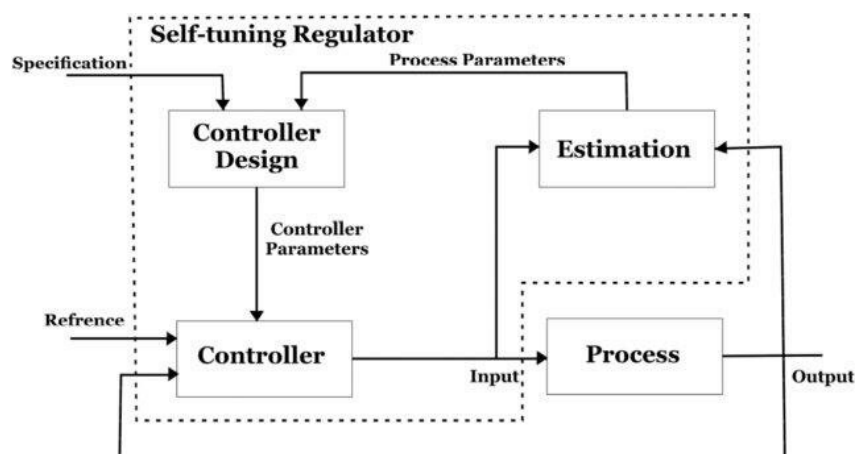


FIGURE – I.12 Contrôleurs auto-ajustables

I.6.4.5 Commande duale (Dual control) :

Contrairement aux approches précédentes, la commande duale prend en compte les incertitudes liées à l'estimation des paramètres (du contrôleur ou du système), considérées comme stochastiques. Elle vise simultanément à contrôler le système et à améliorer l'estimation des paramètres. Cependant, en raison de sa complexité théorique et de sa mise en œuvre difficile, cette approche reste peu appliquée dans la pratique. [9]

- Domaines d'application :

La commande adaptative est particulièrement utile dans les systèmes présentant des incertitudes ou des variations de paramètres. Elle permet de maintenir la stabilité et les performances sans connaissance précise du modèle. Ses domaines d'application incluent :

- Aéronautique et spatial : contrôle d'avions, drones et satellites soumis à des variations de masse et de conditions aérodynamiques.

- Automobile : régulation moteur, suspensions actives, régulateurs adaptatifs selon les conditions de conduite.

- Robotique : adaptation à des charges variables ou à des environnements changeants.

- Systèmes électriques : contrôle de moteurs (ex. : BLDC), convertisseurs, et réseaux intelligents soumis à des perturbations.

- Énergies renouvelables : optimisation de la production dans des conditions climatiques variables.

- Industrie des procédés : maintien de la performance malgré des changements de conditions ou d'intrants.

- Applications biomédicales : adaptation aux besoins spécifiques des patients dans les dispositifs médicaux.

I.7 Conclusion :

Dans ce premier chapitre, on a vu les généralités sur les moteurs électriques, en mettant en lumière d'abord sur ses principes de fonctionnements et ses classifications. Parmi ces différents types de moteurs on a parlé sur le moteur Brushless à courant continu (BLDC) s'est imposé comme une solution moderne et performante, grâce à sa structure sans balais, sa commutation électronique, et on a vu plusieurs technique de commande ont été présentées, son développement , on va voir maintenant dans le chapitre suivant la modélisation du moteur BLDC.

CHAPITRE II : Modélisation d'un moteur BLDC

II.1 Introduction :

Aujourd'hui, les moteurs à courant continu sans balais à aimants permanents (BLDC) connaissent un essor croissant. Ils s'imposent comme une solution idéale pour les applications modernes, de plus en plus exigeantes en matière de fiabilité, de longévité, de compacité, de légèreté, de rendement énergétique, de faible niveau sonore et de capacité de régulation.

Ce chapitre parle sur le moteur BLDC, en commençant par son principe de fonctionnement, sa structure. Nous avons mis en lumière sur la modélisation mathématique du moteur à travers ses équations électriques et mécaniques. Enfin, l'onduleur à 3 bras, pour piloter le moteur, a également été modélisé. Cette base théorique est essentielle pour aborder les méthodes de commande développées dans les chapitres suivants.

II.2 Structure physique et composants d'un moteur BLDC :

Un moteur BLDC (Brushless DC) est un moteur synchrone à aimants permanents sans balais, où la commutation est assurée électroniquement, ce qui améliore la fiabilité et le rendement. Selon la figure II.1, un moteur BLDC est composé de plusieurs éléments essentiels, chacun jouant un rôle fondamental dans son fonctionnement :

- Stator :

Le stator est constitué de bobinages en cuivre enroulés autour de noyaux en acier feuilleté. Ces bobines sont organisées par phases et génèrent le champ magnétique nécessaire à l'interaction avec le rotor [10]

- Rotor :

Le rotor intègre des aimants permanents, généralement en néodyme ou en ferrite, qui créent un champ magnétique. Ce champ interagit avec celui du stator pour produire le couple moteur et entraîner la rotation [11].

- Roulements :

Le rotor repose sur des roulements, souvent à billes, pour permettre une rotation fluide et stable.

- Boîtier du moteur :

L'ensemble du moteur peut être protégé par un carter qui empêche l'intrusion de poussières ou d'humidité, tout en assurant un support mécanique solide.[12]

- Capteurs à effet Hall :

L'effet Hall est un phénomène physique découvert par Edwin Hall en 1879. Il se manifeste lorsqu'un courant électrique circule dans un conducteur ou un semi-conducteur placé dans un champ magnétique perpendiculaire : une tension apparaît perpendiculairement au courant et au champ magnétique.

Cette tension est appelée tension de Hall. De nombreux moteurs BLDC sont équipés de capteurs à effet Hall. Ces dispositifs détectent la position angulaire du rotor et envoient des signaux au contrôleur électronique, permettant une commutation précise des phases.

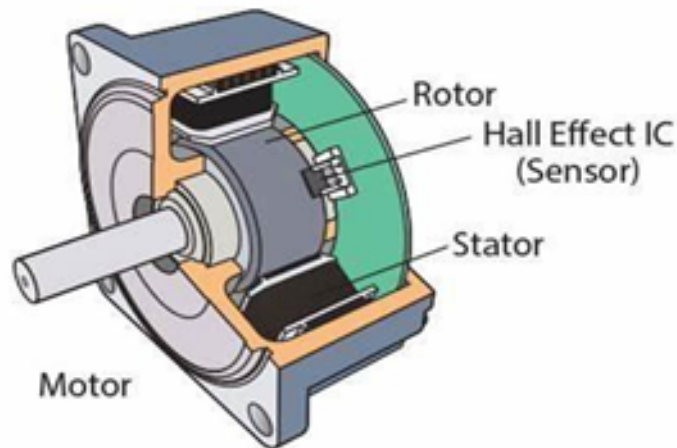


FIGURE – II.1 :Les Composant d'un moteur BLDC

II.3 Constitution du Moteur BLDC :

Le moteur BLDC est défini comme une combinaison de la machine à courant alternatif (machine synchrone) avec un commutateur électronique et les capteurs de position du rotor. Ce type de moteur est caractérisé par une caractéristique mécanique linéaire mais, par rapport au moteur classique à courant continu il ne contient pas le commutateur mécanique et les balais. Le moteur à courant alternatif a des enroulements polyphasés sur le stator et les aimants permanents sur le rotor [13] .

Les parties principales du moteur BLDC, représentées sur figure II.2 sont :

- Moteur synchrone (ayant en général trois phases)
- Circuit de commutation électronique. Le moteur est alimenté par une source de courant continu à travers une commutation Electronique[14].

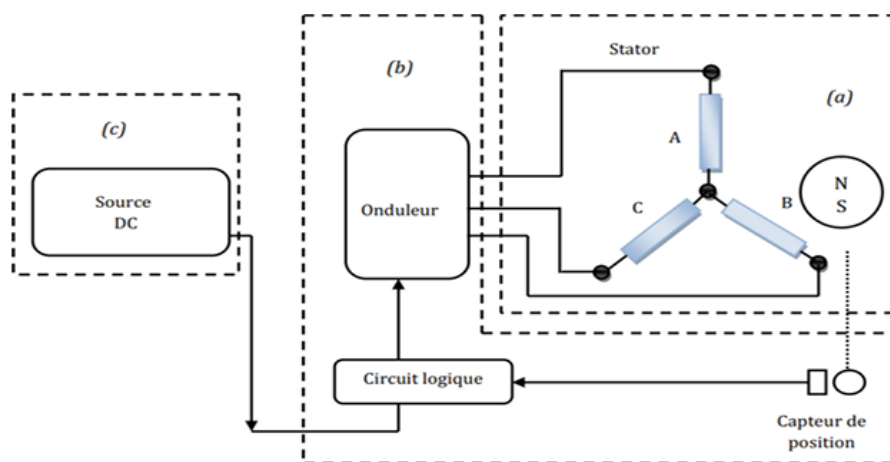


FIGURE – II.2 Parties principales du moteur BLDC

II.4 Le Système de détection de la position du rotor :

Le capteur de position du rotor est une partie intégrée au moteur BLDC. La détection de la position du rotor peut être réalisée par deux méthodes :

- sans capteur (sensorless)
- avec le capteur.

Pour la dernière méthode, les capteurs électro-optiques (capteurs d'effet de Hall 89 du nom de celui qui remarqua le phénomène en 1879) et le dispositif le plus généralement utilisé.

II.4.1 Capteurs à effet Hall :

Contrairement à un moteur à courant continu balayé, la commutation d'un moteur BLDC est commandée électroniquement. Pour faire tourner le moteur BLDC, les enroulements de stator doivent être activés dans une séquence. Il est important de connaître la position du rotor afin de comprendre ce qui enroulement sera mis sous tension après la séquence d'excitation. La position du rotor est détectée en utilisant des capteurs à effet Hall intégrés dans le stator.

La plupart des moteurs BLDC ont trois capteurs de Hall intégrés dans le stator sur le côté opposé à l'entraînement du moteur. Chaque fois que les pôles magnétiques du rotor passent près des capteurs à effet Hall, ils donnent un signal haut ou bas, indiquant le N ou le pôle S passant à proximité des capteurs. Sur la base de la combinaison de ces trois signaux de capteurs de hall, la séquence exacte de commutation peut être déterminée [15].

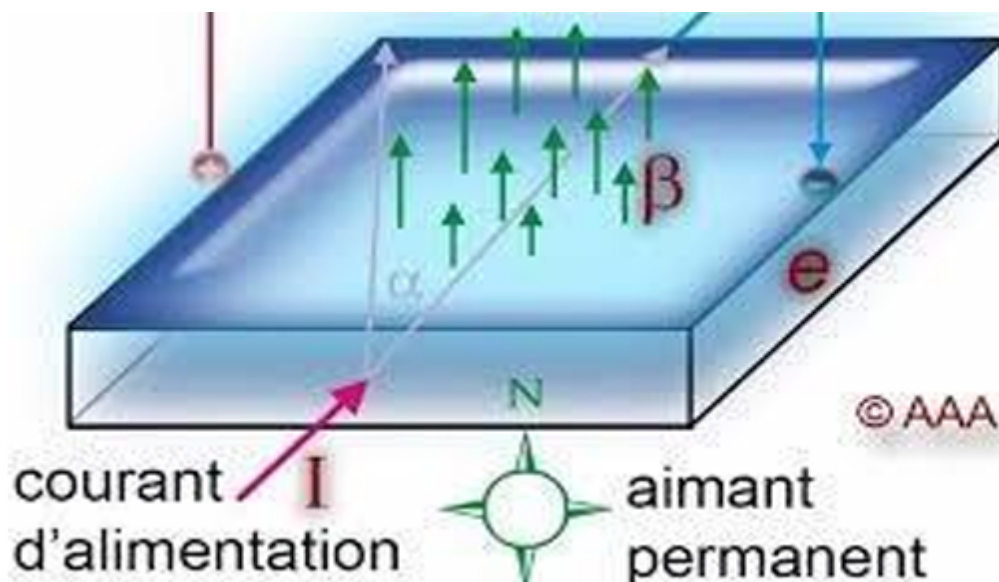


FIGURE – II.3 Capteur à effet hall

II.5 Principes de fonctionnement moteur BLDC :

Le moteur BLDC triphasé fonctionne selon une logique d'alimentation à deux phases actives. À chaque instant, deux phases sont alimentées pour générer le couple maximal, tandis que le troisième reste désactivé. Le choix des phases activées dépend de la position

angulaire du rotor, détectée par des capteurs de position. Ces capteurs génèrent un code binaire à trois bits (H1, H2, H3), qui se modifie tous les 60° électriques.

La Figure II.4 présente une coupe transversale d'un moteur triphasé connecté en étoile, accompagnée de la séquence d'alimentation des phases [16]. Chaque phase d'alimentation commence lorsque les champs magnétiques du rotor et du stator sont espacés de 120° , et se termine lorsque cet écart atteint 60° . Le couple est maximal lorsque ces champs sont perpendiculaires [17]. La commutation du courant est réalisée grâce à un onduleur à six étapes. Bien que les interrupteurs soient représentés sous forme de transistors bipolaires (BJT), les MOSFET sont en réalité plus couramment utilisés. .

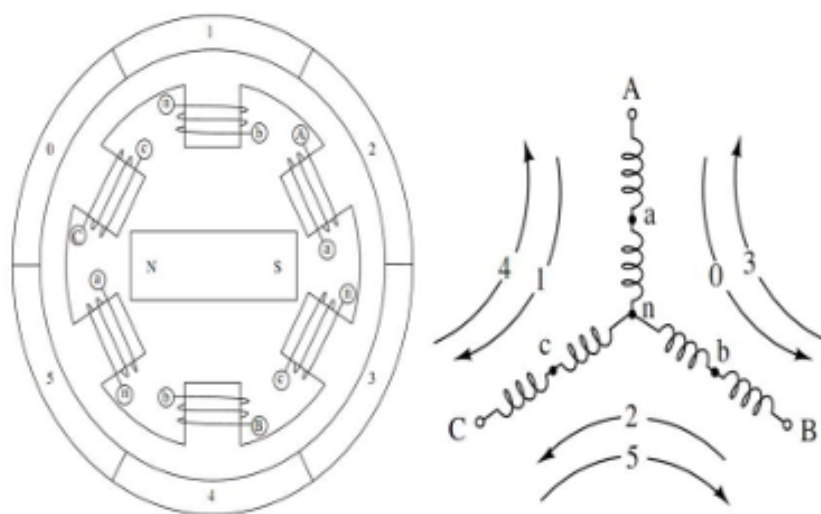


FIGURE – II.4 Section transversale du moteur BLDC

II.6 Modélisation mathématique des moteurs BLDC :

Le modèle mathématique d'un moteur BLDC (Brushless DC) constitue un outil fondamental pour analyser son comportement, concevoir des stratégies de commande efficaces et assurer un contrôle précis. Il permet de simuler le fonctionnement du moteur sous diverses conditions, ce qui facilite les étapes d'optimisation et de régulation .

Un moteur BLDC triphasé possède trois enroulements statoriques, dont deux sont activés simultanément afin de générer un champ magnétique tournant. L'ordre d'excitation des phases du stator doit suivre une séquence rigoureuse, déterminée par la position angulaire des aimants permanents du rotor .

Le modèle mathématique est établi en tenant compte des hypothèses suivantes :

- Le stator est constitué d'un bobinage connecté en étoile (configuration Y), avec des enroulements à pas complet et de type concentré.
- Le rotor est de type intérieur, sans pôles saillants.
- Trois capteurs à effet Hall sont disposés de façon symétrique, avec un décalage angulaire de 120° entre eux.[18]

II.6.1 Les Équations électriques :

Les Équations Électriques qui régissent le fonctionnement du moteur BLDC sont données par les équations suivantes :

$$\vec{V} = [\mathbf{R}] \vec{I} + \frac{d\vec{\varphi}_M}{dt} \quad (1)$$

$$\vec{\varphi} = [\mathbf{L}] \vec{I} + \vec{\varphi}_M \quad (2)$$

Où :

$\vec{V}$, $\vec{\varphi}$ et $\vec{I}$ sont des vecteurs représentant la tension, le courant et le flux magnétique pour chaque phase respectivement.

$\vec{\varphi}_M$: est le vecteur du flux magnétique créé par l'aimant permanent ;

$[R]$ et $[L]$ sont les matrices résistances et inductances de la machine données par les matrices (3) et (4)

$$[\mathbf{R}] = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[\mathbf{L}] = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Les variables d'états sous forme matricielle sont données :

$$\vec{V} = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, \quad \vec{I} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, \quad \vec{\varphi} = \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix}, \quad \vec{\varphi}_M = \begin{bmatrix} \varphi_{Ma} \\ \varphi_{Mb} \\ \varphi_{Mc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_0 \cos \theta \\ \varphi_0 \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \varphi_0 \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Où :

φ_0 : L'amplitude du flux magnétique créé par l'aimant permanent. θ : l'angle électrique.

Alors :

$$\vec{V} = [R] \vec{I} + \frac{d}{dt} ([L] \vec{I} + \vec{\varphi}) \quad (6)$$

$$\vec{V} = [R] \vec{I} + \frac{d}{dt} \left([L] \vec{I} + \frac{d\vec{\varphi}_M}{dt} \right) \quad (7)$$

$$\vec{E}_p = \frac{d\vec{\varphi}_M}{dt} \quad (8)$$

E_p : représente la force électromotrice.

Le vecteur des tensions aux bornes des trois phases est donné par :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L & M & L \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

Voici une figure qui représente le Modèle électrique simplifié du BLDC

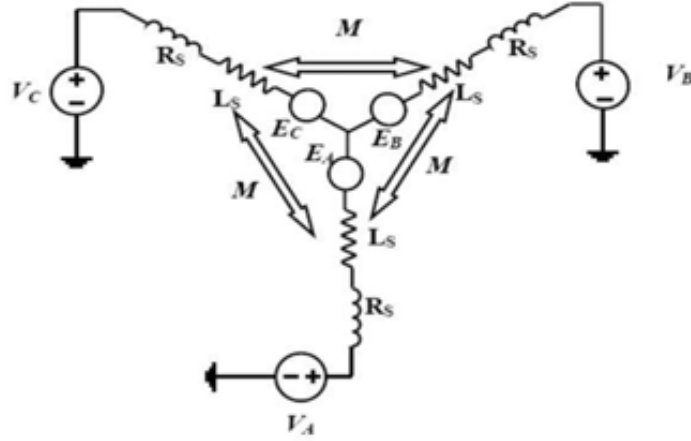


FIGURE – II.5 :Modèle électrique simplifié du BLDC

Le circuit équivalent du moteur BLDC est basé sur la relation courant-tension dans un stator, comme illustré à la Fig.6

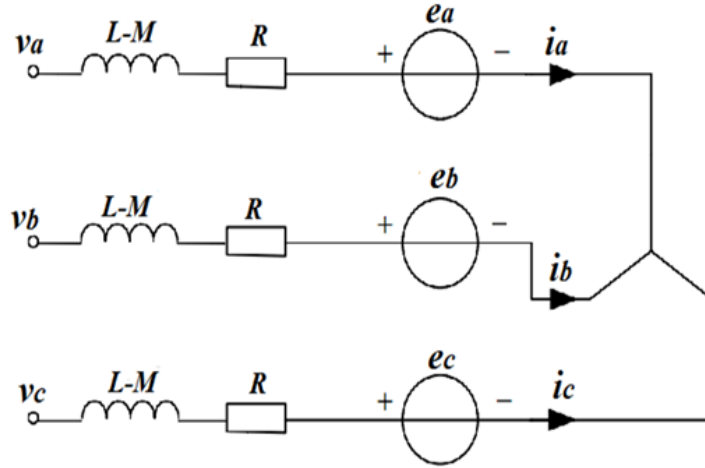


FIGURE – II.6 :Circuit équivalent d'un moteur BLDC triphasé.

La position électrique (θ) du rotor se déduit directement de la position mécanique du rotor (θ_r) mesurée par le capteur) par :

$$\theta = p\theta_r \quad (10)$$

Où :

p : est le nombre de paires de pôles du moteur, par conséquent, l'expression de la vitesse électrique est donnée par :

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = p \frac{d\theta_r}{dt} = p\omega_r \quad (11)$$

Les mutualités et les inductances sont des grandeurs invariantes pour les aimants permanents attachés sur surface cylindrique du rotor, lorsque les enroulements sont symétriques, les inductances propres sont fournies avec précision par :

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} \quad (12)$$

Et les inductances mutuelles sont également identiques données par :

$$L_{ab} = L_{ba} = L_{ac} = L_{ca} = L_{bc} = L_{cb} = M \quad (13)$$

Les équations sous la forme matricielle exprimée par :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L & M & L \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (14)$$

Puisque les enroulements du stator sont couplés en étoile, la somme des trois courants de phase est nulle :

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (15)$$

Alors :

$$i_a + i_b = -i_c \quad (16)$$

Par conséquent, la tension prend la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (17)$$

$e_a = f_a(\theta) \cdot k_e \cdot \omega_r$ force électromotrice de la phase a.

$e_b = f_b(\theta)$ ke wr la force électromotrice de la phase b.

$e_c = f_c(\theta)$ ke wr la force électromotrice de la phase c.

Avec :

Ke : est le coefficient de la force électromotrice

II.6.2 Modélisation mécanique d'un moteur BLDC :

La modélisation mécanique d'un moteur BLDC est essentielle pour comprendre son comportement dynamique et concevoir des systèmes de contrôle efficaces. Cette modélisation se concentre sur les aspects mécaniques du moteur, tels que l'inertie, le frottement et le couple. La dynamique du rotor est définie par l'équation suivante

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = C_e - f\omega_r - C_r \quad (18)$$

ω_r : est la vitesse angulaire en rad/s

C_e : est le couple électromagnétique développé en N/m ;

C_r : est le couple de charge en N/m

f : est le coefficient de frottement en N(m/rad)

II.6.3 La Force électromotrice :

La force électromotrice induite est déterminée par la position angulaire de l'aimant, c'est à dire du rotor, il est très important de remarquer que la valeur crête de la FEM est directement proportionnelle à la vitesse angulaire instantanée du rotor[19] :

$$\vec{E}_p = k_e \omega_r \quad (19)$$

Les formes typiques des FEMs induites et des courants dans les trois phases sont illustrées par la figure II.7

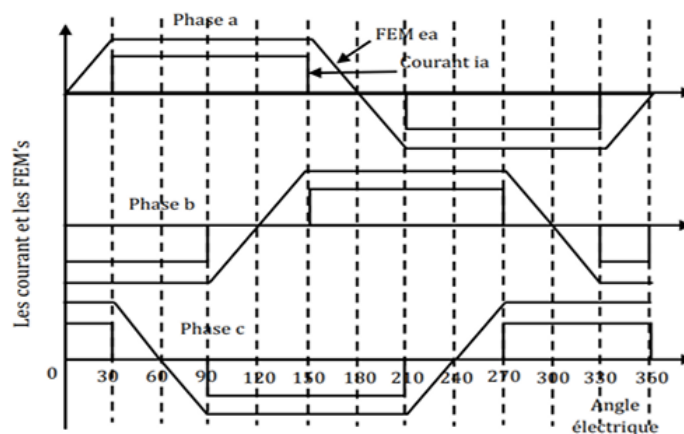


FIGURE – II.7 :Formes typiques des courants et des FEMs

II.7 L'onduleur 3 niveaux (IGBT) et son fonctionnement avec un moteur BLDC :

Un onduleur 3 niveaux est utilisé pour les applications de puissance moyenne à élevée. Il génère trois niveaux de tension : $+V_{dc}/2, 0, -V_{dc}/2$. Cela permet d'obtenir une tension plus proche d'une sinusoïde qu'un onduleur 2 niveaux. Il réduit les pertes par commutation et les harmoniques. Cela améliore le rendement et les performances du moteur.

Le moteur BLDC est alimenté généralement en commutation trapézoïdale, mais avec un onduleur 3 niveaux, on peut viser une commande plus lissée, ce qui améliore :

- le rendement.
- le couple.
- réduit le bruit.

II.8.1 Équations des Tensions de Sortie :

Les tensions de phase (V_{an}, V_{bn}, V_{cn}) sont générées par modulation PWM et dépendent des états des interrupteurs (0=ouvert, 1=fermé) :

II.8.1.1 Tension phase-neutre

Voici l'équation de la tension phase neutre :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{V_{dc}}{3}(2S_1 - S_3 - S_5) \\ V_{bn} = \frac{V_{dc}}{3}(2S_3 - S_1 - S_5) \\ V_{cn} = \frac{V_{dc}}{3}(2S_5 - S_1 - S_3) \end{cases}$$

II.8.1.2 Tensions entre phases (ligne-ligne) :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{an} - V_{bn} \\ V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} \\ V_{ca} = V_{cn} - V_{an} \end{cases}$$

II.9 Conclusion:

Ce chapitre a permis de mieux comprendre le moteur BLDC, en commençant par sa structure ,son principe de fonctionnement. Nous avons ensuite établi la modélisation mathématique du moteur à travers ses équations électriques et mécaniques et électromotrice. Enfin, l'onduleur multiniveaux, Cette base théorique est essentielle pour aborder les méthodes de commande développées dans les chapitres suivants.

CHAPITRE III: Approche de la commande adaptative appliquée au moteur bldc

III.1 Introduction:

Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur la commande adaptative MRAC au moteur brushless à courant continu (BLDC), à l'aide de la règle d'adaptation MIT. Cette règle permet la mise à jour continue des paramètres du contrôleur de manière à minimiser l'erreur entre le système réel et le modèle de référence, tout en garantissant une stabilité et une performance accrues.

III.2 La commande à hystérésis:

La commande à hystérésis est une technique de contrôle utilisée dans les moteurs BLDC pour générer les signaux de commande des interrupteurs de l'onduleur. Elle maintient le courant dans une bande de tolérance autour de la valeur de consigne. Lorsque le courant dépasse cette bande, les interrupteurs changent d'état pour corriger la trajectoire.

Le but de la commande à hystérésis est de contrôler le courant dans chaque phase du moteur afin de la maintenir dans une plage définie autour de la consigne. C'est une commande rapide et robuste souvent utilisée dans les entraînements BLDC.

III.3 Description de la commande à hystérésis appliqué au moteur BLDC :

La commande de vitesse d'un moteur à courant continu sans balais (BLDC) est généralement réalisée à l'aide d'une double boucle : une boucle externe de vitesse et une boucle interne de courant. Le système reçoit une consigne de vitesse w_{ref} qui est comparée à la vitesse réelle w_m , mesurée à l'aide d'un encodeur de position placé sur l'arbre du moteur. L'erreur de vitesse e est traitée par un régulateur proportionnel-intégral (PI) qui génère un courant de référence i_{ref} .

-Ce courant est ensuite transformé, en fonction de la position du rotor $\theta_1(t)$ en courants de référence pour chaque phase du moteur : $i_{a,ref}$, $i_{b,ref}$, $i_{c,ref}$.

-La boucle de courant compare ces consignes aux courants réels i_a , i_b , i_c , mesurés en temps réel. La commande à hystérésis est utilisée pour maintenir les courants dans une bande de tolérance étroite autour de leurs valeurs de consigne. Elle agit directement sur les interrupteurs de l'onduleur afin d'augmenter ou de diminuer la tension appliquée selon que l'erreur dépasse la bande de tolérance définie. Cette stratégie garantit une réponse rapide du système et permet un suivi précis du courant, assurant ainsi un fonctionnement efficace et dynamique du moteur BLDC. La commande de vitesse d'un moteur à courant continu sans balais (BLDC) est généralement réalisée à l'aide d'une double boucle : une boucle externe de vitesse et une boucle interne de courant. Le système reçoit une consigne de vitesse

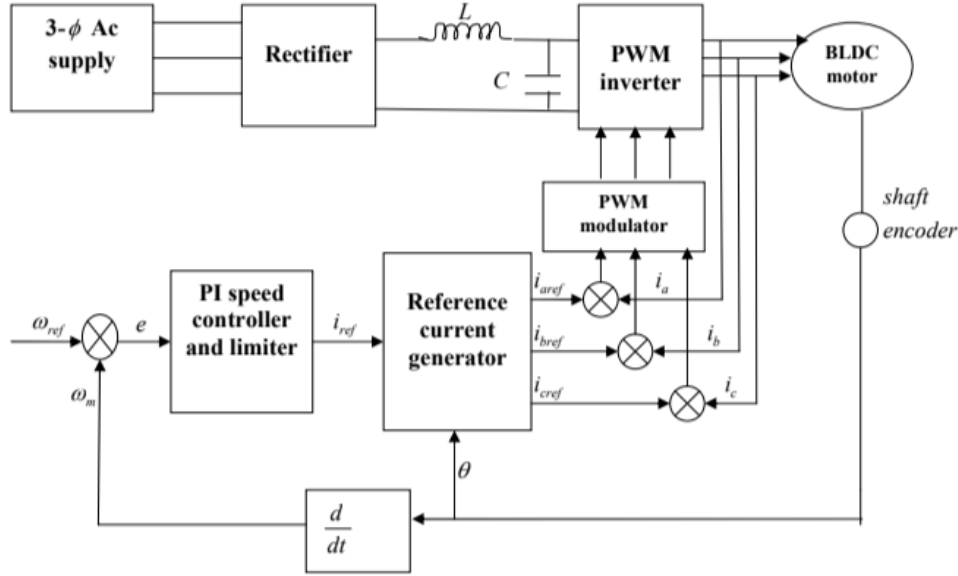


Figure III.1 Schéma block de Régulateur de Vitesse de l'entraînement BLDC par hystérésis

On peut calculer le Courant de Référence comme suit la valeur du courant de référence triphasé i_{ref} est déterminée à partir du couple de référence T_{ref} afin d'assurer la production du couple requis par le moteur.

$$i_{ref} = \frac{T_{ref}}{K_t} \quad (20)$$

En fonction de la position du rotor, le bloc générateur de courants de référence produit les courants triphasés de référence i_a^* , i_b^* et i_c^* à partir de la valeur de i_{ref} .

Ces courants de référence sont ensuite envoyés au contrôleur de courant pour assurer une commutation appropriée. Les courants de référence pour chaque phase sont donc fonction de la position du rotor.

La commutation électronique dans les moteurs BLDC consiste à activer séquentiellement les enroulements du stator pour créer un champ magnétique rotatif qui entraîne le rotor. Il existe principalement deux techniques de commutation :

- Commutation à 6 étapes (Six-Step Commutation) :

-Principe : Cette technique est la plus courante et la plus simple à mettre en œuvre. Elle divise le cycle électrique en six étapes, chaque étape durant 60 degrés électriques.

-Séquence : À chaque étape, deux enroulements sont alimentés simultanément (un enroulement est alimenté avec un courant positif, l'autre avec un courant négatif), tandis que le troisième enroulement est laissé flottant. La séquence de commutation est déterminée par la position du rotor, généralement détectée par des capteurs à effet Hall.

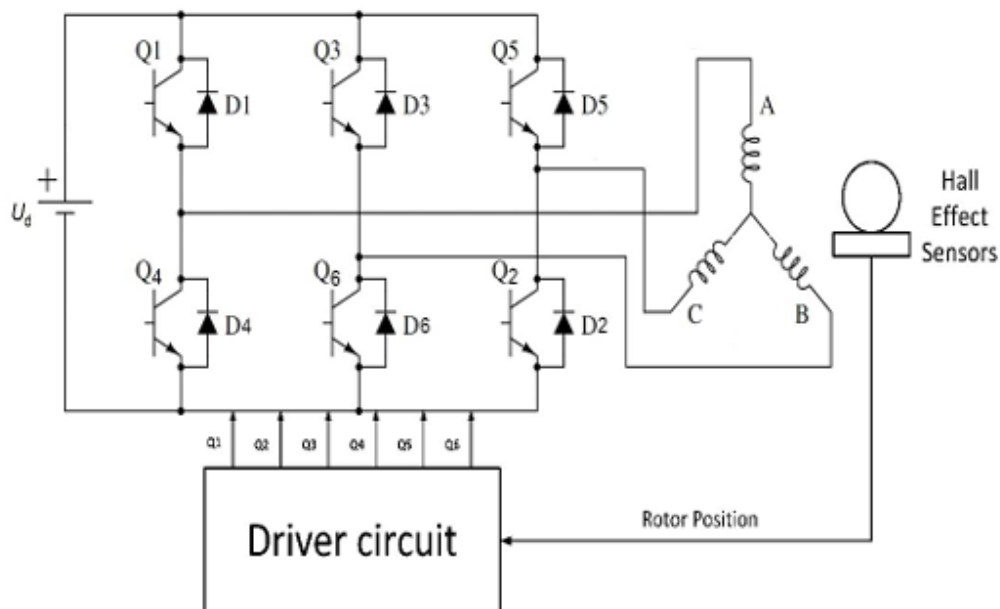
-Avantages : Simplicité de mise en œuvre, faible coût.

-Inconvénients : Couple ondulé plus élevé, moins de contrôle sur le courant.

• Séquences de commutation : La séquence de commutation précise dépend du type de moteur BLDC et de la configuration des capteurs de position. Voici

un exemple de séquence de commutation pour un moteur BLDC à 3 phases avec des capteurs à effet Hall :

Voici figure III.2 montre schéma simplifié d'un système d'entraînement BLDC



FigureIII.2 : schéma simplifié d'un système d'entraînement BLDC

La figure III.3 résume la séquence de commutation , le sens du courant et les signaux des capteur de position

Switching Interval	Sequence Number	Position Sensor			Switch Closed	Phase Current		
		H1	H2	H3		A	B	C
0°– 60°	0	1	0	0	Q1 - Q6	+	-	Off
60°-120°	1	1	1	0	Q1 – Q2	+	Off	-
120°- 180°	2	0	1	0	Q3 – Q2	Off	+	-
180°-240°	3	0	1	1	Q3 – Q4	-	+	Off
240°-300°	4	0	0	1	Q5 – Q4	-	Off	+
300°-360°	5	1	0	1	Q5 – Q6	Off	-	+

FigureIII.3 La séquence de commutation

- 1 : Niveau haut
- 0 : Niveau bas
- + : Courant positif
- : Courant négatif
- 0 : Pas de courant

- Ce table indique l'état des capteurs à effet Hall et la direction du courant dans chaque phase à chaque étape de la commutation.
- Chaque transition correspond à un changement d'état du rotor.
- Le sens de rotation dépend de l'ordre de la séquence.
- En inversant l'ordre, on inverse le sens de rotation.

III.4 Le contrôleur de courant à hystérésis :

Le contrôleur de courant à hystérésis contribue à la génération des signaux de commutation pour l'onduleur. La modulation de largeur d'impulsion à bande d'hystérésis (hysteresis-band PWM) est une méthode de commande en courant basée sur une rétroaction instantanée. Le courant réel suit en permanence le courant de référence à l'intérieur d'une bande d'hystérésis. La figure III.1 illustre le principe de fonctionnement de cette méthode dans le cas d'un onduleur demi-pont. Le circuit de commande génère un courant de référence sinusoïdal qui est comparé au courant de phase réel.

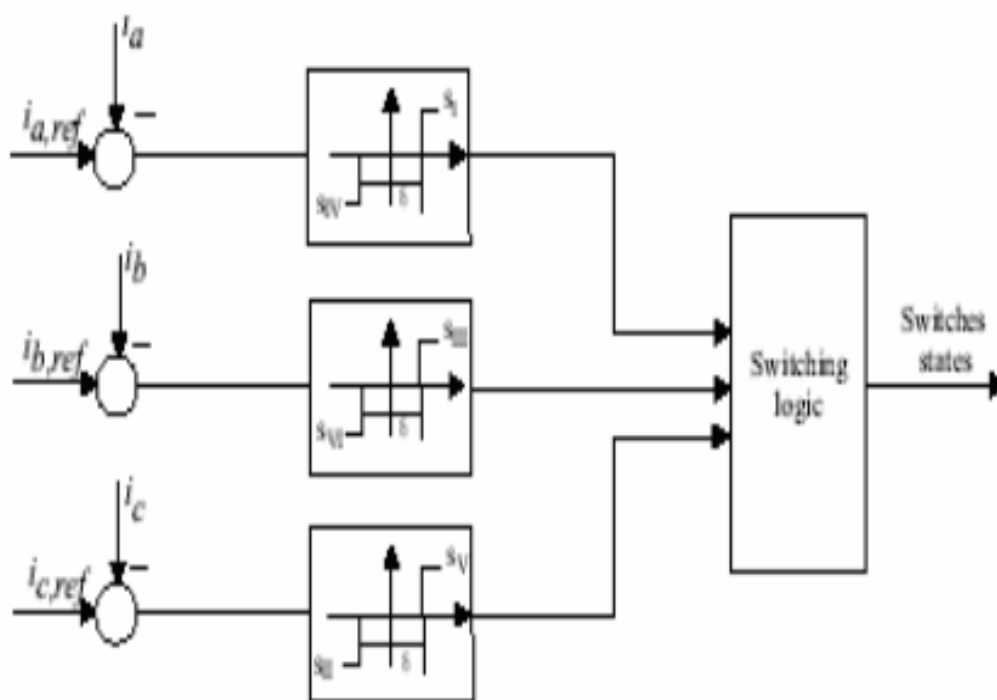


Figure III.4 Structure du contrôleur du courant PWM.

Lorsque le courant dépasse la limite supérieure de la bande d'hystérésis, l'interrupteur supérieur s'éteint et l'interrupteur inférieur s'allume. Inversement, lorsque le courant descend sous la limite inférieure, l'interrupteur supérieur s'allume et l'interrupteur inférieur s'éteint. Ce principe de commutation est appliqué de la même manière aux autres phases du moteur.

La logique de commutation est formulée comme suit :

- Si $i_a < (i_a^* - h_b)$ Interrupteur 1 ON, Interrupteur 4 OFF $S_a = 1$.
- Si $i_a < (i_a^* + h_b)$ Interrupteur 1 OFF, Interrupteur 4 ON $S_a = 0$.

- Si $i_b < (i_b^* - h_b)$ Interrupteur 3 OFF, Interrupteur 6 ON $S_b=0$.
- Si $i_b < (i_b^* + h_b)$ Interrupteur 3 OFF, Interrupteur 6 ON $S_b=1$.
- Si $i_c < (i_c^* - h_b)$ Interrupteur 5 OFF, Interrupteur 2 ON $S_c=0$.
- Si $i_c < (i_c^* + h_b)$ Interrupteur 5 OFF, Interrupteur 2 ON $S_c=1$.

où: h_b représente la bande d'hystérésis autour des courants de référence des trois phases. Selon les conditions de commutation décrites ci-dessus, les tensions de sortie de l'onduleur sont données comme suit :

$$\begin{aligned} v_a &= \frac{1}{3}(2S_A - S_B - S_C) \\ v_b &= \frac{1}{3}(-S_A + 2S_B - S_C) \\ v_c &= \frac{1}{3}(-S_A - S_B + 2S_C) \end{aligned}$$

III.5 Conception d'un régulateur de vitesse PI:

Un régulateur proportionnel-intégral (PI) est un mécanisme de boucle de rétroaction utilisé dans les systèmes de contrôle industriels. Dans un processus industriel, un régulateur PI cherche à corriger l'erreur entre une variable mesurée du processus et une consigne souhaitée en calculant puis en appliquant une action corrective qui permet d'ajuster le processus en conséquence.

Le calcul du régulateur PI repose sur deux modes distincts : le mode proportionnel et le mode intégral. Le mode proportionnel détermine la réaction à l'erreur actuelle, tandis que le mode intégral détermine la réaction basée sur les erreurs passées. La somme pondérée de ces deux modes est appliquée comme action corrective à l'élément de commande. Le régulateur PI est largement utilisé dans l'industrie en raison de sa simplicité de conception et de sa structure simple.

$$output(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (21)$$

Où :

$e(t)$ = valeur réelle calculée

III.5.1 Méthode de Ziegler-Nichols pour le réglage de K_p et K_i :

Cette méthode empirique permet d'ajuster les paramètres du contrôleur PI en fonction de la réponse du système :

- Appliquer un échelon d'entrée et observer la réponse du système.
- Identifier deux paramètres
- Temps de retard L : délai avant que la sortie commence à réagir.
- Constante de temps T : temps nécessaire pour atteindre 63% de la réponse finale.

Calculer les gains du contrôleur selon les formules

$$K_p = 0.9 \times \frac{T}{L}$$

$$K_i = \frac{0.3}{L}$$

Ces réglages assurent un bon compromis entre rapidité et stabilité du système.

III.6 La Commande adaptative :

La commande adaptative est une stratégie de régulation conçue pour les systèmes dont les paramètres sont incertains ou susceptibles d'évoluer dans le temps. Contrairement aux régulateurs classiques à gains fixes, elle ajuste dynamiquement ses paramètres afin de maintenir les performances souhaitées, même en présence de variations du système. Cette approche repose généralement sur l'utilisation d'un modèle de référence, qui décrit le comportement idéal que le système doit suivre.

Parmi les approches les plus connues, on retrouve le MRAC (Model Reference Adaptive Control), qui utilise des lois d'adaptation, telles que la règle MIT, pour adapter les paramètres du contrôleur en fonction de l'erreur entre le modèle de référence et la sortie réelle. Cette méthode est particulièrement bien adaptée aux systèmes non linéaires, comme les moteurs BLDC.

Dans un système à commande adaptative, les performances réelles du système sont constamment mesurées et comparées aux performances attendues définies par le modèle de référence. Cette comparaison génère une erreur d'adaptation, que le mécanisme d'adaptation exploite pour ajuster les paramètres du régulateur, ou bien pour agir directement sur la loi de commande. L'objectif est de modifier le comportement du système de manière à réduire l'écart entre la réponse réelle et la réponse désirée, garantissant ainsi une performance optimale malgré les incertitudes.

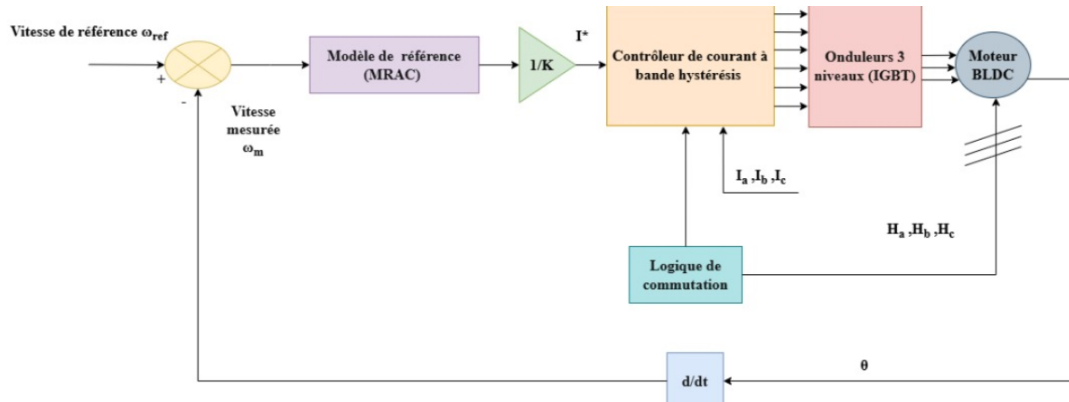


Figure III.5 Schéma block diagramme de la commande adaptative d'un moteur bldc.

- L'objectif de la commande adaptative est :
 La réalisation d'une commande ajustable.
 L'estimation des paramètres du processus (modèle estimé).
 Le calcul le régulateur en ligne.
- Les difficultés d'implémentation de la commande adaptative sont :
 Le temps du calcul est important pour l'implémentation en ligne.
 De garantir la stabilité et la convergence désirée par rapport à la référence.

III.7 Concept de la commande adaptative :

Le principe fondamental de la commande adaptative repose sur la capacité à gérer les incertitudes liées aux paramètres du système à contrôler. Ces paramètres peuvent être mal connus au démarrage ou bien évoluer au cours du temps, sous l'effet de variations internes (comme l'usure) ou environnementales (comme les changements de température ou de charge). Si le régulateur n'est pas ajusté en conséquence, cela peut entraîner une dégradation des performances, voire l'instabilité du système.

Les stratégies de commande classiques, conçues sur la base de modèles à paramètres fixes, se révèlent souvent insuffisantes pour faire face à ces variations dynamiques. C'est dans ce contexte que la commande adaptative trouve tout son intérêt : elle permet d'ajuster automatiquement les paramètres du régulateur en temps réel, à partir des données mesurées sur le comportement du système. L'adaptation a principalement deux objectifs :

- Assurer le réglage progressif du système de commande au fil du temps.
- Tenir compte des variations des paramètres du système afin de maintenir les performances souhaitées.

Dans ce travail, nous nous concentrons sur une approche particulière de la commande adaptative : la commande adaptative à modèle de référence (MRAC), qui utilise un modèle idéal comme base de comparaison pour guider l'adaptation du régulateur.

III.8 Domaines d'application de la commande adaptative :

La commande adaptative a été appliquée avec succès dans un large éventail d'applications industrielles et technologiques, grâce à sa capacité à s'adapter aux variations des systèmes en temps réel. Parmi les domaines d'utilisation les plus notables, on peut citer :[21]

- Le traitement des matériaux bruts (concasseurs, mélangeurs)
- Les fours de séchage et les procédés de traitement thermique
- Les réacteurs chimiques
- Les colonnes de distillation
- Les machines à papier
- Les échangeurs de chaleur
- Les systèmes énergétiques
- Le pilotage automatique de navires
- L'asservissement de moteurs électriques
- Les systèmes d'armes et les robots manipulateurs

La commande adaptative suscite un intérêt croissant en raison de sa complexité modérée et de sa facilité d'intégration, rendue possible par les avancées en microélectronique et en systèmes embarqués. Elle contribue à améliorer la qualité des produits, à accroître la productivité et à réduire la consommation énergétique des systèmes. De plus, elle joue un rôle important dans l'optimisation de la maintenance, en permettant d'espacer les arrêts de production et de détecter rapidement les anomalies ou les dérives de fonctionnement.

III.9 Commande Adaptative à Modèle de Référence (MRAC)

:

La commande adaptative suscite un intérêt croissant en raison de sa complexité raisonnable et de sa facilité de mise en œuvre, notamment grâce aux progrès réalisés en microélectronique et en systèmes embarqués. Elle permet d'améliorer la qualité des produits, d'augmenter la productivité, ainsi que de réduire la consommation énergétique des procédés industriels. Par ailleurs, elle contribue à l'optimisation de la maintenance en réduisant la fréquence des arrêts et en détectant précocement les anomalies ou dérives de fonctionnement, ce qui renforce la fiabilité et la disponibilité des installations.

Le mécanisme d'ajustement s'appuie sur un paramètre modifiable θ , qui permet d'adapter les paramètres du contrôleur en temps réel. Le système se compose de deux boucles imbriquées : une boucle interne de rétroaction classique, formée par le système à contrôler (la plante) et le contrôleur, et une boucle externe chargée d'ajuster les paramètres du contrôleur. Ces paramètres sont modifiés en fonction de l'erreur de suivi, définie comme la différence entre la sortie réelle du système et la sortie souhaitée fournie par le modèle de référence.

L'erreur de suivi ainsi que la loi d'adaptation des paramètres du contrôleur sont déterminées selon la règle MIT, qui permet une mise à jour continue et stable des paramètres θ .

La figure suivante illustre le schéma bloc d'un système adaptatif à modèle de référence.

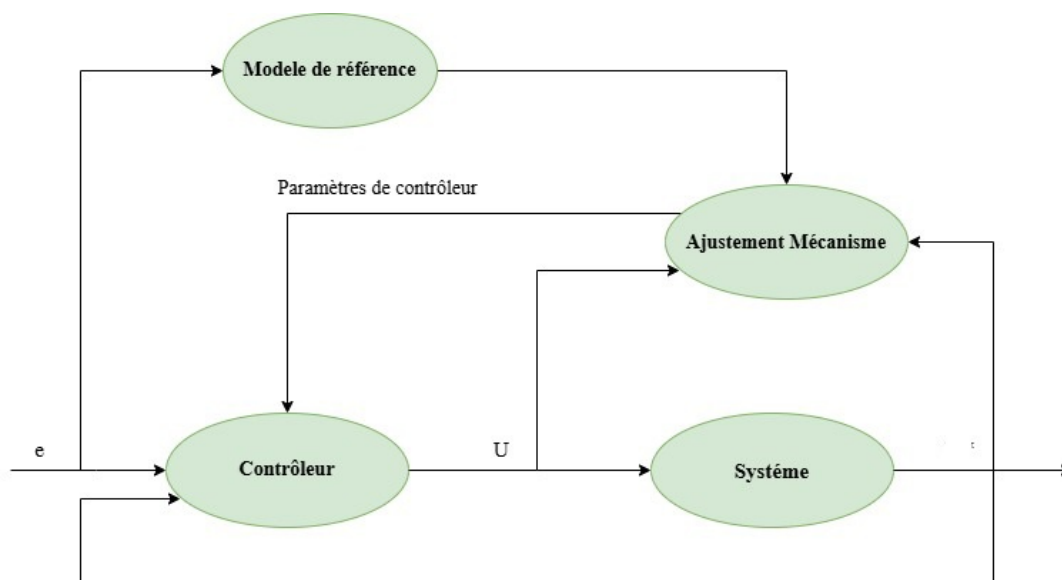


Figure III.6 Schéma block diagramme de la commande adaptative MRAC .

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

- La sortie du système doit suivre la trajectoire de référence.
- L'erreur de poursuite $e(t) = x(t) - x_m(t)$ représente une déviation de la sortie du système par rapport à la sortie de modèle de référence.

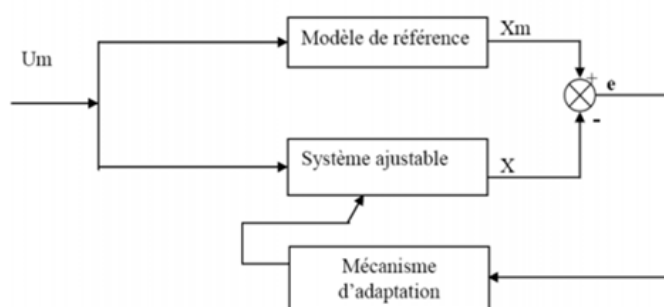
- Le système en boucle fermée est basée sur une loi de commande par feedback.
- La commande comporte un contrôleur et un mécanisme d'ajustement.
- Le mécanisme d'ajustement génère des estimés des paramètres du contrôleur.
- La synthèse du contrôleur comporte la conception de la loi de commande et le mécanisme d'adaptation.

III.9.1 Structures de système MRAC :

On peut distinguer trois principales structures pour les systèmes adaptatifs à modèle de référence [22]

a) Structure parallèle :

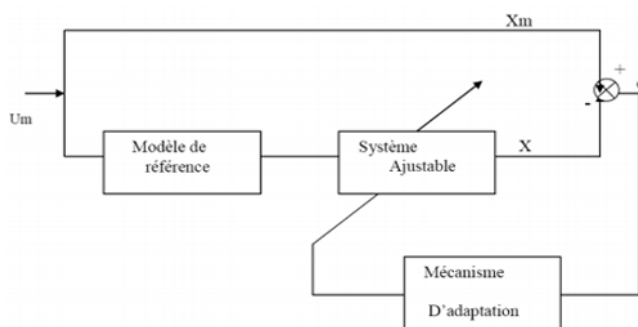
Il s'agit de la structure la plus connue et la plus largement utilisée. Dans ce schéma, le modèle de référence est placé en parallèle avec le système ajustable, comme illustré sur la figure (III.7).



FigureIII.7: Structure parallèle de système MRAC

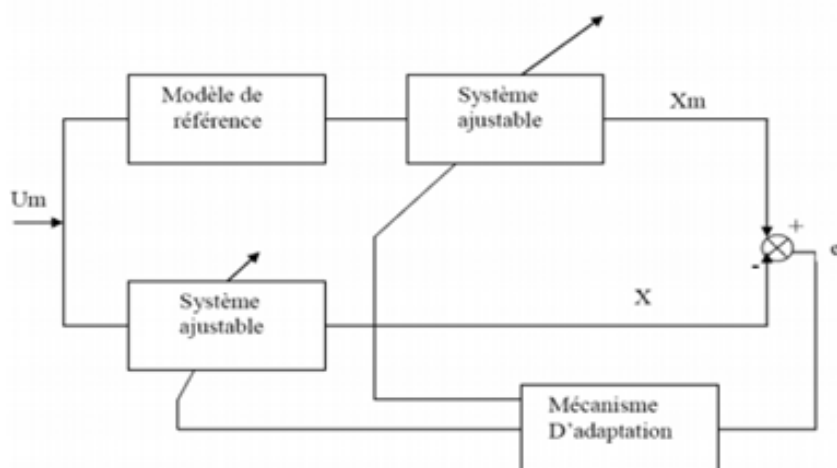
b) Structure série :

Dans cette configuration, le modèle de référence et le système ajustable sont connectés en série, comme le montre la figure(III.8)



FigureIII.8: Structure série de système MRAC

c) Structures série parallèle : Le modèle de référence peut être placé à la fois en série et en parallèle avec le système ajustable, comme illustré sur la figure(III.9).



FigureIII.9: Structure série parallèle de système MRAC

III.9.2 Conception du contrôleur MRAC :

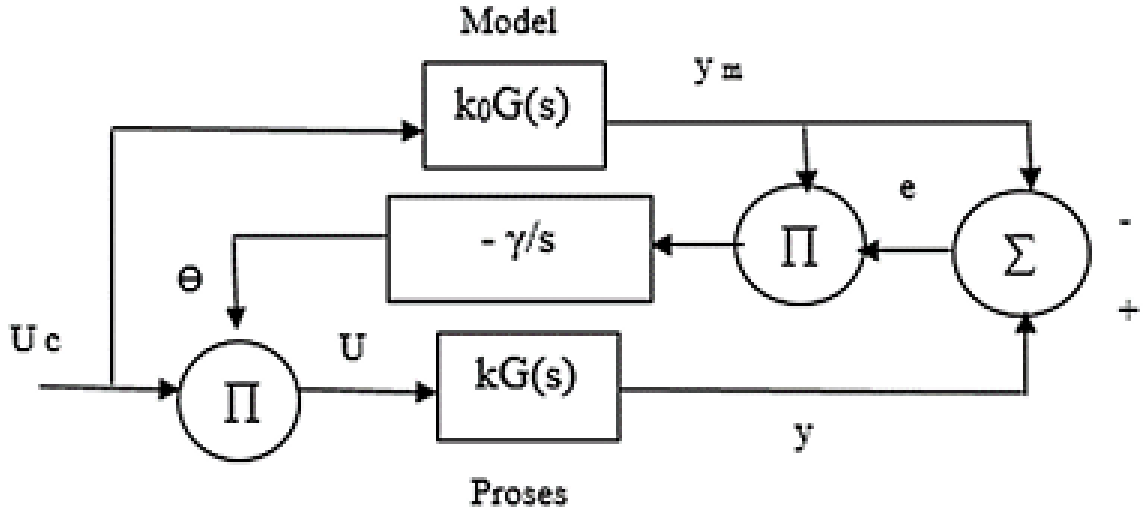
Avant de présenter la synthèse des lois d'adaptation, il est nécessaire de poser certaines hypothèses de base [23] :

- Le modèle de référence doit être un système linéaire invariant dans le temps .
- Le modèle de référence et le système ajustable doivent avoir la même dimension.
- Tous les paramètres du système ajustable doivent être accessibles pour l'adaptation, notamment dans le cadre d'une adaptation paramétrique.
- Durant le processus d'adaptation, les paramètres du système ajustable varient uniquement sous l'effet du mécanisme d'adaptation.
- Aucun signal extérieur, à l'exception du vecteur d'entrée, ne doit influencer le système.
- La différence initiale entre les paramètres du modèle de référence et ceux du système ajustable est supposée connue.

III.10 La règle MIT :

Le taux de variation temporelle du vecteur de paramètres du contrôleur θ est proportionnel au gradient négatif de la fonction coût J . L'approche basée sur la règle MIT vise à minimiser cette fonction coût quadratique, qui mesure l'écart entre la sortie réelle du procédé y et la sortie du modèle de référence y_m . Lorsque cette fonction d'erreur atteint son minimum, un suivi parfait est assuré entre y et y .

Dans le cadre du MRAC (Commande Adaptative à Modèle de Référence), on suppose que la structure du système (plante) est connue, même si ses paramètres précis ne le sont pas. Autrement dit, le nombre de pôles et de zéros est fixé, mais leur position exacte reste inconnue.[22]



FigureIII.10: La règle MIT

Les formules sont :

$$U = \theta U_c \quad (22)$$

U : Tension de sortie du système

Uc : Tension de commande ou de consigne, issue du contrôleur

θ : Coefficient de correction ou de compensation de gain appliqué à la commande.

$$\theta = \frac{k_0}{k} \quad (23)$$

θ : Coefficient de correction.

k0: Gain nominal ou de référence du système .

k : Gain réel ou actuel du système (peut varier avec le temps, la température, etc.).

-L'erreur entre la sortie réelle et celle du modèle :L'objectif est de faire tendre e(t) vers zéro.

$$e = y - y_m = kG(s)U_c - k_0G(s)U_c \quad (24)$$

e : Erreur entre la sortie réelle et la sortie du modèle (ou de référence).

y : Sortie réelle du système (réponse réelle).

ym: Sortie du modèle ou sortie de référence (réponse attendue avec le gain nominal).

k : Gain réel du système.

k0 : Gain nominal ou de référence (valeur idéale connue ou attendue).

G(s) : Fonction de transfert du système (dans le domaine de Laplace), sans le gain.

Uc: Signal de commande ou de consigne (entrée du système).

$$u(t) = \theta_1(t) \cdot r(t) + \theta_2(t) \cdot y(t) \quad (25)$$

u(t) : Signal de commande à l'instant t. C'est la sortie du contrôleur.

$r(t)$: Signal de référence à l'instant t .

$y(t)$: Sortie réelle du système à l'instant t .

$\theta_1(t)$: Paramètre (ou gain) adaptatif associé à la consigne.

$\theta_2(t)$:Paramètre (ou gain) adaptatif associé à la sortie réelle.

$$J(\theta) = \frac{1}{2}e^2(t) \quad (26)$$

$J(\theta)$: Fonction de coût (ou critère d'erreur) en fonction du vecteur de paramètres θ .

$e(t)$: Erreur de sortie à l'instant t (souvent définie comme $e(t)=y(t)-r(t)$).

$$\dot{\theta}_i(t) = -\gamma_i \cdot \frac{\partial J}{\partial \theta_i} = -\gamma_i \cdot e(t) \cdot \frac{\partial e(t)}{\partial \theta_i} \quad (27)$$

$\dot{\theta}_i(t)$:Dérivée temporelle du paramètre adaptatif.

γ_i :Gain d'adaptation, un paramètre positif qui règle la vitesse d'ajustement de $\theta_i(t)$.

$J(t)$: Fonction de coût.

$\partial J(t)/\partial \theta_i(t)$: Dérivée partielle de la fonction de cout par rapport au paramètre $\theta_i(t)$

$\partial e(t)/\partial \theta_i(t)$:Sensibilité de l'erreur par rapport au paramètre θ_i .

III.10 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exploré en profondeur la commande adaptative, en commençant par ses fondements théoriques, son évolution historique et ses domaines d'application.

Nous nous sommes ensuite concentrés sur une approche largement utilisée dans les systèmes adaptatifs : la commande adaptative basée sur un modèle de référence (MRAC). La structure générale du MRAC a été présentée, accompagnée de sa modélisation mathématique, ainsi que des principales techniques d'adaptation, notamment la règle MIT.

L'objectif de cette étude était de poser les bases nécessaires à la mise en œuvre pratique de cette commande, en vue d'évaluer ses performances dans un contexte réel ou simulé.

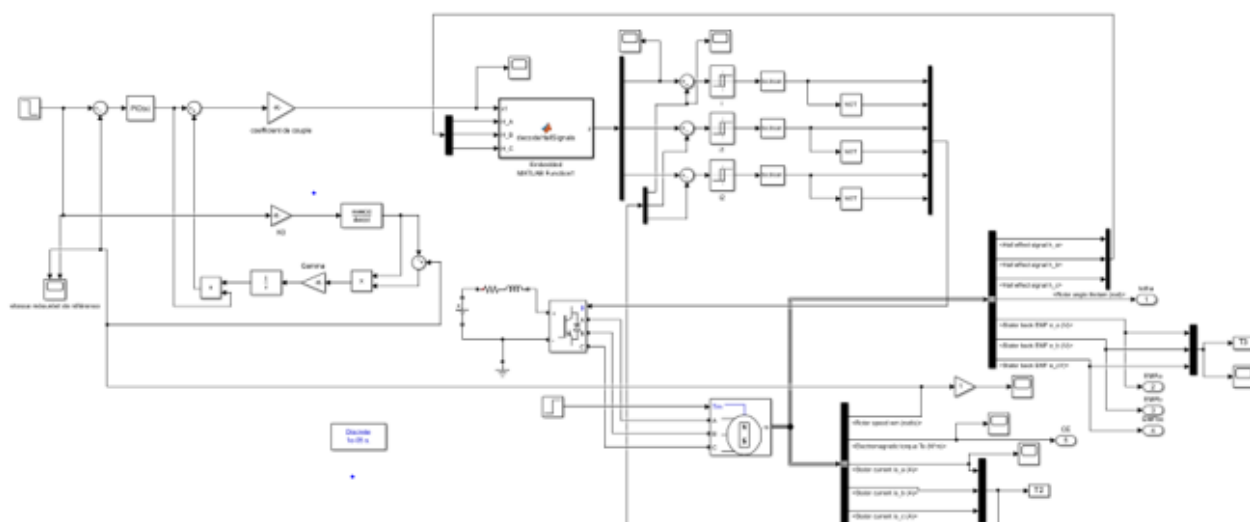
CHAPITRE IV: Résultat du simulation et discussion

IV.1 Introduction:

Ce chapitre est consacré à la validation par simulation de la stratégie de commande adaptative développée dans le chapitre précédent. L'objectif est d'évaluer les performances dynamiques de la commande MRAC appliquée à un moteur BLDC, en utilisant la règle MIT pour l'adaptation des paramètres. Les résultats obtenus à partir d'un environnement de simulation (MATLAB/Simulink) sont présentés sous forme de courbes représentant la vitesse, le couple, la force électromotrice et les courants de phase. Ensuite, nous discuterons les résultats obtenus à travers des courbes représentatives. à suivre la consigne, sa stabilité, sa robustesse, et sa performance en présence de perturbations ou de variations de charge.

IV.2 Simulation du commande adaptative d'un moteur BLDC :

Il s'agit d'une simulation Simulink représentant un système de contrôle pour un moteur BLDC. On y distingue clairement une boucle de contrôle de vitesse, probablement implémentant les stratégies PI et MRAC que vous avez mentionnées précédemment. Le modèle comprend la partie moteur BLDC, des capteurs de courant et de vitesse, ainsi que les blocs de commande générant les signaux pour l'onduleur alimentant le moteur. Le but de cette simulation est d'évaluer et de comparer les performances des contrôleurs PI et MRAC pour la commande adaptative du moteur BLDC.



FigureIV.1 Schéma de simulation du commande adaptative d'un moteur BLDC

Voici le tableau qui représente les paramètres du moteur BLDC:

Table 2 : IV.1 Les paramètres du motor BLDC

Paramètre du moteur	valeur	Unité
Nombre de pole	4	pôle
résistance de phase du rotor	0.18	ohm
inductance phase du rotor	0.0085	H
puissance	34.2	W
Moment d'inertie	0.00062	Kg.m ²
Coefficient de frottement de viscosité	0.0003035	N.m.s

IV.4 Résultat :

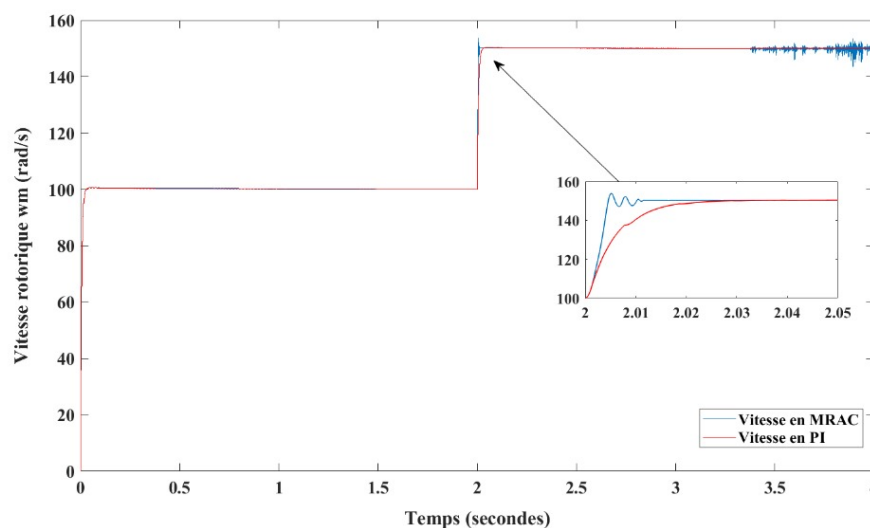
Les résultats de la simulation à vide et en charge permettent d'analyser le comportement du système dans des conditions différentes, mettant en évidence ses performances et sa stabilité. Cette comparaison est essentielle pour évaluer l'efficacité et la réponse dynamique du moteur ou dispositif étudié.

IV.4.1 Essai à vide:

L'essai à vide permet de caractériser les performances d'un système en l'absence de charge=0. Il fournit des données essentielles comme les pertes magnétiques, le courant à vide et le comportement en régime libre.

IV.4.1.1 La réponse de la vitesse en accélération:

Sur la courbe de vitesse à vide avec accélération La figure montre la réponse de la vitesse rotorique en régime à vide lors d'une variation de consigne, comparant deux stratégies de commande : MRAC et PI .



FigureIV.2 La réponse du vitesse en accélération à vide

Commentaire :

-Au début (jusqu'à 2 secondes), la vitesse de consigne est fixée à 100 rad/s. Les deux commandes (MRAC en bleu, PI en rouge) suivent parfaitement la consigne avec une réponse rapide et sans dépassement significatif. À $t=2$ secondes, la consigne subit une brusque augmentation à 150 rad/s, simulant une accélération en régime à vide.

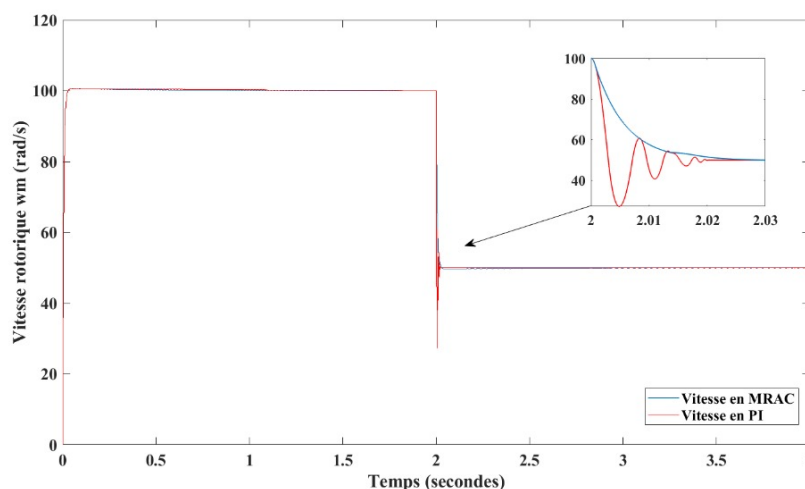
-Le régulateur PI réagit plus lentement avec un temps de montée plus long mais sans dépassement significatif.

-En commande MRAC la réponse est très rapide, la vitesse atteint la nouvelle consigne presque instantanément.

-Commande MRAC on observe un léger dépassement (overshoot) et quelques oscillations transitoires (visible dans l'encadré agrandi), indiquant une dynamique plus agressive et réactive.

IV.4.1.2 La réponse de la vitesse en décélération:

Le graphique présente la "Vitesse rotorique ω_m (rad/s)" en fonction du "Temps (secondes)". Il compare deux méthodes de contrôle : "Vitesse en MRAC" et "Vitesse en PI".



FigureIV.3 La réponse du vitesse en décélération à vide

Commentaire :

-La décélération à vide se produit aux environs de 2 secondes. À ce moment, la vitesse de consigne semble passer d'une valeur élevée (environ 100 rad/s) à une valeur plus basse (environ 50 rad/s).

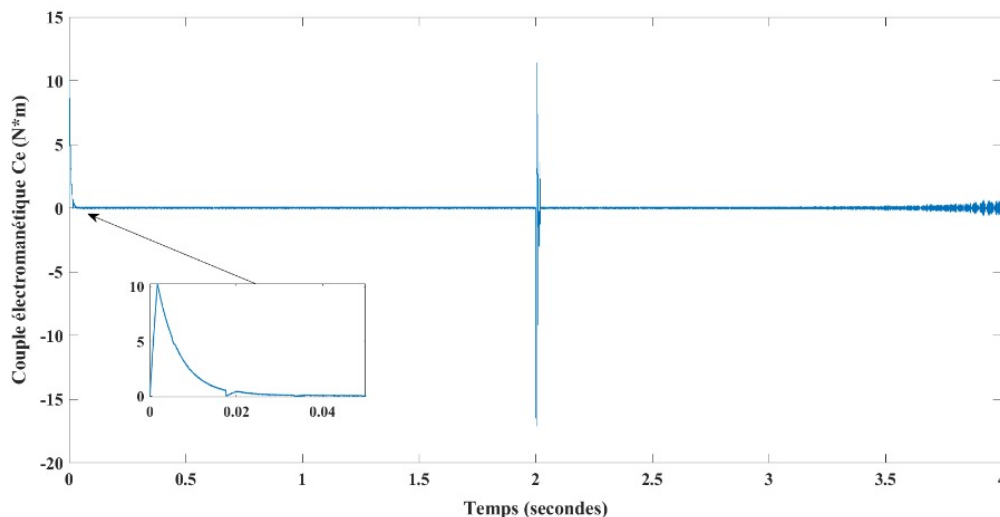
- Les deux régulateurs atteignent rapidement la consigne de 100 rad/s. Le MRAC (en bleu) montre un comportement plus progressif et plus stable, tandis que le PI (en rouge) a un temps de réponse légèrement plus rapide mais plus agressif.

-Réponse à un changement brutal à $t = 2$ s : Une chute de consigne est appliquée. Le MRAC assure une décroissance douce avec peu d'oscillations, tandis que le PI présente une réponse oscillante importante avant stabilisation.

-Stabilité et performance dynamique : Le MRAC offre une meilleure robustesse et amortissement face aux perturbations (moins de dépassement

et d'ondulations), alors que le PI souffre de sous-amortissement, visible par les oscillations prolongées après $t = 2$ s.

IV.4.1.3 L'allure du couple électromagnétique :



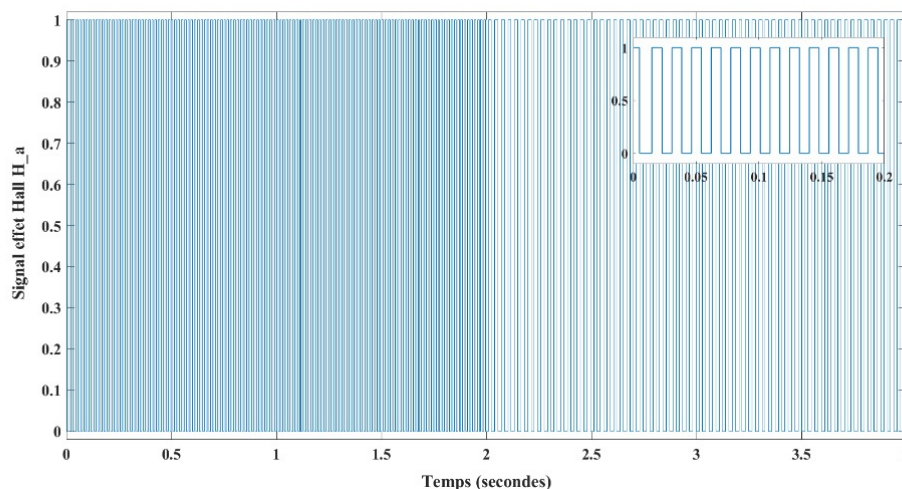
FigureIV.4 L'allure du couple électromagnétique

Commentaire :

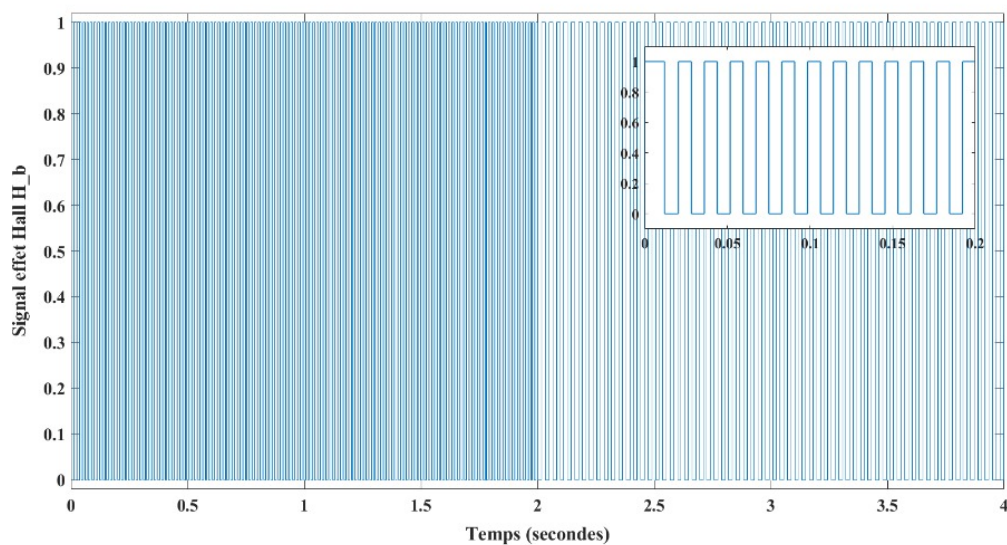
-Lorsqu'il est à vide, le couple électromagnétique (C_e) est presque nul, ce qui est attendu car il n'y a pas de charge à entraîner. La pointe observée à 2 secondes est un pic de couple transitoire, probablement lié à une variation de consigne.

-Après le régime transitoire (0,05 s), le couple électromagnétique converge rapidement vers zéro, ce qui est attendu dans un fonctionnement à vide.

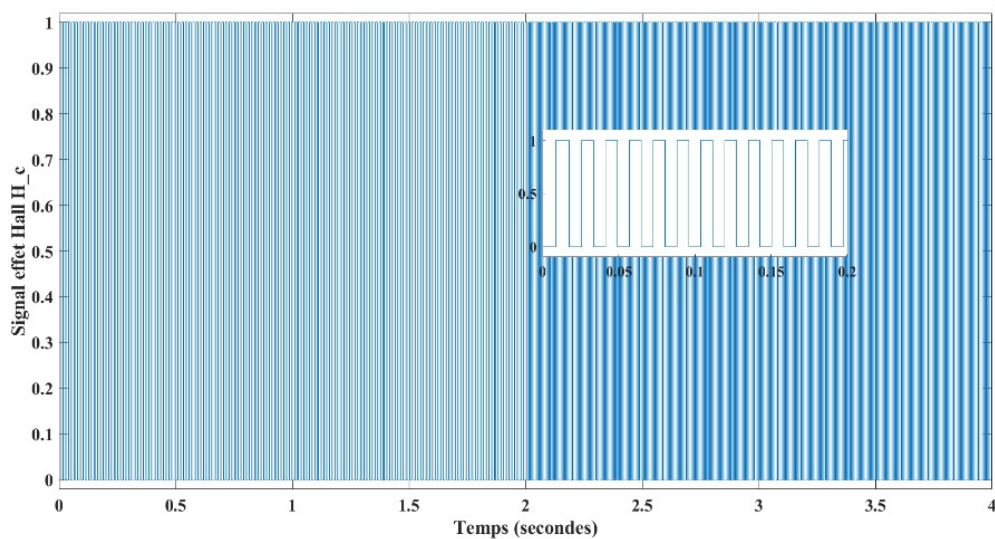
IV.4.1.4 Les allures des signaux à effet hall :



FigureIV.5 L'allure du signal effet hall phase a



FigureIV.6 L'allure du signal effet hall phase b

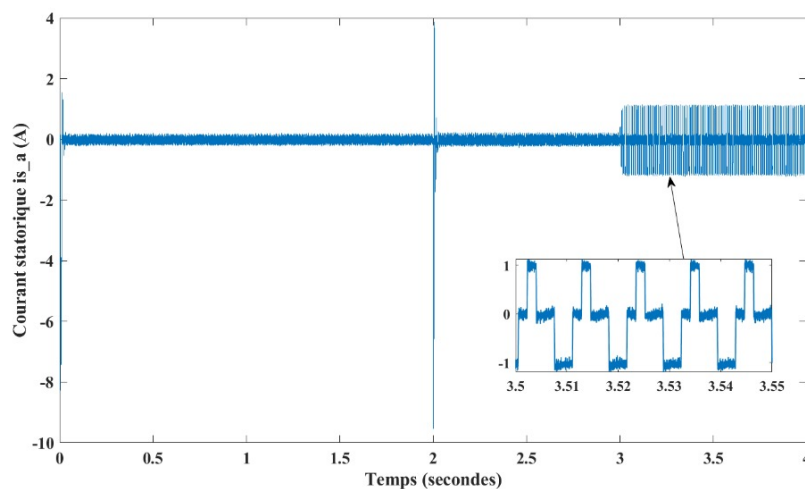


FigureIV.7 L'allure du signal effet hall phase c

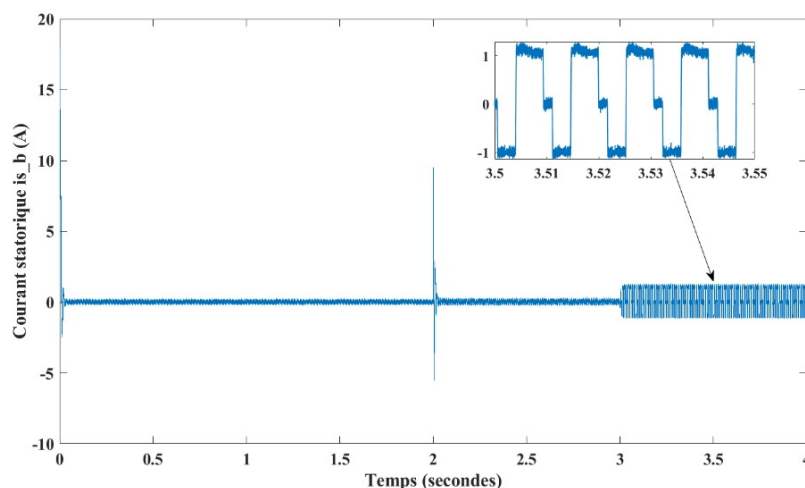
Commentaire :

- Les capteurs à effet Hall dans un moteur BLDC sont utilisés pour détecter la position du rotor. Ils génèrent un signal carré qui change d'état (0 ou 1) à des intervalles précis en fonction de la rotation du moteur.
- Les signaux e_a , e_b , et e_c sont réguliers et de forme sinusoïdale → fonctionnement normal. stabilité typique d'un régime à vide sans sollicitation de charge.
- Les trois tensions ont la même amplitude et fréquence bon équilibrage du système triphasé.

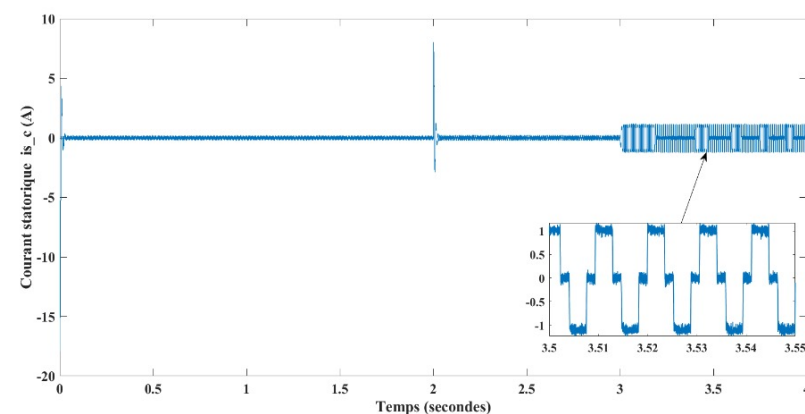
IV.4.1.5 Les allures des courants statoriques :



FigureIV.8 L'allure de courant statorique phase a



FigureIV.9 L'allure de courant statorique phase b



FigureIV.10 L'allure de courant statorique phase c

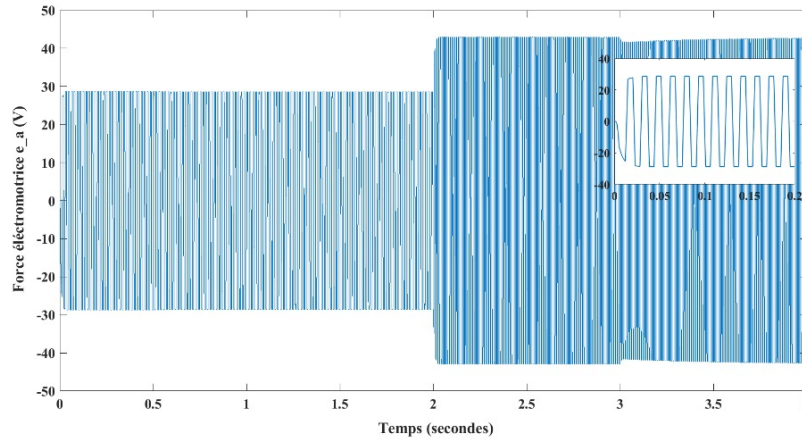
Commentaire :

-Les courants i_{s_a} , i_{s_b} et i_{s_c} présentent des formes globalement sinusoïdales, légèrement déformées en raison des harmoniques générées par l'onduleur.

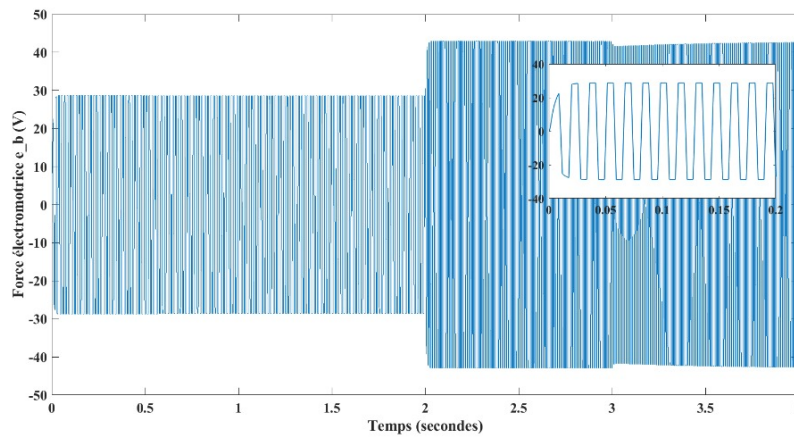
-Un pic net apparaît à $t = 2$ s sur les trois phases, probablement dû à un événement de commutation ou un changement de régime.

-Après le transitoire, les courants restent proches de zéro avec de petites oscillations dues à l'effet des tensions d'alimentation à vide.

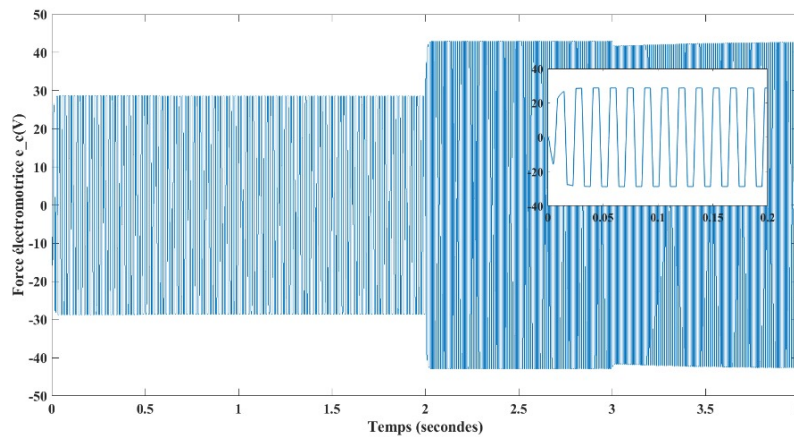
IV.4.1.6 Les allures de la force électromotrice:



FigureIV.11 L'allure de la force électromotrice phase a



FigureIV.12 L'allure de la force électromotrice phase b



FigureIV.13 L'allure de la force électromotrice phase c

Commentaire :

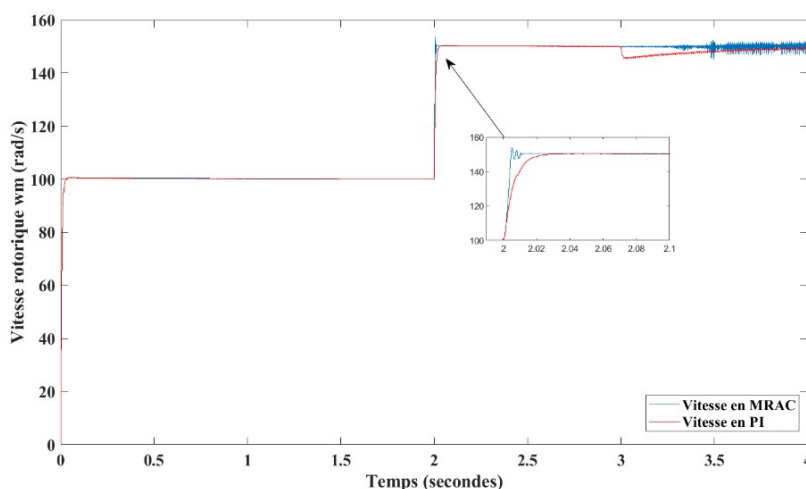
- Les trois figures représentent les signaux de la force électromotrice (fem) triphasée ea,eb et ec, dans un système soumis à une commande dynamique.
- Le profil suit également la logique triphasée avec un déphasage attendu.
- La stabilité initiale du signal confirme une bonne synchronisation des trois phases avant la perturbation.

IV.4.2 Essai en charge:

L'essai en charge permet d'analyser le comportement réel de la machine électrique lorsqu'elle fonctionne sous une charge appliquée

IV.4.2.1 La réponse de la vitesse en accélération:

La réponse de la vitesse en accélération montre comment la vitesse du moteur augmente pour atteindre sa valeur de consigne après le démarrage.



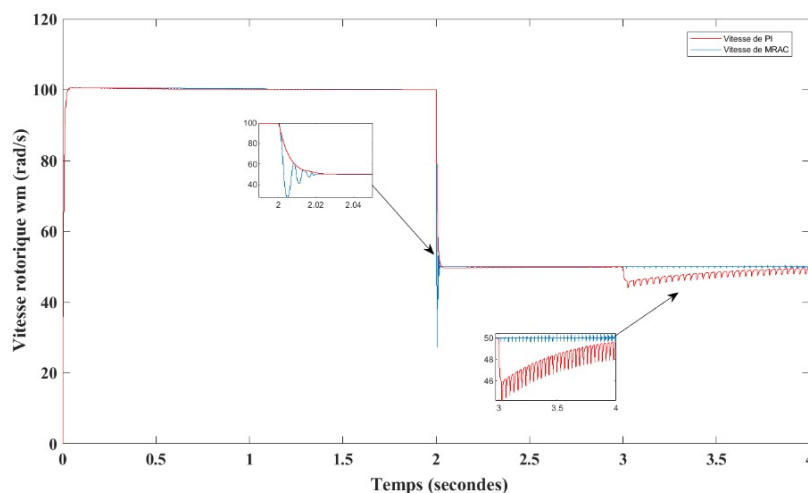
FigureIV.14 La courbe de la réponse de vitesse en accélération

Commentaire :

- La consigne de vitesse augmente brusquement à $t = 2$ s, provoquant une phase d'accélération où les deux commandes (PI et MRAC) réagissent différemment.
- Le contrôleur MRAC atteint plus rapidement la nouvelle consigne (environ 150 rad/s) que le PI, avec une montée plus abrupte. Une meilleure rapidité de réponse au prix de quelques oscillations transitoires.
- Le PI offre une réponse plus amortie, convenant mieux aux applications où la stabilité est prioritaire par rapport à la rapidité.

IV.4.2.2 La réponse de la vitesse en décélération:

La réponse de la vitesse en décélération montre comment la vitesse du moteur diminue pour atteindre une nouvelle consigne plus basse après une réduction de charge .



FigureIV.15 La courbe de la réponse de vitesse en décélération

Commentaire :

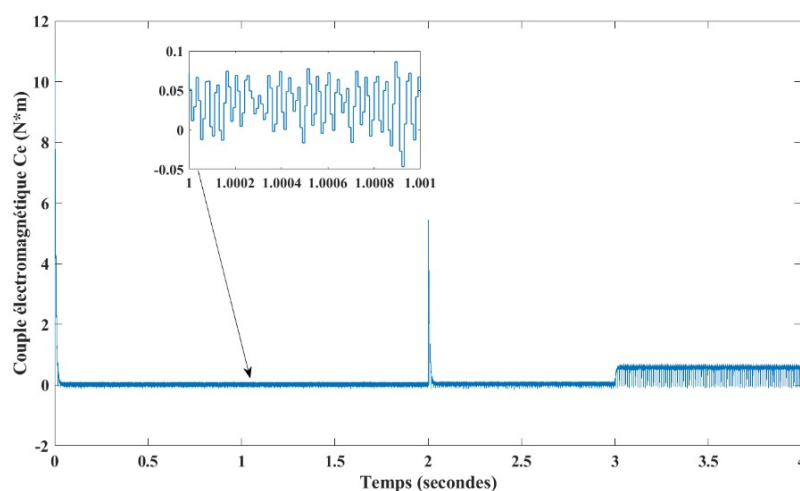
-Après la décélération à 2 secondes, le MRAC atteint la nouvelle vitesse de consigne avec moins de dépassement et un temps de stabilisation plus court.

-Le régulateur PI montre des oscillations et une récupération plus lente, surtout lors du second palier de vitesse (vers 3 secondes).

-Le MRAC offre une meilleure robustesse et amortissement face aux perturbations (moins de dépassement et d'ondulations), alors que le PI souffre de sous-amortissement, visible par les oscillations prolongées après $t=2s$.

IV.4.2.3 L'allure du couple électromagnétique :

L'allure du couple électromagnétique est illustrée dans la figure ci-dessous.



FigureIV.16 L'allure du couple électromagnétique

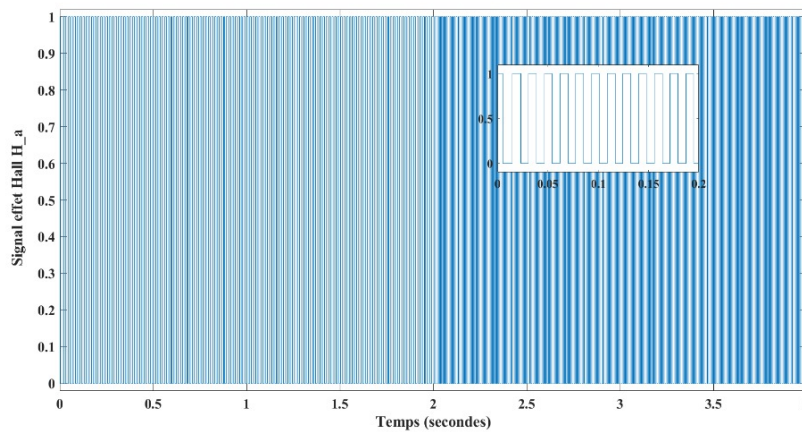
-Le couple présente un pic positif suivi d'un pic négatif très marqué à l'instant initial. Ce comportement traduit la dynamique transitoire du système.

-Après le régime transitoire (0,05 s), le couple électromagnétique converge rapidement vers zéro, ce qui est attendu dans un fonctionnement à vide (aucun couple résistant appliqué).

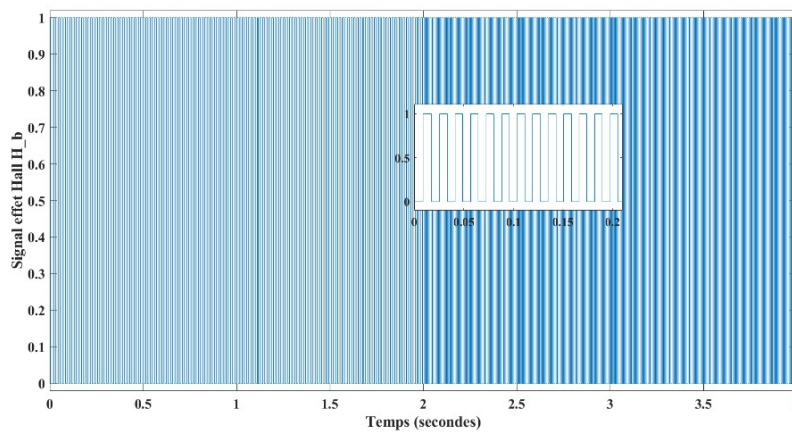
- Une discontinuité importante est visible vers $t = 2$ s, indiquant une commutation ou un changement de commande. Le système retourne ensuite à l'équilibre avec une faible oscillation amortie.

IV.4.2.4 Les allures du signaux à effet HALL :

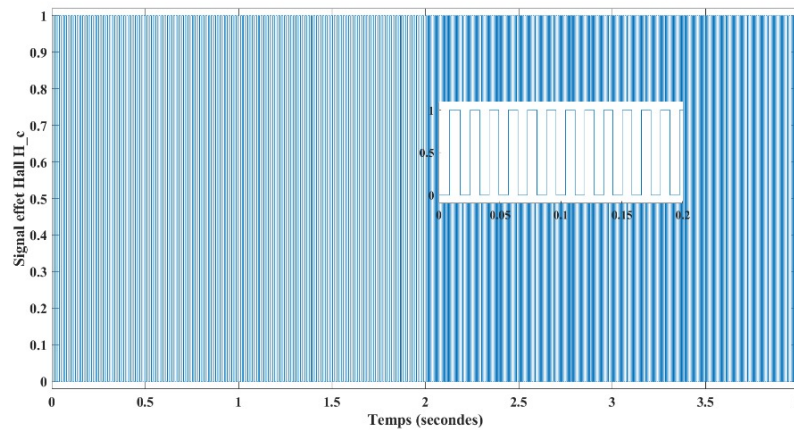
Les signaux typiques des capteurs à effet Hall sont représentés ci-dessous.



FigureIV.17 L'allure du signal à effet HALL phase a



FigureIV.18 L'allure du signal à effet HALL phase b



FigureIV.19 L'allure du signal à effet HALL phase c

Commentaire :

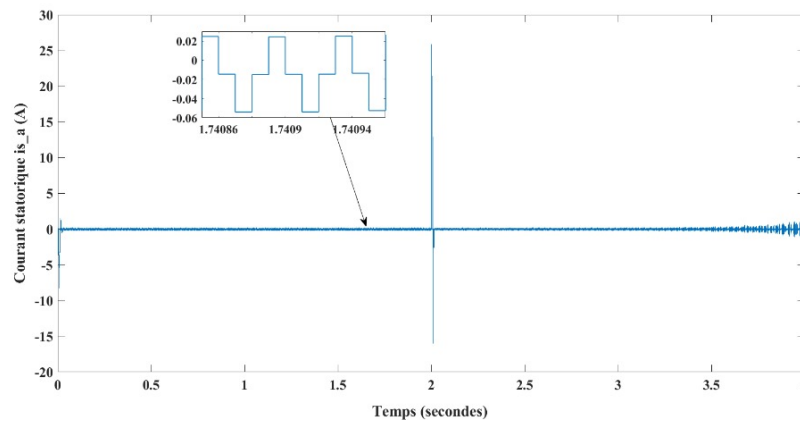
-Les signaux ea, eb, et ec sont réguliers et de forme sinusoïdale →fonctionnement normal.

- Environ ± 30 V stabilité typique d'un régime à vide sans sollicitation de charge.

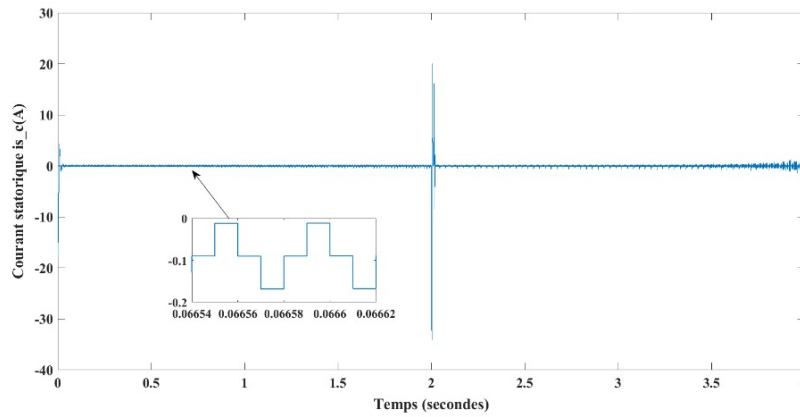
-Les trois tensions ont la même amplitude et fréquence → bon équilibrage du système triphasé

-Chaque signal change d'état ($0 \rightarrow 1$ ou $1 \rightarrow 0$) lorsque le rotor passe devant le capteur correspondant.

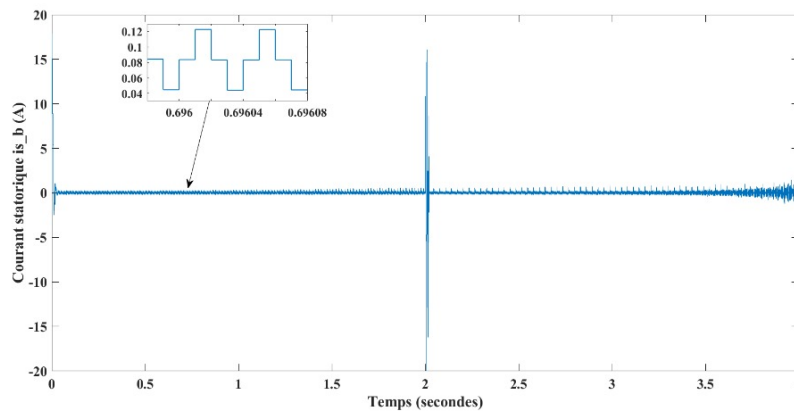
IV.4.2.5 Les allures du courants statoriques :



FigureIV. 20 L'allure du courant statorique phase a



FigureIV.21 L'allure du courant statorique phase b

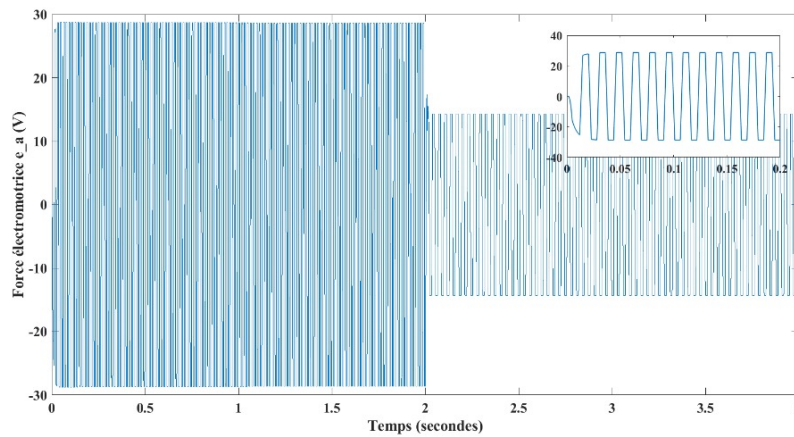


FigureIV.22 L'allure du courant statorique phase c

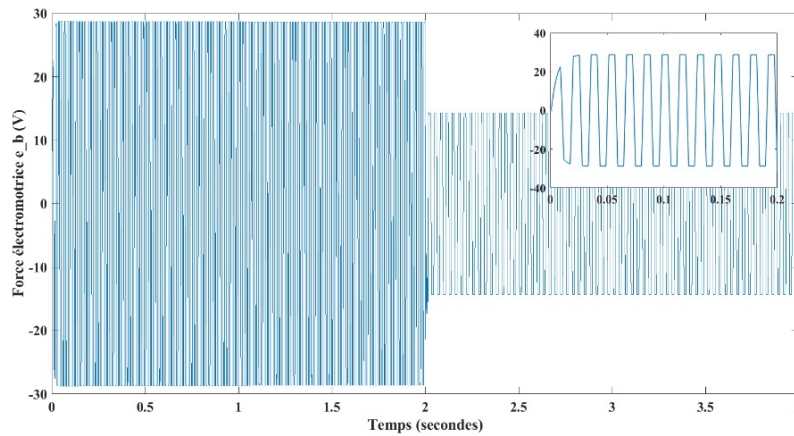
Commentaire :

- Les courants i_{sa} , i_{sb} et i_{sc} présentent des formes globalement sinusoïdales, légèrement déformées en raison des harmoniques générées par l'onduleur.
- Un pic net apparaît à $t = 2$ s sur les trois phases, probablement dû à un événement de commutation ou un changement de régime.
- Après le transitoire, les courants restent proches de zéro avec de petites oscillations dues à l'effet des tensions d'alimentation à vide.

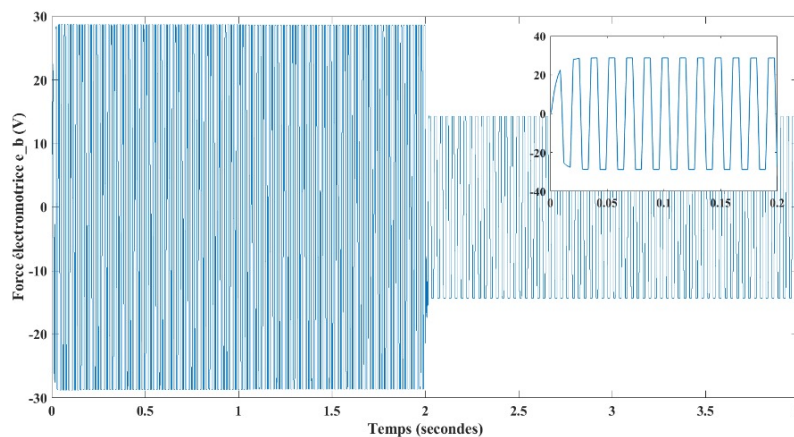
IV.4.2.6 Les allures du force électromotrice :



FigureIV.23 L'allure du force électromotrice phase a



FigureIV.24 L'allure du force électromotrice phase b



FigureIV.25 L'allure du force électromotrice phase c

Commentaire :

-Les trois figures montrent des tensions électromotrices triphasées e_a, e_b, e_c de forme parfaitement sinusoïdale, ce qui est typique d'un moteur synchrone à aimants permanents (PMSM) en fonctionnement normal. Ces tensions sont

décalées de 120° les unes par rapport aux autres, illustrant un équilibrage triphasé conforme.

-À partir de la seconde 2, une réduction soudaine de l'amplitude des EMF est observable. Cela reflète une baisse de la vitesse du rotor ou un changement des conditions de fonctionnement du moteur (commande ou charge), ce qui impacte directement la génération de la force contre-électromotrice.

-Chaque figure contient un encart agrandi (zoom entre 0 et 0,2 s), permettant d'observer précisément la fréquence et la régularité des signaux sinusoïdaux. Ce zoom confirme la qualité harmonique du système avant le changement de régime.

IV.5 Discussion et comparaison :

-Le contrôleur PI présente généralement une réponse rapide mais avec des dépassements notables lors des variations brusques de consigne ou de perturbations (changement de charge, variation de vitesse).

-Par contre ,le MRAC montre une meilleure capacité d'adaptation les dépassements sont réduits et la convergence vers la consigne est plus fluide, grâce à l'ajustement en temps réel

-Le MRAC, grâce à son mécanisme d'adaptation, est naturellement robuste face aux incertitudes ou changements dynamiques du système. Il assure une performance constante même en cas de variation des paramètres moteurs.

-Le PI reste simple à implémenter et peu coûteux en termes de calcul, ce qui le rend adapté aux applications industrielles classiques.

-Le MRAC est plus complexe il nécessite la définition d'un modèle de référence, une loi d'adaptation, et peut engendrer des calculs plus lourds. Toutefois, cette complexité est compensée par des performances supérieures en environnement variable.

-Le PI reste un bon choix pour des systèmes linéaires bien modélisés et fonctionnant dans des conditions stables.

-Le MRAC, est plus adapté aux environnements incertains ou variables, notamment lorsqu'une meilleure robustesse et adaptation dynamique sont requises, comme dans le cas de machines électriques soumises à des variations de charge ou de conditions de fonctionnement.

IV.6 Conclusion :

En conclusion, ce chapitre a permis de comparer les performances de la commande classique PI avec la commande adaptative robuste MRAC appliquée à un moteur BLDC. Les résultats obtenus montrent que le MRAC assure une meilleure rapidité, précision et robustesse face aux variations de paramètres et perturbations. La commande MRAC constitue ainsi une solution plus performante et fiable que la commande PI classique pour le contrôle de la vitesse du moteur.

Conclusion Générale

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire, concerne la commande PID classique de courant et de vitesse du moteur à courant continu sans balais (BLDC).

Ce mémoire a traité la commande d'un moteur à courant continu sans balais (BLDC) en utilisant des techniques de commande adaptative, en particulier la commande à modèle de référence (MRAC). Le moteur BLDC, largement utilisé dans les applications industrielles, présente des avantages importants, mais nécessite une commande robuste face aux variations paramétriques et perturbations externes.

Après avoir présenté le principe du moteur et les méthodes classiques comme la commande de courant à hystérésis, nous avons introduit l'approche MRAC, qui permet une adaptation en temps réel des paramètres du contrôleur afin d'assurer un bon suivi du modèle de référence. La règle MIT a été utilisée pour définir la loi d'adaptation, en minimisant l'écart entre la sortie réelle et celle du modèle.

Les résultats obtenus par simulation ont montré que cette approche permet une amélioration notable de la stabilité et de la performance du système. En conclusion, la commande adaptative s'avère être une solution efficace et prometteuse pour les systèmes dynamiques incertains, avec de nombreuses perspectives de développement futur, notamment en environnement embarqué.

BIBLIOGRAPHY

- [1] S. Mezani et B. Laporte, *Électrotechnique - Machines électriques et convertisseurs de puissance*
- [2] J.-F. Charpentier, *Commande des moteurs à courant continu : Théorie et applications industrielles*. Londres: Hermès Science, 2020
- [3] Boldea, I., & Nasar, S. A. (2020). *Electric Machines: Steady State, Transients, and Design with MATLAB* (2nd ed.). CRC Press.
- [4] Sen, P. C. (2021). *Principles of Electric Machines and Power Electronics* (3rd ed.). Wiley.
- [5] Pyrhönen, J., Jokinen, T., & Hrabovcová, V. (2023). *Design of Rotating Electrical Machines* (3rd ed.). Wiley.
- [6] Jahns, T. (2018). "BLDC Machine Control Challenges". *IEEE Transactions on Power Electronics*.
- [7] Landau, I. D., Lozano, R., M'Saad, M., & Karimi, A. (2021). *Adaptive Control: Algorithms, Analysis and Applications*.
- [8] Goodwin, G. C., & Sin, K. S. (2023). *Adaptive Filtering, Prediction and Control*.
- [9] K. J. Åström et B. Wittenmark, *Computer-Controlled Systems: Theory and Design*, 3rd ed. Prentice Hall, 2008.
- [10] Filatov, N. M., & Unbehauen, H. (2021). *Adaptive Dual Control: Theory and Applications*.
- [11] Krishnan, R. (2017). *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*. CRC Press.
- [12] Hanselman, D. C. (2019). *Brushless Permanent Magnet Motor Design* (3rd ed.). Magna Physics.
- [13] Gieras, J. F. (2022). *Advancements in Electric Machine Housing Design*. Springer.
- [14] Lee, J.-S. (2018). *BLDC Motor Design Handbook* (2nd ed.). TechPress.
- [15] Miller, T. J. E. (2019). *Electronic Control of Switched Reluctance Machines*. Newnes.
- [16] R. G. Lyons et J. S. Lee, "Hall-Effect Sensor Integration in BLDC Motors".
- [17] Bose, B. K. (2021). *Modern Power Electronics and AC Drives*.
- [18] Krishnan, R. (2018). *Brushless DC Motors: Modeling and Control*. Wiley.

- [19] J. Holtz et N. Oikonomou, "Advanced Current Control for BLDC Drives".
- [20] R. Krishnan, *Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control*, Prentice Hall, 2001.
- [21] K. J. Åström and B. Wittenmark, *Adaptive Control*, 2nd Edition, Addison-Wesley, 1995.
- [22] Ioannou, P. A., and Sun, J., *Robust Adaptive Control*, Prentice Hall, 1996.
- [23] Narendra, K. S., & Annaswamy, A. M., *Stable Adaptive Systems*, Prentice Hall, 1989.