

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الدكتور الطاهر مولاي سعيادة

Université Saida Dr Tahar Moulay –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Mémoire de fin d'études présenté pour l'obtention du Diplôme de MASTER

En : Électrotechnique

Spécialité : Électrotechnique Industrielle

Par : AROUANE Abdelkhalek et CHADLI Saadia

Sujet

Simulation du pilotage et de commande d'un moteur « BLDC »

Soutenue publiquement en **28 /06/2022** devant le jury composé de :

Mr. TERRAS Tahar	MCA.	Univ. Saida	Président
Mr. BENYAHIA Mokhtar	MAA.	Univ. Saida	Rapporteur
Mr. MEZOUAR Abdelkader	Pr.	Univ. Saida	Examineur

Année universitaire 2021/2022

Remerciements

Nos remerciements vont tout premièrement, à Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage pour réaliser ce travail.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Mr BENYAHIA Mokhtar, un remerciement spécial pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, son aide et ses conseils pour élaborer ce travail.

Nos sincères remerciements à tous les membres du jury : Mr. MEZOUAR Abdelkader et Mr. TERRAS Tahar, qui nous ont fait l'honneur d'avoir accepté d'examiner et évaluer notre modeste travail.

En fin toute personne qui a participé de près ou de loin à l'accomplissement de ce mémoire soit sincèrement remerciée ainsi que les enseignants qui ont partagés avec nous à tous les moments de notre chemin d'étude.

Dédicaces

A mes chers parents, qui nous ont donnés tout le courage, la tendresse et la passion

A mes sœurs et frères

A toutes la famille AROUANE et GASMI

A mon binôme S.Chadli

A tous mes amis :

A.Benhamida, B.Benouis, M.Boutaleb, M.Labras

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin

A tous ceux qui nous ont honorés de leur savoir, nous dédions ce travail.

A.AROUANE

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mon très cher père.

A ma chère mère

A mon frère

A mon binôme A.Arouane

A tous mes chères amies et mes collègues

*A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin
A tous ceux qui nous ont honorés de leur savoir, nous dédions ce travail.*

S.CHADLI

Liste des figures

Liste des figures du chapitre 1

Figure (1. 1) : Classification des moteurs électriques	6
Figure (1. 2) : Fcém des moteurs BLDC et PMSM	8
Figure (1. 3) : Enroulements des moteurs BLDC et PMSM	8

Liste des figures du chapitre 2

Figure (2. 1) : Éléments constitutifs d'un moteur à cc sans balais	13
Figure (2. 2) : Stator d'un moteur à cc sans balais « BLDC»	13
Figure (2. 3): Différents types de rotors pour moteur à cc sans balais « BLDC »	14
Figure (2. 4): Capteurs à effet Hall pour moteur à cc sans balais	16
Figure (2. 5): Rotor et stator d'un moteur Brushless à rotor externe « outrunner »	18
Figure (2. 6): Moteur Brushless à disques	19
Figure (2. 7): Disposition des phases et des enroulements du moteur BLDC	20
Figure (2. 8): Stratégie de commande du moteur Brushless à capteurs à effet hall	21
Figure (2. 9): Moteur BLDC à trois phases et une paire de pôles	23
Figure (2. 10): Les six étapes de l'alimentation des bobines du moteur	23
Figure (2. 11): Les six cas d'alimentation des paires d'enroulements statoriques	24
Figure (2. 12): Alignement du rotor (une paire) selon le champ statorique obtenu en commutation	24
Figure (2.13) : Lois et principe de position du rotor (une paire de pôles) suivant la commutation	25

Figure (2. 14): Commutation des phases par un onduler contrôlé par une table logique	25
Figure (2. 15): La résolution pour plusieurs nombre de pôles (multipolaire)	26
Figure (2. 16): Principe de commutations utilisant des capteurs à effet hall	26
Figure (2. 17): Les six secteurs détectés par le capteur effet hall	27
Figure (2. 18): Positions des 3 capteurs à effet Hall sur un moteur BLDC	28
Figure (2. 19): Les signaux délivrés par les trois capteurs à effet Hall	28
Figure (2. 20): Capteur à réluctance variable qui détecte le mouvement de la roue d'entrée.	29
Figure (2. 21): Constitution de l'encodeur incrémental	29
Figure (2. 22): Les signaux des voies A et B	30
Figure (2. 23): formes d'onde avec capteur à effet Hall et les formes d'onde avec fcém trapézoïdales	31
Figure (2. 24): Schéma de modèle typique de commutation sans capteurs « avec détection de la fcém	32
Figure(2.25) : Les circuits représentant les méthodes de détection de la fcém	33
Figure(2.26) : Onduleur triphasé alimentant les enroulements statoriques du moteur	35
Figure(2.27) : Principe de commutation du moteur BLDC à l'aide d'un onduleur	35
Figure(2.28) : Exemple illustrant une situation de commutation	36
Figure(2.29) : Boucle de régulation avec onduleur commandé par la technique MLI	37
Figure(2.30) : Les 4 quadrants couple- vitesse	38

Liste des figures de chapitre 3

Figure (3. 1) : Structure générale pour entraînement d'un moteur à cc sans balais	42
Figure (3. 2) : Commutation du courant en mode étiole- bidirectionnelle	43
Figure (3. 3) : Circuit de base pour l'alimentation bidirectionnelle –les phases en étoile	44
Figure (3. 4) : Commutation du courant dans les phases en étiole avec une alimentation unidirectionnelle	44
Figure (3. 5) : Courbes des $f_{cém}$ et des courants pour un moteur en étoile dans le cas d'une alimentation unidirectionnelle.	45
Figure (3. 6) : Circuit de base pour l'alimentation unidirectionnelle	45
Figure (3. 7): Commutation du courant dans les phases d'un moteur triphasé en triangle	46
Figure (3.8) : Courbes des $f_{cém}$, du couple et des courants pour un moteur en triangle	47
Figure (3.9) : Schématique de disposition des enroulements d'un moteur BLDC à une paire de pôles	49
Figure (3.10) : Modèle triphasé des phases statoriques du moteur BLDC	50
Figure (3.11) : Modèle équivalent d'un moteur BLDC	55
Figure (3.12) : Relation de phase entre $B(\theta)$, e_a et $f_a(\theta)$	57
Figure (3.13) : Schéma bloc du contenu du modèle du moteur BLDC	61

Liste des figures de chapitre 4

Figure (4. 1) : structure générale de contrôle avec capteurs d'un moteur BLDC	65
Figure (4. 2) : Onduleur triphasé alimentant le moteur BLDC	65
Figure (4. 3) : Structure de contrôle : position-capteur table logique-onduleur-moteur BLDC	66
Figure (4. 4) : Logique de commande de l'onduleur après detection des passage zero	68
Figure (4. 5) : Modèle utilisant les signaux des tensions simples pour l'estimation des f_{cems}	69

Figure (4.6) : Modèle Simulink du schéma de contrôle du moteur BLDC	70
Figure (4. 7) : Modèle simulink fournissant les commutations à partir des signaux Hall	71
Figure (4.8) : Courants des phases - contrôle du BLDC avec capteurs en BO	71
Figure (4.9) : Tensions et f_{cem} des phases - contrôle du BLDC avec capteurs en BO	72
Figure (4.10) : Signaux des capteurs et de la tension de phase	72
Figure (4.11) : Angle de position de rotor tension et f_{cem} d'une phase	73
Figure (4.12) : Couples, vitesse, courant, tensions et f_{cem} pour une charge du moteur à 0.2s	73
Figure (4.13) : Signaux de commutation des interrupteurs sans charge	74
Figure (4.14) : Boucle de contrôle de vitesse du moteur BLDC avec capteurs	75
Figure (4.15): Modèle Simulink de contrôle de vitesse – moteur BLDC avec capteurs	75
Figure (4.16) : Vitesses et couples – contrôle de vitesse du moteur BLDC avec capteurs	76
Figure (4.17) : Courants et f_{cems} des phases – contrôle de vitesse du moteur BLDC avec capteurs	76
Figure (4.18) : Tension continu alimentant l'onduleur	76
Figure (4.19) : Tensions composées et signaux Hall – contrôle de vitesse du moteur BLDC avec capteurs	77
Figure (4.20): Vitesses et couples – variation de couple du moteur BLDC avec capteurs	77
Figure (4.21) : Courants et f_{cems} – variation de couple du moteur BLDC avec capteurs	78
Figure (4.22) : Tensions composées et tension DC – variation de couple du moteur BLDC avec capteurs	78
Figure (4.23) : Schéma bloc du modèle Simulink simulé du moteur BLDC – (sans capteur)	79
Figure (4.24) : Détection de passage par zero de la f_{cem} Trapézoïdale	82
Figure (4.25) : Courants et f_{cems} des phases– contrôle de vitesse du BLDC sans capteurs	84

Figure (4.26) : Couples des phases et signaux de détection de passage par zero des fcéms – Moteur BLDC sans capteurs	85
Figure (4.27) : Vitesse, angle, et tension par phase –moteur BLDC sans capteurs	85
Figure (4.28) : Courants et fcems des phases– variation de vitesse du moteur BLDC sans capteurs	86
Figure (4.29) : Vitesse, angle et signaux de détection de passage par zero des fcéms – variation de vitesse du moteur BLDC sans capteurs	86
Figure (4.30) : Erreur de vitesse – variation de vitesse du moteur BLDC sans capteurs	87
Figure (4.31) : Onduleur triphasé commutant les phases du bloc « inverser »	87
Figure (4.32) : Instants de commutation des interrupteurs – variation de vitesse du moteur BLDC sans capteurs	87
Figure (4.33) : Vitesse et angle de rotation – inversion du sens de rotation du moteur BLDC sans capteurs	88
Figure (4.34) : Courants et fcems des phases– inversion du sens de rotation du moteur BLDC sans capteurs	88

Liste des tableaux

Liste des tableaux du chapitre 1

Tableau (1. 1) : Comparaison des moteurs BLDC et PMSM	7
--	---

Liste des tableaux du chapitre 2

Tableau (2. 1) : Caractéristiques des couplages	22
--	----

Liste des tableaux du chapitre 4

Tableau (4. 1) : Signaux des capteurs et états des interrupteurs	66
---	----

Notations et Abréviations

Abréviations :

AC	Alternating current
DC	Direct current
BLDC	Brushless Direct current
BLDCM	Brushless Direct current motor
MAP	Machine à aimants permanents
MLI	Modulation de largeur d'impulsion
PWM	Pulse Width Modulation
PMSM	Permanent Magnet synchronous Motor
EMI	Electromagnetic interference
F_{em}	Force électromotrice
$F_{cém}$	Modèle dans la boucle
B_{emf}	Back electromotive force
RMI	La réaction magnétique d'induit
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
S	Sud
N	Nord
BO	Boucle ouvert
PI	Régulateur proportionnel, intégral
dq	Repère de park
u, v, w	Repères des enroulements statoriques réels et des phases
ou : a,b,c	

Symboles :

R_s	Résistance statorique (ohm)
L	Inductance propre de l'enroulement par phase (Henry)
M	L'inductance mutuelle par phase (Henry)
L_d	L'inductance d'axe d
L_q	L'inductance d'axe q
i_d	Le courants d'axe d
i_q	Le courants d'axe q
ψ_p	Le flux de lien total
Ψ_{ap}	Le flux du aux aimants permanents
$I_{a,b,c}$	Courants de la charge (Courants du moteur)
$V_{a,b,c}$	Tensions simples délivrées par le convertisseur
P	le nombre de paires de pôles
θ	La position électrique
θ_r	La position mécanique du rotor
I_{aY}	Courant de l'enroulement Y (A)
V_n	La tension du nœud de point neutre
e_a, e_b, e_c	Les fcéms dans les phases respectives
i_a, i_b, i_c	les courants de phase individuels
V_a, V_b, V_c	Tensions des enroulements statoriques.
C_a, C_b, C_c	Les couples individuels de phase
E_p	La valeur max de fcém par phase
B	L'induction du champ dans lequel les conducteurs sont placés(T)
L	La longueur du rotor (m)

N	Le nombre de tours (spires) par phase
r	Rayon du rotor
F	Les valeurs des pertes par frottement au rotor
ω	La vitesse angulaire électrique (rad / sec)
ω_m	La vitesse de rotation angulaire ‘mécanique’ en (rad/s)
ω_n	La valeur réelle actuelle de la vitesse du rotor (rad / s)
ω_{ref}	La vitesse du rotor requise (rad électrique / s)
ϕ_a	L’intensité du flux magnétique de la phase a
ϕ_g	Flux d’entrefer
Φ	Flux statorique total
Φ_r	Flux d’excitation des aimants permanents
J	Moment d’inertie
C_{em}	Le couple électromagnétique
C_r	Le couple résistant (charge et frottement)
F_v	Le coefficient de frottement visqueux su rotor.
Θ	thêta: Angle de position du rotor en radians électriques
Θ_r	La position du rotor en (rad)
$H_{1,2,3}$	Signaux des capteurs
E, e	Force contre électromotrice (V)
T_i	ième Transistor
Tr_i	Le signal fournis à l’ième gâchette de l’onduleur
err	L’erreur entre la vitesse de commande et la vitesse réelle a l’instant actuel
K_e	Le coefficient de la force électromotrice
K_p	La constante de proportionnalité
K_i	La constante intégrale
K_D	La constante différentielle

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Notations et abréviations

Introduction générale 1

Chapitre 1 : Concepts fondamentaux des moteurs BLDC

1.1 Introduction	3
- Origine du moteur sans balais	3
1.2 L'utilisations de moteur BLDC.....	4
- Le transport	4
- Outils électriques	4
- L'industrie et fabrication	4
- L'électroménager	4
- Modèles radiocommandés	4
1.3 Classification des moteurs électriques « BLDC »	5
1.3.1 Moteur à courant continu comparé au moteur brushless	5
1.3.2 Différence entre moteur BLDC brushless et MSAP	6
1.4 Caractéristiques spécifiques du moteur à C.C sans balais (BLDC).....	8
1.4.1 Avantage des moteurs brushless « BLDC »	9
1.4.2 Principaux facteurs de choix du moteur sans balais	10
a- Durée de vie et fiabilité.....	10

c- Encombrement et poids	10
d- Niveau sonore	10
e- Variation de vitesse et asservissement	10
1.4.3 Les caractéristiques du moteur BLDC (appelé ECM)	11
1.5 Conclusion	11

Chapitre 2 : Constitution et fonctionnement des moteurs BLDC

2.1 Introduction	12
2.2 Constitution du moteur brushless « BLDC »	12
2.2.1 Stator (inducteur)	13
2.2.2 Rotor (induit)	14
a- Moteurs SPM : aimants permanents fixés sur la surface latérale du rotor	15
b- Moteurs IPM : Les aimants permanents sont intégrés à l'intérieur du rotor	15
c- Machine a aimant de bobinage concentré double couche à dents	16
2.2.3 Les capteurs à effet hall	16
2.2.4 Une carte électronique	17
2.2.5 Les paliers	17
2.3 Les différents types des moteurs brushless	17
2.3.1 Moteurs Brushless à rotor externe (Outrunner)	17
2.3.2 Moteurs brushless à rotor interne « Inrunner »	18
2.3.3 Moteurs Brushless à disques	19
2.4 Fonctionnement d'un moteur Brushless (BLDC)	19
2.4.1 Configuration du bobinage	21
2.5 Principe de commutation des moteurs brushless	22

2.5.1 Les pôles	22
2.5.2 Principe de commutation	22
2.5.3 Moteurs BLDC à Capteurs à effet hall (commutation avec capteur)	26
2.5.4 Les capteurs de position dans les BLDCM	27
2.5.4.1 Capteur à effet Hall	27
2.5.4.2 Capteurs de vitesse de roue à réluctance variable (VR)	29
2.5.4.3 L'encodeur incrémental en quadrature	29
2.5.5 La commutation sans capteur	30
2.5.5.1 Moteurs brushless à commutation (régulation) basée sur la f_{cem}	30
2.5.5.2 Méthodes de détection de contre-électromotrice ($f_{cém}$)	32
2.5.6 La commutation sinusoïdale ou vectorielle de flux	33
2.6 Circuits d'alimentation des moteurs « BLDC »	34
2.6.1 Alimentation par un onduleur triphasé	34
2.6.2 Principe de fonctionnement : moteur BLDC-Onduleur	35
2.6.3 Techniques de commande onduleur triphasé	36
2.6.4 Commande par la modulation de largeur d'impulsion (PWM)	34
2.7 Moteur Brushless en régime établi	38
2.8 Démarrage d'un moteur brushless	38
2.9 Régulation de vitesse d'un moteur brushless	38
2.10 Freinage	39
2.11 Conclusion	39

Chapitre 3 : Mise en équations et modélisation en vue de pilotage des moteurs BLDC

3.1 Introduction	41
3.2 Les moteur BLDC monophasés et triphasés	42
3.3 Structures et modes d'alimentation du moteur Brushless	43
3.3.1 Modes d'alimentation	43
3.3.1.1 Moteur à trois phases couplées en étoile à alimentation bidirectionnelle	43
- Éléments du circuit	44
3.3.1.2 Moteur à trois phases en étoile à alimentation unidirectionnelle.....	44
- Éléments du circuit	45
3.3.1.3 Moteur à trois phases en triangle	46
3.4 Modélisation de la machine BLDC	48
3.4.1 Modélisation du moteur.....	48
3.4.2 Le modèle mathématique	48
3.4.3 Hypothèses simplificatrices.....	49
3.4.4 Modèle mathématique dans le repère triphasé	50
3.4.4.1 Équations magnétiques.....	50
a- Flux propre du stator	51
b-Flux du stator produit par le rotor	57
3.4.4.2 Équations électriques	57
3.4.4.3 Équations mécaniques.....	59
- Calcul du couple moteur.....	59
3.4.4.4 Représentation du moteur BLDC dans l'espace d'état	60
3.5 Conclusion	61

Chapitre 4 : Stratégies et modes de contrôle des moteurs BLDC – simulations

4.1 Introduction	63
4.2 Stratégies de commande appliquées au moteur BLDC	64
4.2.1 Contrôle du moteur BLDC avec capteurs à effet Hall.....	64
4.2.2 Contrôle du moteur BLDC sans capteurs (Sensorless)	66
4.2.2.1 Méthode basée sur l'estimation des f.c.e.m simples.....	68
4.2.2.2 Estimation des f.c.e.m simples à partir des tensions simples.....	69
4.3 Simulation sur le contrôle avec capteurs du moteur BLDC	69
4.3.1 Simulation en boucle ouverte du moteur BLDC	70
4.3.1.1 Commentaires des résultats de simulation	71
4.3.2 Simulation en boucle fermée de contrôle du BLDC avec capteurs	74
4.4 Simulations sur le contrôle sans capteurs du moteur BLDC	78
4.4.1 Description du modèle	79
4.4.1.1 Estimation des références	80
4.4.1.2 Technique de détection de passage par zéro	81
-Le bloc inverter	83
4.4.2 Résultats des simulations.....	84
4.5 Interprétations des résultats de simulation	89
- Ondulation du couple	90
4.6 Conclusion	91
Conclusion générale	92
Références bibliographiques	94
Annexes	98

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Au cours des deux dernières décennies, la recherche et le développement sur les stratégies de contrôle et leur mise en œuvre ultérieure ont été rapportés dans des revues et présentés et publiés lors de plusieurs travaux et conférences. En ce qui concerne l'électronique de puissance associée à ces systèmes d'entraînement, l'onduleur à pont triphasé est utilisé comme standard depuis très longtemps, sa compréhension et son contrôle ont considérablement changé au fil du temps grâce aux développements enregistrés en microélectronique de contrôle (microcontrôleurs).

De nos jours, il existe plusieurs applications dépendantes d'un entraînement à moteur électrique. Ces applications nécessitent des performances qui rendent le choix du moteur adéquat très délicat. On trouve alors de nombreux types sur le marché. Le moteur synchrone, le moteur asynchrone, moteur à courant continu, le moteur à réluctance variable, etc..., sont parmi les types les plus utilisés dans l'industrie. Ils sont différents les uns des autres en fonction de l'efficacité, du coût, de la réponse en vitesse, de la facilité de fabrication et de contrôle, etc...

Les champs d'applications des différents moteurs s'élargissent progressivement grâce aux innovations citées offrant des puissances de calcul intéressantes, qui permettent de contrôler le courant de façon très flexible.

Les moteurs électriques sont également classifiés par rapport à leur utilisation des aimants permanents (PMs) ou non,. En fait, les PMs présentent de nombreux avantages, parmi lesquels on peut citer la taille réduite du moteur, un rendement plus élevé et l'accélération plus rapide par rapport à d'autres types de moteurs tels que les moteurs à induction. En effet, c'est à base des PMs que le type de moteur Brushless est apparu.

Le développement des matériaux à aimants permanents et des composants d'électronique de puissance efficaces a rendu le moteur BLDC de plus en plus utilisé et largement répandu pour plus d'un siècle, et en particulier après l'apparition des éléments Hall développés en 1962. Cela a inauguré une nouvelle ère dans la fabrication des moteurs BLDC.

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 en revanche il est commuté électroniquement. Il contient des enroulements polyphasés

sur le stator et des aimants permanents sur le rotor. Pour cela ce moteur est défini comme une combinaison de la machine à courant alternatif synchrone avec un commutateur électronique et les capteurs de position du rotor.

Les moteurs « brushless-DC » sont largement utilisés dans l'industrie, ils équipent les véhicules électriques récents, ils sont aussi très utilisés en modélisme pour faire se mouvoir des modèles réduits d'avions, d'hélicoptères (aéromodélisme). Ils sont moins bruyants que les moteurs avec balais. Le rapport poids/ puissance de ces moteurs est très favorable à leur utilisation dans ce domaine. Ils équipent aussi les disques durs et les graveurs de DVD, en particulier dans les servomécanismes des machines-outils, et plus utilisés dans la robotique pour leurs dimensions et leur non influence de la charge sur la vitesse (vitesse est relativement constante quelque soit la charge).

Le contrôle des moteurs BLDC peut se faire en mode capteur ou sans capteur, mais pour réduire le coût global des dispositifs d'actionnement, les techniques de contrôle sans capteur sont normalement utilisées. L'avantage du contrôle du moteur BLDC sans capteur est que la partie « détecteur » peut être omise et, par conséquent, les coûts globaux peuvent être considérablement réduits. Les inconvénients du contrôle sans capteur sont des exigences plus élevées pour les algorithmes de contrôle et l'électronique plus compliquée.

Nous avons réparti notre travail selon le plan suivant :

Au premier chapitre on présente des notions fondamentales sur ce type de moteur, sa classification parmi les moteurs électriques les plus connus, ses applications et les particularités de son emploi.

Le second chapitre est consacré à la présentation des différents éléments constitutifs du moteur BLDC avec les différents modes de fonctionnement en vue de son contrôle.

Au troisième chapitre on traite les techniques d'entraînements puis on établit la mise en équations et les différents modèles mathématiques.

Dans le cadre du quatrième chapitre, les techniques et les stratégies conventionnelles de commande d'entraînement y sont citées avec une comparaison entre les performances de chacune. Les deux techniques avec capteurs et sans capteurs sont évaluées et vérifiées par des simulations réalisées sur un modèle du moteur BLDC.

En clôture notre travail par des conclusions et suggestions.

CHAPITRE 1

CONCEPTS FONDAMENTAUX DES MOTEURS BLDC

1.1 Introduction [1]

Le moteur DC sans balais (BLDC) est également appelé moteur à commutation électronique. Le rotor est dépourvu de balais et la commutation est effectuée électroniquement sur certaines positions de rotor. Un moteur BLDC est un moteur synchrone à aimants permanents, générant une onde de force contre-électromotrice unique, ce qui lui permet de se comporter de façon similaire à un moteur DC à balais traditionnel. Un moteur BLDC ne fonctionne pas directement à partir d'une source de tension DC. Cependant, le principe de fonctionnement de base est similaire à celui d'un moteur DC.

Un moteur DC sans balais a un rotor équipé d'aimants permanents et un stator avec enroulements. Un moteur BLDC est globalement un moteur DC retourné. Les balais et le collecteur ont été éliminés et les enroulements sont connectés à l'électronique de commande. L'électronique de commande remplace la fonction du collecteur et excite le bon enroulement. Les enroulements sont excités selon une configuration tournant autour du stator. L'enroulement excité entraîne l'aimant du rotor et les commutateurs au moment où le rotor s'aligne avec le stator.

Le moteur DC sans balais est le choix idéal pour les applications nécessitant une grande fiabilité, un haut rendement et un très bon rapport puissance/volume. En général, un moteur BLDC est considéré comme un moteur de haute performance, capable de fournir un couple élevé sur une plage de vitesse étendue.

Origine du moteur sans balais [01]

Le moteur sans balais, qui commence à équiper plusieurs outils aujourd'hui, ne date pas d'hier. Pour bien comprendre son origine, il faut remonter jusqu'au moteur avec balais inventé par « M. Ernst Werner von Siemens » en 1856. Bien que rudimentaire, ce moteur a connu plusieurs améliorations au fil des décennies, dont l'une d'elles était un rhéostat servant à contrôler avec précision la vitesse de rotation de l'arbre.

La porte du moteur sans balais s'est ouverte au début des années 1960. En 1962, c'est apparu une description d'un moteur sans balais fonctionnant sur le courant continu et doté d'une

technologie où le magnétisme d'aimants est mis en opposition successivement par un dispositif électrique. La grande trouvaille dans le concept du moteur sans balais était évidemment l'absence d'un commutateur mécanique (physique) servant à transmettre le courant. [01]

1.2 L'utilisations de moteur BLDC [02].

Les moteurs brushless sont largement utilisés dans l'industrie, car ils ont des caractéristiques considérables et efficaces dans ce domaine. Il existe de nombreuses applications pour les moteurs BLDC. Voici quelques-unes des plus courantes :

- **Le transport** : Il est devenu le moteur incontournable de tous les types de véhicules de transport : petites voitures, vélos, fauteuils roulants, scooters et drones [02].
- **Outils électriques** : En raison de leur efficacité, les outils alimentés par batterie - perceuses, tournevis, scies, tondeuses à gazon électriques et coupe-bordures, entre autres - sont passés presque exclusivement au moteur BLDC. Le rendement élevé fournit non seulement de la puissance, mais également plus de temps entre les charges et une durée de vie de la batterie plus longue [02].
- **L'industrie et fabrication** : Les usines déploient des centaines de moteurs pour contrôler des machines de toutes sortes. Des utilisations supplémentaires sont dans les appareils et les robots asservis. La vitesse et le couple sont facilement contrôlés pour répondre à presque tous les besoins. Le rendement élevé et la faible maintenance permettent d'économiser sur les coûts d'énergie et de maintenance [02].
- **L'électroménager** : Les aspirateurs, laveuses et sécheuses de haute gamme utilisent des moteurs BLDC où la performance, le silence et la longévité sont essentiels.
- Les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation utilisent largement les moteurs BLDC dans les ventilateurs, les pompes et maintenant même les compresseurs. L'équipement de réfrigération utilise également des moteurs BLDC avec beaucoup d'avantages [02].
- **Modèles radiocommandés** : Les modèles R/C de voitures, d'avions et de drones abandonnent les vieux moteurs à combustion interne bruyants pour les moteurs BLDC. Ils sont puissants, efficaces et offrent une longue durée de vie de la batterie [02].

1.3 Classification des moteurs électriques « BLDC » [03]

1.3.1 Moteur à courant continu comparé au moteur brushless

En prenant un moteur brushless à rotor extérieur (outrunner) comme base de comparaison, les deux moteurs ont une structure équivalente : des aimants sur l'extérieur et des bobinages à l'intérieur autour de l'axe. La différence est que le support des aimants formant le rotor dans un moteur brushless alors que ce sont les bobines qui tournent pour un moteur à courant continu. A dimensionnement équivalent, le couple et la surface magnétique sont identiques. Le moteur à courant continu est plus long et un peu plus lourd car l'axe doit recevoir les balais. La commande d'un moteur à courant continu se fait généralement à tension constante (après avoir régulé son courant d'induit) par un hacheur qui permet de varier la tension de commande. L'excitation des phases est automatique avec la rotation du rotor qui entraîne une commutation des bobinages à angle fixe. Les balais ont donc un double rôle, passer le courant à une pièce en rotation et commuter les phases à angle déterminé.

Dans un moteur brushless, communément à 3 phases, les phases sont excitées électroniquement à tour de rôle pour entraîner la rotation. Il faut connaître la position angulaire du moteur pour savoir quelle phase est excitée. Des capteurs sont utilisés pour cela (hall, optique, resolver, encoder, etc...). En mode sans capteur « sensorless », on détecte les variations de la *fcém* (Force Contre Électromotrice) pour calculer la position angulaire du rotor. La commande peut se faire comme un moteur DC en tension pseudo continu (méthode des 6 pas) avec des capteurs hall qui jouent le rôle des balais pour la position angulaire, la commutation des phases se faisant toujours électroniquement.

Il est possible de faire des commandes plus sophistiquées qui permettent d'optimiser le facteur de puissance et d'augmenter le rendement du système moteur + contrôleur. Ce type de commande est difficile à mettre en œuvre avec un moteur à balai car l'excitation de la phase se fait à angle fixe. Dans ce cas, le facteur de puissance peut varier fortement, soit par des distorsions de courant, soit par des déphasages du courant à haut régime. Cela entraîne des pertes de rendement et une limitation de puissance à haut régime. Les balais créent également une discontinuité de courant dans les phases qui se traduit par un pic de tension et une étincelle sur les balais. L'énergie de magnétisation des phases est alors partiellement perdue. Le pic de tension génère du bruit (Compatibilité Électromagnétique).

Avec un moteur brushless, il n'y a pas d'étincelle et il est possible d'exciter continuellement toutes les phases sans perdre l'énergie de magnétisation à chaque inversion de la *fcém*. Le bruit est réduit et le rendement augmenté. [03]

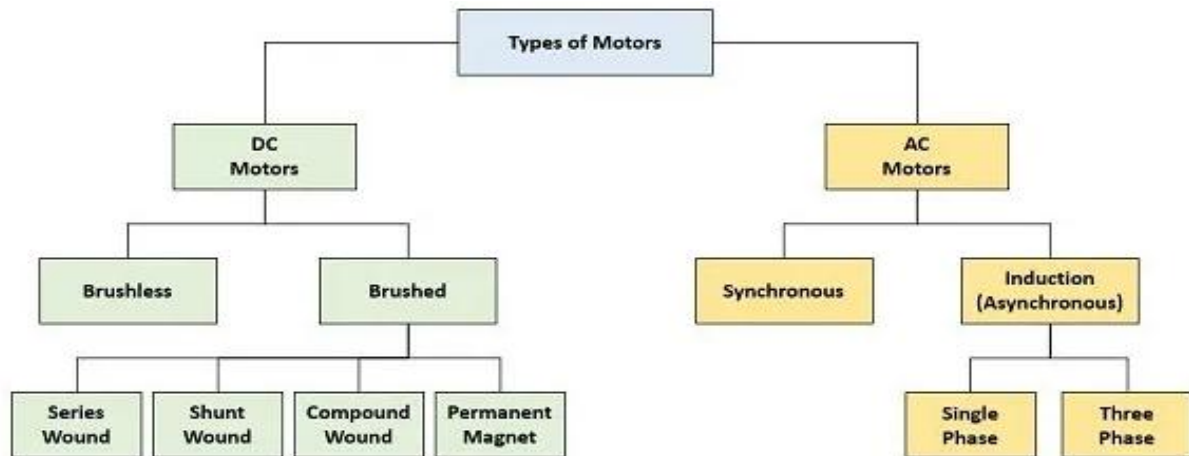


Figure (1.1) : Classification des moteurs électriques

1.3.2 Différence entre Moteur BLDC brushless et MSAP [04]

Le moteur Brushless « BLDC » est une machine synchrone à aimants permanents « MSAP » ayant comme seule différence la distribution des enroulements. La MSAP aurait une distribution sinusoïdale alors que le moteur DC Brushless aurait une distribution trapézoïdale. La vraie différence entre les deux serait donc le mode de commande:

- La MSAP serait commandé par des signaux sinusoïdaux avec un contrôle réalisé à travers les transformées de Park
- Le moteur DC Brushless serait commandé comme un moteur DC avec comme différence le contrôle des phases sur lesquelles la PWM est appliquée

Cependant, les deux modes de contrôles seraient compatibles avec les deux types de machines.

Les moteurs BLDC sont un type de moteur synchrone. Cela signifie que le champ magnétique généré par le stator et le rotor tournent à la même fréquence. Le moteur BLDC ne fonctionne pas directement à partir d'une source de tension continue. Il se compose d'un rotor à aimants permanents, d'un stator à enroulements et d'une commutation réalisée électroniquement [05].

Il existe des points similaires entre les moteurs BLDC et PMSM en termes de caractéristiques et d'importance, et il existe également des points différents qui les distinguent. Il est nécessaire d'étudier une comparaison entre eux pour en connaître tous les aspects, notamment : Le tableau (1.1) récapitule les principaux points de distinction.

Moteur « BLDC »	Moteur « PMSM »
- Machine synchrone	- Machine synchrone
- Enroulement concentré	- Enroulement distribué
- Alimenté en courant continu	- Alimenté par des courants sinusoïdaux
- $f_{cém}$ trapézoïdale	- $f_{cém}$ sinusoïdale
- Commutation de la position du flux du stator tous les 60° (pour 3 ϕ /bipolaire)	- Variation continue de la position du flux stator
- Seulement deux phases ON en même temps.	- Possible d'avoir trois phases ON en même temps.
- Ondulation de couple aux commutations	- Pas d'ondulation de couple aux commutations
- Harmoniques de courant d'ordre inférieur dans la plage audible	- Moins d'harmoniques grâce à l'excitation sinusoïdale
- Pertes de noyau plus élevées dues au contenu harmonique	- Moins de perte de noyau
- Moins de pertes de commutation	- Pertes de commutation plus élevées à la même fréquence de commutation.
- Les algorithmes de contrôle sont relativement simples	- Les algorithmes de contrôle sont mathématiquement intensifs

Tableau (1.1): Comparaison des moteurs BLDC et PMSM [06]

Parmi les points de distinction les plus importants entre les moteurs BLDC et PMSM il y a le diagramme du signal de la force contre électromotrice $f_{cém}$ (*bemf* en anglais).

On remarque sur la figure (1.2) que la forme d'onde de la $f_{cém}$ pour PMSM (en bleu) est sinusoïdale tandis que la seconde forme (en rouge) est trapézoïdale pour BLDM. On peut considérer que chacune d'elles est une courbe périodique.

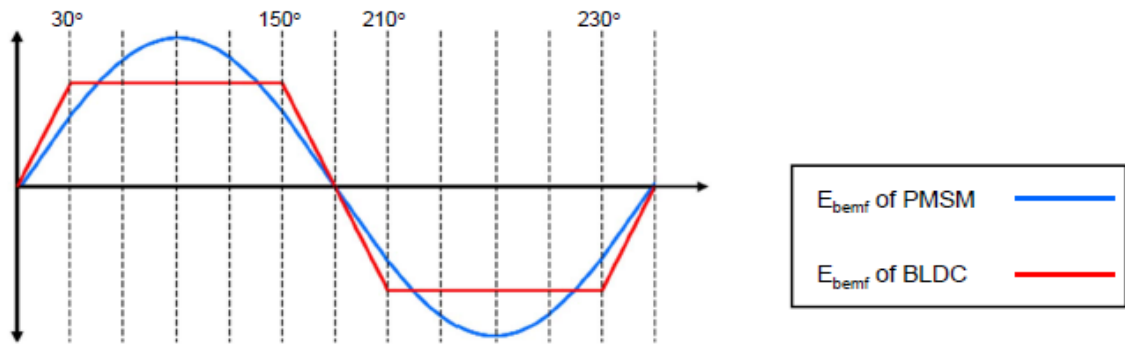


Figure (1.2) : *fém des moteurs BLDC(rouge) et PMSM(bleu)*

Un moteur à courant continu sans balais et un moteur PMSM se composent d'un aimant permanent, qui tourne (le rotor), entouré de trois enroulements équidistants, qui sont fixes (le stator). Le flux de courant dans chaque enroulement produit un vecteur de champ magnétique, qui s'additionne aux champs des autres enroulements. En contrôlant les courants dans les trois enroulements, un champ magnétique de direction et d'amplitude arbitraires peut être produit par le stator. Le couple est alors produit par l'attraction ou la répulsion entre ce champ net du stator et le champ magnétique du rotor.

La figure (1.3) représente les deux types d'enroulement des moteurs BLDC et PMSM :

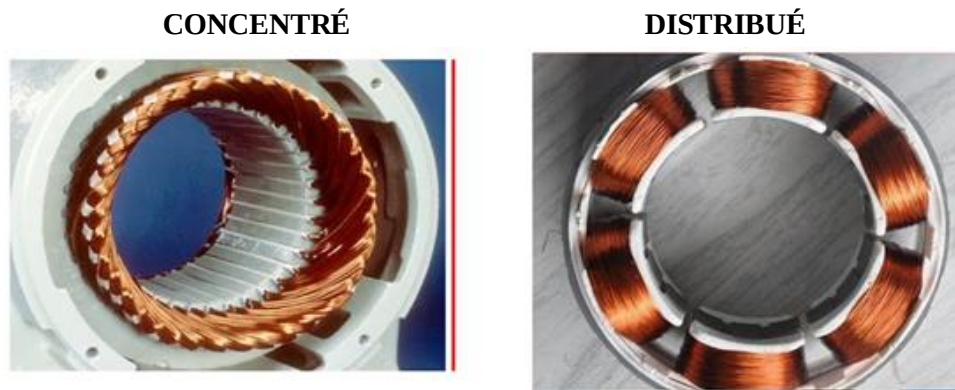


Figure (1.3) : *Enroulements des moteurs BLDC et PMSM*

1.4 Caractéristiques spécifiques du moteur à C.C sans balais (BLDC) [07]

Les moteurs à courant continu sans balais « BLDC », également appelés moteurs synchrones à courant continu à aimant permanent, sont l'un des types de moteurs qui ont gagné en popularité le plus rapidement, principalement en raison de leurs meilleures caractéristiques et performances [2]. Ces moteurs sont utilisés dans un grand nombre de secteurs industriels car leur architecture est adaptée à toutes les applications critiques pour la sécurité.

Le moteur à courant continu sans balais est un moteur électrique synchrone qui, du point de vue de la modélisation, ressemble exactement à un moteur à courant continu, ayant une relation linéaire entre le courant et le couple, la tension et le régime. Il s'agit d'un système de commutation à commande électronique, au lieu d'avoir une commutation mécanique, ce qui est typique des moteurs à balais. De plus, les électro-aimants ne bougent pas, les aimants permanents tournent et l'armature reste statique. Cela contourne le problème de la façon de transférer le courant à une armature mobile. Pour ce faire, l'ensemble balais/collecteur est remplacé par un contrôleur électronique intelligent, qui effectue la même distribution de puissance qu'un moteur à courant continu à balais [03].

Ce n'est toutefois que dans les années 80 que le moteur sans balais a vraiment connu un début digne de ce nom. La plus grande disponibilité d'aimants permanents, combinée à des transistors à haut voltage, ont permis au moteur sans balais de générer autant de puissance que les moteurs pourvus de balais. Évidemment, les améliorations au moteur sans balais se sont poursuivies sans cesse au cours des trois dernières décennies. Ils sont toutefois devenus une réalité dans certaines industries avant d'autres.

Si on les retrouve aujourd'hui dans plusieurs outils électroportatifs, c'est tout simplement parce que la miniaturisation du contrôle électronique et le perfectionnement des méthodes de la fabrication industrielle permettent aujourd'hui de produire ces outils. Les outils avec moteur sans balais sont pour le moment considérés comme chez les fabricants d'outillage.

1.4.1 Avantage des Moteurs Brushless « BLDC »

Les moteurs Brushless (synchrones autopilotés) de faible et moyenne puissance présentent plusieurs avantages par rapport aux moteurs à courant continu à balais et aux moteurs à induction, tels qu'une vitesse accessible supérieure ; meilleure vitesse par rapport aux caractéristiques de couple, une réponse dynamique élevée, un rendement et une fiabilité élevés, une longue durée de vie (pas d'érosion des balais, autorisant ainsi une meilleure dissipation thermique. Il en découle une diminution des frottements), un fonctionnement silencieux, des plages de vitesse plus élevées et une réduction d'interférences électromagnétiques (EMI). De plus, le rapport entre le couple fourni et la taille du moteur est plus élevé, ce qui le rend utile dans les applications où l'espace et le poids sont des facteurs critiques, en particulier dans les applications aérospatiales [08].

EN plus une maintenance plus souple et une puissance massique supérieure. De plus, l'absence de coupure physique du courant permet d'éviter la création d'arc électrique lors des

commutations augmentant ainsi la plage de domaine d'utilisation de cette machine. Enfin, le flux d'induction étant constant (certaines précautions doivent être prises pour éviter la démagnétisation du circuit magnétique) et non lié à l'état de l'inducteur, les circuits de commande de cette machine sont plus simples. [09]

1.4.2 Principaux facteurs de choix du moteur sans balais [10]

a- Durée de vie et fiabilité

La longévité (env. 20000 h) est équivalente aux moteurs AC et jusqu'à 4 fois supérieur à un moteur DC avec balais. Les soucis liés au frottement des charbons sur le collecteur disparaissent : plus de parasites, plus d'échauffement du collecteur et de pertes dues à l'étincelage, plus d'usure mécanique (hormis les roulements).

b- Encombrement et poids

Plus compact que les moteurs AC et DC, un moteur sans balais est également 2 à 3 fois plus léger qu'un moteur DC traditionnel. Pour un poids et un encombrement identique, le moteur BLDC sera donc bien plus efficace en terme puissance.

c- Consommation électrique

Le rendement est bien supérieur à celui d'un moteur DC traditionnel à balais (pas de chute de tension au niveau du collecteur et pas de friction). Gestion électronique pour un rendement maximum.

d- Niveau sonore

Le bruit et les vibrations générés par un moteur sans balais sont inférieurs aux autres types de moteurs. La variation de vitesse aisée permet également de rechercher facilement le point de fonctionnement le plus silencieux.

e- Variation de vitesse et asservissement

La technologie du moteur « brushless » avec son module électronique offre de nouvelles possibilités de variation de la vitesse. Plus de souplesse en effet, avec une plage de variation plus étendue et surtout le maintien du couple (couple constant car on ne modifie pas la tension d'alimentation).

1.4.3 Les caractéristiques du moteur BLDC (appelé ECM)

Le moteur Brushless n'a pas de commutation mécanique mais une commutation électronique. Il n'y a donc pas de couple de frottement dû à la friction des balais sur les lames du collecteur. Ce moteur à courant continu sans balais peut atteindre des vitesses allant jusqu'à 50000 tours par minute avec des rotors à l'équilibrage optimisé. Son rendement est optimum sans bruit, sans parasites électriques, sans débris et résidu. En effet, le moteur brushless n'a ni collecteur, ni balais, c'est un moteur léger, souple et fiable qui permet de réaliser de l'asservissement de vitesse et de position. [10]

1.5 Conclusion

Les moteurs Brushless à c.c offrent aujourd'hui de grandes possibilités d'application des moteurs à c.c dans le contrôle et la précision en offrant une flexibilité de commande grâce aux convertisseurs et aux microcontrôleurs employés qui se développent jour après jour.

Les moteurs à courant continu sans balais à aimant permanent sont plus acceptés utilisés dans les applications hautes performances en raison de leur rendement plus élevé, leur couple plus élevé à bas régime, haute densité de puissance, peu d'entretien et moins de bruit qu'autres moteurs. Dans cet article Mathématique du moteur BLDC modèle est développé. Enfin un contrôle de vitesse en boucle fermée Le BLDC est réalisé et les résultats de la simulation sont présentés. Les résultats de l'évaluation des performances montrent que la modélisation est très utile pour étudier les hautes performances conduire avant d'aborder la conception du contrôleur dédié concept d'évaluation des performances dynamiques du moteur. Les résultats de la simulation sont présentés pour divers chargements conditions. [03]

Les moteurs brushless réduisent certains problèmes liés aux moteurs à balais les plus courants (durée de vie limitée pour des applications à usage intensif) et leur conception mécanique est beaucoup plus simple (sans balais). Le contrôleur de moteur utilise des capteurs à effet Hall pour détecter la position des rotors, et le contrôleur peut ainsi commander le moteur de façon précise via le courant dans les bobines du rotor pour réguler la vitesse. Les avantages de cette technologie sont une longue durée de vie, peu d'entretien et un haut rendement (85-90 %), tandis que les inconvénients sont des coûts élevés et des contrôleurs plus compliqués. Ces types de moteurs sont généralement utilisés dans le contrôle de positionnement et de vitesse avec des applications telles que les ventilateurs, pompes et compresseurs, qui nécessitent fiabilité et robustesse.

CHAPITRE 2

*CONSTITUTION ET FONCTIONNEMENTS DES
MOTEURS BRUSHLESS A C.C*

2.1 Introduction [01][11]

Le monde industriel a durant longtemps connu les moteurs à courant continu qui sont tout à fait adaptés aux fonctionnements en régime variable, mais ils présentent de gros inconvénients liés à la présence du contact mobile entre balais et collecteur (entretien, problème de commutation).

Afin de contourner ces inconvénients on a donc cherché à les remplacer par des machines qui utilisent un commutateur électronique à la place du commutateur mécanique : ce sont les moteurs sans balais.

Le moteur brushless est supérieur au moteur à courant continu classique à bien des égards grâce à ses caractéristiques et avantages : l'absence de balais conduit à de meilleures performances énergétiques et une meilleure fiabilité. Les bobinages étant sur le stator, l'évacuation de la chaleur est plus facile et l'inertie est réduite (les bobinages de cuivre sur le rotor des moteurs à courant continus sont très lourds), ce qui améliore encore les performances énergétiques dans les applications nécessitant des accélérations et décélérations. Le rapport poids/puissance est meilleur et le coût des commandes électroniques triphasées est désormais inférieur au coût d'un collecteur.

Les moteurs Brushless sont l'un des types de moteurs gagnant rapidement une popularité, Parce qu'il présente de nombreux avantages qui suivent le rythme des industries modernes et garantissent d'excellents rendements et il offre une longue durée de vie avec moins d'entretien. Ils sont employés dans des industries telles que, l'automobile, Aéronautique, les appareils : de consommation, médical, l'Automatisation industrielle, équipement et instrumentation.

2.2 Constitution du moteur brushless « BLDC » [01]

Un moteur brushless comporte les mêmes éléments qu'un moteur à courant continu, excepté le collecteur, mais l'emplacement des bobines et des aimants permanents sont inversés. Le rotor est composé d'un ou plusieurs aimants permanents, et le stator de plusieurs bobinages. La figure (2.1) montre les éléments constitutifs d'un moteur BLDC.

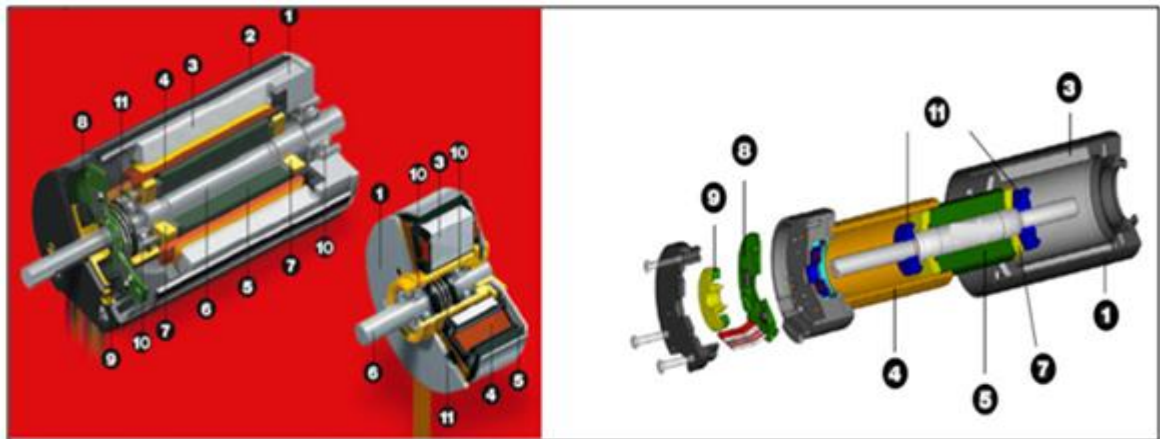


Figure (2.1) : Éléments constitutifs d'un moteur à cc sans balais

- | | | |
|----------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 1. Flasque | 5. Aimant Permanent (rotor) | 9. Aimants de commande |
| 2. Carcasse | 6. Arbre | 10. Roulements pré chargés |
| 3. Tôles statoriques | 7. Disques d'équilibrage | |
| 4. Bobinage | 8. Capteur à effet hall | |

Parmi les principaux éléments du moteur Brushless nous mentionnons les suivants:

2.2.1 Stator (inducteur) [01]

C'est un empilement de tôles statoriques qui évitent l'établissement d'un courant de Foucault dans le corps du moteur. Un bobinage (généralement triphasé) est logé dans les encoches du circuit magnétique, l'enroulement triphasé est connecté en étoile ou en triangle. Sur la figure (2.2) est illustré le stator d'un moteur BLDC avec son enroulement concentrique.

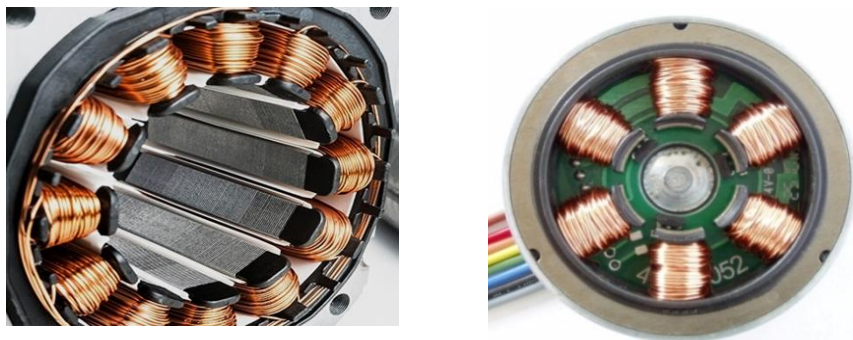


Figure (2.2) : Stator d'un moteur à cc sans balais « BLDC »

2.2.2 Rotor (induit) [01]

Le rotor est constitué de l'axe moteur, de l'aimant à un ou plusieurs paires de pôles et de disques d'équilibrage. Les aimants du rotor du moteur à commutation électronique « ECM » sont en ferrite, en samarium cobalt (SmCo_5 , $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$) et Néodyme ferbore NdFeB .

Le rotor peut être soit à aimants déposés, soit à concentration de flux ; cette seconde conception étant réalisée avec un volume d'aimants plus faible.

Sur la figure (2.3) sont présentés les différents types et formes des aimants du rotor du moteur BLDC.

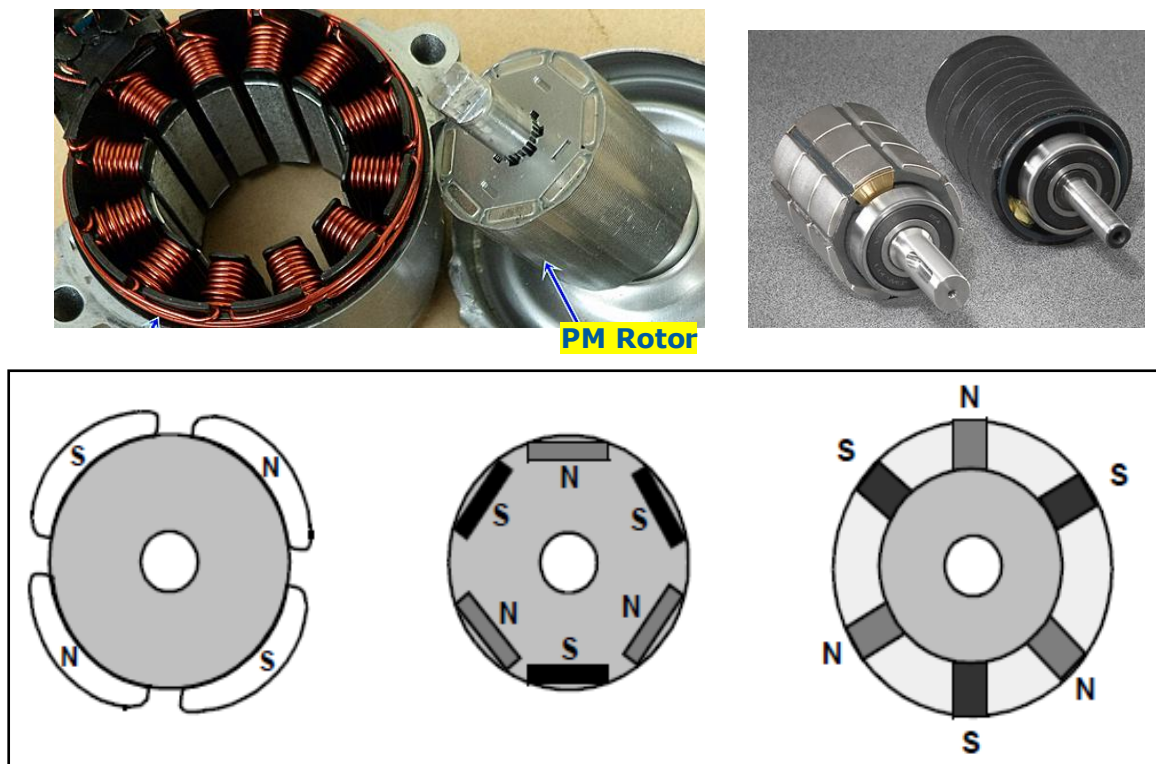


Figure (2.3) : Différents types de rotors pour moteur à cc sans balais « BLDC »

Parmi les types d'aimants employés à la fabrication du rotor du moteur BLDC, on trouve :

a- Moteurs SPM : aimants permanents fixés sur la surface latérale du rotor [12]

Les SPM à bobinage reparti possèdent une puissance massique supérieure à celle des moteurs à courant continu tout en restant simples à fabriquer. L'absence de bobinage d'excitation (machine brushless) remplacée par les aimants permanents augmente considérablement la durée de vie de la machine tout en annulant les pertes joules rotoriques.

L'inconvénient majeur de ce type de machine réside dans le faible rapport de défluxage de l'ordre de 2 à 3 qui se traduit par une réaction magnétique d'induite relative inférieure à l'unité. La réaction magnétique d'induit (RMI) étant le ratio entre le flux d'axe d produite par le bobinage statorique et le flux produit par l'inducteur :

$$Rmi = \frac{L_d i_d}{\Psi_{ap}} \quad (2.1)$$

Avec : L_d l'inductance d'axe d, i_d Le courant d'axe d,

Ψ_{ap} Le flux du aux aimants permanents.

b- Moteurs IPM : Les aimants permanents sont intégrés à l'intérieur du rotor [13]

Pour ce type de machine, le processus de création de couple est lié à la fois à une interaction du flux produit par l'aimant rétorque Ψ_a et les courants satiriques ainsi qu'au couple reluctance rotorique :

$$C = \frac{3}{2} P (\Psi_{ap} + (L_q - L_d) i_d) i_q \quad (2.2)$$

Avec : L_d l'inductance d'axe d, L_q l'inductance d'axe q ;

$i_d i_q$ Les courants d'axe d et q et Ψ_{ap} le flux du aux aimants permanents.

Aux avantages des structures à aimants surfaciques (structure brushless, rendement, couple massique...), s'ajoute la facilité de fixation des aimants dans le rotor ce qui permet le fonctionnement à des vitesses de rotation élevées sans frette supplémentaire. De plus, le risque de démagnétisation des aimants est réduit car ils sont entourés de matériau ferromagnétique et éloignés de l'entrefer. Le matériau ferromagnétique protège également les aimants de la corrosion, des impacts mécaniques et de la poussière.

Par exemple, les moteurs IPM sont utilisés dans les véhicules hybrides et entièrement électriques. Ces moteurs hautes performances sont capables de fonctionner sur une large plage de vitesses, ce qui leur permet de s'adapter à la vitesse élevée d'un moteur de véhicule.

c- Machine à aimant de bobinage concentré double couche à dents [13]

Sa forme se distingue du reste par la présence des spires centrées sur des dents espacées. Au but d'éviter le recouvrement des bobinages adjacents, il faut augmenter

le facteur de remplissage d'encoches avec un bobinage asymétrique consistant à diminuer l'épaisseur de la couche d'isolant sur le côté intérieur de la dent et à alterner les dents.

Parmi ses avantages, la diminution des pertes joules statoriques par augmentation du coefficient de remplissage, une bonne liaison mécanique et Il a un bon rendement.

2.2.3 Les capteurs à effet hall [01].

Un capteur à effet Hall permet de mesurer une variation de champ magnétique. C'est donc un capteur inductif. En général on l'appelle « Effet hall » lorsqu'une électronique interne au capteur le rend plus performant en amplifiant ou traitant le signal avant transmission, limitant ainsi les risques de perturbations d'environnement.

Ce sont donc des capteurs actifs, nom donné à la catégorie de ceux avec traitement du signal (autant analogique que numérique). Ces actifs ont toujours trois broches minimum. Ce n'est pas un signe distinctif, mais si une tresse de masse protège la liaison et qu'elle est reliée à une broche, ce n'est pas un actif (ils sont très souvent sans tresse de masse).

Ils peuvent donc servir par exemple à fabriquer un tesla mètre. Dans la mesure où un courant électrique génère un champ magnétique, on se sert aussi d'un capteur à effet Hall particulier pour mesurer l'intensité d'un courant électrique. Voir la figure (2.4).

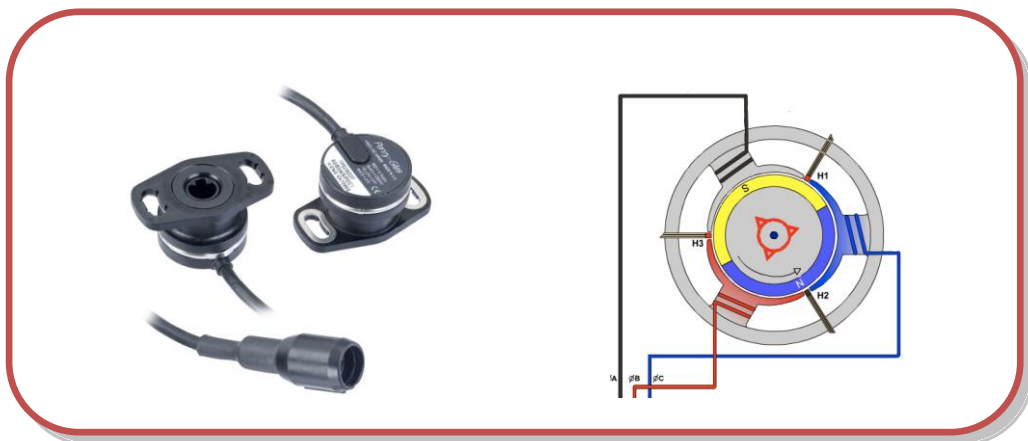


Figure (2.4) : Capteurs à effet Hall pour moteur à cc sans balais

Ils permettent à l'électronique d'assurer la commutation des phases du moteur. Le recopiage de la position du rotor peut se faire soit par l'intermédiaire de 3 capteurs magnétiques placés dans le moteur, soit grâce à un résolveur embarqué sur le moteur. La 1^{ère} solution est une solution économique et convenable pour une régulation simple. La seconde permet de parvenir à une régulation exacte, particulièrement pour le positionnement.

2.2.4 Une carte électronique [01].

Elle est utilisée pour piloter le moteur brushless. C'est elle qui définit la direction et la force du champ en fonction de l'information donnée par le capteur à effet hall

2.2.5 Les paliers [01].

Sont des organes utilisés en construction mécanique pour supporter des arbres de transmission. Suivant l'usage désiré, ces paliers peuvent être :

- lisses où les arbres qui reposent sur des coussinets sont soumis au frottement de glissement entre les surfaces en contact.
- à roulement où le contact s'effectue par l'intermédiaire de billes ou de rouleaux contenus dans des cages. On a là un phénomène de résistance au roulement (parfois appelé improprement « frottement de roulement ») qui permet une plus grande charge sur les paliers et une plus grande vitesse de rotation.
- Ils sont le seul lien mécanique entre le stator et le rotor. La durée de vie de l'ensemble en dépend. Ces roulements à billes pré chargées permettent d'obtenir une longue durée de vie. Cette durée de vie est également proportionnelle à la vitesse maximale, au déséquilibre résiduel et à la charge appliquée aux paliers créés pour fonctionner des dizaines de milliers d'heures.

2.3 Les différents types de moteurs Brushless

2.3.1 Moteurs Brushless à rotor externe (Outrunner) [14]

On appelle « outrunner » les moteurs brushless dont le rotor est autour du stator. Cette configuration est intéressante en termes de couple moteur, car les aimants sont disposés sur un diamètre important, ce qui crée un bras de levier très intéressant. De plus, cette disposition permet de placer facilement plusieurs séries d'aimants (jusqu'à 32 pôles sur certains moteurs

brushless outrunners) et de bobines. Les bobines sont toujours câblées par groupes de 3, et les aimants sont soit collés par groupes de 2, soit constitués d'une partie magnétique comprenant plusieurs pôles voir figure (2.5). Comme pour un moteur pas à pas, les moteurs brushless outrunners comprenant plus de 3 bobines et 2 pôles ne font qu'une fraction de tour lorsque le champ a tourné de 180° . Leur fréquence de rotation est donc plus faible mais le couple très élevé.

Ces moteurs brushless outrunners sont souvent utilisés dans des applications qui nécessitent un fort couple, car ils peuvent être reliés à la charge sans nécessiter de dispositif de réduction. Leur coefficient K_v est relativement faible par rapport aux autres types de moteurs brushless. Les principales applications des moteurs brushless outrunners sont les suivantes : ventilateurs, moteurs de disques durs, Cd-rom, moteurs de vélos électriques (intégrés dans un moyeu), bateaux ou avions radio commandés....

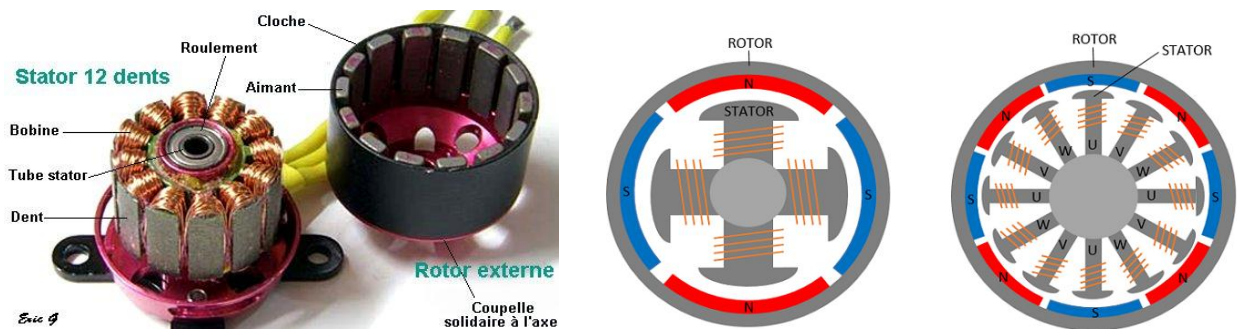


Figure (2.5) : Rotor et stator d'un moteur Brushless à rotor externe « outrunner »

2.3.2 Moteurs brushless à rotor interne « Inrunner » [14]

Contrairement au type précédent, les moteurs brushless inrunners ont le rotor à l'intérieur du stator. Ils n'ont généralement qu'une seule paire de pôles sur le rotor, et 3 bobines au stator.

L'inertie du rotor est beaucoup plus faible que pour un moteur outrunner, et les vitesses atteintes par ce type de moteur sont beaucoup plus élevées (K_v jusqu'à 7700tr/min/V). La gestion électronique de la commutation est par contre plus simple car le rotor tourne à la même fréquence que le champ magnétique. Le couple des moteurs brushless inrunners est plus faible que pour un outrunner car les aimants sont sur un diamètre plus petit à taille de moteur égale. Ce type de moteur brushless est très utilisé dans l'industrie car il se rapproche

beaucoup d'un moteur à courant continu à balais et collecteur. Cette configuration est la même que celle présentée au paragraphe constitution (§.2.2).

2.3.3 Moteurs Brushless à disques [14]

Le rotor et le stator peuvent également être constitués de deux disques faces à face, avec les rayons et les bobines répartis selon les rayons de ces deux disques. Ce type de moteur brushless est peu employé car l'action des bobines sur les aimants crée un effort axial important qui nécessite des butées à billes conséquentes, sans offrir de différences notables au niveau des performances par rapport à un moteur brushless outrunner. La figure (2.6) illustre ce type de moteur.



Figure (2.6) : Moteur Brushless à disques

2.4 Fonctionnement d'un moteur Brushless (BLDC) [15]

Afin de comprendre le fonctionnement du moteur à courant continu sans collecteur, Il vaut la peine de revenir sur celui du moteur DC à collecteur, en considérant le cas d'une machine à trois enroulements, i.e. trois phases, dont les axes magnétiques sont décalés de 120° . Par ailleurs, les enroulements sont connectés en étoile et ont de ce fait une borne commune, laquelle est flottante. Les lames du collecteur forment chacune un Arc de 120° (pour $p = 1$). L'excitation de la machine est constante et réalisée par deux aimants logés dans l'alésage statorique.

Comparé au moteur traditionnel avec balais, un moteur « brushless » est constitué d'aimants permanents sur le rotor et d'un bobinage triphasé sur le stator. Il suffit de faire passer un courant dans une partie du bobinage pour créer un champ magnétique qui va attirer les aimants et les aligner avec le Champ magnétique. Le bobinage est

généralement en triphasé, c.à.d qu'il est constitué de trois (3) Groupes de bobines reliées entre elles. En alimentant successivement les groupes de bobines, le rotor va à chaque fois s'aligner sur les champs et tourner.

Le moteur est simple mais la commande électronique (codeur ou contrôleur) est plus élaborée. En effet, il faut connaître à chaque instant la position du rotor et envoyer le courant dans les groupes de bobines.

Le module électronique est également capable de régler en permanence le courant pour que le moteur fonctionne dans sa zone de rendement maximum. Ce module de commande électronique est soit directement intégré au moteur pour les petites puissances ou intégré dans un boîtier fixé sur le moteur.

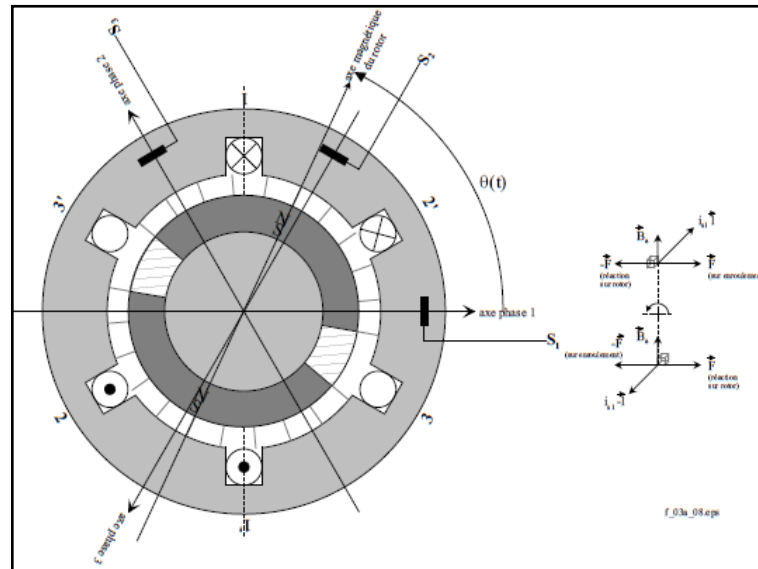


Figure (2.7) : disposition des phases et des enroulements du moteur BLDC

Comme il est montré sur la figure (2.7), les enroulements des trois phases sont logés dans le stator (induit), et la position de l'aimant (Inducteur) est détectée par les trois sondes de Hall S_1 , S_2 et S_3 .

Dans le moteur à CC à collecteur, la polarité de courant est inversée par le système collecteur –balais, tandis que pour le moteur sans balais, l'inversion de polarité est effectuée par la commutation des semi-conducteurs qui doivent être synchronisés avec la position du rotor.

Le moteur BLDC est généralement considéré comme un système triphasé et doit donc être alimenté par une alimentation triphasée. La position du rotor doit être connue à certains égards « angles », afin d'aligner la tension appliquée avec la *fcém*. L'alignement entre les événements de retour et de commutation est très important.

Généralement, une composition simple du moteur BLDC doit contenir un convertisseur triphasé de puissance et un moteur à courant continu sans balais.

La figure suivante (2.8.) représente une configuration générale pour la commande et le pilotage d'un moteur BLDC.

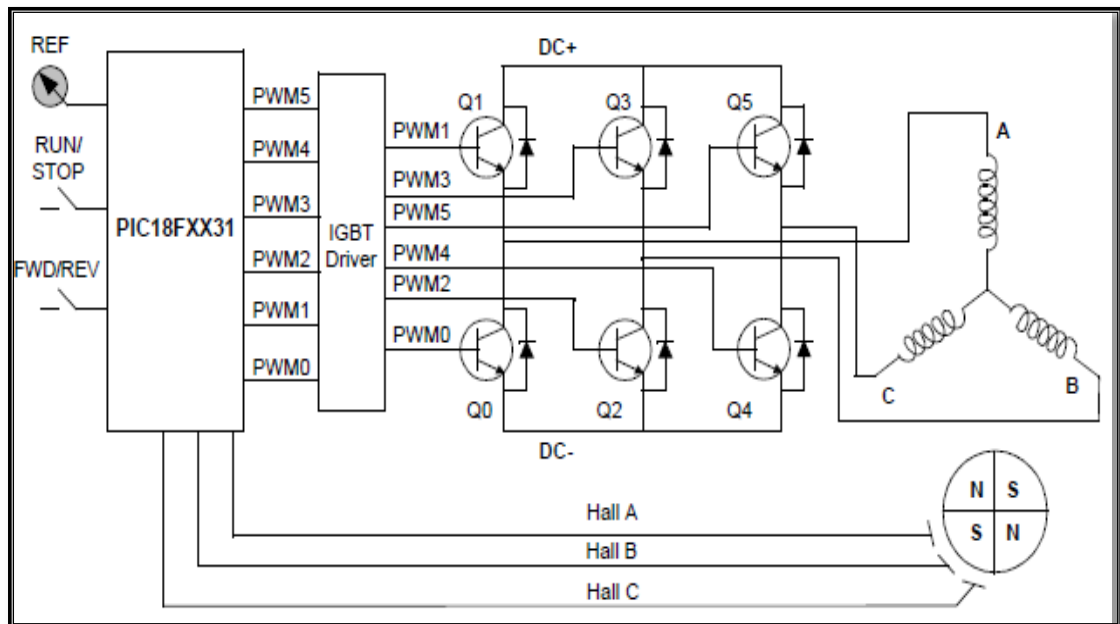


Figure (2.8) : Stratégie de commande du moteur Brushless à capteurs à effet hall

2.4.1 Configuration du bobinage [15]

Le moteur est constitué de trois (3) bobines, déphasées de 120° , couplées en étoile ou en triangle.

Les couplages permettent de privilégier soit la vitesse soit le couple avec un facteur $\sqrt{3}$.

Les constantes de vitesse et de couple doivent correspondre aux résultats attendus : Pour une impédance forte, le couplage en étoile avec les bobines en série est recommandé.

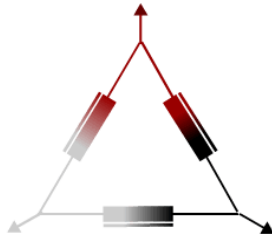
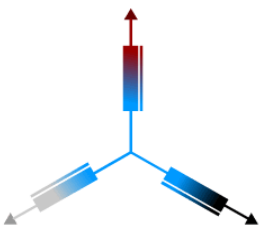
Circuit - Δ -	Circuit - Y -
	
❖ Resistance faible ❖ Tension faible ❖ Constante de vitesse plus élevée	❖ Grande résistance ❖ Courant faible ❖ Constante de couple plus élevée

Tableau (2.1) : Caractéristiques des couplages

2.5 Principe de commutation des moteurs brushless

2.5.1 Les pôles [16]

Une paire de pôles dans un moteur BLDC peut faire référence aux pôles électromagnétiques du stator ou aux pôles magnétiques du rotor. Le moteur BLDC triphasé le plus basique a des paires tripolaires sur le stator et peut accueillir plusieurs pôles sur le rotor, selon l'application.

Le nombre de pôles affecte les performances d'un moteur. Plus de pôles de rotor exigent des cycles de commutation plus fréquents dans une résolution mécanique en raison de la nécessité d'un angle de 90° pour fournir un couple maximal entre le champ magnétique du rotor et du stator. Ainsi, à mesure que le nombre de pôles augmente, le couple électromagnétique dans le moteur sera plus important et la vitesse maximale sera réduite.

2.5.2 Principe de commutation [17]

Il est important dans un premier temps de connaître la base de la commutation qui permet le fonctionnement optimal du moteur. Donc, tous les aspects de cette commutation qui font fonctionner le moteur en douceur doivent être expliqués. La première figure (2.9) explique le positionnement de tous les composants de sorte qu'il y ait 3 enroulements positionnés également à un angle de 120° dans le stator du moteur, et une seule paire de pôles dans le rotor.

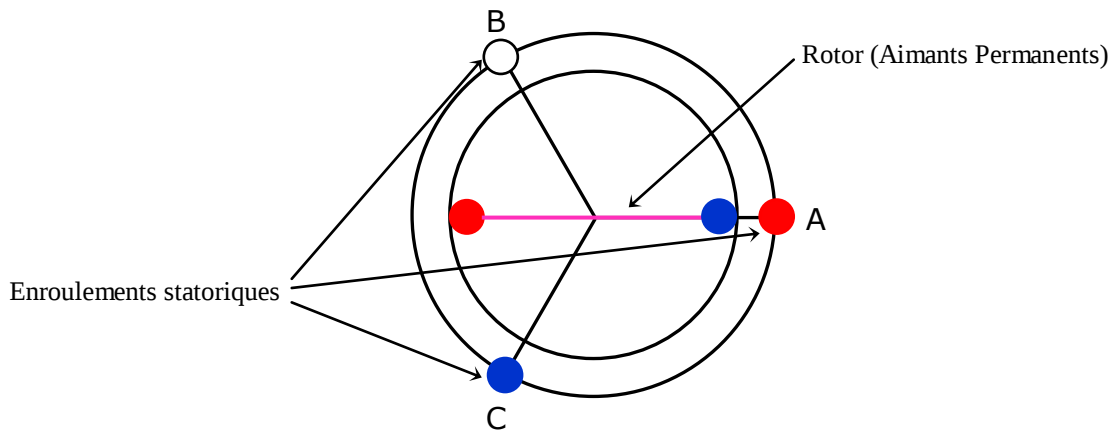


Figure (2.9) : Moteur BLDC à trois phases et une paire de pôles

Le principe du travail de commutation réside dans le fait que chaque paire d'enroulements fonctionne simultanément, et à tous les 60° , les enroulements de fonctionnement changent, et donc toujours un enroulement reste éteint. Ainsi, nous obtenons 6 cas d'enroulements d'alimentation, comme le montre la figure suivante (2.10) :

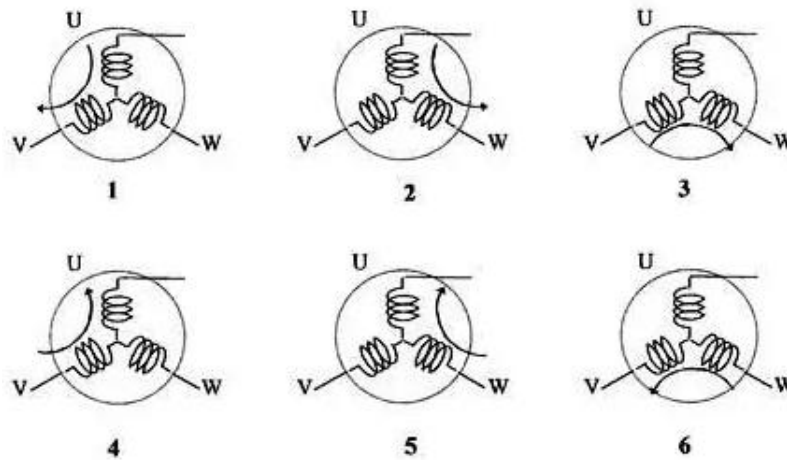


Figure (2.10) : les six étapes de l'alimentation des bobines du moteur

Sur cette forme de base, nous obtiendrons 6 cas possibles d'alimentation des paires d'enroulements (6 paires) qui permettent au moteur de tourner et également d'obtenir à travers lui la position exacte de la paire de pôle (contrôle trapézoïdal). En commutant 2 phases en même temps on peut faire tourner le champ magnétique du stator qui attire le rotor à tourner et se retrouver dans la position déterminée. Comme le montre les figures (2.11) et (2.12) :

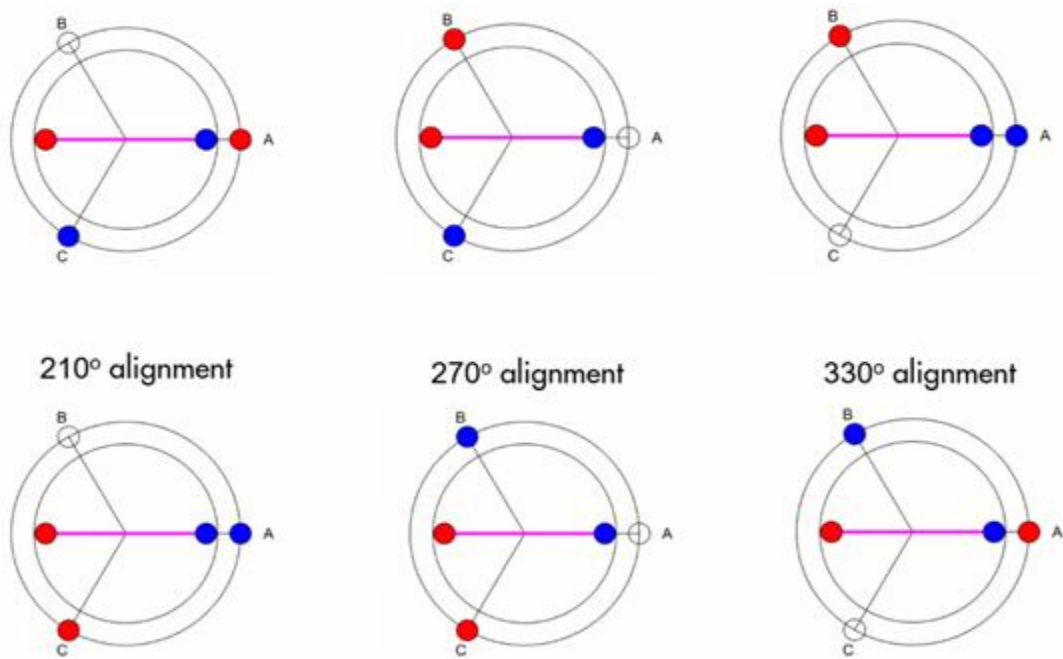


Figure (2.11) : Les six cas d'alimentation des paires d'enroulements statoriques

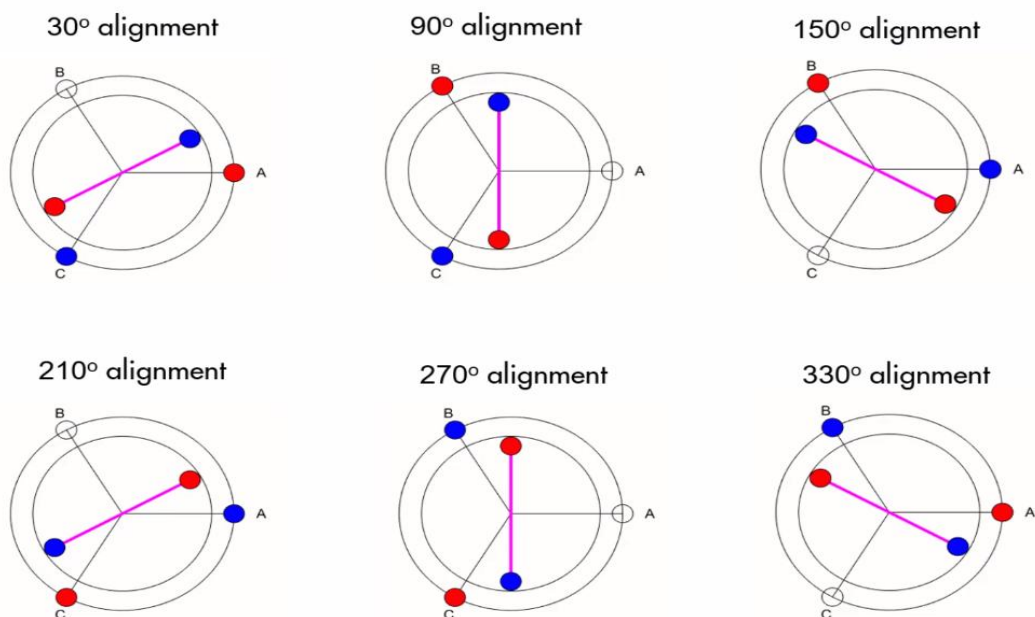


Figure (2.12) : Alignement du rotor (une paire) selon le champ statorique obtenu en commutation

Ce changement dans le travail des enroulements se déroule de manière régulière et dépend de la loi d'attraction et de répulsion, qui est expliquée dans la figure suivante, et sur cette base, le moteur peut tourner en continu. La figure (2.13) est une illustration de ce qui précède.

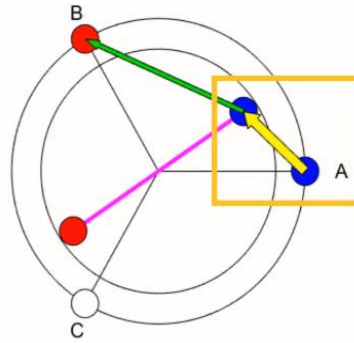


Figure (2.13) : Lois et principe de position du rotor (une paire de pôles) suivant la commutation

Ce travail élaboré est effectué en raison de l'onduler formé de six composants électroniques (IGBT & diode) qui jouent le rôle de l'interrupteur, de sorte que chaque paire d'interrupteurs fonctionne dans une section de 60° . Qui à son tour est marqué par le passage du courant en deux tours dans l'ordre pour faire tourner le pôle, le fonctionnement de ce contrôleur peut être résumé dans une table que nous appelons la table de commutation logique (contrôle par capteurs), comme le montre la figure (2.14).

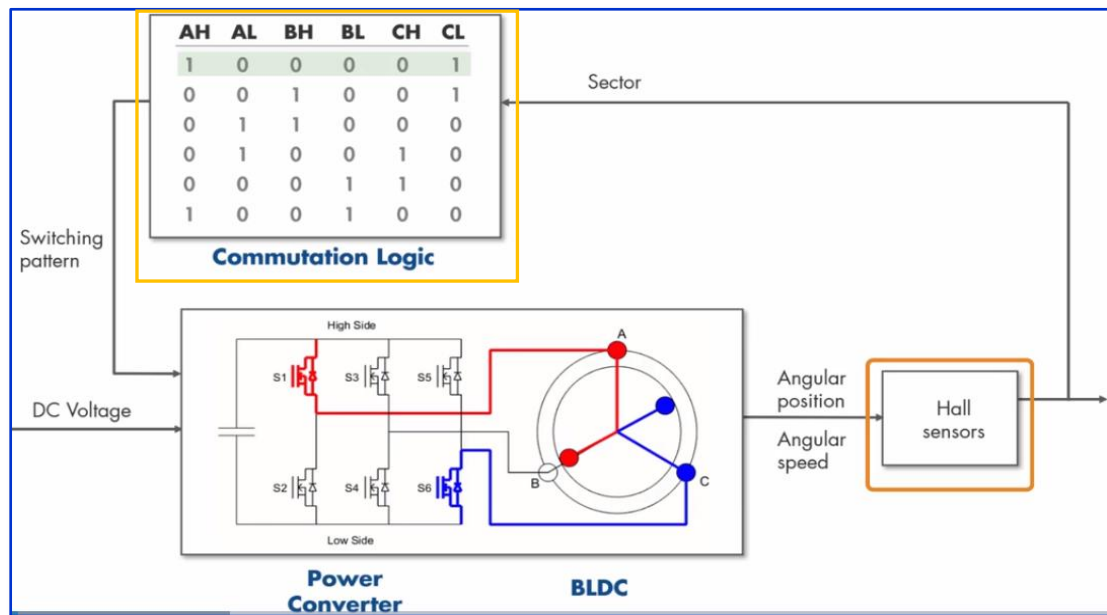


Figure (2. 14) : commutation des phases par un onduler contrôlé par une table logique

Plus le nombre de paires de pôles est élevé, plus le nombre d'enroulements et les degrés de commutation décroissants, et il est plus facile pour les capteurs de déterminer la position du moteur et d'assurer la précision de la position. Au fur et à mesure que le nombre de paires de pôles augmente et que l'angle de commutation diminue, on se rapproche du moteur pas à pas. La figure (2.15) donne l'aspect d'augmentation des paires de pôles au rotor.

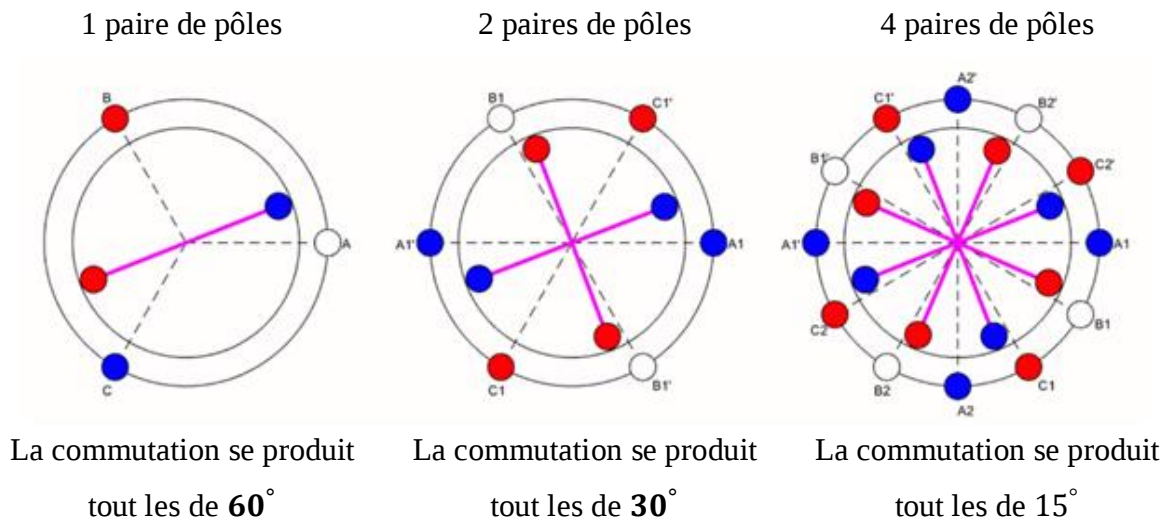


Figure (2.15) : La résolution pour plusieurs nombre de pôles (multipolaire)

2.5.3 Moteurs BLDC à Capteurs à effet hall (commutation avec capteur) [10]

Dans ce type de moteur brushless, des capteurs à effet hall (3 en général) sont utilisés pour connaître à tout moment la position du rotor, et adapter en conséquence l'alimentation des bobines et le champ magnétique. Le capteur va détecter le passage d'un pôle magnétique, et à partir de cette information le circuit de commande électronique assurera la commutation des bobines. L'utilisation de capteurs à effet hall dans les moteurs brushless permet une excellente régulation, cependant l'ajout de ces composants, et le fait qu'il faille les placer très près du rotor entraîne un surcoût et un risque de panne supplémentaire. Cette solution est la plus employée dans les moteurs brushless utilisés en industrie.

La figure (2.16) illustre le principe de ces capteurs pour un moteur BLDC:

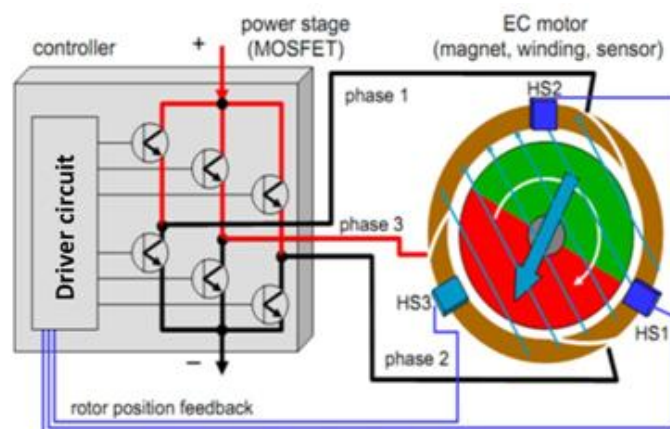


Figure (2.16) : Principe de commutations utilisant des capteurs à effet hall

Le capteur de position est un composant important du moteur A, de sorte qu'à tous les 60° , il nous donne des informations sur la position exacte de la paire de pôles. A partir de ces informations, il est possible de déduire la section par l'angle. Comme le montre la figure suivante (2.17):

$0^\circ \leq \theta < 60^\circ$	Section 1
$60^\circ \leq \theta < 120^\circ$	Section 2
$120^\circ \leq \theta < 180^\circ$	Section 3
$180^\circ \leq \theta < 240^\circ$	Section 4
$240^\circ \leq \theta < 300^\circ$	Section 5
$300^\circ \leq \theta < 360^\circ$	Section 6

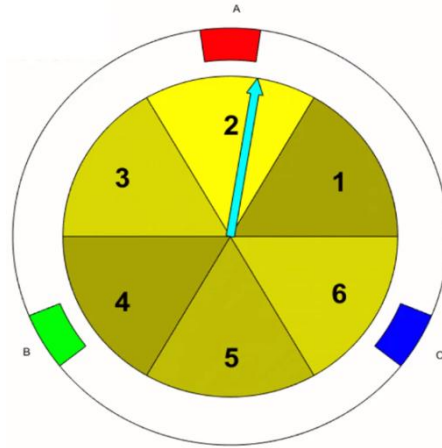


Figure (2.17) : les six secteurs détectés par le capteur effet hall

2.5.4 Les capteurs de position dans les BLDCM [18]

Les moteurs Brushless sont généralement équipés par des capteurs de position qui retournent des informations sur le rotor : sa position, sa vitesse

2.5.4.1 Capteur à effet Hall [18]

Comme présenté dans la section précédente, ces capteurs fonctionnent selon le principe de l'effet Hall selon lequel lorsqu'un conducteur porteur de courant est exposé au champ magnétique, les porteurs de charge subissent une force basée sur la tension développée sur les deux côtés du conducteur. Si la direction du champ magnétique est inversée, la tension développée s'inversera également. Pour les capteurs à effet Hall utilisés dans les moteurs BLDC, chaque fois que les pôles magnétiques du rotor Nord (N) ou Sud (S) passent près du capteur à effet Hall, ils génèrent un signal de niveau HAUT ou BAS, qui peut être utilisé pour déterminer la position de l'arbre. La plupart des moteurs BLDC se composent de trois capteurs Hall.

La combinaison de ce capteur produira la séquence exacte de commutation.

La figure (2.18) représente une coupe transversale d'un moteur BLDC avec un rotor doté d'aimants permanents nord et sud alternés et trois sondes à effet hall. Il existe deux versions de sortie en faisant référence à la position physique des capteurs à effet Hall à 60° ou 120° de déphasage l'un par rapport à l'autre:

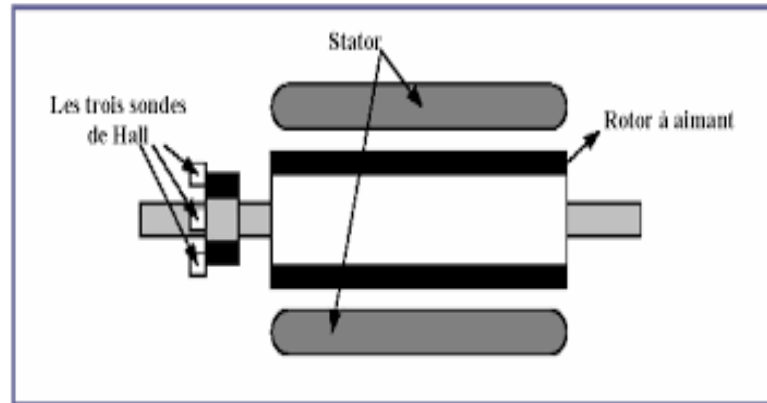


Figure (2.18) : positions des 3 capteurs à effet Hall sur un moteur BLDC

Les capteurs à effet Hall délivrent trois signaux carrés décalés de 120° chacun par rapport à l'autre comme est montré sur la figure (2.19) :

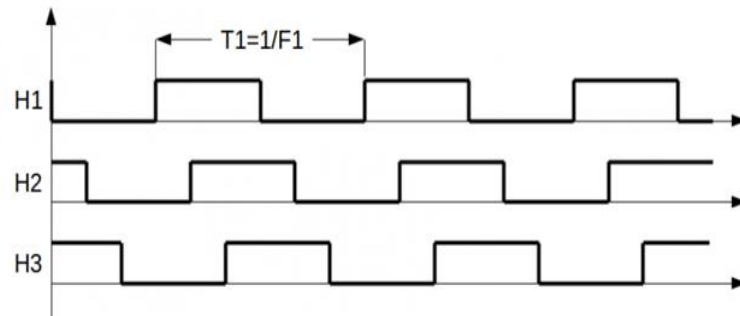


Figure (2.19): Les signaux délivrés par les trois capteurs à effet Hall

Ces capteurs ne sont pas très précis car ils délivrent la position du rotor par secteur de 60°.

2.5.4.2 Capteurs de vitesse de roue à réluctance variable (VR) [19]

Ce type de capteur est utilisé pour mesurer la position et la vitesse des composants métalliques en mouvement, et est souvent appelé capteur magnétique passif car il n'a pas besoin d'être alimenté. Il se compose d'un aimant permanent, d'une pièce polaire ferromagnétique, d'une bobine de détection et d'une roue dentée rotative, comme l'illustre la figure (2.20). Cet appareil est essentiellement un aimant permanent avec un fil enroulé autour de lui. Il s'agit généralement d'un simple circuit de seulement deux fils où, dans la plupart des

cas, la polarité n'est pas importante, et la physique derrière son fonctionnement comprend l'induction magnétique.

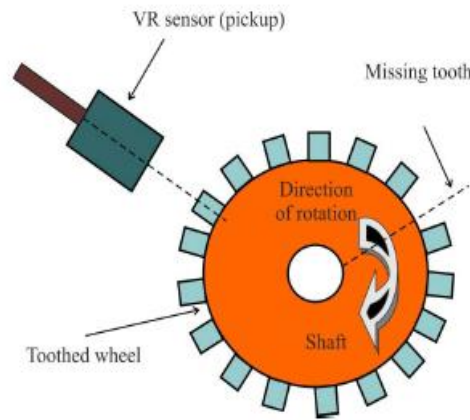


Figure (2.20) : Capteur à réluctance variable qui détecte le mouvement de la roue dentée.

Lorsque les dents traversent le champ magnétique du capteur, la quantité de flux magnétique traversant l'aimant permanent varie. Lorsque la denture est proche du capteur, le flux est au maximum. Lorsque la dent est plus éloignée, le flux diminue. La cible mobile produit un flux variable dans le temps qui induit une tension dans la bobine, produisant une onde électrique analogique. La fréquence et la tension du signal analogique sont proportionnelles à la vitesse de la roue dentée en rotation. Chaque discontinuité passant dans la cible amène le capteur VR à générer une impulsion. Le train d'impulsions cycliques ou une forme d'onde numérique créée peut être interprétée par le contrôleur de moteur BLDC.

2.5.4.3 L'encodeur incrémental en quadrature [20]

Il est constitué d'un disque rotatif fixé sur l'axe du rotor, deux pistes de code dont les secteurs sont décalés de 90 degrés d'une piste à l'autre, une source de lumière et un capteur, comme est présenté dans la figure (2.21).

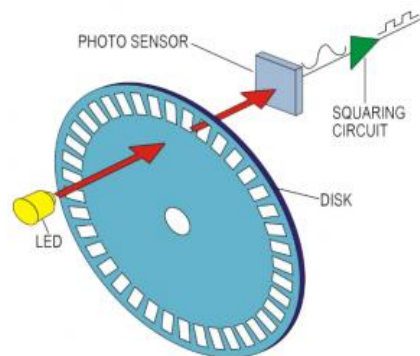


Figure (2.21) : Constitution de l'encodeur incrémental

Lorsque le disque tourne, les segments opaques bloquent la lumière alors que ceux où le verre est clair la laissent passer.

Ceci génère des impulsions d'onde carrée comme est montré dans la figure (2.22) et qui peuvent ensuite être décodées par un compteur et interprétées comme position.

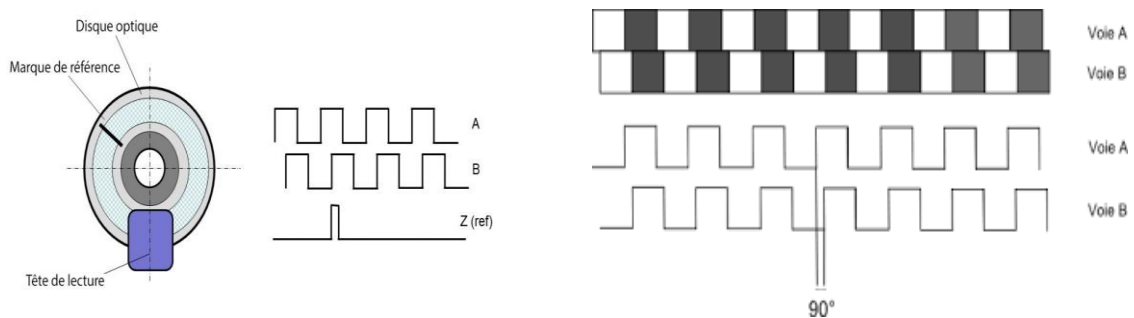


Figure (2.22): Les signaux des voies A et B

Le sens de rotation du disque dépend de la position des deux pistes : si A devance B d'un quart de période, le disque tourne dans le sens positif (Le sens de l'aiguille d'une montre), si non, il tourne dans le sens inverse.

Ces capteurs sont très précis et délivrent la position du rotor avec une bonne résolution.

2.5.5 La commutation sans capteur [15]

Le moteur démarre avec une séquence de commutation prédéfinie selon une rampe d'accélération. Ensuite, la tension induite définit la position du rotor. Son passage à 0 est reconnu par l'électronique qui commute le courant du moteur. L'amplitude de cette tension est fonction de la vitesse.

Ce point de passage à 0 est comparé avec le neutre. Pour que le moteur Brushless en « triangle » puisse être commuté sans capteurs, un point neutre virtuel est créé par l'électronique dans un schéma en étoile. La commutation sans capteurs est adaptée pour les applications d'entraînement continu.

2.5.5.1 Moteurs brushless à commutation (régulation) basée sur la fcm [15]

Pour éviter l'utilisation de capteurs à effet hall, certains circuits de commande de moteurs brushless utilisent les bobines non alimentées à un instant donné pour mesurer la force contre électromotrice et en déduire le moment pour déclencher la commutation. Cette solution

permet d'éviter l'emploi de capteurs à effet hall, et donc de réduire le prix du moteur brushless.

Les enroulements d'un moteur électrique agissent comme un générateur lorsqu'ils coupent les lignes de champ magnétique. Un potentiel est généré dans les enroulements, mesuré en volts et appelé force électromotrice (*fém*). Selon la loi de Lenz, cette *fém* donne lieu à un champ magnétique secondaire qui s'oppose au changement d'origine du flux magnétique entraînant la rotation du moteur. En termes plus simples, la *fém* résiste au mouvement naturel du moteur et est appelée *fcém* "back emf". Pour un moteur donné de flux magnétique fixe et de nombre d'enroulements déterminé, l'amplitude de la *fcém* est proportionnelle à la vitesse angulaire du rotor

Dans la variante sans capteur du moteur BLDC, il n'y a pas de capteurs à effet Hall. Au lieu de cela, lorsque le moteur tourne, la force contre-électromotrice dans les trois bobines varie selon une forme d'onde trapézoïdale (lignes en pointillés longs) illustrée à la figure (2.23). À titre de comparaison, la même figure montre également les sorties des capteurs Hall d'un moteur configuré de manière similaire.

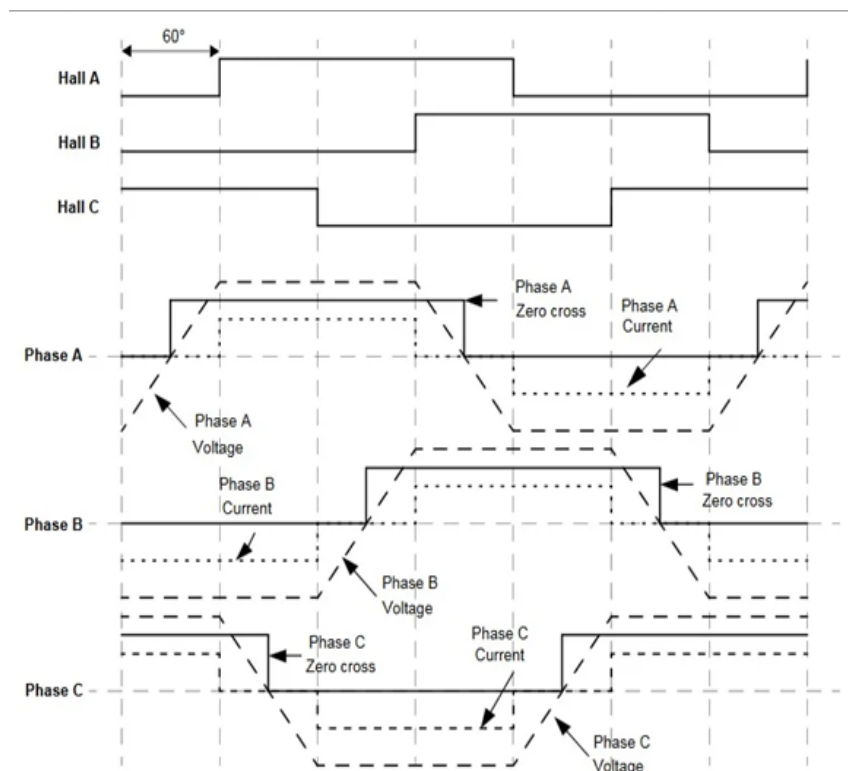


Figure (2.23) : formes d'onde avec capteur à effet Hall et les formes d'onde avec *fcém* trapézoïdales

Contrôler un moteur au moyen d'une force contre-électromotrice « commande trapézoïdale sans capteur des moteurs BLDC » n'est pas une tâche simple ; la plupart des moteurs BLDC sans capteur sont contrôlés à l'aide d'un microcontrôleur, d'un processeur de signal numérique ou d'un circuit intégré de commande dédié. La figure ci-dessous montre un pilotage de moteur BLDC sans capteur typique.

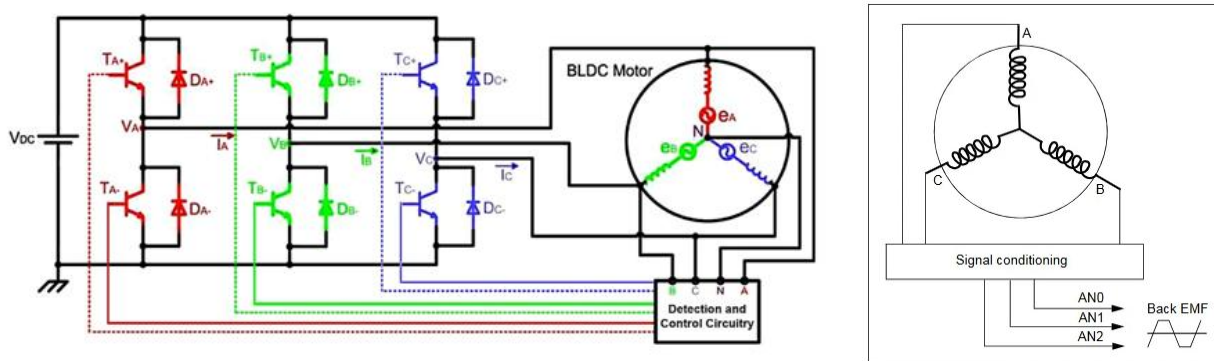


Figure (2.24) : Schéma de modèle typique de commutation sans capteurs « avec détection de la *fcém*)

Par contre, au démarrage, la *fcém* est trop faible pour être utilisable. Il faut donc utiliser un autre mode de commande pour le démarrage des moteurs brushless sans capteurs.

Généralement, ils sont démarrés comme des moteurs pas à pas, en commutant les phases à une fréquence croissante prédéfinie, suffisamment lentement pour que le moteur brushless ne décroche pas.

Le couple dans cette phase est très mauvais. La mise au point de ce système de commande est très difficile, requiert une puissance de calcul importante et nécessite des solutions de filtrage pour distinguer la *fcém* des parasites engendrés par le moteur. Cette technique est principalement employée dans les petits moteurs brushless, en particulier en modélisme.

2.5.5.2 Méthodes de détection de contre-électromotrice (*fcém*) [10].

Il existe plusieurs techniques pour mesurer la force contre-électromotrice. Le plus simple consiste à comparer la force contre-électromotrice à la moitié de la tension du bus CC à l'aide d'un comparateur. La figure (2.25-a) montre un schéma d'un tel système. Dans ce cas, le comparateur est relié à la bobine B ; un système complet aurait un comparateur connecté à chaque bobine. Dans la figure, la bobine A est excitée positivement, la bobine C est excitée négativement et la bobine B est ouverte. La force contre-électromotrice monte et descend à mesure que la séquence d'activation de cette phase est mise en œuvre.

Le principal inconvénient de cette méthode de comparateur simple est que les trois enroulements peuvent ne pas avoir des caractéristiques identiques, ce qui entraîne un déphasage positif ou négatif par rapport au point de passage par zéro réel. Le moteur fonctionne probablement encore, mais peut tirer un courant excessif.

La solution consiste à générer un point neutre virtuel comme illustré à la figure (2.25-b) en utilisant trois réseaux de résistances connectés en parallèle avec les enroulements du moteur. La force contre-électromotrice est ensuite comparée au point neutre virtuel.

Une troisième méthode consiste à utiliser des convertisseurs analogique-numérique (ADC) (2.25-c).

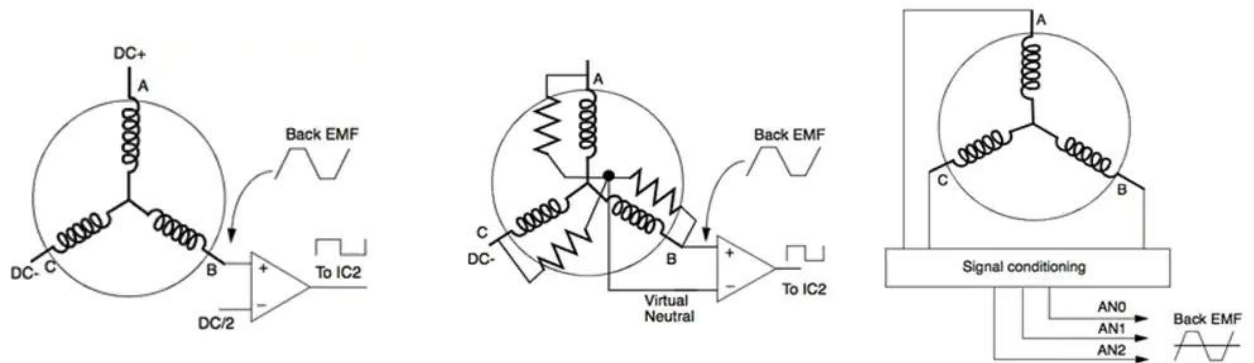


Figure (2.25) : les circuits représentant les méthodes de détection de la *fém*

De nombreux microcontrôleurs disponibles pour la commande de moteur BLDC incluent des CAN haute vitesse adaptés à cet effet. Avec cette méthode, la force contre-électromotrice est atténuée afin qu'elle puisse être transmise directement au MCU. Le signal est échantillonné par le CAN puis comparé à une valeur numérique correspondant au point zéro. Lorsque les deux valeurs correspondent, la séquence d'excitation de la bobine passe à l'étape suivante. Cette technique offre certains avantages, comme la possibilité d'utiliser des filtres numériques pour supprimer les composants de commutation haute fréquence du signal de la *fém*.

2.5.6 La commutation sinusoïdale ou vectorielle de flux [15]

La commande sinusoïdale ou vectorielle, aussi appelée commande à flux orienté est une méthode de commande des variateurs de vitesse électrique dans laquelle les courants statoriques triphasés d'un moteur électrique à courants alternatifs sont transformés en deux composantes orthogonales qui peuvent être considérée comme étant des vecteurs. Le premier vecteur permet le réglage du flux magnétique du moteur, tandis que, le second règle le

couple. Ils sont alors découplés et le fonctionnement devient alors similaire à celui d'un moteur à courant continu.

Le calculateur calcule alors à partir de la consigne de vitesse du moteur, le flux et le couple nécessaire, desquels on déduit les courants requis. Typiquement, un régulateur PI sert à maintenir le courant à la valeur demandée. La modulation de largeur d'impulsion (MLI) gère ensuite la commutation des transistors du variateur de vitesse électrique en fonction de la consigne de tension qui lui parvient. Un régulateur PI est placé après les consignes de courant afin de stabiliser l'ensemble.

La commande vectorielle est utilisée pour les machines synchrones et asynchrones, ainsi que pour les onduleurs en général, par exemple dans le cas des installations haute tension à courant continu. Elle a été conçue au départ pour des applications demandant de bonnes performances de la part du moteur : fonctionnement régulier sur toute la plage de vitesse, couple maximal à vitesse nulle, bonnes performances dynamiques combinés à des accélérations et décélérations rapide. La technique s'est toutefois démocratisée car elle permet également de réduire la taille du moteur, et donc son coût, ainsi que sa consommation électrique.

2.6 Circuits d'alimentation des moteurs « BLDC »

2.6.1 Alimentation par un onduleur triphasé [21]

La commande d'un moteur peut se faire aussi à partir d'un convertisseur statique alimenté par une source de tension continue constante.

Les onduleurs de tension permettent d'imposer aux enroulements statoriques du moteur des tensions d'amplitude et de fréquence réglables en agissant sur la commande des interrupteurs du convertisseur statique (GTO, transistors bipolaire, MOSFET, IGBT, etc.).

Dans les années 90 du dernier siècle, le transistor IGBT a complètement relancé la construction des onduleurs nécessaires à l'alimentation des moteurs à courant alternatif asynchrones et synchrones. Pour réaliser un onduleur triphasé classique alimenté par une source de tension continue (munie d'un filtrage capacitif), et dont le récepteur est une charge alternative qui se comporte comme une source de courant (le stator d'un moteur à courant alternatif est inductif), on a besoin de 6 interrupteurs bidirectionnels en courant. Il faut aussi disposer donc de diodes rapides et performantes, montées en parallèle inverse avec les transistors IGBT.

Cette configuration permet d'imposer aux moteurs des courants présentant une faible distorsion harmonique et conduit ainsi à l'élaboration des systèmes d'entraînements à base de

moteurs à courant alternatif à hautes performances. La figure (2.26) donne une configuration générale de connexion de l'onduleur aux enroulements :

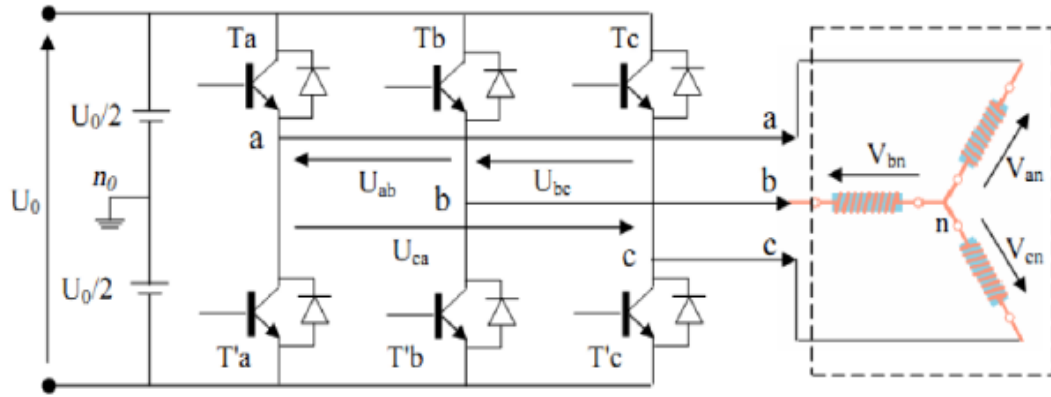


Figure (2.26) : Onduleur triphasé alimentant les enroulements statoriques du moteur

2.6.2 Principe de fonctionnement : moteur BLDC-Onduleur

Comme déjà mentionné à la section de fonctionnement, 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. La figure (2.27) montre l'architecture du moteur et de son onduleur.

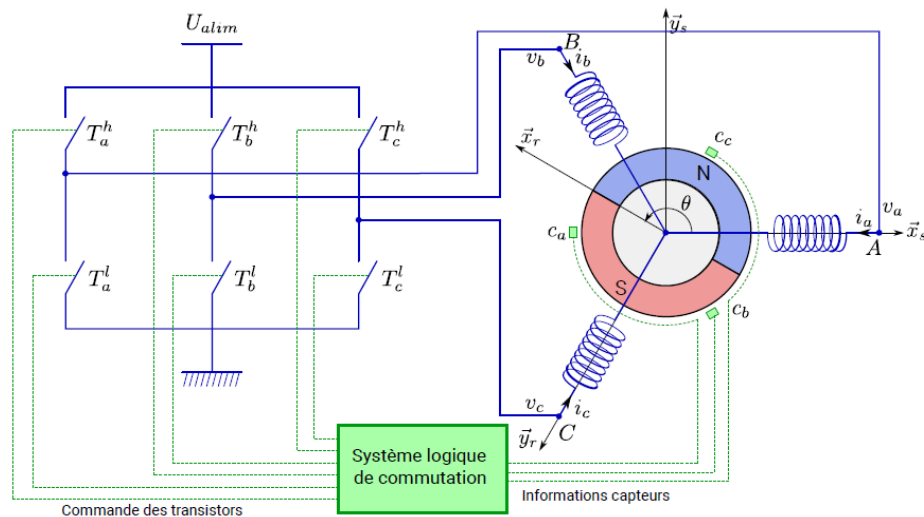


Figure (2.27) : Principe de commutation du moteur BLDC à l'aide d'un onduleur

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 (2.28), 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, une illustration est donnée par la figure suivante.

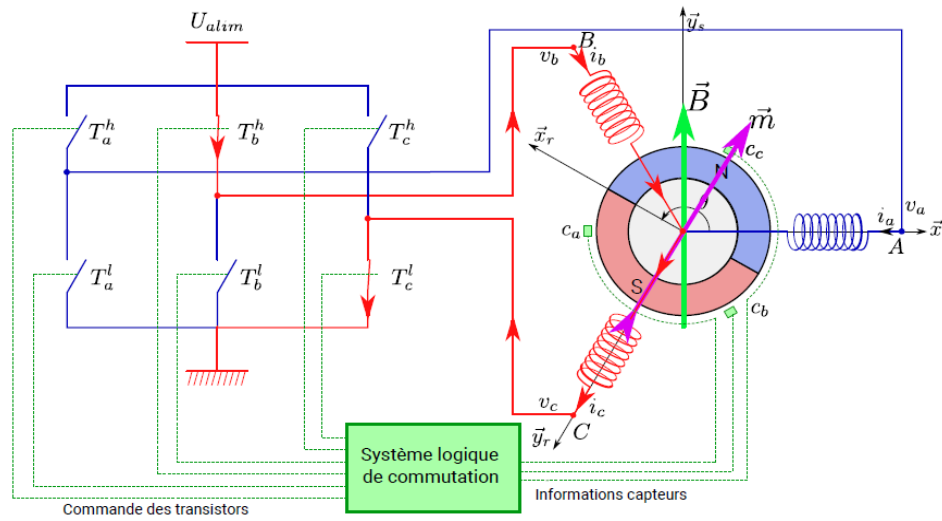


Figure (2.28): Exemple illustrant une situation de commutation

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 poursuivre la rotation dans le sens trigonométrique. L'angle entre $\vec{m}$ et $\vec{B}$ conduit à un couple magnétique $\vec{C}_m = \vec{m} \wedge \vec{B}$.

2.6.3 Techniques de commande onduleur triphasé [22]

Plusieurs techniques sont développées pour la commande des convertisseurs électroniques à savoir les onduleurs, elles dépendent de leurs niveaux (des onduleurs) et les configurations et les algorithmes de contrôle et de commande (vitesse, position, couple ...) dont sont employés ces onduleurs. On peut citer :

- Commande plein onde 180°
- Commande plein onde décalée 120°
- Commande par hystérésis

- Commande par la modulation de largeur d'impulsion (MLI ou PWM)
- Commande vectorielle (SVM).

2.6.4 Commande par la modulation de largeur d'impulsion (PWM) [22]

La modulation de largeur d'impulsion MLI (Pulse Width Modulation) consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie. Le principe de cette technique consiste à générer des impulsions de commande de largeur de manière à avoir à la sortie des convertisseurs la forme de tension désirée. Une des techniques basée sur le découpage de l'onde rectangulaire et de comparer le signal de référence ou la modulante sinusoïdale (V_{ref}) avec une porteuse triangulaires (V_p) est appelée *MLI* sinus triangle.

Aux paragraphes précédents on a cité que des signaux de commutation de l'onduleur sont envoyés par une table de commutation logique (figure 2.14)

Afin d'implémenter l'algorithme de contrôle dans un modèle de simulation, en réalité c'est plus simple d'employer la technique MLI (PWM) pour un contrôle de vitesse ou de position par exemple figure (2.29). Une explication détaillée sera donnée au chapitre de technique commandes

En réalité on alimente l'onduleur par une source de tension continue fixe qui nécessite une modulation pour fournir un système de tensions triphasé.

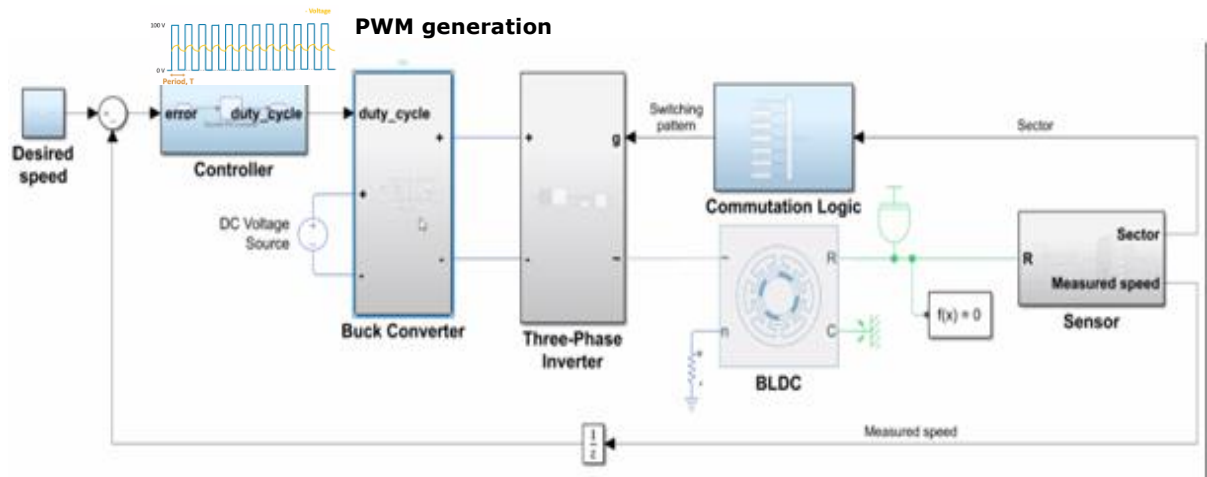


Figure (2.29): Boucle de régulation avec onduleur commandé par la technique MLI

2.7 Moteur Brushless en régime établi [10]

Le moteur brushless est un moteur considéré comme synchrone, c'est-à-dire qu'il tourne à la même vitesse que le système de tensions qui l'alimente. Tant que le couple moteur est supérieur à la charge à entraîner, la rotation du rotor est synchronisée avec le champ magnétique.

Si le couple résistant devient supérieur au couple moteur, et que la tension d'alimentation n'est pas ajustée en conséquence, il y a un risque de décrochage, c'est-à-dire que le rotor risque de ne plus suivre le champ magnétique. A partir de ce moment là, le rotor va se mettre à osciller, sans pouvoir se resynchroniser avec le champ magnétique, ce qui peut provoquer sa destruction. Pour éviter cela, le système d'asservissement doit être en mesure de réagir si le couple résistant augmente, et ajuster la tension d'alimentation en conséquence.

2.8 Démarrage d'un moteur brushless [10]

Le même problème se pose pour le démarrage du moteur brushless, car le rotor ne peut pas atteindre instantanément la vitesse de rotation du champ. Le système de contrôle électronique doit donc assurer un démarrage progressif, l'objectif étant toujours de reproduire la fonction du collecteur. La fréquence des tensions d'alimentations sera donc très basse au départ, puis augmentée progressivement en tenant compte de la réaction du moteur.

2.9 Régulation de vitesse d'un moteur brushless [10]

Globalement, la vitesse maximale d'un moteur brushless est liée à sa tension d'alimentation, ou du rapport cyclique dans le cas d'une commande en PWM, par un coefficient appelé K_v . La valeur de ce coefficient dépend de la construction du moteur (nombre de bobines, de pôles, d'encoches, type de fil pour les bobines, ...).

Contrairement à un moteur synchrone triphasé où on ajuste la fréquence pour obtenir la vitesse souhaitée, ici c'est la vitesse du moteur brushless qui va indiquer au contrôleur à quelle fréquence il doit assurer la commutation.

On décrit par 'quadrants' les quatre zones d'un diagramme couple - vitesse :

- Une vitesse positive représente une rotation en sens des aiguilles, une vitesse négative en sens inverse
- Un couple positif représente un fonctionnement moteur, un couple négatif un fonctionnement frein.

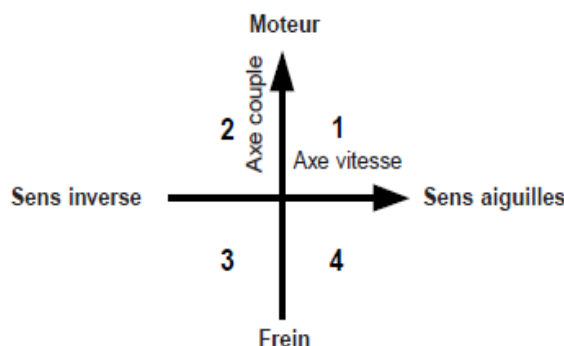


Figure (2.30) : Les 4 quadrants couple- vitesse

Une régulation 1^{ère} quadrant fonctionne dans un seul sens de rotation, sans possibilité de freinage. En cas de survitesse, le régulateur coupe le courant jusqu'à ce que le moteur soit freiné par la charge, le principe est identique pour une régulation 2^{ème} quadrant mais dans les deux sens de rotation, ce mode de fonctionnement est proposé en option sur les moteurs brushless.

Une régulation 4^{ème} quadrant fonctionne également dans les deux sens de rotation, mais permet également le freinage. En cas de survitesse, le moteur participe au freinage, et le système perd rapidement de la vitesse.

On peut dire que généralement, tous les moteurs brushless possèdent une régulation en 4 quadrants.

2.10 Freinage [10]

Freiner, c'est absorber de l'énergie du système mécanique. Selon l'utilisation faite de cette énergie absorbée, on distingue plusieurs types de freinages :

Le freinage 'avec réjection d'énergie' convertit l'énergie du système en courant électrique, qui sera rejetée vers l'alimentation du moteur. A l'exception des batteries, la majorité des alimentations du commerce n'acceptent pas ces retours de courant (elles sont dites 'irréversibles').

Il faut alors s'assurer que le courant rejeté puisse être consommé par un autre appareil, sans quoi l'alimentation risque d'être endommagée. Ce mode de freinage est proposé en option sur les moteurs brushless, mais doit être utilisé avec précaution.

En systèmes standardisés, les moteurs brushless possèdent un freinage 'sans réjection d'énergie'. Cela signifie qu'au freinage, l'énergie cinétique du système est convertie en chaleur à l'intérieur même du moteur, sans retour vers l'alimentation. Dans la majorité des applications, c'est le freinage le mieux adapté. Cependant, en cas de freinage prolongé, la chaleur générée risque d'enclencher les protections thermiques du moteur. Dans le cas d'applications à forte inertie, ou en cas de fonctionnement en génératrice.

2.11 Conclusion [02] [15]

Les moteurs Brushless à c.c offrent aujourd'hui de grandes possibilités d'application des moteurs à c.c dans le contrôle et la précision en offrant une flexibilité de commande grâce aux convertisseurs et aux microcontrôleurs employés qui se développent jour après jour.

On a vu dans ce chapitre que le moteur BLDC est un moteur qui comporte les mêmes éléments qu'un moteur à courant continu sachant que ce moteur est défini comme une

combinaison de la machine synchrone avec un commutateur électronique. Et on a vu aussi que ce type de moteur a des caractéristiques améliorées (robustesse, fiabilité électromécanique, rendement et couple élevé, possibilités de élevé la vitesse). Nous avons également abordé le principe de fonctionnement, les capteurs qui déterminent la position de l'arbre et la vitesse. Nous avons également vu la nécessité de l'onduleur pour le pilotage et l'assurance d'une bonne commutation entre les phases ce qui permet le positionnement du rotor, des exemples sur un moteur BLDC bipolaire ont été expliqué pour mieux éclaircir le phénomène soit avec capteurs à effet Hall soit sans capteurs (avec détection de la f.c.é.m.).

En conclure que les moteurs BLDC sont de plus en plus utilisés pour remplacer les moteurs à balais dans de nombreuses applications en raison de leurs avantages considérables. Ceux-ci incluent l'efficacité, la faible maintenance et la fiabilité pour la longévité, en plus de leur réponse rapide aux variations de vitesse et de couple. Leur coût un peu plus élevé peut souvent être justifié simplement par ces avantages inhérents. La mise en équations ainsi l'entraînement et le pilotage du moteur BLDC seront examinés aux chapitres qui suivent.

CHAPITRE 3

*MISE EN EQUATIONS ET MODELISATION EN VUE
DE PILOTAGE DES MOTEURS BLDC*

3.1 Introduction [22] [23]

L'étude de tout système physique requiert une modélisation. Qui nécessite, avant tout, une bonne connaissance de son modèle dynamique afin de bien prédire, par voie de simulation, son comportement et de la forme de chacune de ses grandeurs dans les différents modes de fonctionnement envisagés.

La première étape pour élaborer une structure de commande est la modélisation du système étudié. Qui est donc très importante pour disposer d'un modèle mathématique qui représente fidèlement les caractéristiques de ce dernier. Ce modèle ne doit pas être trop simple pour ne pas s'éloigner de la réalité physique et ne doit pas être trop complexe pour simplifier l'analyse des structures de commande.

Dans un moteur à courant continu avec balais, l'ensemble collecteur balais assure mécaniquement la commutation dans l'alimentation des bobines en fonction de l'angle du rotor. Dans un moteur Brushless cet élément n'existe plus, il faut donc créer cette commutation électroniquement. Le moteur Brushless est un moteur synchrone, c'est-à-dire qu'il tourne à la même vitesse que le système de tensions qui l'alimente.

Les moteurs « BLDC » possèdent une caractéristique assez intéressante qui est la courbe couple-tension linéaire. Pour faire varier le couple, il suffit de faire varier la tension. Un inconvénient apparaît tout de même, le microcontrôleur devra faire varier la tension aux bornes du moteur ; alors que les sorties du microcontrôleur sont des sorties discrètes (état haut et état bas).

Le circuit de commande devra donc exciter les bobines dans un ordre approprié, mais les commutations doivent également se faire au moment opportun afin de créer un champ magnétique.

Le modèle mathématique du moteur « BLDC » est fondamental pour l'analyse de performance et la conception du système de contrôle correspondantes. Les caractéristiques de la structure et les modes de fonctionnement du moteur BLDC devraient être pris en compte lorsque nous construisons son modèle. Le moteur BLDC se compose généralement de trois parties: la structure du moteur, le circuit d'alimentation et le capteur de position. En outre, il existe différentes structures et différents modes de contrôle.

La figure (3.1) montre un exemple des trois parties : moteur, circuit d'alimentation et capteur de position.

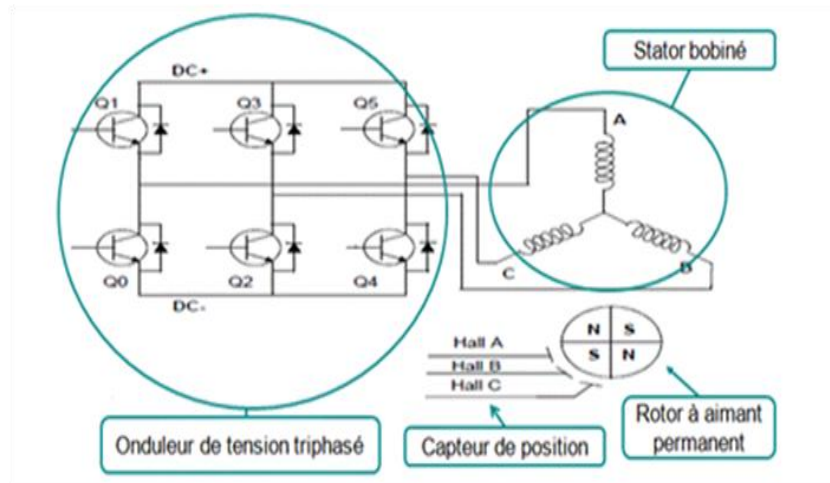


Figure (3.1) : structure générale pour entraînement d'un moteur à cc sans balais

3.2 Les moteur BLDC monophasés et triphasés [16]

Il existe trois types de moteurs « BLDC » : monophasé, biphasé et triphasé. Le nombre de phases est déterminé par le nombre d'enroulements du stator. Les moteurs monophasés et triphasés sont les plus couramment utilisés.

Le stator d'un moteur monophasé comporte un ensemble d'enroulements autour de quatre bras de stator, ce qui donne deux paires de pôles électromagnétiques lorsqu'il est alimenté. Sa structure simple le rend plus petit par rapport à un moteur triphasé. Cependant, un moteur BLDC monophasé ne peut tourner que dans un sens. Pour cette raison, il est généralement utilisé dans les applications de pompes et de ventilateurs.

Les moteurs triphasés ont trois ensembles d'enroulements dans le stator et peuvent tourner dans le sens des aiguilles d'une montre et dans le sens inverse. Le fait d'avoir trois phases permet aux enroulements d'être connectés dans deux configurations différentes : connexion en étoile et en triangle. Cependant, les connexions en triangle peuvent être considérées comme inefficaces pour entraîner un moteur à courant continu sans balais, c'est pourquoi la plupart de ces moteurs sont connectés en étoile. Par rapport à une monophasée, cette option est légèrement plus coûteuse, mais cela est largement compensé par un contrôle amélioré et un fonctionnement plus fluide.

3.3 Structures et modes d'alimentation du moteur Brushless DC

3.3.1 Modes d'alimentation [24]

Selon le nombre de phases et le fonctionnement voulu, on peut distinguer plusieurs mode d'alimentations, parmi, on peut citer les suivants :

Alimentation unidirectionnelle ou bidirectionnelle : On prévoit en général l'inversion du sens du courant dans les phases (alimentation bidirectionnelle) car la machine est alors mieux utilisée, les enroulements peuvent être couplés en étoile ou en polygone. On rencontre aussi parfois des alimentations unidirectionnelles, mais uniquement lorsque les phases sont couplées en étoile avec neutre sorti.

3.3.1.1 Moteur à trois phases couplées en étoile à alimentation bidirectionnelle

Pour obtenir le fonctionnement décrit précédemment au chapitre 2, on peut connecter les trois phases en étoile en reliant ensemble une extrémité de chaque bobine et appliquer une alimentation bidirectionnelle avec une autre borne 1, 2 ou 3 et le commun(N).

En fait, comme on a toujours deux phases utilisées en sens inverse en même temps, il n'y a aucun courant dans le fil commun et on peut donc le supprimer et alimenter deux phases en série.

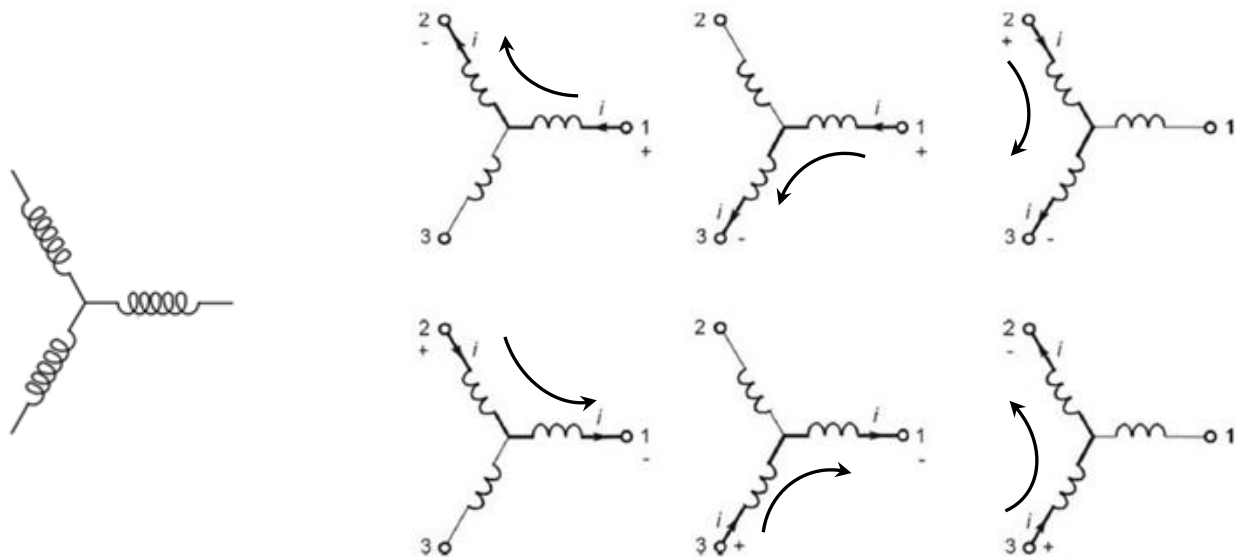


Figure (3.2) : Commutation du courant en mode étoile- bidirectionnelle

Suivant les enroulements commutés illustrés par la figure (3.2), on obtient six cas différents pour la circulation du courant qu'on déjà décrit au chapitre précédent.

- Éléments du circuit [25]

Il faut ici deux transistors et deux diodes par phase. Le montage est identique, que le moteur soit en étoile (figure 3.3) ou en triangle. On sature simultanément deux transistors, l'un du groupe T_1, T_2, T_3 et l'autre du groupe T_1', T_2', T_3' . Dans le cas du moteur triphasé en étoile, la tension V_{cc} est appliquée aux bornes de deux enroulements en série. Dans le cas du moteur triphasé en triangle, cette tension est appliquée à une phase en parallèle avec les deux autres phases en série. Les six diodes assurent la fonction de roue libre dans tous les cas du circuit

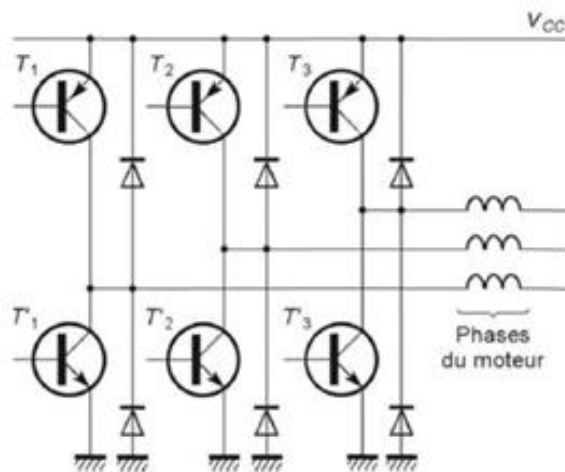


Figure (3.3) : circuit de base pour l'alimentation bidirectionnelle –les phases en étoile

3.3.1.2 Moteur à trois phases en étoile à alimentation unidirectionnelle [25]

Il arrive que pour des raisons d'économie au niveau de l'alimentation, on ne prévoit pas d'inverser les courants. Dans ce cas, la connexion du neutre est indispensable. On applique une alimentation unidirectionnelle entre chaque borne 1, 2 ou 3 et le commun. On obtient ainsi trois cas différents pour la circulation du courant. Figure (3.4).

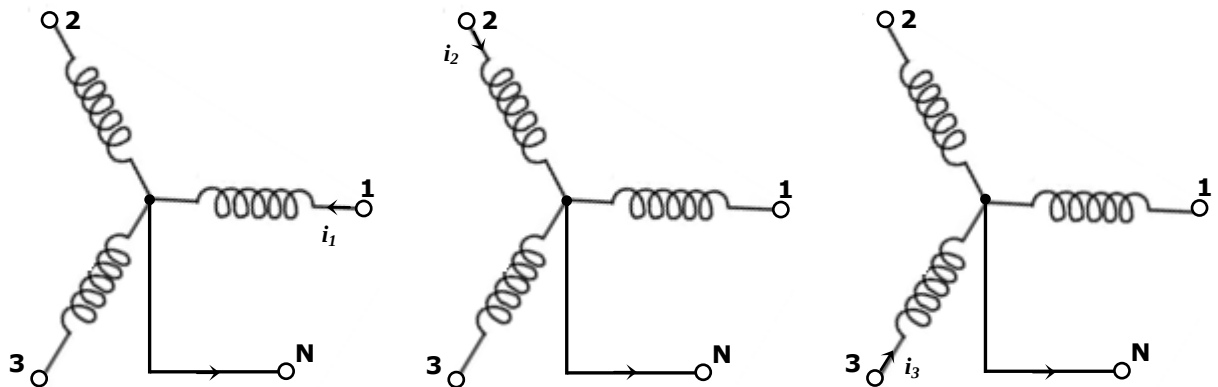


Figure (3.4) : commutation du courant dans les phases en étoile avec une alimentation unidirectionnelle.

Le couple obtenu est encore constant, mais il est divisé par 2 par rapport au cas de l'alimentation bidirectionnelle. Figure (3.5)

$$C_m = k_c \cdot i \quad (3.1)$$

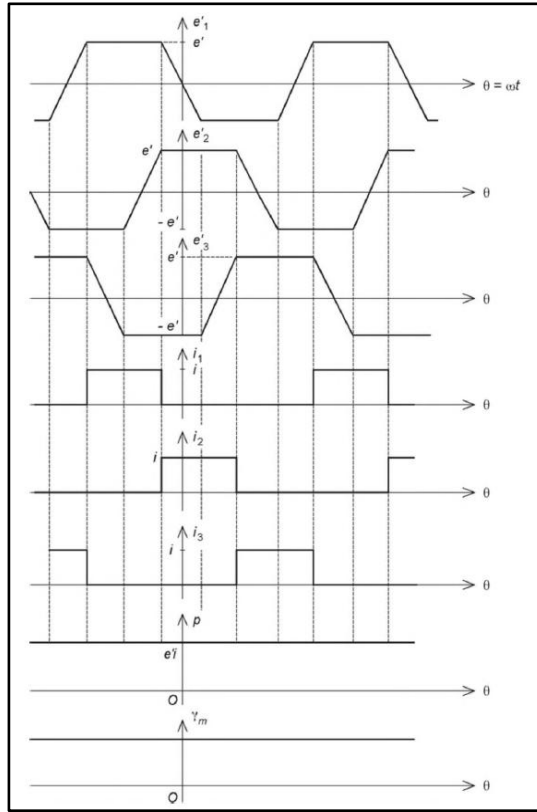


Figure (3.5) : courbes des fém et des courants pour un moteur en étoile dans le cas d'une alimentation unidirectionnelle.

- Éléments du circuit [25]

Dans ce cas, on a besoin d'un transistor et d'une diode par phase (figure 3.6). Lorsqu'un transistor est saturé, la tension d'alimentation est appliquée aux bornes de la phase. Quand on bloque le transistor, la force électromotrice induite dans l'inductance du circuit impose la mise en conduction de la diode de roue libre qui court-circuite alors l'enroulement.

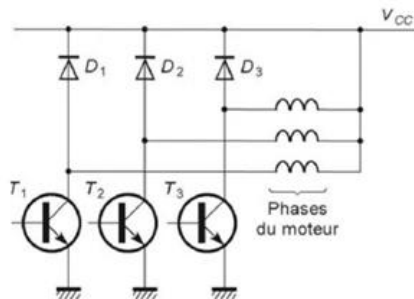


Figure (3.6) : circuit de base pour l'alimentation unidirectionnelle

3.3.1.3 Moteur à trois phases en triangle [25]

Dans ce cas, selon la figure (3.7), le courant se partage entre deux branches, l'une formée par une seule phase, l'autre par deux phases en série. L'application des tensions entre les bornes 1, 2 et 3 est la même qu'avec le couplage étoile en alimentation bidirectionnelle, mais la distribution du courant dans les enroulements est différente. Un tiers de l'intensité en ligne circule dans les deux phases en série tandis que les deux autres tiers parcourent la phase seule. Les courbes de la figure (3.5) des courants montrent que la puissance instantanée et donc le couple ne sont pas tout à fait constants.

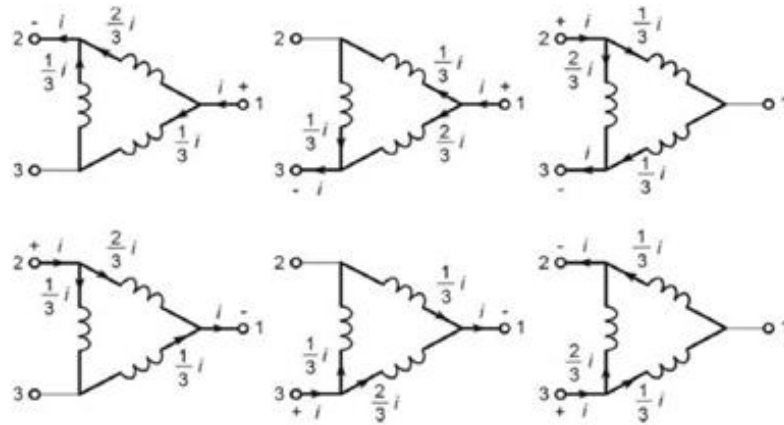


Figure (3.7): commutation du courant dans les phases d'un moteur triphasé en triangle

Le couplage triangle des enroulements s'obtient en plaçant trois barrettes de connexions.

Un câble de phase est relié ensuite à chaque barrette. Le câble de neutre n'est pas connecté.

Dans un couplage triangle, il est nécessaire de décomposer chaque courant traversant les récepteurs. Ainsi, on a :

$$i_1 = j_{21} - j_{31} \quad (3.2)$$

$$i_2 = j_{33} - j_{21} \quad (3.3)$$

$$i_3 = j_{23} - j_{31} \quad (3.4)$$

Les valeurs efficaces des courants de ligne et de phase sont liées par la relation :

$$I = \sqrt{3}J \quad (3.5)$$

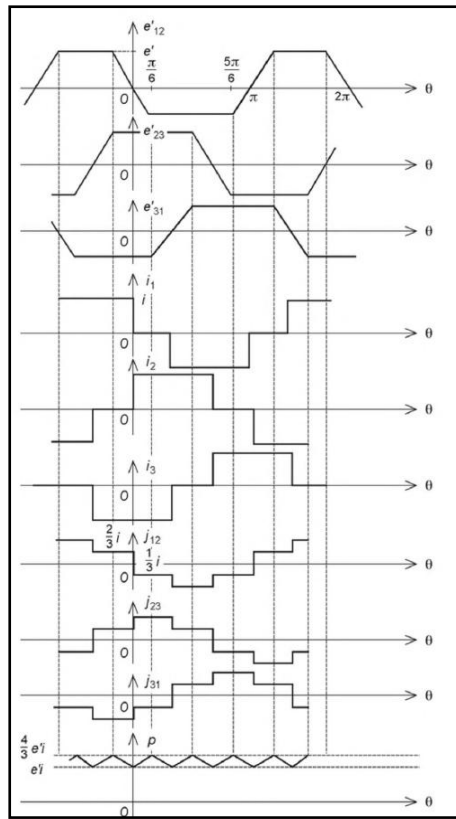


Figure (3.8) : courbes des fém, du couple et des courants pour un moteur en triangle

D'autres configurations et modes sont utiles, on peut citer :

- Moteur à quatre phases en étoile à alimentation bidirectionnelle
- Moteur à quatre phases en carré
- Moteur à quatre phases en étoile à alimentation unidirectionnelle

D'une façon plus généralisée, le circuit de pilotage assurant l'alimentation électronique d'un moteur à courant continu sans balais comprend :

- des capteurs, munis éventuellement de circuits de mise en forme, qui permettent de connaître la position du rotor à tout instant;
- un circuit logique qui élabore les commutations à appliquer aux différentes phases du moteur compte tenu des signaux issus des capteurs;
- Un commutateur de puissance qui alimente les enroulements en fonction des informations reçues par la logique de commande;
- Une commande de la tension ou du courant permettant d'agir sur la vitesse du moteur.

Les trois premières fonctions permettent d'effectuer les commutations assurées par le système balais-collecteur dans un moteur à courant continu classique, tandis que la dernière est analogue à celle qui est utilisée pour la commande de ces mêmes moteurs.

3.4 Modélisation de la machine BLDC

3.4.1 Modélisation du moteur [21]

La modélisation du moteur à aimants permanents fait l'objet de nombreuses études en moyenne et forte puissance. La mise sous forme d'un modèle mathématique d'un moteur à aimants permanents facilite largement son étude.

Les machines à aimants permanents sont classées en deux catégories "sinusoïdale" (MSAP) et "non- sinusoïdale" : (BLDCM) en fonction de la répartition spatiale des conducteurs. Les MAP sinusoïdales alimentées par des courants sinusoïdaux présentent un couple constant et leur modèle en régime linéaire est relativement simple dans le "repère de Park".

Le modèle électrique d'une machine à aimants permanents à force contre électromotrice non- sinusoïdale "trapézoïdale" (BLDCM) requiert une attention particulière. En effet, étant donné que les *f.c.é.m* induites par les aimants sont non sinusoïdales, il n'est pas possible d'appliquer directement le changement de référentiel à l'aide de la transformée de Park. Cette transformation permet d'accélérer le temps de calcul, car les variables d'état sont constantes en régime permanent et d'en simplifier la commande.

Dans le cas de BLDCM, plusieurs auteurs s'accordent pour utiliser les variables de phase (abc) afin de modéliser ce moteur. Cette modélisation aura pour conséquence d'augmenter légèrement le temps de simulation. Toutefois, étant donné que le modèle d'état est relativement simple, cette augmentation sera minime.

De plus, pour évaluer les avantages du moteur BLDC et en vue de tester ces performances on doit disposer d'un modèle dynamique sous forme d'équations différentielles. Ce modèle permet de simuler son comportement et de reproduire sa vitesse, son couple et les courants ainsi que les *fcéms* dans chaque phase. Dans cette partie, on explicite le modèle du moteur BLDC pour les deux modes de fonctionnement. Et enfin, on termine par établir un modèle en vue de simulation en régime statique, de démarrage et dynamique du moteur.

3.4.2 Le modèle mathématique [26] [27]

La présentation portera sur les modèles mathématiques d'une machine triphasée avec une ingénierie typique, c'est-à-dire une structure cylindrique avec des enroulements d'induit dans le stator et un aimant permanent dans le rotor. De toute évidence, il existe une grande variété

De machines BLDC (courant continu sans balais), tant en termes de nombre d'enroulements de phase que, par exemple, celles basées sur la structure du disque, où le champ majeur a une direction axiale. Cependant, une machine cylindrique triphasée constitue la solution d'ingénierie de base et se présente comme un appareil de petite, moyenne et grande puissance. Une configuration simplifiée d'une telle machine pour le nombre de paires de pôles au rotor $p = 1$ est présentée sur la figure suivante.

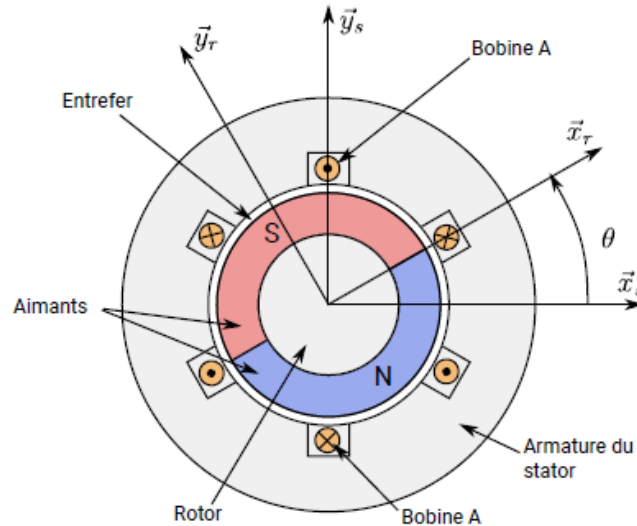


Figure (3.9). : Schématisation de disposition des enroulements d'un moteur BLDC à une paire de pôles

3.4.3 Hypothèses simplificatrices [21]

Les phénomènes physiques inhérents au fonctionnement du système peuvent être partiellement ou totalement pris en compte dans un modèle. Ils découlent plusieurs niveaux de modélisation liés aux hypothèses simplificatrices associées. Plus le nombre d'hypothèses est grand, plus simple sera le modèle. Cela permet une étude et une exploitation plus aisées. Ces simplifications proviennent des propriétés des machines à courants alternatifs.

Dans ce but, on adopte les suppositions suivantes :

- Caractéristiques magnétiques du moteur linéaire (circuit magnétique non saturé). Les valeurs des inductances propres et mutuelles sont indépendantes des intensités des courants (sont constantes). Les pertes dans le fer (pertes par hystérésis et par courants de Foucault) sont supposées nulles.
- La variation des résistances des enroulements en fonction de la température est négligeable. On prendra les valeurs correspondantes au fonctionnement sous charge nominale, après stabilisation de la température des enroulements.
- La symétrie complète de la construction du moteur.

- On ignore la réaction de l'induit, et la distribution du champ magnétique de l'entrefer est supposée comme une onde trapézoïdale avec une largeur plate de 120° électrique.
- Les harmoniques d'ordre supérieur de la FMM sont négligées.
- On ignore l'effet de denture

3.4.4 Modèle mathématique dans le repère triphasé

Différents modèles analytiques pourraient être considérés. Ils peuvent être à base d'équations d'état-espace, de séries de Fourier, ou basé sur le changement de référence [28], [29]. Certains auteurs ont présenté une modélisation globale utilisant les équations mathématiques de l'ensemble onduleur-moteur, tandis que d'autres modèles étaient basés sur des équations du moteur seulement [30], [31]. Dans cette section, la modélisation du moteur BLDC est basée sur les variables de phase (abc) en tant qu'outil facile à concevoir pour le développement des contrôles du moteur BLDC. Figure (3.9)

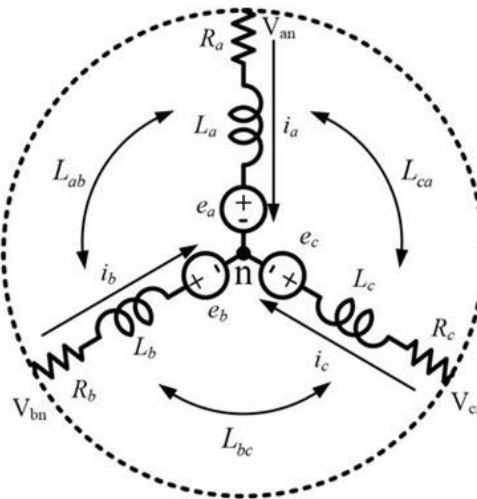


Figure (3.10) : modèle triphasé des phases statoriques du moteur BLDC

Le fonctionnement du moteur BLDC est régi par trois types d'équations :

- Équations magnétiques ; Équations électriques; - Équations mécaniques

En général, le premier type d'équations décrit les flux dans les enroulements, le deuxième type décrit les relations entre les courants et les tensions dans la machine (la loi d'Ohm généralisée), et le dernier type décrit la relation Couple – Vitesse sur l'arbre de la machine en rotation (la deuxième loi de Newton).

3.4.4.1 Équations magnétiques

Le moteur que nous modélisons est à aimant permanent, alors le flux rotorique est constant (ϕ_r), et les seules équations (magnétiques et électriques) à écrire sont celles statoriques.

a- Flux propre du stator [32]

À partir des hypothèses mentionnées auparavant, les flux produits par les courants du stator sur lui-même s'expriment en fonction des courants statoriques, des inductances propres des enroulements et des inductances mutuelles entre les enroulements.

Si nous négligeons les fuites, nous obtenons dans le référentiel statorique les relations suivantes :

$$\begin{cases} \phi_{sa} = L_a \cdot i_a + M_{ab} \cdot i_b + M_{ac} \cdot i_c \\ \phi_{sb} = M_{ba} \cdot i_a + L_b \cdot i_b + M_{bc} \cdot i_c \\ \phi_{sc} = M_{ca} \cdot i_a + M_{cb} \cdot i_b + L_c \cdot i_c \end{cases} \quad (3.6)$$

Où ϕ_{sa} , ϕ_{sb} et ϕ_{sc} , sont les flux par phase, L_a , L_b et L_c sont les self-inductances du bobinage du stator, M_{ab} , M_{ac} , et M_{cb} sont les inductances mutuelles, i_a , i_b et i_c sont les courants des phases.

Puisque le moteur est à rotor non saillant, et les enroulements statoriques sont fixes et équidistants, on déduit :

$$\begin{cases} M_{ab} = M_{ac} = M_{bc} = M_s = \text{Constante} \\ L_a = L_b = L_c = L_s = \text{Constante} \end{cases} \quad (3.7)$$

Les inductances propres et mutuelles sont constantes et ne dépendent pas de la position ni du temps. Donc les flux propres du stator s'écrivent :

$$\begin{cases} \phi_{sa} = L_s \cdot i_a + M_s \cdot i_b + M_s \cdot i_c \\ \phi_{sb} = M_s \cdot i_a + L_s \cdot i_b + M_s \cdot i_c \\ \phi_{sc} = M_s \cdot i_a + M_s \cdot i_b + L_s \cdot i_c \end{cases} \quad (3.8)$$

Sous forme matricielle (3.8) s'écrit :

$$[\phi_s] = [L_s][I_s] + [M_s][I_s] \quad (3.9)$$

La machine étant triphasée et équilibrée, alimentée par une source triphasée, alors la somme des courants des enroulements statoriques à chaque instant est nulle :

$$i_a + i_b + i_c = 0, \text{ et } i_b + i_c = -i_a \quad (3.10)$$

Ce qui donne :

$$\begin{cases} \phi_{sa} = L \cdot i_a \\ \phi_{sb} = L \cdot i_b \\ \phi_{sc} = L \cdot i_c \end{cases} \quad (3.11)$$

Avec : $L = L_s - M_s$: l'inductance cyclique des enroulements statoriques.

b- Flux du stator produit par le rotor

Le flux rotorique constant (ϕ_r) tourne avec une vitesse (dite électrique) faisant un angle avec le premier enroulement statorique, $(\theta - 2\pi/3)$ avec la deuxième et , $(\theta + 2\pi/3)$ avec la troisième. On peut donc modéliser les flux produits par l'aimant du rotor dans chacun des enroulements du stator de la façon suivante :

$$\begin{cases} \phi_{ra} = \phi_r \cdot \cos(\theta) \\ \phi_{rb} = \phi_r \cdot \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \phi_{rc} = \phi_r \cdot \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (3.12)$$

Par conséquent, les flux totaux traversant les phases (enroulements) statoriques sont :

$$\begin{cases} \phi_a = \phi_{sa} + \phi_{ra} \\ \phi_b = \phi_{sb} + \phi_{rb} \\ \phi_c = \phi_{sc} + \phi_{rc} \end{cases} \quad (3.13)$$

3.4.4.2 Équations électriques

La loi d'Ohm généralisée appliquée sur les enroulements statoriques donne :

$$\begin{cases} v_a = R_s \cdot i_a + \frac{d\phi_{sa}}{dt} + \frac{d\phi_{ra}}{dt} \\ v_b = R_s \cdot i_b + \frac{d\phi_{sb}}{dt} + \frac{d\phi_{rb}}{dt} \\ v_c = R_s \cdot i_c + \frac{d\phi_{sc}}{dt} + \frac{d\phi_{rc}}{dt} \end{cases} \quad (3.14)$$

Ce qui se met sous la forme matricielle suivante :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = [R_s] \cdot [i_s] + \frac{d}{dt} [\phi_s + \phi_r] \quad (3.15)$$

Avec :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}, \quad [\phi_s] = \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix}, \quad [\phi_r] = \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix}, \quad [I_s] = [i_a \ i_b \ i_c]^T$$

Où :

$[V_s]$: Vecteur des tensions statoriques.

$[I_s]$: Vecteur des courants statoriques.

$[\phi_s]$: Vecteur des flux statoriques

ϕ : Flux statorique total

ϕ_r : Flux d'excitation des aimants permanents

$[R_s]$: Matrice des Résistances statoriques par phase

En remplaçant par les flux totaux des phases statoriques, l'expression (3.14) devient:

$$\begin{cases} v_a = R_s \cdot i_a + \frac{d}{dt} \phi_a \\ v_b = R_s \cdot i_b + \frac{d}{dt} \phi_b \\ v_c = R_s \cdot i_c + \frac{d}{dt} \phi_c \end{cases} \quad (3.16)$$

Les inductances propres à chaque enroulement sont constantes, et ne varient ni en fonction de temps ni en fonction de l'angle du rotor, (grâce à l'architecture du moteur et à nos hypothèses), donc le flux propre du stator ne dépend que du courant (c.à.d. du temps), ce qui donne la force électromotrice (f.é.m.) “de transformation” :

Tandis que le flux produit par le rotor dépend de θ explicitement (et de temps implicitement), donc :

$$\frac{d\phi_r}{dt} = \frac{d\phi_r}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = \omega \frac{d\phi_r}{d\theta} \quad (3.17)$$

ω : Vitesse angulaire électrique du rotor

Ce n'est rien autre que la f.é.m. dite « de rotation », produite par la rotation de champs du rotor par rapport aux enroulements statoriques fixes :

$$\begin{cases} \phi_{ra} = \phi_r \cdot \cos(\theta) \\ \phi_{rb} = \phi_r \cdot \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \phi_{rc} = \phi_r \cdot \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (3.18)$$

$$\begin{cases} e_a = \omega \cdot \frac{d\phi_{ra}}{d\theta} = -\omega \cdot \phi_r \sin(\theta) = -\omega \cdot P \cdot \phi_r \sin(\theta_r) = -k_e \cdot \omega \cdot f(\theta) \\ e_b = \omega \cdot \frac{d\phi_{rb}}{d\theta} = -\omega \cdot \phi_r \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) = -\omega \cdot P \cdot \phi_r \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) = -k_e \cdot \omega \cdot f(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ e_c = \omega \cdot \frac{d\phi_{rc}}{d\theta} = -\omega \cdot \phi_r \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) = -\omega \cdot P \cdot \phi_r \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) = -k_e \cdot \omega \cdot f(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (3.19)$$

Ou :

e : Force contre électromotrice (V)

ϕ_{ra} : Flux rotorique produit dans la phase (a) du stator.

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

$$\theta = P \cdot \theta_r \quad (3.20)$$

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

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = P \cdot \frac{d\theta_r}{dt} = P \cdot \omega_r \quad (3.21)$$

Avec un simple arrangement sur le système d'équations (3.19) les $fcems$ (e_a, e_b, e_c) peuvent être exprimées avec la vitesse et la position angulaires électriques (ω, θ) soit mécaniques (ω_r et θ_r), suivant le modèle final visé pour la simulation.

Malgré le nom de «moteur à courant continu sans balais», il s'agit d'une machine synchrone « PM », où les champs magnétiques sont uniformément répartis dans l'entrefer (plutôt que distribués sinusoïdalement). Lorsque le rotor fonctionne à vitesse constante, il en résulte une $fcém$ « *back emf* » qui a une forme trapézoïdale dans le temps, et donc le nom du moteur à $fcém$ trapézoïdale «*trapezoidal back emf motor* ». [05] [22]

Le système (3.16) des trois équations électriques des enroulements statoriques peut être écrit sous la forme:

$$\begin{cases} v_a = R_s \cdot i_a + L \cdot \frac{di_a}{dt} + e_a \\ v_b = R_s \cdot i_b + L \cdot \frac{di_b}{dt} + e_b \\ v_c = R_s \cdot i_c + L \cdot \frac{di_c}{dt} + e_c \end{cases} \quad (3.22)$$

La distribution de flux dans le moteur DC sans balais est trapézoïdale et, par conséquent, le modèle dans le repère de référence (dq) du rotor développé pour le moteur synchrone à aimants permanents n'est pas applicable. [07]

Compte tenu de la distribution de flux non sinusoïdale, il est prudent de dériver un modèle de tenant compte des variables de phase. La dérivation de ce modèle est basée sur les hypothèses selon lesquelles les courants induits dans le rotor en raison des champs harmoniques du stator sont négligés et les pertes de fer et parasites sont également négligées. Les enroulements d'amortissement ne font généralement pas partie du moteur « BLDC » et l'amortissement est fourni par le contrôle de l'onduleur. Le moteur est considéré comme ayant trois phases même si, pour un certain nombre de phases, la procédure de dérivation est valide.

La figure (3.10) schématise le modèle simplifié des trois phases statorique du moteur BLDC.

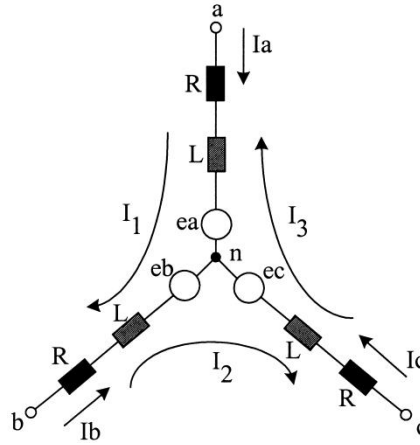


Figure (3.11) : Modèle équivalent des phases d'un moteur BLDC

Sur la base du circuit équivalent du moteur BLDC et du système d'équations (3.15), (3.19) et (3.22), les équations dynamiques du moteur se dérivent comme suit: [22] [33] [34] [35]

$$\begin{bmatrix} V_{as} - v_n \\ v_{bs} - v_n \\ v_{cs} - v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + p \cdot \begin{bmatrix} L_a & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_b & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Où:

R_s : Résistance statorique par phase

i_a, i_b, i_c : Courants des phases du stator

$p = \frac{d}{dt}$: L'opérateur de Laplace « dérivé du temps »

V_n : est la tension du nœud de point neutre donnée par :

$$v_n = \frac{1}{3}(v_{as} + v_{bs} + v_{cs}) - \sum f_{c\acute{e}ms} \quad (3.24)$$

$\sum f_{c\acute{e}ms}$ Signifie la somme de $f_{c\acute{e}ms}$ d'une phase individuelle en un instant.

e_a , e_b , e_c : Représentent les $f_{c\acute{e}ms}$ trapézoïdales « trapezoidal back emfs » dans les phases respectives,

avec E_p est la valeur max de $f_{c\acute{e}m}$ par phase donnée par :

$$E_p = (B.l.v).N = N.(B.l.r.\omega) = N.\phi_a.\omega = \psi_p.\omega \quad (3.25)$$

Avec:

B : l'induction du champ dans lequel les conducteurs sont placés(T),

l : est la longueur du rotor (m),

N : est le nombre de tours (spires) par phase,

r : rayon du rotor,

ω : la vitesse angulaire électrique (en rad/sec),

ϕ_a : l'intensité du flux magnétique = $B.l.r$,

ψ_p : Représente le flux de lien total, donné en tant que produit du nombre de conducteurs (N) par le flux de lien par conducteur (ϕ_a).

Le produit (Blr), qui est ϕ_a a les dimensions du flux et est directement proportionnel au flux d'entrefer ϕ_g , tel que :

$$\phi_a = BLr = \frac{1}{\pi}B.\pi.l.r = \frac{1}{\pi}\phi_g \quad (3.26)$$

Notez que le produit du flux et le nombre de conducteurs en série a la dimension de flux de lien (couplage) noté par ψ_p . Étant donné que cela n'est que proportionnel pour une phase au flux de lien par un facteur de $(1/\pi)$, il est appelé ci-après de flux de couplage modifié. S'il n'y a pas de changement de la réluctance du rotor avec l'angle (en raison de la non saillance du rotor), et en supposant les trois phases symétriques,

Les inductances propres de toutes les phases sont égales et les inductances mutuelles entre phases sont égales entre elles et sont notées par (3.7):

$$L_a = L_b = L_c = L \quad \text{et} \quad L_{ab} = L_{ba} = L_{ca} = L_{ac} = L_{bc} = L_{cb} = M$$

En remplaçant les inductances dans l'équation 3.23, le système obtenu est de la forme :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Les courants de phase de stator sont contraints d'être équilibrés, c'est-à-dire :

$$i_a + i_b + i_c = 0, \quad i_a + i_b = -i_c \quad (3.28)$$

Ce qui conduit à la simplification suivante de la matrice d'inductance :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L - M & 0 & 0 \\ 0 & L - M & 0 \\ 0 & 0 & L - M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Avec une représentation du modèle de la figure (3.11) [23]

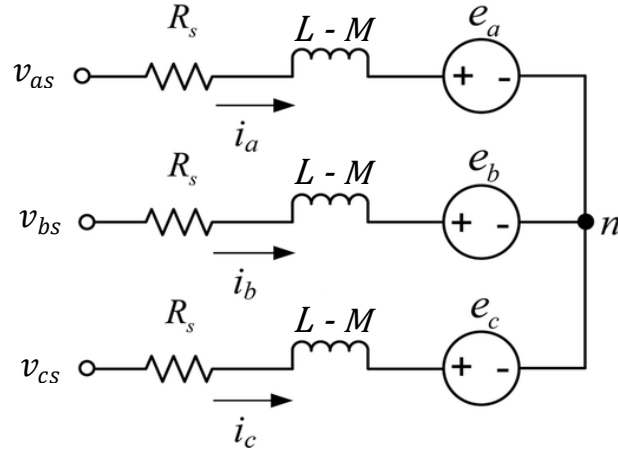


Figure (3.12): Circuit équivalent simplifié du moteur BLDC

Dans la plupart des applications pratiques des moteurs BLDC, les enroulements du stator sont connectés en Y dans lesquels il n'y a pas de point neutre pour que les tensions de phase soient difficiles à détecter.

Ainsi, le modèle mathématique basé sur la tension de phase n'est pas applicable dans certains cas. En revanche, la tension de ligne est facile à mesurer. Elle est approximativement égale à la tension du bus CC lorsque les transistors de puissance concernés sont allumés. Par conséquent, le modèle mathématique basé sur la tension de ligne est plus adapté au système pratique.

L'équation de tension de ligne peut être obtenue par le calcul de soustraction de l'équation de tension de phase comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L-M & M-L & 0 \\ 0 & L-M & M-L \\ M-L & 0 & L-M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a - e_b \\ e_b - e_c \\ e_c - e_a \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

L'analyse de la puissance et du couple pour le moteur BLDC peut être effectuée à partir du point de vue du transfert d'énergie. Lorsque le moteur fonctionne, la puissance de la source est absorbée, et bien qu'un peu soit transformé en pertes, la majeure partie de la puissance est transférée par l'entrefer au rotor par l'effet de couple. La puissance transférée au rotor, dite électromagnétique, est égale à la somme du produit des *fcém* actuelles (back-EMF) des trois phases. Elle est donnée par l'expression (3.31).

$$P_e = e_a \cdot i_a + e_b \cdot i_b + e_c \cdot i_c \quad (3.31)$$

En ignorant les pertes mécaniques et toute perte parasite, le couple électromagnétique est :

$$C_e = (e_a \cdot i_a + e_b \cdot i_b + e_c \cdot i_c) \cdot \frac{1}{\omega} \quad [Nm] \quad (3.32)$$

L'expression instantanée de la *fcém* (back-EMF) s'écrit comme :

$$\begin{cases} e_a = f_a(\theta) \cdot \psi_p \cdot \omega \\ e_b = f_b(\theta) \cdot \psi_p \cdot \omega \\ e_c = f_c(\theta) \cdot \psi_p \cdot \omega \end{cases} \quad (3.33)$$

k_e : est le coefficient de la force électromotrice

$f_a(\theta), f_b(\theta), f_c(\theta)$: sont les fonctions dépendant uniquement de la position du rotor. [23]

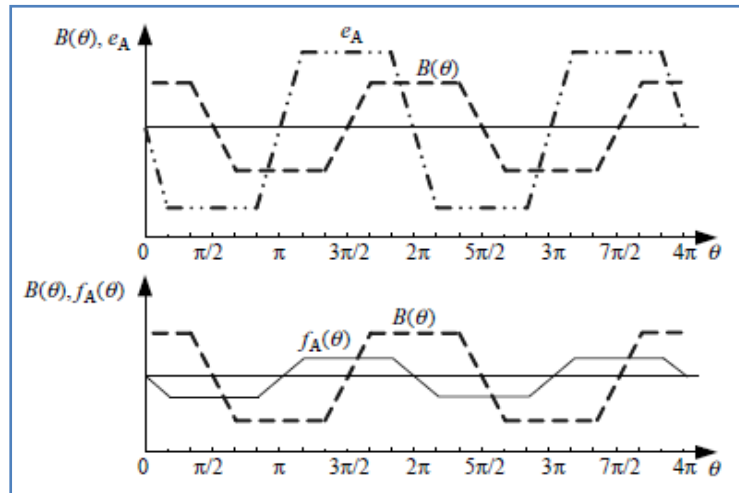


Figure (3.13): Relations de phase entre $B(\theta)$, e_a et $f_a(\theta)$

Notant que $f_a(\theta)$ a une répartition trapézoïdale avec la position du rotor, et ses valeurs maximales et minimales sont respectivement 1 et -1. La forme d'onde correspondante et sa relation de phase avec $B(\theta)$ et e_a sont illustrées à la figure (3.12). En ce qui concerne les enroulements symétriques triphasés, il existe également les fonctions $f_b(\theta) = f_a(\theta - 2\pi/3)$ et $f_c(\theta) = f_a(\theta + 2\pi/3)$. On peut remarquer que e_a est une *fcém* tournante qui est produite par le flux d'enroulement provoquée par le rotor rotatif.

À partir de (3.32) et (3.33), le couple électromagnétique peut être écrit comme :

$$C_e = p \cdot \psi_p [f_a(\theta_r)i_a + f_b(\theta_r)i_b + f_c(\theta_r)i_c] \quad (N.m) \quad (3.34)$$

3.4.4.3 Équations mécaniques

L'application de la 2^{ème} loi de Newton donne l'équation de mouvement :

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = C_{em} - C_r - F_v \cdot \omega_m \quad (3.35)$$

Où :

J : est l'inertie du rotor avec la charge associée,

C_{em} : est le couple moteur fourni par le stator,

C_r : est un couple résistant (charge et frottement sec),

F_v : est le coefficient de frottement visqueux su rotor.

ω_m : la vitesse de rotation angulaire 'mécanique' en (rad/s)

θ_r : la position du rotor en (rad)

- Calcul du couple moteur

On peut calculer le couple moteur par plusieurs manières, et qui reviennent tous à la même formulation : Le couple électromagnétique est la dérivée du travail mécanique par rapport à la position (angle de rotation).

$$C_m = \frac{dW_{meca}}{d\theta} \quad (3.36)$$

En fait, la puissance totale fournie au moteur est :

$$\begin{aligned} P_{elec} &= \sum_{k=a,b,c} V_k i_k = \sum_{k=a,b,c} \left[R i_k + L \frac{di_k}{dt} + E_k \right] i_k \\ &= \sum_{k=a,b,c} R i_k^2 + L i_k \frac{di_k}{dt} + E_k i_k = P_{joule} + P_{mag} + P_{méca} \end{aligned}$$

Le premier terme représente les pertes sont les pertes résistives (effet Joule), le second terme n'est rien autre que la variation de l'énergie magnétique emmagasinée :

$$\int L i_k \frac{di_k}{dt} dt = \frac{1}{2} L i_k^2 = w_{mag} \quad (3.37)$$

Le dernier terme ($E_k i_k$) est la puissance transformée en puissance mécanique (rotation).

Or on sait que la puissance mécanique P_{meca} s'exprime comme suit :

$$P_{meca} = \frac{dW_{meca}}{dt} = \frac{dW_{meca}}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = C_m \cdot \omega = \sum_{k=a,b,c} E_k \cdot i_k$$

Ce qui donne le couple :

$$C_m(t) = \frac{e_a(t) i_a(t) + e_b(t) i_b(t) + e_c(t) i_c(t)}{\omega} \quad (3.40)$$

On remplace E_k par son expression, il est alors possible de calculer le couple fourni par la machine :

$$C_m(t) = -K_e \left[i_a(t) \sin(\omega t) + i_b(t) \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c(t) \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (3.41)$$

Il est nécessaire de synchroniser les formes d'ondes de courant sur la position du rotor : la machine doit être autopilotée.

3.4.4.4 Représentation du moteur BLDC dans l'espace d'état [23] [33] [35]

Sur la base du circuit équivalent du moteur BLDC et du système d'équations dynamiques du moteur « BLDC » précédent, et en combinant toutes les équations pertinentes, le système est exprimé sous forme d'espace d'état comme suit:

$$\dot{x} = A \cdot x + B \cdot u \quad (3.42)$$

Les variables d'état choisies sont données par le vecteur

$$x = [i_a \quad i_b \quad i_c \quad \omega_m \quad \theta]^T$$

On peut choisir d'autres variables selon le contrôle et la technique voulus.

Ainsi, la matrice d'espace d'état devient:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{L_1} & 0 & 0 & -\frac{\psi_p}{L_1} f_a(\theta_r) & 0 \\ 0 & \frac{-R_s}{L_1} & 0 & -\frac{\psi_p}{L_1} f_b(\theta_r) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-R_s}{L_1} & -\frac{\psi_p}{L_1} f_c(\theta_r) & 0 \\ \frac{\psi_p}{J} f_a(\theta_r) & \frac{\psi_p}{J} f_b(\theta_r) & \frac{\psi_p}{J} f_c(\theta_r) & \frac{-F}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P & 0 \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{J} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

$$U = [v_{as} \quad v_{bs} \quad v_{cs} \quad C_r]^T \quad (3.45)$$

Où:

L_1 : L - M ;

L : inductance propre de l'enroulement par phase

M : L'inductance mutuelle par phase

v_{as}, v_{bs}, v_{cs} sont les tensions par phase sur les enroulements du moteur.

Toutes les équations forment le modèle d'espace d'état complet pour le BLDC. La variable d'état θ_r , la position du rotor, est nécessaire pour avoir les fonctions $f_a(\theta_r)$, $f_b(\theta_r)$ et $f_c(\theta_r)$, qui peuvent être réalisées à partir d'une table stockée. Ceci complète la modélisation du moteur BLDC.

Un schéma bloc peut être développé où le modèle du BLDC est illustré selon la figure suivante.

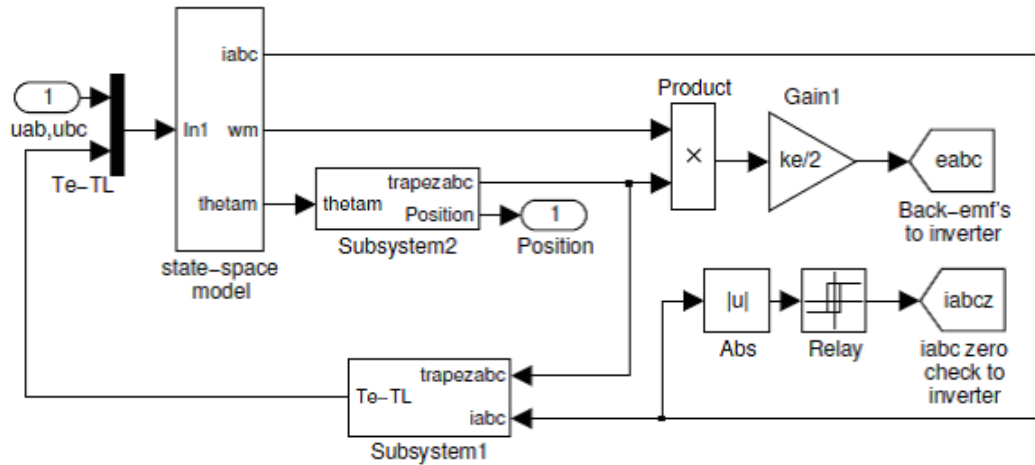


Figure 3.13: schéma bloc du contenu du modèle du moteur BLDC

3.5 Conclusion

Comme le moteur BLDC est aussi appelé moteur commuté électroniquement « EMC », on a présenté dans ce chapitre les différents modes d'alimentation du moteur BLDC, et les types

de convertisseurs utilisés, nous avons examiné de ce côté les alimentations unidirectionnelle et bidirectionnelle.

Le contrôle des moteurs BLDC peut se faire en mode capteur ou sans capteur, la conception avec capteurs de position emploie des capteurs à effet Hall qui, positionné à 60° ou à 120° l'un de l'autre, permettent de connaître la position du rotor. La connaissance de la position du rotor permet à un circuit électronique auxiliaire d'effectuer les commutations de l'alimentation et de contrôler le moteur BLDC. Mais pour réduire le coût global des dispositifs d'actionnement, les techniques de contrôle sans capteur sont normalement utilisées. [35]

La modélisation du moteur BLDC, connaissant que le modèle d'équations différentielles est construit pour un moteur BLDC triphasé avec le stator à trois enroulements ce qui est semblable à un modèle mathématique d'un moteur synchrone à aimant permanent, à partir duquel on a développé le modèle final du moteur BLDC. En faisant aussi la description et la mise en équation de la forme réelle de la fcm trapézoïdale (trapézoidal back emf)

Nous avons présenté selon le type de couplage des enroulements possibles pour ce moteur, la mise en équation triphasée. Ensuite nous avons extrait les relations mathématiques analytiques en leurs trois types (électrique, magnétique et mécanique), et nous avons utilisé un ensemble d'équations matricielles qui décrit comment un système évoluera dans le temps, qui s'appelle modèle d'espace d'état, au but de calculer et simplifier certaines grandeurs physiques.

Ce chapitre est un prélude au chapitre suivant, car la modélisation complète du moteur de type BLDC va nous faciliter la tâche pour faire parfaitement des simulations selon une configuration et une stratégie de contrôle choisi.

CHAPITRE 4

*STRATEGIES ET MODES DE CONTROLE DES
MOTEURS BLDC - SIMULATIONS*

4.1 Introduction [10]

Le moteur BLDC est commuté électroniquement par les interrupteurs d'un convertisseur statique d'alimentation au lieu de balais, comparé à un moteur à courant continu à balais ou à un moteur asynchrone. Le commutateur électronique du moteur BLDC alimente séquentiellement les bobines du stator, générant ainsi un champ électrique tournant qui « entraîne » le rotor avec lui. Pour garantir un fonctionnement efficace, il faut veiller à ce que les bobines soient alimentées exactement au bon moment.

Étant donné l'absence de contact mécanique ou électrique entre le stator et le rotor du moteur BLDC, d'autres procédés sont nécessaires pour indiquer les positions relatives des composants de manière à faciliter la commande du moteur. Pour y parvenir, les moteurs BLDC font appel à l'une des deux méthodes suivantes : une basée sur la mesure de la force contre-électromotrice (back emf) « sans capteur », l'autre se base sur utilisation de capteurs à effet Hall (Hall sensors). En outre, les moteurs BLDC offrent un rapport couple/taille du moteur élevé, une réponse dynamique rapide et un fonctionnement pratiquement silencieux. Mais il reste encore bien souvent des ombres quant à la commande.

Pour comprendre les différents comportements du moteur devant les diverses commandes, des algorithmes sur les microcontrôleurs et les techniques de commande du convertisseur sont développés en blocs de simulation et leur fonctionnement dépend du bon choix du résolveur (ODE) et des constantes de simulation.

Après avoir étudié les différentes parties de la structure de commande trapézoïdale ou avec capteurs, et les données de modélisation précédentes du moteur BLDC, nous allons dans ce chapitre mené une étude basée sur des simulations dans le but d'évaluer les modèles présentés pour différents mode de pilotage.

Malgré l'efficacité et les avantages du moteur BLDC, ses applications nécessitent un contrôle précis de la vitesse, un régulateur de vitesse classique (PI) est utilisé, avec des simulations afin dévaluer les performances et l'influences de réglage sur les différents paramètres, la stabilité du système et la poursuite.

4.2 Stratégies de commande appliquées au moteur BLDC

4.2.1 Contrôle du moteur BLDC avec capteurs à effet Hall [10]

Dans ce type de moteur brushless DC, des capteurs à effet hall (3 en général) sont utilisés pour connaître à tout moment la position du rotor, et adapter en conséquence l'alimentation des bobines et le champ magnétique. Le capteur va détecter le passage d'un pôle magnétique, et à partir cette information le circuit de commande électronique assurera la commutation des bobines. L'utilisation de capteurs à effet hall dans les moteurs brushless permet une excellente régulation, cependant l'ajout de ces composants, et le fait qu'il faille les placer très près du rotor entraîne un surcoût et un risque de panne supplémentaire. Cette solution est la plus employée dans les moteurs brushless DC utilisés en industrie.

Pour que le rotor tourne, il doit être dans la bonne position par rapport aux bobines du stator. S'il n'est pas aligné correctement, aucune rotation ne se produit. Pour cette raison, les moteurs BLDC doivent fournir un signal qui donne les informations de position appropriées aux circuits entraînant les impulsions du stator.

Une méthode courante consiste à intégrer des capteurs à l'intérieur du stator aux points critiques. Des capteurs à effet Hall sont généralement utilisés. Ceux-ci sont espacés de 120 degrés pour les moteurs BLDC triphasés et fournissent des signaux logiques aux circuits d'impulsions du stator.

Comme le montre la figure (4.1), dans ce contrôleur hypothétique, les sorties du capteur à effet Hall sont généralement numériques et lues par des entrées de sortie d'entrée à usage général sur l'unité de microcontrôleur ou le dispositif de contrôle moteur. Le contrôleur génère les signaux qui fournissent des entrées aux circuits de commande de grille. Ces signaux de commande de grille sont à modulation de largeur d'impulsion (PWM) pour fournir contrôle de vitesse. L'étage de sortie de l'onduleur délivre les impulsions et le courant aux enroulements de phase du stator.

Comme déjà expliqué en chapitre 2, les interrupteurs du convertisseur reçoivent leurs impulsions soit :

- À partir d'une table logique fournie les instants et la séquence de commutation des interrupteurs à partir des signaux logiques émis par les capteurs selon les secteurs appropriés. Pour cela c'est la tension DC qui sera modulée (duty : rapport cyclique).
- À partir d'une commande MLI. Lorsqu'un contrôleur de vitesse est utilisé pour actionner la commande de l'onduleur.

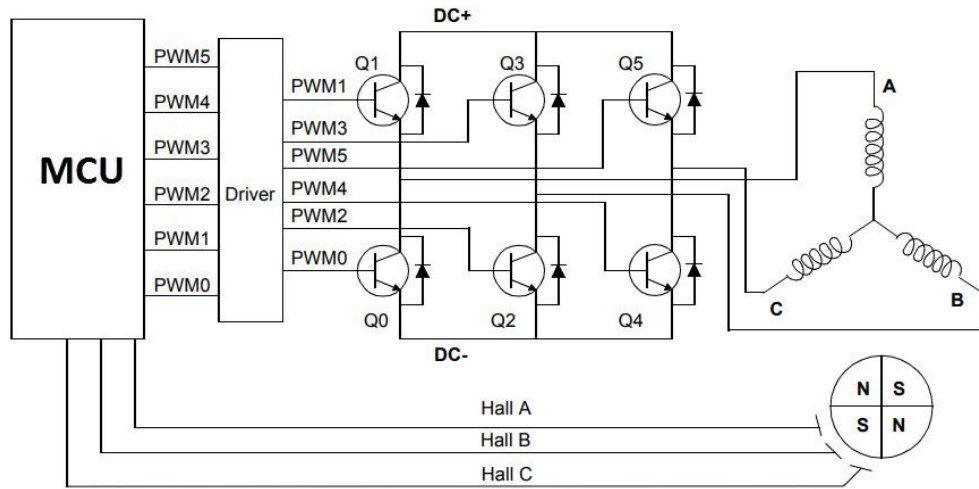


Figure (4.1) : structure générale de contrôle avec capteurs d'un moteur BLDC

La logique de commande de l'onduleur de la figure (4.2) est la suivante :

Le moteur BLDC triphasé fonctionne de manière biphasée, c'est-à-dire que les deux phases qui produisent le couple le plus élevé sont alimentées tandis que la troisième phase est désactivée. Les deux phases alimentées dépendent de positionnement des rotors. Les signaux des capteurs de position produisent un nombre à trois chiffres qui change selon la position et le secteur.

Chaque transistor conduit pendant un tiers de période (120°) et l'enchaînement des séquences tient compte de la position du rotor, la commande se fait de telle sorte qu'à chaque position élémentaire du rotor de BLDC (on impose un angle $\theta = 60^\circ$ électrique), des ordres doivent être donnés pour le blocage d'un transistor et le déblocage d'un autre.

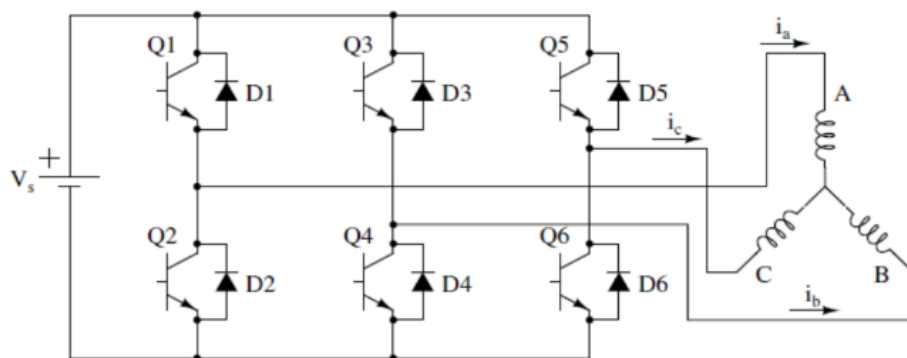


Figure (4.2) : Onduleur triphasé alimentant le moteur BLDC

Le tableau (4.1) indique l'état des interrupteurs de l'onduleur (conduit, bloqué) en fonction des signaux du codeur de position.

Angle électrique	Sequence	Capteurs			Courants des phases			Phase conductive			Interrupteurs	
		H1	H2	H3	ia	ib	ic	a	b	c		
0°-60°	1	1	0	1	+	-	Off	x	x		Q1	Q4
60°-120°	2	1	0	0	+	Off	-	x		x	Q1	Q6
120°-180°	3	1	1	0	Off	+	-		x	x	Q3	Q6
180°-240°	4	0	1	0	-	+	off	x	x		Q3	Q2
240°-300°	5	0	1	1	-	Off	+	x		x	Q5	Q2
300°-360°	6	0	0	1	Off	-	+		x	x	Q5	Q4

Tableau (4.1) : Signaux des capteurs et états des interrupteurs

La figure (4.3) donne structure générale du pilotage du moteur BLDC avec la table logique par l'intermédiaire du contrôle de l'onduleur

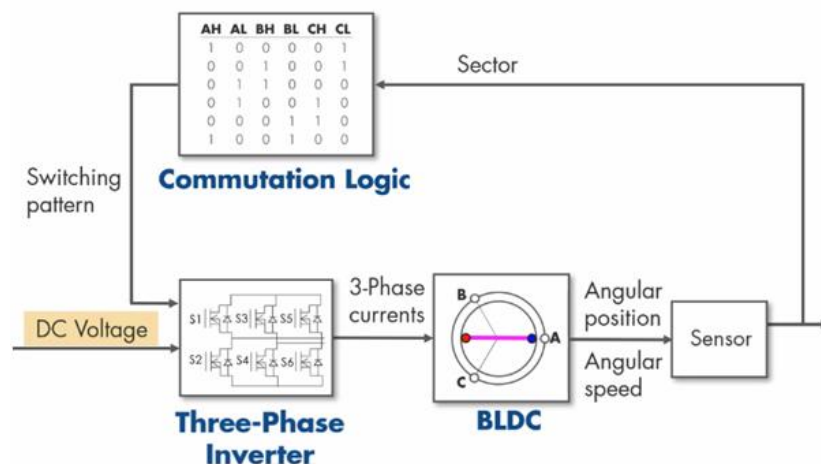


Figure (4.3) : Structure de contrôle : position-capteur table logique-onduleur-moteur BLDC

4.2.2 Contrôle du moteur BLDC sans capteurs (Sensorless)

Le terme “sans capteur” (en anglais Sensorless) signifie que les quantités mécaniques d'un moteur ne sont pas mesurées, mais estimées en temps réel par des méthodes bien établies pour les raisons suivantes :

- Réduction de cout ;
- Réduction de volume par élimination des instruments de mesures ;
- La limitation de certains capteurs de position à des vitesses données ;
- Augmentation de fiabilité.

Les capteurs de position peuvent être complètement éliminés, réduisant ainsi davantage le coût et la taille de l'ensemble moteur, dans les applications dans lesquelles seul un contrôle de vitesse variable (c'est-à-dire pas de positionnement) est requis et la dynamique du système n'est pas particulièrement exigeante (lentement ou, au moins, charge variable prévisible). En fait, certaines méthodes de contrôle, telles que la *fcem* et la détection de courant, fournissent, dans la plupart des cas, suffisamment d'informations pour estimer avec une précision suffisante la position du rotor et, par conséquent, pour faire fonctionner le moteur avec des courants de phase synchrones : Un variateur PM Brushless qui ne nécessite pas de capteurs de position mais uniquement des mesures électriques est appelé un entraînement sans capteur. Le moteur BLDC constitue un élément intéressant pour un fonctionnement sans capteur car la nature de son excitation offre intrinsèquement un moyen peu coûteux d'extraire les informations de position du rotor à partir des tensions aux bornes du moteur. Dans l'excitation d'un moteur BLDC triphasé, sauf pour les périodes de commutation de phase. Seuls deux des enroulements triphasés sont conducteurs à la fois et la phase non conductrice transporte la force contre-électromotrice. Il existe de nombreuses catégories de stratégies de contrôle sans capteur; cependant, la catégorie la plus populaire est basée sur les forces contre-électromotrices ou *fcem* (Back-EMF). La détection *fcem* de la phase inutilisée est la méthode la plus rentable pour obtenir la séquence de commutation dans les moteurs à enroulement en étoile. Étant donné que la *fcem* est nulle à l'arrêt et proportionnelle à la vitesse, la tension aux bornes mesurée qui a un grand rapport signal sur le bruit ne peut pas détecter le passage par zéro à basse vitesse. C'est la raison pour laquelle dans toutes les méthodes sans capteur basées sur *fcem*, les performances à basse vitesse sont limitées.

Plusieurs méthodes d'estimation de la position et la vitesse sont proposées, le choix de l'une parmi les autres dépend de l'application, et des propriétés du processeur utilisé ; les estimateurs non linéaires et dynamiques exigent souvent un microprocesseur puissant (surtout le filtre de Kalman), tandis que les estimateurs classiques et linéaires exigent moins de temps de calcul. La position estimée servira à l'estimation de vitesse, qui est indispensable pour la commande. Le problème qui se pose est l'estimation à faible vitesse et à vitesse nulle, où les estimateurs montrent des mauvaises performances.

Afin de réaliser l'autopilotage de ce moteur, c'est à dire élaborer une configuration sans capteur de position, nous devons trouver un moyen, autre que le capteur de position, qui permet l'estimation de cette information. Pour cela, plusieurs méthodes ont été développées

Certaines de ces méthodes ne nous permettent pas d'obtenir directement les instants de commutation de l'onduleur associé au moteur BLDC. Par exemple, la méthode basée sur les *f.c.e.m* simples directe qui nécessite la programmation d'un retard de 30° électriques. Cependant, il existe d'autres méthodes qui nous permettent d'acquérir directement ces instants de commutation, tels que la méthode basée sur l'intégration des *f.c.e.m*, la méthode basée sur les *f.c.e.m* composées, la méthode basée sur la troisième harmonique, etc.

4.2.2.1 Méthode basée sur l'estimation des *f.c.e.m* simples [36]

En utilisant la méthode des *f.c.e.m* simples pour la commande d'un moteur BLDC, les instants de commutation sont acquis en retardant les points de passages par zéro de ces dernières d'un angle électrique de 30° .

Sachant que cet angle est directement lié à la vitesse du moteur, dans un cas de vitesse variable, la précision de ces instants de commutation n'est pas évidente.

Afin d'éviter cet inconvénient, on utilise un déphasage de 90° électrique, qu'on obtient en intégrant les *f.c.e.m* simples. Cela nous donne des signaux décalés de 90° électrique par rapport à ces dernières.

Après détection des points de passage par zéro de ces signaux, on constate que les instants de commutation peuvent être déterminés directement à partir de ces derniers.

La détermination des six signaux de commande de l'onduleur se fait en utilisant une logique selon la figure (4.4).

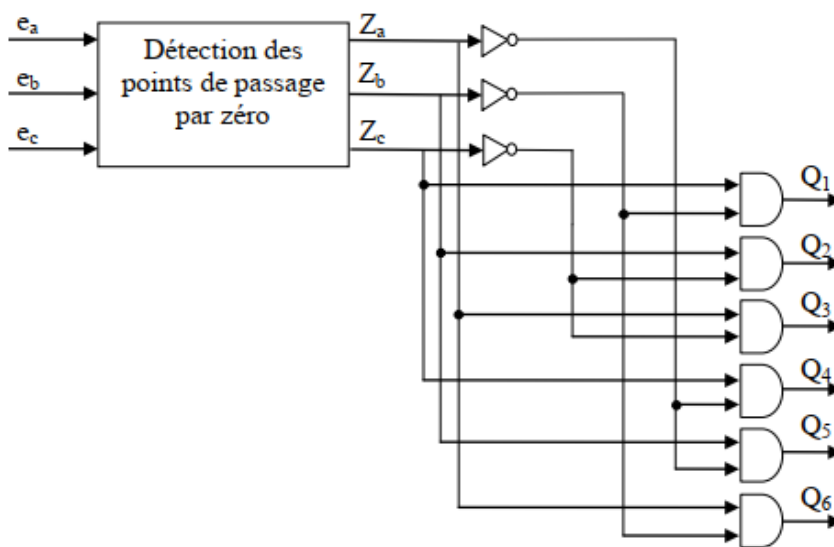


Figure (4.4) : Logique de commande de l'onduleur après détection des passages par zéro

4.2.2.2 Estimation des f.c.e.m simples à partir des tensions simples [36]

Puisque les f.c.e.m sont des grandeurs inaccessibles, nous devons donc estimer ces f.c.e.m à partir d'autres grandeurs accessibles. La grandeur directement mesurable la plus indiquée pour estimer la f.c.e.m simple est a priori la tension simple.

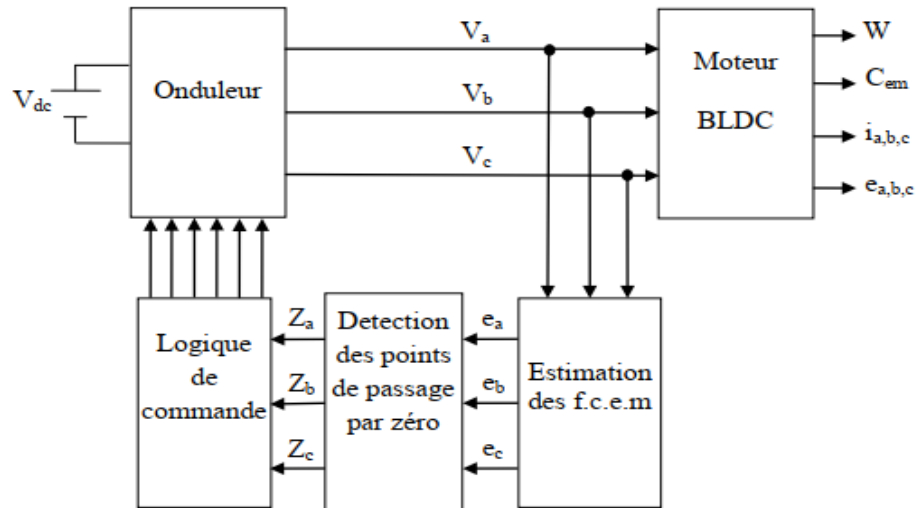


Figure (4.5) : Modèle utilisant les signaux des tensions simples pour l'estimation des fcems

L'inconvénient notable de cette technique, c'est qu'elle n'est utilisable que lorsque la FCEM est significative, c'est-à-dire lorsque le moteur tourne suffisamment vite. Le moteur ne peut donc a priori pas fonctionner à basse vitesse. Ces moteurs démarrent généralement suivant un cycle en rampe de vitesse (sans mesure, en faisant l'hypothèse qu'il y aura suffisamment peu de couple pour que le rotor suive le champ magnétique) pendant quelques secondes puis basculent en mode auto-piloté dès que la vitesse est suffisante.

4.3 Simulations sur le contrôle avec capteurs du moteur BLDC

Dans cette section on a réalisé des simulations sous Matlab-Simulink R2017a- on choisissant le résolveur ODE113.

Tout d'abord on a examiné les caractéristiques et les différentes grandeurs du moteur BLDC par un essai en boucle ouverte, puis on a simulé un contrôle de vitesse pour les deux techniques avec capteurs et sans capteurs

4.3.1 . Simulation en boucle ouverte du moteur BLDC

Comme la plupart des moteurs BLDC sont orientés vers des applications de basse puissance, alors le moteur pris pour la simulation est choisi de faible puissance. Les paramètres nécessaires à la simulation sont représentés à l'annexe A.

Nous avons établi les équations de fonctionnement de l'ensemble commutateur- moteur pour la séquence directe et inverse. Un programme de simulation de la dynamique du moteur BLDC est développé sous l'environnement MATLAB. Ce dernier permet à la fois de reproduire le couple du moteur, la vitesse, les courants dans les trois phases, le courant total à l'entrée du commutateur, les f_{cem} induites, ainsi que les signaux de commande des transistors et les durées de conduction des diodes.

Le modèle de cet exemple utilise un moteur BLDC triphasé couplé à un convertisseur abaisseur et une liaison d'alimentation à onduleur triphasé. Le convertisseur abaisseur est modélisé avec des MOSFET et l'onduleur avec des IGBT plutôt que des commutateurs idéaux afin que les résistances et les caractéristiques de l'appareil soient correctement représentées. Les tensions de la liaison du convertisseur CC-CC et de l'onduleur peuvent être contrôlées en modifiant les déclencheurs de la porte à semi-conducteur, qui contrôlent la vitesse du moteur. Le modèle de cet exemple illustré par la figure (4.6) utilise un moteur BLDC triphasé entraîné par un onduleur triphasé à travers un contrôleur. Ce contrôleur reçoit les signaux des capteurs les modélise et les envoient comme des signaux de commande et de commutation des MOSFET / IGBT qui sont modélisé comme des commutateurs idéaux afin que les résistances et les caractéristiques de l'appareil soient correctement représentées.

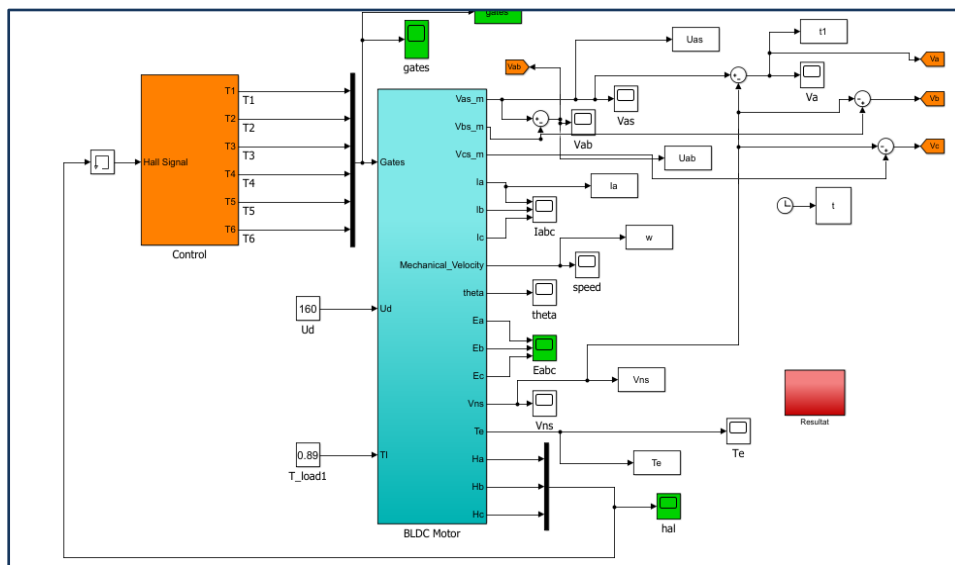


Figure (4.6) : Modèle simulink du schéma de contrôle du moteur BLDC

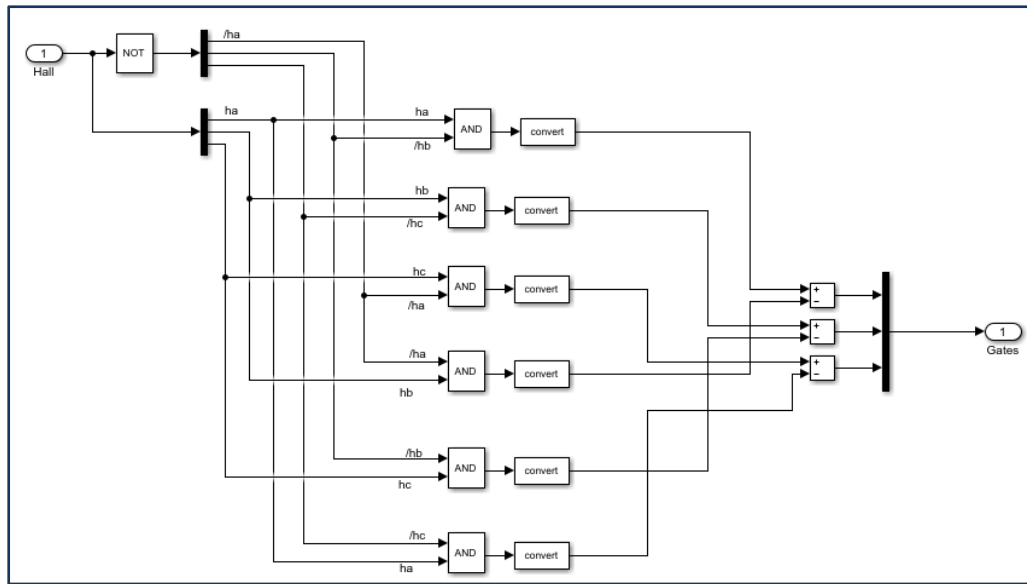


Figure (4.7) : Modèle simulink fournissant les commutations à partir des signaux Hall

4.3.1.1 Commentaires des résultats de simulation

En premier test et sans charge on injecte une référence de vitesse constante de 4000 tr/min afin d'accélérer le moteur. Les figures (4.8), (4.9), et (4.10) montrent les allures des courants, tension et f_{cem} des phases statoriques ainsi que les signaux des capteurs et ceux de contrôle des interrupteurs.

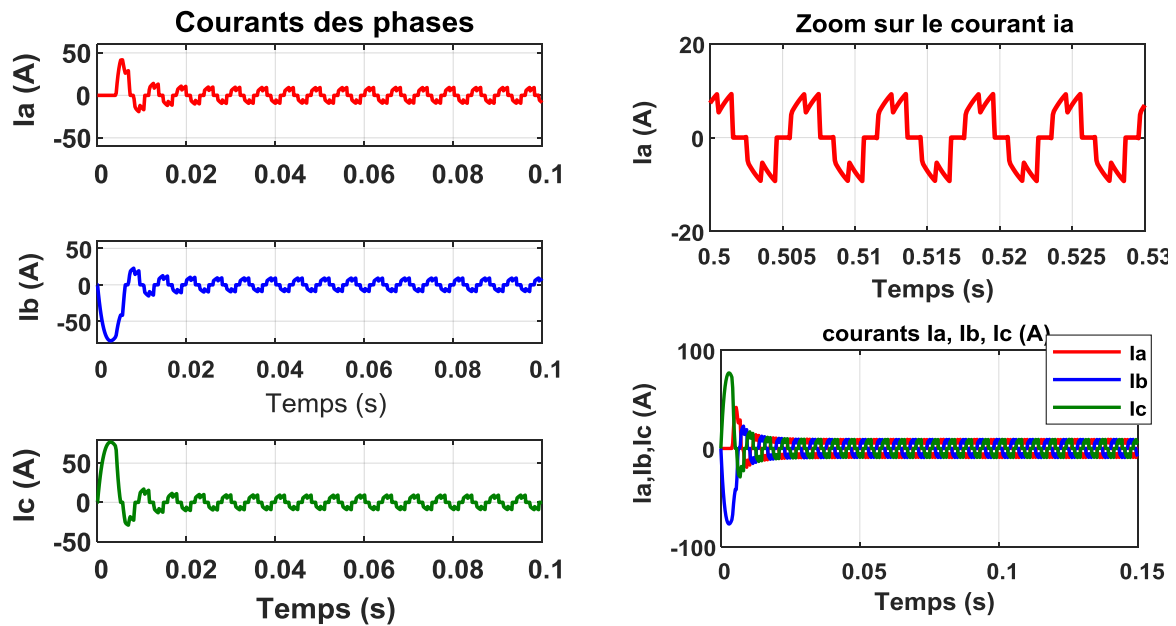


Figure (4.8) : Courants des phases - contrôle du BLDC avec capteurs en BO

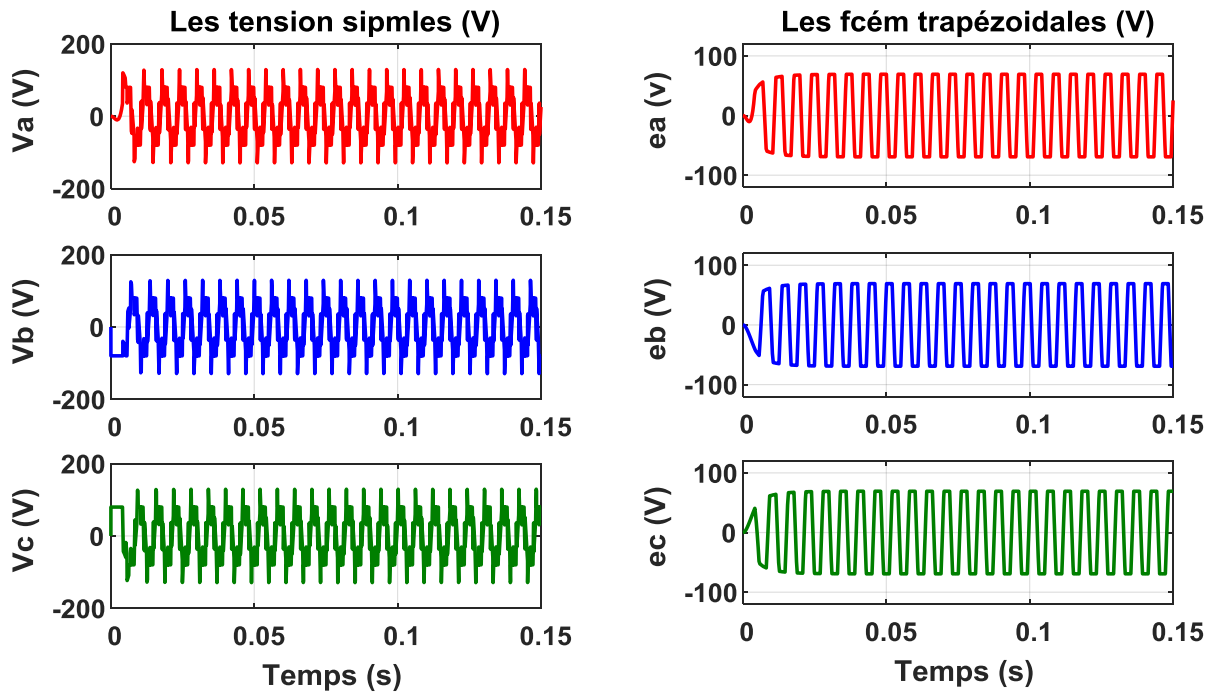


Figure (4.9) : Tensions et fcm des phases - contrôle du BLDC avec capteurs en BO

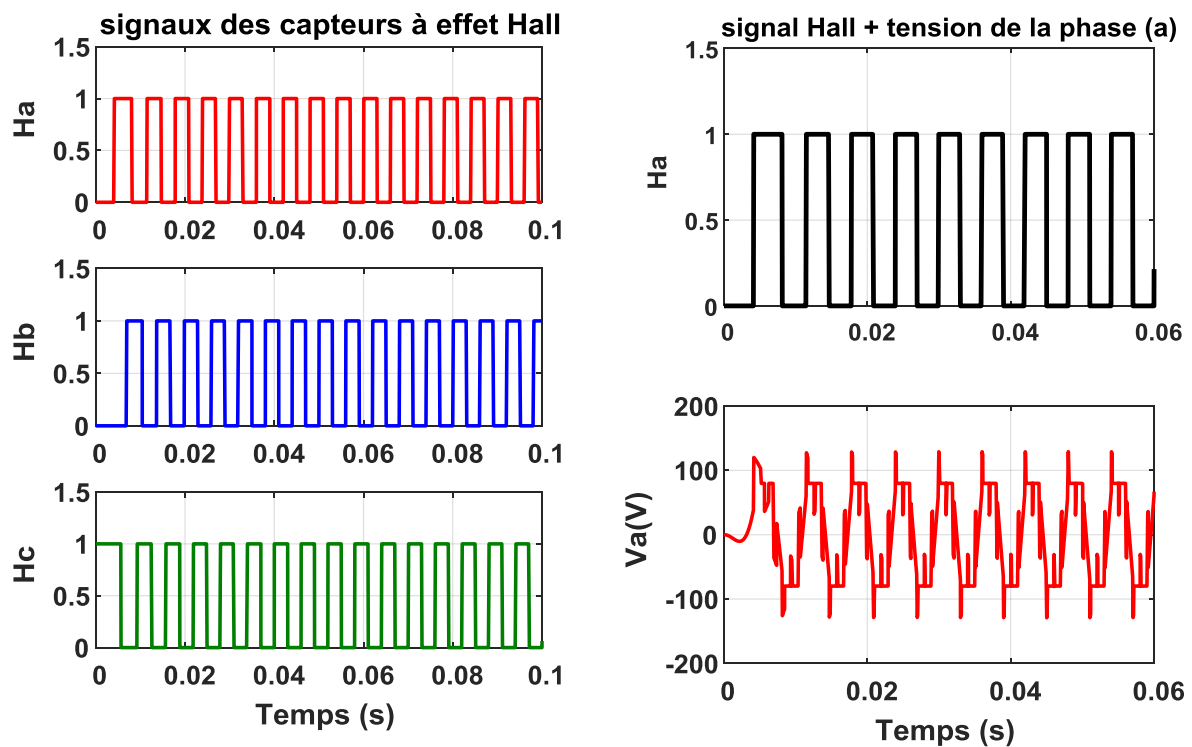


Figure (4.10) : Signaux des capteurs et de la tension de phase

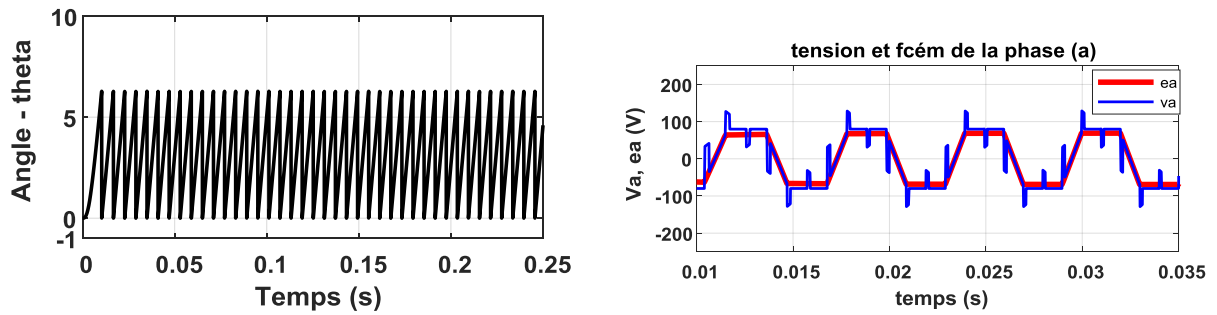


Figure (4.11) : Angle de position de rotor tension et fcem d'une phase

Comme deuxième test sur le même modèle Nous avons exécuté une simulation sur avec charge du moteur d'un couple de 6 $N.m$ à l' instant de $t=0.2s$, ce qui donne les résultats suivants:

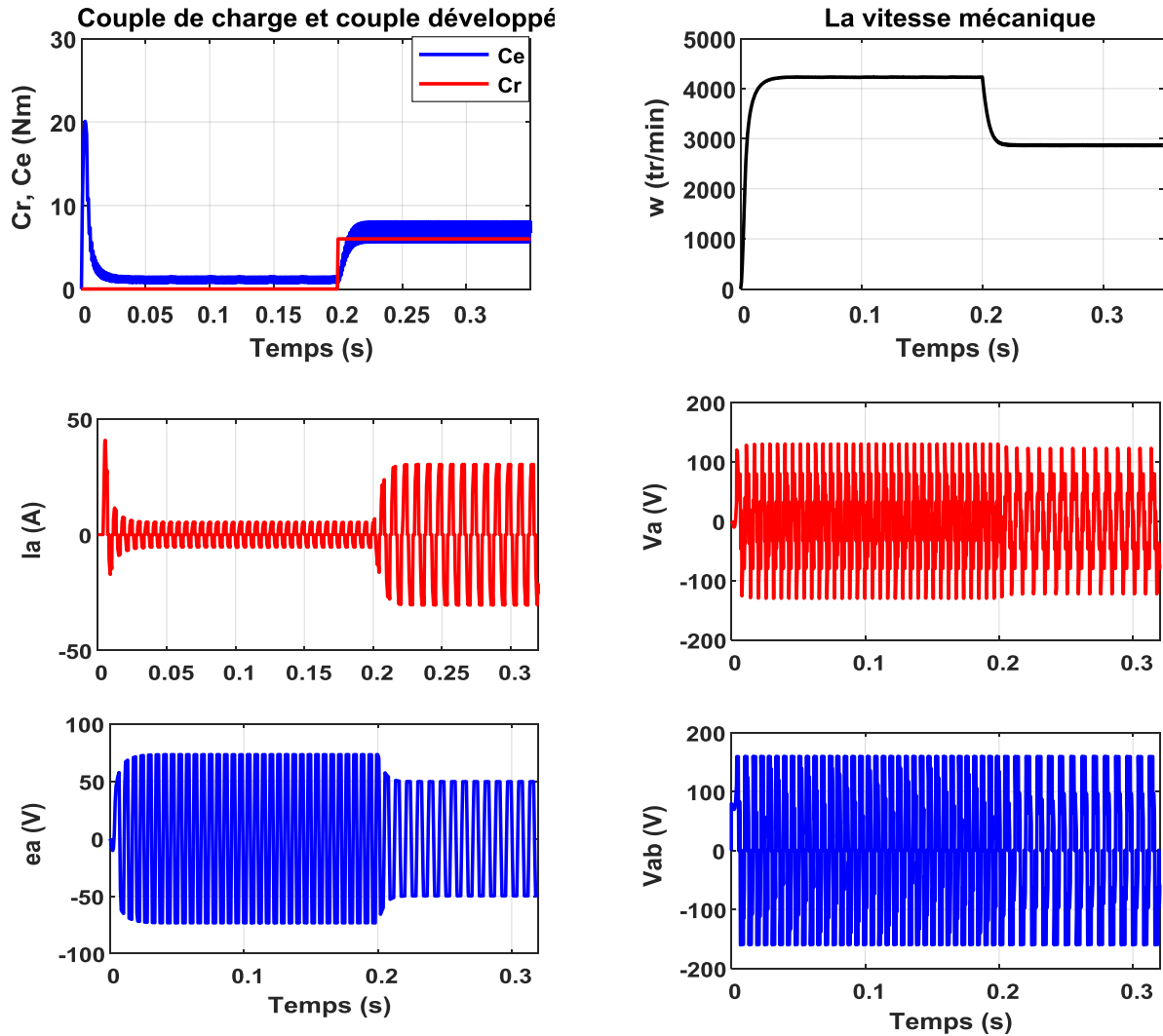


Figure (4.12) : Couples, vitesse, courant, tensions et fcém pour une charge du moteur à $t=0.2s$

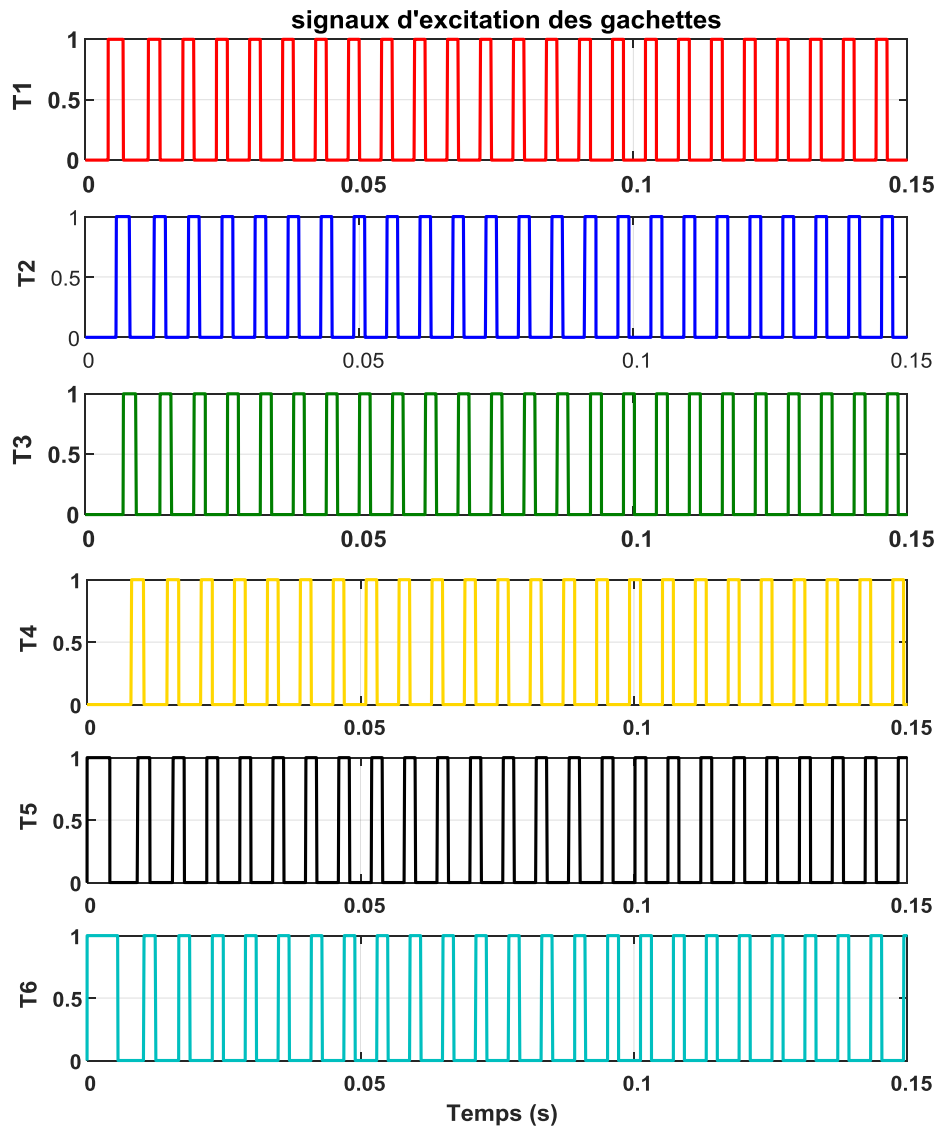


Figure (4.13) : Signaux de commutation des interrupteurs sans charge

4.3.2. Simulation en boucle fermée de contrôle du BLDC avec capteurs

Dans cette partie, nous allons reprendre le même modèle en boucle fermée pour contrôler la vitesse. Les figures (4.14), (4.15) montrent le schéma synoptique de principe et le modèle en blocs Simulink. L'erreur entre la consigne et le signal du capteur de position (vitesse) est régulée avec un régulateur PI simple afin de contrôler la tension de bus DC (VDC) qui alimente l'onduleur à MLI.

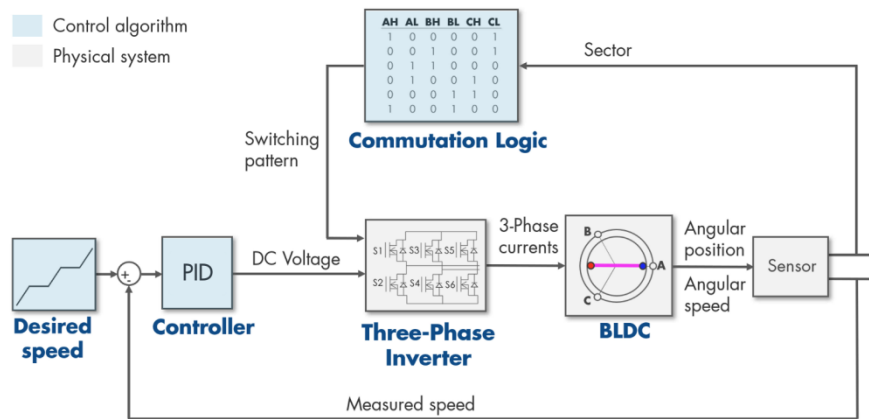


Figure (4.14) : Boucle de contrôle de vitesse du moteur BLDC avec capteurs

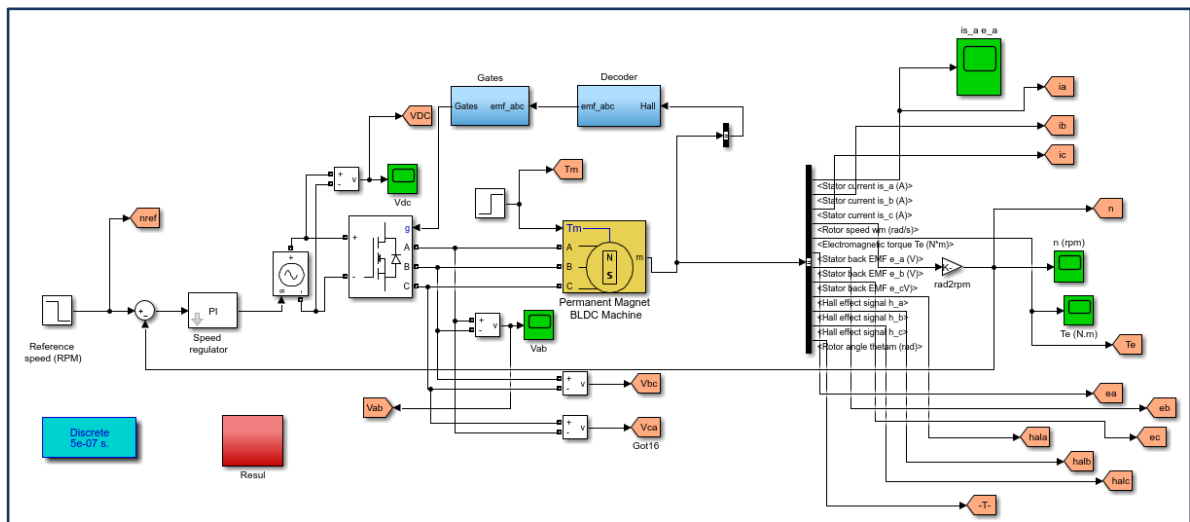


Figure (4.15) : Modèle Simulink de contrôle de vitesse – moteur BLDC avec capteurs

La commande de ces moteurs peut se faire par action sur la tension continue d'entrée du commutateur, mais il est plus simple d'agir sur les courants de phase du moteur où sur le courant continu à l'entrée du commutateur.

La commande des courants de phase exige la mesure où la reconstitution de ces courants ce qui n'est pas aisé. Il est plus facile de contrôler directement le courant continu. Le plus souvent on utilise un onduleur de tension commandé en courant.

Nous avons exécuté cette fois une simulation avec une variation de vitesse de $n=4000$ à 2000 tr/min à l'instant de $t=0.3s$ et un couple de charge constant $C_r=4.5$ Nm , ce qui donne les résultats illustrés par les figures suivantes:

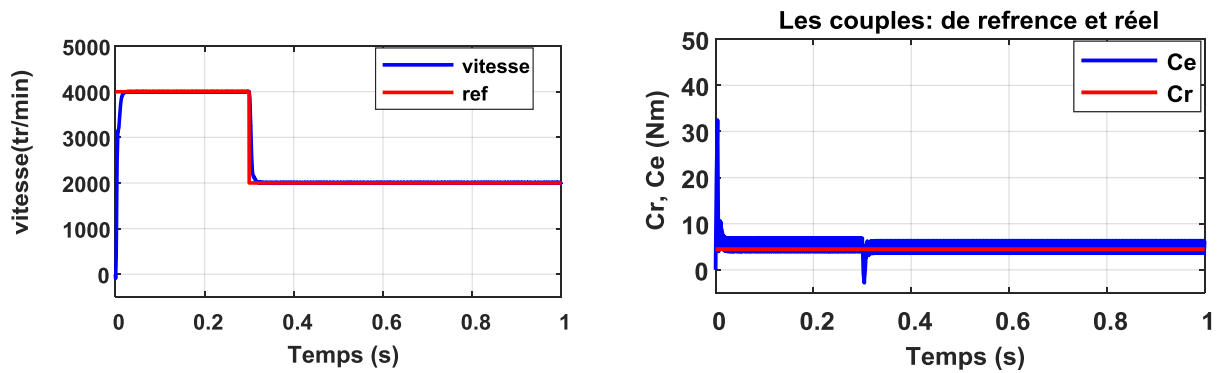


Figure (4.16) : Vitesses et couples – contrôle de vitesse du moteur BLDC avec capteurs

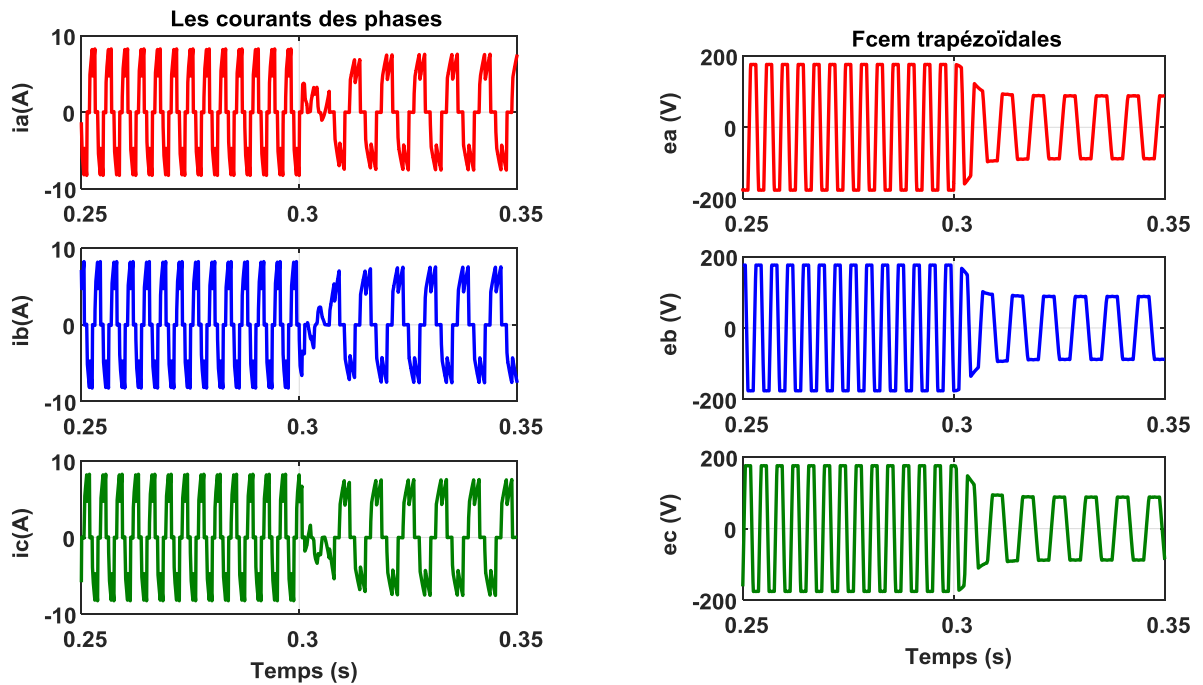


Figure (4.17) : Courants et fcems des phases – contrôle de vitesse du moteur BLDC avec capteurs

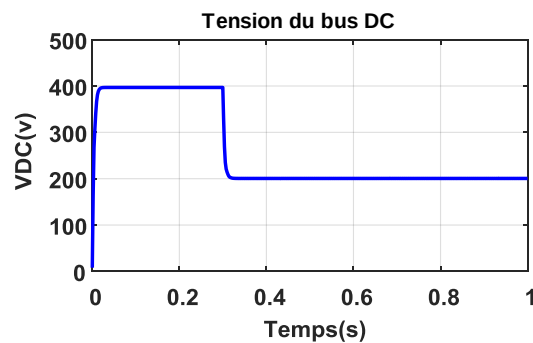


Figure (4.18) : Tension continue alimentant l'onduleur

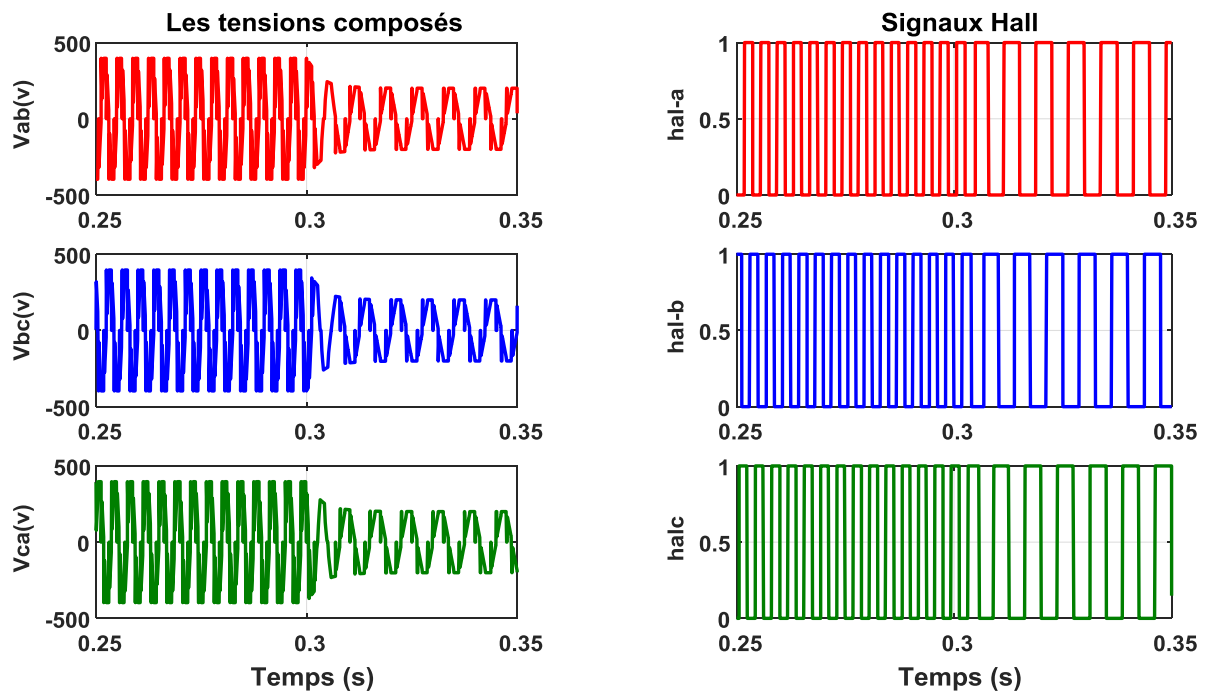


Figure (4.19) : Tensions composées et signaux Hall – contrôle de vitesse du moteur BLDC avec capteurs

En testant le contrôle de vitesse avec le régulateur PI, on a effectué cette fois une simulation, de sorte que la valeur de la vitesse sera constante sur toute la durée de la simulation $n = 2000 \text{ tr/min}$ et on injectant un 'step' de variation de la valeur de couple de charge Cr de 0 N.m à 4.5 N.m , à l'instant $t = 0.2 \text{ s}$, On obtient alors les courbes suivantes :

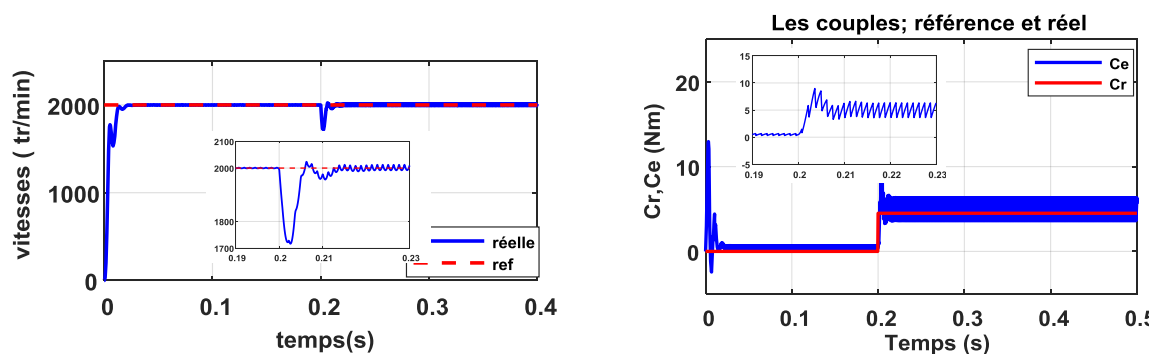


Figure (4.20) : Vitesses et couples – variation de couple du moteur BLDC avec capteurs

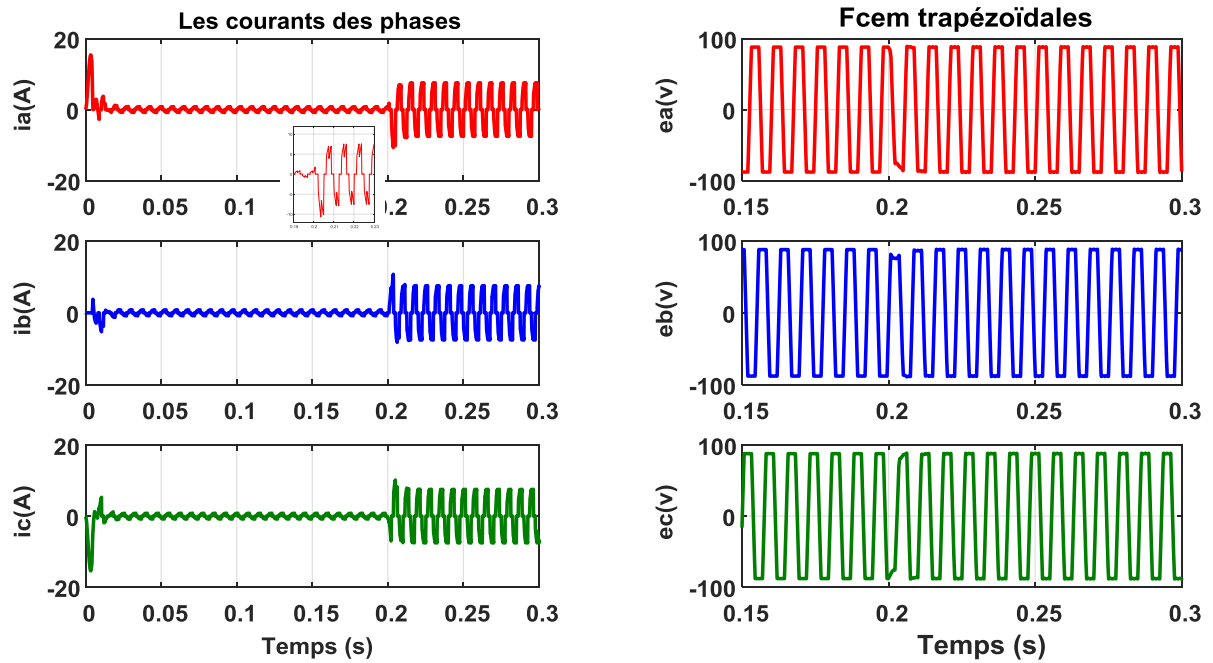


Figure (4.21) : Courants et f_{cem} s – variation de couple du moteur BLDC avec capteurs

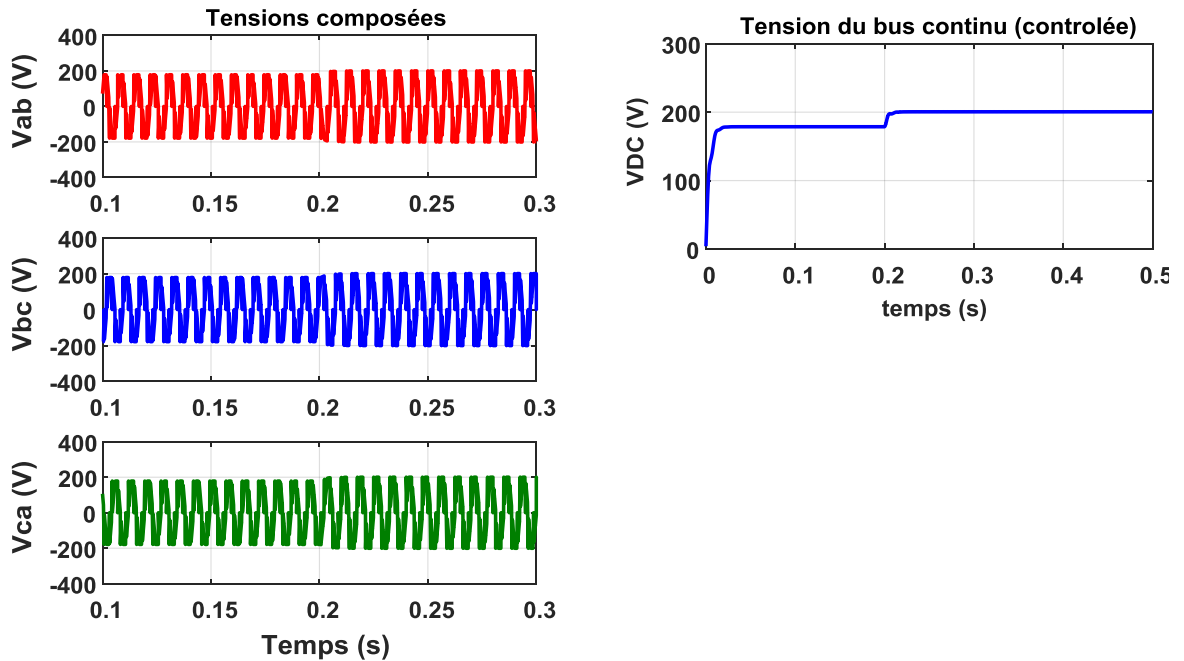


Figure (4.22) : Tensions composées et tension DC – variation de couple du moteur BLDC avec capteurs

4.4 Simulations sur le contrôle sans capteurs du moteur BLDC [33]

Le travail est basé autour de la f_{cem} trapézoïdale (trapezoidal back emf), pour le moteur BLDC avec un stator couplé en étoile, bien que la logique utilisée ici puisse être appliquée à n'importe quel type de distribution de flux.

Les détails de tous les blocs utilisés en simulation sont fournis dans la description suivante.

Une grande partie du travail a été consisté à la mise au point du modèle en bloc du moteur «BLDC bloc» est une logique équivalente de l'onduleur. L'approche utilisée est de récolter les avantages des deux programmes Matlab et Simulink, donnant ainsi un modèle très flexible mais fiable ; et d'éviter l'utilisation de SIMULINK Sim power block set qui est lent à simuler et nécessite une grande mémoire et une puissance phénoménale du processeur. Les résultats de simulation dépendent fortement sur le choix du « solveur ». Nous avons utilisé ode113 (Adams). .

Le bloc de base pour le moteur BLDC a été écrit comme un modèle d'espace d'état dans le troisième chapitre. Au cours des simulations, de nombreuses approches ont été jugés et on l'a réalisé de façon que le modèle de l'espace d'état permis une description précise et facile du moteur Brushless à C.C. [24], [33]

4.4.1 Description du modèle

Un modèle de base de la figure (4.23) sous bloc simulink « BLDC.mdl » développé en fonction de fichiers matlab s-functions qui sont requis par le fichier principal.

Le bloc prend les valeurs de tensions au niveau des enroulements avec l'information de couple de charge (Cr). Les valeurs à l'entrée sont dérivées des sources générales, les sorties sont calculées en résolvant des équations différentielles de sorte que seules les valeurs numériques sont requis.

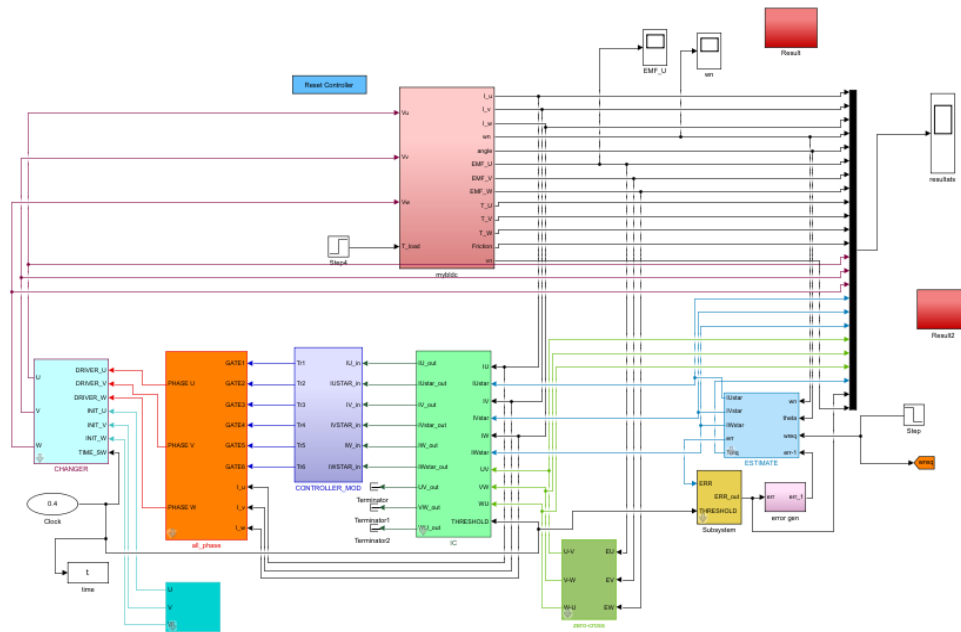


Figure (4.23): Schéma bloc du modèle Simulink simulé du moteur BLDC – (sans capteur)

Le « BLDC » est entraîné par un onduleur qui a été conçu sur mesure pour ce genre d'utilisation de « blockset », et il n'est pas recommandé qu'il soit utilisé comme une unité indépendante.

- Les entrées sont : V_a, V_b, V_c : Valeurs des tensions des enroulements statoriques.
- Les sorties sont:
 - i_a, i_b et i_c : sont les courants de phase individuels.
 - ω_n : est la vitesse du rotor électrique en rad / s.
 - θ : Angle : est la position électrique du rotor par rapport à la position initiale(%).
 - e_a, e_b et e_c : sont les valeurs des fcm générées dans les trois phases.
 - C_a, C_b et C_c : sont les couples individuels de phase.
 - F : Friction: les valeurs des pertes par frottement au rotor.
 - V_n : est la tension du nœud de point neutre. (stator en étoile).
 - Cr : est le couple de charge externe qui est appliqué au système. Ainsi, le couple de freinage total qui est connu par le système est une combinaison de friction et le couple de charge.

La résolution des équations d'états est nécessaire sous une «S-Fonction», les conditions initiales des états peuvent être modifiées. Et sont nécessaires pour le calcul des matrices 'A', 'B', 'C', 'D' traitées en chapitre3. Par conséquent, chaque modification de simulation doit être activée par mise à jour du contrôleur 'RESET CONTROLLER'.

Les paramètres de la machines sont nécessaires pour ce calcul. Les états sont (chapitre 3) :

$$x = [i_a \quad i_b \quad i_c \quad \omega_m \quad \theta]^T \quad (4.1)$$

4.4.1.1 Estimation des références

Un bloc d'estimation contient le contrôleur central faisant appel à une S-fonction qui permet de calculer les courants de phases de référence selon les références de vitesse et de couple comme suit:

1. Il calcule l'erreur de vitesse (Différence entre la vitesse réelle et la Vitesse de commande)
2. Ensuite, il utilise un simple contrôleur PID pour Estimer le couple nécessaire:

La période de temps d'échantillonnage (T_s) peut être modifiée pour un choix optimal des paramètres du régulateur :

KP est la constante de proportionnalité; KI est la constante intégrale; KD est la constante différentielle.

Une limite de saturation peut être appliquée au couple total en cas de sécurité.

- pour ce bloc d'estimation, les entrées attendues sont:

- ω_n : la valeur réelle actuelle de la vitesse du rotor (rad / s).
- θ : θ : position du rotor en radians électriques.
- ω_{ref} : la vitesse du rotor requise (rad électrique / s).

- Et les sorties sont :

- i_{a-c} , i_{c-c} , i_{b-c} : Les courants de commande de phases.
- err : l'erreur entre la vitesse de commande et la vitesse réelle à l'instant actuel
- Cr : La valeur du couple qui doit être générée par le moteur de façon à satisfaire la vitesse de commande et / ou des conditions de couple de charge.

4.4.1.2 Technique de détection de passage par zéro « Back-EMF Zero Crossing Detection method »

L'approche de passage à zéro est l'une des méthodes les plus simples de la technique de détection de la $fcém$, et est basée sur la détection de l'instant auquel la $fcém$ (back EMF) dans la phase non excitée croise le point zéro. Ce passage à zéro déclenche une minuterie, qui peut être aussi simple qu'une constante de temps (RC), de sorte que la commutation séquentielle suivante se produit à la fin de cet intervalle de synchronisation [34] [37].

Pour le fonctionnement typique d'un moteur BLDC, le courant de phase et la $fcém$ doivent être alignés pour générer un couple constant. Le point de commutation actuel indiqué sur la figure (4.24) peut être estimé par le point de passage à zéro (ZCP) des $fcéms$, et un déphasage de 30 °, en utilisant un schéma de commutation en six étapes par un onduleur triphasé pour la commande du moteur BLDC. L'intervalle conducteur pour chaque phase est de 120 degrés électriques. Par conséquent, seules deux phases conduisent le courant à tout moment, laissant la troisième phase libre (non reliée). Afin de produire un couple maximal, l'onduleur doit être commuté tous les 60 ° en détectant le passage à zéro de la $fcém$ sur la bobine libre du moteur, de sorte que le courant est en phase avec la $fcém$,

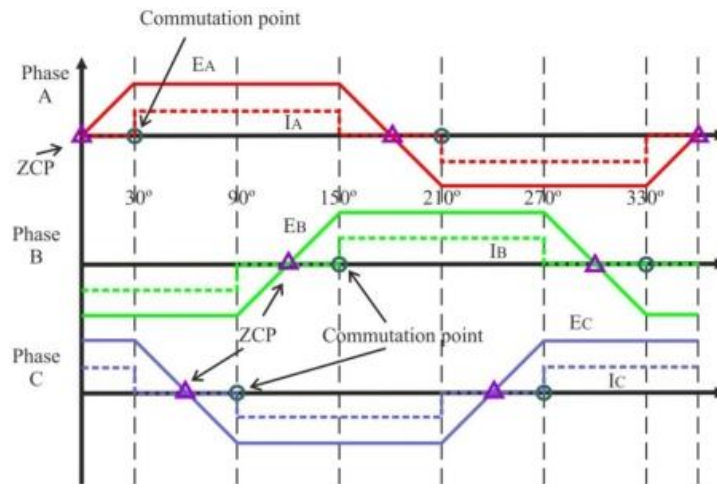


Figure (4.24) : Détection de passage par zéro de la *fcém* Trapézoïdale

Le bloc « Zero Crossing, IC, trigger de 120 degrés BLOCS » évalue les passages à zéro de:

1. ab: détection de passage à zéro de *fcém* : a - *fcém* : b
2. bc: détection de passage à zéro de *fcém* : b - *fcém* : c
3. ca: détection de passage à zéro de *fcém* : c - *fcém* : a

Ces signaux peuvent être utilisés pour synchroniser le contrôleur ou l'onduleur.

Le bloc 'IC' est utilisé pour maintenir le contrôleur à son état initial jusqu'à ce que le temps moteur reprenne une vitesse suffisante et que les *fcém*s, soient significatives. Il convient de noter ici que la conception de contrôle sans capteur a été implémentée par plusieurs travaux [35], [38], [39], ce qui dépend fortement des valeurs de la *fcém*.

Initialement, puisque le moteur est à l'arrêt, les *fcém* n'ont pas été encore construites. Ainsi, le moteur est «aveuglément» accéléré jusqu'à ce que des tensions suffisantes soient accumulées. Il est important que pendant cette période, le contrôleur ne perd pas son état initial.

Un sous système "déclencheur de 120°" ou "120 deg trigger" accélère le moteur pendant un certain temps déterminé par la valeur dans le champ 'threshold time' dans le bloc 'CHANGER'. Après le temps de seuil, le bloc 'CHANGER' déconnecte simplement le bloc "déclencheur de 120 °" et met le moteur en boucle fermée.

Le circuit de détection de passage par zéro permet de donner des informations sur la position du rotor au microcontrôleur, afin de déterminer l'instant des commutations des bobines.

Le circuit de détection de passage par zéro est conçu à partir de comparateurs à hystérésis, pour éliminer l'influence des hautes fréquences provoquées par le découpage haute fréquence de l'alimentation.

Il sera entièrement contrôlé par le microcontrôleur. Le circuit de commutation sert d'intermédiaire entre le moteur (considéré comme une source de courant) et l'alimentation (source de tension). Ce microcontrôleur (généralement le PIC18F4431.) est particulièrement bien adapté à la commande de moteur, car il possède une série de modules qui facilitent la mise en oeuvre du contrôle d'un moteur.

Après que les références ont été générés par la Bloc «estimation», le bloc « CONTROLLER_MOD » prend en cours et déclenche les gâchettes appropriées de l'onduleur afin d'établir et maintenir le courant souhaité.

- Pour ce bloc les entrées sont:

- i_a : est la valeur actuelle du courant dans l'enroulement de phase a .
- $Ia-c$: est le courant de commande pour la phase a .
- i_b : est le courant actuel dans l'enroulement de phase b .
- $Ib-c$: est le courant de commande pour la phase b .
- i_c : est la valeur actuelle du courant dans l'enroulement de phase c .
- $Ic-c$: est le courant de commande pour la phase c .

- Les résultats attendus sont:

- $Tr_1, Tr_2, \dots Tr_6$: sont les signaux logiques fournis aux gâchettes de l'onduleur.

- Le bloc inverter

Il s'agit en fait d'une version logique de l'onduleur à 6 transistors d'électronique de puissance ($f_c=2\text{kHz}$). Les tensions qui doivent être fournies au moteur BLDC sont des signaux dérivés, par conséquent de l'onduleur « INVERTER ALL PHASES » qui est une unité complètement logique. La logique utilisée est simple (expliquée au paragraphe précédent), et est rapide et fiable (au calcul des transitoires). Au moins, pour ce type de mise en œuvre destiné au BLDC. [10]

- Les entrées sont:

- $I, G1, G2, \dots G6$: signaux logiques des (zéro / non nul) qui activent les gâchettes des «transistors».
- ia, ib, ic sont les valeurs des courants de phase qui sont nécessaires pour activer la Logique de roue libre : «freewheeling».

-Les sorties sont : va, vb, vc : sont les «tensions» respectives des phases statoriques.

4.4.2 Résultats des simulations

Pour ce modèle sans capteurs, plusieurs essais de simulation seront menés pour prédire les allures des différentes caractéristiques et les performances du système - sans capteurs

- On a exécuté des simulations, premièrement en injectant un couple de charge de consigne $C_r = 1 \text{ N.m}$ à l'instant de $t=0.15\text{s}$ à la vitesse $\omega=75 \text{ rad/s}$. On obtient les résultats illustrés par les figures suivantes :

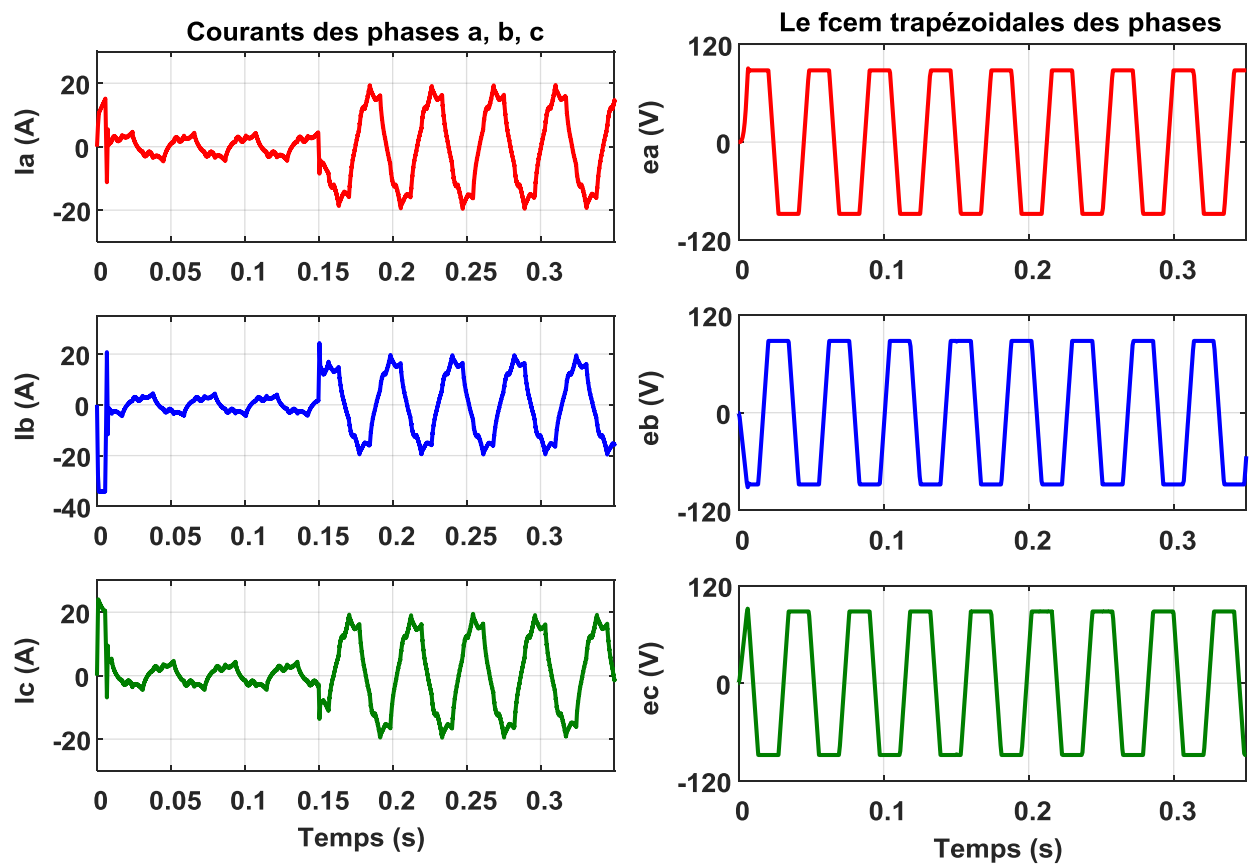


Figure (4.25): Courants et fcm des phases– contrôle de vitesse du moteur BLDC sans capteurs

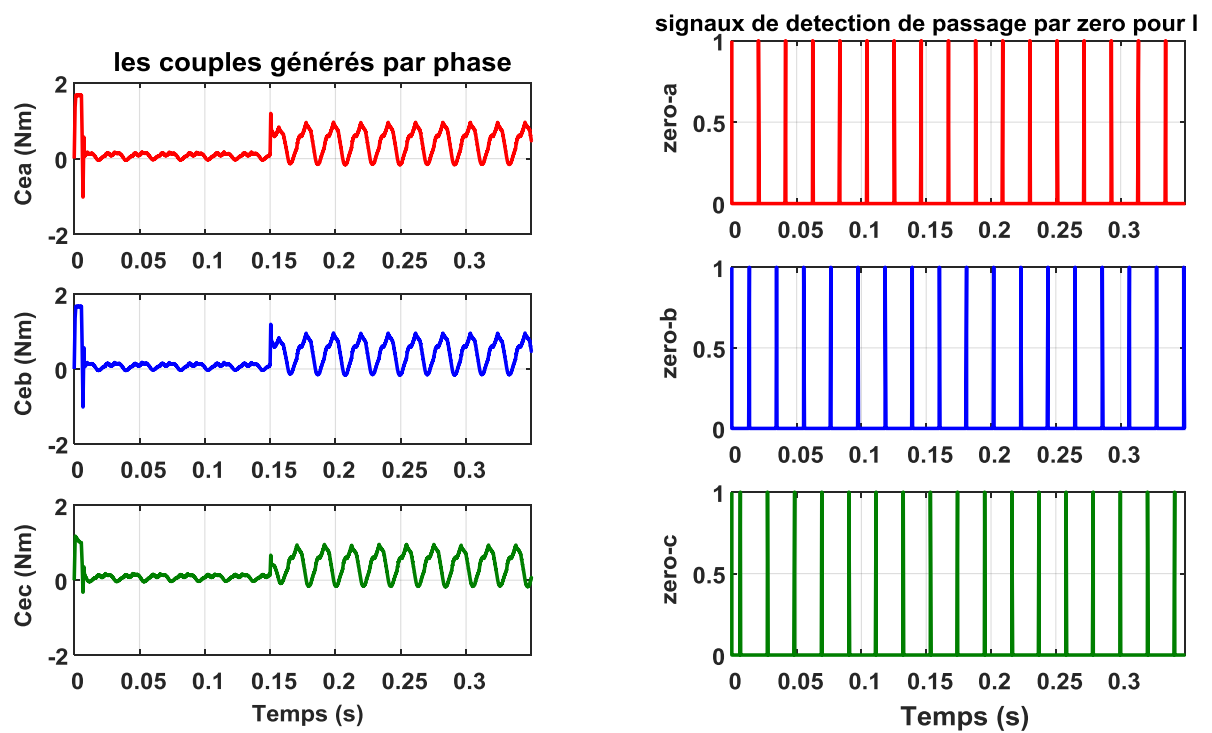


Figure (4.26): Couples des phases et signaux de détection de passage par zéro des $f_{c\acute{e}ms}$ – Moteur BLDC sans capteurs

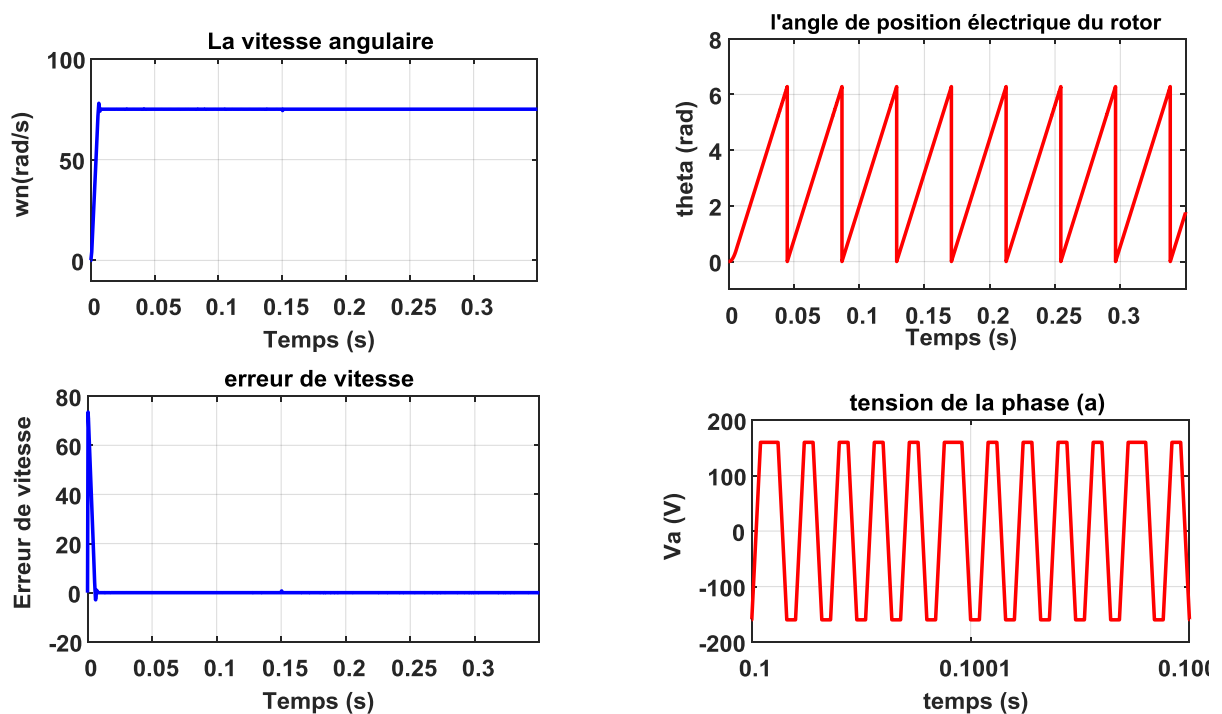


Figure (4.27): Vitesse, angle, et tension par phase –moteur BLDC sans capteurs

- Une deuxième simulation est lancée, cette fois en envoyant un 'step' de vitesse en référence de $\omega=75 \text{ rad/s}$ à $\omega=50 \text{ rad/s}$ à l'instant $t=0.15\text{s}$ tout en maintenant le couple de charge constant. Les figures qui suivent illustrent les résultats obtenus.

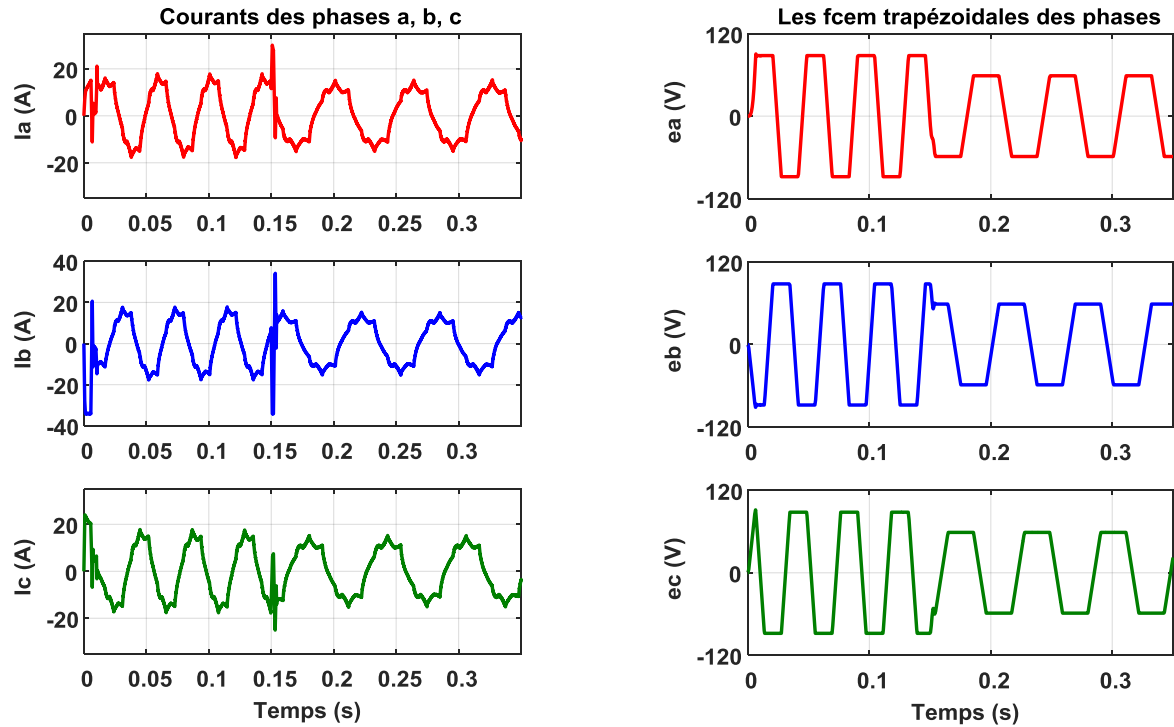


Figure (4.28): Courants et fcems des phases– variation de vitesse du moteur BLDC sans capteurs

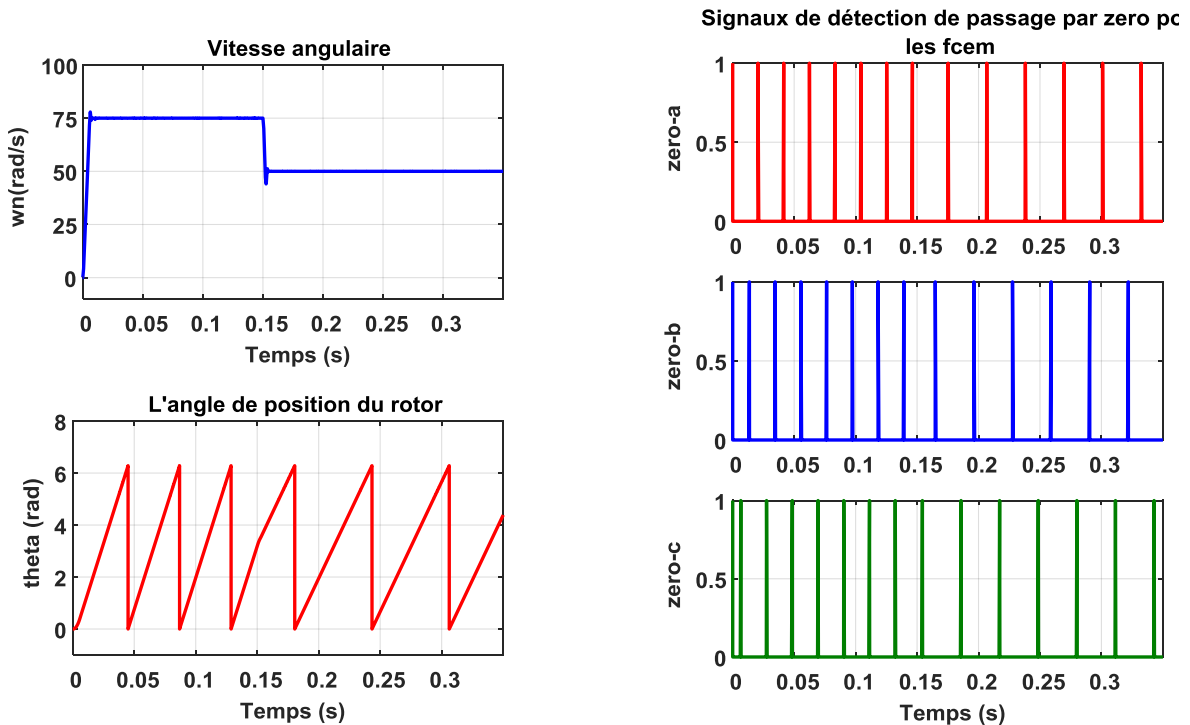


Figure (4.29): Vitesse, angle et signaux de détection de passage par zero des fcéms – variation de vitesse du moteur BLDC sans capteurs

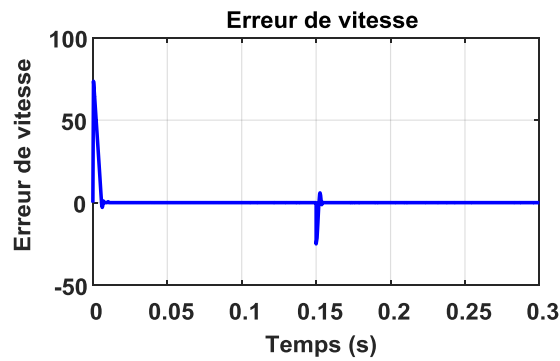


Figure (4.30): Erreur de vitesse – variation de vitesse du moteur BLDC sans capteurs

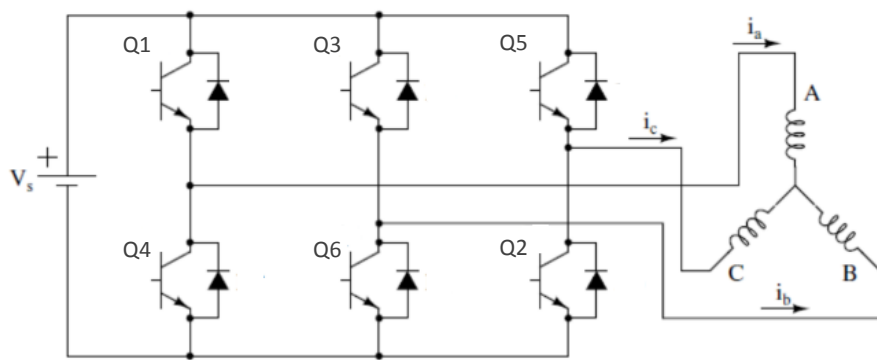


Figure (4.31): Onduleur triphasé commutant les phases du bloc « inverser »

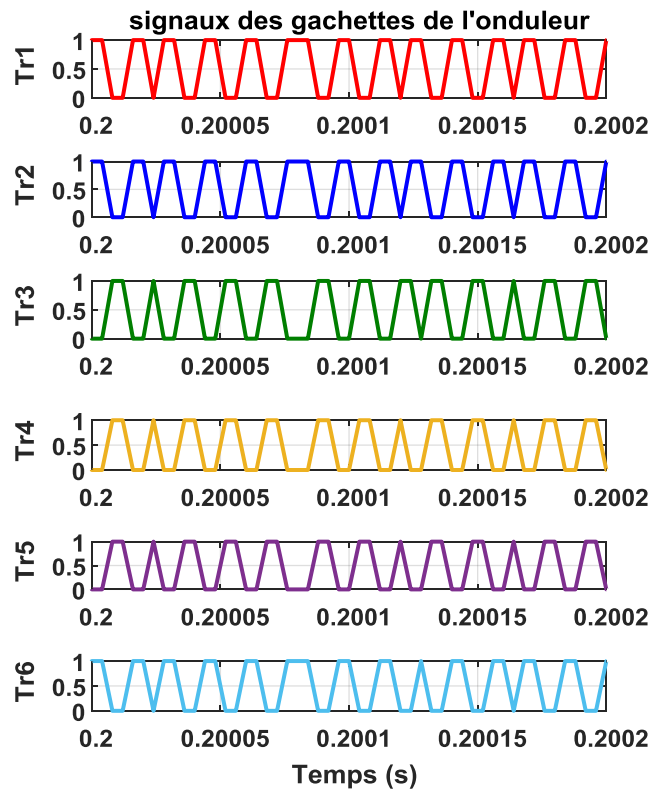


Figure (4.32): Instants de commutation des interrupteurs – variation de vitesse du moteur BLDC sans capteurs

- Une dernière simulation est effectuée pour inversion de sens de rotation avec un 'step' de vitesse de référence de $\omega=75 \text{ rad/s}$ à $\omega=-75 \text{ rad/s}$ à l'instant $t=0.15\text{s}$ tout en maintenant le couple de charge constant. Les figures qui suivent illustrent les résultats obtenus.

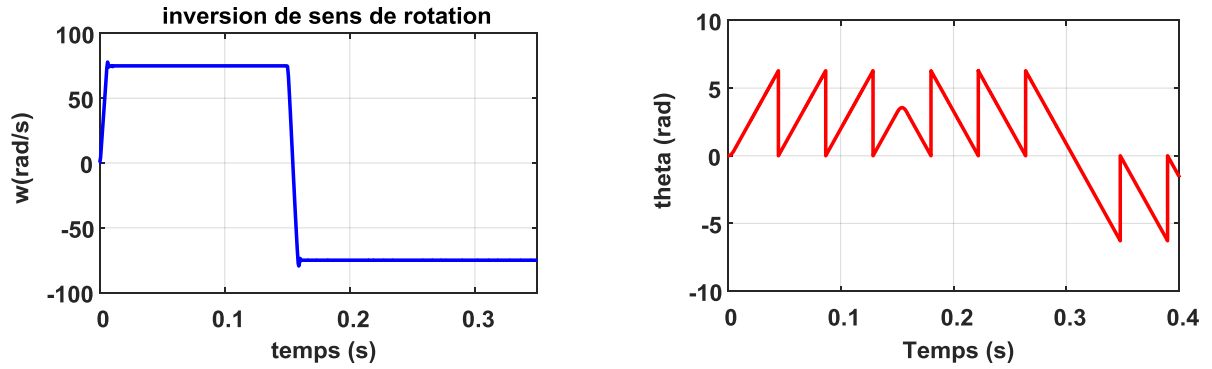


Figure (4.33): Vitesse et angle de rotation – inversion du sens de rotation du moteur BLDC sans capteurs

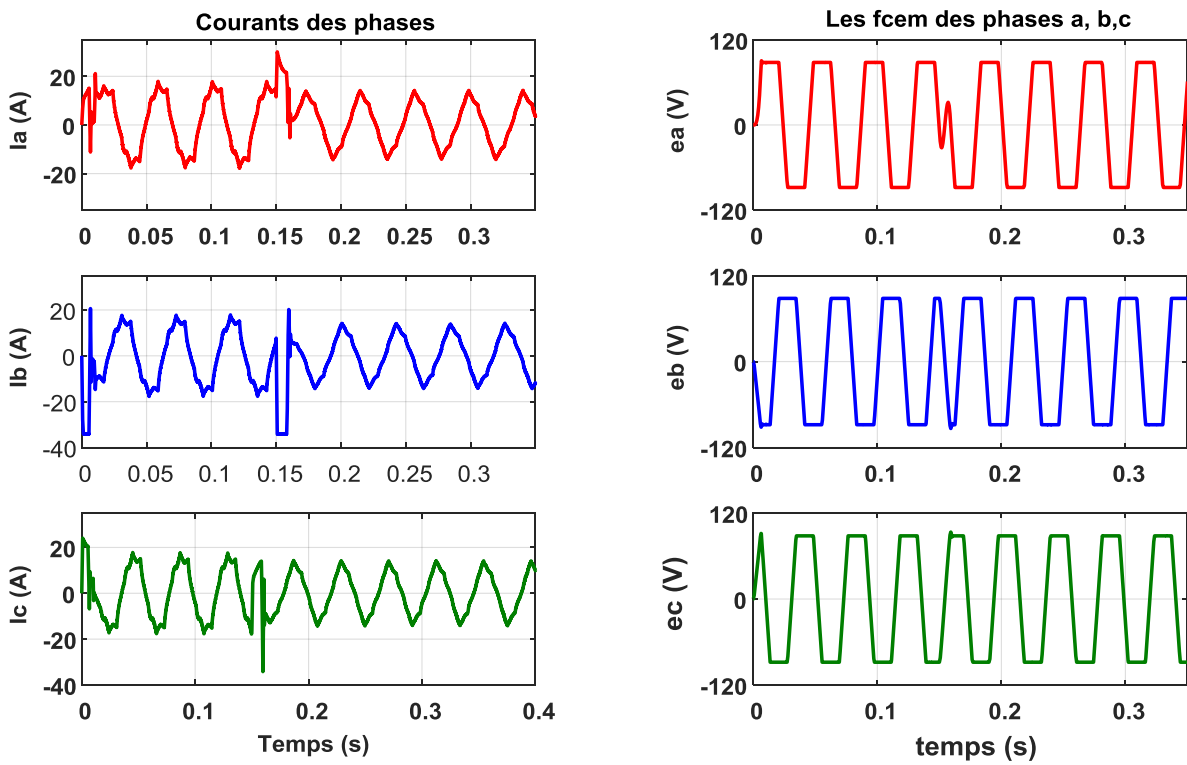


Figure (4.34): Courants et fcems des phases– inversion du sens de rotation du moteur BLDC sans capteurs

4.5 Interprétations des résultats de simulation

- Les moteurs BLDC sans capteur sont plus simples et potentiellement plus fiables que les unités qui utilisent des capteurs à effet Hall.
- L'avantage du contrôle du moteur BLDC sans capteur est que la partie capteur peut être omise et, par conséquent, les coûts globaux peuvent être considérablement réduits. Les inconvénients du contrôle sans capteur font des exigences plus élevées pour les algorithmes de contrôle et l'électronique plus compliquée. Les moteurs sans balais se basent sur la mesure de la force contre-électromotrice pour déterminer les positions relatives du stator et du rotor de sorte que la séquence d'alimentation correcte de la bobine puisse être mise en œuvre.
- L'inconvénient est qu'aucune force contre-électromotrice n'est générée quand le moteur est à l'arrêt ; le démarrage est donc affecté par un fonctionnement en boucle ouverte. Par conséquent, il faut parfois un peu de temps pour que le moteur se règle et fonctionne efficacement. Autre inconvénient, à basse vitesse, la force contre-électromotrice est faible et difficile à mesurer, ce qui peut se entraîner un fonctionnement inefficace. Il convient d'envisager l'utilisation de moteurs BLDC équipés de capteurs dans de telles applications.
- Cependant, pour une multitude d'autres applications, les ingénieurs peuvent tirer profit de moteurs BLDC sans capteurs compacts et puissants. L'utilisation de microcontrôleurs et de circuits d'amorçage des IGBT ou MOSFET conçus spécialement pour cette tâche peut faciliter le processus de conception. Le développement peut être davantage rationalisé en tirant parti des kits d'évaluation à base des circuits de référence pour les solutions de moteur BLDC sans capteurs éprouvées.
- En premier cas, le moteur est doté par des capteurs à effet hall pour détecter la position de rotor. Le contrôle du moteur se fait à l'aide d'un onduleur composé de six diodes de roue libre et six transistors de type IGBT ou MOSFET.
- Les trois capteurs de position fournissent des grandeurs qui permettent de connaître la position du rotor. La connaissance de la position du rotor permet de commander la commutation des interrupteurs du système électronique. Les six interrupteurs fonctionnent deux à deux. Les commutations des interrupteurs doivent se faire lorsque le rotor passe par une position bien déterminée par rapport au stator. Il ne faut pas que les commutations se fassent trop rapidement (ou trop lentement). La commutation deux à deux de ces interrupteurs permet d'alimenter deux bobines à la fois. La troisième bobine a un potentiel flottant. Le courant rentrera par une bobine et sortira par l'autre bobine. L'onduleur est dit

à six étapes de commutation (six step inverter).

Les résultats de simulations dans ce cas montrent le réglage de vitesse avec des régulateurs PI est réalisé avec une poursuite de consigne assurée rapidement et pas de fort dépassement.

- Plus que le surcoût et l'encombrement qui limitent l'emploi des BLDC à capteurs à effet Hall, on peut remarquer aussi l'importance de contrôle de vitesse, et de se remédier aux ondulations du couple remarquables sur les résultats obtenues.
- En second, nous avons réalisé des simulations sur le moteur BLDC sans capteurs contrôlé par la *fcém* (trapezoidal back EMF). Les figures (4.25) et (4.26) montrent les *fcém* trapézoïdales et les signaux de passage par par zéro qui serrent (comme de signaux de capteurs) à donner des informations sur la position du rotor au microcontrôleur, afin de déterminer l'instant des commutations des bobines, ces signaux peuvent être utilisés pour synchroniser le contrôleur ou l'onduleur. Les courants de commande du contrôleur ainsi que les signaux de commande des transistors (thyristors) fournis par le contrôleur sont représentés par les figures (4.28), (4.32). Les tensions et courants au niveau des bobines statoriques sont donnés par la figure (4.27).

Ondulations du couple [10]

Les ondulations de couple reflétées comme des oscillations périodiques en couple vont dégrader les performances d'asservissement des moteurs à aimants permanents. Par rapport à PMSM, les ondulations de couple dans le moteur BLDC sont beaucoup plus sérieuses. La pulsation entraînera non seulement une acoustique et des vibrations, mais limitera sévèrement les performances du système, en particulier dans les applications de haute précision et de haute stabilisation. La minimisation des ondulations de couple dans un système d'entraînement à moteur BLDC a été un problème important et difficile. D'une manière générale, la pulsation dans un moteur BLDC peut être divisée en deux catégories: couple de denture (saillance) et couple de commutation. Le couple de denture est produit par la réluctance variable dans l'entrefer causée par la denture du stator. La pulsation de la *fcém* « back EMF » provoquée par un couple de denture est une fonction périodique de la position du rotor, ce qui entraînera des ondulations de couple. C'est un grand défi de réduire le couple de denture pendant la conception de la machine.

Cependant, les chercheurs ont développé diverses méthodes basées sur la conception du moteur qui peuvent minimiser le couple de denture en modifiant la structure du moteur. Les méthodes existantes contiennent principalement des pôles ou dents inclinés, en

incorporant des cales dans les encoches magnétiques, en plaçant des encoches/dents auxiliaires, en concevant des dents fractionnaires par pôle, etc.

L'ondulation du couple de commutation dans un moteur BLDC, en raison de la variation de courant pendant l'intervalle de commutation, limite également son application dans un système d'asservissement à haut rendement. En plus elle est influencée par la fcm « 'back EMF », les modes de commutation et du contrôle PWM. En outre, plusieurs méthodes ont été développées pour réduction du couple-ondulation basées sur la commutation par répartition dans le temps, la technologie de contrôle de rejet de perturbation active... ect

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre on a décrit les principes et la méthodologie du développement de modèles de simulation du comportement dynamique et les techniques employées pour l'entraînement du moteur BLDC, en se basant sur les modèles mathématiques développés.

On a traité les deux méthodes les plus connues et employées en pratique pour le contrôle du moteur BLDC ; à savoir la technique employant des capteurs à effet Hall pour détecter la position du rotor par rapport au champ statorique, et la technique sans capteurs à fcm trapézoïdale (trapezoidal back emf), ou la méthode détection de passage par zéro a été employée afin de formuler les fcm trapézoïdale pour commuter les interrupteurs.

Les résultats obtenus montrent l'influence des deux techniques sur les grandeurs principales courant, vitesse, couple.fcm ... Ce qui nécessite des contrôleurs avec capacité de mémoire importante et oblige d'entraîner le BLDC sous charge sous l'emploi des contrôleurs de vitesse et de couple, ce dernier doit être commandé pour minimiser ses ondulations.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Les entraînements électriques réglés ne seraient pas ce qu'ils sont aujourd'hui si la technique n'avait pas fait les progrès que l'on sait. Sous la désignation 'technique', il faut comprendre plusieurs disciplines que, réunies, trouvent en les entraînements électriques réglés un champ d'application idéal.

Le développement des techniques relatives à l'électronique de puissance permet de disposer aujourd'hui d'alimentation adaptée à chaque type d'entraînement, les dites alimentations étant facilement commandables et présentant d'excellents rendements. Si l'on était jusqu'ici habitué à pouvoir traiter les signaux, on sait maintenant faire de même avec l'énergie électrique.

Le type d'entraînement électrique choisi évolue de manière quasi irréversible vers la technologie « Brushless », i.e. sans balais, provoquant la disparition progressive du moteur DC à collecteur. Ce moteur s'est imposé dans le domaine des industries en raison de sa supériorité et de son haut rendement.

Le moteur BLDC présente alors plusieurs avantages par rapport aux autres moteurs pour le système de propulsion électrique, tels que réduction au niveau de volume, haute performance (dû à l'absence des pertes au niveau du rotor), la fiabilité élevée à cause de l'élimination de certains problèmes au niveau de l'excitation.

Par notre étude, alors que ce type de moteur se trouve sous diverses configurations et technologies, on s'est intéressé aux différentes stratégies de contrôle les plus appliquées industriellement. on a décrit les principes et la méthodologie du développement de modèles de simulation du comportement dynamique et les techniques employées pour l'entraînement du moteur BLDC, on a tirés de bonnes compréhensions sur le fonctionnement particulier de ce type de moteur, et cela n'est possible que par l'intermédiaire convertisseurs électroniques et leurs commandes développés grâce aux contrôleurs. Puis on a réalisé des simulations sur le moteur BLDC avec les deux techniques de commandes avec fcém (sans capteurs) et avec

capteurs à effets Hall. Les résultats montrent de fortes ondulations de couple ce qui nécessite des régulations de vitesse et de contrôle de couple.

Sachant que le circuit d'alimentation du moteur BLDC est basé sur l'onduleur triphasé, les commutations des enroulements statoriques nécessaires sont pilotées par les signaux générés des capteurs à effet Hall ce que nous avons constaté des résultats obtenus des simulations réalisées soit en boucle ouverte ou avec une boucle de régulation de vitesse.

Pour tout travail de simulation et de contrôle un modèle mathématique est nécessaire, ce qui nous a emmené à établir une modélisation du moteur BLDC en ce basant sur les lois régissant son fonctionnement, en partant des équations électriques, puis des équations magnétiques, jusqu'aux équations mécaniques. Ensuite, nous avons utilisé la méthode d'espace d'état pour simplifier et résoudre facilement les équations. Le modèle d'état obtenu a été retenu dans la plupart des simulations qu'on a réalisées.

Si bien que nous avons mené plusieurs simulations avec l'outil Matlab/Simulink sur des cas différents afin d'évaluer les deux techniques.

Nous avons simulé les deux techniques de contrôle du moteur BLDC : - avec capteurs à effet hall, - et sans capteurs. En effectuant un réglage de vitesse pour les deux, on a évalué les performances du système.

L'emploi des capteurs pour des faibles puissances n'est pas suscité économiquement. Par revanche la technique sans capteurs est favorisée en éliminant toutes les erreurs établies par les capteurs, mais elle nécessite des algorithmes et des estimateurs compliqués pour la détection du passage par zéro de la f_{cem} .

On a constaté la présence des ondulations au niveau du signal du couple (ripple torque), ce qui nous emmène à conclure qu'un contrôle de couple est nécessaire.

Nous souhaitons à la fin de notre travail, que notre document soit utile pour de futurs travaux traitant des techniques avancées de contrôle de vitesse et de couple pour ce type de moteur.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [01] **Michel Etique**, « cours Entraînements réglés (MET2) », Ecole d'Ingénierie et de Gestion du canton de Vaud, yverdon-les-Bains, Mars 2006.
- [02] Essential Guide to Brushless DC Motor Controls *from Toshiba*
- [03] **S.Khalifaoui, L.Zidani**, «réalisation d'un banc d'essai moteur électrique type Brushless», Université d'aéronautique et des études spatiales – Blida. 2015.
- [04] **A.Ameur**, « commande sans capteur de vitesse par DTC d'une machine synchrone à aimants permanents dotée d'un observateur d'ordre complet à modes glissants ». Mémoire de Magister, Université de Batna, 25 Octobre 2005.
- [05] **R.Krishnan**, « Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives» Electrical and Computer Engineering Department Blacksburg, Virginia, U.S.A. CRC Press - Taylor & Francis Group 2010.
- [06] Sensorless Trapezoidal Control of BLDC Motors, « Texas Instruments » SPRABQ7A - july2013-Revised September 2015.
- [07] **R. Krishnan**, « Electric Motor Drives, Prentice Hall», Upper Saddle River, NJ, 2001.
- [08] **M.Vila**, «A quick overview on rotatory Brush and Brushless Dc motors», ingenia-cat S.L. - 2006.
- [09] **Barnéoud**, «Moteurs à courant alternatif », Bonchamp-Lès-Laval en France,N°238, Novembre 2005.
- [10] **A.Djallouli, N.Mebarki**, «Technique d'entraînement de réglage et de controle d'un moteur sans balais», Mémoire de master, Université Dr. Tahar Moulay - Saïda. 2017.
- [11] **K.Nouari, A.Alleg**, «Etude et simulation de la commande trapézoïdale d'un moteur BLDC», Mémoire de master, Université Dr. Tahar Moulay - Saïda. 2016.

- [12] **Jérôme Legranger**, «Contribution à l'étude des machines brushless à haut rendement dans les applications de moteurs-générateurs embarqués», thèse de Docteur, Université de Technologie de Compiègne préparée au Laboratoire d'Electromécanique de Compiègne avec la société VALEO VES dans le cadre de l'école Doctorale Technologies de l'Information et des Systèmes – 2009
- [13] **M.Markovic**, «Magnetic field anlysis in electrical motor using conformal mapping», Thèse EPFL- 2004.
- [14] **AMANI Ahmed**, «Le controle pid d'un moteur brushless», Mémoire de master, Université Badji Mokhtar - Annaba. 2019.
- [15] **Lahbib AMAANAN**, Note d'application, « Les différentes techniques de commande des moteurs brushless », école polytechnique clermont ferrand - 2014.
- [16] **David Toro**, «Introduction to Brushless DC Motors», AN1164 – Rev 1 Application Note, 2021.
- [17] Site internet : https://www.mathworks.com/campaigns/offers/brushless-dc-motors-introduction.html?s_eid=PSM_15028
- [18] **Nurliana Binti Abd Krim**, « Simulation of speed control brushless dc motor using gaussian fuzzy logic controller», Mémoire de master, Universiti Tun Hussein Onn - Malaysia. 2014.
- [19] **Bucak, I.Ö.** «Position Error Compensation Via a Variable Reluctance Sensor Applied to a Hybrid Vehicle Electric Machine.», Sensors 2010, 10, 1918-1934
- [20] **Khouildi Emna**, «Conception et développement d'une application de commande du moteur brushless», Diplôme National d'Ingénieur en Génie Électrique, Ecole nationale d'engineurs de Tunis El Manar – Tunis. 2012.
- [21] **KHELFAOUI SAIDA**, «Commande du moteur à aimants permanents avec alimentation non-sinusoïdale», Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université Larbi Ben M'hidi – Oum El Bouaghi. 2014.
- [22] **Sid ali SLIMANI**, «Modélisation et simulation d'un moteur BLDC», Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri - Tizi-Ouzou. 2021.

-
-
- [23] **Chang- liang Xia Tianjin University, P.R. China**, «Permanent magnet brushless DC motor drives and controls » .This edition first published 2012. Science Press. Published by John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd
- [24] **Pierre Mayé**, «moteurs électriques pour la robotique», édition Eyrolles, octobre 2013.
- [25] **Farah Salameh**, «identification et commande de moteur brushless pour mini drones», international master «electrical engineeruig systems», departement de formation génie électrique et automatique - Toulouse – France. 2013
- [26] **Cheok, A.D., Zhang, Z.F.** «Fuzzy logic rotor position estimation based switched reluctance motor dsp drive with accuracy enhancement», IEEE Trans. P. Electr. 20,908–921 – 2005
- [27] **Radimov, N., Ben-Hail, N., Rabinivici, R.** «Switched Reluctance Machines as Three-Phase AC Autonomous Generator», IEEE Tran. Mag. 42, 3760–3764 – 2006.
- [28] **A.Lee, et M. Ehsani**, “Advanced Simulation Model for Brushless DC Motor Drives”, Electric Power Components and Systems, vol. 31, no. 9, pp. 841-868, doi: 10.1080/15325000390227191
- [29] **P. Pillay, et R. Krishnan**, “Modeling of permanent magnet motor drives”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 35, no. 4, pp. 537-541, Nov. 1988. doi: 10.1109/41.9176.
- [30] **Xiaotian Li**, «Model-Based Design of Brushless Dc Motor Control and Motion Control Modelling for Robocup SSL Robots », 2015 Technology and Communication.
- [31] **Olivier Tremblay**, « Modelisation, simulation et commande de la machine synchrone à aimants à force contre-électromotrice trapezoïdale », Maîtrise En Génie Électrique, Montréal, 8 MAI 2006.
- [32] **Byoung.kuk Lee, Mehrdad. Ehsani**, «Advanced Simulation Model for Brushless DC Motor Drives », Electric Power Components and Systems, 31:841–868, 2003 Copyright c-Taylor & Francis Inc.
- [33] **Ramu, Krishnan**, « Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives» Electrical and Computer Engineering Department Virginia Tech Blacksburg, Virginia, U.S.A. CRC Press Taylor & Francis Group.

- [34] **Piotr Wach Politechnika Opolska** Institute of Electromechanical Systems and Applied Informatics Poland, « Dynamics and Control of Electrical Drives », Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011.
- [35] **C. Mohankrishna**, « Modelling and Simulation of BLDC Motor Using State Space Approach », International journal of innovative research in electrical, electronics, instrumentation and control engineering vol. 4, issue 5, may 2016.
- [36] **Salim Si Hali**, « Command d'un moteur BLDC sans capteur de position », Mémoire de master, Université Mouloud Maamri – Tizi-Ouzou 2017.
- [37] Site internet : <http://www.moteurindustrie.com/brushless/>, « Moteur brushless : la technique », Moteur industrie 33 rue paul Gauguin 31100 Toulouse.
- [38] **Stefán Baldursson**, « BLDC Motor Modeling and Control and Implementation », Master Thesis, May, 2005.
- [39] **Steven Keeping**, « Commande de moteurs BLDC sans capteurs via la force contre-électromotrice » notes d'application de kit d'évaluation des moteurs BLDC - Electronic Products 2013.

ANNEXES

1. Paramètres du moteur BLDC avec capteurs simulé en boucle ouverte :

$$R_s = 0.70 \text{ } (\Omega)$$

$$L_s = 2.72e^{-3} \text{ (H)}$$

$$M = 1.5e^{-3} \text{ (H)}$$

$$J = 2.e^{(-4)} \text{ (kg.m}^2\text{)}$$

$$F : \text{facteur de frottement visqueux} = 2e^{-3} \text{ (Nm/(rad/s))}$$

$$K_E : \text{Constante de la fcém} = 0.06627 \text{ (V/(rad/s))}$$

2 paires de pôles

$$T_s = 5e^{-5}$$

$$V_{dc} = 160V$$

2. Paramètres du moteur BLDC avec capteurs simulé en boucle fermée avec réglage de vitesse :

$$R_s = 0.70 \text{ } (\Omega)$$

$$L_s = 2.72e^{-3} \text{ (H)}$$

$$J = 2.e^{(-4)} \text{ kg.m}^2$$

$$F : \text{facteur de frottement visqueux} = 2e^{-3} \text{ (Nm/(rad/s))}$$

$$\text{Flux linkage } \phi = 0.105 \text{ wb}$$

$$\text{Back emf flat area degree} = 120^\circ$$

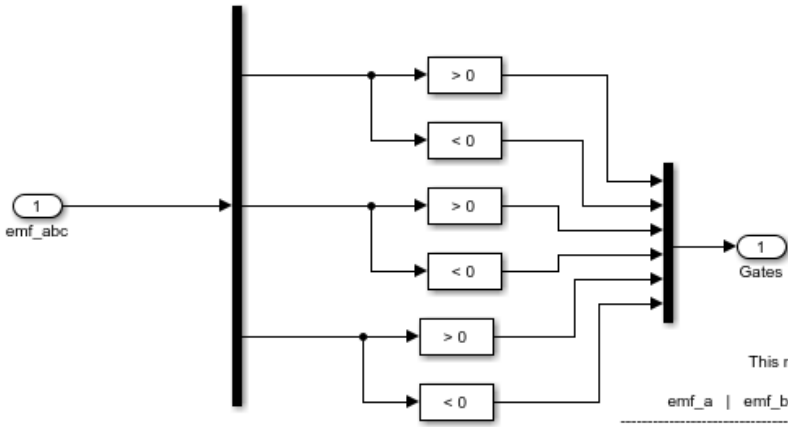
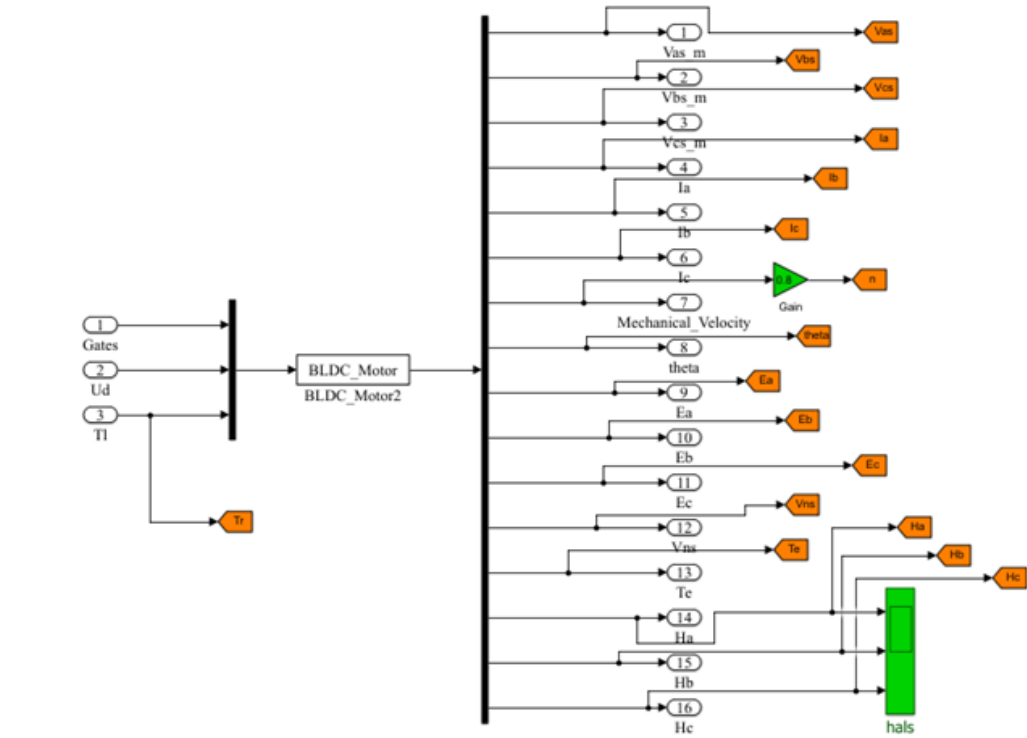
$$2P = 4$$

$$T_f : \text{Frottement statique} = 0.089 \text{ (N.m)}$$

$$PI : K_i = 20, K_p = 0.002$$

$$T_s = 50.e^{-7} \text{ s}$$

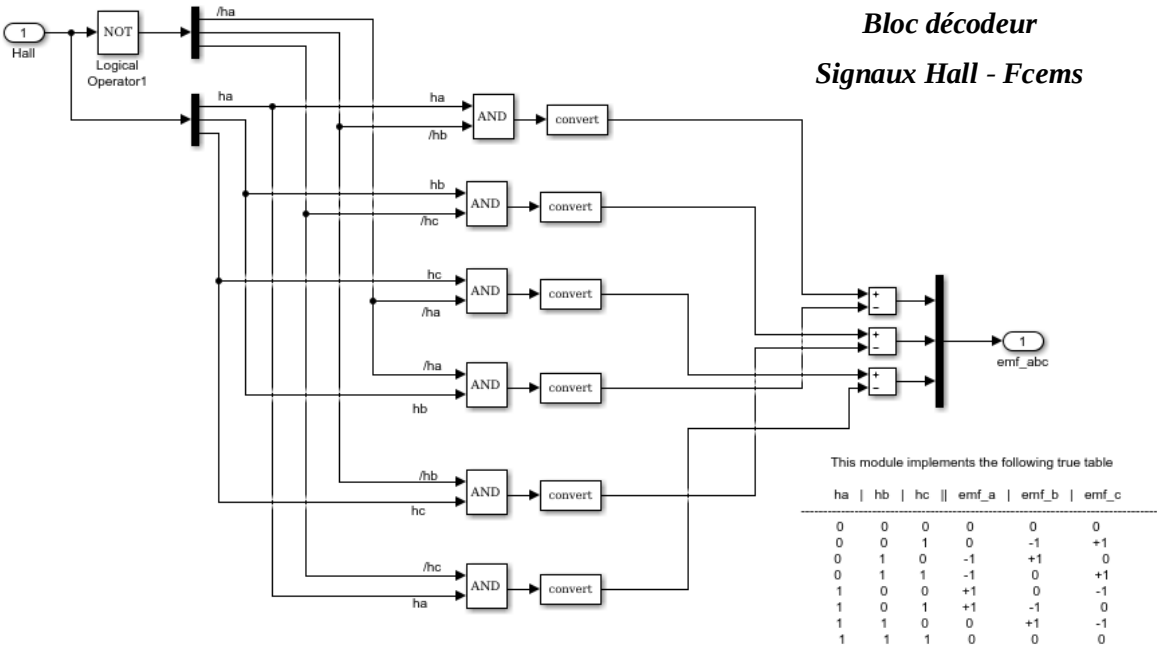
3. Schémas bloc de Simulink des sous systèmes du modèle simulé du moteur BLDC avec capteurs



Bloc Gates
Fcems - Signaux de commutation

This module implements the following true table

emf_a	emf_b	emf_c	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-1	+1	0	0	0	1	1	0
-1	+1	0	0	1	1	0	0	0
-1	0	+1	0	1	0	0	1	0
+1	0	-1	1	0	0	0	0	1
+1	-1	0	1	0	0	1	0	0
0	+1	-1	0	0	1	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0



4. Paramètres du modèle du moteur BLDC sans capteurs:

$$R_s = 0.70 (\Omega)$$

$$L_s = 2.72e^{-3} (H)$$

$$M = 1.5e^{-3} (H)$$

$$J = 2.e^{(-4)} (kg.m^2)$$

$$F = 2e-3 (Nm/(rad/s))$$

$$2P=4$$

$$T_f : \text{Frottement statique} = 0.089 (N.m)$$

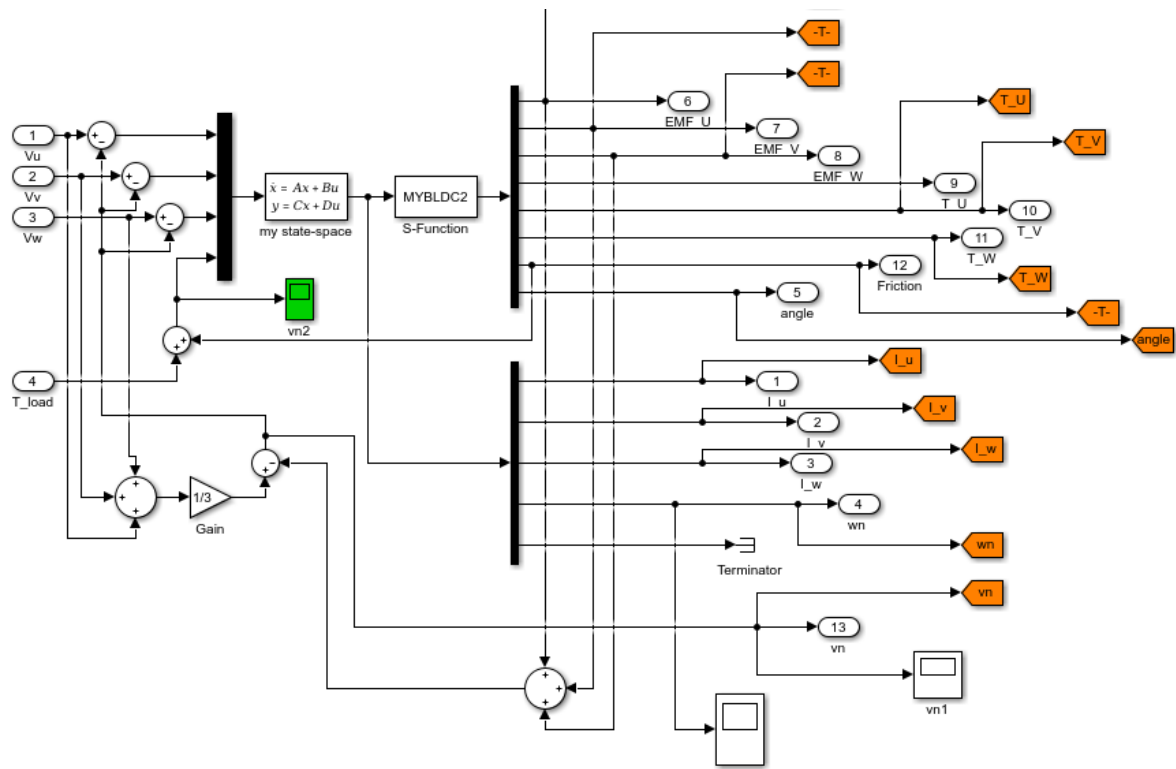
$$K_E : \text{Constante de la fém} = 0.06627 (V/(rad/s))$$

$$\text{Valeur initiale de } \theta = 0^\circ$$

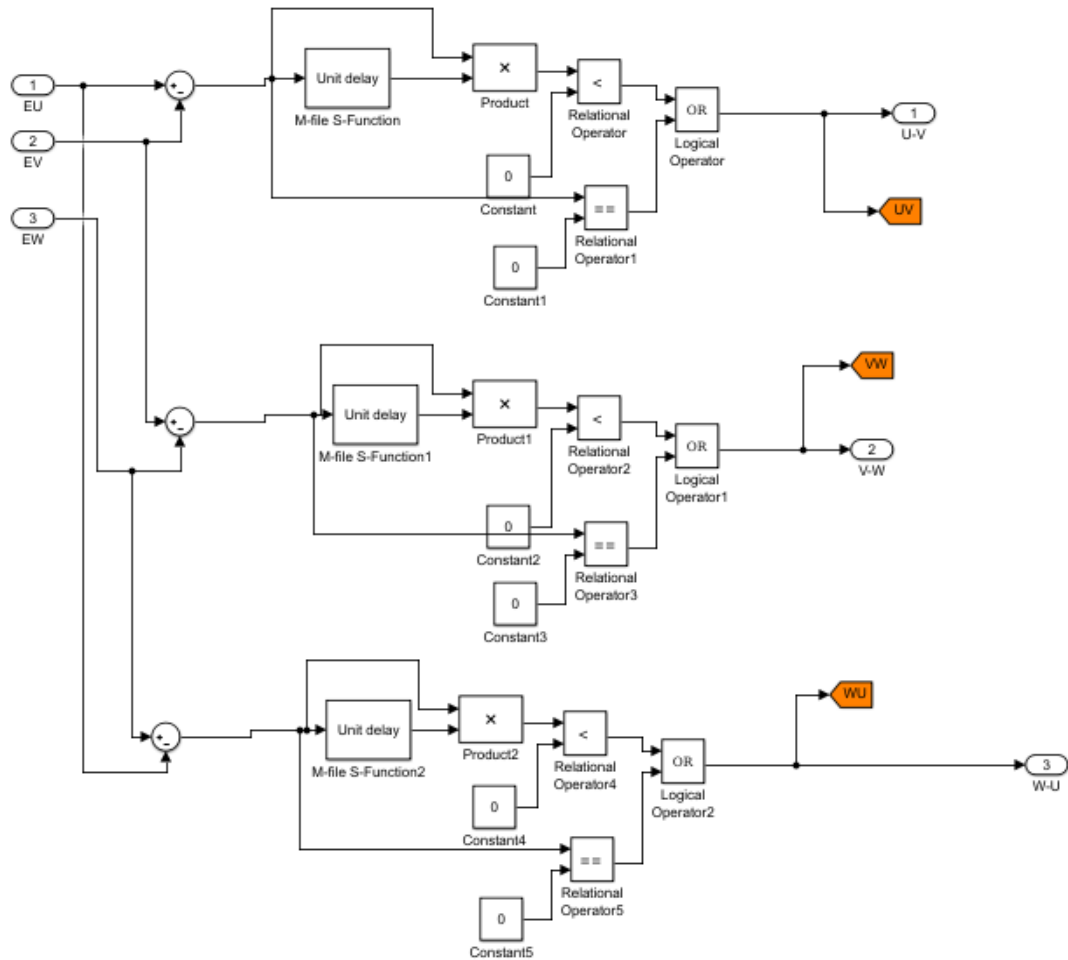
$$V_{dc} = 160 (V)$$

$$T_s = 4e^{(-6)} (s)$$

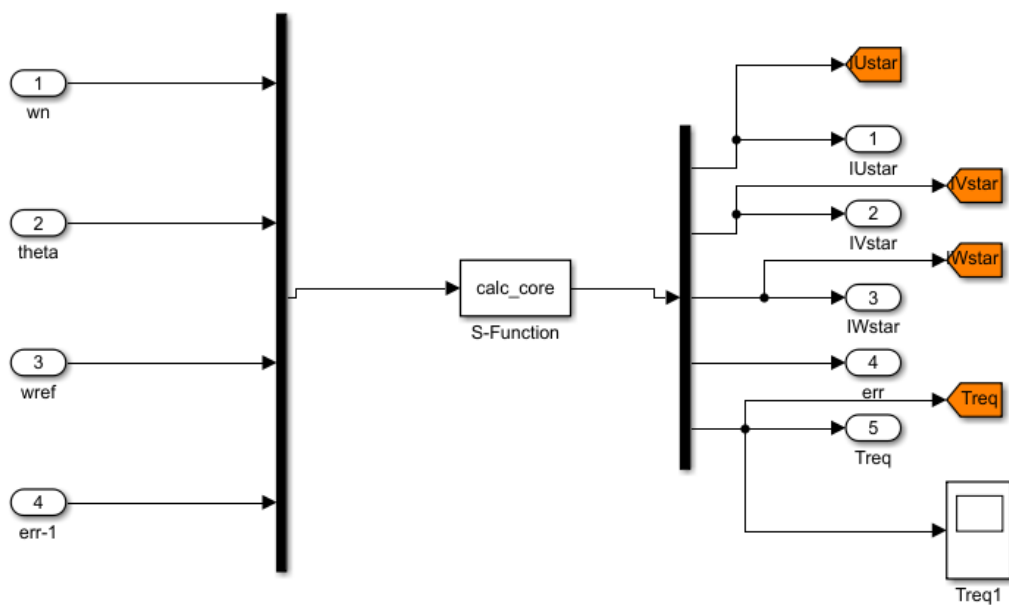
Sous système - Bloc du moteur BLDC sans capteurs



Sous système - Bloc détection de passage par zéro du moteur BLDC sans capteurs



Sous système - Bloc Estimateur du moteur BLDC sans capteurs



الملخص

يعتبر محرك التيار الثابت من أقدم المحركات وأكثرها استخداما في عالم الصناعة وذلك بسبب تكلفته القليلة وأداءه المستديم والتحكم السهل في سرعة المحرك، إلا أنه يعيبه وجود الفرش التي تحتاج إلى صيانة مستمرة أو إلى تبديل. لذلك خضع هذا المحرك إلى عدة تحسينات إلى أن وصل إلى محرك تيار الثابت بدون فرش. يعتبر هذا المحرك مزيج بين محرك التيار الثابت والمحرك المتزامن. يتكون المحرك بدون فرش من مغناطيس على الجزء الدوار وملفات ثلاثية الأطوار في الجزء الثابت. يعمل هذا المحرك عن طريق تغذية ملفات الجزء الثابت بالتيار الكهربائي المتناوب عبر مموج مما ينتج حقل مغناطيسي والذي يمكن الجزء الدوار (ذي الأقطاب) من الدوران. تتركب هذه الملفات على الشكل المثلثي وعلى الشكل النجمي. ينقسم هذا المحرك إلى نوعين فيما يخص مبدأ التبديل، الأول هو محرك بدون فرش مع مستشعرات الموضع، تقوم هذه المستشعرات بقياس الاختلاف في المجال المغناطيسي. وتعرف باسم مستشعرات تأثير هال. أما النوع الثاني فهو محرك بدون فرش وبدون مستشعرات، يكمن مبدأ عمله في قياس القوة ضد الدافعة الكهربائية (شبه المنحرفة) لاستنتاج اللحظة المناسبة من أجل التبديل. بالانتقال إلى أطوار هذا المحرك فهناك محرك بدون فرش أحادي الطور و ثلاثي الأطوار. يستلزم هذا المحرك إنشاء نمذجة مفصلة له واستخلاص النموذج الرياضي المتكون من المعادلات الكهربائية، المغناطيسية والميكانيكية وذلك تمهيدا لإجراء المحاكاة في الأرضية الافتراضية في ماتلاب. وعلى هذا الأساس استخلصنا أن محرك التيار الثابت بدون فرش أفضل من محرك التيار الثابت بفرش في العديد من الميزات بما في ذلك الكفاءة. وأن المحرك بدون فرش بدون مستشعرات أجدر من محرك بدون فرش بالمستشعرات لأنه الأبسط والأكثر موثوقية.

Résumé :

La BLDC est l'une des machines spéciales utilisée dans les entraînements à vitesse variable.

La réalisation d'une commande en vitesse d'une BLDC nécessite le passage par plusieurs étapes, premièrement par la modélisation de cette dernière puis l'onduleur qui lui est associé, ainsi que le calcul de la boucle de régulation en linéarisation de l'équation du couple électromagnétique de la BLDC.

Pour cela on a construit un modèle sous l'espace Matlab-Simulink de notre système entier, après une étude théorique suivie d'une modélisation mathématique des différents éléments. Afin d'évaluer les deux modes et structures de contrôle du moteur BLDC, la réalisation des simulations pour des modèles établis donne des résultats remarquables sur les performances de chaque type soit avec capteurs soit sans capteurs, ce dernier est l'objet de plusieurs travaux et recherches.

Mots clés :

Brushless DC, BLDC, BLDCM, Moteur synchrone a F.c.e.m trapézoïdale, MCC sans balais, capteur a effet hall, ECM

Abstract :

This report provides global knowledge and model of Brushless DC Motor (BLDC) and Simulation. A brief description of a brushless DC motor is given. For this work, mathematical models were developed and subsequently used to obtain simulation models. The model was accomplished using MATLAB / SIMULINK. The operational parameters of the selected BLDC motor were modeled using tuning methods used to develop subsequent simulations. Sensored and sensorless BLDCM are compared simulated in this work.