

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE
N° :



FILIERE : ELECTROMECHANIQUE
OPTION : ELECTROMECHANIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER EN GENIE ELECTRIQUE

THEME

Commande DTC d'un moteur synchrone à
aimants permanents pour véhicules électriques

Proposé et dirigé par :

Dr.A. CHOUCHOU

Présenté par :SALEM Hadjer

LAKHNECHE Randa

Année universitaire : 2022/2023

Dédicaces

إذا كان أول الطريق الم فان أخره تحقيق حلم, و إذا كانت أول انطلاقة دمة فان نهايته بسة , وكل بداية نهاية
وهاهي السنوات قد مرت والحلم يتحقق فانه لك الحمد قبل أن ترضى ولك الحمد إذا رضيت ولك الحمد بعد الرضا
لأنك وفقتني لإتمام هذا العمل . واهدي هذا العمل إلى

إلى من كلة الله بهيبة والوقار إلى من علمني العطاء بدون انتظار.... إلى سندي و قوتي.... إلى من احملي
اسمه بافتخار.... إلى أبي, أبي شكرا ثم شكرا لك على تعبك و حيرتك ومجهودك وأدعو الله يحفظك يديك تاجا
فوق راسي

إلى من جعلت الجنة تحت أقدامهاأمي....قرة عيني واعز ما املك.....غاليتي....التي سهرت و كانت معي
في أسوء حالاتي وظروفي و ضغوطاتي ,يكفي أن تعرفي أن لكي ابنة تنتظر فرصة واحدة لتقدم لكي الروح و
القلب والعين هدية رخيصة لكي لما قدمتهوها اليوم صفقي ..فابنتك كبرت وأصبحت خريجةحماك الله
وأدامك لنا

إلى أختي و أخوي محمد ياسين الداعمين لي والذين يفرحهم تفوقي ونجاحي
والي كل من ساهم في تشجيعي ومساندتي من بعيد وقريب زملائي زميلاتي أعمامياخوالي وبأخص خالي خليل
إلي أساتذتي أهل الفضل علي والجامعة التي احتضنتني وكان لها الفضل بعد الله عز وجل لاستكمال مسيرتي
الجامعية إلى كل هؤلاء اهديهم هذا البحث المتواضع سائلة الله العلي القدير إن ينفعا به ويمدنا بتوفيقه.

SALEM HADJER

Dédicaces

(واخر دعواهم أن الحمد لله رب العالمين)

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات الحمد لله ما تم جهد ولا ختم سعي إلا بفضل الله وما تخطى العبد من العقبات وصعوبات إلا بتوفيقه ومعونته تم بحمد الله وفضله تخرجني

ها أنا اخطو خطوات تخرجني ودربي ساطع تشدو به الآمال في وجداني

بعد عناء طويل وبعد تعب وجهد وسنوات طويلة ها أنا أخرج كم من السرور في قلبي لهذا اليوم كم من مصاعب الحياة واجهت لأكمل دراستي أنى قطعت العهد أن أرقى السماء أزهو وروح الجد في شرياني اهدي تخرجني إلى

الى الرجل الأول في حياتي الى أغلى ما في الكون الى ذلك الرجل الذي يتوانى للحظة عن مساعدتنا والوقوف الى جانبنا في الأيام الشدائد نسير في دروب الحياة ويبقى من يُسيطر على أذهاننا في كل مسلك نسلكه تاج راسي لتفرح يا والدي فابنتك اليوم تخرجت وأصبحت مهندسة

الى جنتي على الأرض الى من كانت بجانبني دائما كانت داعمي الوحيد كانت من يشجعني في كل صباح الى قرة عيني الى حبيبتي الى أول اسم على فمي الى من أفضلها على نفسي ولم لا فلقد ضحت من أجلي امي حبيبتي وهاهي ابنتك ياامي تخطو في مسار التخرج شكرا لك ايتها الانسنة الجميلة شكرا لكي يا امي أكثر من يستحق هذه الفرحة هم أنتم والدي امي أبي

الى أخيا لاكبررهان في بلاد الغربية فكلي حب وحنين وانتظار فما أطيب اللقبة بعد الميعاد الى إخوتي أخواتي سندي في هذه الحياة وحماة ظهري الى أصدقائي صديقاتي لم اختاركم أنا فاختركم الله الى كل من جمعني بهم منبر العلم وكما اتفقنا لم يكن نجاحي بل نجاحنا جميعا

الى بلد المليون ونصف مليون شهيد بلدي الجزائر الى من تهفو لها القلوب والعقول تذهب لها الروح تقدي ولها الأشعار تنظم (فلسطين الأبية) والحمد لله على التمام والكمال

LAKHNECHE RANDA

Remerciements

Nous tenons à remercier tout premièrement Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé, le courage et la patience qu'il nous a donnés durant toutes ces longues années pour arriver au terme de ce travail.

J'exprime nos vifs remerciements à Mr. CHOUCHOU ABDELMADJID, Docteur à l'Université de M'sila, d'avoir encadré et dirigé ces travaux.

A travers ce mémoire, nous adressons nos reconnaissances aux enseignants : DJ.KHODJA ; T.BENSLIMANE ; H.ALLOUNI et qui ont contribué à la formation de notre connaissance depuis la première classe du primaire jusqu'à aujourd'hui. Que mes amis soient aussi sincèrement remerciés pour leurs encouragements afin de mener à terme les travaux de cette mémoire.

Sommaire

SOMMAIRE.....	I
LISTE DES FIGURES.....	V
LISTE DES TABLEAUX :.....	VIII
NOTATIONS ET SYMBOLES.....	IX
INTRODUCTION GENERALE	

Chapitre I : Etat de l'art sur le Véhicule électrique et son motorisation

I.1Introduction.....	04
I.2.Définition d'un véhicule électrique.....	04
I.3.Classification des véhicules électriques.....	05
I.3.1. Véhicules hybrides.....	05
I.3.1.1. Architecteur série.....	05
I.3.1. 2.Architecteur parallèle.....	06
I.3.2. Véhicules tout électrique.....	06
I.4. Schéma synoptique de la chaine de traction.....	06
I.4.1.la batterie	07
I.4.2.Convertisseur statique.....	08
I.5.Les moteurs électriques.....	08
I.5.1. Les moteurs à courant continu	09
I.5.2. les Moteurs asynchrones.....	09
I.5.3. Les moteurs synchrones.....	09
I.5.3.1. Les moteurs synchrones à réluctance variable	09
I.5.3.2. Le moteurs synchrones à aiment permanent	09
I.6. Description d'une MSAP.....	10
I.6.1. Stator.....	10
I.6.2. Rotor.....	11
I.6.3. Les organes mécaniques.....	12
I.6.3.1 L'arbre.....	12
I.6.3.2. Les roulements.....	12
I.7. Principe de fonctionnement de MSAP :	13
I.8. Les avantages et les inconvénients de la MSAP.....	14

I.8.1. Avantages de la MSAP.....	14
I.8.2. Inconvénients de la MSAP	14
I.9. Domaines d'application de la MSAP.....	14
I.10. Différents types des machines à aimants permanents.....	15
I.10.1 Moteur à rotor intérieur.....	15
I.10.2 Moteur à rotor extérieur.....	16
I.10.3 Moteur à entrefer axial.....	16
I.10.4 Conclusion	17
Chapitre 2 : Modélisation et simulation ensemble véhicule électrique –MSAP	
II.1 Introduction	18
II.2. Dynamique de véhicule.....	18
II.2.1. Force de roulement.....	19
II.2.2. Force aérodynamique.....	19
II.2.3 Force d'inclinaison.....	20
II.2.4. Force d'accélération.....	21
II.2.5. Environnement de véhicule.....	21
II.3. Modèle de la motorisation électrique.....	22
II.3. 1.Mise en équations de la MSAP.....	23
II.3.1.1. Equations électriques.....	23
II.3.1.2. Equations magnétiques.....	23
II.3.1.3. Equation mécanique	24
II.4. Principe de transformation de Park.....	24
II.4.1. Equations des tensions et des flux dans référentiel de PARK.....	25
II.4.2. Expression du couple électromagnétique	25
II.5. Modélisation de l'onduleur de tension	26
II.6. Commande par MLI.....	27
II.7. Équations d'état de la MSAP	28
II.7.1 - Résultats de simulation	29
- Test à vide	29
-Test en charge	30
II.7.2. Simulation de l'ensemble onduleur-MSAP	31
II.7.2.1-Résultats de simulation.....	32
II.8. Equation de véhicule.....	33
-Résultats de simulation.....	
II.9. Conclusion.....	34

Chapitre III : Commande direct du couple (DTC) du MSAP-Véhicule électrique

III.1 - Introduction	36
III.2 - Principe de la Commande DTC	36
III.3 - Principe du Contrôle du flux et du Couple.....	37
III.3.1 - Contrôle du flux statoriques	37
III.3.2 - Contrôle du couple Electromagnétique	39
III.4. Choix des Vecteurs de tension.....	39
III.5. Estimateurs	40
III.5.1. Estimation du flux statoriques	40
III.5.2. Estimation du couple électromagnétique	41
III.6. Elaboration du vecteur de commande.....	42
III.6.1. Correcteur de flux	42
III.6.2. Correcteur de couple	42
III.6.2.1. Le correcteur à deux niveaux.....	42
III.6.2.2. Le correcteur à trois niveaux.....	43
III.7. Elaboration de la table de commande	44
III.8. Structure Générale de la DTC Appliquée au MSAP.....	48
III.9. Résultats de la simulation et interprétations	49
-Test à vide	49
-Test variation du vitesse.....	50
-Test variation du couple	51
III.10.Simulation de la DTC avec véhicule électriques.....	53
-Test de $p=0\%$	53
-Test de $p=10\%$	55
-Test de $p=-10\%$	56
III.11. CONCLUSION	58

Liste des figures

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1 :

Etat de l'art sur le Véhicule électrique et son motorisation

Figure I-1 : Composants Principaux du VE	04
Figure I.2: Motorisation hybride série.....	05
Figure I.3: Motorisation hybride parallèle.....	06
Figure I.4 : Représentation de la machine synchrone à aimants permanents.....	07
Figure I.5 : Les deux types de bobinage statorique de la machine Synchrone.....	10
Figure I.6 : Rotor à aimants permanents.....	11
Figure I.7 : (a)roulements ;(b) arbre d'induit ; (c) roulement monté dans la machine.....	12
Figure I.8: Caractéristique du couple-angle électrique.....	13
Figure I.9: Moteur à rotor intérieur.....	13
Figure I.10: Moteur à rotor extérieur.....	15
Figure I.11: Moteur à entrefer axial.....	16
Figure I.12: Moteur à entrefer axial.....	16

Chapitre 2 :

Modélisation et simulation ensemble véhicule électrique- MSAP

Figure II.1: Dynamiques longitudinale d'un véhicule.....	18
Figure II.2 : La force de roulement sur la roue.....	19
FigureII.3 : Définition de la pente.....	21
FigureII.4 ; Entrées-sorties du modèle d'environnement du véhicule.....	21
Figure II.5 : Représentation schématique d'un onduleur de tension.....	23
Figure II.6 : Génération d'une MLI naturelle pour un signal de la porteuse de 1 kHz (a) et de 2kHz (b).....	26
Figure II .7 : Schéma bloc du modèle de la MSAP dans le repère d-q.....	28
Figure II.8 : Caractéristique dynamique de la MSAP à vide ($C_r = 0$).....	29
Figure II.9 : Caractéristiques dynamiques de la MSAP avec l'application d'un échelon de couple au régime permanent ($C_r=2N.m$).	30
Figure I.10 : Schéma bloc de l'ensemble onduleur-MSAP.....	31
Figure II.11 : Caractéristiques dynamiques de l'ensemble onduleur-MSAP avec l'application d'un échelon de couple au régime permanent ($C_r = 2 N.m$).	32
Figure II.12: schéma de modélisation de l'expression du couple C_r	33
Figure II.13. Caractéristiques dynamiques ensemble véhicule électrique –MSAP.....	34

Commande direct du couple (DTC) du MSAP associé e au véhicule

FigureIII-1 : Schéma structurel d'une commande DTC appliquée à la MSAP.....	37
FigureIII.2: Evolution de l'extrémité de ϕ s pour $R_s I$ négligeables.....	38
FigureIII.3 : Trajectoire du flux statorique.....	39
FigureIII. 4 : Choix la Vecteur de tension	40
FigureIII.5 : Comparateur à hystérésis à deux niveaux.	43
Figure III.6: Comparateur à hystérésis à trois niveaux utilisé pour le réglage du couple Électromagnétique.	43
Figure III.7 : Schéma de la structure générale du contrôle direct du couple de la MSAP.....	48
Figure III.8: Résultats de simulation de la DTC classique.....	49
Figure III.9: Résultat de simulation de la MSAP commandée par DTC (à vide $C_r=0$ N.m, $w=100$ rad/s).....	50
Figure III.10. Grandeurs électriques, mécaniques et magnétiques de la DTC en cas de variation de la vitesse de la MSAP.....	51
Figure III.11. Grandeurs électriques, mécaniques et magnétiques de la DTC en cas de variation de couple de la MSAP.....	52.
Figure III.12. Schéma bloc de l'ensemble DTC-véhicule électriques.....	53
Figure III.13. Grandeurs électriques, mécaniques et magnétiques de la DTC en cas de pente=0% de la véhicule électrique.....	54
Figure III.14. Grandeurs électriques, mécaniques et magnétiques de la DTC en cas de pente= 10%de la véhicule électrique.....	56
Figure III.15. Grandeurs électriques, mécaniques et magnétiques de la DTC en cas de pente= -10%de la véhicule électrique.....	57

Liste des tableaux

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre3 :Commande direct du couple (DTC) appliquée au MSAP

Tableau III-1 : Commutation.....	45
Table III.1 : Table de commande du flux.....	45
Table III.2: Table de commande du couple	45
Table III.3: Table de commutation avec séquences nulles.....	45
Table III.4 : Table de commutation avec séquences non nulles.....	48

Notations et symboles

NOTATIONS ET SYMBOLES

MSAP Machine Synchrone à Aimants Permanents.

MLI Modulation de Largeur d'impulsion.

DTC Commande directe du couple (Direct Torque Control).

$[P(\theta)]$ Matrice de Park

$[P(\theta)]^{-1}$ Matrice de Park inverse.

T_e [s] Constante du temps électrique.

Repère : a, b, c Axes liés aux enroulements triphasés.

d, q Axes de référentiel de Park.

α, β Axes de référentiel statoriques.

O Axe homopolaire.

V_e Véhicule électrique.

Paramètres Du véhicule

M Masse du véhicule

C_{RRmoy} Coefficient de résistance au roulement

V_v Vitesse du vent

G Gravitation

A_L l'angle de la pente

P Densité volumique de l'air

R Rayon des pneumatiques

S_f Section frontal du véhicule

Paramètres de modélisation de la machine :

$[R_s]$ [Ω] Matrice de la résistance statoriques.

r_s [Ω] Résistance statoriques

$[L_s]$ [H] Matrice d'inductance statoriques.

l_s [H] Inductance statoriques.

L_d [H] Inductance cyclique directe.

Notations et symboles

L_q [H] Inductance cyclique quadrature.

L_{sc} [H] Matrice d'inductance cyclique d'un enroulement statoriques.

L_{sc} [H] L'inductance cyclique d'un enroulement statoriques.

p Nombre de pair de pôles.

J [Kg.m²] Moment d'inertie du moteur.

f_c [N.m.s/rad] Coefficient de frottement visqueux

Grandeurs électriques :

$[V_s] = [V_{as} \ V_{bs} \ V_{cs}]^T$ [V] Les tensions des phases statoriques.

$[I_s] = [I_{as} \ I_{bs} \ I_{cs}]^T$ [A] Les courants des phases statoriques.

I_d, I_q [A] Courants statoriques d'axe direct et d'axe quadrature.

V_d, V_q [V] Tension statoriques d'axe direct.

E [V] Tension continue à l'entrée de l'onduleur.

U_c [V] Tension à la sortie du redresseur.

φ [rad] Déphasage du courant par rapport à la tension.

Grandeurs magnétiques :

$\phi = [\phi_{as} \ \phi_{bs} \ \phi_{cs}]^T$ Vecteur flux statoriques.

ϕ_f [Wb] Flux des aimants.

ϕ_d [Wb] Flux statoriques instantané dans l'axe d.

ϕ_q [Wb] Flux statoriques instantané dans l'axe q.

ϕ_α [Wb] Flux statoriques instantané dans l'axe α

ϕ_β [Wb] Flux statoriques instantané dans l'axe β .

Grandeurs mécaniques :

ω_r [rad/s] Vitesse angulaire du rotor.

ω_{ref} [rad/s] Vitesse angulaire du rotor e référence.

Ω [rad/s] Vitesse mécanique de rotation.

θ [rad] Position absolue du rotor en degré électrique.

Notations et symboles

C_{em}, C_e [N.m] Couple électromagnétique.

C_r [N.m] Couple résistant.

C_f [N.m] Couple de frottement.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dans le contexte actuel de la transition énergétique et de la demande croissante de solutions

de transport plus propres et plus efficaces, les véhicules électriques gagnent en popularité en tant qu'alternative aux véhicules à combustion interne. Les avantages des véhicules électriques résident notamment dans leur faible impact environnemental, leur efficacité énergétique et leur potentiel pour réduire les émissions de gaz à effet de serre.

La motorisation électrique des véhicules repose largement sur les machines synchrones à aimants permanents en raison de leurs performances élevées et se distingue également par sa réponse dynamique rapide et sa capacité à fonctionner à des vitesses élevées. Cela en fait un choix idéal pour les applications nécessitant un contrôle précis du couple et de la vitesse, comme les véhicules électriques qui exigent une accélération rapide et une bonne régulation du couple à basse vitesse., de leur compacité et de leur efficacité supérieure. Ces machines utilisent des aimants permanents pour générer un champ magnétique qui interagit avec le champ magnétique tournant créé par le courant alternatif dans les enroulements statoriques, générant ainsi un couple de rotation.

Pour optimiser les performances des véhicules électriques, il est essentiel de développer des techniques de modélisation et de commande avancées pour les machines synchrones à aimants permanents. La modélisation précise de ces machines permet de prédire leur comportement électromagnétique, tandis que la commande efficace permet de réguler le couple, la vitesse, garantissant ainsi une performance optimale du système

La commande Direct Torque Control (DTC) est une technique de commande avancée largement utilisée dans les systèmes d'entraînement électrique, en particulier dans les applications de machines à induction et de machines synchrones à aimants permanents. Elle offre une méthode efficace pour réguler avec précision le couple et la vitesse de rotation du moteur, ce qui est essentiel pour assurer des performances optimales dans diverses applications industrielles.

La principale caractéristique de la commande DTC réside dans sa capacité à réguler directement le couple et la vitesse du moteur sans nécessiter de conversion préalable en variables intermédiaires telles

Introduction Générale

que le flux magnétique ou la tension statoriques. Cela permet une réponse dynamique rapide et une meilleure précision de commande, ce qui est particulièrement important dans les applications nécessitant des changements de couple rapides et des transitions de charge fréquentes.

De plus, la commande DTC présente des caractéristiques intrinsèques de faible harmonique et de faible bruit, ce qui contribue à réduire les perturbations électromagnétiques et acoustiques indésirables. Cette caractéristique est particulièrement avantageuse dans les applications sensibles au bruit et aux vibrations, telles que les véhicules électriques et les systèmes de positionnement.[12] [36]

Le contenu de cette thèse sera présenté en trois chapitres chronologiquement le suivant :

Dans la première partie du premier chapitre, nous présentons quelques généralités sur le véhicule électrique (VE) et ses types (Véhicules hybrides, véhicule tout électrique) et identifions les principaux composants de la chaîne de traction (batterie, moteur, Convertisseur statique, etc.). Dans la deuxième partie est consacré à la présentation les différentes parties composant des machines synchrones à aimants permanents et les types.[37]

Dans le deuxième chapitre nous présentons la dynamique du véhicule et consacré au modèle de la motorisation électrique de l'association MSAP – Onduleur dans le référentiel de Park. De plus, on a présenté les résultats du simulation de MSAP sans et avec onduleur aussi simulation de la MSAP avec la dynamique du véhicule.[17]

Dans le troisième chapitre, est consacré les détails sur la commande directe du couple des machines synchrones à aimants permanents alimentée d'un onduleur de tension à deux niveaux.

Et commande DTC de MSAP avec la dynamique du véhicule en tenant compte l'influence du couple résistant sur la vitesse et le couple électromagnétique en fonction de la pente (p en %).[24][39]

En conclusion, nous formulons une perspective en se basant sur les résultats obtenus

CHAPITRE I :

**Etat de l'art sur le Véhicule électrique et son
motorisation**

Introduction

Le véhicule électrique, présent dès les débuts de l'industrie automobile, fait récemment son retour en tant que solution potentielle pour remplacer les véhicules conventionnels. Bien qu'il ne soit pas encore dominant sur le marché des véhicules particuliers, il représente indéniablement une alternative intéressante en termes de performance de la source d'énergie embarquée.

Les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) utilisées dans les véhicules électriques, qu'elles fonctionnent en tant que moteur ou générateur, sont de plus en plus attractives car elles répondent aux exigences des nouvelles technologies. [1]

I.1 Définition d'un véhicule électrique

Un véhicule électrique (VE) est une voiture dont la propulsion est entièrement alimentée par un ou plusieurs moteurs électriques, contrairement aux voitures à carburant qui nécessitent un moteur à combustion interne. La force motrice est transmise aux roues par le ou les moteurs électriques en fonction de la solution de transmission adoptée. Les avancées scientifiques et technologiques dans le domaine de l'électronique de puissance et des systèmes de gestion de l'énergie ont ouvert la voie à de nouvelles idées et conceptions pour développer cette technologie de propulsion. Le système de propulsion électrique est caractérisé par une architecture simple qui comprend un actionneur électrique et un dispositif de transmission, et des roues (Figure I. 1). [24] [25]

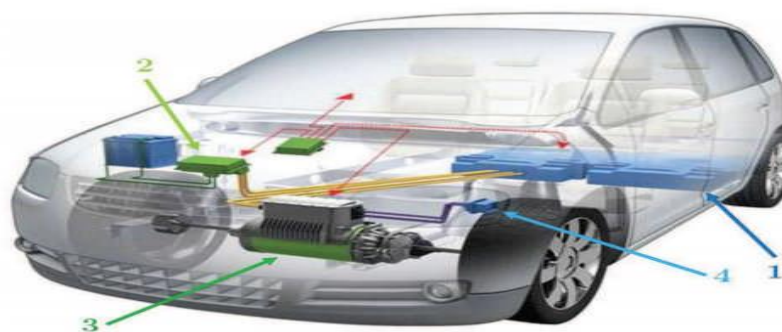


Figure I-1: Composants Principaux du VE[23] :

- | | |
|--------------|-----------------------|
| 1) Batterie, | 2) Onduleur/Chargeur, |
| 3) Moteur | 4) Prise de charge |

I.2 Classification des véhicules électriques

Les véhicules électriques font partie de la famille des véhicules électrifiés, qui comprend également les véhicules hybrides et hybrides rechargeables. Chacune de ces familles peut comporter plusieurs sous-catégories.

I.2.1 Véhicules hybrides

Lorsqu'un véhicule à moteur électrique est équipé de plusieurs sources d'énergie supplémentaires, on parle de véhicule hybride. L'hybridation peut être réalisée en associant un moteur à combustion interne avec une machine électrique et un système de stockage. Cette combinaison permet de réduire la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre. Deux types de véhicules hybrides sont couramment distingués : l'hybride série et l'hybride parallèle. [9][12]

I.2.1.1 Architecture série :

Le concept d'architecture série pour les véhicules hybrides, illustré dans la figure I.2, implique l'utilisation d'un générateur d'électricité embarqué et d'une batterie pour alimenter le moteur électrique. Le générateur est composé d'un moteur thermique et d'un alternateur, et c'est lui qui fournit l'énergie au moteur électrique lorsqu'il est en fonctionnement sur la route. La batterie peut fournir une puissance supplémentaire si nécessaire. Pour assurer une gestion efficace des flux d'énergie, le régime du moteur thermique est maintenu dans la zone de son plan couple-vitesse, évitant ainsi des changements brusques de régime qui pourraient impacter son rendement maximal. Cela permet une consommation optimale du moteur thermique, réduisant ainsi les émissions polluantes. [9]

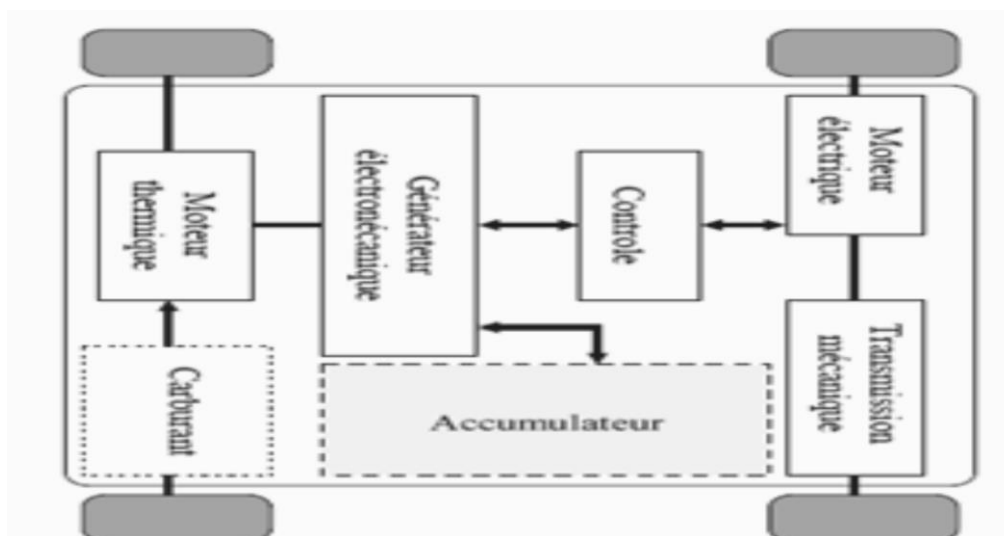


Figure I.2: Motorisation hybride série [10]

I.2.1.2 Architecture parallèle

L'architecture parallèle pour les véhicules hybrides, présentée dans la figure I.3, permet une propulsion électrique, thermique, ou les deux simultanément. La puissance est entièrement transmise aux roues via une transmission mécanique. Le moteur thermique utilise un carburant conventionnel, généralement de l'essence, car les moteurs à essence sont moins chers que les moteurs Diesel. Le moteur électrique est alimenté exclusivement par la batterie. La charge de la batterie peut être assurée de trois manières : le moteur thermique entraîne un alternateur pour recharger les batteries en mode thermique uniquement, la récupération de l'énergie cinétique lors du freinage, ou la recharge en branchant le véhicule sur le réseau électrique. [10]

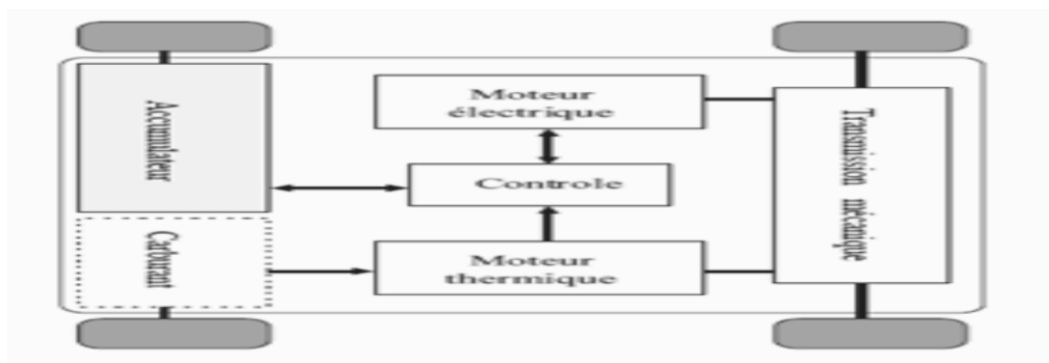


Figure I.3.: Motorisation hybride parallèle [10]

I.2.2 Un véhicule tout électrique :

Est une automobile propulsée par un moteur électrique alimenté par une batterie d'accumulateurs, qui sert de réserve d'énergie. Cette batterie peut être rechargée en utilisant un chargeur et un câble à partir d'une source d'alimentation externe. Pendant les phases de freinage, l'énergie peut également être récupérée en faisant passer le moteur en mode générateur. [23]

I.3 Schéma synoptique de la chaîne de traction :

Les conceptions actuelles des véhicules électriques sont fortement inspirées des structures des véhicules thermiques. Le moteur à combustion interne qui utilise un carburant stocké dans un réservoir (comme l'essence, le diesel ou le GNV) est remplacé par un moteur électrique qui est alimenté par l'énergie électrique stockée dans des batteries d'accumulateurs électrochimiques. Une chaîne de motorisation pour un véhicule électrique tout électrique se compose généralement d'un moteur électrique, d'un système électronique pour l'alimentation et la commande, et d'un système de liaison mécanique comprenant un réducteur, un différentiel et les roues. . (Figure I.4)[23]

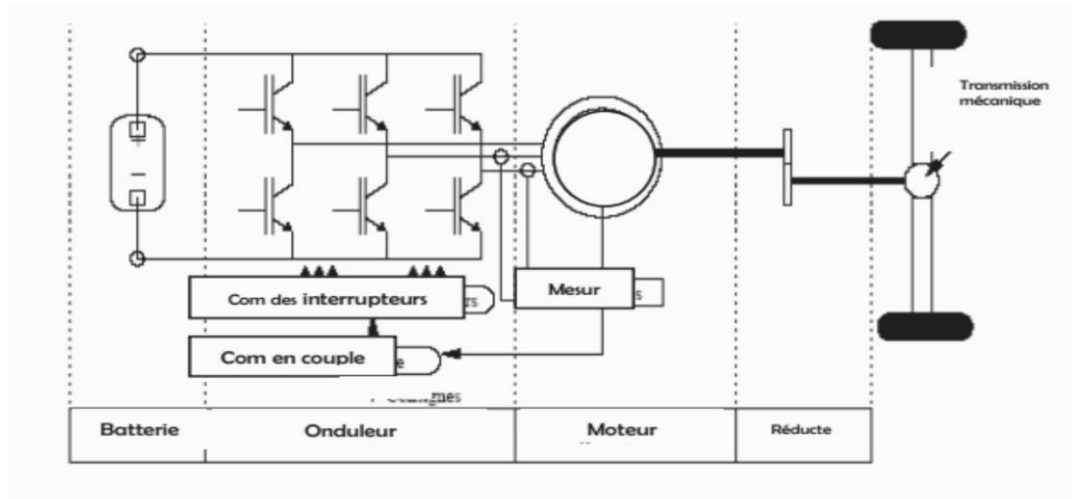


Figure I.4 structure de la chaîne de traction [23]

I.3.1 La batterie :

La batterie est essentielle dans le stockage de l'énergie électrique pour alimenter le moteur. Elle est reliée au moteur via un régulateur et un convertisseur, et elle est chargée périodiquement à partir d'une source extérieure pendant les périodes de repos. Pour un véhicule électrique, le choix de la batterie doit répondre à plusieurs critères importants tels qu'une bonne puissance massique pour de bonnes accélérations, une tension stable, une autonomie satisfaisante avec une bonne énergie massique (Wh/kg), une durée de vie élevée mesurée en nombre de cycles de charge et de décharge, et une faible maintenance et recyclage possible. Différents types d'accumulateurs existent, notamment :[39]

- **l'accumulateur au plomb** : La batterie au plomb est un des types de batterie les plus anciens et les plus couramment utilisés. Chaque élément de cette batterie fournit une tension de 2V. Bien qu'elle soit la moins coûteuse à produire et qu'elle ait une durée de vie satisfaisante, sa densité d'énergie massique est assez faible, atteignant seulement environ 40Wh/kg. Malgré ces inconvénients, cette batterie a été choisie par General Motors pour alimenter l'EV1, qui avait une puissance élevée mais une autonomie relativement faible. [12]

- **l'accumulateur au nickel-cadmium** : La batterie nickel-cadmium (Ni-Cd) est largement utilisée et considérée comme la plus performante avec une meilleure énergie massique que l'accumulateur au plomb. Chaque élément a une tension de 1,2V. Cependant, elle a des inconvénients tels qu'une mauvaise tenue à des températures supérieures à 40°C, un coût élevé par kilowattheure et une toxicité de la matière utilisée (cadmium) dans sa conception. Depuis 1995, les constructeurs automobiles français ont choisi cette batterie pour équiper leurs véhicules.

- **Les batteries lithium-ion** : Le véhicule électrique pur reste le choix le plus prometteur pour augmenter l'autonomie des véhicules électriques grâce à sa capacité énergétique élevée en termes de masse et de volume.

Cependant, la pile doit être associée à un système de sécurité sophistiqué pour éviter tout dépôt de lithium métal pendant la recharge. Un autre paramètre critique de ces batteries est le compromis entre le coût et la durée de vie, car pour obtenir des durées de vie raisonnables pour une utilisation en véhicule électrique pur, des additifs doivent être ajoutés à l'électrode positive, augmentant le coût de la batterie.

Si le lithium venait à manquer, d'autres alternatives seraient envisageables, telles que des batteries au magnésium, un minéral plus abondant, bien qu'elles présentent actuellement des performances limitées pour les voitures électriques. Des équipes de chercheurs travaillent également à l'utilisation d'enzymes de biomasse pour produire des molécules chargées électrochimiquement.

La chaîne de traction du véhicule fonctionne généralement avec des tensions supérieures à 12V, 3,2V ou 1,2V, ce qui nécessite une mise en série de batteries élémentaires pour atteindre les niveaux requis. L'autonomie du véhicule est directement liée à l'énergie stockée dans le pack de batteries, et en fonction de la capacité nominale de la batterie élémentaire, une association parallèle des batteries doit être effectuée pour former le pack du véhicule, qui est une combinaison de batteries élémentaires en série et en parallèle. [25]

I.3.2 Convertisseur statique :

Pour une alimentation par batterie dans cette plage de puissance, il est recommandé d'utiliser un onduleur de tension triphasé pour alimenter l'actionneur. L'onduleur permet de fournir un courant à fréquence variable à la machine pour réguler son couple et sa vitesse. La commande électronique de l'onduleur est générée à partir de la position du rotor et de la mesure des courants dans la machine. Pour notre application, un onduleur de tension contrôlé en courant par modulation de largeur d'impulsion (MLI) peut alimenter le moteur. Le contrôle des courants est réalisé au moyen de régulateurs qui assurent le suivi d'une référence à fréquence et amplitude variables.

I.4 Les moteurs électriques :

Les moteurs électriques actuellement en usage ont été conçus pour des applications industrielles standards telles que les machines-outils. Cependant, les perspectives d'amélioration en termes de poids, de taille et de performances des moteurs destinés aux voitures électriques sont considérables. Les technologies de machines électriques les plus couramment utilisées dans l'industrie automobile sont les moteurs asynchrones, les moteurs synchrones à aimants permanents et les moteurs synchrones à réluctance variable. Les moteurs à courant continu ne sont plus adaptés à cette application, grâce aux avancées technologiques en matière de commande des machines. [24]

I.4.1 Les moteurs à courant continu :

Si la source d'énergie provient d'une batterie à courant continu, l'utilisation d'un moteur à courant continu semble logique. Les moteurs à courant continu ont été couramment utilisés dans les véhicules électriques en raison de leur facilité de contrôle de la vitesse et de leur courbe de couple avantageuse à basse vitesse. Cependant, ces moteurs ont des coûts de fabrication élevés et nécessitent un entretien régulier du système balais-collecteur. De plus, ils ont une vitesse limitée et leur puissance massique est généralement inférieure à 0,3 à 0,5 kW/kg, tandis que les moteurs à essence ont une puissance massique de l'ordre de 0,75 à 1,1 kW/kg. [11]

I.4.2 Les moteurs asynchrones :

Le moteur asynchrone est similaire à un transformateur avec un enroulement secondaire en rotation. Les courants du stator génèrent un champ magnétique rotatif, qui induit des courants dans le rotor pour créer à son tour un champ magnétique rotatif, tournant à la même fréquence que celui du stator. C'est l'interaction entre ces deux champs qui engendre le couple de rotation. Toutefois, il est nécessaire d'injecter de la puissance réactive pour magnétiser le fer, ce qui se traduit par un mauvais facteur de puissance et des pertes joules relativement élevées au niveau du stator. En outre, des pertes joules au rotor sont inévitables pour générer du couple. En conséquence, un moteur asynchrone est plus massif et encombrant qu'un moteur synchrone.

I.4.3 Les moteurs synchrones :

Le moteur synchrone est considéré comme ayant le meilleur rendement en mode générateur et moteur. Il est constitué d'un stator et d'un rotor séparés par un entrefer, tout comme le moteur asynchrone. La différence réside dans la conception du rotor. Il existe plusieurs configurations de moteurs synchrones, mais les deux types les plus couramment cités dans la littérature sont [34] :

I.4.3.1 Les moteurs synchrones à aimants permanents :

Le moteur synchrone est le plus couramment utilisé pour propulser les véhicules électriques en raison de ses performances supérieures en termes de rendement, de couple et de puissance massique. En outre, il nécessite peu d'entretien et est relativement simple à contrôler. Toutefois, le coût de production est élevé, étant donné que la qualité des aimants est un facteur crucial dans sa conception.

I.4.3.2 I.5.3.b. Les moteurs synchrones à réluctance variable :

Les moteurs synchrones, en particulier ceux à aimants permanents, sont les plus couramment utilisés dans les voitures électriques en raison de leurs performances élevées en termes de rendement, de couple et de puissance massique. Ils nécessitent peu d'entretien et sont relativement faciles à contrôler. Cependant, leur coût de production est élevé en raison de la qualité des aimants nécessaires.

Le moteur synchrone à réluctance variable, bien qu'il soit solide et facile à contrôler, nécessite un rapport maximal d'inductance pour obtenir de bonnes performances, ce qui rend sa réalisation délicate et son coût élevé. Le choix du moteur dépend donc des notions de coût et de difficulté de commande. A ce jour, toutes les voitures commercialisées utilisent des moteurs synchrones à aimants permanents ou à rotor bobiné, à l'exception de la Tesla Roadster qui utilise un moteur asynchrone. Le moteur synchrone à aimants permanents offre une bonne autonomie, tandis que le moteur synchrone à rotor bobiné présente un bon rapport qualité/prix et le moteur asynchrone est simple et économique. [34]

I.5 Description d'une machine à aimant permanas (MSAP)

La MSAP est similaire à une machine asynchrone, avec un schéma composé de trois enroulements (a, b et c) au stator et des aimants permanents au rotor. Lorsque les enroulements statoriques sont alimentés, cela crée une force magnétomotrice d'excitation. La figure (I.5) illustre le schéma de la MSAP. [36]

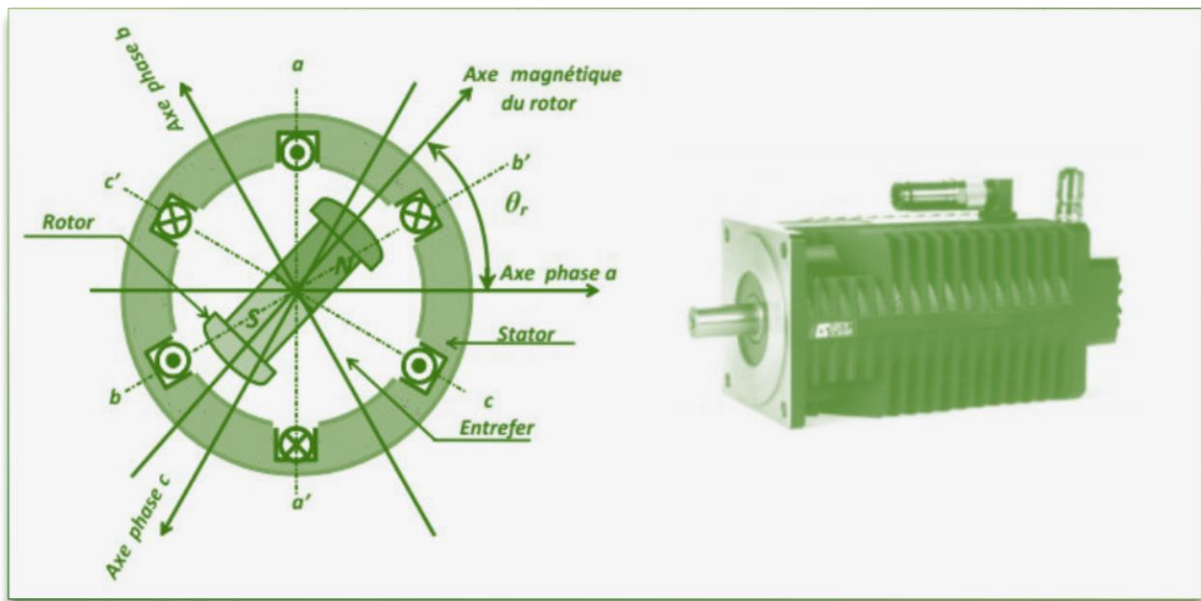


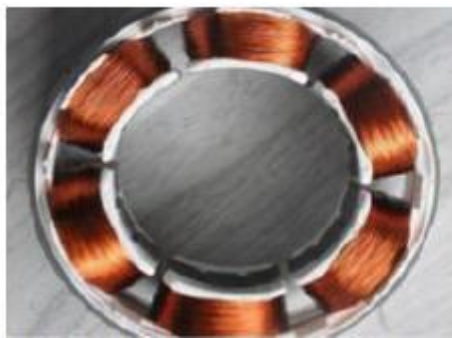
Figure I.5: Représentation de la machine synchrone à aimants permanents. [26]

I.5.1 Stator :

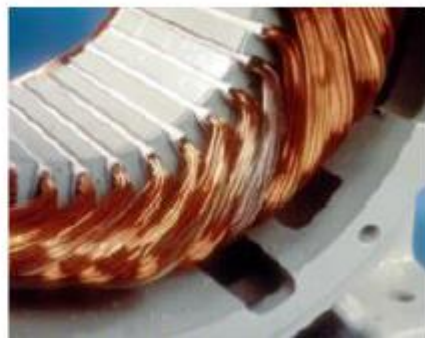
L'induit, qui est une partie fixe, contient les enroulements liés à la source et est similaire au stator des machines électriques triphasées. Il est composé de plusieurs bobines réparties dans les encoches statoriques et il existe deux catégories de bobinage couramment utilisées dans les MSAP : le bobinage distribué et le bobinage concentrique.

Le bobinage distribué, également appelé bobinage réparti, est le plus utilisé dans l'industrie car il permet une répartition quasi-sinusoïdale du champ magnétique dans l'entrefer, ce qui augmente sa capacité à récupérer le flux rotorique et réduit les pertes magnétiques. Il convient également aux applications à grande vitesse nécessitant un nombre réduit de paires de pôles. Cependant, son principal inconvénient est le volume important de cuivre perdu, notamment dans les têtes de bobines, lors de sa mise en place. [2]

Le bobinage concentrique est une technique de bobinage plus ancienne qui consiste à entourer chaque dent par un enroulement, puis à relier les enroulements de la même phase en série ou en parallèle. Cette structure de bobinage présente de nombreux avantages par rapport au bobinage distribué, notamment la réduction des têtes de bobines et donc du volume de cuivre utilisé, sa facilité de réalisation et son efficacité plus élevée pour le même couple moyen. Il convient particulièrement aux applications à grande puissance avec un nombre important de phases ou de pôles. [3]



Bobinage concentrique



bobinage distribué

Figure I.6.: Les deux types de bobinage statoriques de la machine Synchrone [1]

I.5.2 Rotor :

Les différents types de moteurs électriques, qu'ils soient asynchrones ou synchrones, ne diffèrent que par leur rotor. Le stator, quant à lui, reste essentiellement le même dans tous les cas. Le rotor, qui est la partie tournante qui permet de faire tourner la charge mécanique, est constitué d'aimants permanents. Le rotor de ces machines peut être à pôles lisses ou à pôles saillants.

Une machine à pôles lisses à un entrefer considéré comme constant, tandis qu'une machine à pôles saillants possède un entrefer variable. [4] Les machines synchrones à pôles lisses sont utilisées dans les applications nécessitant une vitesse de rotation élevée, tandis que les machines à pôles saillants sont utilisées pour des applications nécessitant une puissance plus importante à basse vitesse de rotation.



Figure I.7 : Rotor à aimants permanents [1]

I.5.3 Les organes mécaniques :

I.5.3.1 L'arbre :

L'arbre est un élément essentiel de transmission qui se compose d'une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et d'une extrémité d'arbre sur laquelle est fixé un demi-accouplement. Il est généralement fabriqué en acier moulé ou forgé et est soutenu par un ou plusieurs paliers. Les paliers sont responsables de soutenir le rotor et de garantir sa rotation libre. Le deuxième palier est conçu pour permettre les dilatations thermiques de l'arbre. [5].

I.5.3.2 Les roulements :

Les roulements ont pour fonction de maintenir l'axe de la machine (arbre) et garantir une rotation fluide du rotor. En général, ils sont constitués d'une bague interne, d'une bague externe, d'un organe de roulement (composé de billes maintenues dans une cage ou de rouleaux) ainsi que d'un système de lubrification [6]. Le choix du type de roulement dépend des caractéristiques et des types d'efforts exercés sur la machine. Les roulements à billes, à rouleaux cylindriques ou à aiguilles sont utilisés pour les vitesses élevées. Pour l'effort radial, les roulements à billes conviennent aux faibles ou moyennes charges, tandis que les roulements à rouleaux ou à aiguilles conviennent aux charges importantes. Pour l'effort axial, les roulements rigides à billes conviennent aux faibles charges, les roulements à billes à contact oblique conviennent aux charges moyennes et les roulements à rouleaux coniques conviennent aux charges importantes.

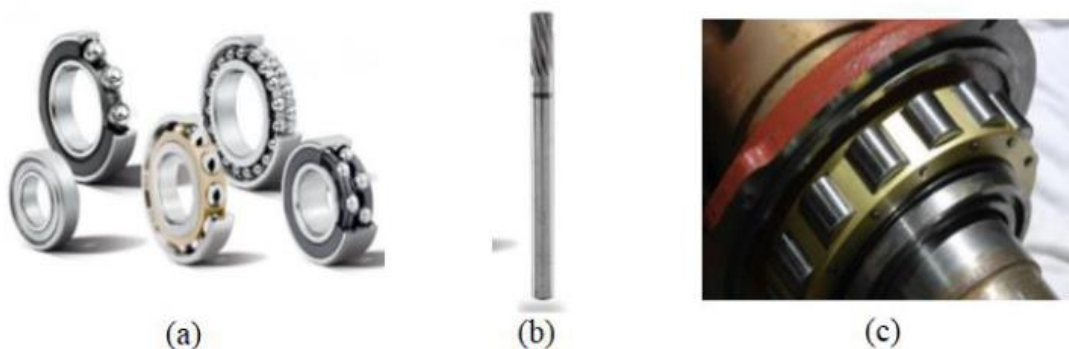


Figure I.8: (a) roulements ; (b) arbre d'induit ; (c) roulement monté dans la machine [1]

I.6 Principe de fonctionnement de la machine synchrone à aimants permanents :

La génératrice synchrone à aimants permanents permet de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique alternative. Cette machine triphasée fournit un système équilibré de tensions et de courants alternatifs. Les champs magnétiques statoriques et rotorique tournent en synchronisme à la même vitesse, ce qui crée un couple d'origine électromagnétique. Les aimants permanents liés au rotor (inducteur) assurent l'excitation de la génératrice synchrone à aimants permanents. Il existe deux structures de génératrices à aimants permanents : le rotor interne et le stator externe, ainsi que le stator interne et le rotor externe (voir Figure I.9). Toutefois, les alternateurs à aimants permanents avec stator externe sont plus performants en termes de puissance massique et volumique, ainsi que de couple massique et volumique, car le refroidissement des enroulements statoriques est plus facile lorsque le stator est en contact avec l'air ambiant. [8]

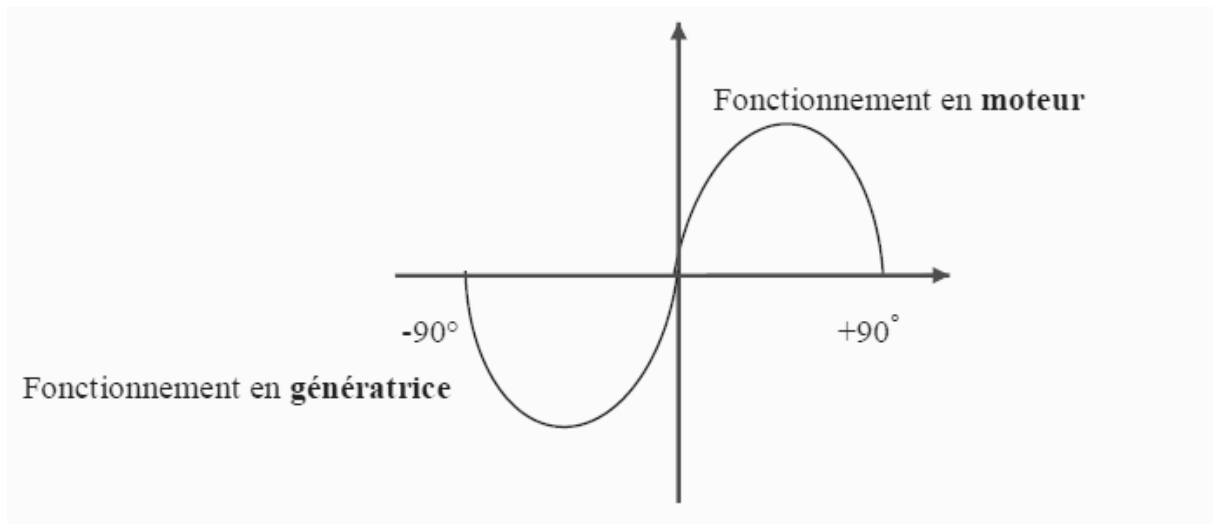


Figure I.9 : Caractéristique du couple-angle électrique. [26]

I.7 Les avantages et les inconvénients de la machine synchrone

I.7.1 Avantages de la MSAP :

L'utilisation d'aimants permanents à la place des bobinages d'excitation offre de nombreux avantages lors de la construction de machines synchrones à aimants permanents (MSAP) :

- Des puissances massiques élevées.
- Absence de contacts glissants.
- Un bon rendement.
- La suppression des pertes par effet joule du système inducteur est un avantage évident de l'utilisation des aimants.

- Pas besoin de balais ou d'alimentation continue.
- Une faible inertie et un couple massique élevé.
- Moins de pertes de cuivre.
- Une constante thermique et une fiabilité accrues grâce à l'absence de contact bagues-balais dans ces machines.
- Des performances dynamiques améliorées.
- Une construction et une maintenance plus simples. [28]

I.7.2 Inconvénients :

Le MSAP présente néanmoins certains inconvénients, tels que :

- Un coût élevé, principalement dû au prix élevé des aimants permanents.
- Le risque de démagnétisation irréversible des aimants en raison de la réaction d'induit.
- La sensibilité aux vibrations et aux chocs, pouvant affecter la structure de la machine.
- Nécessite une excitation, c'est-à-dire une deuxième source d'énergie.
- Si le couple résistant dépasse une certaine limite, le moteur peut décrocher et s'arrêter. [27]

I.8 Domaine d'application :

Le moteur synchrone trouve une grande utilité dans diverses applications telles que :

- Les appareils ménagers (par exemple, les machines à laver).
- Les automobiles.
- Les équipements de technologie de l'information (lecteurs de DVD).
- Les outils électriques, les jouets, les systèmes de vision et leurs équipements.
- Les équipements de soins médicaux et de santé (par exemple, les fraises dentaires).
- Les servomoteurs.
- Les applications robotiques.
- La production d'électricité.
- La propulsion des véhicules électriques et des sous-marins.
- Les machines-outils.
- Les applications de l'énergie éolienne. [31] [28]

I.9 Types de MSAP :

Il existe diverses configurations de moteurs synchrones à aimants permanents afin de répondre aux besoins spécifiques des utilisateurs. Par exemple, pour la conception d'un servomoteur, une faible inertie est essentielle pour permettre une accélération et une décélération rapides, ce qui rend préférable l'utilisation d'un moteur à rotor intérieur avec des aimants à haute énergie. D'autre part, pour

une application où la vitesse doit être maintenue constante, comme pour la motorisation d'un disque magnétique, un moteur à rotor extérieur est préférable en raison de son inertie. Il existe trois grandes familles de moteurs synchrones à aimants permanents : les moteurs à rotor intérieur, à rotor extérieur et à entrefer axial. [33]

I.9.1 Moteur à rotor intérieur :

Le moteur synchrone à aimants permanents à rotor intérieur possède une configuration traditionnelle. Son rotor est composé d'aimants assemblés sur une douille magnétique, tandis que son stator ressemble à celui des machines triphasées à induction. Un exemple de ce type de moteur est présenté sur la figure (I.10).

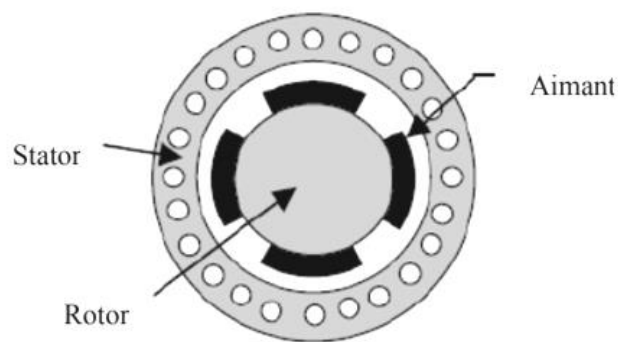


Figure I.10: Moteur à rotor intérieur [13]

Le principal avantage de cette configuration est le rapport couple/vitesse élevé qu'elle offre. Cependant, sa construction présente une difficulté majeure, car il est essentiel de pouvoir maintenir les aimants en place, même à des vitesses élevées. Dans la plupart des cas, ils sont collés et fixés en pression.

I.9.2 Moteur à rotor extérieur :

La section d'un moteur à rotor extérieur est présentée dans la figure. Les tôles utilisées pour le stator sont similaires à celles utilisées pour l'induit d'une machine à courant continu à balais. Ce type de stator est facile à bobiner car le fil est directement enroulé sur le stator section par section. Le rotor est constitué d'aimants montés dans une cloche magnétique assurant la continuité du champ. Dans cette configuration, il n'y a plus de problème pour maintenir les aimants car ils sont maintenus plaqués sur la cloche par la force centrifuge. Cette structure est couramment utilisée dans les applications de ventilation en raison de son coût modéré et de sa facilité de fabrication.

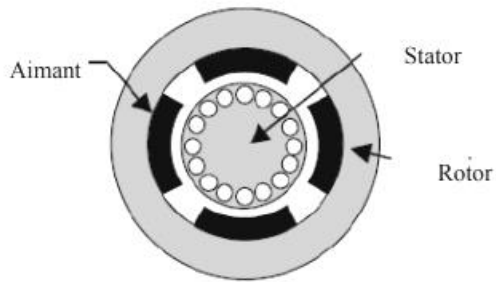


Figure I.11 : Moteur à rotor extérieur [13]

Cependant, les machines à rotor extérieur ne sont utilisées que pour des applications à vitesse constante.

I.9.3 Moteur à entrefer axial :

Les machines à entrefer axial sont devenues populaires dans certaines applications où l'encombrement est réduit, telles que les disques durs d'ordinateur, les tables tournantes et les ventilateurs. Dans ce type de moteur, les aimants sont montés sur un disque magnétique mobile, tandis que les bobines sont fixées sur le circuit imprimé avec les composants électroniques. Une plaque métallique sous le circuit permet au champ magnétique de se refermer. La figure (I.12) montre une coupe d'un moteur à entrefer axial.

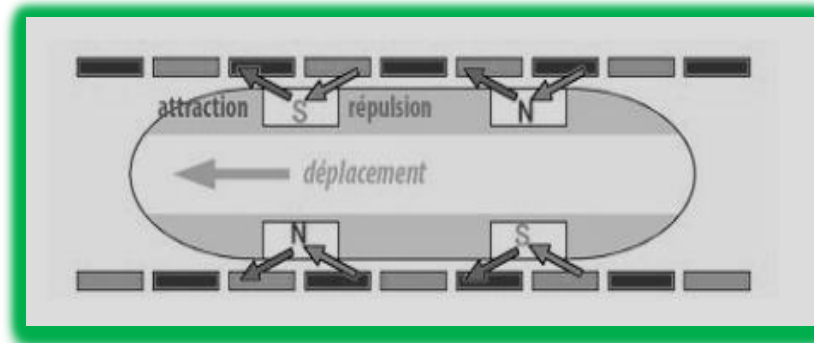


Figure I.12: Moteur à entrefer axial [13]

Ces machines ont en général un grand nombre de pôles et fonctionnent à basses vitesses (inférieure à 1000 tr/min) afin d'éviter un échauffement excessif dû aux courants de Foucault. Les avantages du moteur à entrefer axial sont : un faible coût, sa forme plate et l'absence de couple résistant à faible vitesse. [13]

I.10 Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à la présentation du véhicule électrique avec toutes ses classifications : véhicules hybrides avec ces deux types d'architecture (série, parallèle) et véhicules tout électrique. Dans un deuxième lieu, nous avons présenté les différentes parties qui composent la chaîne de traction (batterie, convertisseur statique ...). par la suite nous présentons les types de moteurs utilisés dans les véhicules électriques, nous avons décrit la machine synchrone à aimants permanents (rotor, stator et les organes mécaniques) et son fonctionnement (générateur, moteur), enfin nous avons présenté les différents types de moteur : Moteur à rotor intérieur, extérieur et entrefer axial.

CHAPITRE II :

Modélisation et simulation ensemble véhicule
électrique- MSAP

Introduction :

La conception et l'étude des véhicules automobiles sont complexes en raison de leur composition en plusieurs organes et de la difficulté à modéliser et optimiser leur dynamique. Pour comprendre leur comportement, il est nécessaire de modéliser les sous-systèmes qui les composent.

Dans ce chapitre, notre focus se concentre sur l'étude de la dynamique longitudinale des véhicules électriques (VE). Le modèle dynamique choisi est simplifié, excluant les forces de roulis et de tangage. Ensuite, nous abordons la modélisation de la partie électrique ainsi que le couplage entre les parties électrique et mécanique pour obtenir un modèle global d'un véhicule électrique à propulsion par les deux roues arrière. [19].

De plus, un couplage entre la dynamique de véhicule électrique et de l'actionneur électrique de type MSAP pour asservir la vitesse longitudinale du VE.

II.1 Dynamique du véhicule :

Dans ce contexte, le véhicule est considéré comme une masse en mouvement qui subit à la fois la force motrice F_t engendrée par le groupe motopropulseur et diverses forces environnementales. Lorsque le véhicule est en mouvement, il fait face à une résistance qui s'oppose à son déplacement. Cette résistance englobe généralement la résistance au roulement, la traînée aérodynamique et la résistance en montée. La Figure (II.1) illustre les différentes forces auxquelles le véhicule en mouvement est exposé. [24]

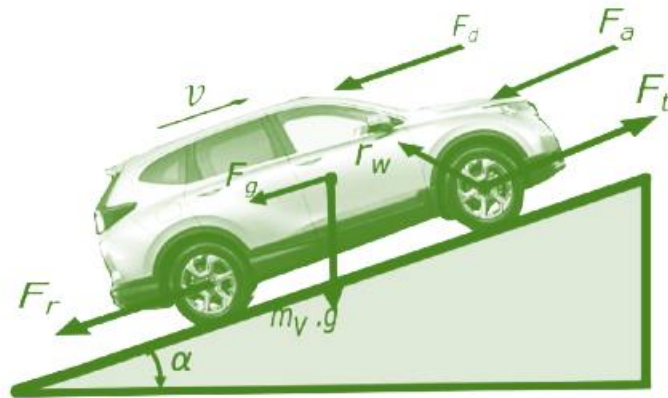


Figure II.1: Dynamique longitudinale d'un véhicule [35]

La deuxième loi de Newton permet d'exprimer l'accélération du véhicule comme suit :

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F_t - F_R}{M} \quad (\text{II.1})$$

Dans cette équation, V représente la vitesse du véhicule, F_t désigne l'effort de traction total exercé sur le véhicule, F_r représente la résistance totale rencontrée, et M correspond à la masse totale du véhicule.

$$F_t = F_r + F_a + F_g + F_{acc} \quad (\text{II.2})$$

F_r : force de résistance de roulement des roues

F_a : force aérodynamique

F_g : force d'inclinaison

F_{acc} : force d'accélération

II.1.1 Force de roulement :

La force de résistance au roulement liée au coefficient de roulement des roues. Pratiquement ce coefficient de roulement C_{rr} vaut environ 0.01 (environ 0.015 pour des pneus classiques). Il dépend de la largeur des pneus et du revêtement routier

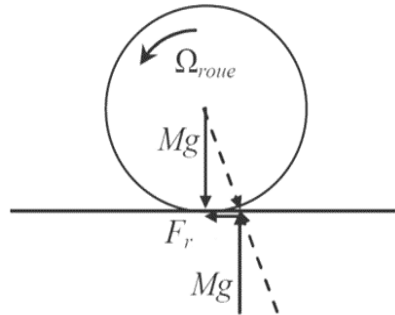


Figure II.2: La force de roulement sur la roue [24]

Si les pneus avant sont différents des pneus arrière, ou leurs pressions de gonflage sont différentes, l'effort de résistance au roulement vaut :

$$F_r = [C_{rr_{avmav}} + C_{rr_{arrear}}] g \approx g M C_{rr_{moy}} \quad (\text{II.3})$$

m_{av} et m_{ar} sont les masses portées par les roues avant et arrière.

M est la masse totale du véhicule.

g est l'accélération de la pesanteur

La résistance au roulement peut être minimisée en maintenant les pneus gonflés afin de réduire sa déformation. [35].

II.1.2 Force aérodynamique :

La force aérodynamique est influencée par plusieurs facteurs, notamment la densité de l'air, le carré de la vitesse relative par rapport à l'air (en tenant compte du vent), la surface frontale du véhicule et son coefficient de traînée. Le coefficient de traînée, noté C_x , varie généralement entre 0,2 et 1,5 en fonction de la forme de la carrosserie du véhicule. La force aérodynamique peut être exprimée par la

relation suivante :

$$F_a = \frac{1}{2} \rho S_f C_x (V_a - V_{vent})^2 \quad (\text{II.4})$$

Avec :

ρ : densité volumique de l'air (kg/m³)

S_f : section frontale du véhicule

V : vitesse du véhicule

V_{vent} : vitesse du vent

En général ρ est pris égal à 1.23 bien qu'il dépende de l'altitude et de la température.

Dans le cas des véhicules particuliers, la section frontale peut être estimée en utilisant la largeur et la hauteur du véhicule, ou en se basant sur sa masse. En effet, la section frontale varie généralement entre 79 % et 84 % de la surface calculée en multipliant la largeur et la hauteur du véhicule.

En ce qui concerne la vitesse du vent, une valeur positive indique que le vent souffle dans la direction opposée à la vitesse du véhicule (vent de face), tandis qu'une valeur négative indique que le vent souffle dans la direction de la vitesse du véhicule (vent arrière). [24][35]

II.1.3 Force d'inclinaison :

C'est la force de résistance due à la pente d'angle à gravir (force liée au profil de la route). Elle est donnée par :

$$F_g = M g \sin(\alpha) \quad (\text{II.5})$$

La pente en % est définie comme l'élévation verticale en mètres pour une distance horizontale de 100 mètres (Figure 1.14). Elle est donnée par la relation suivante :

$$F_g = M p g \text{ pour } p \leq 20\%$$

La pente en % est définie comme l'élévation verticale en mètres pour une distance horizontale de 100 mètres (Figure 1.14). Elle est donnée par la relation suivante : [23]

$$P(\%) = \frac{y(m)}{100(m)} \cdot 100(\%) \quad (\text{II.6})$$

Avec y est l'élévation verticale [24]

$$P [0 \text{ } 1] = \frac{20}{100} \sin \alpha \text{ d'ou } F_{\text{pente}} = M.g. \sin \alpha = M.g.p\%$$

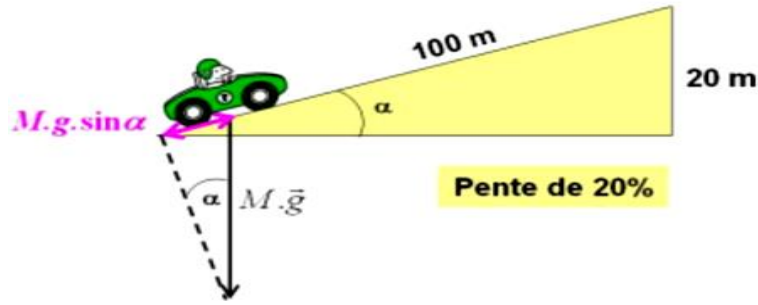


Figure II. 3 : définition de la pente [23]

II.1.4 Force d'accélération :

Elle représente le terme dynamique de l'accélération ou de décélération du véhicule.

$$F_{acc} = M \frac{dv}{dt} = M\gamma \quad (\text{II.7})$$

γ : accélération du véhicule.

Avec :

$$F_t = F_r + F_a + F_g \quad (\text{II.8})$$

F_R est la force de résistance totale

La vitesse angulaire des roues ω (roue) est liée à la vitesse du [9] véhicule V par la relation :

$$\omega_{roue} = \frac{v}{R} \quad (\text{II.9})$$

II.1.5 Environnement de véhicule :

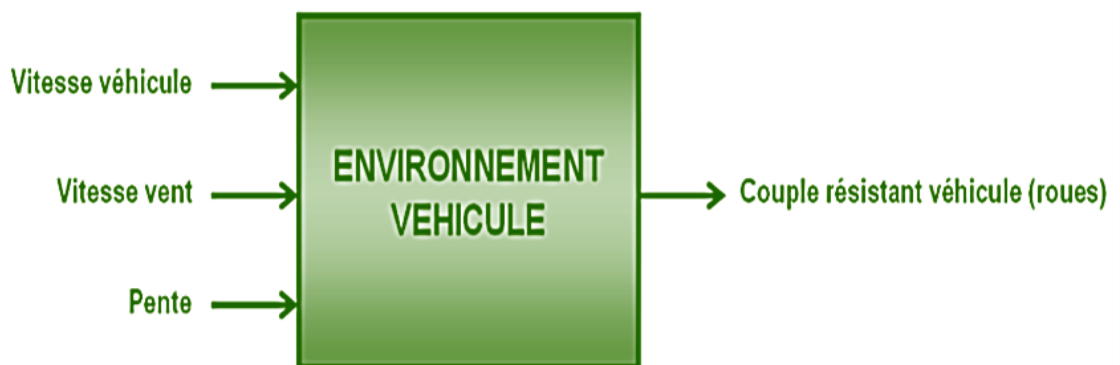


Figure II .4 Entrées-sorties du modèle d'environnement du véhicule [24]

La formulation de la force de résistance exercée sur le véhicule (plus spécifiquement sur les roues) est la suivante :

$$Cr(roues) = \left[\frac{1}{2} \cdot Sf \cdot Cx \cdot \rho \cdot (V_{veh})^2 + CRR_{moy} \cdot M \cdot g + M \cdot g \cdot P\% + M \cdot \gamma \right] \cdot Rr \quad (\text{II.10})$$

ρ : Masse volumique de l'air (1.28 Kg/m³)

Sf : section frontale du véhicule [m²]

C_x : Coefficient de pénétration dans l'air (entre 0.3 et 0.4)

V_{veh} : vitesse véhicule [m/s]

CRR_{moy} : coefficient de résistance au roulement entre (0.01 et 0.015)

M : masse de véhicule [Kg]

γ : accélération du véhicule [m/s²]

Rr : rayon de la roue[m]

À partir de l'expression mentionnée précédemment, on peut déduire le couple de résistance appliqué à la machine lorsqu'il s'agit d'un réducteur sans perte :

$$C_r(\text{machine}) = \frac{Cr(roues)}{n} \quad (\text{II.11})$$

Avec n : rapport de réduction

$$Cr(machines) = \left[Sf \cdot Cx \cdot \rho \cdot \left(\frac{\frac{\Omega_{machine}}{n}}{2} \right)^2 + CRR_{moy} \cdot M \cdot g + M \cdot g \cdot P\% \right] \cdot \frac{Rr}{n} \quad (\text{II.12})$$

L'illustration II.3 présente une estimation approximative de la valeur du couple de résistance appliqué à la machine de traction lorsqu'elle atteint une vitesse stabilisée, en tenant compte de la pente et de la vitesse du véhicule. [23]

II.1.6 Force liée à l'accélération : suppression du terme correspondant :

L'équation mécanique considérée pour la machine électrique est la suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = ce - cr - cmecca \quad (\text{II.13})$$

En retirant le terme lié à l'accélération de l'équation mécanique, l'équation déjà inclut l'accélération de la machine (et donc du véhicule). Le terme $J \frac{d\Omega}{dt}$ dans l'équation mécanique est redondant avec le terme $M \cdot \gamma$ de l'expression du couple résistant. Ainsi, nous pouvons retirer le terme lié à l'accélération du terme du couple résistant. [23]

II.2 Modèle de la motorisation électrique :

L'étude des systèmes électromagnétiques ne peut se faire que moyennant des hypothèses ou des transformations mathématiques afin d'obtenir un ou plusieurs modèles simplifiés. Les hypothèses simplificatrices données dans la majorité des références sont adoptées comme suit:

- Le circuit magnétique n'est pas saturé et l'effet de Peau et d'hystérésis est négligé.
- La répartition des forces magnétomotrices est sinusoïdale.
- L'effet d'amortissement au rotor est négligé.
- Les irrégularités de l'entrefer dues aux encoches statoriques sont ignorées.
- Les couplages capacitifs entre les enroulements sont négligés .[9]

II.2.1 Mise en équations de la MSAP dans le repère(abc) :

A partir de la figure (I.6), nous écrivons les équations de la machine synchrone dans le repère fixe au stator, en notation matricielle :

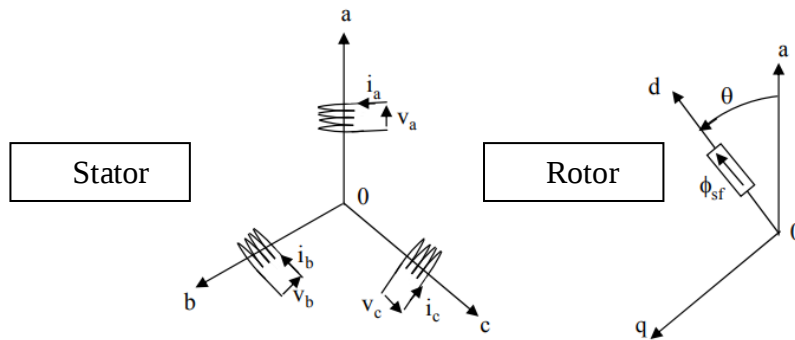


Figure II.5: Représentation d'une machine synchrone à aimants permanents [7]

II.2.1.1 Equations électriques :

$$[V] = [R_s][i] + \frac{d[\phi]}{dt} \quad (\text{II.14})$$

Avec : $[v] = [v_a v_b v_c]^T$: Vecteur tensions statoriques.

$[i] = [i_a i_b i_c]^T$: Vecteur courants statoriques.

$[\phi] = [\phi_a \phi_b \phi_c]^T$: Vecteur flux statoriques.

$$R_s = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} : \text{Matrice de la résistance équivalente d'un enroulement statorique}$$

II.2.1.2 Equations magnétiques :

Les hypothèses que nous avons présentées précédemment, conduisant à une matrice des inductances, qui établit les relations linéaires entre les flux et les courants. [16]

$$[\phi] = [L_s][i] + [\phi_f] \quad (\text{II.15})$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} : \text{Matrice d'inductance propre d'une phase statoriques}$$

M_s : L'inductance mutuelle entre phases du stator.

$[\phi] = [\phi_a \phi_b \phi_c]^T$: Vecteur flux des aimants.

Les flux induits par les aimants dans les trois phases statoriques (a, b, c) sont donnés par :

$$[\phi_f] = [L_{sc}][i] + [\phi_f]$$

avec:

$$[L_{sc}] = \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix}; L_{sc} = L_s - M_s : \text{L'inductance cyclique d'un enroulement Statorique.}$$

II.2.1.3 Equation mécanique :

L'équation mécanique s'écrit comme suite :

$$C_e - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + C_f \Omega \quad (\text{II.16})$$

Ω : Vitesse mécanique de rotation de la machine.

C_r : Couple résistant.

C_{em} : Couple électromagnétique.

C_f : Couple de frottement.

J : Moment d'inertie.

C_f : Coefficient de frottement.

P : Nombre de paires de pôles.

ω_r : Vitesse électrique du rotor

II.3 Transformation de PARK :

II.3.1 Principe de la transformation de Park :

Les machines électriques les plus couramment utilisées sont basées sur la transformation de Park, qui est définie par la matrice $[P(\theta)]$. Cette transformation mathématique permet de convertir le circuit triphasé fixe de la machine en un circuit biphasé, où les enroulements statoriques sont fixes par rapport au référentiel rotor défini par les axes d et q. La transformation de Park associe les variables réelles statoriques à leurs composantes directes d'axe d et transversales d'axe q, ce qui permet de formuler les équations électriques dans un système cartésien d'axes dq . Dans le repère classique, il y a trois axes (a, b, c) alignés avec les trois enroulements statoriques de la machine. Habituellement, l'axe a est considéré comme la référence. En ce qui concerne le rotor, il y a toujours un seul axe pour les machines synchrones à aimants permanents, et θ représente la position du rotor par rapport au stator. Les trois enroulements du stator peuvent être remplacés par deux enroulements fictifs décalés de $\pi/2$ dans l'espace et alimentés par des courants décalés de $\pi/2$ dans le temps. Ces deux enroulements virtuels sont disposés le long des axes d et q, ou dans le cas des machines synchrones à aimants permanents, l'axe d est aligné avec le rotor. Pour passer du système triphasé abc au système biphasé dq (et vice versa), les relations suivantes sont utilisées. [37] [14]

$$[X_{dqo}] = [p(\theta)] [X_{abc}]$$

$$[X_{abc}] = [p(\theta)]^{-1} [X_{dqo}]$$

Avec :

$$[p(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

Dont la matrice inverse est la suivante :

$$[p(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix}$$

II.3.1.1 Equations des tensions et des flux dans référentiel de PARK :

A partir cette transformation, les équations s'écrivent comme :

$$\left\{ \begin{aligned} V_d &= R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_q i_q \\ V_q &= R_q i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r L_d i_d + \omega_r \phi_f \\ \phi_d &= L_d i_d + \phi_f \\ \phi_q &= L_q i_q \end{aligned} \right.$$

II.3.1.2 Expression du couple électromagnétique :

La puissance absorbée par la machine est donnée par :

$$P(t) = V_a i_a + V_b i_b + V_c i_c$$

Dans le repère (d, q), cette puissance s'écrit :

$$P(t) = V_q i_q + V_d i_d$$

En remplaçant les tensions V_d et V_q par leurs expressions, la puissance électrique absorbée par la machine dans le référentiel de PARK devient : [15]

$$P(t) = \frac{3}{2} (R_s (i_d^2 + i_q^2) L_d i_d \frac{di_d}{dt} + P \omega ((L_d - L_q) i_d i_q + V_q i_q + \phi_f))$$

Cette puissance est composée de :

- Puissance perdue par effet Joule :

$$P_j = \frac{3}{2} R_s (i_d^2 + i_q^2)$$

- Puissance électromagnétique :

$$P_{me} = \frac{3}{2} (P \omega ((L_d - L_q) i_d i_q + V_q i_q + \phi_f))$$

- La variation d'énergie magnétique :

$$P_v = \frac{3}{2} (L_d i_d \frac{di_d}{dt} + L_q i_q \frac{di_q}{dt})$$

- Le couple électromagnétique est exprimé par :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P ((L_d - L_q) i_d i_q + V_q i_q + \phi_f)$$

$\frac{3}{2} \phi_f i_q$: Couple que l'on obtiendrait avec une machine à pôles lisses

$\frac{3}{2} P ((L_d - L_q) i_d i_q)$: Couple supplémentaire dû à la saillance des pôles.

II.4 Modélisation de L'onduleur de Tension :

Le dispositif de commande (figure II.5) un MSAP est basé sur un onduleur de tension triphasé, qui utilise des composants semi-conducteurs tels que des transistors ou des thyristors GTO. Cet onduleur est le cœur du système et peut être considéré comme un amplificateur de puissance, composé de trois bras, chacun comportant deux interrupteurs en parallèle inverse avec une diode de récupération. Pour éviter le court-circuit de la source et assurer la continuité des courants alternatifs, les interrupteurs K1 et K2, K3 et K4, K5 et K6 doivent être contrôlés de manière complémentaire. La figure (II.5) illustre un convertisseur statique qui alimente le stator du MSAP. [38]

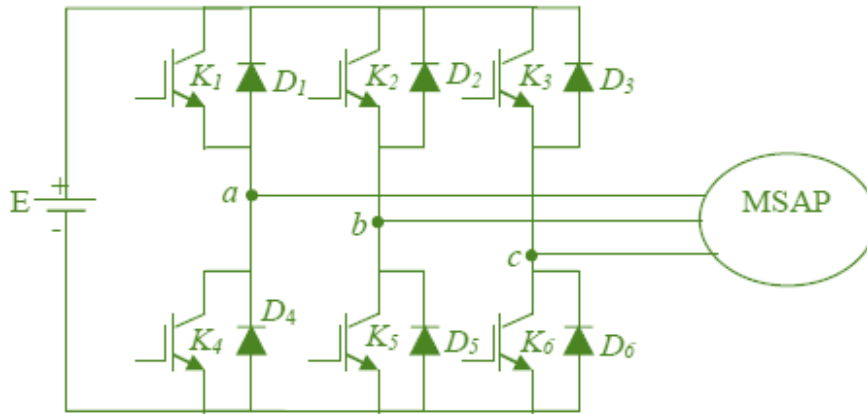


Figure II.5- Représentation schématique d'un onduleur de tension. [26]

Pour simplifier l'étude, on supposera que [10] :

- La commutation des interrupteurs est instantanée.
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable.
- La charge triphasée, est équilibrée, couplée en étoile avec un neutre isolé.

Les ordres de commande de l'onduleur sont transmis aux trois bras par l'intermédiaire des signaux de commande c1, c2 et c3. La convention adoptée pour le fonctionnement du bras i est la suivante :

Si $c_i = 1$: L'interrupteur du haut K_i est fermé et l'interrupteur de bas K_{i+3} est ouvert.

Si $c_i = 0$: L'interrupteur du haut K_i est ouvert et l'interrupteur de bas K_{i+3} est fermé.

Les commandes c_i de l'onduleur de tension triphasé sont généralement générées par une stratégie de Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI).

Si la charge connectée à l'onduleur est équilibrée ($V_a + V_b + V_c = 0$), les tensions phase – neutre s'expriment comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{Uf}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c1 \\ c2 \\ c3 \end{bmatrix}$$

II.5 Commande par MLI :

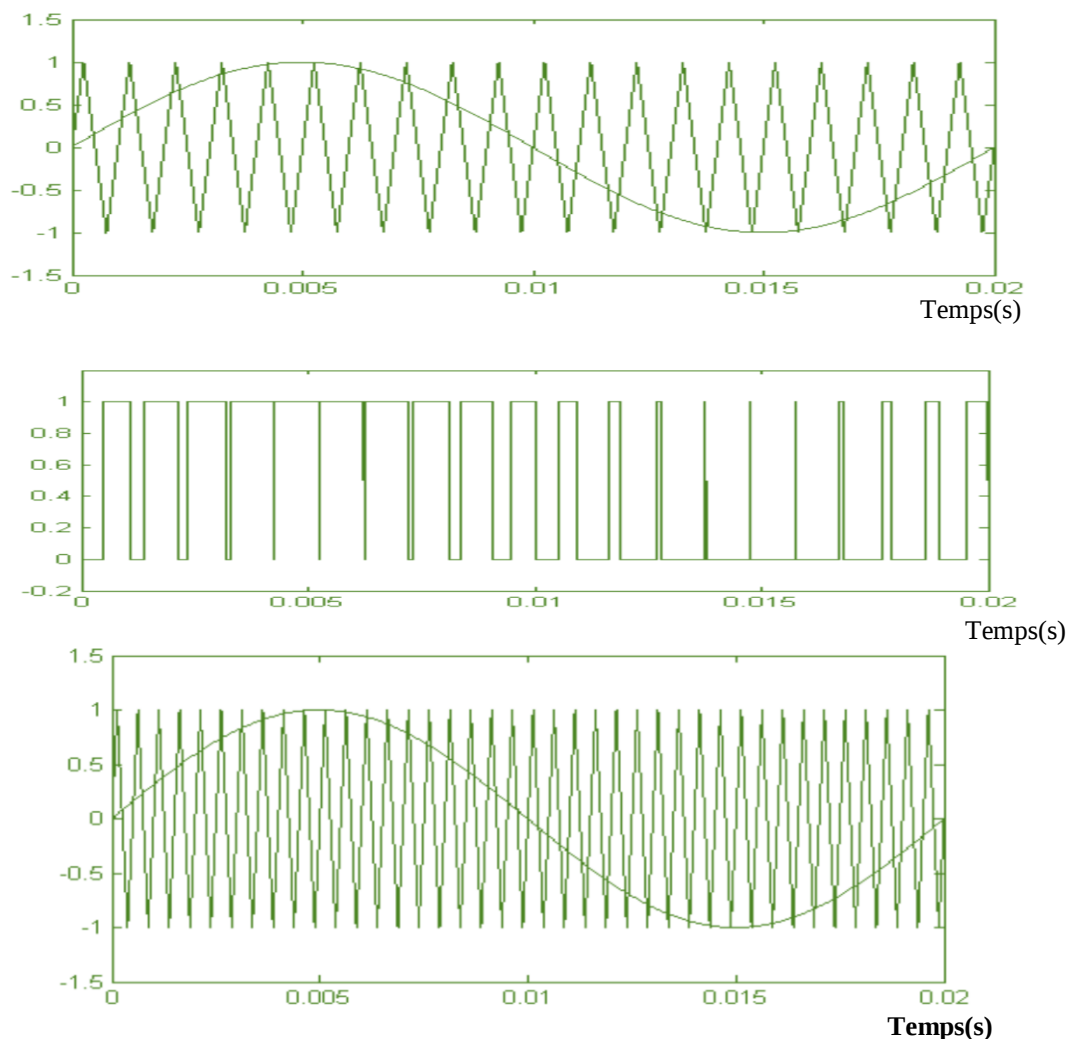
La méthode de modulation de largeur d'impulsion (MLI) naturelle implique la comparaison de deux signaux : un signal de référence (modulateur) qui représente une sinusoïde souhaitée en sortie d'onduleur et peut être modulé en amplitude et en fréquence, et un signal de porteuse (triangulaire) qui définit la fréquence de commutation des interrupteurs d'onduleur. Le signal de porteuse est un signal à haute fréquence par rapport au signal de référence.

L'onde en impulsion est meilleure que l'onde rectangulaire si:

$$\text{Porteuse} > 20 \text{ référence}$$

Les figures II.6 représente deux signaux à MLI générés par la comparaison de deux signaux de la porteuse en triangle ayant deux fréquences différentes (figure II.6.A.B), avec le même signal de référence sinusoïdal 1 kHz et 2 kHz [16]

L'impulsion imposée
Au bras de l'onduleur



L'impulsion imposée
Au bras de l'onduleur

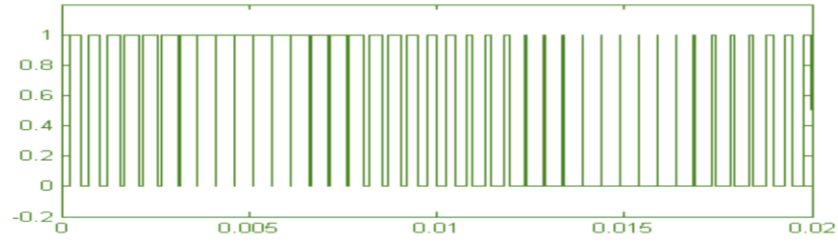


Figure II.6: Génération d'une MLI naturelle pour un signal de la porteuse de 1 kHz (a) et de 2kHz (b).

II.6 Equations d'état de la MSAP :

Les équations de la MSAP dans le repère de PARK sont regroupées dans le système suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_d}{dt} = \frac{v_d}{L_d} - \frac{R_s i_d}{L_d} + \omega_r L_q \frac{i_q}{L_d} \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{v_q}{L_q} - \frac{R_s i_q}{L_q} + \omega_r L_d \frac{i_d}{L_q} + \frac{\omega_r}{L_q} \Phi_f \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{c_{em}}{J} - \frac{c_r}{J} - \frac{c_l}{J} \\ c_{em} = \frac{3}{2} p ((L_d - L_q) i_d i_q) + \Phi_f i_q \end{array} \right. \quad (II.17)$$

Le schéma bloc de ce système est représenté par la figure (II.7) :

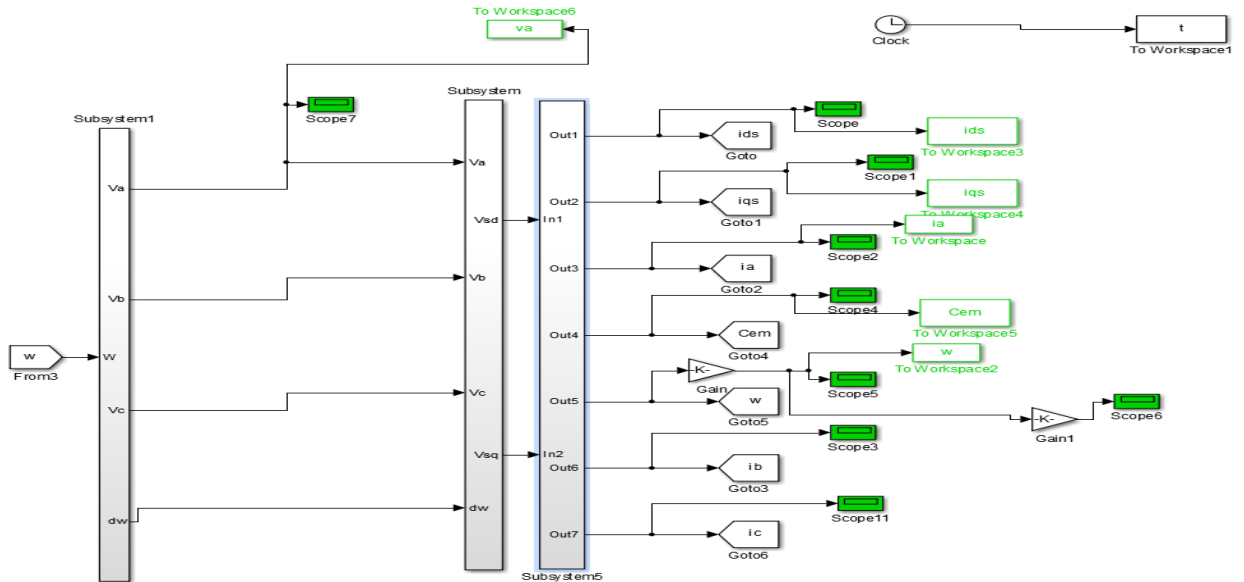


Figure II.7 : Schéma bloc du modèle de la MSAP dans le repère d-q.

II.6.1 Résultats de la simulation :

la simulation du modèle de la machine donne une validation pratique du modèle et des hypothèses simplificatrices ainsi que le comportement dynamique de la machine à vide et en charge et dont les résultats sont présentés ci-dessous.

Moteur à vide :

La figure (II.8) illustre le comportement de la MSAP lors d'un démarrage à vide. On peut observer qu'après une période transitoire de 0,5 seconde, le couple ramène le rotor à la vitesse de synchronisme, où il se stabilise près de zéro puisqu'il n'y a pas de charge et que les frottements sont négligeables. La vitesse subit des oscillations avant de se stabiliser à la vitesse de synchronisme après 0,5 seconde. Au démarrage, les courants directs et quadrature i_{sd} et i_{sq} présentent des oscillations significatives qui, après la période transitoire, convergent vers leurs valeurs nominales. Ces oscillations s'expliquent par une faible force contre-électromotrice ($f.c.e.m$) associée à la vitesse au démarrage.

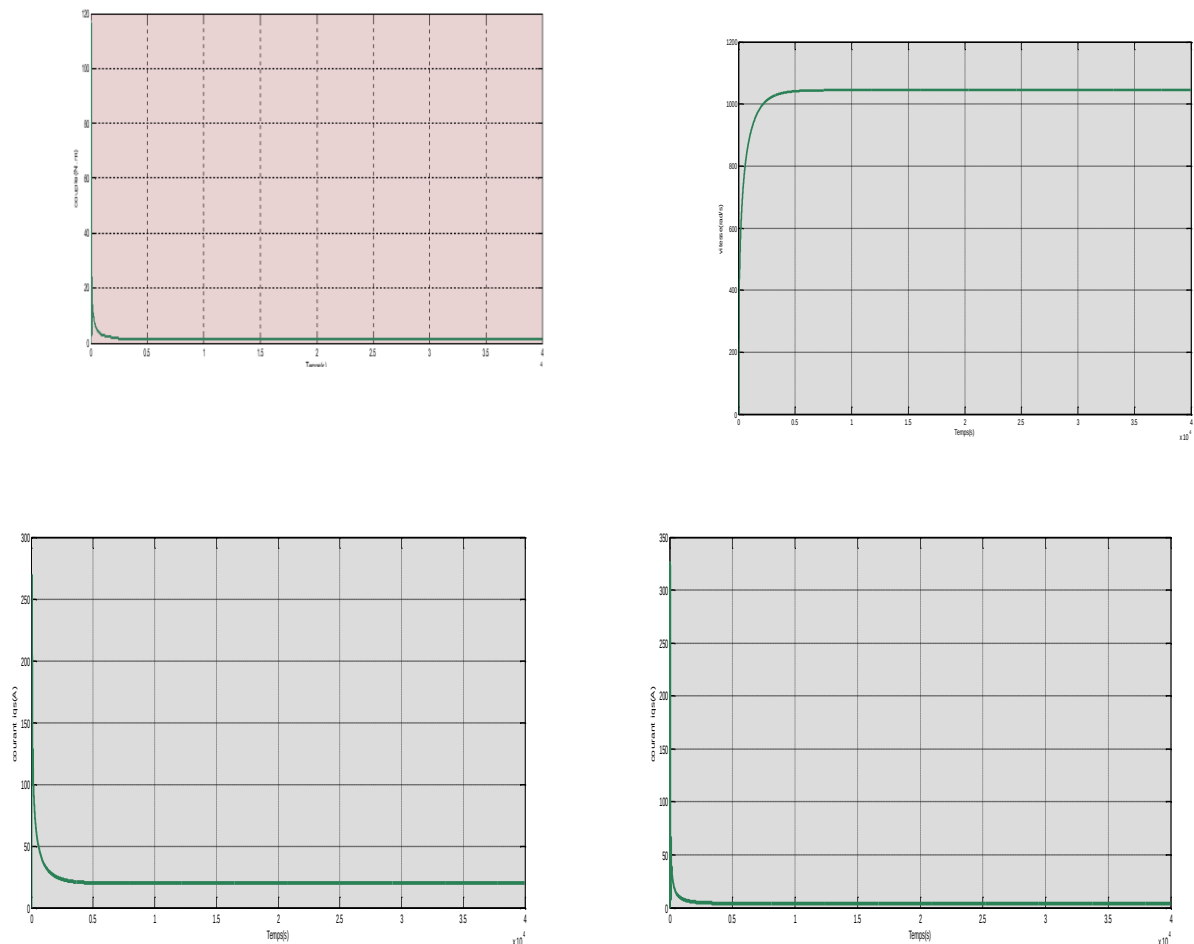


Figure II.8 : Caractéristique dynamique de la Moteur à vide ($Cr = 0$).

- Moteur en charge :** La figure (II.9) présente le comportement de la MSAP lorsqu'une charge de 2 N.m est appliquée. On peut observer que la vitesse présente des oscillations plus importantes par rapport au cas précédent, mais elle se stabilise toujours au niveau de synchronisme malgré l'application de la charge. Il est à noter que la valeur de couple réactionnel lorsqu'une charge est présente est légèrement plus élevée que celle en régime à vide. Cela est tout à fait normal car, pour toute machine électrique, ces valeurs ne sont pas proportionnelles aux charges appliquées.

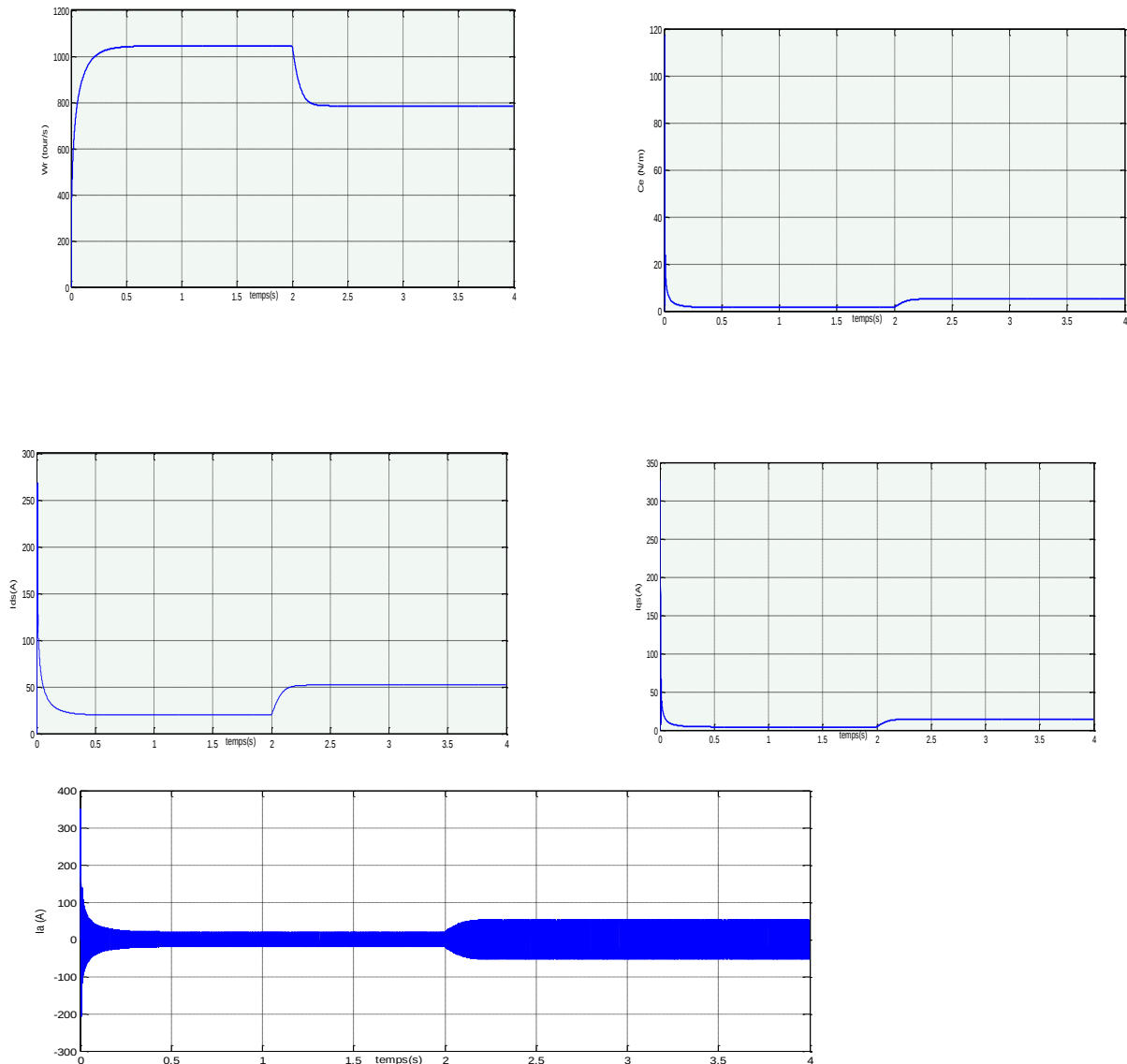


Figure II.9 : Caractéristiques dynamiques de la MSAP avec l'application d'un échelon de couple au régime permanent ($C_r=2$ N.m).

II.1 Simulation de l'ensemble onduleur-MSAP :

Dans la pratique, l'utilisation de la MSAP est généralement associée à un convertisseur statique, ce qui permet d'éliminer les variations excessives de couple et de courant. Les résultats présentés ci-dessous sont simplement des tests théoriques utilisés pour vérifier la validité du modèle de la machine associée à un onduleur qui permet de réaliser l'autopilotage et donc la fréquence variable.

Le schéma bloc du modèle de la MSAP associé à un onduleur est représenté par la figure (II.10) :

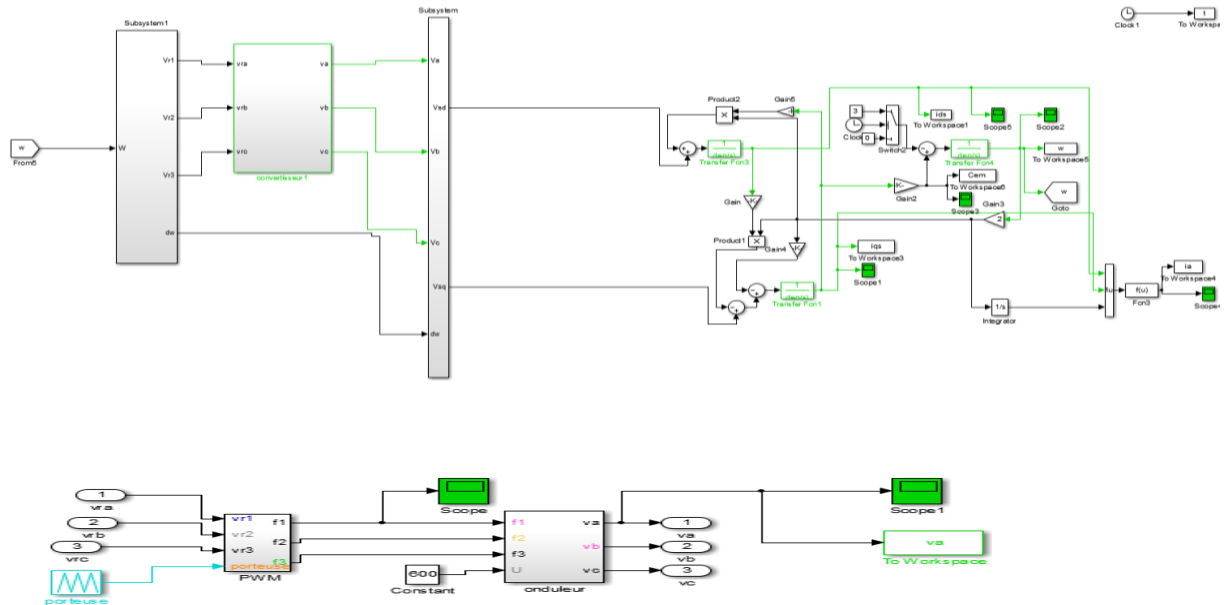


Figure II.10: Schéma bloc de l'ensemble onduleur-MSAP.

III.1.1 Résultats de la simulation du dynamique du moteur associé à l'onduleur :

Des fluctuations sont observées dans les grandeurs de la machine, principalement en raison des harmoniques présents dans la tension générée par l'onduleur.

Les résultats de simulation dans la figure (II.11) (fonctionnement en charge) :

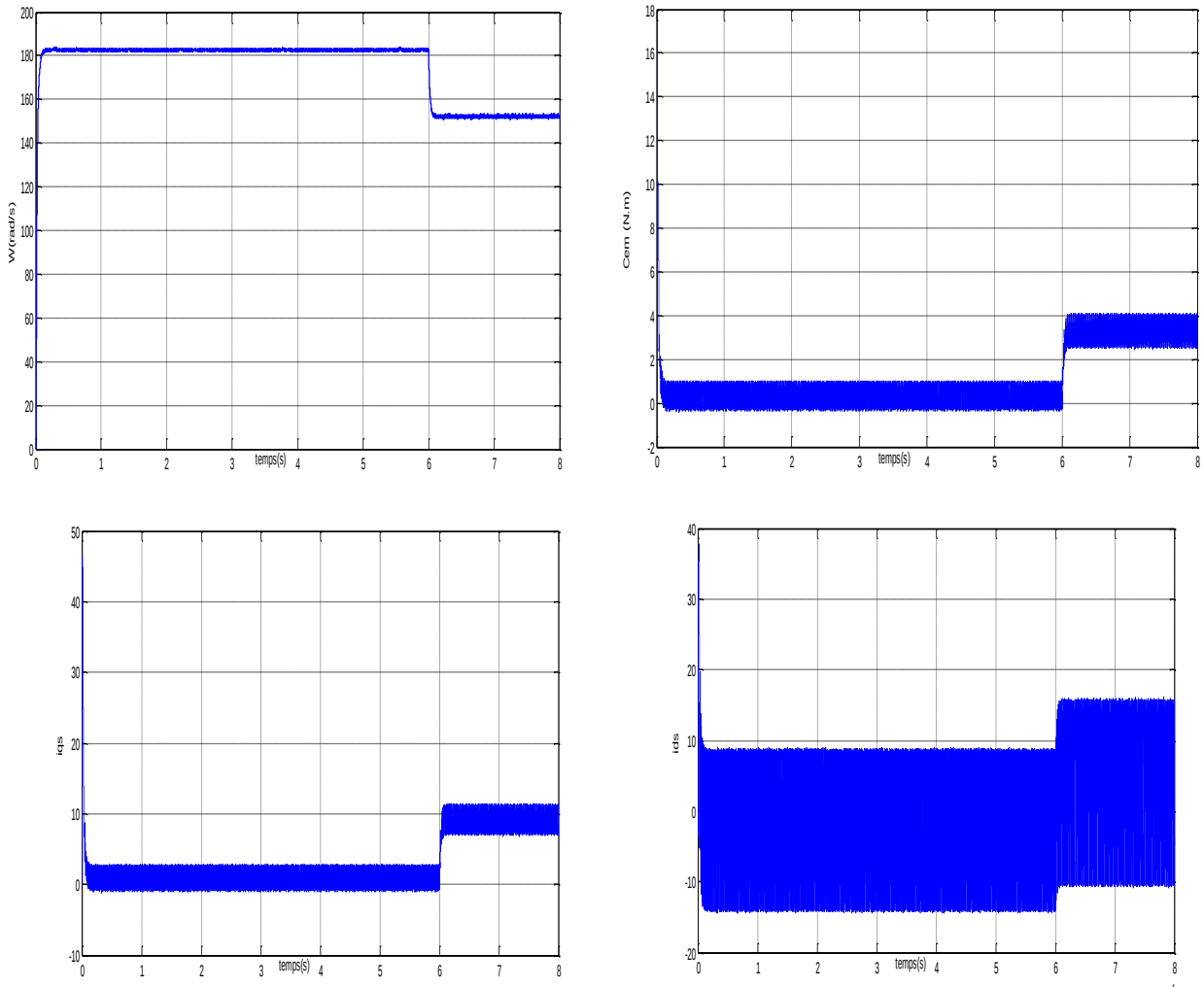


Figure II.11 : Caractéristiques dynamiques de l'ensemble onduleur-MSAP avec l'application d'un échelon de couple au régime permanent ($C_r = 3 \text{ N.m}$).

Lors du démarrage de la MSAP avec un onduleur, on peut observer qu'avec ce type d'alimentation, la machine passe par une période transitoire avant de se stabiliser après environ 0,5 seconde. En régime permanent, elle atteint une vitesse d'environ 116rad/s.

Interprétations :

Lorsqu'on compare les résultats de la MSAP alimentée par un onduleur avec ceux obtenus sans onduleur (alimentation directe par le réseau), on observe une similitude générale. Cependant, la présence de l'onduleur entraîne des ondulations supplémentaires sur la vitesse, le couple et les courants statoriques, ondulations autour d'une valeur moyenne.

III.2 Equation de véhicule :

A partir de l'équation (II.12) :

Et Dans le but de passer à la vitesse linéaire du véhicule nous utilisons :

Vitesse linéaire (**km/h**) = fréquence de rotation (**tours/min**) × circonférence (**km**) × 60

$$V = 2 \times \pi \times R \times n \times 60$$

R = rayon de la roue

n = vitesse du rotation

$$n \text{ (tours/min)} = \omega \times n_r$$

ω = régime moteur

n_r = rapport de démultiplication (boîte de vitesse, pont)

Le schéma bloc de ce système est représenté par la figure (II.12) :

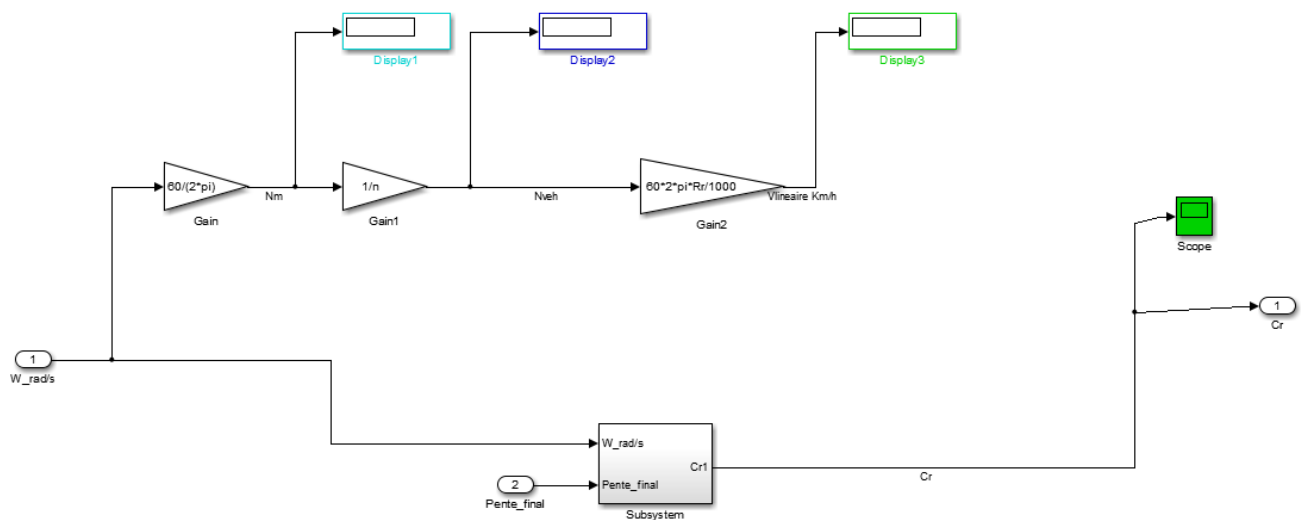
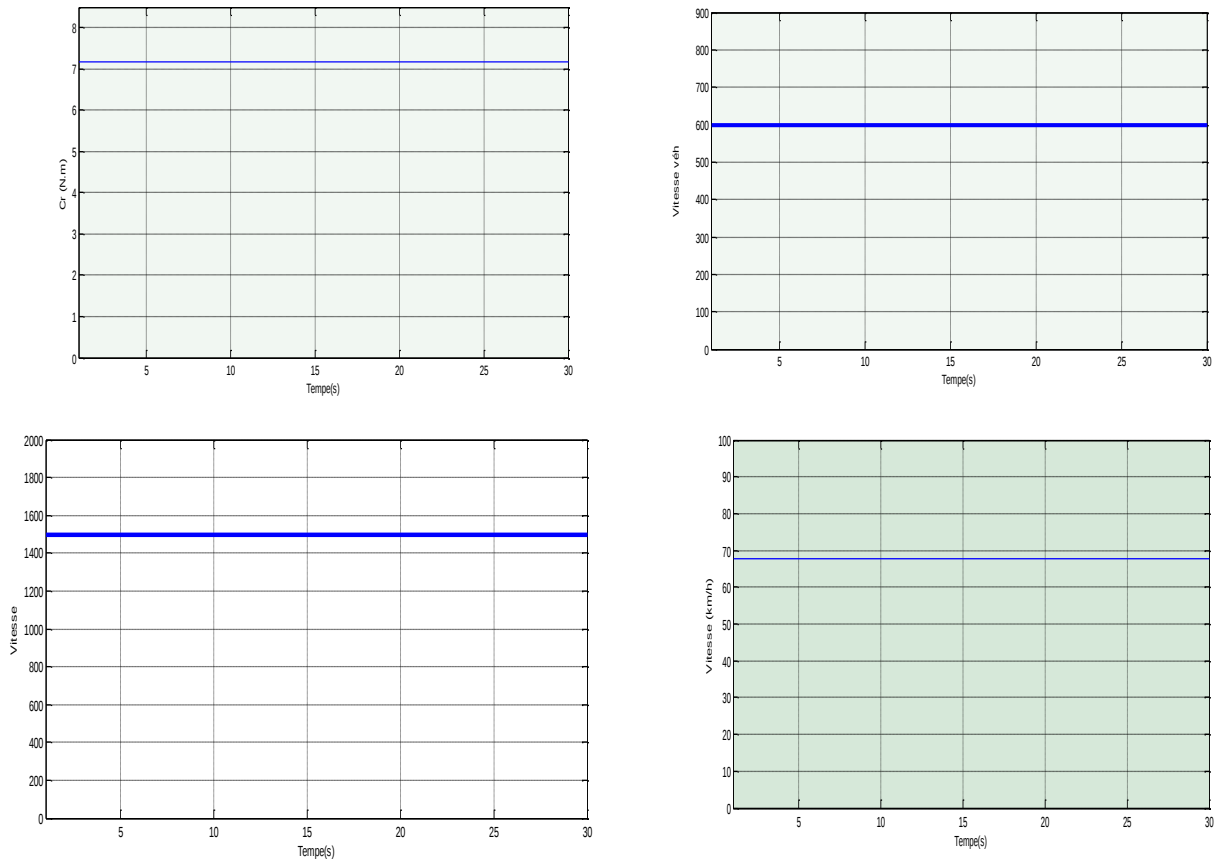


Figure II.12 : schéma bloc de la simulation du comportement dynamique du véhicule électrique

II.9.1 Résultats de simulation :



FigureII.1 3 :Caractéristiques dynamiques du comportement dynamique du véhicule électrique

A partir de l'équation (II.12) on peut déduire le couple de la machine en imposant une vitesse linéaire désirée qui vaut 67Km/h ce qui implique une vitesse de rotation du moteur égale à 1500 tr/min

III.3 Simulation de l'ensemble véhicule-MSAP :

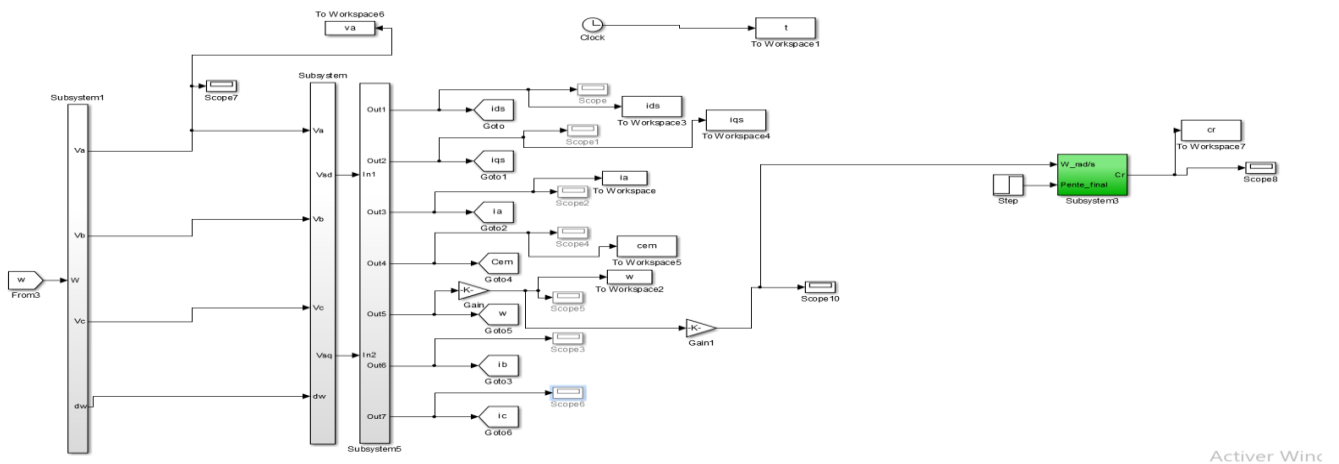


Figure II.14: Schéma bloc de la simulation du comportement dynamique du véhicule électrique MSAP

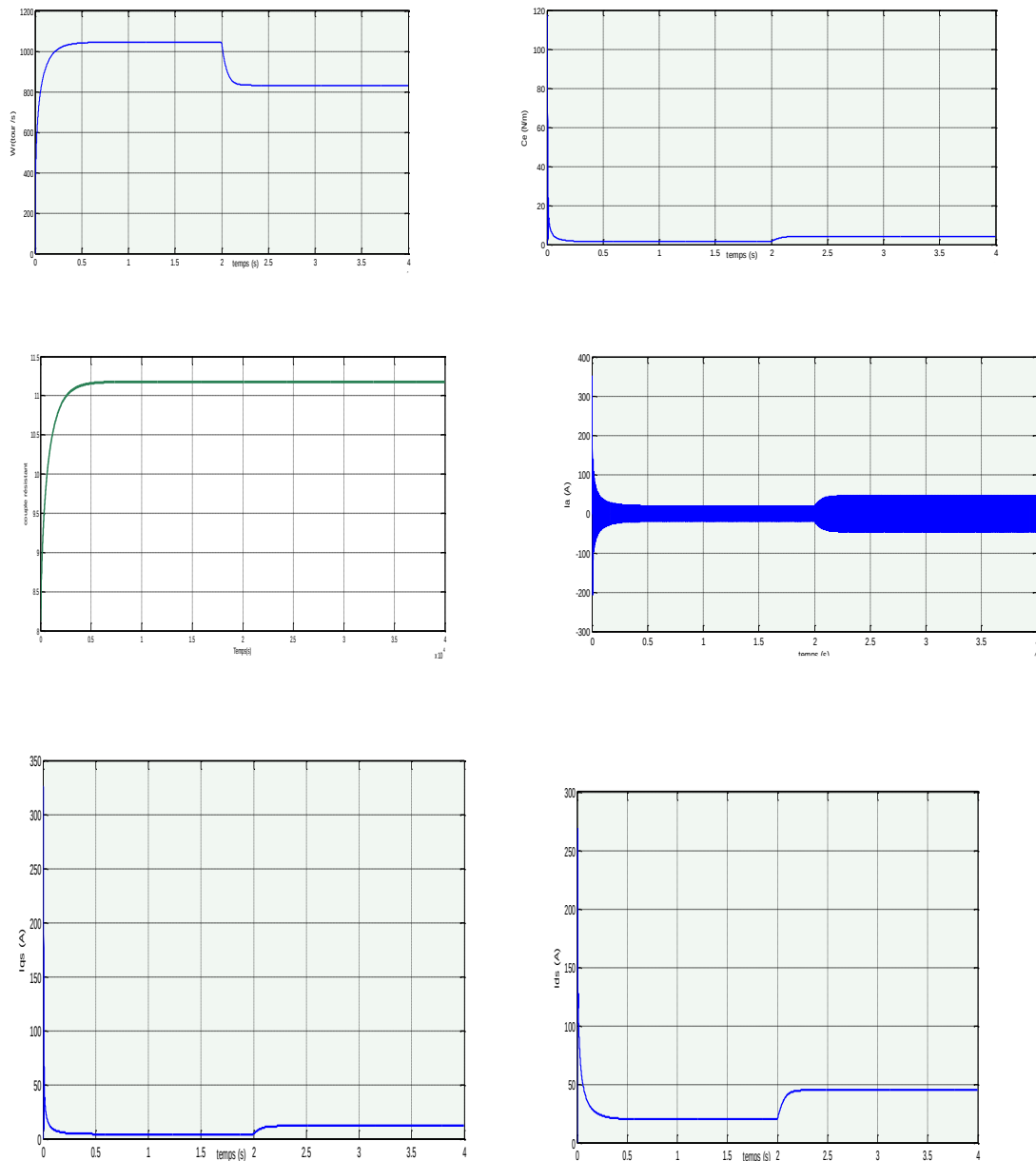


Figure II.15. Caractéristiques dynamiques ensemble véhicule électrique –MSAP

Interprétation :

Dans l'objectif d'étudier le comportement dynamique de l'ensemble moteur synchrones à aimant permanent véhicule électrique on a démarré le moteur à vide puis on applique une charge mécanique à l'instant $t=2\text{s}$. On constate un fort couple au démarrage pour compenser l'inertie de système à l'arrêt.

III.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exposé la modélisation de la dynamique longitudinale d'un véhicule électrique (VE) en se basant sur une étude dynamique et cinématique du véhicule. De plus, nous avons élaboré un modèle de motorisation électrique dans le référentiel de PARK lié au rotor (d, q) et examiné

le couplage entre les composantes électrique et mécanique du système. Le modèle de l'onduleur de tension et de sa commande utilisant la MLI sinus triangle a également été présenté.

Afin d'améliorer les performances dynamiques et statiques de la véhicule électrique et MSAP, une commande spécifique appelée DTC (Direct Torque Control) est introduite. Cette commande sera discutée en détail dans le chapitre suivant.

Chapitre III

Commande direct du couple (DTC)du MSAP associé
au véhicule

III.5 Introduction :

La DTC, également connue sous le nom de "Direct Torque Control" en anglais, est une méthode de commande qui se base sur l'orientation du flux statoriques. Elle a été développée en 1971 par des chercheurs allemands et japonais pour la commande de couple des servomoteurs à haute puissance. Récemment, elle a gagné en popularité dans l'industrie en remplaçant la stratégie de commande basée sur l'orientation du flux. La DTC permet de contrôler indépendamment le couple et le flux des machines à courant alternatif en utilisant un onduleur de tension sans régulation de courant par une boucle de rétroaction, offrant ainsi des performances similaires à celles de la commande vectorielle. Trois techniques de commande ont été utilisées pour mettre en œuvre la DTC :

- Commande par une table de commutation ;
- Commande automatique directe (DSC : Direct Self Control), introduite par Depenbrock en 1987 ;
- Commande directe par modulation de vecteur (DVMC : Direct Vector Modulation Control).

Dans la suite, nous nous focaliserons spécifiquement sur la commande directe du couple et du flux (DTC). Nous commencerons par présenter et mettre en œuvre une structure de commande pour les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) basée sur la DTC afin d'étudier cette stratégie de commande. Ensuite, nous présenterons et discuterons des résultats de simulations et d'expérimentations, en tenant compte ou non d'une boucle de régulation de vitesse avec un correcteur PI.

III.6 Principe de la commande directe du couple :

La DTC vise à réguler directement le couple de la machine en appliquant différents vecteurs de tension de l'onduleur qui détermine son état. Les variables contrôlées sont le flux statoriques et le couple électromagnétique, qui sont généralement régulés par des régulateurs à hystérésis. L'objectif est de maintenir ces grandeurs à l'intérieur des bandes d'hystérésis prédéfinies. La sortie de ces régulateurs détermine le vecteur de tension optimal à appliquer à chaque instant de commutation. Le principe de la DTC repose sur la sélection directe des vecteurs de tension en fonction des écarts entre les références du couple et du flux et leurs valeurs réelles. En se basant sur les erreurs de couple et de flux fournies par des comparateurs à hystérésis, un vecteur de tension est choisi parmi une table de vecteurs. Les caractéristiques générales de la DTC sont les suivantes :

- La commande directe du couple et du flux est réalisée en sélectionnant les vecteurs optimaux de commutation de l'onduleur.
- La commande des intensités et des tensions du stator de la machine est indirecte.
- Les flux et les courants statoriques sont proches des formes sinusoïdales.
- La réponse dynamique du couple de la machine est très rapide.

- Des oscillations de couple peuvent apparaître en fonction de la largeur des bandes des comparateurs à hystérésis.
- La fréquence de commutation de l'onduleur dépend également de la largeur des bandes d'hystérésis.

La commande DTC de la MSAP repose sur la détermination directe de la séquence de commande appliquée aux interrupteurs d'un onduleur de tension. L'onduleur de tension permet d'atteindre sept positions distinctes dans le plan de phase, correspondant aux huit séquences du vecteur de tension à la sortie de l'onduleur. La commande DTC de la MSAP peut être schématisée par la figure (III.1).[18]

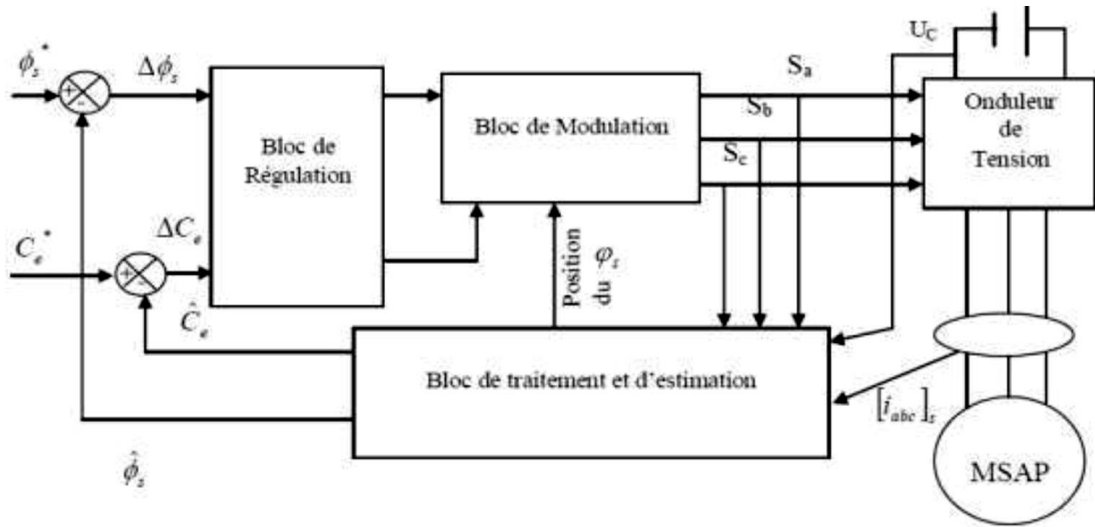


Figure III-1: Schéma structurel d'une commande DTC appliquée à la MSAP.[18]

III.7 Principe du Contrôle du flux et du Couple :

III.7.1 Contrôle du vecteur flux statoriques :[21]

Pour obtenir un contrôle efficace du couple électromagnétique, il est essentiel de régler précisément le flux. Le contrôle dynamique du couple peut être illustré par le modèle vectoriel de la machine dans le référentiel (α, β) lié au stator, ce qui permet d'éviter les transformations de coordonnées. Dans ce modèle, le flux considéré est le flux statoriques. Le modèle de la partie électrique de la machine, qui relie les vecteurs de flux, de tension et de courant, peut être exprimé de la manière suivante :

$$V_s = R_s I_s + d\phi_s / dt \Rightarrow \phi_s = \phi_{s0} + \int_0^t (V_s - R_s I_s) dt \quad (III.1)$$

Où : ϕ_{s0} est le vecteur flux à l'instant $t = 0$.

Dans cette étude nous allons considérer le terme $R_s I$ négligeables devant le vecteur de tension V_s ce qui se vérifie lorsque la vitesse de rotation est suffisamment élevée. A partir de l'équation précédente on trouve : $\Delta \phi_s = V_s T_e$ (III.2)

On constate que sur l'intervalle de temps $[0, T_e]$, l'extrémité du vecteur ϕ_s se déplace sur une droite dont la direction est donnée par V_s , figure (III-2).

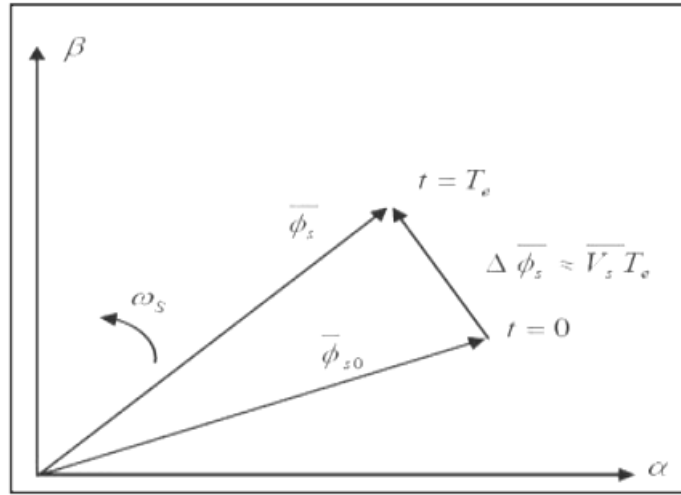


Figure III.2: Evolution de l'extrémité de ϕ_s pour $R_s I$ négligeables. [21]

Le déplacement du vecteur flux statoriques est réalisé en appliquant successivement la vectrice tension fournis par l'onduleur de tension. En fonction du vecteur tension appliqué, il est possible de modifier la valeur du module du flux statoriques (voir figure (II-2) et (II-3)). Ainsi, en choisissant judicieusement le vecteur tension statoriques pour chaque intervalle de la période d'échantillonnage T_e , on peut obtenir une trajectoire quasi circulaire à l'extrémité du vecteur flux statoriques, tout en maintenant l'amplitude du flux proche d'une valeur de référence constante.

Par conséquent, pour augmenter le flux statoriques, il suffit d'appliquer un vecteur de tension colinéaire et dans la même direction, et inversement.

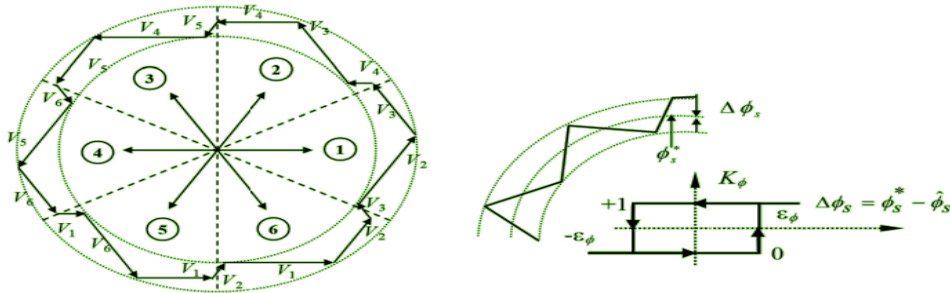


Figure III.3 Trajectoire du flux statoriques

III.7.2 Contrôle du couple électromécanique :

Pour expliquer de manière qualitative les principes de contrôle du couple synchrone, nous supposons, dans un souci de simplification, que la vitesse de rotation de la machine et l'amplitude du flux rotorique sont constantes. Nous pouvons contrôler le vecteur ϕ_s en fonction du vecteur V_s , avec une marge d'erreur de la chute de la tension R_s et du courant I_s . [32]

Le couple électromagnétique est proportionnel au produit vectoriel entre les vecteurs des flux statoriques et rotorique de la façon suivante :

$$C_e = K (\phi_s \wedge \phi_r) = K \|\phi_s\| \|\phi_r\| \sin(\delta) \quad (\text{III.3})$$

$$\text{Tel que : } K = \frac{P}{Lq}$$

- ϕ_s est le vecteur de flux statoriques ;
- ϕ_r est le vecteur de flux rotorique ramené au stator
- δ est l'angle entre les vecteurs des flux statoriques et rotorique.

Le couple dépend de l'amplitude des vecteurs ϕ_s et ϕ_r ainsi que de leur position relative. Si nous parvenons à contrôler avec précision le flux ϕ_s (à partir de V_s) en termes de magnitude et de position, nous pouvons donc contrôler indépendamment l'amplitude de ϕ_s et le couple électromagnétique.

III.8 Choix des vecteurs :

Le choix du vecteur $\overline{V_s}$ dépend de la position de $\overline{\phi_s}$ dans le référentiel "secteur (S)", de la variation souhaitée pour le module de $\overline{\phi_s}$, de la variation souhaitée pour le couple et du sens de rotation de $\overline{\phi_s}$.

L'espace d'évolution de $\overline{\phi_s}$ dans le "secteur (S)" est divisé en six zones S_i , avec $i=[1..6]$, comme illustré dans la figure (III-3).

Lorsque le flux $\overline{\phi_s}$ se situe dans une zone S_i , le contrôle du flux et du couple peut être réalisé en sélectionnant l'un des huit vecteurs tension suivants :

→ $\overline{V_{i+1}}$ Si est sélectionné alors ϕ croît et C_e croît.

→ $\overline{V_{i-1}}$ Si est sélectionné alors ϕ s croît et C_e décroît.

→ $\overline{V_{i+2}}$ Si est sélectionné alors ϕ s décroît et C_e croît.

→ $\overline{V_{i-2}}$ Si est sélectionné alors ϕ s décroît et C_e décroît.

→ Si $\overline{V_0}$, ou $\overline{V_7}$ sont sélectionnés, alors la rotation du flux ϕ s'est arrêtée, d'où une décroissance du couple alors que le module de flux $\overline{\phi_s}$ reste inchangée .

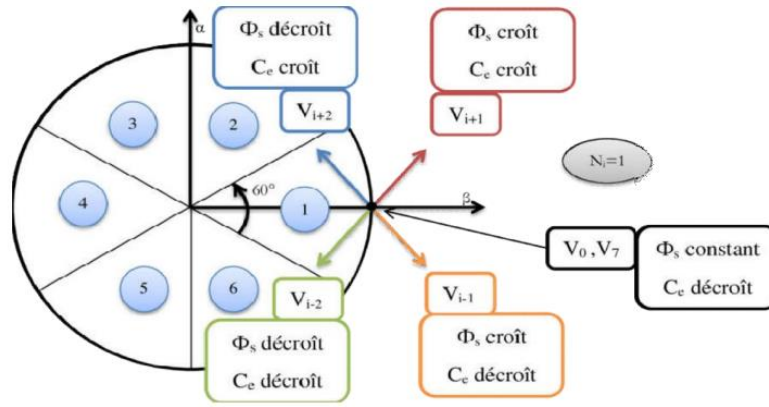


Figure III.4: Choix de la vectrice tension. [21]

L'efficacité des vecteurs tension appliqués dépend également de la position du vecteur flux dans la zone Si.

En début de zone, les vecteurs $\overline{V_{i+1}}$ et $\overline{V_{i-2}}$ sont perpendiculaires à $\vec{\phi}_s$, ce qui entraîne une évolution lente de l'amplitude du flux $\vec{\phi}_s$. En revanche, en fin de zone, l'évolution est inverse. Les vecteurs $\overline{V_{i-1}}$ et $\overline{V_{i+2}}$ correspondent à une évolution lente du couple et une évolution rapide de l'amplitude de ϕ_s en début de zone, tandis que c'est le contraire en fin de zone.

Quel que soit le sens d'évolution du couple ou du flux dans la zone Si, les vecteurs $\overline{V_{i-1}}$ et $\overline{V_{i+2}}$ ne sont jamais utilisés. En effet, ces vecteurs ont la plus forte composante de flux (évolution très rapide de $\vec{\phi}_s$), mais leur effet sur le couple dépend de la position de $\vec{\phi}_s$ dans la zone, avec un effet nul au milieu de la zone.

Le vecteur de tension à la sortie de l'onduleur est déterminé en fonction des écarts estimés entre le couple et le flux par rapport à leur référence, ainsi que de la position de $\vec{\phi}_s$. Pour cela, des estimateurs du module et de la position du flux, ainsi qu'un estimateur du couple, sont nécessaires. [33]

III.9 Les estimateurs :

Le flux statoriques et le couple électromagnétique qui ne sont pas mesurable donc il est obligé faire l'estimation

III.9.1 Estimation du flux statoriques :[19]

Les équations des tensions statoriques dans le système d'axes (α, β) lié au stator du MSAP

Sont :

$$\begin{cases} v_{s\alpha} = r_s i_{s\alpha} + \phi_{s\alpha} \text{ (III.4)} \\ v_{s\beta} = r_s i_{s\beta} + \phi_{s\beta} \end{cases}$$

Les tensions $v_{s\alpha}$, $v_{s\beta}$ sont obtenues à partir des commandes C_{K1} , C_{K2} , C_{K3} et des mesures de la tension U_c , en utilisant la transformée de concordai.

$$\begin{cases} v_{s\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_c (C_{K1} - \frac{1}{2} (C_{K2} + C_{K3})) \\ v_{s\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_c (C_{K2} + C_{K3}) \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

On peut écrire alors :

$$\bar{V}_s = v_{s\alpha} + j v_{s\beta}$$

Les flux statoriques sont calculés en utilisant les expressions suivantes :

$$\begin{cases} \phi_{s\alpha} = \int_0^t (v_{s\alpha} - r_s i_{s\alpha}) dt \\ \phi_{s\beta} = \int_0^t (v_{s\beta} - r_s i_{s\beta}) dt \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

La formulation discrète de cet estimateur, adaptée à une période d'échantillonnage T_e , est la suivante :

$$\begin{cases} \phi_{s\alpha}(n) = \phi_{s\alpha}(n-1) + [v_{s\alpha}(n-1) - r_s i_{s\alpha}(n-1)] T_e \\ \phi_{s\beta}(n) = \phi_{s\beta}(n-1) + [v_{s\beta}(n-1) - r_s i_{s\beta}(n-1)] T_e \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

Le calcul du module et de la phase du flux est réalisé de la manière suivante :

$$\phi_s = \sqrt{\phi_{s\alpha}^2 + \phi_{s\beta}^2} \quad (\text{III.8})$$

$$\angle \phi_s = \arctg \frac{\phi_{s\beta}}{\phi_{s\alpha}} \quad (\text{III.9})$$

III.9.2 Estimation du couple électromécanique :

Le couple électromagnétique peut être déduit à partir de l'estimation du flux et de la mesure du courant en utilisant l'équation (2.11) qui exprime le couple en fonction du flux et du courant statoriques. [19]

$$C_e = \frac{3}{2} p (\phi_{s\alpha} i_{s\alpha} - \phi_{s\beta} i_{s\beta}) \quad (\text{III.10})$$

III.10 Elaboration du vecteur de commande :

III.10.1 Le correcteur du flux :

Le but de ce type de correcteur est de maintenir l'extrémité du vecteur dans une couronne circulaire, comme illustré dans la figure (II.4). La sortie du correcteur est représentée par une variable booléenne (C_{flx}) qui indique directement si l'amplitude du flux doit être augmentée ($C_{flx} = 1$) ou diminuée ($C_{flx} = 0$) afin de maintenir : [21][9]

$$|\phi_{sref} - \phi_s| \leq \Delta \phi_s$$

On peut écrire alors

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{si } \Delta\phi_s > \varepsilon_\phi \text{ alors} & k_\phi = 1 \\ \text{si } 0 \leq \Delta\phi_s \leq \varepsilon_\phi \text{ et } d\Delta\phi_s/dt > 0 & \text{alors} & k_\phi = 0 \\ \text{si } 0 \leq \Delta\phi_s \leq \varepsilon_\phi \text{ et } d\Delta\phi_s/dt < 0 & \text{alors} & k_\phi = 1 \\ \text{si } 0 \leq \Delta\phi_s < -\varepsilon_s & \text{alors} & k_\phi = 0 \end{array} \right.$$

$k_\phi = 0$ Signifier qu'il faut réduire le flux.

$k_\phi = 1$ Signifier qu'il faut augmenter le flux.

Ce régulateur à hystérésis à deux niveaux convient parfaitement pour avoir des bonnes performances dynamiques.

III.10.2 Le correcteur du couple

Le rôle du correcteur de couple est de garantir que le couple reste dans les limites requises, afin de maintenir :

$$|C_e^* - C_e| \leq \varepsilon_{C_e}$$

C_e^* : La consigne du couple.

Cependant, contrairement au contrôle du flux, le couple peut être positif ou négatif en fonction du sens de rotation de la machine. Deux solutions sont possibles :

- Un correcteur à deux niveaux utilisant l'hystérésis.
- Un correcteur à trois niveaux utilisant l'hystérésis.

III.10.2.1 Le correcteur à deux niveaux

Ce correcteur est similaire à celui utilisé pour le contrôle du module de ϕ_s . Il permet le contrôle du couple uniquement dans un seul sens de rotation. Ainsi, seuls les vecteurs V_{i+1} et V_{i+2} peuvent être sélectionnés pour faire varier le flux. Par conséquent, la réduction du couple est réalisée uniquement en sélectionnant des vecteurs nuls. Avec ce correcteur, pour inverser le sens de rotation de la machine, il est nécessaire de croiser deux phases de la machine. Cependant, ce correcteur est plus simple à mettre en œuvre. [18]



Figure. III. 5 : Comparateur à hystérésis à deux niveaux

III.10.2.2 Le correcteur à hystérésis à trois niveaux

Le correcteur à hystérésis à trois niveaux (-1, 0, 1) offre un contrôle bidirectionnel du moteur, permettant un couple positif ou négatif, où ($Ccpl$) représente l'état de sortie du comparateur et ε_{C_e} correspond à la limite de la bande d'hystérésis (voir figure III.6).[21]

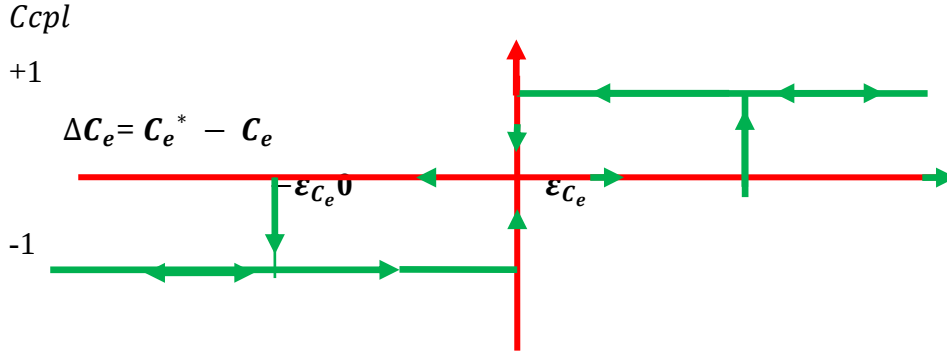


Figure III-6: Comparateur à hystérésis à trois niveaux utilisé pour le réglage du couple Électromagnétique

On peut écrire alors :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{Si } \Delta C_e > \varepsilon_{C_e} \text{ alors } & Ccpl = 1 \\ \text{Si } 0 \leq \Delta C_e \leq \varepsilon_{C_e} \text{ et } \frac{d\Delta C_e}{dt} > 0 & \text{alors } Ccpl = 0 \\ \text{Si } 0 \leq \Delta C_e \leq \varepsilon_{C_e} \text{ et } \frac{d\Delta C_e}{dt} < 0 & \text{alors } Ccpl = 1 \\ \text{Si } \Delta C_e < -\varepsilon_{C_e} \text{ alors } & Ccpl = -1 \\ \text{Si } -\varepsilon_{C_e} \leq \Delta C_e < 0 \text{ et } \frac{d\Delta C_e}{dt} > 0 & \text{alors } Ccpl = 0 \\ \text{Si } -\varepsilon_{C_e} \leq \Delta C_e < 0 \text{ et } \frac{d\Delta C_e}{dt} < 0 & \text{alors } Ccpl = -1 \end{array} \right.$$

En utilisant un comparateur à hystérésis à trois niveaux, une différence (ΔC_e) est introduite entre le couple électromagnétique de référence et celui estimé (C_e^*). Ce comparateur génère une sortie ($Ccpl=1$) pour augmenter le couple, ($Ccpl=-1$) pour le réduire, et ($Ccpl=0$) pour le maintenir constant dans une bande ε_{C_e} autour de la référence. L'ajout de niveaux supplémentaires dans ce correcteur vise à réduire la fréquence moyenne de commutation des interrupteurs, car la dynamique du couple est généralement plus rapide que celle du flux. De plus, ce correcteur permet une diminution rapide du couple. Par exemple, pour réduire sa valeur, en plus des vecteurs nuls (arrêt de la rotation de $\emptyset_s$), on peut appliquer les vecteurs V_{i+1} ou V_{i+2} si l'on choisit un sens de rotation positif (sens

trigonométrique). Dans ce cas, le flux ϕ_r rattrapera plus rapidement le flux ϕ_s , car ce dernier ne se contente pas simplement de "l'attendre" (cas des vecteurs nuls), mais "va à sa rencontre" en inversant le sens de rotation de ϕ_s . [21]

En utilisant un comparateur à hystérésis à trois niveaux, une différence (ΔC_e) est introduite entre le couple électromagnétique de référence et celui estimé (C_e^*). Ce comparateur génère une sortie ($C_{cpl}=1$) pour augmenter le couple, ($C_{cpl}=-1$) pour le réduire, et ($C_{cpl}=0$) pour le maintenir constant dans une bande ε_{C_e} autour de la référence. L'ajout de niveaux supplémentaires dans ce correcteur vise à réduire la fréquence moyenne de commutation des interrupteurs, car la dynamique du couple est généralement plus rapide que celle du flux. [18] De plus, ce correcteur permet une diminution rapide du couple. Par exemple, pour réduire sa valeur, en plus des vecteurs nuls (arrêt de la rotation de ϕ_s), on peut appliquer les vecteurs V_{i+1} ou V_{i+2} si l'on choisit un sens de rotation positif (sens trigonométrique). Dans ce cas, le flux ϕ_r rattrapera plus rapidement le flux ϕ_s , car ce dernier ne se contente pas simplement de "l'attendre" (cas des vecteurs nuls), mais "va à sa rencontre" en inversant le sens de rotation de ϕ_s . [17]

III.11 Elaboration de la table de commutation :

La création de la table de vérité se base sur les erreurs du flux ($\Delta\phi_s$) et du couple (ΔC_e), ainsi que sur la position du vecteur de flux statoriques ($N=1\dots,6$). Le plan complexe est divisé en six secteurs angulaires, comme illustré dans la figure III.8. Cela permet de déterminer, pour chaque secteur, la séquence de commande des interrupteurs de l'onduleur correspondant aux différents états des grandeurs de contrôle ($\Delta\phi_s$ et ΔC_e), en fonction du comportement du flux et du couple par rapport à l'application d'un vecteur de tension statoriques. Le tableau (III.1) résume l'effet combiné de chaque configuration sur le flux statoriques et le couple électromagnétique.

	AUGMENTATION	DIMINUTION
ϕ_s	$V_{i-1}, V_i \text{ et } V_{i+1}$	$V_{i+2}, V_{i+3} \text{ et } V_{i-2}$
C_e	$V_{i+1} \text{ et } V_{i+2}$	$V_{i-1} \text{ et } V_{i-2}$

Tableau III-1 : commutation. [30]

Les tableaux ci-dessous fournissent une synthèse générale des séquences de tensions actives à appliquer pour augmenter ou diminuer le module du flux statoriques et le couple électromagnétique en fonction du secteur.

Flux	N = 1	N = 2	N = 3	N = 4	N = 5	N = 6
$\phi_s \uparrow$	V ₆ , V ₁ , V ₂	V ₁ , V ₂ , V ₃	V ₂ , V ₃ , V ₄	V ₃ , V ₄ , V ₅	V ₄ , V ₅ , V ₆	V ₅ , V ₆ , V ₁
$\phi_s \downarrow$	V ₃ , V ₄ , V ₅	V ₄ , V ₅ , V ₆	V ₅ , V ₆ , V ₁	V ₆ , V ₁ , V ₂	V ₁ , V ₂ , V ₃	V ₂ , V ₃ , V ₄

Tableau III-2 : Commande du flux [30]

Flux	N = 1	N = 2	N = 3	N = 4	N = 5	N = 6
Ce $\uparrow$	V ₃ , V ₂	V ₄ , V ₃	V ₅ , V ₄	V ₆ , V ₅	V ₁ , V ₆	V ₂ , V ₁
Ce $\downarrow$	V ₆ , V ₅	V ₁ , V ₆	V ₂ , V ₁	V ₃ , V ₂	V ₄ , V ₃	V ₅ , V ₄

Tableau III-3 : Commande du couple [30]

En fin de compte, la comparaison des tables de commande précédentes permet la synthèse finale d'une seule table de commande, qui peut ensuite être décomposée en deux autres tables distinctes :

Flux	Couple	N = 1	N = 2	N = 3	N = 4	N = 5	N = 6	correcteur
CFlx=1	C _{cpl} =1	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆	V ₁	2 Niveaux
	C _{cpl} =0	V ₇	V ₀	V ₇	V ₀	V ₇	V ₀	
	C _{cpl} =-1	V ₆	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	3 Niveaux
CFlx=0	C _{cpl} =1	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆	V ₁	V ₂	2 Niveaux
	C _{cpl} =0	V ₀	V ₇	V ₀	V ₇	V ₀	V ₇	3 Niveaux
	C _{cpl} =-1	V ₅	V ₆	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	

Tableau III-4 : Commutation avec séquences nulles [30]

Flux	couple	N = 1	N = 2	N = 3	N = 4	N = 5	N = 6	correcteur
CFlx=1	C _{cpl} =1	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆	V ₁	2 Niveaux
	C _{cpl} =0	V ₇	V ₀	V ₇	V ₀	V ₇	V ₀	
	C _{cpl} =-1	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆	3 Niveaux
CFlx=0	C _{cpl} =1	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆	V ₁	V ₂	2 Niveaux
	C _{cpl} =0	V ₄	V ₅	V ₆	V ₁	V ₂	V ₃	
	C _{cpl} =-1	V ₅	V ₆	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	3 Niveaux

Tableau III-5 : Commutation avec séquences non nulles

Lorsque l'objectif est de maintenir le couple dans sa bande d'hystérésis, on utilise les vecteurs nuls (V_0 , V_7).[30]

III.12 Structure Générale de la DTC Appliquée au MSAP :

La structure d'une commande par DTC appliquée au MSAP est représentée sur la figure III.6 :

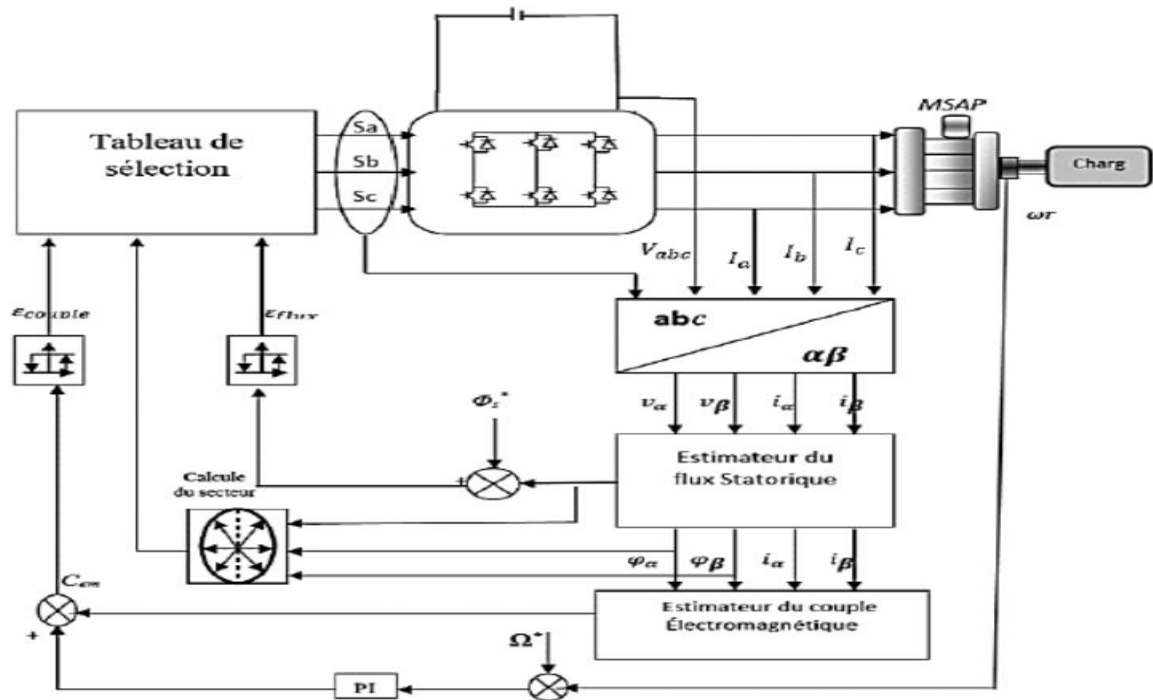


Figure III.7 : Schéma de la structure générale du contrôle direct du couple de la MSAP

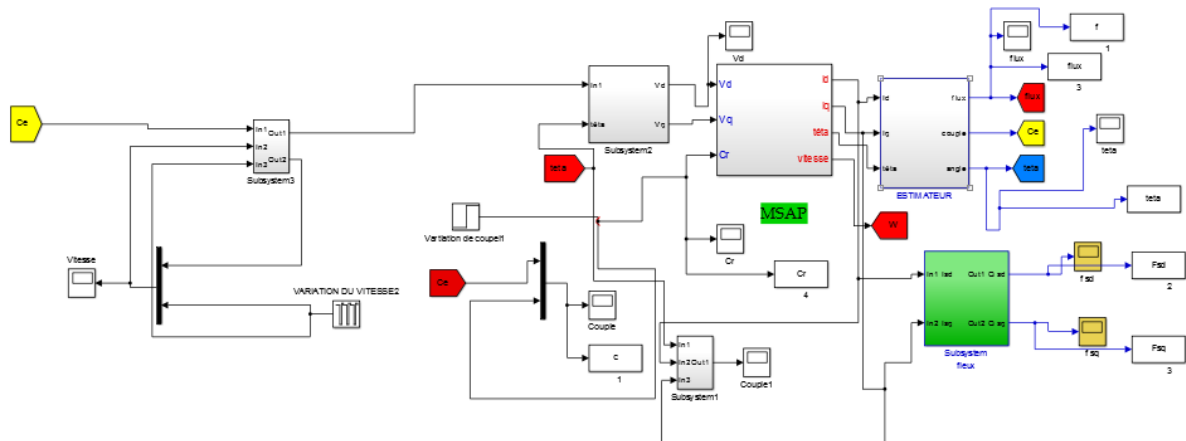


Figure III.8: Schéma bloc de la commande direct du couple appliquée à la MSAP

III.13 Résultats de la simulation et interprétations :

- Test1 : à vide $C_r=0$

Les figures ci-dessous présentent les résultats de simulation pour un flux de référence à 0.15Wb.

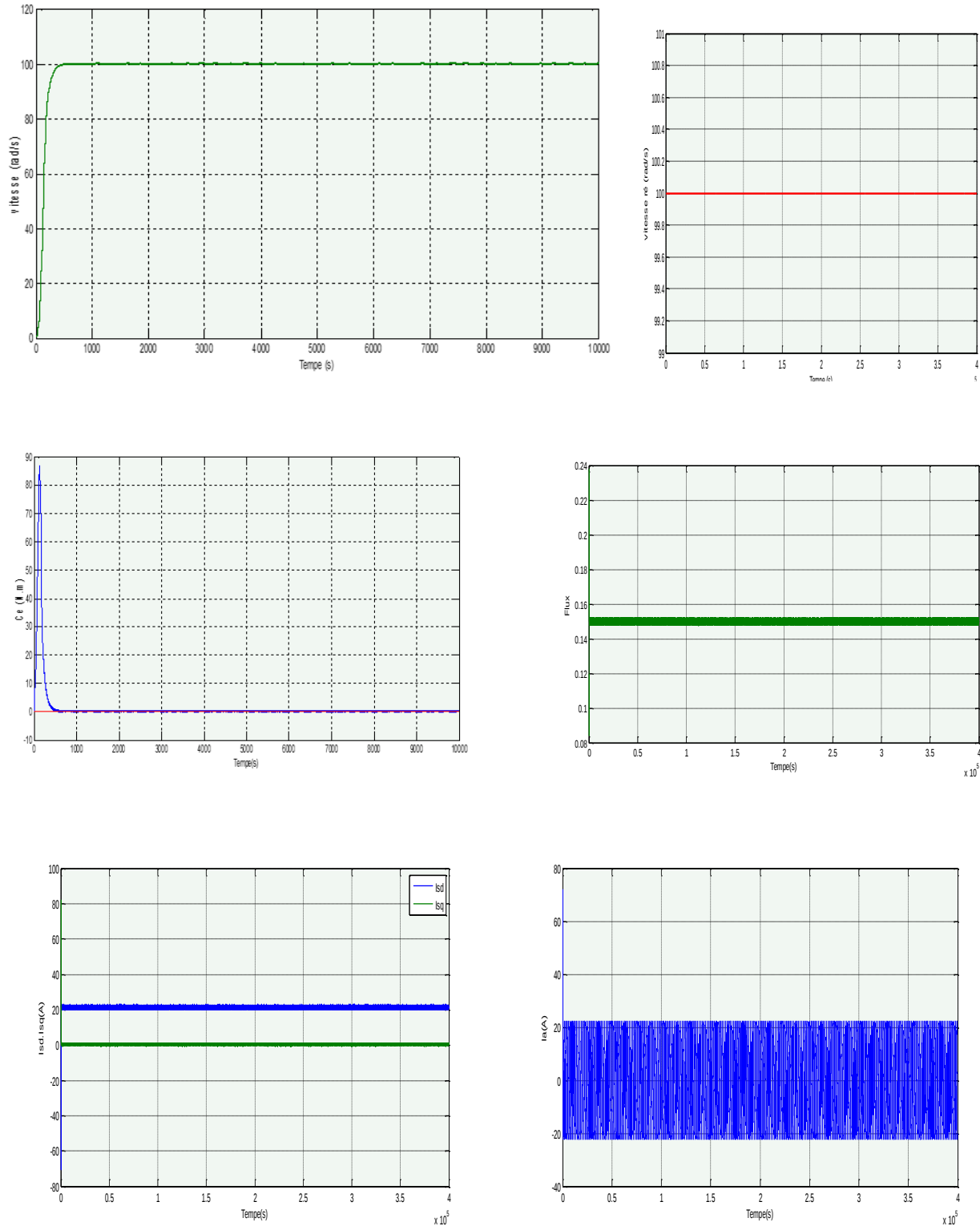


Figure III.9: Résultat de simulation de la MSAP commandée par DTC (à vide $C_r=0$ N.m, $w=100$ rad/s).

Après le démarrage de la machine, on observe un couple élevée, suivi d'une diminution et d'une stabilisation autour de zéro avec des oscillations, après 0.03 s, étant donné l'absence de charge. Au démarrage, le courant statoriques reste constant.

Test 2 : Test variation de vitesse : pour une durée de $T=4s$ $C_r=4Nm$

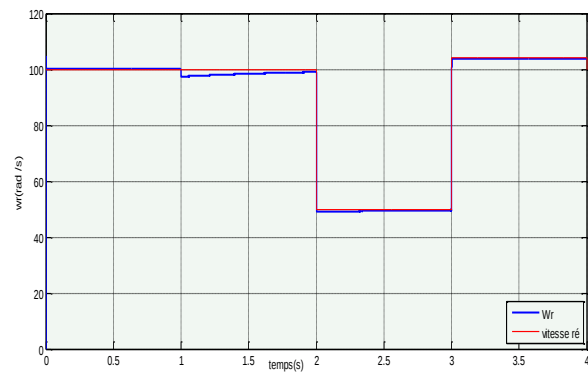
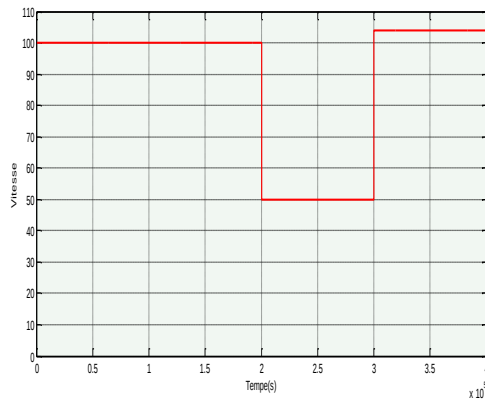
Dans ce test on valide à la fois la réponse de la commande du moteur pour une variation de vitesse mécanique de sortie pour une diminution a l'instant $T=2s$ et puis une augmentation à l'instant $t T=2s$ associé à un couple de charge a l'instant $T=1s$.

la variation de vitesse est résumée comme suit :

$$\omega = 100 \text{ rad/s Si } 0s < T < 2s$$

$$\omega = 50 \text{ rad /s Si } 2s < T < 3s$$

$$\omega = 104 \text{ rad//s Si } 3s < T < 4s$$



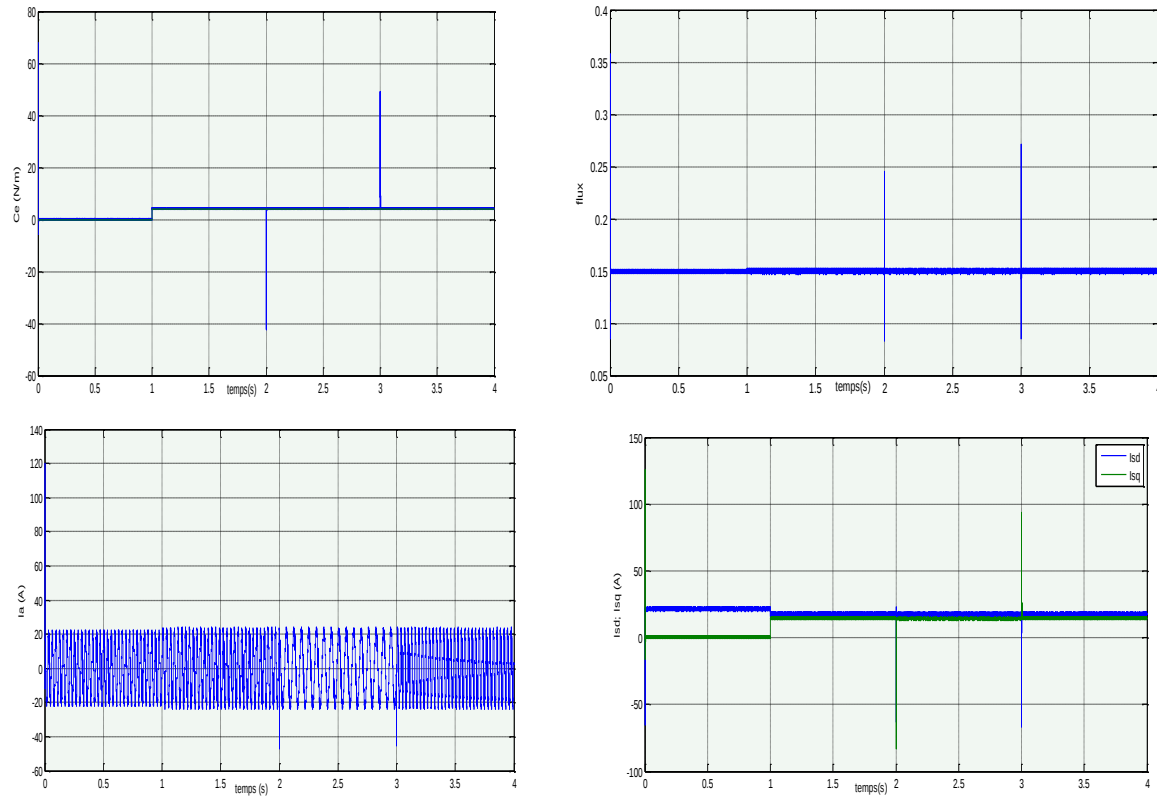
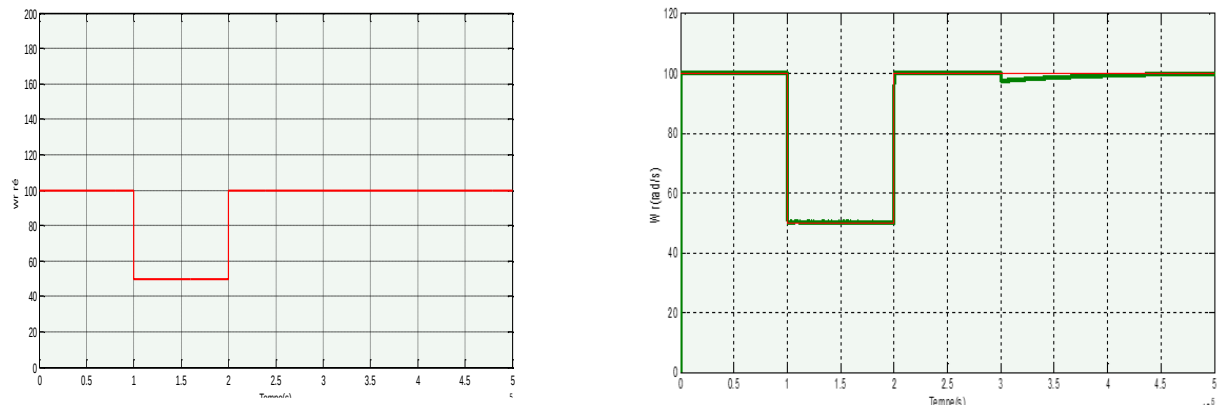


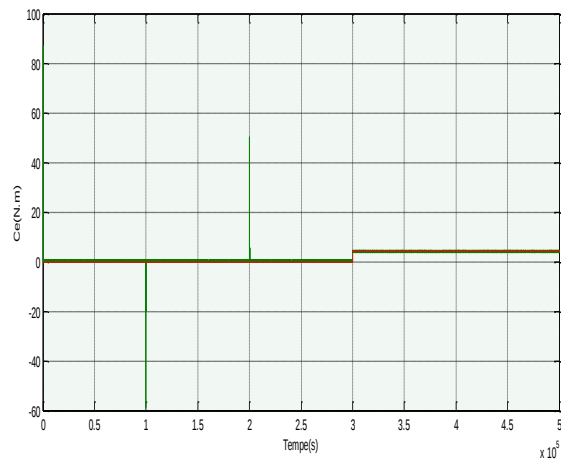
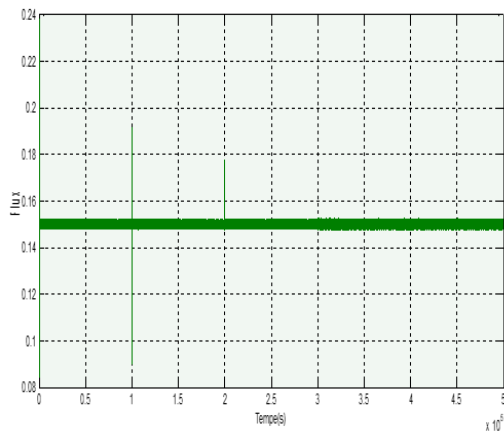
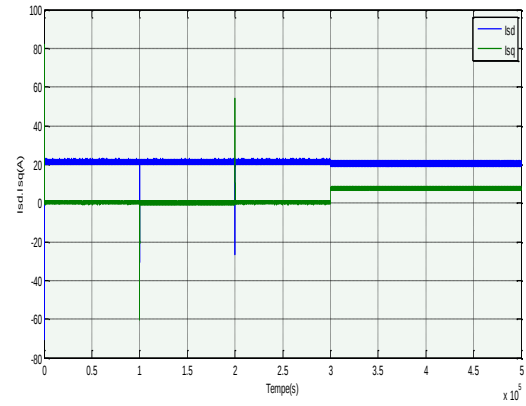
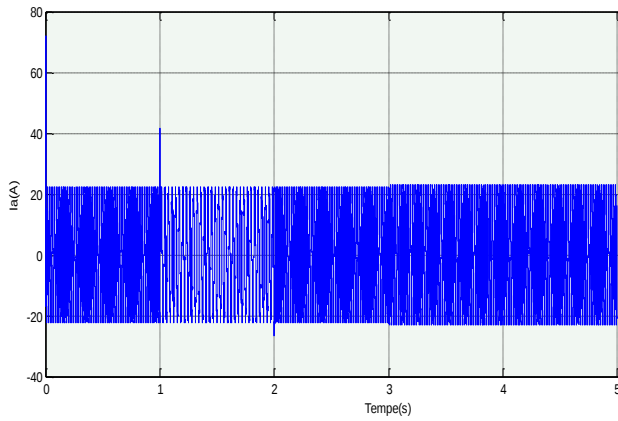
Figure III.10. Grandeurs électriques, mécaniques et magnétiques de la DTC en cas de variation de la vitesse de la MS

Interprétations :

Lors de ce test, nous avons observé une réponse positive du système, où la vitesse réelle et estimée suit rapidement leur nouvelle référence. Les courants statoriques présentent des ondulations lors de la variation de vitesse, avec un pic au démarrage.

Test 2 : Test variation de vitesse : pour une durée de $T=3s$ $Cr=4$



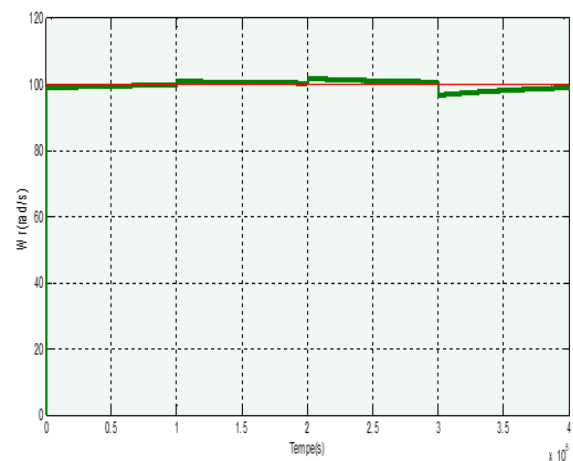
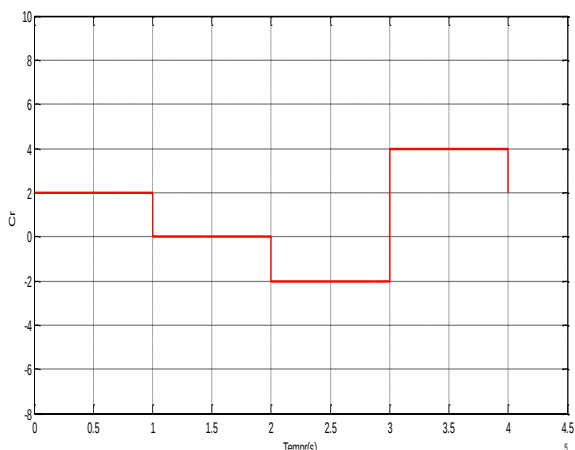


Test 3 : variation de couple :

Dans ce test on réalise une variation du couple suivant la séquence ci dessous :

$$t = [0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 2 \ 2 \ 3 \ 3 \ 4]s$$

$$C_r = [0 \ 2 \ 2 \ 0 \ 0 \ -2 \ -2 \ 4 \ 4]N.m$$



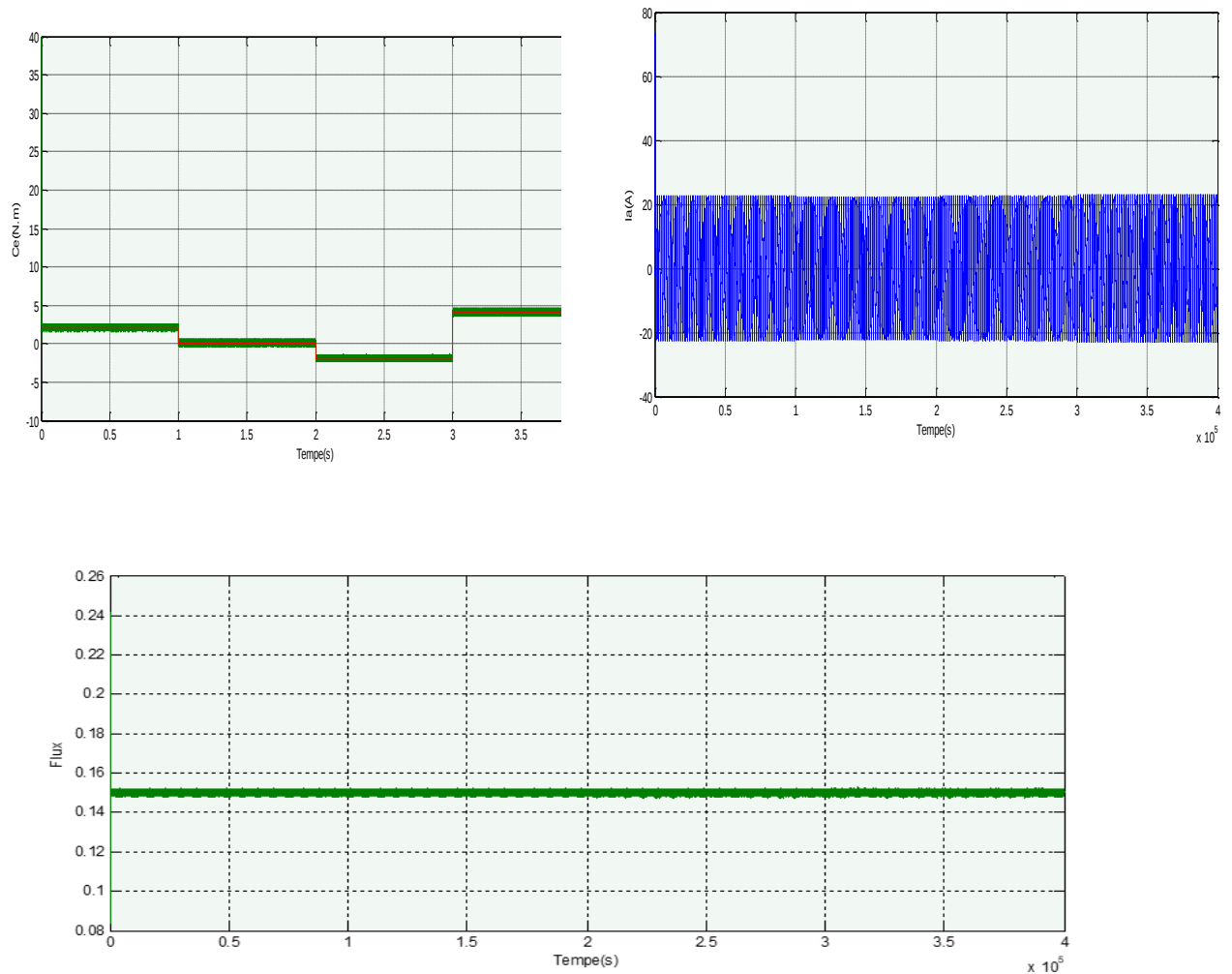


Figure III.11. Grandeurs électriques, mécaniques et magnétiques de la DTC en cas de variation de couple de la MSAP

Interprétations du résultat :

Dans cette simulation, nous constatons que le couple suit parfaitement les valeurs de consigne et reste dans la bande d'hystérésis préalablement définie. De plus, l'évolution du flux statoriques est conforme à la référence fixée à 0.12Wb. D'autre part, la vitesse n'est pas affectée par les variations du couple de charge. En revanche, les courants statoriques sont influencés par les variations de la charge

III.14 Simulation de la DTC avec véhicule électriques :

le schéma bloc de la figure III.12 représente la commande DTC appliqué au moteur synchrone à aimants permanents

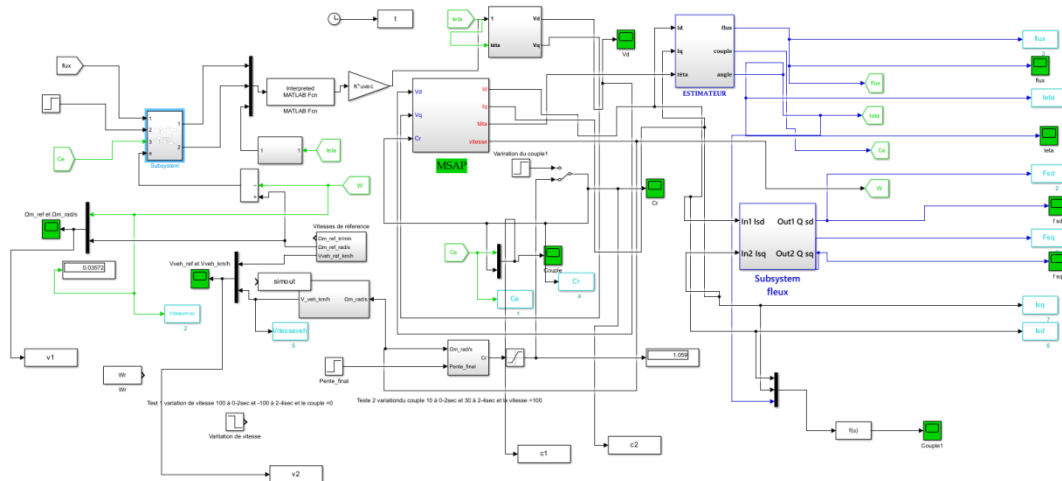
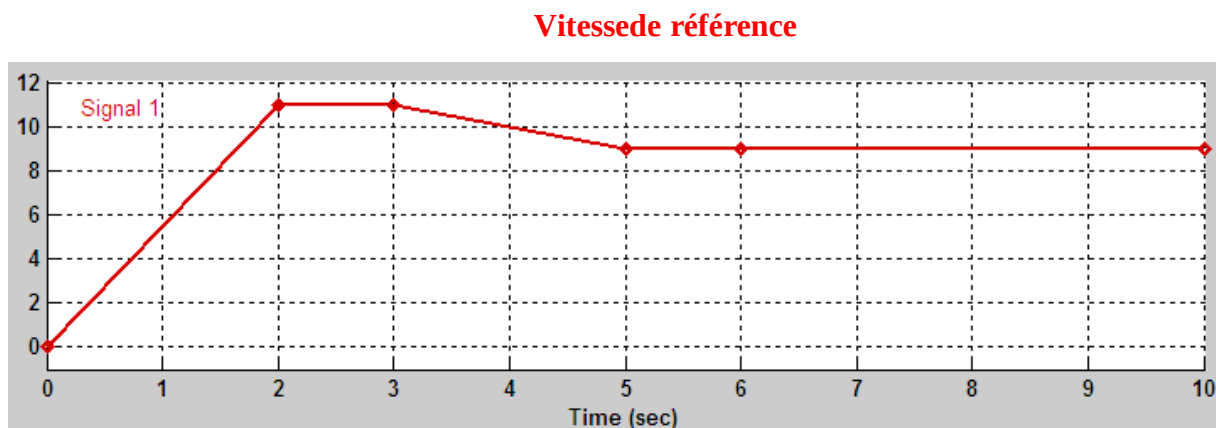


Figure III.12. Schéma bloc de l'ensemble DTC-Véhicule électrique

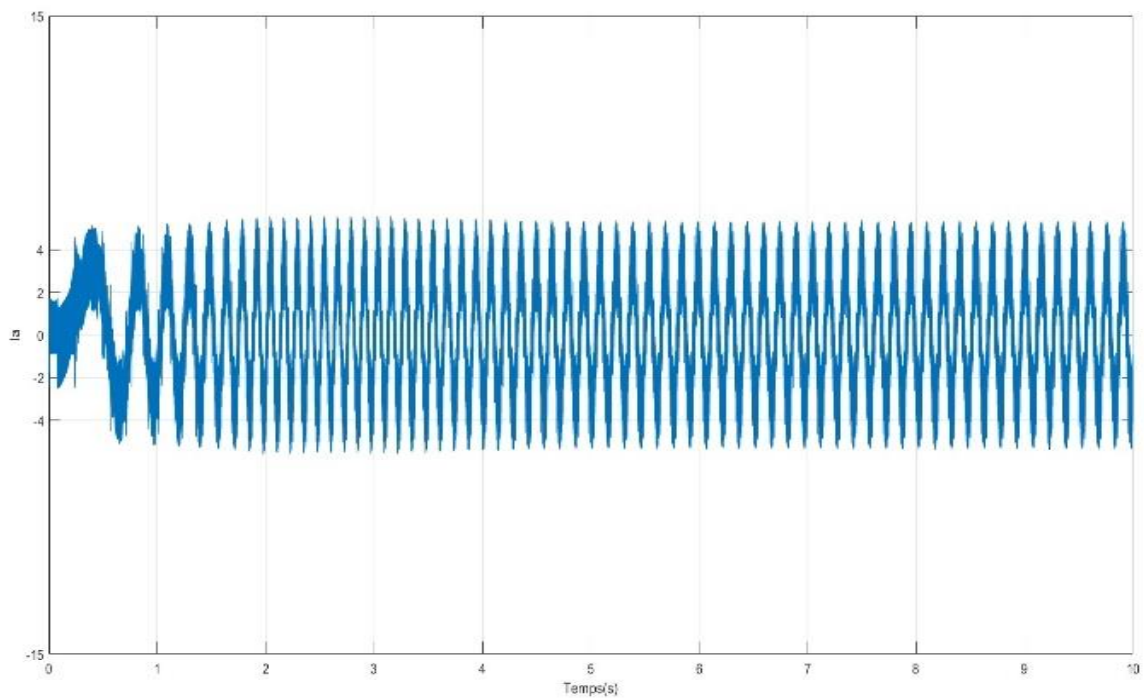
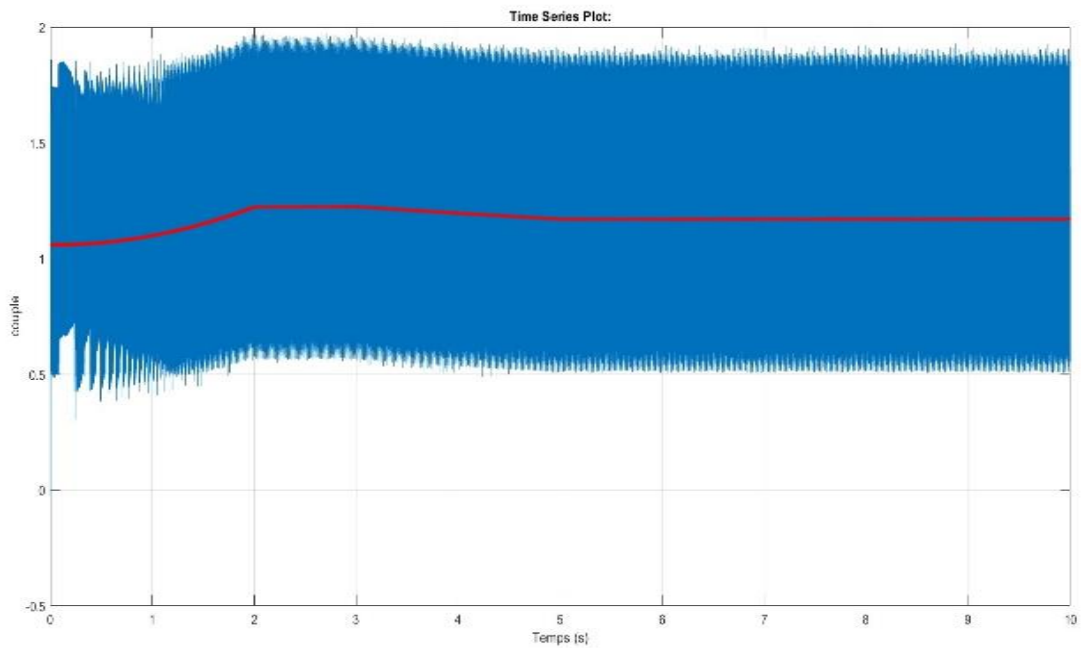
Dans la partie suivante nous allons simulé la réponse de la commande proposée pour une consigne de vitesse variable suivie d'une variation de la pente de la route, ou nous vérifions la poursuite de la vitesse de sortie.

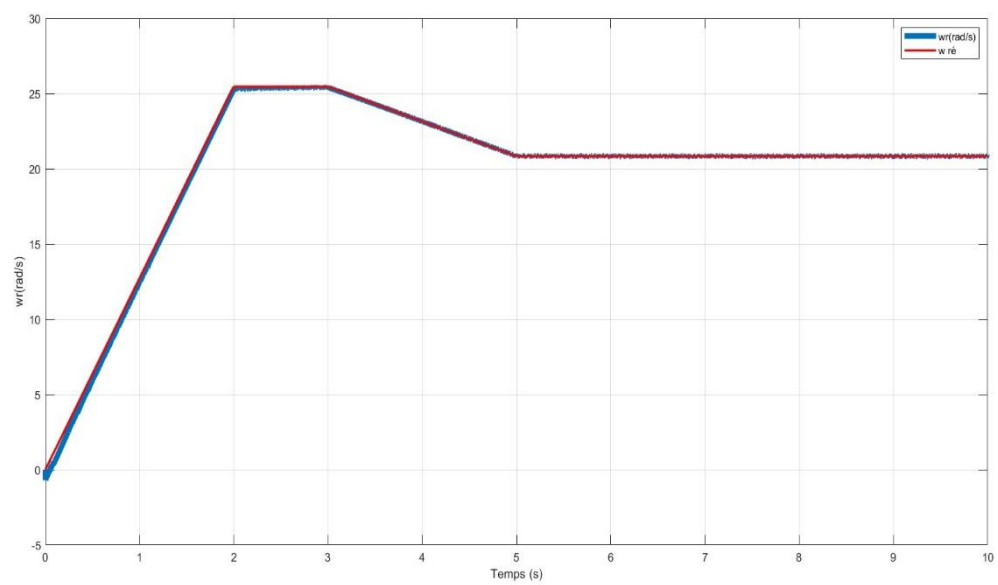
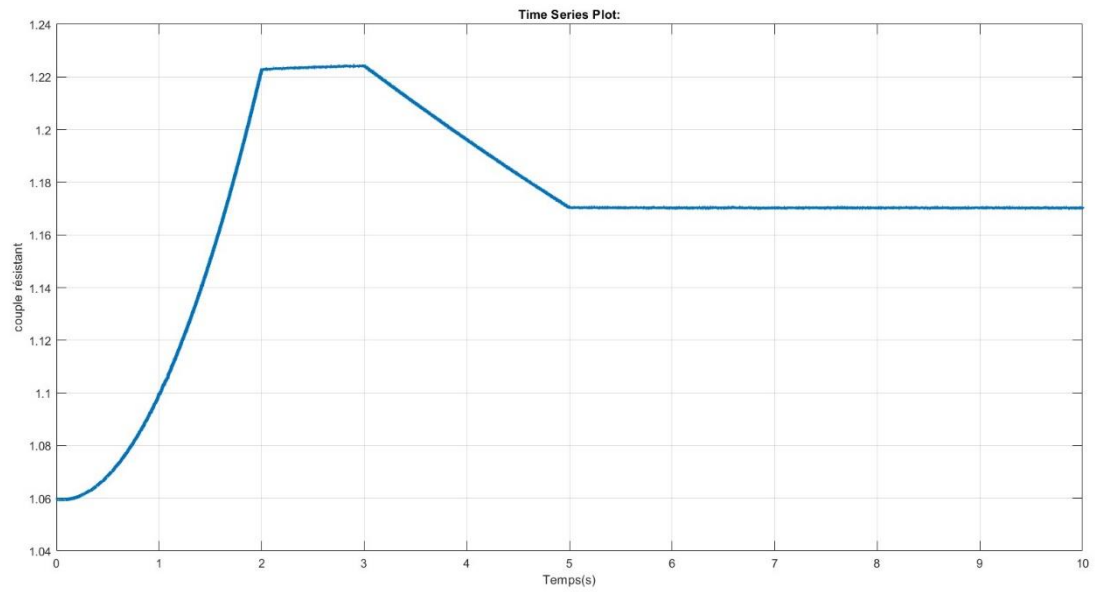
La Consigne de la vitesse est donne par la figure suivante :



Test 1 : $p=0\%$

Le premier test concerne un chemin plat donc une pente nulle.





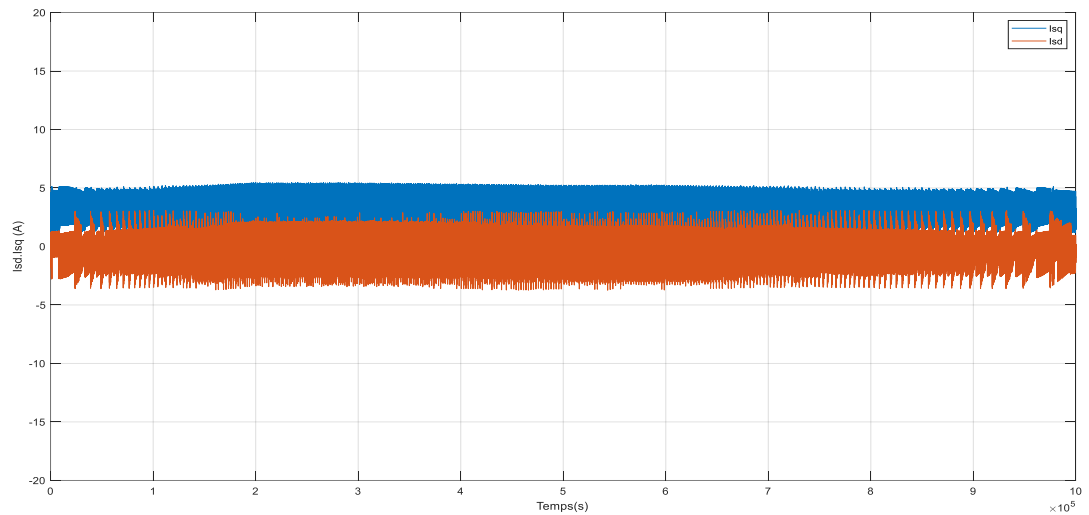
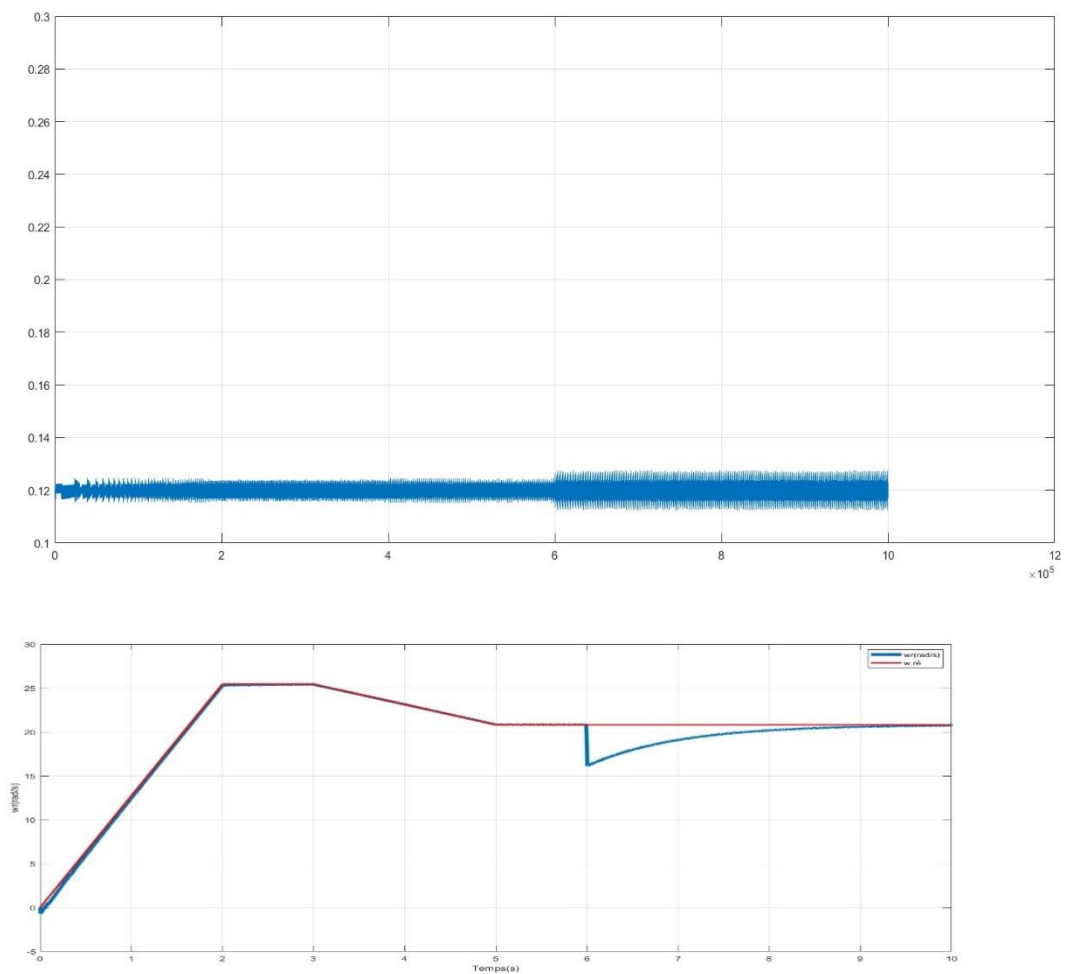
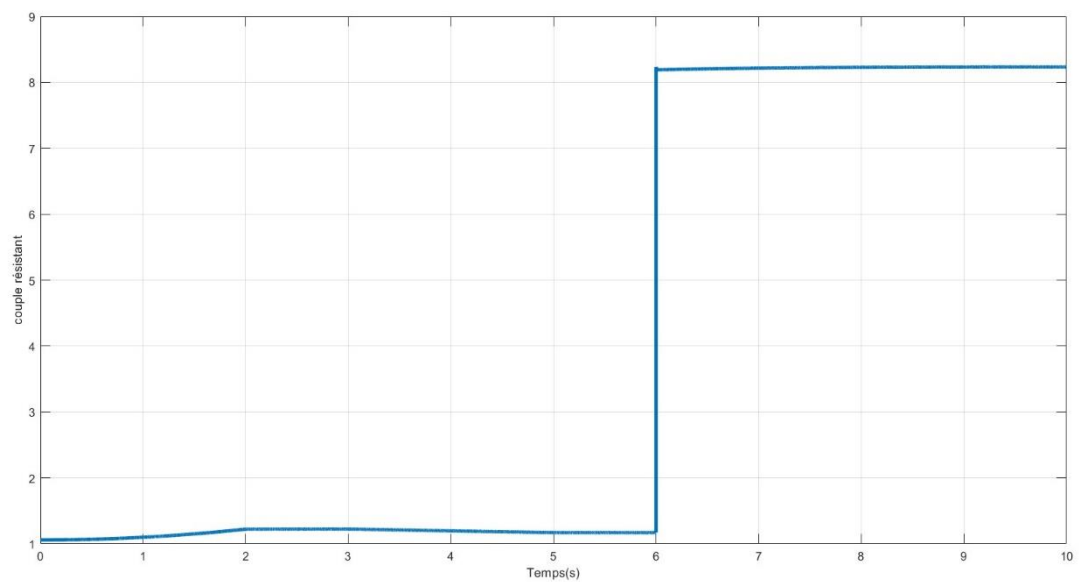
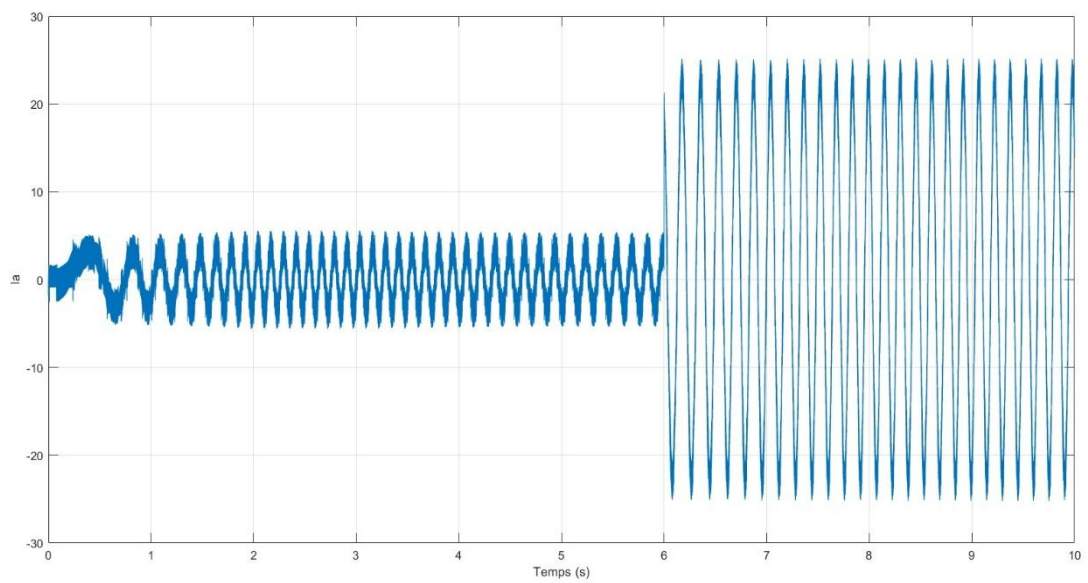


Figure III.13. Grandeurs électriques, mécaniques et magnétiques de la DTC en cas de pente=0% de la véhicule électrique

- Test 02: $p=10\%$





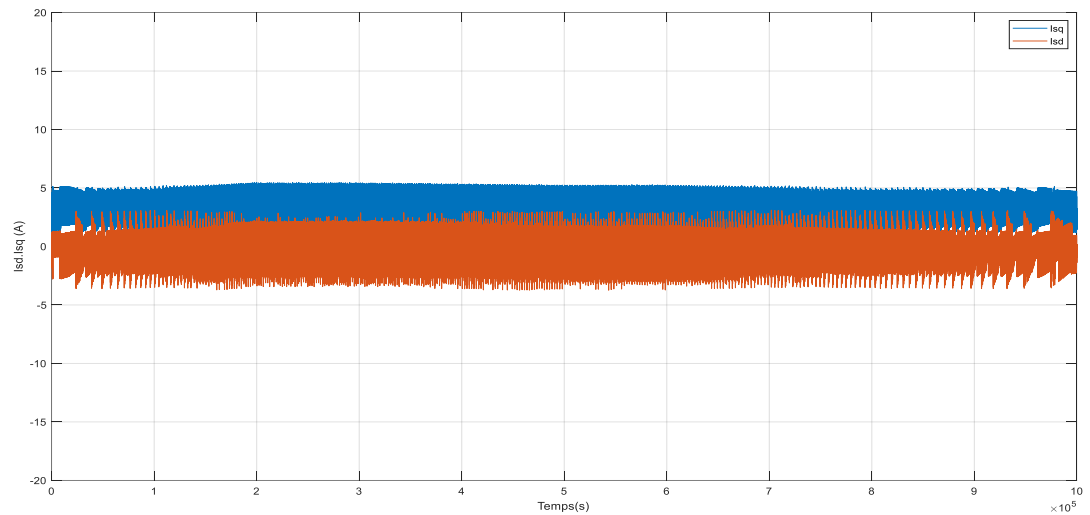
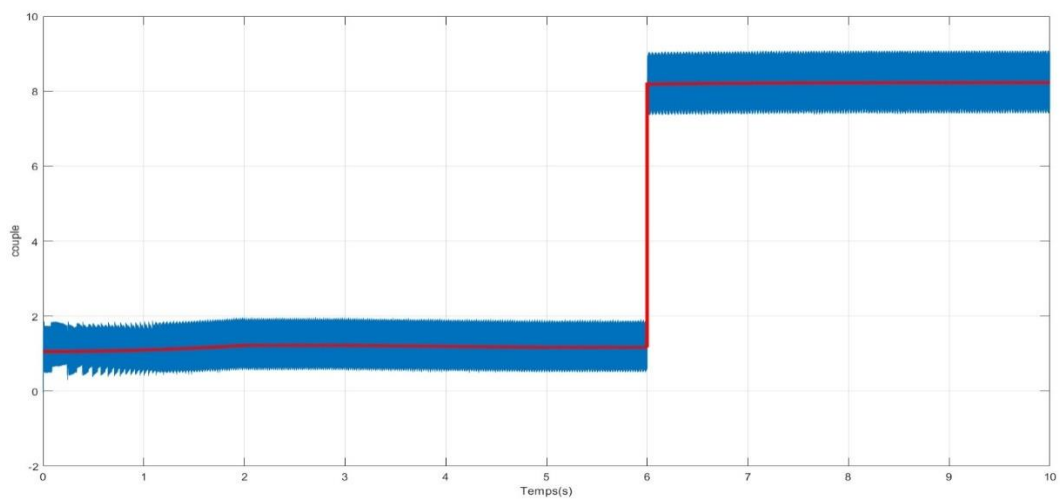
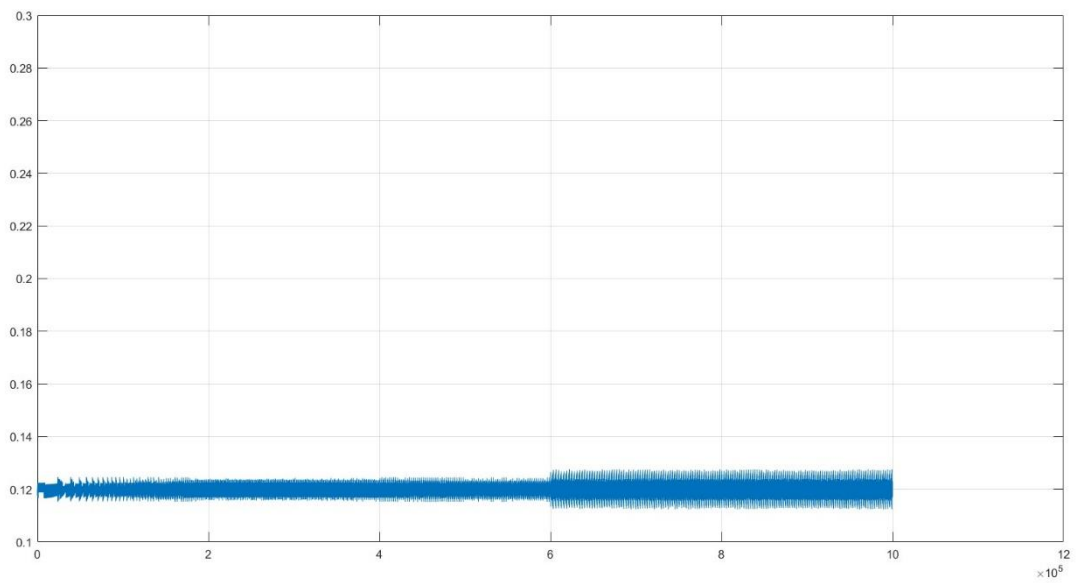
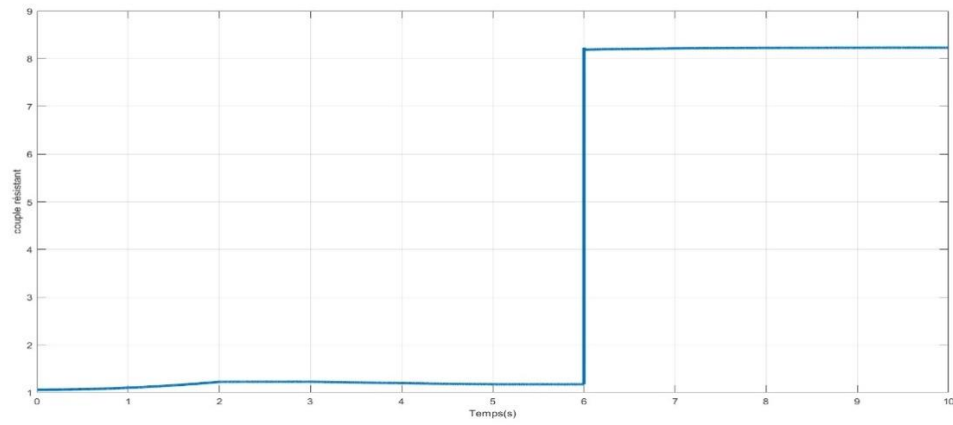
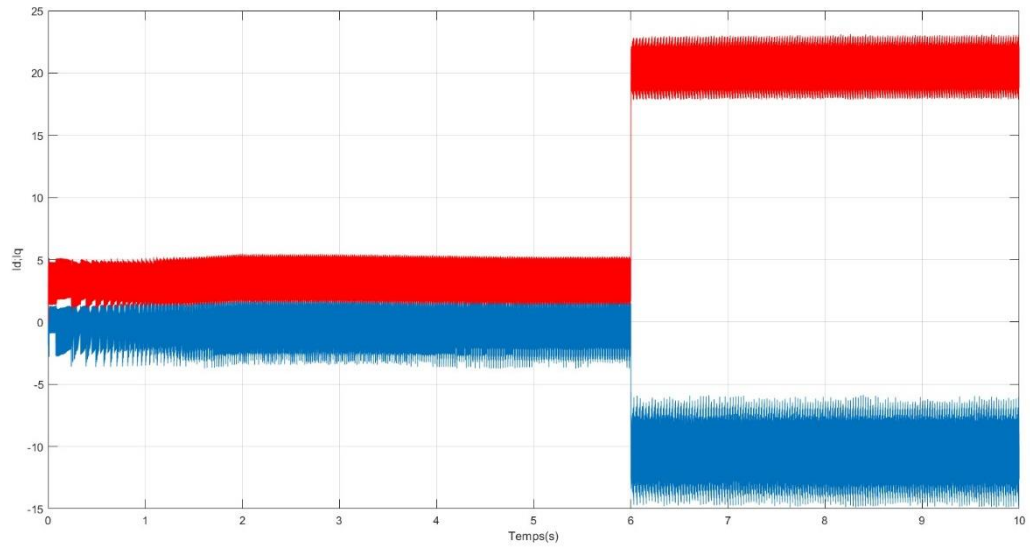


Figure III.14. Grandeurs électriques, mécaniques et magnétiques de la DTC en cas de pente=10% de la véhicule électrique

Test 3 : $p=-10\%$





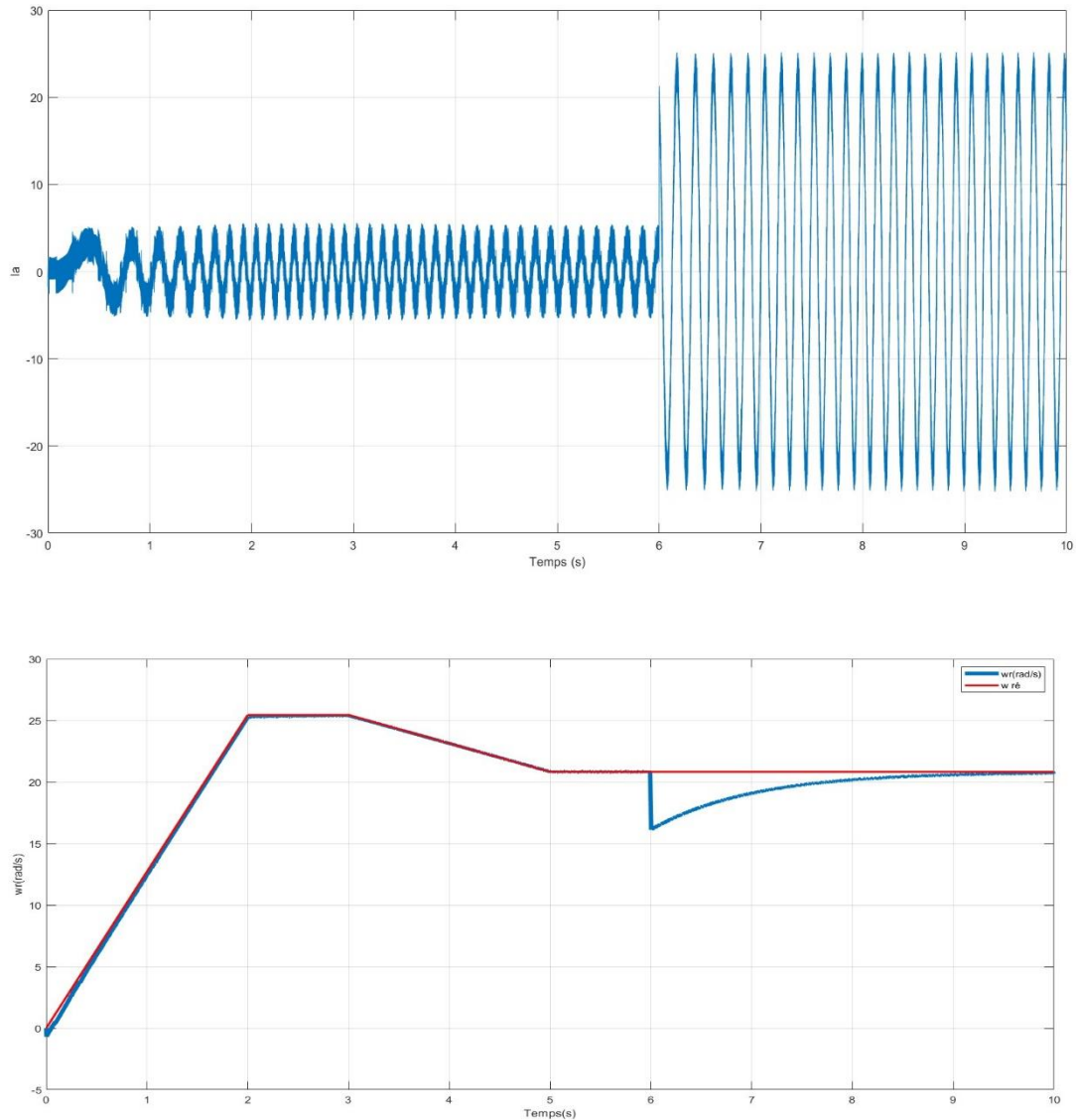


Figure III.15. Grandeurs électriques, mécaniques et magnétiques de la DTC en cas de pente = -10% de la véhicule électrique

Intrépétations :

Lors du démarrage du moteur, on observe que le couple électromagnétique a différents effets :

1) Pour une pente de 0%, lorsque la charge résistante est faible (C_r faible), les vitesses se stabilisent à des valeurs prédéterminées et les courants restent presque les mêmes. Cela est dû à la force nécessaire pour surmonter l'inertie du véhicule.

2) Pour une montée de pente de 10%, le C_r est élevé, ce qui entraîne une diminution de la vitesse. La machine absorbe un courant important pour développer un couple suffisant pour surmonter toutes

les charges résistantes. Ensuite, la vitesse se stabilise au régime permanent à des valeurs prédéterminées.

3) Pour une descente de pente de -10%, on observe une augmentation de la vitesse et une diminution progressive du couple électromagnétique au démarrage du véhicule. Lorsque la pente devient de 0%, le couple se stabilise au régime permanent et la vitesse se stabilise à une valeur prédéterminée, indiquant que le moteur fonctionne en mode générateur pour récupérer de l'énergie vers la batterie.

Les simulations présentées dans les figures précédentes sont satisfaisantes, ce qui indique que cette technique de commande peut être utilisée pour un véhicule électrique. La commande assure un bon suivi de la consigne et permet de compenser efficacement les perturbations liées à la charge. De plus, même si le C_r varie en fonction de la pente, on constate que le DTC assure une régulation précise de la vitesse.

III.15 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté et validé la commande directe du couple de la machine synchrone à aimants permanents en fonctionnement moteur ou dans la première partie de ce chapitre nous avons donné une approche théorique de la DTC.

Dans la deuxième partie nous avons simulé via Simulink sous Matlab. le modèle du moteur avec la commande DTC ainsi que l'association moteur - véhicule électrique qui constitue notre cible dans cette étude.

On peut conclure après les résultats de simulation que la DTC présente de bonnes performances dynamiques et statiques de couple de vitesse et de flux.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

La modélisation et la simulation de la dynamique des véhicules jouent un rôle essentiel dans la réduction des coûts de développement et la minimisation des essais expérimentaux pour la conception de véhicules sûrs et confortables.

Pour concevoir des véhicules innovants fiables et sécurisés, il est nécessaire de disposer d'une modélisation précise de la dynamique adaptée au mouvement du véhicule, garantissant ainsi une mobilité stable et de bonnes performances au niveau du moteur.

L'objectif de cette étude était d'établir un modèle représentant la dynamique latérale du véhicule électrique. À cette fin, nous avons proposé un modèle détaillé prenant en compte les forces extérieures et les résistances du véhicule.

Dans cette perspective, Nous avons pris connaissance des composants et des caractéristiques d'une voiture électrique et MSAP.

Et Nous avons brièvement décrit la modélisation MSAP. Nous avons appliqué la transformée PARK pour convertir la machine triphasée en une machine standard à deux axes, ce qui facilite la résolution des équations électromagnétiques de la machine. Nous avons ensuite procédé à la conception d'un onduleur de tension triphasé, Nous avons lié et ajouté la dynamique du véhicule à MSAP, Nous avons vu à partir des résultats de simulation sur une capacité MSAP et Sur l'excellent fonctionnement de la voiture.

D'autre part, nous avons abordé les concepts de la stratégie de contrôle direct du couple du moteur du véhicule électrique, qui permet de déterminer des paramètres de contrôle tels que le flux statorique et le couple électromagnétique à partir de mesures de courants et de tensions statoriques, et nous avons vu d'après les résultats que le contrôle DTC permet une régulation précise du couple et de la vitesse sans conversion préalable, et fournit une réponse dynamique rapide et une meilleure précision de contrôle.

En fin de compte, nous concluons que le choix idéal pour les moteurs électriques qui nécessitent un contrôle précis du couple et de la vitesse est de s'appuyer sur des machines synchrones à aimants permanents pour fournir des performances élevées, une réponse dynamique rapide et leur capacité

A fonctionner à des vitesses élevées, en utilisant Direct Torque. Control (DTC), qui est essentiel pour améliorer les performances. Les performances MSAP permettent une régulation précise du couple et de la vitesse sans pré-changement, offrant une réponse dynamique rapide et une meilleure

CONCLUSION GENERALE

précision de contrôle. De plus, il présente des caractéristiques de faible harmonique et de faible bruit, ce qui réduit les perturbations électromagnétiques et acoustiques indésirables.

Après cela, nous disons que les points de vue peuvent être formulés pour améliorer encore les performances des véhicules électriques.

Annexe

A.1-Paramètres du moteur synchrone à aimants permanents étudié [21] :

Paramètres	Valeurs(SI)
Fréquence	50(HZ)
Puissance	1500(watt)
Tension d'alimentation	220 /380(V)
Nombre de paires de pôles	2
Résistance statoriques	0.6(Ω)
Flux d'un aimant	0.12Wb
Inertie	0.0011
Coefficient de frottement	0.0014
Inductance statoriques quadratique	0.0028H
Inductance statoriques directe	0.0014H

A.2Paramètres du véhicule électrique :

Symbole	Valeur
R	30cm
N	2.5
M	60Kg
ρ_{air}	1.25 kg/m ²
C _d	0.24
S _f	961.8cm ²
g	9.81
<i>CRRmoy</i>	0.015
pen	0.1

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **RACHID, S., LOUIS, L., &MEHDIUI, B.** (2020). Étude d'une machine synchrone à aimant permanent à concentration de flux et à bobinage fractionnaire (Doctoral dissertation, Université Abderrahmane MIRA de Bejaia).
- [2] **A. AMINE**, Commande par mode glissant de la machine synchrone à aimants permanents, Masteren Électrotechnique, Université Djilali Liabes de Sidi bel-Abbes, 2011.
- [3] **K. ALAMEH**, Contribution au diagnostic et à l'analyse de défauts d'une machine synchrone àaimants permanents, thèse de doctorat, Normandie Université, 2017.
- [4] **C. BOURRASSET**, Théorie des machines synchrones, projet : Gestion intelligente des Transferts d'énergie d'un pylône d'éclairage public autonome, Poly Tech Clermont-Ferrand, France, 2010.
- [5] **Y. NACERA**, Modélisation des machines asynchrones dédiée au diagnostic des défauts de court-circuitinter-spires et des cassures de barres et d'anneaux, Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2009.
- [6] **B. AUBERT**, Détection des court-circuit inter-spires dans les Générateurs Synchrones à AimantsPermanents : Méthodes basées modèles et filtre de Kalman étendu - Application à un canal dégénération électrique en aéronautique, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2014
- [7] **DJAFRI, B., METIDJI A., &Saou, R.** (2021). Étude et modélisation d'une machine synchrone à aimants permanents insérés (Doctoral dissertation, Université A. MIRA-BEJAIA)
- [8] **ZIDELMAMAL, T.** (2015). Modèle de prédiction et de commande de la machine synchrone à aimants permanents : application dans les aérogénérateurs (Doctoral dissertation, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue).
- [9] **HOUACINE, K.** (2016). Commande neuro-floue d'une machine asynchrone dans une chaine de propulsion d'un véhicule électronique (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [10] **MME HOUACINE, K.** Commande Neuro-Floue d'une Machine Asynchrone Dans une Chaine de Propulsion d'un Véhicule Electrique (Doctoral dissertation, Université de Tizi Ouzou-Mouloud Mammeri).
- [11] **SAMIR, B., & RABAH, C.** (2018). Commande en vitesse d'un véhicule électrique (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [12]**H. GHARBI**, Modélisation et Commande d'un véhicule électrique hybride, Mémoire de Magister, Université Hassiba Ben Bouali Chlef, 2014.].

- [13] **BOUDJEMA, A. R.** (2014). Commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents MSAP (Master'sthesis).
- [14] **BOUDJEMA, A. R.** (2014). Commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents MSAP (Master'sthesis).
- [15] **AID, H., & AINA, W.** (2013). Synthèse de lois de commande non-linéaires pour un entraînement électrique à vitesse variable basé sur un moteur synchrone à aimants permanents (Doctoral dissertation).
- [16] **AHMED ABD ELMALEK, O., & BOUDINA, I.** (2021). Commande vectorielle de la machine asynchrone double alimentation basée sur la logique floue (Doctoral dissertation, université of M'sila).
- [17] **HAYETTE, M. E. S. L. O. U. B.** (2016). Commande DTC Prédictive D'une Machine Synchrone à Aimants Permanents. Mémoire de Doctorat LMD en Génie Electrique Université Mohamed Khider-Biskra.
- [18] **ABDELKARIM, A. M. M. A. R.** (2017). Amélioration des Performances de la Commande Directe de Couple (DTC) de La Machine Asynchrone par des Techniques Non-Linéaires (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra).
- [19] **AMEUR, A.** (2003). Commande sans capteur de vitesse par DTC d'une machine synchrone à aimants permanents dotée d'un observateur d'ordre complet à modes glissants (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- [20] **NABTI, K., & BENALLA, H.** (2017). Contribution à la commande de la machine asynchrone par DTC et logique floue.
- [21] **FERHAT, C.** (2022). Commande directe de couple par la logique floue des machines synchrones à aimants permanents (Doctoral dissertation, université of M'sila).
- [22] **ZERROUKI, B., & KHABAT, Y.** (2020). Commande directe du couple d'une machine synchrone à aimants permanents alimentée par un onduleur à cinq niveaux (Doctoral dissertation, Univ M'sila).
- [23] **AHMED, B., & MOHAMED, D.** (2015). Modélisation et commande d'un véhicule électrique à base d'une machine synchrone à aimants permanents (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [24] **BENARIBA, H.** (2019). Contribution à la commande d'un véhicule électrique (Doctoral dissertation).
- [25] **FERHAT, C.** (2022). Commande directe de couple par la logique floue de la machine synchrone à aimants permanents (Doctoral dissertation, université of M'sila).

- [26] **NASMA, H. O. U. I. C. H. E.** (2016). Commande DTC flou d'un moteur synchrone à aimant permanent (Doctoral dissertation, UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF M'SILA FACULTE DE TECHNOLOGIE).
- [27] **NASSIM, M. E. K. K. I.** (2017). Commande en vitesse et en position d'une MSAP (Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA).
- [28] **BENOUMHANI, A.** (2022). Commande Non Linéaire D'un Moteur Synchrone à Aimants Permanent basée sur la logique floue type-2 (Doctoral dissertation, université of M'sila).
- [29] **MAATOUG, S., & TABI, R.** (2020). Commande de la machine synchrone à aimants permanents par la technique DTFC (Doctoral dissertation, Université M'sila)
- [30] **BEKRAOUI, F., & TAHIRI, F.** (2017). Commande directe du couple (DTC) d'un MSAP alimenté par un onduleur à Z-source (Doctoral dissertation, Université Ahmed Draia-ADRAR).
- [31] **ILYES, H. M.** (2012). Commande sans capteur de vitesse d'un moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) par l'utilisation de la commande directe du couple et d'un observateur de vitesse à mode glissant (Doctoral dissertation).
- [32] **HOUARA, B.** (2017). Commande DTC Prédictive de la MSAP.
- [33] **KHELIF, I.** La Commande Direct du Couple D'une Machine Synchrone A Aimants Permanents (MSAP) (Doctoral dissertation).
- [34] **BOUGUENNA, I. F.** (2020). Commande Robuste d'une Chaîne de Traction d'un Véhicule Electrique Multi sources (Doctoral dissertation).(photo)
- [35] **BEBMANSOUR, K.** (2006). Contributions à l'application des commandes robustes et intelligentes à une MSAP et de la théorie des systèmes dynamiques hybrides à un convertisseur (Doctoral dissertation, Thèse de doctorat de l'ENP El-Harrach).
- [36] **KCHAOU, Y.** (2013). Etude d'industrialisation de véhicules électriques en Tunisie (Doctoral dissertation, Université Virtuelle de Tunis).
- [37] **BOUNASLA, N.** (2018). Commande par mode de glissement d'ordre supérieur de la machine synchrone à aimants permanents (Doctoral dissertation).
- [38] **KHLAIEF, A.** (2012). Contribution à la commande vectorielle sans capteur mécanique des machines synchrones à aimants permanents (MSAP) (Doctoral dissertation, Aix-Marseille).
- [39] **YACINE, T., & HACENE, B.** (2018). Commande en vitesse d'un véhicule électrique par mode glissant (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).

Résumé :

Cette mémoire se concentre sur l'étude de la modélisation et du contrôle d'une machine synchrone à aimants permanents pour véhicules électriques, en prenant en compte la dynamique du véhicule. Pour réguler la vitesse de la machine et du véhicule, nous avons utilisés une technique de commande appelée Direct Torque Control (DTC). Des simulations ont été réalisées pour mettre en évidence la robustesse de ces techniques de commande, qui visent à améliorer les performances des véhicules électriques.

Mots clés : MSAP, Onduleur de tension, DTC, véhicule électrique.

Summary:

This memory focuses on the study of the modelling and control of a permanent magnet synchronous machine for electric vehicles, taking into account the dynamics of the vehicle. To regulate the speed of the machine and the vehicle, we used a control technique called Direct Torque Control (DTC). Simulations have been carried out to highlight the robustness of these control techniques, which aim to improve the performance of electric vehicles.

Keywords: MSAP, Voltage inverter, DTC, electric vehicle

المخلص:

تركز هذه المذكرة على دراسة النمذجة والتحكم في آلة متزامنة ذات مغناطيس دائم للسيارات الكهربائية، مع مراعاة ديناميكيات السيارة. لتنظيم سرعة الماكينة والمركبة، استخدمنا تقنية تحكم تسمى التحكم المباشر في عزم الدوران (DTC). تم إجراء عمليات محاكاة لتسليط الضوء على متانة تقنيات التحكم هذه، والتي تهدف إلى تحسين أداء المركبات الكهربائية.

الكلمات الرئيسية: MSAP، عاكس الجهد، DTC، مركبة كهربائية.