

République Algérienne Démocratique et Populaire Ministre de l'enseignement

Supérieur et de la recherche scientifique



Faculté de technologie

Département génie électrique

*Filière : Electrotechnique.*

*Spécialité : Automatismes industriels.*

## *Mémoire de fin de cycle*

*En vue d'obtention du diplôme Master*

*Thème :*

**Commande d'un véhicule électrique actionné par  
un moteur synchrone a aimants permanents  
double étoile**

**Présenté Par :**

- ✓ GANA LENA
- ✓ HAMOUM DJAMILA

**Encadré par :**

- ✓ Mr. ACHOUR ABDELYAZID

*Promotion  
Juin 2024*



## *Remerciement :*

*On commence par remercier de tout puissant ALLAH, car sans lui rien de tout cela ne sera possible.*

*On remercie toutes les personnes qui nous ont donner main forte durant ce travail.*

*Parmi eux toutes personnes ayant contribuer à nous former durant notre parcours scolaire.*

*Nous souhaitons également exprimer notre profonde gratitude envers notre encadreur Mr : ACHOUR ABDELQAZID, pour sa qualité d'encadrement, sa patience et son soutien.*

*Nos sincères remerciements vont également aux membres du jury qui ont accepté d'examiner notre recherche.*

## *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire à :*

*La lumière de ma vie, ma chère mère KELTOUMA, mon  
idole.*

*A mon cher père.*

*A ma sœur LAURA et son fils WILLIAM.*

*A mon frère ALL et sa femme LYDIA.*

*A toute la famille AIT EL DJOUDI.*

*A NAWAL et LIZA.*

*A tous mes amis.*

*Au sport qui m'a toujours tiré vers le haut.*

*Et à ma binôme HAMOUM DJAMILA.*

# Dédicace

Je dédie ce travail

A mes parents avec toute ma gratitude pour toutes

Ces années de sacrifices et encouragement

A mon grand-père (JEDI L'MOULOUD)

A mes sœurs (YASMINE, IMANE)

A mon frère jumeau (WALID)

A toute ma famille.

A tous mes Amies (CELIA et AMINA)

A ma binôme (Lena)

A tous ceux que j'aime

Et sans oublier mon chat (TOUTA)



# Table des matières

**Symboles et abréviations**

**Liste des Figures**

**Introduction générale** 1

## **CHAPITRE 1 : PRESENTATION DU VEHICULE ELECTRIQUE**

I.1 Introduction 2

I.2 Historique 2

I.3 Définition du véhicule électrique : 3

I.3.1 Différents type de véhicule électriques : 4

I.4 Composants des véhicules électriques 5

I.4.1 Variateur de vitesse 5

I.4.2 Batterie 5

I.4.3 Convertisseur DC/DC : 5

I.4.4 Moteur électrique : 5

I.4.5 Système de gestion thermique : 6

I.4.6 Chargeur embarqué : 6

I.4.7 Calculateur de bord : 6

I.5 Les avantages et les Inconvénients des véhicules électriques : 6

I.5.1 Avantages : 7

I.5.2 Inconvénients : 7

I.6 Conclusion 8

## **CHAPITRE 2 :MODELISATION DE LA MACHINE SYNCHRONNE A AIMANTS PERMANENTS DOUBLE ETOILE**

II.1 Introduction 9

II.2 Présentation de la Machine synchrone à aimants permanents double étoile 9

II.2.1 Définition	9
II.2.2 Structure MSAPDE :	9
II.2.2.1 Structure du stator	9
II.2.2.2 Structure du rotor	10
II.2.3 Avantages et inconvénients de la MSAPDE	10
II.2.3.1 Avantages	10
II.2.3.2 Inconvénients	10
II.3 Modélisation de la MSAPDE dans le repéré <i>abc</i>	10
II.3.1 Equation électrique	11
II.3.2 Equation magnétique	12
II.3.3 Equation mécanique	13
II.4 Modélisation de la MSAPDE dans le repéré biphasée <i>dq</i>	13
II.4.1 Modèle simplifié dans le plan <i>dq</i> composé (modèle <i>dq</i> étendu)	14
II.4.2 Choix du référentiel lié au champ tournant	14
II.4.3 Equation électrique	14
II.4.4 Equation mécanique	15
II.5 Convertisseur statique continue-alternatif	15
II.5.1 Définition de l'onduleur	16
II.5.2 Modélisation de l'Onduleur de tension	16
II.5.3 Commande De L'onduleur Par Modulations De Largeur D'impulsions	<b>18</b>
II.5.4 Principe de la commande par MLI sinusoïdale triangulaire	19
II.5.5 Caractéristique de la MLI	20
II.6 Dynamique du véhicule électrique	20
II.6.1 Force aérodynamique	21
II.6.2 Force de résistance au roulement	22
II.6.3 Force de la dynamique de la route	23
II.6.4 Force d'accélération	23
II.7 Couplage entre le modèle mécanique du VE et celui de son actionneur	24
II.8 Conclusion	26

## **CHAPITRE 3 : COMMANDE EQUIVALENTE PAR LES MODES GLISSANTS**

III.1 Introduction	27
III.2 Principe de la commande équivalente par les modes glissants	27
III.3 Commande équivalente par les modes glissants	27
III.3.1 Modèle du VE actionné par le MSAPDE	28
III.3.2 Retour de sortie linéarisant	28
III.3.3 Calcul de la commande équivalente par mode glissant	29
III.4 Conclusion :	36

## **CHAPITRE 4 : VALIDATION DE L'ALGORITHME DE COMMANDE PAR DES TESTS DE SIMULATION**

IV.1 Introduction	37
IV.1 Schéma bloc pour les tests de simulation du MSAPDE alimenté par deux onduleurs commandés par MLI	38
IV.2 Schéma bloc pour les tests de simulation, de la commande linéarisant par retour de sorti du MSAPDE sans onduleurs	41
IV.3 Schéma bloc pour les tests de simulation, de la commande la commande équivalente par les modes glissant du MSAPDE linéarisé par un retour de sorti, sans onduleurs	45
IV.4 Schéma bloc de simulation du VE-MSAPDE commandé par la commande équivalente par les modes glissant associée au retour de sorti linéarisant et alimenté par deux convertisseurs	50
IV.4.1 Schéma bloc de l'expansion du bloc VE-MSAPDE et de la dynamique du VE	51
IV.5. Conclusion	55
<b>Conclusion générale</b>	<b>56</b>
<b>Liste des références bibliographiques</b>	<b>57</b>
<b>Annexe</b>	

## Symboles et abréviations :

$(X_1, X_2 \dots X_n)$  : Tensions, courants ou flux des phases.

$[M_{S_{ij}}]$  : Mutuelle entre les phases  $i$  et  $j$ .

$T_m$  : Le couple de charge.

$\hat{T}_m$  : Couple de charge estimé.

$\varphi_{PM_{abc}}$  : Le flux des aimants permanents vu par le bobinage statorique.

$\Omega_{ref}$  : Vitesse de référence.

$\Psi_{pm}$  : Amplitude du flux des aimants permanents dans l'entrefer.

$A_S^{BF}$  : Matrice système en boucle fermée.

$A_p$  : Amplitude de la porteuse.

$A_r$  : Amplitude du signal de référence de la MLI.

$D^*(S)$  : Equation caractéristique désiré en boucle fermée.

$D_S^{BF}$  : L'équation caractéristique en boucle fermée.

$K_i$  : Gains positifs de la commande par mode glissant.

$L_i$  : Inductance propre de l'enroulement  $i$ .

$L_l$  : Inductance de fuite.

$L_s$  : Inductance propre d'un enroulement polyphasé.

$L_s T_p$  : Matrice d'inductance de la machine dans le plan  $dq$  composé.

$[P]$  : Matrice de Park généralisée.

$r_s$  : Résistance au stator.

$S_a, S_b, S_c$  : État des interrupteurs du convertisseur.

$S_s(x)$  et  $S_a(x)$  : Surfaces de glissement.

$T_e$  : Couple électromagnétique de la machine.

$T_p(\theta)$  : Matrice (4×6) de transformation du repère naturel triphasé vers le repère biphasé tournant de la MSAPDE.

$U_{eq}$  : Vecteur des commandes équivalentes.

$U_i$  : Les composantes du vecteur de commande.

$V_{dc}$  : Tension continu à l'entrée de l'onduleur.

$X$  : Vecteur tension, courant ou flux.

$X_{a0}, X_{ad}, X_{aq}$  : Composantes homopolaire, directe et quadratique respectivement du deuxième stator (stator d'indice « a »).

$X_{abc}$  : Vecteur de tension/courant/flux dans le repère naturel.

$X_{dq}$  : Vecteur de tension/courant/flux dans le plan  $dq$  composé.

$X_{n0}, X_{nd}, X_{nq}$  : Composantes homopolaire, directe et quadratique respectivement du premier stator (stator d'indice « n »).

$e_{abc}$  : Force électromotrice générée par la machine.

$f_p$  : Fréquence de la porteuse.

$f_r$  : Fréquence de la référence.

$M$  : Indice de modulation.

$r_1$  : Coefficient de réglage en tension.

$x_r$  : Etat de l'intégrateur.

$x_s$  : Vecteur d'état du MSAPDE avec commande vectorielle.

$\theta_{ij}$  : Angle entre les phases  $i$  et  $j$ .

$w_e$  : Pulsation électrique de la tension statorique de la machine.

$[R]$  : Matrice de rotation.

$F$  : Coefficient de frottement visqueux de la machine.

$n$  : Nombre de phases.

$J$  : Inertie totale de la masse tournante du MSAPDE.

$P$  : Nombre de paires de pôles de MSAPDE.

$S(x), (xs)$  : Vecteurs des surfaces de glissement.

$T(\theta)$  : Matrice ( $2 \times 3$ ) de transformation de Park.

$m$  : L'inductance mutuelle.

$r$  : Matrice résistance de la machine.

$\Omega$  : Vitesse angulaire de la machine.

$\Omega^{ref}$  : Vitesse de référence

$\alpha$  : Angle de déphasage entre les deux étoiles de la machine.

MLI : Modulation de la Largeur d'Impulsion.

MCC : Moteur à courant continue.

VE : Véhicule électrique

CMG : Commande par mode glissant

CEMG : Commande équivalent par mode glissant

MSAPDE : Machine Synchrone à Aimants Permanents Double Etoile.

.

## Liste des Figures

<b>Figure I.1 :</b> <i>Première voiture électrique 1830</i> .....	2
<b>Figure I.2:</b> <i>La jamais contente</i> .....	3
<b>Figure I.3:</b> <i>Voiture électrique</i> .....	4
<b>Figure I.4:</b> <i>Composant d'un véhicule électrique</i> .....	6
<b>Figure I.5:</b> <i>Schéma de la MSAPDE dans le repère abc</i> .....	11
<b>Figure I.2 :</b> <i>Schéma de principe d'un onduleur</i> .....	16
<b>Figure I.3 :</b> <i>Représentation d'un onduleur de tension à deux niveaux.</i> .....	17
<b>Figure I.4 :</b> <i>Schéma bloc d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux.</i> .....	18
<b>Figure II.5:</b> <i>Schéma bloc de la MLI sinusoïdale triangulaire.</i> .....	19
<b>Figure II.6:</b> <i>Représentation des forces agissant sur le VE.</i> .....	21
<b>Figure II.7:</b> <i>Force aérodynamique pour différentes valeurs de <math>C_x</math></i> .....	22
<b>Figure II.8:</b> <i>Force de roulement sur la roue.</i> .....	23
<b>Figure II.9:</b> <i>Mécanisme du réducteur</i> .....	24
<b>Figure I.1 :</b> <i>Schéma bloc de la commande linéarisant par retour de sortie du VE- MSAPDE</i> .....	29.
<b>Figure I.2:</b> <i>Schéma bloc du système en boucle fermé sans onduleur</i> .....	36
<b>Figure IV.1 :</b> <i>Schéma bloc de simulation du MSAPDE alimenté par des deux onduleurs de tension commandés par MLI.</i> .....	38
<b>Figure IV.2 :</b> <i>Réponse du MSAPDE à vide, alimenté par des deux onduleurs de tension commandés par MLI.</i> .....	39
<b>Figure IV.3 :</b> <i>Réponse du MSAPDE avec un couple de charge de 300 N.m appliqué à <math>t=5s</math>, alimenté par des deux onduleurs de tension commandés par MLI.</i> .....	40

<b>Figure IV.5 :</b> Réponse du MSAPDE à vide et sans onduleurs, avec un retour de sorti linéarisant.....	42
<b>Figure IV.6 :</b> Réponse du MSAPDE sans onduleurs, avec un retour de sorti linéarisant, et chargé à $t=5s$ , avec un couple de 300 N.m. ....	43
<b>Figure IV.7 :</b> Schéma bloc de simulation de la commande équivalente et du retour de sorti linéarisant du MSAPDE sans onduleurs .....	45
<b>Figure IV.8 :</b> Réponse du MSAPDE à vide et sans onduleurs, avec une commande équivalente par le mode glissant et un retour de sorti linéarisant. ....	47
<b>Figure IV.9 :</b> Réponse du MSAPDE sans onduleurs, avec une commande équivalente par le mode glissant et un retour de sorti linéarisant, et chargé à $t=5s$ , avec un couple de 300 N.m. ....	48
<b>Figure IV.10 :</b> Mise en œuvre du système en boucle fermée (VE-MSAPDE, les deux lois de commande et les deux onduleurs) .....	59
<b>Figure IV.11:</b> Schéma bloc de la dynamique du VE .....	51
<b>Figure IV.12 :</b> Réponse du système en boucle fermée avec une chaussée plate .....	53
<b>Figure IV.13 :</b> Réponse du système en boucle fermée sur une chaussée avec pente de $+30^\circ$	54

---

## *Introduction générale*

---

# *Introduction générale*

Merci à la technologie d'avoir pu nous offrir le confort et la disponibilité des véhicules. En effet ils sont devenus indispensables et primordiales, malgré la pollution causée par les véhicules essence, mais l'humanité a trouvé une alternative qui est : les véhicules électriques (VE), et ce dernier ne cesse d'évoluer et d'être améliorée, afin de pouvoir un jour remplacer la totalité des véhicules à combustion.

Le VE a plusieurs avantages tels que : protection de l'environnement, sécurité routière, facile à entretenir, merci au développement technologique des moteurs électriques utilisés.

Or, le VE est un système physique complexe, composé de plusieurs sous-systèmes. La modélisation de chaque élément de la chaîne de transmission est complexe, ce qui nécessite des études cinématiques et dynamiques approfondies du VE. Le choix des commandes adaptées au contrôle du VE, nécessite l'identification et la gestion de tous phénomènes qui régissent leur comportement.

Notre travail consiste à réaliser la commande d'un VE actionné par un moteur synchrone à aimants permanents double étoile (MSAPDE).

Dans le premier chapitre de ce mémoire nous présentons le VE et ses différents types ainsi leurs compositions et en fin ses avantages et ses inconvénients. La présentation de la MSAPDE, sa structure, sa modélisation dans le plan abc et celui dq, la modélisation de l'onduleur, l'étude ainsi que la modélisation de la dynamique du VE et le modèle complet du VE avec celui de son actionneur MSAPDE ont fait l'objet du deuxième chapitre. Au troisième chapitre, nous avons linéarisé le modèle complet VE-MSAPDE par un retour de sortie, puis nous avons détaillé la conception de la commande équivalente par les modes glissants appliquée au VE-MSAPDE linéarisé. Enfin, dans le dernier chapitre, nous avons validé par des tests de simulation le système en boucle fermée avec le logiciel Matlab/Simulink. On a clôturé le mémoire par une conclusion et des perspectives.

---

***CHAPITRE 1 :***

***Présentation du véhicule électrique***

---

## I.1 Introduction

Dans notre temps les véhicules sont primordiaux et indispensables. En effet, le problème de la pollution est de plus en plus critique, notamment en ce qui concerne les gaz à effet de serre qui sont les principaux responsables du réchauffement climatique [1].

Le VE c'est l'une des solutions préconisées par les constructeurs automobiles et les organismes de recherche pour remplacer progressivement les véhicules classiques.

Aujourd'hui les VE sont de plus en plus populaires, bénéficiant des avancées technologiques en termes d'autonomie et de performance. Leur généralisation reste cependant conditionnée au développement des infrastructures de recharge et de la production électrique.

## I.2 Historique

Il y a plus de 200 ans le premier (figure I.1) VE fait son apparition, avec des modèles développés par des inventeur tel que ROBERT ANDERSON 1830 et THOMAS DAVENPORT en 1834. [2]



*Figure I.1 : Première voiture électrique 1830*

De nombreux autres inventeurs ont développé des VE au fil du temps, mais leur popularité a été restreinte en raison de problèmes de performance et de coût. Pendant longtemps, les voitures à essence étaient plus appréciées et plus accessibles pour la majorité des individus.

En 1859, Gaston Planté a inventé la batterie rechargeable au plomb acide, qui a permis aux VE de prendre réellement leur essor puis en 1881, un premier modèle viable de VE est mis au point par trois Français, dont Camille Faure, qui travaillait à l'amélioration des batteries au plomb. [3]

Mais c'est en 1899 que la viabilité de la VE éclate aux yeux du monde entier. En effet, la « Jamais Contente », pilotée par C. Jenatzy, est la première voiture à dépasser 100km/h.

Pour ce qui est du producteur les États-Unis détrônent la France comme premier producteur mondial d'automobiles en 1904-1905. En France, l'administration des postes utilise un modèle électrique, la *Mildé* (figure I.2), du nom de l'ingénieur Charles Mildé. [4].

Les VE ont connu un regain d'intérêt dans les années 1960 et 1970 [3], en raison de la pollution croissante et des fluctuations des prix du pétrole.

Actuellement, les VE sont de plus en plus populaires, offrant des avantages tels qu'une réduction des coûts d'entretien et une diminution des émissions de gaz à effet de serre, avec des prévisions indiquant une baisse des prix par rapport aux voitures à essence dans les années à venir.

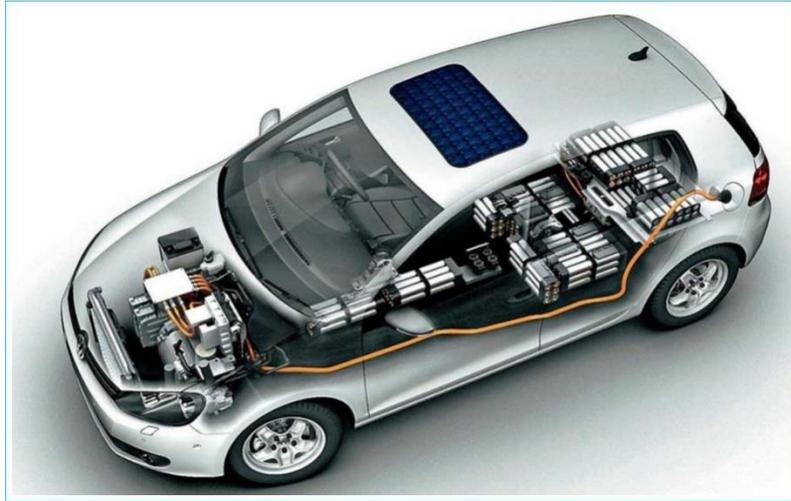


*Figure I.2:* La jamais contente

### **I.3 Définition du véhicule électrique :**

Les VE (figure I.3) correspondent à l'ensemble des véhicules fonctionnant principalement à l'électricité, stockée dans des batteries rechargeables plutôt qu'à l'essence ou au diesel.

Contrairement aux voitures traditionnelles, la propulsion est assurée par un moteur fonctionnant exclusivement à l'énergie électrique. Autrement dit, la force motrice est transmise aux roues par un ou plusieurs moteurs électriques.



*Figure I.3:* Voiture électrique

### I.3.1 Différents type de véhicule électriques :

Le tableau ci-dessous présente les différents véhicules selon le type d'énergie utilisée par son moteur [5].

**Tableau I.1 :** Classement des véhicules selon le type d'énergie utilisée.

Utilisée par Désignation	Type du moteur	Source de l'Energie utilisée par le moteur
Voiture électromotrice	Électrique	Electricité stockée dans des batteries
Voiture hybride	Electrique couplée au thermique	Carburant consommé par le moteur thermique, Générateurs pour les hybrides rechargeables Electricité stockée dans les batteries
Voiture à hydrogène	Électrique	Electricité produite par la pile à combustible

## **I.4 Composants des véhicules électriques**

Il est important de comprendre les composants techniques clés qui composent ces VE. Contrairement aux véhicules à combustion interne classiques, les VE tirent parti de plusieurs composants distincts pour assurer leur fonctionnement optimal et garantir la sécurité des utilisateurs. Voici un aperçu des principaux composants techniques des VE et de leurs équipements électriques.

### **I.4.1 Variateur de vitesse**

Le variateur de vitesses est un élément essentiel des VE, car il et contrôle la vitesse de leur moteur électrique. Il permet aussi de recharger la batterie du VE grâce à son convertisseur réversible, c'est-à-dire, il commande la machine du VE en mode moteur ou génératrice. Cette opération inverse se produit pendant le processus de freinage régénératif (phase de décélération), où l'énergie cinétique est reconvertie en électricité et renvoyée à la batterie.

### **I.4.2 Batterie**

La batterie est le cœur de tout VE, servant de principale source d'énergie. Elle stocke l'énergie sous forme de courant continu et la distribue aux différents composants du véhicule ou de l'équipement. Actuellement, les batteries lithium-ion sont les plus populaires en raison de leur densité énergétique élevée, leur durée de vie prolongée et leur faible perte d'énergie au fil du temps.

### **I.4.3 Convertisseur DC/DC :**

Le convertisseur DC/DC est un composant utile reliant la haute tension de la batterie aux accessoires basse tension du véhicule ou de l'équipement. Il abaisse la tension de la batterie haute tension à un niveau compatible avec les accessoires (souvent 12 ou 24V), tels que les feux, les essuie-glaces et les systèmes audio, tout en maximisant l'efficacité énergétique.

### **I.4.4 Moteur électrique :**

Le moteur électrique est l'élément qui transforme l'énergie électrique en énergie mécanique, propulsant ainsi le véhicule ou actionnant l'équipement. Les moteurs électriques sont généralement plus légers, plus petits et plus silencieux que les moteurs à combustion interne, ce qui améliore l'efficacité globale et la dynamique de conduite.

### I.4.5 Système de gestion thermique :

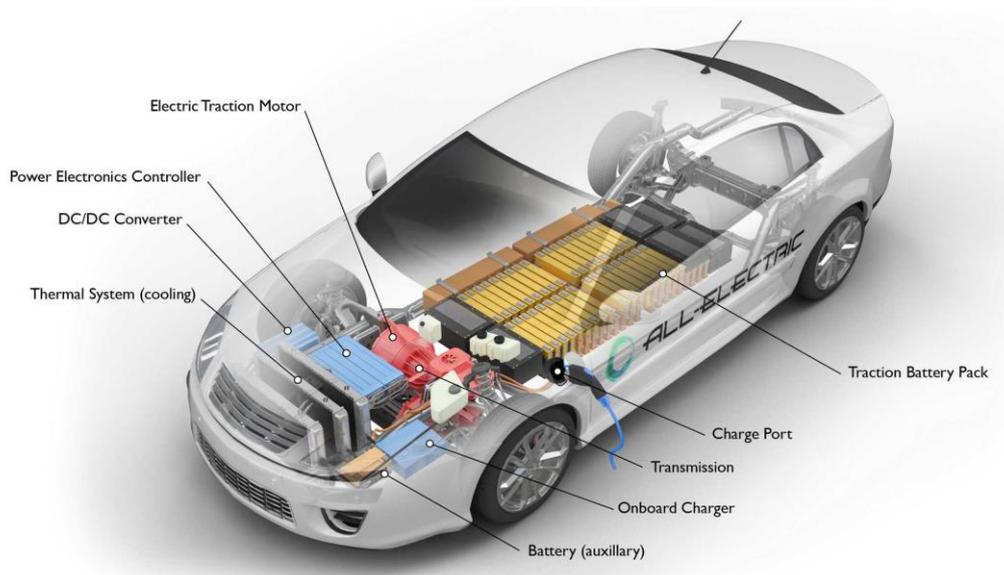
Étant donné que les moteurs et les variateurs produisent de la chaleur lors de leur fonctionnement, il est crucial d'avoir un système de gestion thermique efficace pour maintenir une température optimale. Ce système combine généralement trois types de refroidissement : le refroidissement par liquide, celui par convection naturelle et le un autre par air forcé, assurant ainsi la longévité et la sécurité des composants.

### I.4.6 Chargeur embarqué :

Le chargeur embarqué est responsable de la conversion du courant alternatif (CA) provenant d'une station de charge externe, en courant continu (DC) pour charger la batterie du VE ou de l'équipement.

### I.4.7 Calculateur de bord :

Le calculateur de bord est l'unité de commande centrale qui supervise toutes les opérations électriques du VE ou de l'équipement. Il régule la distribution de l'énergie entre la batterie, l'onduleur et le moteur électrique, en tenant compte des entrées du conducteur, telles que l'accélérateur et les freins, pour assurer une expérience de conduite agréable et sûre. [6]



**Figure I.4:** Composant d'un véhicule électrique

## I.5 Les avantages et les Inconvénients des véhicules électriques :

Les VE offrent plusieurs avantages par rapport aux voitures à combustion interne, on énumère ci-dessous quelques principaux avantages et inconvénients des VE.

### I.5.1 Avantages :

- **Écologiques** : Les VE sont considérées comme l'une des solutions les plus respectueuses de l'environnement en matière de transport. Elles produisent zéro émission de gaz à effet de serre directes, contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique [7], [8], [9].
- **Économiques** : Bien que le coût initial d'achat d'une VE puisse être plus élevé que celui d'une voiture à essence, les économies à long terme sont significatives. L'électricité est généralement moins chère que l'essence, et l'entretien des VE est souvent moins onéreux [7], [8].
- **Performances élevées** : Les moteurs électriques sont connus pour offrir des performances instantanées et une accélération douce. De plus, les VE sont incroyablement silencieuses, offrant une expérience de conduite agréable et paisible [7].
- **Incitations gouvernementales** : De nombreux gouvernements offrent des incitations fiscales et des subventions pour encourager l'achat de voitures électriques, ce qui peut considérablement réduire leur coût initial [7].
- **Moins d'entretien** : Les VE nécessitent moins d'entretien que les voitures à combustion interne, car leur conception est moins complexe, ce qui réduit les pannes et les coûts associés [8].
- **Efficacité énergétique** : Les VE affichent une efficacité énergétique impressionnante de 85 à 90 %, contre 20 % pour les véhicules traditionnels équipés d'un moteur thermique [10].

### I.5.2 Inconvénients :

- **Autonomie limitée de la batterie** : L'autonomie des VE reste l'un des principaux inconvénients. Bien qu'elle ait considérablement augmenté ces dernières années, la distance que vous pouvez parcourir avec une seule charge est encore inférieure à celle d'une voiture à essence [7].
- **Temps de recharge de la batterie** : Recharger une VE prend plus de temps que de faire le plein d'essence. Même avec des chargeurs rapides, cela peut encore prendre plusieurs heures pour une charge complète [7].

- **Coût initial élevé** : Le coût initial d'achat d'une voiture électrique peut être plus élevé que celui d'une voiture à essence, bien que les économies à long terme soient significatives [7], [10].
- **Production des batteries** : La production des VE génère des émissions de CO<sub>2</sub>, notamment lors de l'extraction des ressources nécessaires et de la production de la batterie [8].

En résumé, les VE offrent de nombreux avantages, notamment en termes d'environnement, d'économie et de performances. Cependant, elles présentent également quelques inconvénients, tels que l'autonomie limitée de la batterie, le temps de recharge et le coût initial élevé.

## **I.6 Conclusion**

Le VE est outil indispensable dans la vie de l'être humain, car il lui facilite son quotidien, il lui fait gagner du temps donc il lui porte un certain confort. Des efforts importants ont été déployés pour le rendre efficace, agréable, plus confortable, protecteur de l'environnement. Le modèle convenable dans l'industrie automobile est le VE car il répond à toutes les attentes et exigences dans la vie quotidienne. Dans le chapitre suivant, on présente un type d'actionneur du VE qui attire de plus en plus l'industrie des systèmes embarqués ou le VE fait partie vue disponibilité de service qu'il offre à cause de sa structure fiable.

---

***CHAPITRE 2 :***

***Modélisation de la Machine Synchrone à  
Aimants Permanents Double Etoile***

---

### II.1 Introduction

La modélisation du Procédé à contrôler (MSAPDE dans notre cas) est une étape nécessaire et indispensable de la synthèse de la majorité des lois de commande. Le modèle doit représenter fidèlement les différentes dynamiques présentes et il est conçu avec certaines hypothèses simplificatrices pour faciliter son utilisation. Cette modélisation est établie en termes d'équations différentielles en se basant sur les lois de la physique.

La modélisation de la MSAPDE est une tâche relativement complexe vue sa structure à double stator en étoiles et son appartenance à la classe de machine à courant alternatif. Le modèle initial de la MSAPDE est obtenu dans le repère  $abc$ , en appliquant les lois fondamentales de l'électricité et de la mécanique, sous un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. Des modèles plus simples pour le calcul des lois de commande sont déduit à partir de celui  $abc$ , en appliquant des transformations et celle la plus répondu est celle de Park. Dans ce chapitre, nous présentons les modèles  $abc$ , puis  $dq$  du MSAPDE. La modélisation du prés-actionneur (onduleur) du MSAPDE est donnée dans cette partie du mémoire ainsi que les équations du VE. La modélisation du système complet VE-MSAPDE est aussi établie.

### II.2 Présentation de la Machine synchrone à aimants permanents double étoile

#### II.2.1 Définition

Le MSAPDE présente deux stators semblables au stator de la machines asynchrone à cage, ou les bobinages rotoriques sont remplacés par un aimant permanent qui apportée beaucoup de simplicité comme l'élimination des ballais ainsi que l'absence des pertes à effets de Joule au rotor [11].

#### II.2.2 Structure MSAPDE :

La MSAPDE étudiée est à double étoile, c'est une configuration classique des machines polyphasées et la configuration des deux enroulements triphasés en étoile sont identiques. Les deux étoiles se partagent le même stator et sont décalées d'un angle électrique de  $30^\circ$  [11].

##### II.2.2.1 Structure du stator

Le stator d'une machine électrique est une partie fixe où se trouvent les enroulements liés à la source. Il est constitué d'un certain nombre de bobines réparties dans des encoches qui constituent six bobinages pour la MSAPDE, décalés de  $30^\circ$  électriques dans l'espace. Les enroulements sont destinés à créer un champ magnétique tournant lorsqu'on les alimente par un système triphasé équilibré de tensions.

### II.2.2.2 Structure du rotor

Le rotor du MSAPDE est constitué des aimants permanents. Dans ce type de rotor l'enroulement est remplacé par des aimants, ce qui a pour conséquence, l'élimination des balais et des bagues [12].

### II.2.3 Avantages et inconvénients de la MSAPDE

La MSAPDE présente plus d'avantages que d'inconvénients par rapport aux autres machines électriques dont on présente ci-dessous les plus importants.

#### II.2.3.1 Avantages

Les avantages les plus importants de la MSAPDE sont [13] :

- Une meilleure efficacité énergétique ;
- Une plus grande puissance massique.
- Une plus grande flexibilité dans les applications.
- Pas d'échauffement au rotor, et absence des pertes joules.
- Moins d'utilisation de Cuivre, les pertes viennent surtout du stator ;
- Elle est utilisée dans de nombreux domaines, tels que les applications industrielles, les systèmes embarqués et les équipements de soins médicaux.

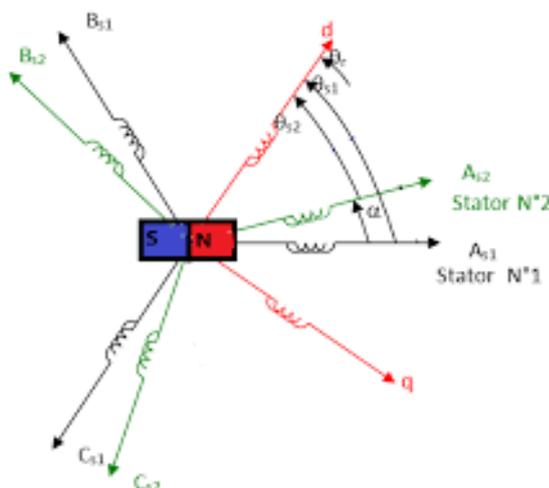
#### II.2.3.2 Inconvénients

Les inconvénients les plus pertinents de la MSAPDE sont [14] :

- Complexité de conception et de mise en œuvre ;
- Une sensibilité aux perturbations et une nécessité de maintenance régulière.
- Prix des aimants la rend plus cher.
- La présence de pulsation de couple ;
- Pertes par courant de Foucault dans les aimants.

### II.3 Modélisation de la MSAPDE dans le repéré *abc*

Le modèle de la MSAPDE est identique à celui de la MSAP à trois phases décalées entre elles de 120 degrés, mais elle a en plus trois autres phases, donc on obtient six phases montées en deux étoiles, décalée entre elle de trente degrés et c'est ce qu'on nomme le double stator (DE) (voir la figure II.1) [15].



**Figure II.1:** Schéma de la MSAPDE dans le repère  $abc$ .

Le modèle du MSAPDE est établi, en considérant des hypothèses simplificatrices telles que : toutes les phases sont supposées identiques, la force magnétomotrice (FMM) dans l'entrefer est considérée sinusoïdale ; l'effet de peau, les courants de Foucault et la saturation sont négligés ; ainsi que l'inductance de fuite mutuelles entre les phases [16].

### II.3.1 Equation électrique

L'équation électrique matricielle de la MSAPDE est obtenue en appliquant la loi d'Ohm tel que

$$v_{abc} = r i_{abc} + \frac{d\varphi_{abc}}{dt} \quad (\text{II.1})$$

Ou,

$$v_{abc} = [v_{a1} v_{b1} v_{c1} v_{a2} v_{b2} v_{c2}]^t \quad (\text{II.2})$$

$$i_{abc} = [i_{a1} i_{b1} i_{c1} i_{a2} i_{b2} i_{c2}]^t \quad (\text{II.3})$$

$$\varphi_{abc} = [\varphi_{a1} \varphi_{b1} \varphi_{c1} \varphi_{a2} \varphi_{b2} \varphi_{c2}]^t \quad (\text{II.4})$$

$$r = \begin{bmatrix} r_s & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \dots & r_s \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

$r$ : Est une matrice diagonale 6x6.

$r_s$ : La résistance d'une phase statorique.

$v_{abc}$ : Vecteur tension du premier et deuxième stator.

$i_{abc}$ : Vecteur courant du premier et deuxième stator.

$\varphi_{abc}$ : Vecteur flux du premier et deuxième stator.

### II.3.2 Equation magnétique

La relation entre les vecteurs des flux et celui des courants s'écrivent comme suit :

$$\varphi_{abc} = [L_s] i_{abc} + \varphi_{PM_{Ddq}} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$[L_s]$  la matrice des inductances,

$\varphi_{PM_{Ddq}}$ : Vecteur des flux des aimants permanents vu par le bobinage statorique et qui est donné par l'équation (II.17) où  $\alpha = \pi/6$  rd représente l'angle électrique entre les deux étoiles, et  $\Psi_{pm}$ : l'amplitude du flux des aimants permanents.

$$\varphi_{PM_{Ddq}} = \Psi_{pm} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta - \alpha) \\ \cos(\theta - 2\pi/3 - \alpha) \\ \cos(\theta + 2\pi/3 - \alpha) \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

Les inductances sont dépendantes de la position du rotor, ainsi la matrice des inductances est formulée par :

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{a1} & M_{a1b1} & M_{a1c1} & M_{a1a2} & M_{a1b2} & M_{a1c2} \\ M_{a1b1} & L_{b1} & M_{b1c1} & M_{a2b1} & M_{b1b2} & M_{b1c2} \\ M_{a1c1} & M_{b1c1} & L_{c1} & M_{a2c1} & M_{c1b2} & M_{c1c2} \\ M_{a1a2} & M_{a2b1} & M_{a2c1} & L_{a2} & M_{a2b2} & M_{a2c2} \\ M_{a1b2} & M_{b1b2} & M_{c1b2} & M_{a2b2} & L_{b2} & M_{b2c2} \\ M_{a1c2} & M_{b1c2} & M_{c1c2} & M_{a2c2} & M_{b2c2} & L_{c2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Les termes  $L_i$  représentent l'inductance propre de l'enroulement  $i$ , et  $M_{ij}$  l'inductance mutuelle entre les enroulements  $i$  et  $j$  et  $L_l$ , ces inductances sont exprimées par :

$$L_i = L_l + m \quad (\text{II.9})$$

$$M_{ij} = m \cos(\theta_i - \theta_j) \quad (\text{II.10})$$

Avec  $L_l$  l'inductance de fuite et  $m$  l'inductance mutuelle

Le modèle électrique de la machine dans le référentiel naturel peut donc s'écrire sous la forme :

$$v_{abc} = r_{i_{abc}} + \frac{d(L_s(\theta)i_{abc}}{dt} + e_{abc} \quad (\text{II.11})$$

Avec  $e_{abc}$  la force électromotrice générée par la machine.

### II.3.3 Equation mécanique

L'équation mécanique de la machine est donnée par :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = T_e - T_m - F\Omega \quad (\text{II.12})$$

Avec :

$J$  : L'inertie totale de la masse tournante.

$\Omega$  : Vitesse angulaire mécanique du rotor.

$T_m$  : Couple mécanique appliqué sur l'arbre de la machine.

$T_e$  : Couple électromagnétique développé par la machine.

$F$  : Coefficient des frottements visqueux.

### II.4 Modélisation de la MSAPDE dans le repéré biphasée $dq$

Le modèle biphasé de la MSAPDE est obtenu par une transformation du repère triphasé réel  $abc$  vers un repère biphasé  $dq$  fictive, qui n'est en fait qu'un changement de base des grandeurs physiques (tensions, flux, et courants) vers des grandeurs fictives indépendantes de l'angle électrique ou le nombre d'équations est réduit. La transformation la plus connue est celle de Park ou le repère  $dq$  peut être fixé au stator, ou au rotor ou au champ tournant, selon les objectifs et l'utilisation du modèle  $dq$  obtenu. Il est possible de transformer le modèle  $abc$  du MSAPDE en deux modèles de Park différents : le modèle double  $dq$  et le modèle  $dq$

composé (ou modèle  $dq$  étendu). On s'est intéressé dans notre étude au modèle  $dq$  composé car il est plus simple car les deux étoiles sont indépendantes l'une de l'autre [16].

#### II.4.1 Modèle simplifié dans le plan $dq$ composé (modèle $dq$ étendu)

Le modèle  $dq$  composé est plus simple par rapport à l'autre modèle  $dq$  (modèle double  $dq$ ), car chacune des étoiles du modèle  $abc$  du MSAPDE est transformée en deux phases en quadrature, indépendante (découplée) l'une de l'autre.

#### II.4.2 Choix du référentiel lié au champ tournant

Le référentiel de Park est lié au champ tournant dans l'entrefer du MSAPDE, donc sa pulsation est celle du champ tournant, donc l'angle de la transformation de Park est l'angle électrique. Ce référentiel est généralement utilisé dans le but de réaliser la commande de la vitesse, du couple, etc. puisque les grandeurs dans ce référentiel sont de nature continue, mais abstraites.

#### II.4.3 Equation électrique

La transformation du modèle  $abc$  vers  $dq$  se fait par l'équation (II.14) en utilisant la matrice de transformation (II.13), où  $X_{abc}$  est une grandeur (tension, courant, flux) dans le repère  $abc$  et  $X_{dq}$  est le grandeur obtenu dans le repère  $dq$ .

$$X_{dq} = [X_{nd} \quad X_{nq} \quad X_{n0} \quad X_{ad} \quad X_{aq} \quad X_{a0}]^T = T_p(\theta)X_{abc} \quad (\text{II.13})$$

$$T_p(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} T(\theta) & T(\theta - \alpha) \\ T(\theta) & -T(\theta - \alpha) \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

$$T(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

Le stator de la machine est constitué de deux étoiles avec connexion en étoile et neutres isolés, donc les grandeurs homopolaires sont nulles, donc on a éliminé la troisième ligne de la matrice  $T(\theta)$  ce qui donne l'expression (II.15).

En appliquant la transformation (II.13) aux vecteurs de l'équation (II.11) et après calcul, on obtient le modèle  $dq$  étendu du MSAPDE [16]:

$$\begin{cases} \frac{di_{nd}}{dt} = \frac{1}{L_{nd}} (v_{nd} - r_s i_{nd} + w_e L_{nq} i_{nq}) \\ \frac{di_{nq}}{dt} = \frac{1}{L_{nq}} (v_{nq} - r_s i_{nq} - w_e L_{nd} i_{nd} - w_e \sqrt{3} \Psi_{PM}) \\ \frac{di_{ad}}{dt} = \frac{1}{L_{ad}} (v_{ad} - r_s i_{ad} + w_e L_{aq} i_{aq}) \\ \frac{di_{aq}}{dt} = \frac{1}{L_{aq}} (v_{aq} - r_s i_{aq} - w_e L_{ad} i_{ad}) \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

Avec :  $\omega_e$  est la pulsation électrique, les termes  $L_s$  ( $s=nd, nq, ad, aq$ ) sont les inductances dans le plan  $dq$  de la machine et elles sont définies en fonction des inductances de fuite et mutuelle comme suit :

$$\begin{cases} L_{ad} = L_{aq} = L_l \\ L_{nd} = L_{nq} = L_l + 3m \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

#### II.4.4 Equation mécanique

L'équation mécanique du rotor du MSAPDE est donnée par la relation (II.12), où la seule grandeur qui s'exprime par les variables dans le repère  $dq$  est le couple électromagnétique  $T_e$  et il est formulé comme suit :

$$T_{em} = P(\varphi_{nd} i_{nd} - \varphi_{nq} i_{nq} + \varphi_{ad} i_{aq} - \varphi_{aq} i_{ad}) \quad (\text{II.18})$$

Le MSAPDE étudiée est sans effets de saillances, donc l'équation du couple dans le modèle  $dq$  composé s'écrit :

$$T_{em} = \sqrt{3} P \Psi_{PM} i_{nq} \quad (\text{II.19})$$

#### II.5 Convertisseur statique continue-alternatif

L'onduleur est le convertisseur indispensable pour tous les actionneurs à courant alternatif dont fait partie le MSAPDE. Dans un système de commande, il représente le pré-actionneur qui permet de varier la vitesse de l'actionneur auquel il est associé. L'évolution de la micro-électronique a fait évoluer les modèles des onduleurs de deux niveaux à celui multi-niveaux et aussi matricielle qui est réversible [17].

### II.5.1 Définition de l'onduleur

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continue alternatif (DC/AC) (figure II.2), alimenté par une source continue, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir une tension et un courant alternatifs de valeur moyenne nulle [18].

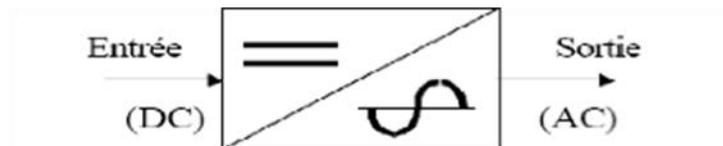


Figure II.2 : Schéma de principe d'un onduleur

On distingue plusieurs types d'onduleurs :

- Selon la source :
  - Onduleurs de tension.
  - Onduleurs de courant.
- Selon le nombre de phases :
  - Monophasé
  - Triphasé, ... etc.
- Selon le nombre de niveaux (2,3, ... etc.)

### II.5.2 Modélisation de l'Onduleur de tension

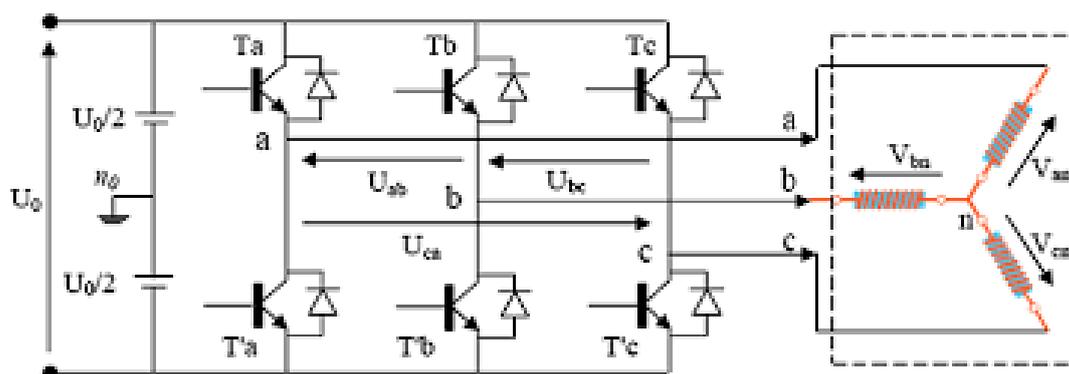
La figure II.3 représente un schéma d'alimentation de chaque étoile de la MSAPDE à base de l'onduleur de tension à deux niveaux. Pour la modélisation de ce schéma, on considère son entrée comme une source parfaite, composée de deux générateurs de F.E.M égale  $E = \frac{U_0}{2}$  connectés entre eux par un point noté «  $n_0$  » [19].

Les tensions de chaque étoile de la MSAPDE sont des tensions simples notées  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$ ,  $V_{cn}$ .

Avec :

-  $T_i$  et  $T_i'$  (ou  $i = a, b, c$ ) sont des transistors ;

-  $S_i$  et  $S_i'$  sont les commandes logiques (complémentaires) de  $T_i$  et  $T_i'$  (les transistors du bras  $i$ , ou  $i = a, b, c$ ) respectivement tel que si  $S_i = 1$  l'interrupteur  $T_i$  est passant et  $T_i'$  est ouvert et si  $S_i = 0$  l'interrupteur  $T_i$  est ouvert et  $T_i'$  est passant.



**Figure II.3 :** Représentation d'un onduleur de tension à deux niveaux.

Dans ces conditions on peut écrire les tensions simples  $V_{in}$  en fonction des signaux de commande  $S_i$  ( $i = a, b, c$ ) et de la tension continue  $V_{dc} = U_0$  à l'entrée de l'onduleur tel que :

$$\begin{cases} V_{an_0} = S_a V_{dc} \\ V_{bn_0} = S_b V_{dc} \\ V_{cn_0} = S_c V_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

Soit « n » le point neutre du côté alternatif (MASPDE), alors les trois tensions simple  $V_{in}$  ( $i = a, b, c$ ) côté AC ainsi que les tensions composées  $U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$  sont définies par les relations suivantes :

$$\begin{cases} V_{an} = V_{an_0} - V_{nn_0} \\ V_{bn} = V_{bn_0} - V_{nn_0} \\ V_{cn} = V_{cn_0} - V_{nn_0} \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an} - V_{bn} \\ U_{bc} = V_{bn} - V_{cn} \\ U_{ca} = V_{cn} - V_{an} \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

La charge constituée par la MSAPDE est équilibrée alors on a  $V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$ , on déduit à partir de (II.21) la tension  $V_{nn_o}$  entre les points  $n$  et  $n_o$ :

$$V_{nn_o} = \frac{1}{3} [V_{an} + V_{bn} + V_{cn}] \quad (II.23)$$

En combinant entre (II.20), (II.21) et (II.22) on obtient le vecteur des simples en fonction des grandeurs de commande :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_0 \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (II.24)$$

La figure II.4 représente le schéma bloc qui peut être utilisé en simulation pour valider le modèle (II.24) de l'onduleur à deux niveaux (0,  $U_0$ ).

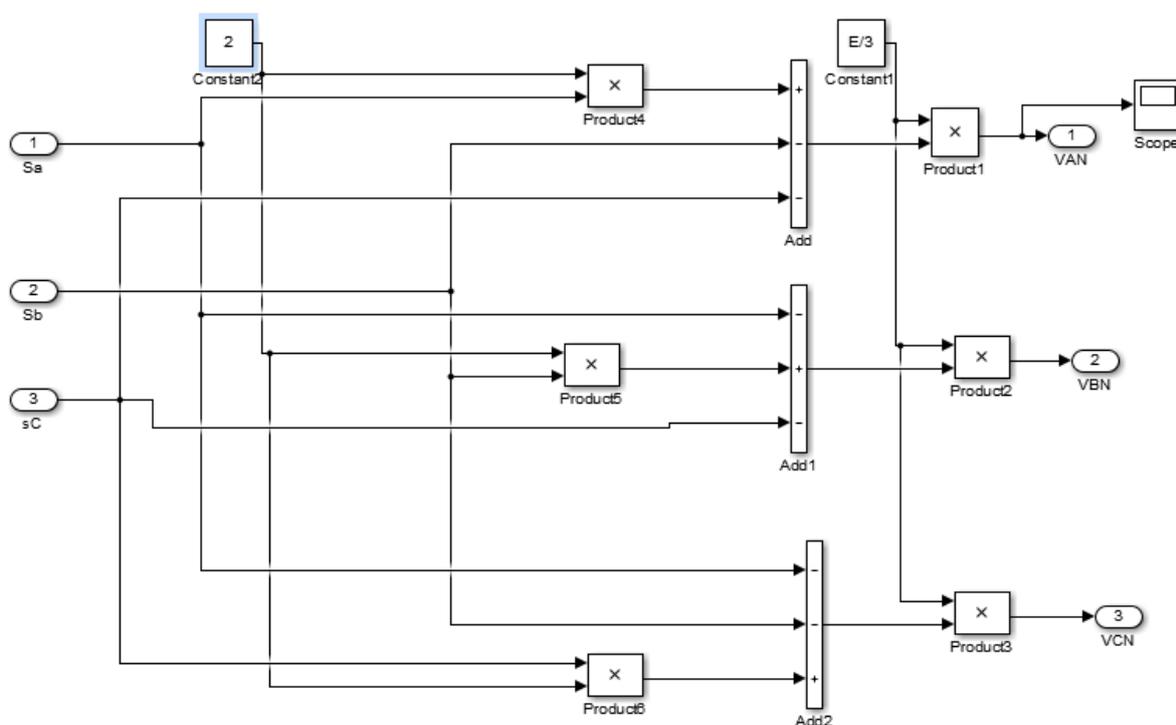


Figure II.4 : Schéma bloc d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux.

### II.5.3 Commande de l'onduleur par Modulations de largeur d'impulsions

L'onduleur a pour objectif de générer à sa sortie, des tensions les plus sinusoïdales possibles. Les grandeurs de sortie des commandes analogiques ou numériques de l'onduleur servent à obtenir les tensions ou courants désirés aux bornes de la machine. La technique de modulation de largeur d'impulsions (MLI en français et PWM pour Pulse Width Modulation en anglais) permet de reconstituer ces grandeurs à partir d'une source à fréquence fixe et

tension fixe (en général une tension continue) par l'intermédiaire d'un convertisseur direct. Celui-ci réalise les liaisons électriques entre la source et la charge. Le réglage est effectué par les durées d'ouverture et de fermeture des interrupteurs et par les rapports cycliques. La technique de MLI sinusoïdale triangulaire (naturelle) est utilisée dans notre schéma de commande.

La figure II.5 représente le schéma bloc qui peut être utilisé en simulation pour valider la MLI sinusoïdale triangulaire.

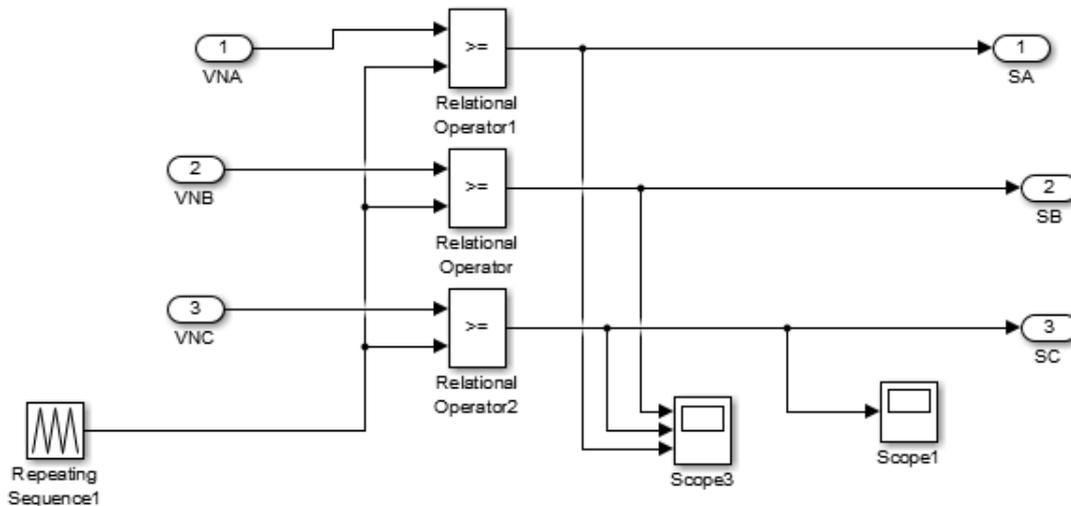


Figure II.5: Schéma bloc de la MLI sinusoïdale triangulaire.

#### II.5.4 Principe de la commande par MLI sinusoïdale triangulaire

Le principe général consiste à convertir une modulante (tension de référence délivrée par la loi de commande), généralement sinusoïdale, en une tension sous forme de créneaux successifs de deux niveaux (0,  $U_0$ ) dans notre cas, générée à la sortie de l'onduleur (niveau de la partie puissance). Cette technique repose sur la comparaison entre deux signaux :

- Le premier, appelé signal de référence, représente l'image de la sinusoïde qu'on désire à la sortie de l'onduleur. Ce signal est modulable en amplitude et en fréquence.
- Le second, appelé signal de la porteuse, définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques de l'onduleur. C'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence.

L'intersection de ces signaux donne les instants de commutation des interrupteurs [22] [23].

### II.5.5 Caractéristique de la MLI

Deux paramètres caractérisent cette commande MLI :

#### - Coefficient de réglage

Le coefficient de réglage en tension « r » est égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence à la valeur crête de l'onde de modulation (amplitude de la porteuse) et il définit par :

$$r = \frac{V_m}{V_{pm}} \quad (\text{II.25})$$

Avec,

- $V_m$  : L'amplitude de la tension de référence (signal sinusoïdal).
- $V_{pm}$  : L'amplitude de la porteuse (signal triangulaire).

#### - Indice de modulation

Il égale au rapport de la fréquence de modulation sur la fréquence de la référence et il définit par :

$$m = \frac{f_p}{f_r} \quad (\text{II.26})$$

Avec :

- $f_p$  : Fréquence de la modulante (valeur très grande).
- $f_r$  : Fréquence de la référence

### II.6 Dynamique du véhicule électrique

Dans le but d'étudier la commande du VE, il est nécessaire de disposer d'un modèle qui tient compte de la dynamique du VE à partir des efforts de traction développés par ses actionneurs et des forces de résistance au déplacement. Le comportement d'un VE en mouvement le long de son sens de déplacement est déterminé par toutes les forces qui lui sont appliquées dans cette direction. La figure II.6 montre les forces agissant sur un véhicule dans une pente [24].

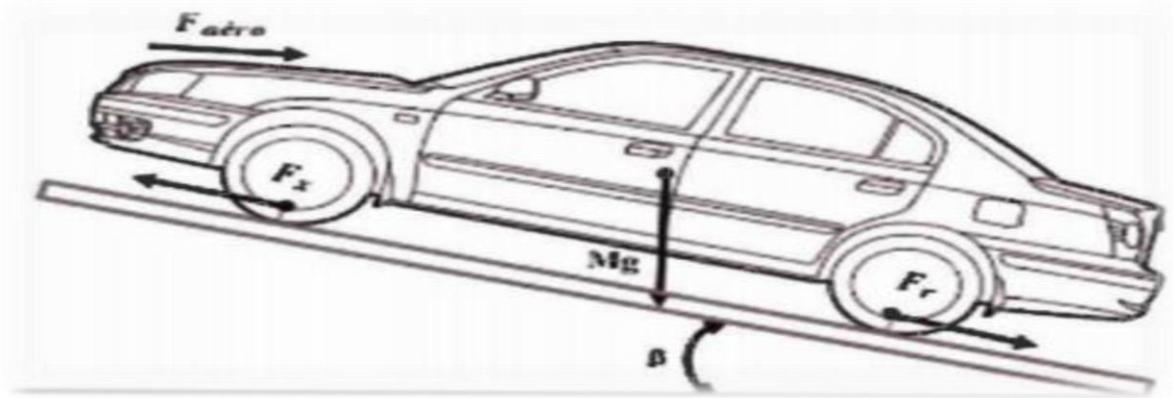


Figure II.6: Représentation des forces agissant sur le VE.

L'expression de la force totale est donnée par la relation suivante :

$$\sum F_{tot} = F_x - F_{aero} - F_r - F_{pente} \quad (II.27)$$

Avec :

$F_x$  : La force longitudinale (accélération) ;

$F_{aero}$  : La force aérodynamique ;

$F_r$  : La force de résistance au roulement ;

$F_{pente}$  : La dynamique de la route ;

### II.6.1 Force aérodynamique

La force aérodynamique (équation II.28) est la force exercée par l'air selon l'axe du mouvement sur le véhicule. Elle est proportionnelle à la masse volumique  $\rho_{air}$  de l'air exprimée en  $kg/m^3$ , à la surface frontale du véhicule  $S_f$  exprimée en  $m^2$ , au coefficient de la traînée du véhicule  $C_x$  et au carré de la vitesse du véhicule [25].

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \rho_{air} S_f C_x (v - v_{vent})^2 \quad (II.28)$$

$\rho_{air}$ : Densité volumique de l'air.

$S_f$  : Section frontale du véhicule.

$v$ : Vitesse du véhicule.

$v_{vent}$ : Vitesse du vent.

$C_x$ : Coefficient de pénétration dans l'air.

Le coefficient  $C_x$  peut être estimé à :

- 0.2 pour un véhicule ayant un très bon profil.
- 0.3 pour un véhicule ayant un bon profil.
- 0.5 pour un véhicule typique.
- 0.7 pour une camionnette.

La figure II.7 représente l'allure de la force aérodynamique pour différentes valeurs de  $C_x$ .

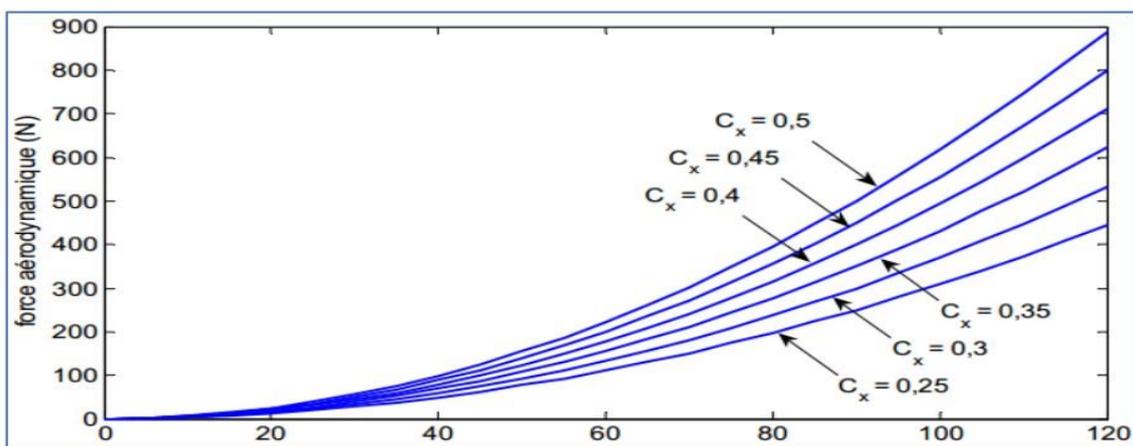


Figure II.7: Force aérodynamique pour différentes valeurs de  $C_x$

## II.6.2 Force de résistance au roulement

La force de résistance au roulement (équation II.29) est une force de résistance sur le VE, due au contact des roues avec la chaussée. Elle peut varier en fonction de plusieurs paramètres : la vitesse du VE, la pression des roues, l'état et le type de la chaussée (sèche, humide, sablée, etc.) [24].

Dans le cas d'un modèle simplifié, la force de résistance au roulement s'écrit comme suit :

$$F_r = \mu M g \cos (\beta) \quad (\text{II.29})$$

Avec :

$\mu$  : Coefficient de résistance au roulement ;

$g$  : Accélération de la gravité exprimée en (m/s<sup>2</sup>),

$M$  : Masse totale du véhicule exprimée en (kg) ;

$\beta$  : Angle de la pente exprimé en (rad).

La figure II.8 représente comment la force de résistance au roulement agit sur la roue de VE.

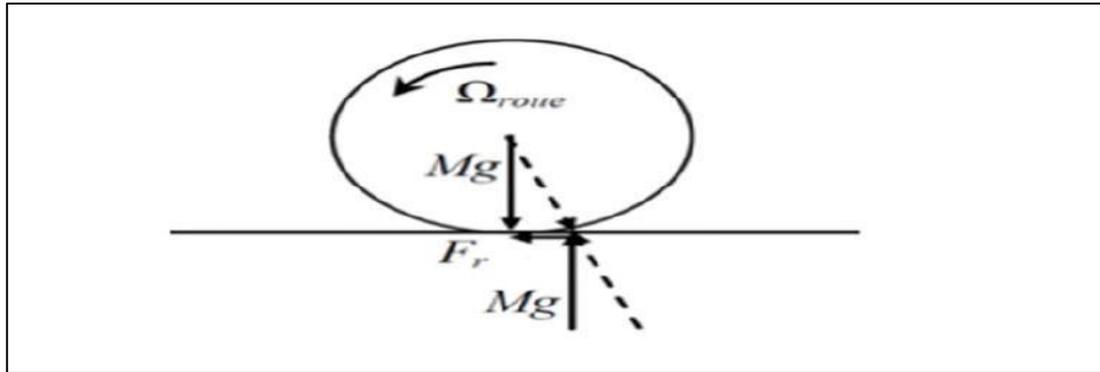


Figure II.8: Force de roulement sur la roue.

### II.6.3 Force de la dynamique de la route

La force de la dynamique de la route équation( II.30)est la force de gravité obtenue quand le véhicule circule sur une route non horizontale [26].

$$F_{pente} = M g \sin (\beta) \quad (II.30)$$

### II.6.4 Force d'accélération

La force due à l'accélération  $F_x$  (équation II.31) assure le comportement dynamique souhaité par le conducteur. Elle est obtenue par le produit entre la masse du véhicule et l'accélération imposée par le conducteur.

$$F_x = M \frac{dv}{dt} = M\gamma \quad (II.31)$$

Avec :  $\gamma$  : accélération du véhicule.

## II.7 Couplage entre le modèle mécanique du VE et celui de son actionneur

La dynamique du VE étudié est couplée à la motorisation électrique à travers un réducteur (figure II.9).

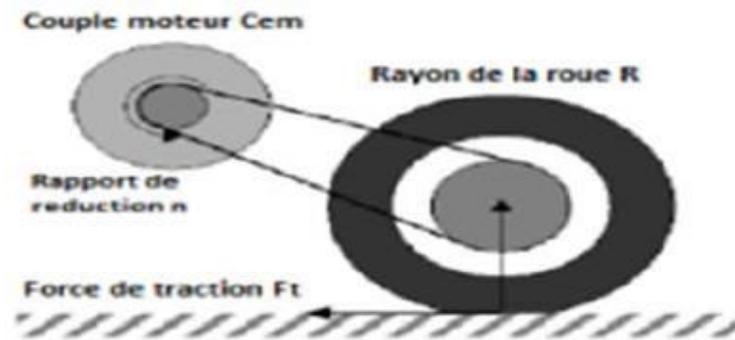


Figure II.9: Mécanisme du réducteur.

Le réducteur doit être dimensionné de telle manière que le couple transmissible soit toujours supérieur au couple résistant. Il permet l'adaptation des vitesses de rotation et des couples entre l'arbre de l'actionneur électrique et les roues. L'équation dynamique du mouvement du VE est :

$$M\dot{V} = F_{tot} - F_{res} = F_{fr} + F_{ar} - F_{res} \quad (II.32)$$

Avec :

$F_{fr}$ : Force de traction longitudinale des roues frontales.

$F_{fr} = 0$  Si le véhicule est propulsé par les deux roues arrière La vitesse longitudinale du VE est donnée par :

$$V = R \cdot \omega_{roue} \quad (II.33)$$

La relation entre la vitesse du moteur et la vitesse de la roue du VE est exprimé par :

$$\omega_r = N \cdot \omega_{roue} \quad (II.34)$$

$N$  : Le rapport de réduction de la vitesse  $\omega_r$  du MSAPDE et celle de la roue du VE  $\omega_{roue}$ .

Alors, l'accélération longitudinale de la roue est :

$$\dot{V} = \frac{R}{N} \dot{w}_r \quad (\text{II.35})$$

On remplaçant (II.32) dans (II.29) sachant que le VE est à attraction arrière, on obtient :

$$M \cdot \frac{R}{N} \dot{w}_r = F_{ar} - F_{res} \quad (\text{II.36})$$

Alors :

$$F_{ar} = M \cdot \frac{R}{N} \dot{w}_r + F_{res} \quad (\text{II.37})$$

L'équation dynamique de la rotation de la roue motrice est donnée par :

$$J \dot{w}_{roue} = C_t - R F_{ar} \quad (\text{II.38})$$

Avec  $C_t$ : le couple de traction de la roue.

En substituant (II.37) dans (II.38), on obtient :

$$J \dot{w}_{roue} = C_t - R \left( M \cdot \frac{R}{N} \dot{w}_r + F_{res} \right) \quad (\text{II.39})$$

L'équation de rotation du moteur est exprimée comme suit :

$$J \dot{w}_r + F_{vF} w_r = C_{em} - \frac{C_t}{N} \quad (\text{II.40})$$

En remplaçant  $C_t$  par son expression déduite de (II.39) dans (II.40), on obtient :

$$J \dot{w}_r + F_{vF} w_r = C_{em} - \frac{J \dot{w}_{roue} + R \left( M \cdot \frac{R}{N} \dot{w}_r + F_{res} \right)}{N} \quad (\text{II.41})$$

Donc,

$$\left( J + \frac{J}{N^2} + M \frac{R^2}{N^2} \right) \dot{w}_r + F_{vF} w_r = C_{em} - \frac{R}{N} F_{res} \quad (\text{II.42})$$

On obtient après calcul :

$$J_e \dot{w}_r + F_e w_r = C_{em} - C_{rm} \quad (\text{II.43})$$

Avec :

$$J_e = J + \frac{J}{N^2} + M \frac{R^2}{N^2} \quad (\text{II.44})$$

$$F_e = F_{vF} \quad (\text{II.45})$$

$$C_{rm} = \frac{R}{N} F_{res} \quad (\text{II.46})$$

En insérant les équations électriques du MSAPDE, le modèle global du VE-MSAPDE s'écrit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{nd}}{dt} = \frac{1}{L_{nd}} (v_{nd} - r_s i_{nd} + w_e L_{nq} i_{nq}) \\ \frac{di_{nq}}{dt} = \frac{1}{L_{nq}} (v_{nq} - r_s i_{nq} - w_e L_{nd} i_{nd} - w_e \sqrt{3} \Psi_{PM}) \\ \frac{di_{ad}}{dt} = \frac{1}{L_{ad}} (v_{ad} - r_s i_{ad} + w_e L_{aq} i_{aq}) \\ \frac{di_{aq}}{dt} = \frac{1}{L_{aq}} (v_{aq} - r_s i_{aq} - w_e L_{ad} i_{ad}) \end{array} \right. \quad (\text{II.47})$$

## II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisée la MSAPDE dans le plans  $abc$  et dans le plan  $dq$  ou le modèle  $dq$  est plus simple que celui  $abc$ , donc c'est ce modèle qui est combiné à celui du VE et le modèle global sera exploité dans le chapitre prochain pour le calcul de la commande linéarisant par retour de sortie, et celle équivalente par mode de glissement.

---

***CHAPITRE 3 :***  
***Commande équivalente par les modes***  
***glissants.***

---

### III.1 Introduction

Lors de la résolution de n'importe quel problème de commande, il est fréquent de constater des écarts entre le système réel et le modèle mathématique élaboré. Il est possible que cette différence soit causée par la fluctuation des paramètres de la dynamique du système ou par l'approximation du comportement complexe du système par un modèle. Cela a suscité un vif intérêt pour l'élaboration de méthodes de commande solides qui visent à résoudre cette problématique. Effectivement, il est nécessaire d'utiliser des méthodes de contrôle afin de résoudre le problème des variations paramétriques, en garantissant une erreur statique nulle, une réponse amortie et rapide, ainsi qu'un système de contrôle stable et rejetant les perturbations externes. La commande par mode glissement est une méthode connue pour sa simplicité et sa robustesse. Elle a été inventée pour la première fois en union soviétique dans le but de résoudre les problèmes de plusieurs applications. Afin d'obtenir ce régime glissant, une loi de commande est requise pour avoir une nature discontinue, c'est à dire que la structure du système a besoin d'être modifiée dans le temps. Dans cette partie du mémoire, on commande le VE actionné par le MSAPDE par deux commandes : un retour de sortie linéarisant qui compense les termes non linéaires et une commande équivalente par le mode glissant qui assure l'asservissement de vitesse du VE.

### III.2 Principe de la commande équivalente par les modes glissants

L'élaboration de la commande par mode de glissement nécessite deux étapes importantes tel que :

- Choix d'une surface de glissement  $S(x, t)$  qui constitue la dynamique du système en boucle fermée ;
- Déterminer d'une loi de commande (commutation),  $U(x, t)$ , qui permet de ramener toutes les trajectoires des sorties et des états du système sur la surface de glissement et de les maintenir.

### III.3 Commande équivalente par les modes glissants

La synthèse de la commande équivalente nécessite un modèle sans terme non-linéaire alors on linéarise d'abord le modèle du VE-MSAPDE par des retours de sortie, en utilisant les signaux d'entrées  $V_{nd}$  et  $V_{ad}$ , puis on utilise le modèle linéarisé pour asservir la vitesse avec une loi de commande par mode de glissement avec les entrées disponibles  $V_{nq}$  et  $V_{aq}$ .

### III.3.1 Modèle du VE actionné par le MSAPDE

On considère les équations du VE actionné par le MSAPDE établies au chapitre précédent (équation II.44) et qui sont rappelées ci-dessous :

$$\frac{di_{nd}}{dt} = \frac{1}{L_{nd}}(v_{nd} - r_s i_{nd} + \omega_e L_{nq} i_{nq}) \quad (\text{III.1})$$

$$\frac{di_{nq}}{dt} = \frac{1}{L_{nq}}(v_{nq} - r_s i_{nq} - \omega_e L_{nd} i_{nd} - \omega_e \sqrt{3} \Psi_{PM}) \quad (\text{III.2})$$

$$\frac{di_{ad}}{dt} = \frac{1}{L_{ad}}(v_{ad} - r_s i_{ad} + \omega_e L_{aq} i_{aq}) \quad (\text{III.3})$$

$$\frac{di_{aq}}{dt} = \frac{1}{L_{aq}}(v_{aq} - r_s i_{aq} - \omega_e L_{ad} i_{ad}) \quad (\text{III.4})$$

L'équation mécanique :

$$J_e \dot{\Omega} + F_e \Omega = T_e - C_{rm} \quad (\text{III.5})$$

Le couple électromagnétique d'une MSAPDE sans effets de saillance :

$$T_e = \sqrt{3} P \Psi_{PM} i_{nq} \quad (\text{III.6})$$

$$\omega_e = P \Omega \quad (\text{III.7})$$

$$\dot{\theta}_m = \Omega \quad (\text{III.8})$$

### III.3.2 Retour de sortie linéarisant

La linéarisation des équations de l'actionneur MSAPDE du VE est réalisé, en compensant par annulation les termes de couplage dans (III.1) et (III.3), en utilisant les retours de sortie suivant :

$$V_{nd} = -\omega_e L_{nq} i_{nq} = -P L_{nq} \Omega i_{nq} \quad (\text{III.9})$$

$$V_{ad} = -\omega_e L_{aq} i_{aq} = -P L_{aq} \Omega i_{aq} \quad (\text{III.10})$$

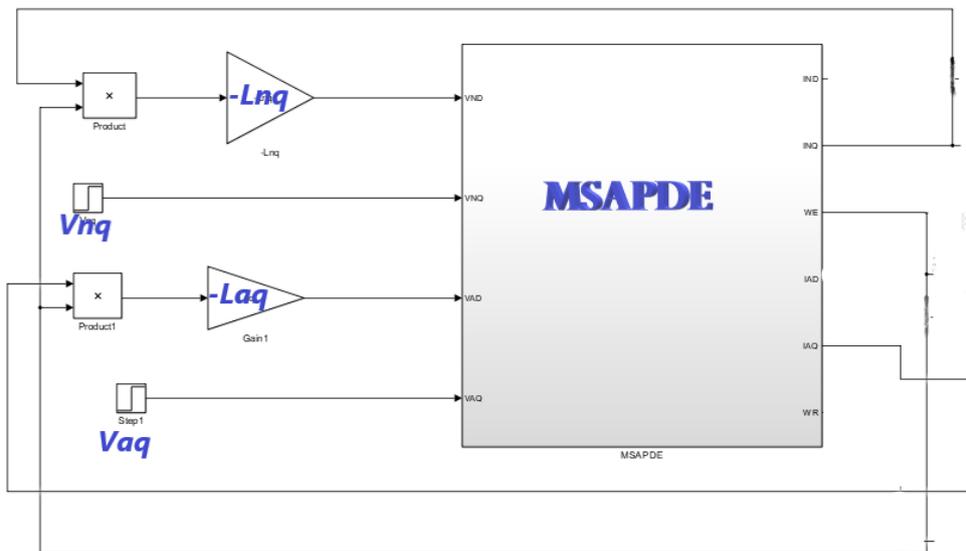
On remplace (III.9) et (III.10) dans (III.1) et (III.3) respectivement, on obtient le modèle du MSAPDE linéaire car au régime établie les courants directs  $i_{nd}$  et  $i_{ad}$  sont nulles. En remplaçant  $\omega_e$  par son expression (III.7) et  $T_e$  par son expression (III.8), le modèle linéaire du MSAPDE est comme suit :

$$\frac{di_{nq}}{dt} = \frac{1}{L_{nq}}(v_{nq} - r_s i_{nq} - \omega_e \sqrt{3} \Psi_{PM}) \quad (\text{III.11})$$

$$\frac{di_{aq}}{dt} = \frac{1}{L_{aq}}(v_{aq} - r_s i_{aq}) \quad (\text{III.12})$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J_e}(\sqrt{3}P\Psi_{PM}i_{nq} - F_e\Omega - C_{rm}) \quad (\text{III.13})$$

La figure III.1 présente le schéma bloc de la commande linéarisant par retour de sortie du système VE-MSAPDE.



**Figure III.1 :** Schéma bloc de la commande linéarisant par retour de sortie du VE-MSAPDE

### III.3.3 Calcul de la commande équivalente par mode glissant

On choisit deux surfaces de glissement  $S_n(x)$  et  $S_a(x)$  correspondant aux entrées  $V_{nq}$  et  $V_{aq}$  respectivement ou en utilisant ces deux surfaces on calcul ces signaux de commande.

- **Choix des surfaces de glissement**

Les deux surfaces de glissement sont choisies, en se basant sur la dynamique du VE-MSAPDE linéaire donnée par les équations (III.1) -(III.3) ou elles sont une combinaison du vecteur d'état  $X_s$  du système linéaire, de la vitesse de référence  $\Omega^{ref}$  et de l'état  $X_r$  d'un intégrateur qui élimine l'erreur d'asservissement au régime établi.

$$S(x) = \begin{pmatrix} S_n(x) \\ S_a(x) \end{pmatrix} = -K_s X_s + K_r X_r + K_w^{ref} \Omega^{ref} \quad (\text{III.14})$$

Tel que  $X_s = (i_{nq} \quad i_{aq} \quad \Omega)^T$  vecteur d'état du système linéaire VE-MSAPDE (équations (III.11) - (III.12)).

- Equation d'état de l'intégrateur

On ajoute un intégrateur afin de minimiser l'erreur d'asservissement de vitesse du VE dont l'équation d'état est :

$$\dot{X}_r = \Omega^{ref} - \Omega \quad (III.15)$$

$\Omega^{ref}$  Est la vitesse de référence de l'arbre du MSAPDE.

$$K_s = \begin{bmatrix} K_{inq} & 0 & K_{nw} \\ 0 & K_{iaq} & K_{aw} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 & 0 & K_3 \\ 0 & K_2 & K_4 \end{bmatrix} \text{ Matrice des gains du retour d'état.}$$

$$K_r = \begin{bmatrix} K_{rn} \\ K_{ra} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_5 \\ K_6 \end{bmatrix} : \text{ gain de l'intégrateur } X_r.$$

$$K_m^{ref} = \begin{bmatrix} K_{nw}^{ref} \\ K_{aw}^{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_7 \\ K_8 \end{bmatrix} : \text{ gain du signal de référence } \Omega^{ref}.$$

Les deux gains de retour de vitesse  $\Omega$  peuvent être choisis identique alors on écrit  $K_3 = K_4$  et on a  $K_i \geq 0; i = 1, \dots, 8$ . On choisit aussi les deux gains de retour de l'état  $X_r$  de l'intégrateur identique, donc  $K_5 = K_6$ , de même pour ceux de la vitesse de rotation de référence  $\Omega^{ref}$ , donc on écrit  $K_7 = K_8$ .

- Calcul des surfaces de glissement

$$\begin{aligned} S(x) &= \begin{pmatrix} S_n(x) \\ S_a(x) \end{pmatrix} = - \begin{bmatrix} K_1 & 0 & K_3 \\ 0 & K_2 & K_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{nq} \\ i_{aq} \\ \Omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_5 \\ K_6 \end{bmatrix} X_r + \begin{bmatrix} K_7 \\ K_8 \end{bmatrix} \Omega^{ref} \\ &= \begin{pmatrix} -K_1 i_{nq} - K_3 \Omega + K_5 X_r + K_7 \Omega^{ref} \\ -K_2 i_{aq} - K_4 \Omega + K_6 X_r + K_8 \Omega^{ref} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$$S_n(x) = -K_1 i_{nq} - K_3 \Omega + K_5 \int (\Omega^{ref} - \Omega) + K_7 \Omega^{ref} \quad (III.16)$$

$$S_a(x) = -K_2 i_{aq} - K_4 \Omega + K_6 \int (\Omega^{ref} - \Omega) + K_8 \Omega^{ref} \quad (III.17)$$

- Calcul du vecteur des commandes équivalentes ( $V_{nq}, V_{aq}$ ) :

Au mode glissant on

$$S(x) = \begin{pmatrix} S_n(x) \\ S_a(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (III.18)$$

On peut écrire

$$\dot{S}(x) = \begin{pmatrix} \dot{S}_n(x) \\ \dot{S}_a(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{III.19})$$

Donc (III.14) s'écrit

$$\dot{S}(x) = -K_s \dot{X}_s + K_r \dot{X}_r + K_{nw}^{ref} \dot{\Omega}^{ref} \quad (\text{III.20})$$

• **Calcul du modèle d'état d modèle linéaire VE-MSAPDE**

On écrit les équations (0.11) – (III.12) et (0.13) sous forme matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} \dot{\widehat{i}}_{nq} \\ \dot{\widehat{i}}_{aq} \\ \dot{\Omega} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -r_s/L_{nq} & 0 & -\sqrt{3}p\Psi_{PM}/L_{nq} \\ 0 & -r_s/L_{aq} & 0 \\ \sqrt{3}P\Psi_{PM}/J_e & 0 & F_e/J_e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{nq} \\ i_{aq} \\ \Omega \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1/L_{nq} & 0 \\ 0 & 1/L_{aq} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{nq} \\ V_{aq} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1/J_e \end{pmatrix} C_{rm} \quad (\text{III.21})$$

On écrit (III.21) sous forme compacte,

$$\dot{X}_s = A_s X_s + B_s U + B_r C_{rm} \quad (\text{III.22})$$

On remplace  $\dot{X}_s$  donnée par (III.22), et  $\dot{X}_r$  donné par (III.15) dans (III.20), on obtient,

$$\dot{S}(x) = -K_s A_s X_s + B_s U + B_r C_{rm} + K_r (\Omega^{ref} - \Omega) + K_{nw}^{ref} \dot{\Omega}^{ref} \quad (\text{III.23})$$

Au mode glissant  $\dot{S}(x) = 0$  et on déduit le vecteur des commande équivalente  $U_{eq}$  :

$$\begin{aligned} U_{eq} = \begin{pmatrix} V_{nq} \\ V_{aq} \end{pmatrix} &= (K_s B_s)^{-1} \{ (-K_s A_s X_s - K_s B_r C_{rm}) + K_r (\Omega^{ref} - \Omega) + K_{nw}^{ref} \dot{\Omega}^{ref} \} \\ &= -(K_s B_s)^{-1} (K_s A_s) X_s - (K_s B_s)^{-1} (K_s B_r) C_{rm} + (K_s B_s)^{-1} K_r (\Omega^{ref} - \Omega) + \\ &(K_s B_s)^{-1} K_{nw}^{ref} \dot{\Omega}^{ref} \end{aligned} \quad (\text{III.24})$$

Sachant que :

$$K_s B_s = \begin{pmatrix} K_1 & 0 & K_3 \\ 0 & K_2 & K_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1/L_{nq} & 0 \\ 0 & 1/L_{aq} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_1/L_{nq} & 0 \\ 0 & K_2/L_{aq} \end{pmatrix}$$

$$\text{Donc } (K_S B_S)^{-1} = \begin{pmatrix} L_{nq}/K_1 & 0 \\ 0 & L_{aq}/K_2 \end{pmatrix} \text{ avec : } \begin{cases} K_1 > 0 \\ K_2 > 0 \end{cases}$$

$$K_S A_S = \begin{pmatrix} K_1 & 0 & K_3 \\ 0 & K_2 & K_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -r_s/L_{nq} & 0 & -\sqrt{3}P\Psi_{PM}/L_{nq} \\ 0 & -r_s/L_{aq} & 0 \\ \sqrt{3}P\Psi_{PM}/J_e & 0 & F_e/J_e \end{pmatrix}$$

$$K_S A_S = \begin{pmatrix} -r_s/L_{nq} K_1 + \sqrt{3}P\Psi_{PM}/J_e K_3 & 0 & -\sqrt{3}P\Psi_{PM}/L_{nq} K_1 + F_e/J_e K_3 \\ \sqrt{3}P\Psi_{PM}/J_e K_4 & -r_s/L_{nq} K_2 & F_e/J_e K_4 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} \text{Donc } (K_S B_S)^{-1}(K_S A_S) &= \begin{pmatrix} L_{nq}/K_1 & 0 \\ 0 & L_{aq}/K_2 \end{pmatrix} (K_S A_S) \\ &= \begin{pmatrix} r_s + \sqrt{3} P\Psi_{PM} L_{nq}/J_e K_3/K_1 & 0 & -\sqrt{3} P\Psi_{PM} + F_e L_{nq}/J_e K_3/K_1 \\ \sqrt{3} P\Psi_{PM} L_{nq}/J_e K_4/K_2 & -r_s & F_e L_{aq}/J_e K_4/K_2 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (\text{III.25})$$

$$K_S B_r = \begin{pmatrix} K_1 & 0 & K_3 \\ 0 & K_2 & K_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1/J_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -K_3/J_e \\ K_4/J_e \end{pmatrix}$$

$$(K_S B_S)^{-1}(K_S B_r) = \begin{pmatrix} L_{nq}/K_1 & 0 \\ 0 & L_{aq}/K_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -K_3/J_e \\ K_4/J_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -L_{nq}/J_e & K_3/K_1 \\ -L_{aq}/J_e & K_6/K_2 \end{pmatrix} \quad (\text{III.26})$$

$$(K_S B_S)^{-1} K_r = \begin{pmatrix} L_{nq}/K_1 & 0 \\ 0 & L_{aq}/K_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K_5 \\ K_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{nq} & K_5/K_3 \\ L_{aq} & K_6/K_2 \end{pmatrix} \quad (\text{III.27})$$

$$(K_s B_s)^{-1} K_{nw}^{ref} = \begin{pmatrix} L_{nq}/K_1 & 0 \\ 0 & L_{aq}/K_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K_7 \\ K_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{nq} & K_7/K_1 \\ L_{aq} & K_8/K_2 \end{pmatrix} \quad (\text{III.28})$$

En remplaçant les matrices  $(K_s B_s)^{-1}(K_s A_s)$  ;  $(K_s B_s)^{-1}(K_s B_r)$  ;  $(K_s B_s)^{-1}K_r$  et  $(K_s B_s)^{-1}K_{nw}^{ref}$  par leur expressions (III.23),(III.24), (III.25) et (III.26) respectivement dans l'expression (III.22) de  $U_{eq} = \begin{pmatrix} V_{nq} \\ V_{aq} \end{pmatrix}$ , on obtient :

$$\begin{aligned} V_{nq} = U_{nq}^{eq} &= \left( r_s - \sqrt{3} P\Psi_{PM} L_{nq}/J_e K_3/K_1 \right) i_{nq} + \left( \sqrt{3} P\Psi_{PM} + F_e L_{nq}/J_e K_3/K_1 \right) \Omega + \\ &\quad \left( L_{nq} K_5/K_1 \right) + (\Omega^{ref} - \Omega) + \left( L_{nq} K_7/K_1 \right) \dot{\Omega}^{ref} + \left( L_{nq}/J_e K_3/K_1 \right) C_{rm} \\ V_{aq} = U_{aq}^{eq} &= \left( -\sqrt{3} P\Psi_{PM} L_{aq}/J_e K_4/K_2 \right) i_{nq} + r_s i_{aq} - \left( F_e L_{aq}/J_e K_4/K_2 \right) \Omega \\ &\quad + \left( L_{aq} K_6/K_2 \right) (\Omega^{ref} - \Omega) + \left( L_{aq} K_8/K_2 \right) \dot{\Omega}^{ref} + \left( L_{aq}/J_e K_4/K_2 \right) C_r \end{aligned}$$

Remarque :

Dans le cas de la machine étudiée on a  $f_{vf} = 0$

$$\begin{aligned} V_{nq} = U_{nq}^{eq} &= \left( r_s - \sqrt{3} P\Psi_{PM} L_{nq}/J_e K_3/K_1 \right) i_{nq} + \sqrt{3} P\Psi_{PM} \Omega + \left( L_{nq} K_5/K_1 \right) + \\ &\quad (\Omega^{ref} - \Omega) + \left( L_{nq} K_7/K_1 \right) \dot{\Omega}^{ref} + \left( L_{nq}/J_e K_3/K_1 \right) \widehat{C}_r \end{aligned} \quad (\text{III.29})$$

$$\begin{aligned} V_{aq} = U_{aq}^{eq} &= \left( -\sqrt{3} P\Psi_{PM} L_{aq}/J_e K_4/K_2 \right) i_{nq} + r_s i_{aq} + \left( L_{aq} K_6/K_2 \right) (\Omega^{ref} - \Omega) + \\ &\quad \left( L_{aq} K_8/K_2 \right) \dot{\Omega}^{ref} + \left( L_{aq}/J_e K_4/K_2 \right) \widehat{C}_{rm} \end{aligned} \quad (\text{III.30})$$

### Loi d'adaptation de couple de charge $C_{rm}$ :

Le couple de charge  $C_{rm}$  est une grandeur inconnue en pratique, mais nécessaire pour calculer les signaux de commandes  $V_{nq}$  et  $V_{aq}$  équations (III.29) et (III.30), donc on doit estimer  $C_{rm}$  par la loi suivante :

$$\dot{\widehat{C}}_{rm} = -K_9 (\Omega^{ref} - \Omega) \quad 30; K_9 > 0 : \text{gain à choisir}$$

**Calcul de l'équation d'état du MSAPDE en boucle fermée :**

Il suffit de remplacer  $U = U_{eq}$  par son expression 22 dans l'équation (III.21) du MSAPDE, on obtient après les calculs :

$$\dot{X}_s = [A_s - B_s(K_s B_s)^{-1}(K_s B_s)]X_s + [B_r - B_s(K_s B_s)^{-1}(K_s B_r)]C_{rm} + [B_s(K_s B_s)^{-1}K_r](\Omega^{ref} - \Omega) + [B_s(K_s B_s)^{-1}K_{nw}^{ref}]\dot{\Omega}^{ref} \quad (III.31)$$

La matrice du système en boucle ferme :  $A_s^{BF}$  pour la MSAPDE avec  $f_{vf} = 0$

$$A_s^{BF} = B_s(K_s B_s)^{-1}(K_s B_s) = \begin{pmatrix} -\sqrt{3} P \Psi_{PM} / J_e K_3 / K_1 & 0 & -\sqrt{3} P \Psi_{PM} / L_{aq} + F_e / J_e K_3 / K_1 \\ -\sqrt{3} P \Psi_{PM} / J_e K_4 / K_2 & 0 & -F_e / J_e K_4 / K_2 \\ \sqrt{3} P \Psi_{PM} / J_e & 0 & -F_e / J_e \end{pmatrix}$$

$$F_e = 0$$

$$A_s^{BF} = \begin{pmatrix} -\sqrt{3} P \Psi_{PM} / J_e K_3 / K_1 & 0 & -\sqrt{3} P \Psi_{PM} / L_{aq} + F_e / J_e K_3 / K_1 \\ -\sqrt{3} P \Psi_{PM} / J_e K_4 / K_2 & 0 & 0 \\ \sqrt{3} P \Psi_{PM} / J_e & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (III.32)$$

L'équation caractéristique en boucle ferme pour MSAPDE avec  $f_{vf} = 0$

$$\mathbf{D}^{BF}(S) = (sI_3 - A_s^{BF}) = \begin{pmatrix} s + \sqrt{3} P \Psi_{PM} / J_e K_3 / K_1 & 0 & \sqrt{3} P \Psi_{PM} / L_{aq} \\ \sqrt{3} P \Psi_{PM} / J_e K_4 / K_2 & s & 0 \\ -\sqrt{3} P \Psi_{PM} / J_e & 0 & s \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{D}^{BF}(S) = s [(s + \sqrt{3} P \Psi_{PM} / J_e K_3 / K_1)s + (\sqrt{3} P \Psi_{PM} / J_e)(\sqrt{3} P \Psi_{PM} / L_{aq})]$$

On obtient :

$$\mathbf{D}^{BF}(S) = s (s^2 + (\sqrt{3} P \Psi_{PM} / J_e K_3 / K_1)s + 3(P \Psi_{PM})^2 / J_e L_{aq}) \quad (III.33)$$

**Déterminations des gains  $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6, K_7, K_8$  par placement de pôles :**

On choisit trois (3) pôles  $P_1 = 0, P_2 = -\rho + \rho j, P_3 = -\rho - \rho j, \rho > 0$

L'équation caractéristique désirée est :

$$D^*(s) = (s - P_1)(s - P_2)(s - P_3) = s(s + \rho - \rho j)(s + \rho + \rho j)$$

$$D^*(s) = s(s^2 + 2\rho s + 2\rho^2) \quad (\text{III.34})$$

Par identification entre (III.33) et (III.34), on obtient :

$$K_3 = \frac{2J_e \rho}{\sqrt{3} P \Psi_{PM}} K_1$$

**Choix des gain  $K_1, \dots, K_8$  :**

On choisit :  $K_1 > 0$   
 $K_2 > 0$

$$K_3 = K_4 > 0$$

$$K_5 = K_6 > 0$$

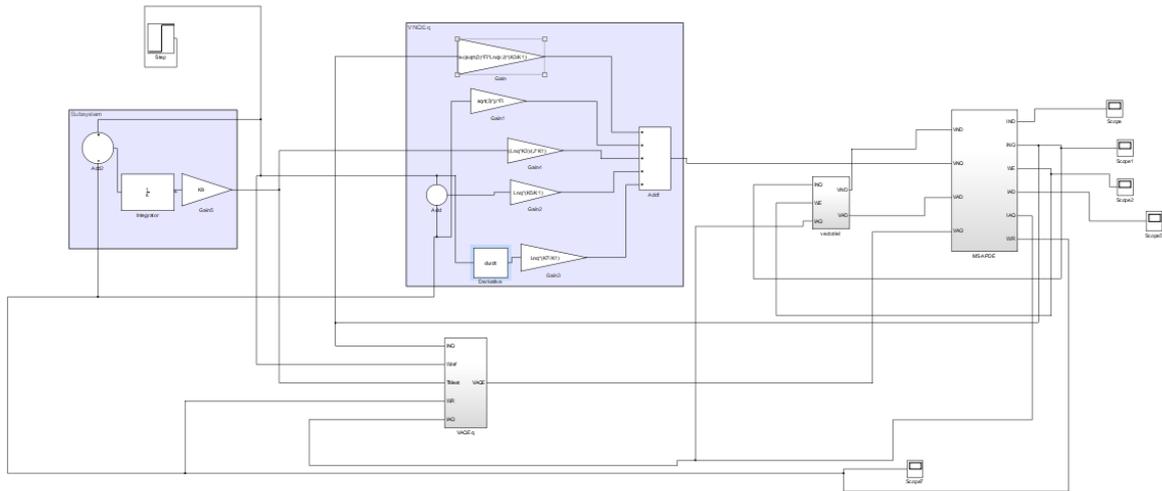
$$K_7 = K_8 > 0$$

Avec :

$$K_3 = \frac{2J_e \rho}{\sqrt{3} P \Psi_{PM}} K_1 \quad (\text{III.35})$$

Avec  $\rho > 0$

C'est-à-dire on choisit  $K_1$  et on détermine  $K_3$  par (III.35)



**Figure III.2 :** Schéma bloc du système en boucle fermée sans onduleur

### III.4 Conclusion :

Le MSAPDE est un système multi-variable et non linéaire, ce qui rend sa commande complexe. C'est pourquoi nous avons combiné la CMG et la commande par retour d'états linéaires pour augmenter la vitesse du MSAPDE. La perturbation aléatoire du couple de charge du MSAPDE est nécessaire pour calculer l'expression de la Commande, ce qui nécessite une loi d'adaptation de cette grandeur. La dernière étape de la mise en place du schéma de commande consiste à déterminer les gains de l'algorithme de commande, ce qui est réalisé par des simulations. Dans le prochain chapitre, des tests de simulation sont réalisés pour vérifier la validité du schéma en boucle fermée constitué des blocs calculés dans les chapitres précédents.

---

***Chapitre 4 :***

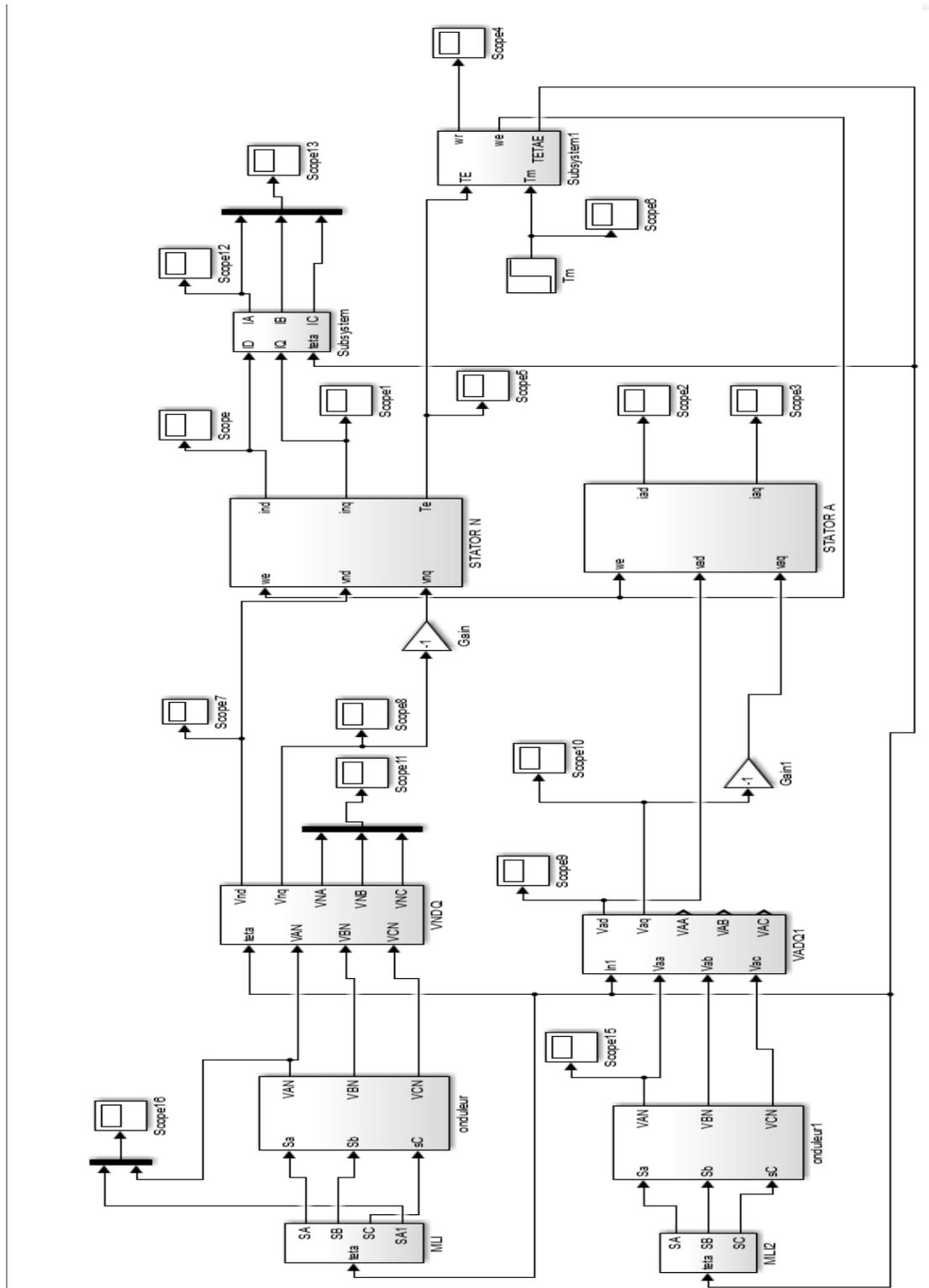
***Validation de l'algorithme de  
commande par des tests de  
simulation.***

---

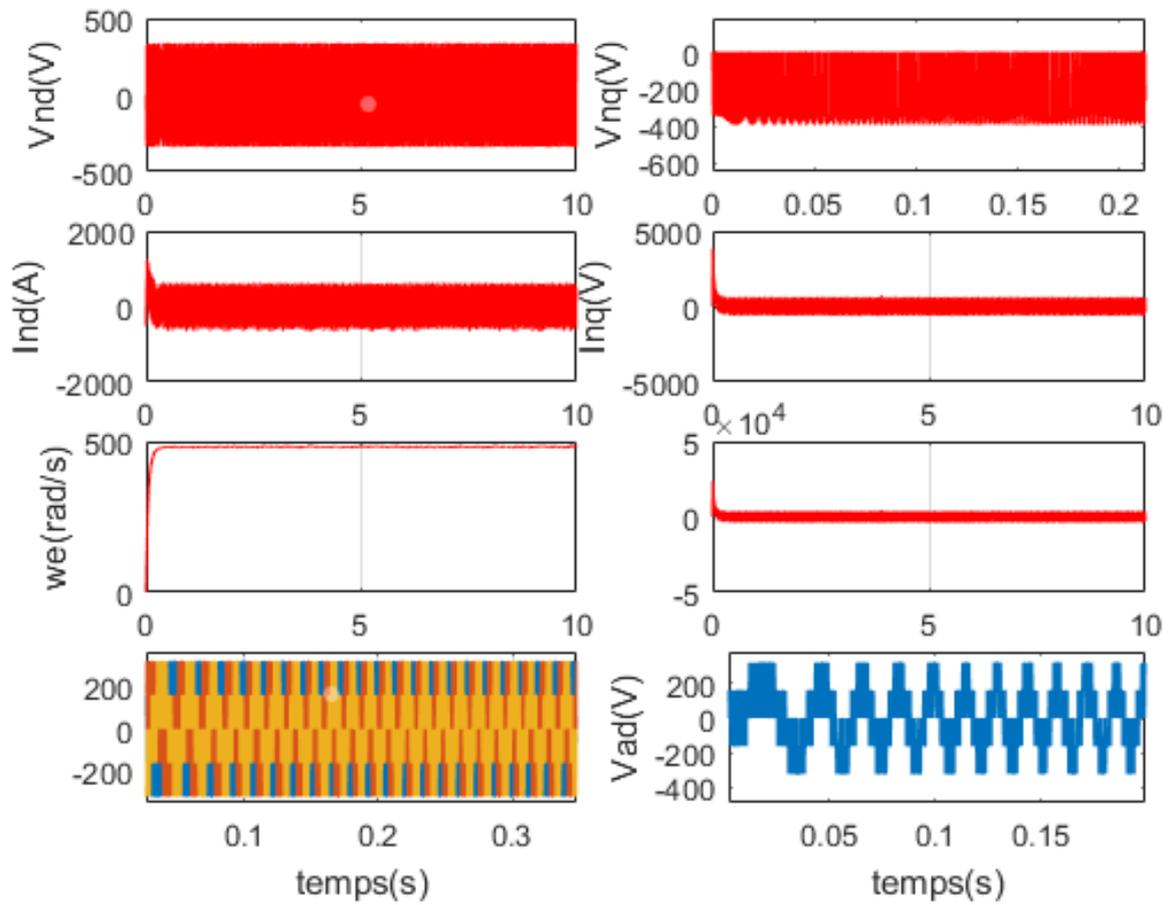
### **IV.1 Introduction**

La validation de l'algorithme de commande du VE actionné par le MSAPDE est réalisée par des tests de simulation en utilisant le logiciel Matlab/Simulink. La conception du système en boucle fermée est faite graduellement ou chaque étape est testée. La méthode de conception est structurée ce qui a fait que le temps de travail est optimal alors la démarche est efficace. L'étape initiale est la validation de l'actionneur qui est le MSAPDE, en l'alimentant par des tensions représentées dans le repère de Park. A la seconde étape, deux convertisseurs de tensions commandés par MLI sont branchés au stator du MSAPDE. La validation de la commande linéarisante a fait l'objet de la troisième étape. La quatrième étape est consacrée à la validation des deux blocs de commande et sans les deux onduleurs et dans l'étape suivante on a introduit les deux convertisseurs. La dernière étape est réservée à la validation du schéma de commande complet composé de : VE ; MSAPDE ; deux convertisseurs contrôlés par la MLI ; commande linéarisante et CEMG.

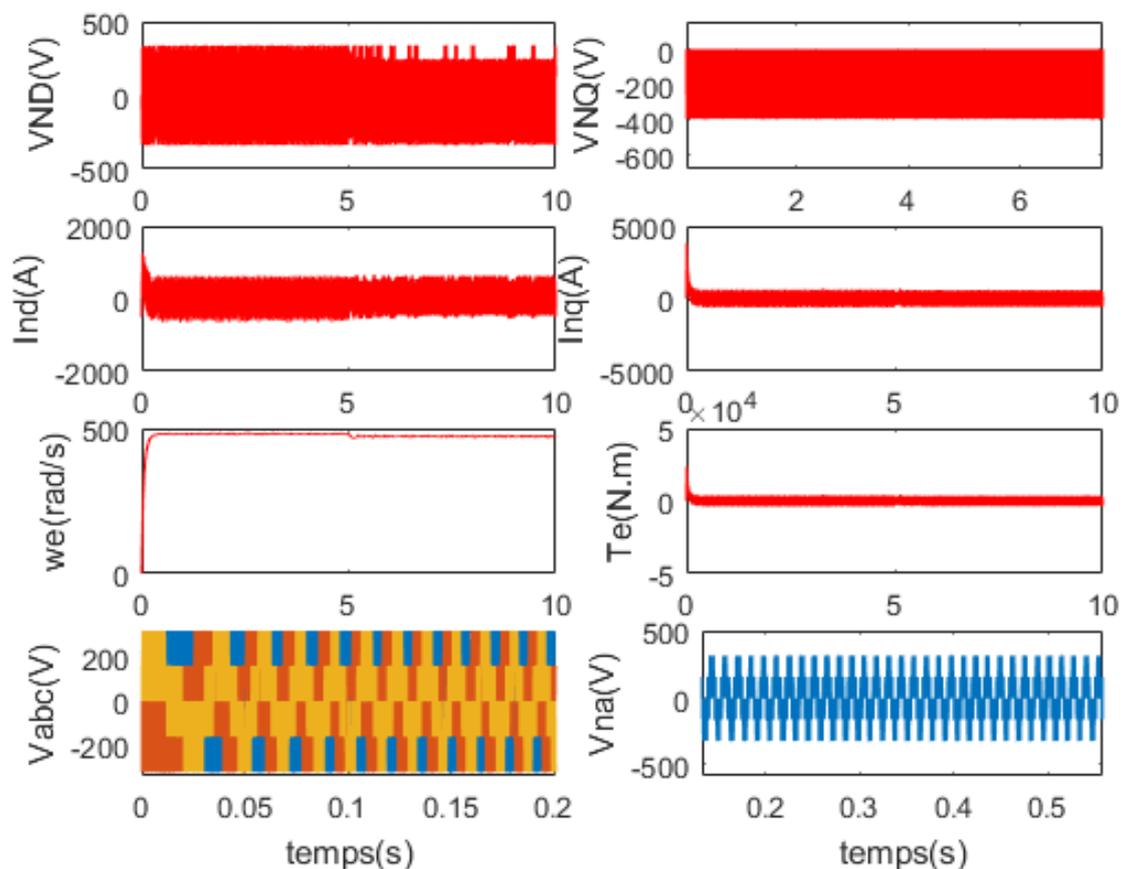
**IV.1 Schéma bloc pour les tests de simulation du MSAPDE alimenté par deux onduleurs commandés par MLI**



**Figure IV.1 :** Schéma bloc de simulation du MSAPDE alimenté par des deux onduleurs de tension commandés par MLI.



**Figure IV.2 :** Réponse du MSAPDE à vide, alimenté par des deux onduleurs de tension commandés par MLI.



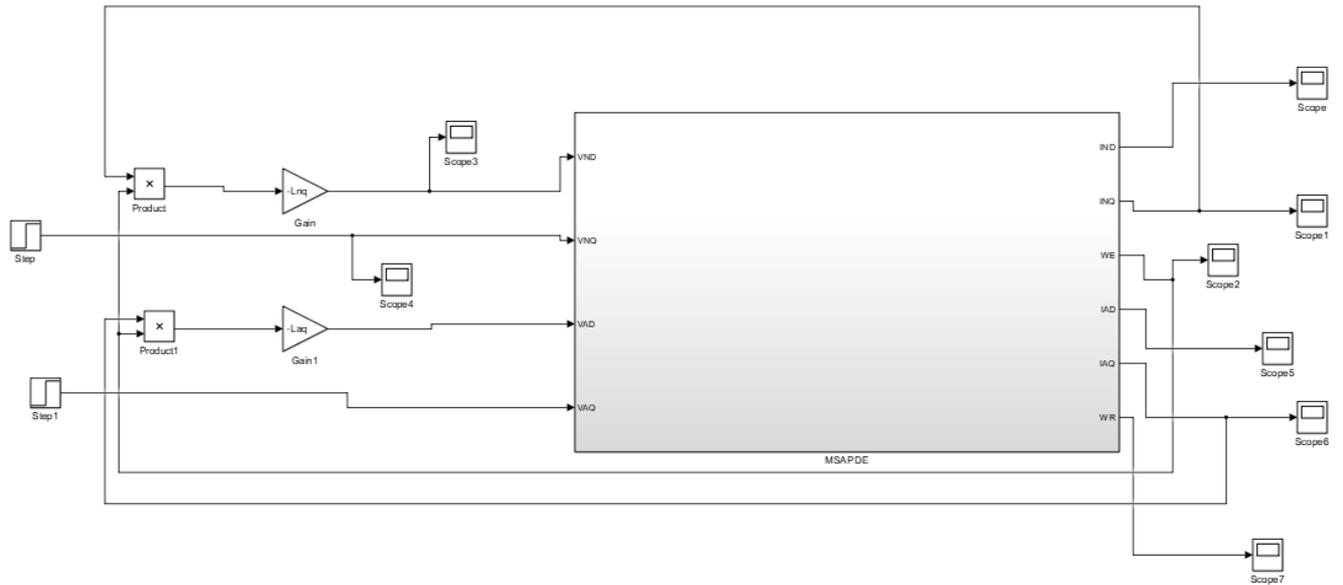
**Figure IV.3** : Réponse du MSAPDE avec un couple de charge de 300 N.m appliqué à  $t=5s$ , alimenté par des deux onduleurs de tension commandés par MLI.

- **Interprétations des résultats des tests de simulation**

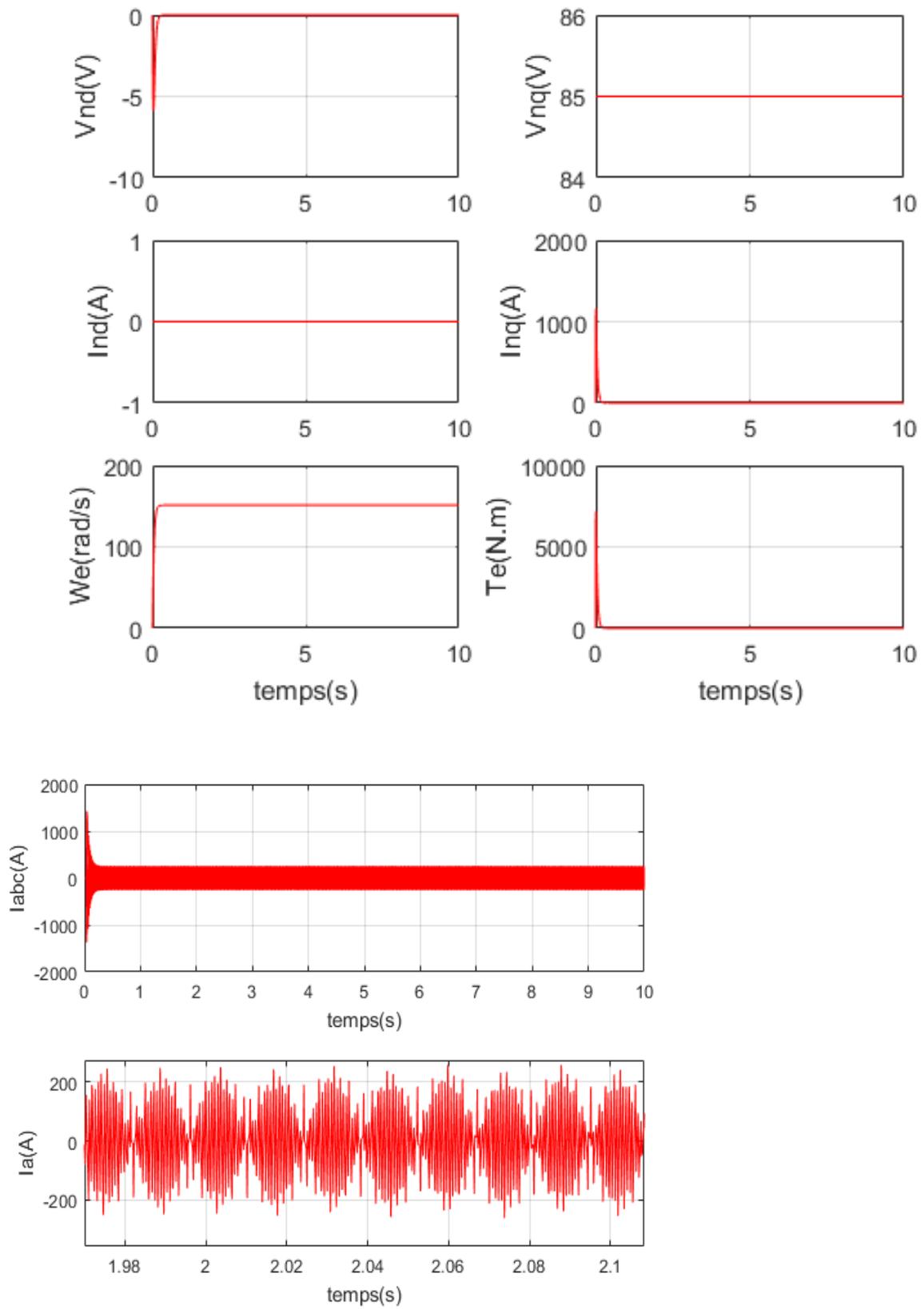
La figure IV.2 présente les allures de quelques signaux du MSAPDE à vide. On constate que : la vitesse se stabilise à sa valeur nominale, après un régime transitoire très court ; le couple électromagnétique  $T_e$  est presque nul au régime établi car la machine est vide et les tensions à la sortie de l'onduleur qui alimente l'étoile d'indice « n » est sous forme de créneaux. On remarque que les signaux sont stables au régime établi.

Les allures des signaux représentés à la figure IV.3 sont presque identiques à ceux de la figure IV.2 à l'exception que dans ce cas le MSAPDE est chargé avec un couple de 300 N.m à  $t=5s$  alors à cet instant la vitesse diminue et le couple électromagnétique  $T_e$  augmente. On state aussi que les deux courants direct  $I_{nd}$  et quadrature  $I_{nq}$  augmente à  $t=5s$  car le MSAPDE appelle du courant à cause de la charge.

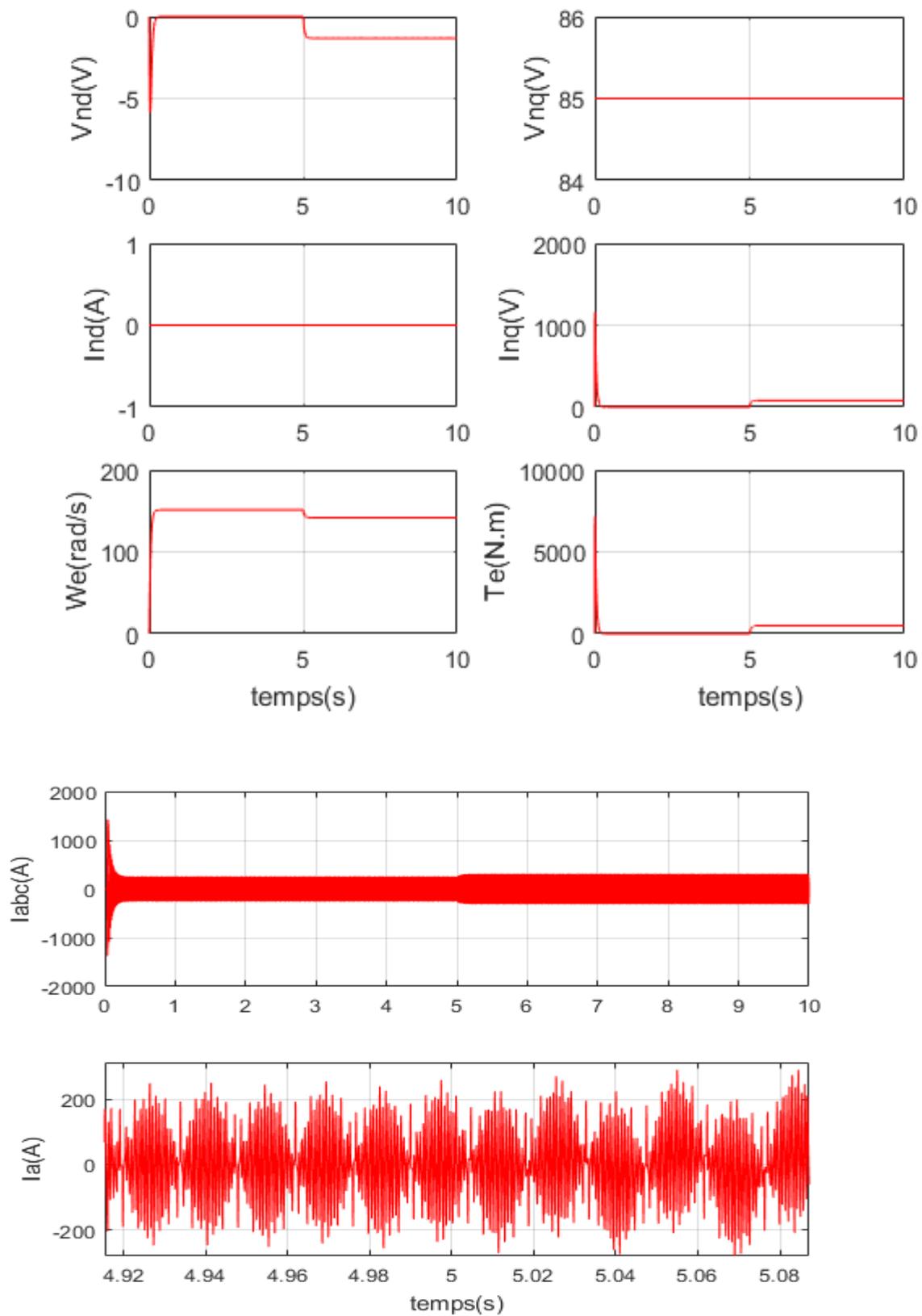
**IV.2 Schéma bloc pour les tests de simulation, de la commande linéarisant par retour de sorti du MSAPDE sans onduleurs**



**Figure IV.4 :** Schéma bloc de simulation de la commande linéarisante par retour de sorti du MSAPDE sans onduleurs



**Figure IV.5 :** Réponse du MSAPDE à vide et sans onduleurs, avec un retour de sorti linéarisant

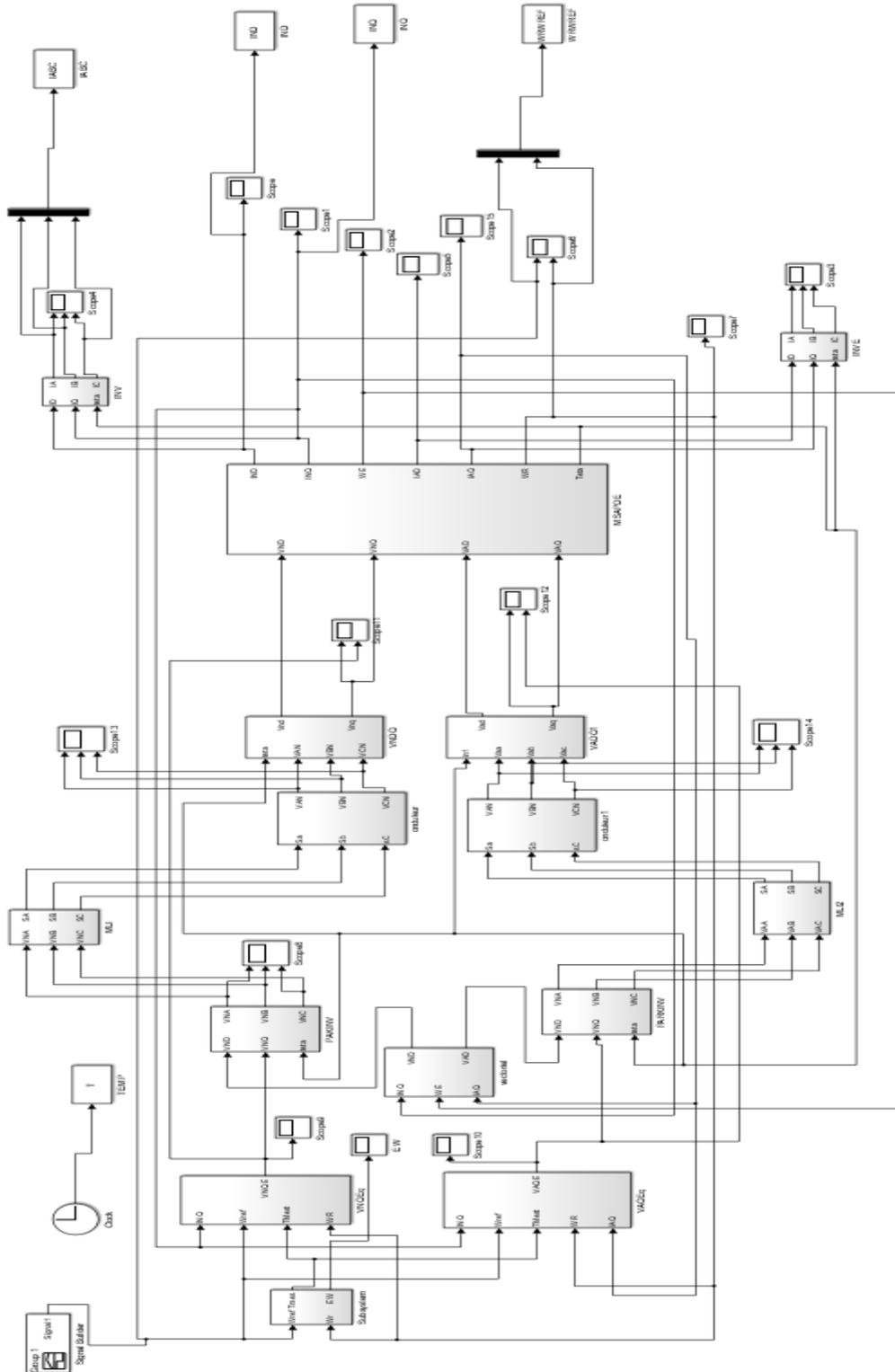


**Figure IV.6 :** Réponse du MSAPDE sans onduleurs, avec un retour de sorti linéarisant, et chargé à  $t=5s$ , avec un couple de 300 N.m.

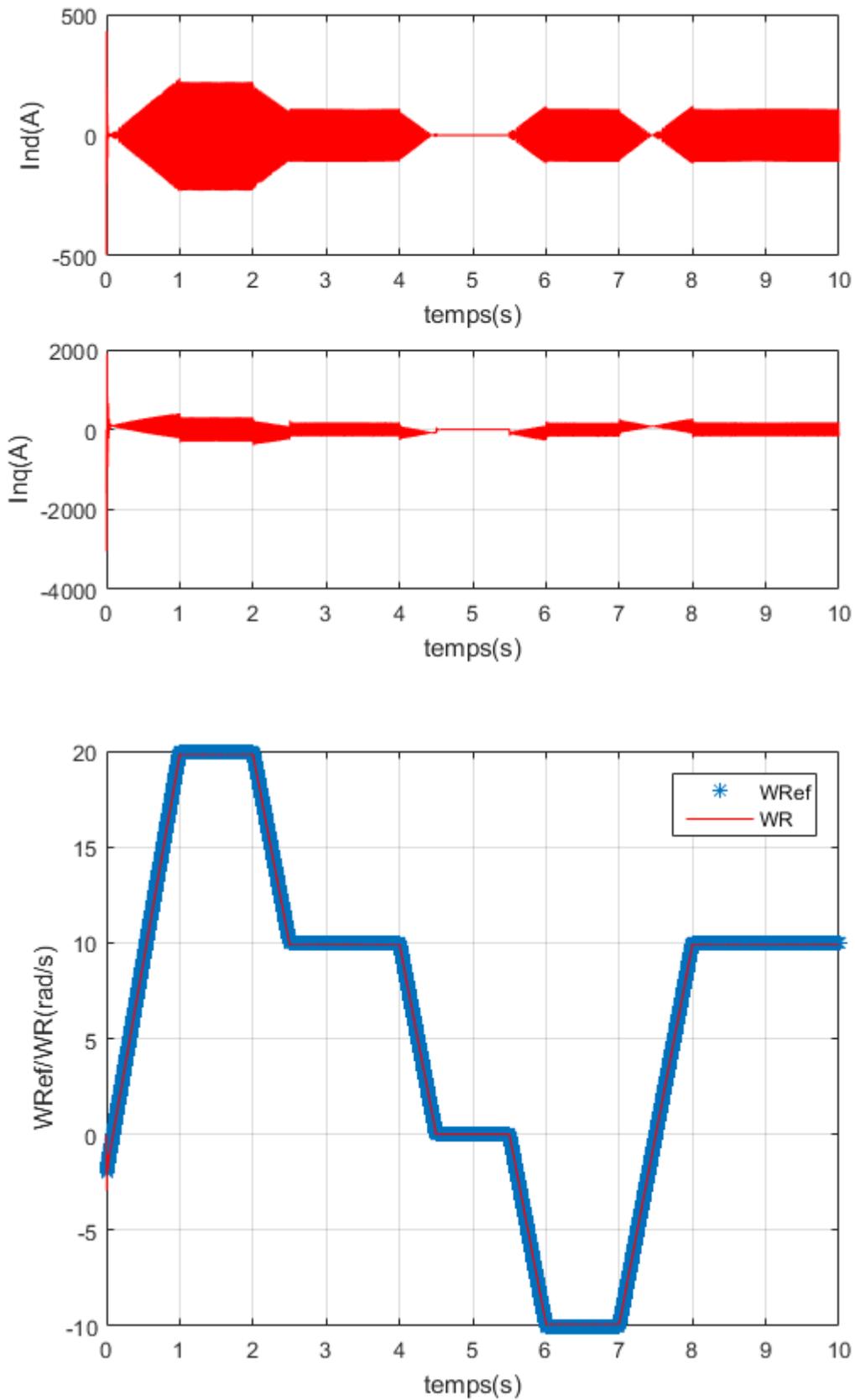
- **Interprétations des résultats des tests de simulation**

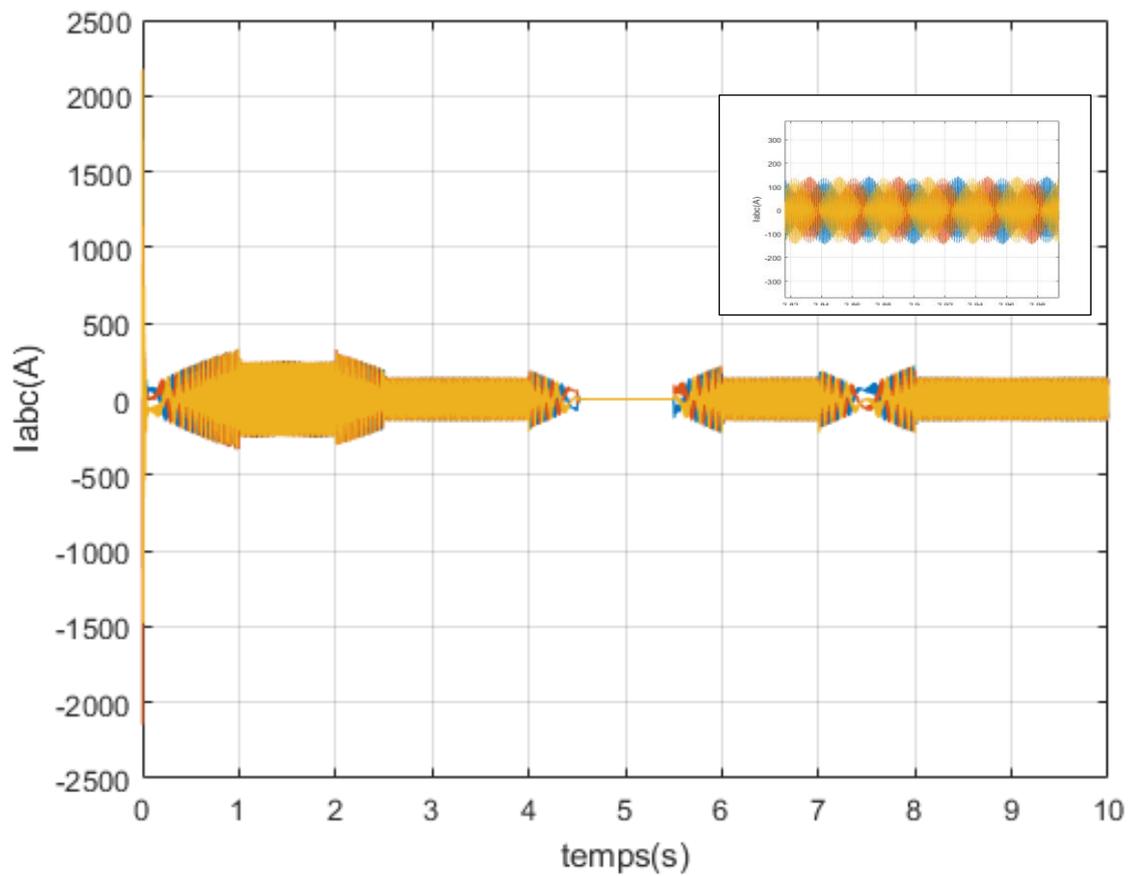
Les figures IV.5 et IV.6 présente les allures de quelques signaux du MSAPDE à vide et avec un couple de charge de 350 N.m à  $t = 5$ s, respectivement. On constate que le retour de sortie linéarisant annule le courant direct de l'étoile d'indice « n », pour un MSAPDE à vide ou en charge. On remarque aussi que tous les signaux du moteur à vide ou en charge sont stables au régime établi donc le retour linéarisant ne déstabilise pas le MSAPDE.

**IV.3 Schéma bloc pour les tests de simulation, de la commande équivalente par les modes glissant du MSAPDE linéarisé par un retour de sorti et avec les deux onduleurs**

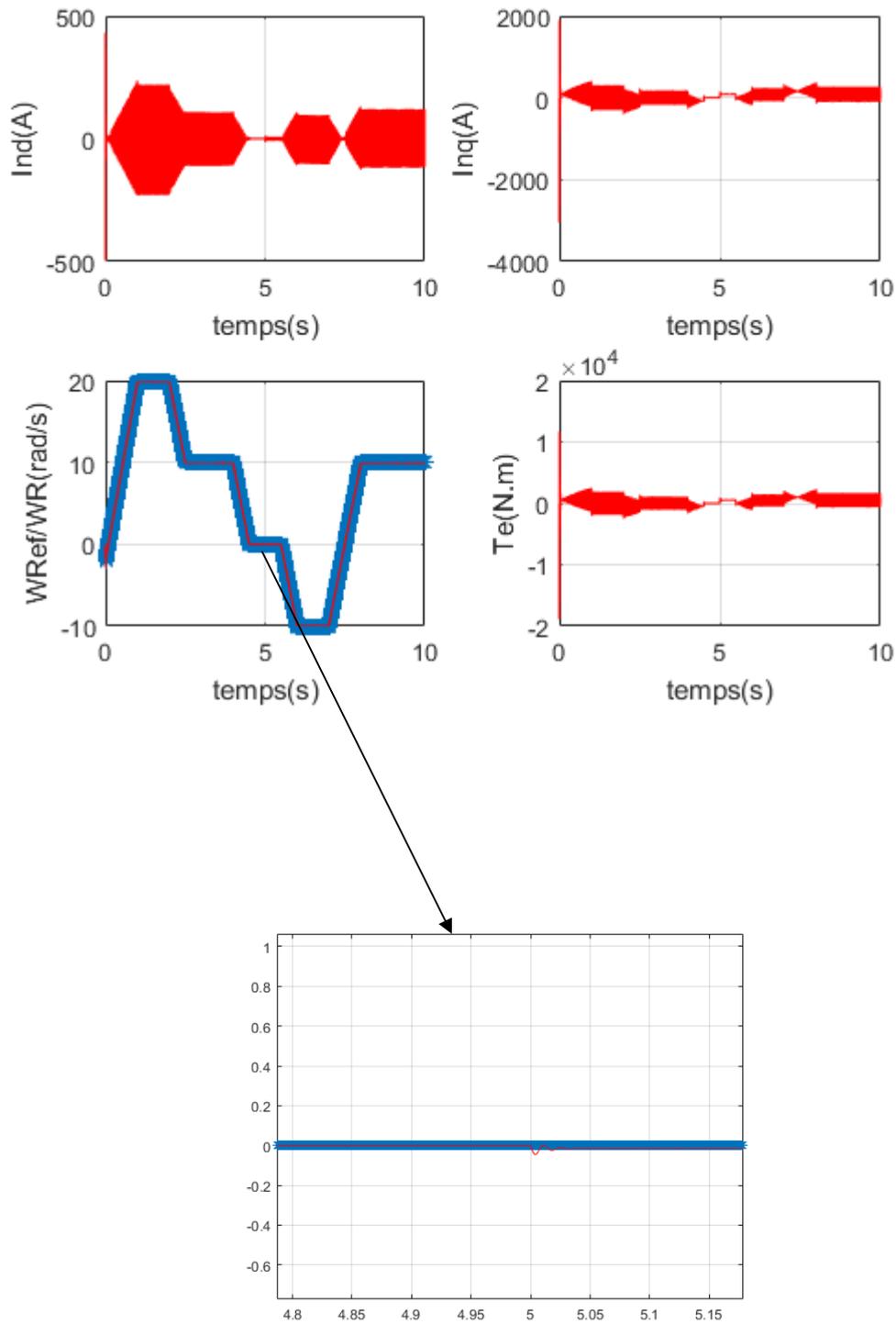


**Figure IV.7 :** Schéma bloc de simulation de la commande équivalente et du retour de sorti linéarisant du MSAPDE avec les deux onduleurs





**Figure IV.8 :** Réponse du MSAPDE à vide et sans onduleurs, avec une commande équivalente par les modes glissant et un retour de sorti linéarisant.

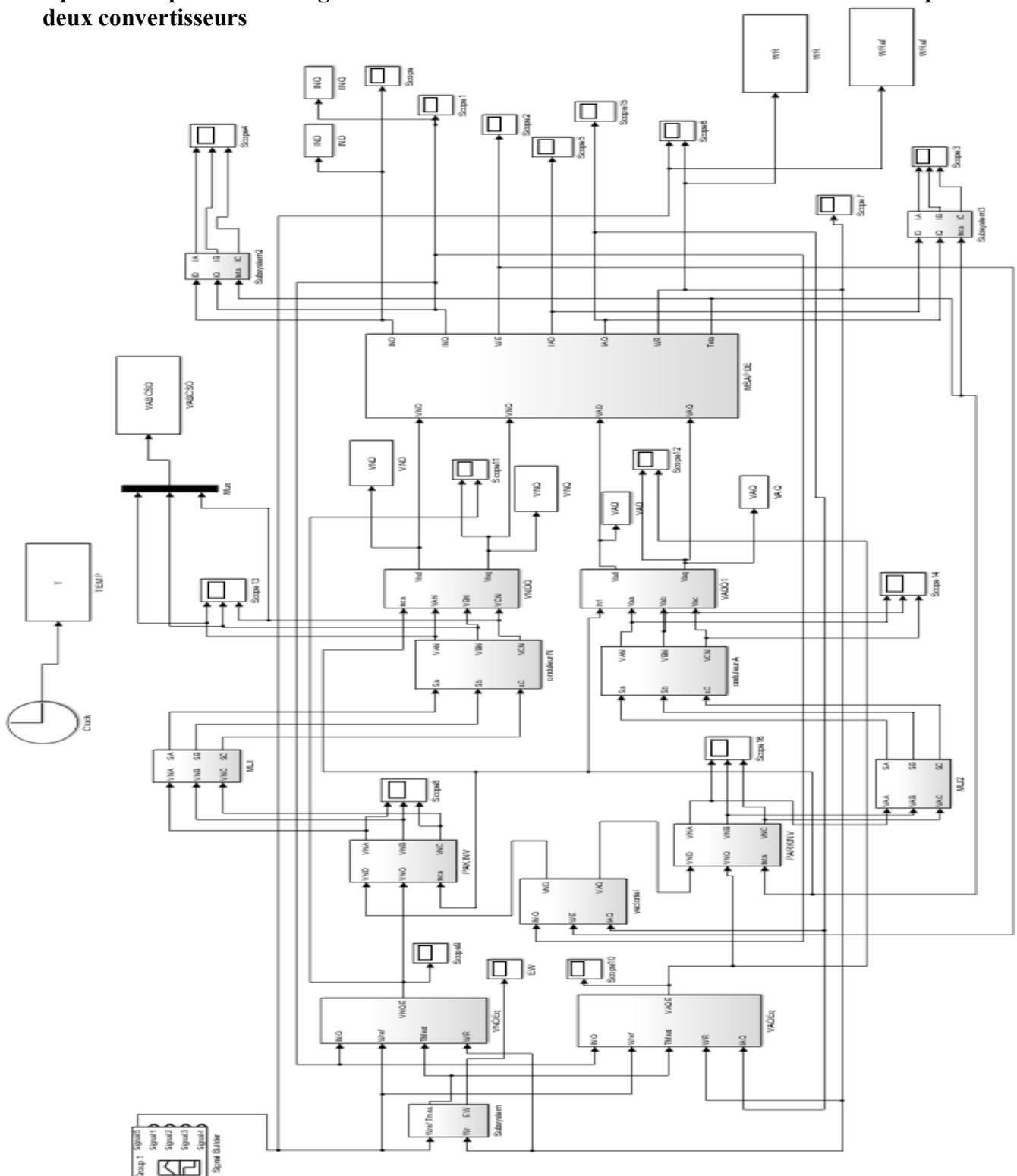


**Figure IV.9 :** Réponse du MSAPDE sans onduleurs, avec une commande équivalente par les modes glissants et un retour de sorti linéarisant, et chargé à  $t=5s$ , avec un couple de 300 N.m.

- **Interprétations des résultats des tests de simulation**

Les figures IV.8 et IV.9 présente les allures de quelques signaux du MSAPDE à vide et avec un couple de charge de 300 N.m à  $t = 5$ s, respectivement. On a imposé une consigne de vitesse de plusieurs créneaux ou plusieurs régimes de fonctionnement (accélération, décélération, changement de sens de rotation) sont imposés au MSAPDE, ou on a constaté que la vitesse mesurée suit cette consigne avec une erreur de poursuite presque nulle et un temps de réponse très court, même en présence de la charge. On constate que les signaux du système en boucle fermée convergent et restent dans l'intervalle supporté par le MSAPDE, ce qui confirme la stabilité et les performances des deux lois de commande appliquées à l'actionneur MSAPDE.

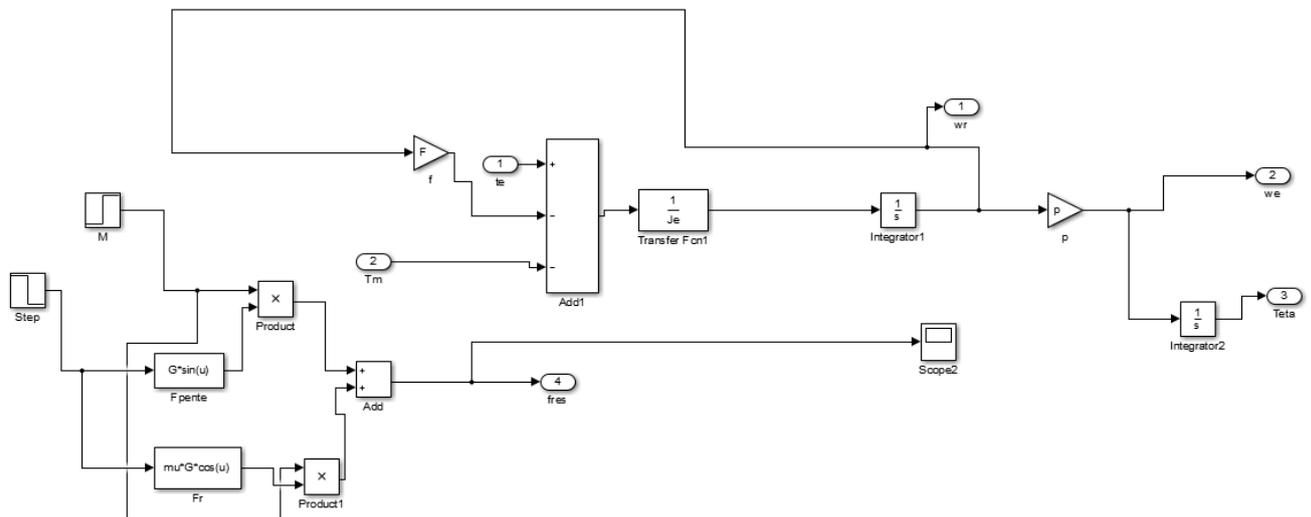
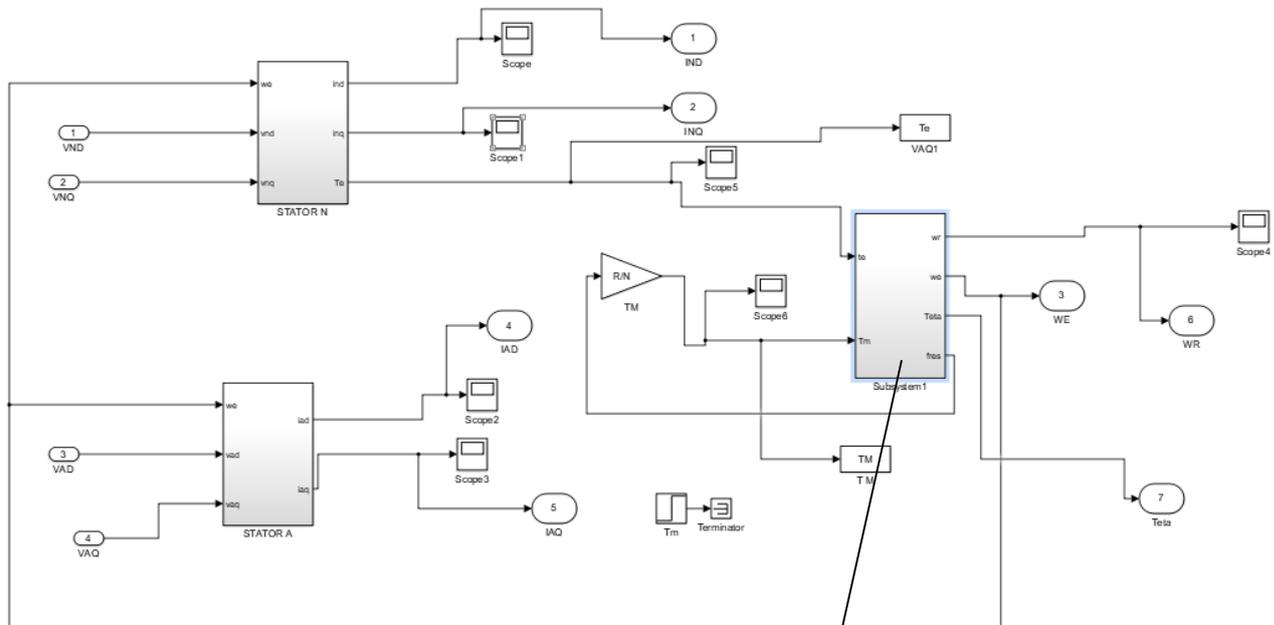
**IV.4 Schéma bloc de simulation du VE-MSAPDE commandé par la commande équivalente par les modes glissant associée au retour de sorti linéarisant et alimenté par deux convertisseurs**



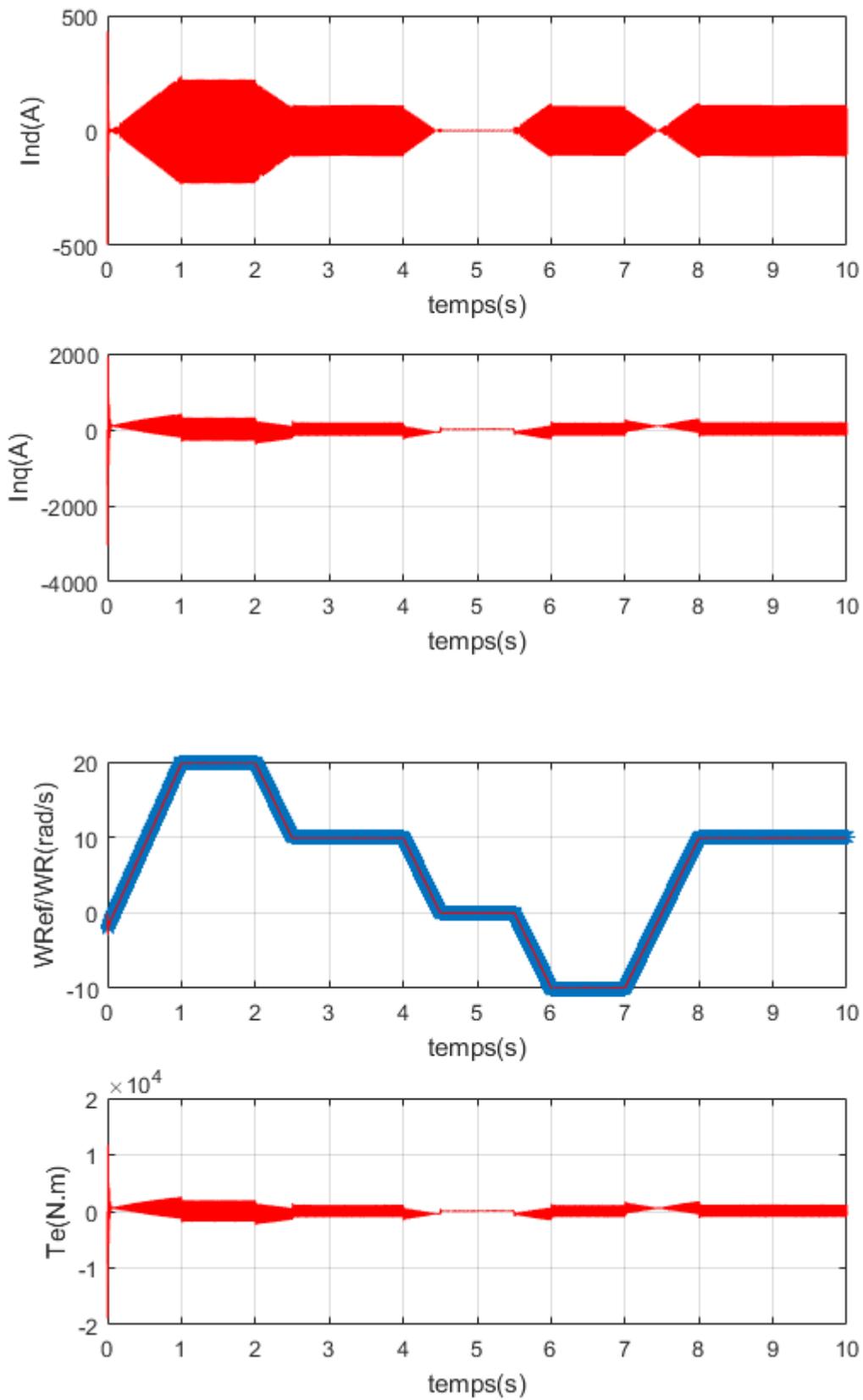
**Figure IV.10 :** Mise en œuvre du système en boucle fermée (VE-MSAPDE, les deux lois de commande et les deux onduleurs).

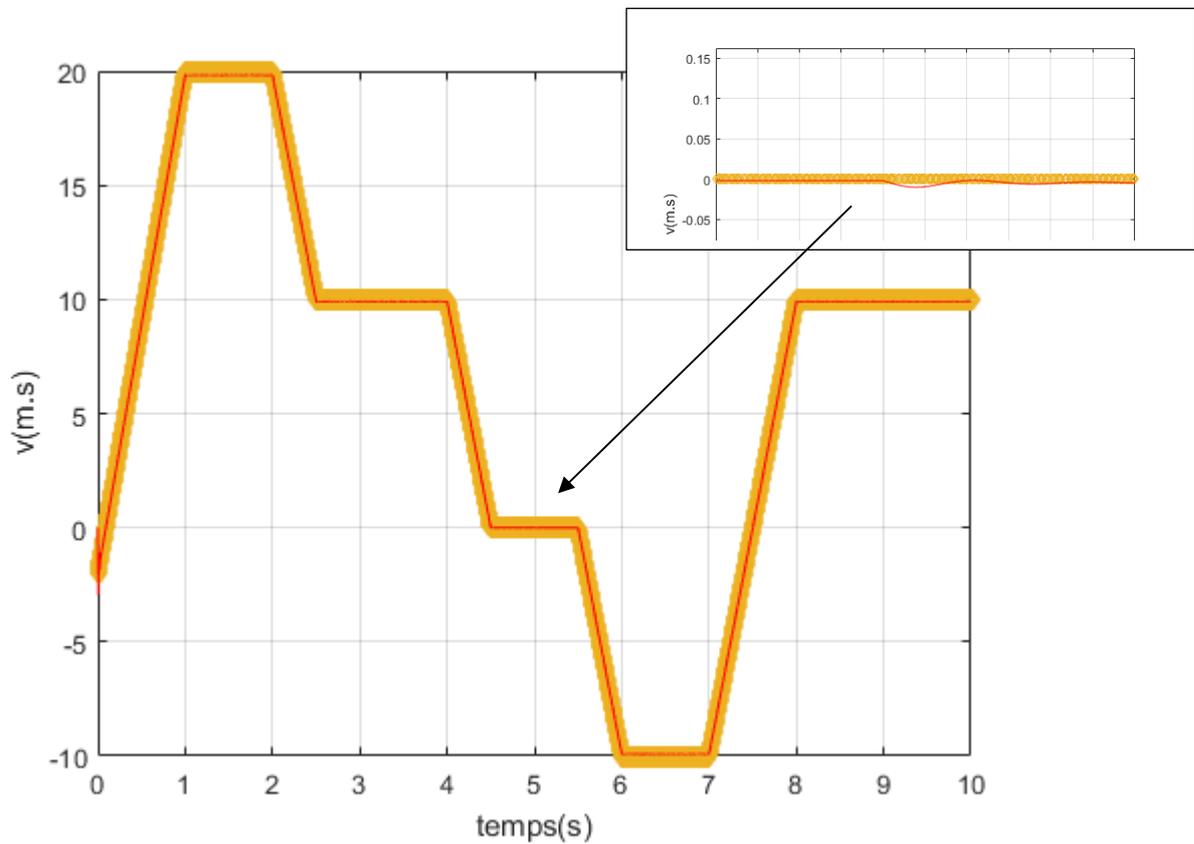
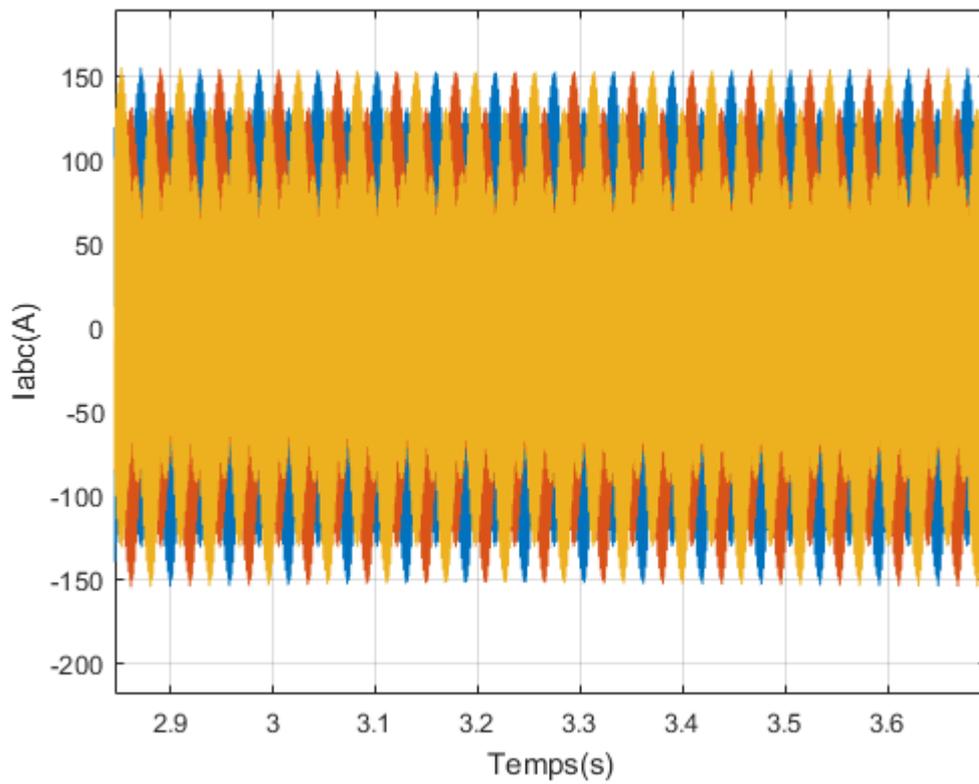
**IV.4.1 Schéma bloc de l'expansion du bloc VE-MSAPDE et de la dynamique du VE**

La dynamique du VE et de son actionneur (MSAPDE) est représentée ci-dessous ou l'expansion détaillée du bloc de la dynamique du VE est représenté dans le schéma bloc du bas de la page.

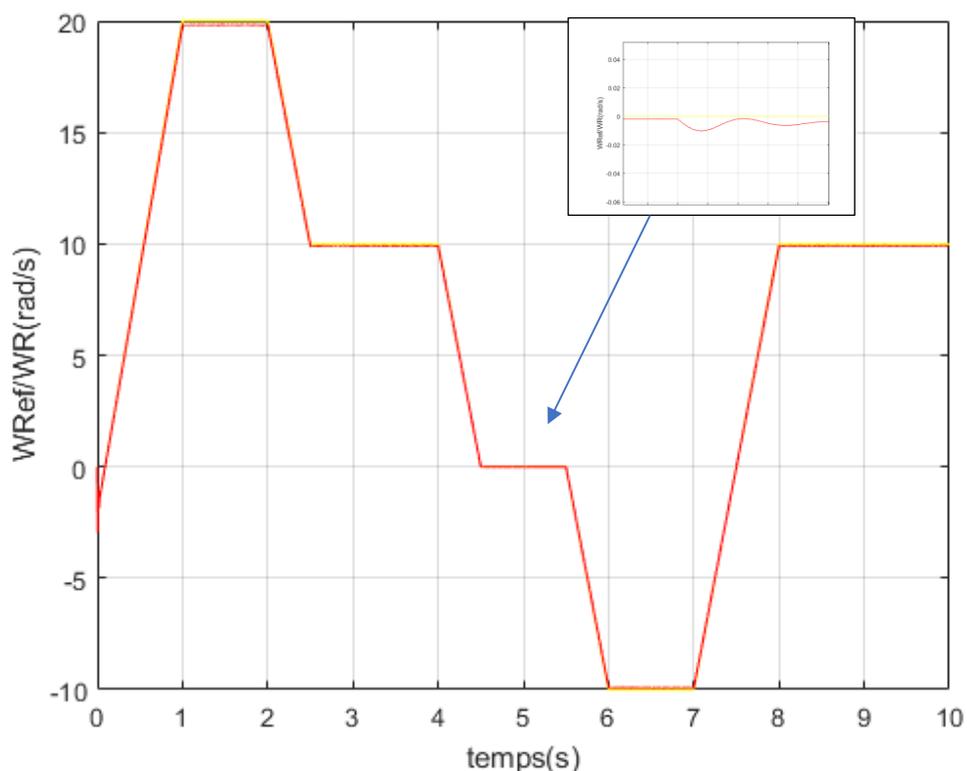


**Figure IV.11:** Schéma bloc de la dynamique du VE.





**Figure IV.12 :** Réponse du système en boucle fermée avec une chaussée plate.



**Figure IV.13 :** Réponse du système en boucle fermée sur une chaussée avec pente de  $+30^\circ$ .

- **Interprétations des résultats des tests de simulation**

La figure IV.12 présente les allures de quelques signaux du système en boucle fermée (VE-MSAPDE, les deux lois de commande et deux onduleurs) ou le profil de la chaussée empruntée par le VE est plat, sachant aussi que plusieurs régimes de fonctionnement (accélération, décélération, changement de sens de rotation) sont imposés au VE ou on a constaté que la vitesse mesurée suit cette consigne avec une erreur de poursuite presque nulle et un temps de réponse très court, ces performances sont toujours préservés même en présence de la charge. On constate que les signaux du système en boucle fermée convergent et restent dans l'intervalle supporté par l'actionneur MSAPDE, ce qui confirme la stabilité et les performances des deux lois de commande appliquées à l'actionneur MSAPDE.

La figure IV.13 présente l'allure de la vitesse du VE ou les mêmes régimes de fonctionnement sont imposées au VE à l'exception de la pente de la chaussée qui est de  $+30^\circ$ .

On constate que le système en boucle fermée garde les mêmes performances même en présence d'une pente importante ce qui confirme les bonnes performances des deux lois de commandes utilisées.

#### IV.5 Conclusion

Les résultats obtenus après simulation numérique sous Matlab/Simulink du système en boucle fermée, nous ont permis d'analyser le comportement dynamique du système global VE-MSAPDE, deux convertisseurs et deux lois de commande) dans des conditions de fonctionnement proche de la réalité.

La commande par retours de sortie, en utilisant les deux tensions directes  $V_{nd}$  et  $V_{ad}$  a permis de linéariser le modèle du MSAPDE et d'obtenir un découplage entre les deux courants en quadrature  $I_{nq}$  et  $I_{aq}$  des deux étoiles et le couple électromagnétique, alors le modèle obtenu est linéaire et il est similaire à celui de deux moteurs à courant continu en cascade MCC. Ce modèle découplé a deux entrées disponibles  $V_{nq}$  et  $V_{aq}$  qui sont exploitées pour l'asservissement de la vitesse du MSAPDE et aussi celle du VE qu'il entraîne.

La commande équivalente par les modes glissants utilisée pour l'asservissement de la vitesse du VE confirme ses bonnes performances en assurant une erreur d'asservissement presque nulle, un régime transitoire très court et son rejet complet des perturbations externes.

---

## *Conclusion générale*

---

# *Conclusion*

**C**e manuscrit présente la commande d'un véhicule électrique (VE) actionnée par un moteur synchrone à aimants permanents double étoile (MSAPDE), muni de deux prés actionneurs (onduleurs).

Le VE est un moyen qui facilite la mobilité qui apporte du confort à l'être humain en respectant l'environnement. L'élément qui permet au VE divers terrains et sa motorisation. Le MSAPDE est l'un des actionneurs les mieux adaptés aux systèmes embarqués dont fait partie le VE, vu ces bonnes caractéristiques sa fiabilité et ces performances remarquables ce qui a motivé notre choix du MSAPDE pour équiper le VE étudié.

La complexité du modèle du MSAPDE et les défis auxquels est confronté ont orienté le choix de l'algorithme de commande. La linéarisation du modèle du MSAPDE d'une manière exacte est assurée par un retour de sortie linéarisant. L'asservissement de la vitesse même en présence des perturbations externes est assuré par la commande équivalente par les modes de glissement (CEMG). La validation du système en boucle fermée confirme les performances remarquables des deux algorithmes de commande adoptés. Les caractéristiques du schéma de commande sont : une erreur d'asservissement presque nulle même en présence des perturbations externes et un régime transitoire très court et bien amorti. Le nombre de gains important de la CEMG a posé un défi pour leur dimensionnement ce qui motive de compléter le travail réalisé par l'introduction des méthodes d'optimisation ou d'adaptations des différents gains afin de trouver une solution à leur calcul.

---

## Liste des *références bibliographiques*

- [1] Fatima Benaissa, "contribution a l'évaluation des effets de la pollution atmosphérique d'origine automobile dans la wilaya de bejaia", mémoire majester, Bejaia, 2010
- [2] Jean-Marie Portal, « Elles électrisent les routes »,01Net, du 10 juillet 2019 au 6 août 2019,p 48-49
- [3] <https://beqtechnology.com/blog/histoire-voiture-electrique-evolution-impressionnante/>.
- [4] Patrick Fridenson, « Le rôle de l'industrie automobile dans le développement de la France, de Allemagne et de la Grande-Bretagne au XX e siècle »,juillet-septembre .p. 10-13 ,1997
- [5] [https://www.maisondelenergie.fr/sites/maisondelenergie.fr/files/voiture\\_electrique.pdf](https://www.maisondelenergie.fr/sites/maisondelenergie.fr/files/voiture_electrique.pdf).
- [6] <https://www.evea-solutions.com/fr/blog/architecture-et-composition-des-vehicules-electriques-b52.html>.
- [7] <https://www.jmj-automobiles.com/actualite/avantages-et-inconvenients-des-voitures-electriques>.
- [8] <https://www.axa.ch/fr/privatkunden/blog/en-deplacement/innovation/avantages-inconvenients-voitures-electriques.html>.
- [9] <https://www.ecoconso.be/fr/content/voiture-electrique-ses-avantages-et-inconvenients>.
- [10] <https://www.fr.honda.ch/cars/blog/article/electric/advantages-and-disadvantages-of-electric-cars.html>.
- [11] M.I. Hemmami, "Commande sans capteur de vitesse d'un moteur synchrone à aimants permanents par l'utilisation de la commande directe du couple et d'un observateur de vitesse par mode glissant", Mémoire de Magister, université de Biskra, 2012..
- [12] YAHIAOUI et BOUHOUÏ, «Modélisation et commande d'une machine synchrone double étoile (MSAPDE) », Mémoire de master, université Abderrahmane Mira de Bejaia 2021.

- [13] A. Ameer, "Commande sans capteur de vitesse par DTC d'une machine synchrone à aimants permanents, doté d'un observateur d'ordre complet par mode glissant", Mémoire de Magistère, université de Batna, 2003.
- [14] A. R. Boudjema, "Commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents", mémoire de master, université de Biskra, 2022
- [15] A. ATTOU, "Commande par mode glissant de la machine synchrone à aimants permanents", mémoire de Master, université Djilali liabes, SBA, Algérie, 2011.
- [16] E. Amirouche « Modélisation dynamique et commande d'une génératrice hydrolienne polyphasée en fonctionnement non conventionnel » Thèse de Doctorat, université A. mira Bejaia, 2022.
- [17] M. Kadjoudj, "Contribution à la Commande d'une MSAP", Thèse De Doctorat D'état Université De Batna, 2003.
- [18] Mlle. GHAMR « Commande robuste du moteur synchrone à aimants permanents » Mémoire de Master, Université de Mohammed Boudiaf-M'sila 2022..
- [19] S. Rezgui "Commande de Machine électrique en environnement, Matlab/Simulink et Temps Réel", Mémoire Rezgui, Université Mentouri de Constantine, Algérie 2009..
- [20] R. Hachelaf « commande vectorielle de la machine synchrone a aimants permanents » Mémoire de Master, Université SAAD DAHLAB de BLIDA 2016.
- [21] G. Grellet, G. Clerc "Actionneurs électriques : Principes, modèles et commandes", Eyrolles, Paris, France, 2000.
- [22] G. O. Cimuca "Système inertiel des stockage d'énergie associé à des générateurs éoliens", Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure D'arts et Métiers Centre de Lille, France, 2005..
- [23] L. Kirsane "Commande non linéaire de la machine a induction aspect expérimental", Mémoire de Magister, Université de Batna, 2008.
- [24] H. Benariba, "Contribution à la commande d'un véhicule électrique", université de Tlemcen, 2019.

- [25] H. Gharbi, " Modélisation et commande d'un véhicule électrique hybride ", Université Hassiba Ben Bouali, Chlef, 2015.
- [26] A. S. a. L. Guzzella, "Control of hybrid electric vehicles,", 2007, pp. 60-70.

# Annexe

## Paramètre de la MSAPDE : [16]

Paramètres	Symbole	Valeurs
Inductance de fuite	m	0.000030918H
Inductance mutuelle	$L1=L_{nq}=L_{nd}$	0.00002284H
Résistance de phase	rs	0.06604Ω
Inertie	J	25.35Kg.m <sup>2</sup>
Coefficient de frottement visqueux	F	0N.m. s
Nombres pairs de pôles	p	11
Flux magnétique permanent	Fi	0.3244Wb

## Paramètres du véhicule électrique :

Paramètres	Symbole	Valeurs
Masse totale du véhicule	M	300gk
Constante de gravitation	g	9.81 m/s <sup>2</sup>
Section frontale du véhicule	$S_f$	1,9 m <sup>2</sup>
Coefficient de pénétration dans l'air	$C_x$	0,25
Coefficient de roulement	$C_{rr}$	0,017
Rayon de la roue	R	0.26 m
Rapport de réduction de la vitesse	N	6
Densité volumique de l'air	$\rho_{air}$	1,23 kg/m <sup>3</sup>

## Paramètre de l'onduleur :

- $E=V_{dc}=480V$ .
- $M=21$ .
- $T_r=0.031$ .
- $T_p=T_r/M$ .

**Gains de la commande équivalente par les modes glissants :**

Matrice des gains de retour d'état :

$$K_s = \begin{bmatrix} K_{inq} & 0 & K_{in\Omega} \\ 0 & K_{iaq} & K_{ia\Omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 & 0 & K_3 \\ 0 & K_2 & K_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.01 & 0 & 45.1166 \\ 0 & 0.01 & 45.1166 \end{bmatrix}$$

Gains de l'intégrateur  $x_R$  :

$$K_R = \begin{bmatrix} K_{Rn} \\ K_{Ra} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_5 \\ K_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10000 \\ 10000 \end{bmatrix}$$

Gains de signal de référence :

$$K_{\Omega_{ref}} = \begin{bmatrix} K_{a\Omega_{ref}} \\ K_{n\Omega_{ref}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_7 \\ K_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 100 \\ 100 \end{bmatrix}$$

Gain de la loi d'adaptation du couple de charge :

$$K_9 = 0.01$$

Partie réel et imaginaire des pôles imposés en boucle fermée :

$$\rho = 1.$$