

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERRI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE

## Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et Système

*Présenté par*

**Yacine HADDAD**

**Karim CHATBI**

Thème

# Commande Scalaire d'Un Moteur Asynchrone Triphasé et Contrôle De Vitesse Via API-Variateur HITACHI X200

*Mémoire soutenu publiquement le 24/06/ 2024 devant le jury composé de :*

**M Ahcene LAKHLEF**

MCA, UMMTO, Président

**M. Mourad ALLAD**

MCB, UMMTO, Encadrant

**M Moussa CHARIF**

MAA, UMMTO, Examineur

**Mme Nacera ARAR**

MAA, UMMTO, Examineur

Ce travail a été préparé au sein du laboratoire d'API et Réseaux, Département d'Automatique, Université de Tizi-Ouzou

# Remerciements

En premier lieu, nous remercions Dieu Tout-Puissant pour nous avoir donné la force, la santé et la patience nécessaires pour mener à bien ce mémoire. Sans Sa guidance et Sa bénédiction, nous n'aurions pas pu accomplir ce travail.

Nous tenons également à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Tout d'abord, nous adressons nos sincères remerciements à notre encadrant, Monsieur Allad Mourad, pour son soutien inestimable, ses conseils avisés et son encadrement rigoureux tout au long de ce projet. Sa disponibilité et son expertise ont été des éléments clés dans l'aboutissement de notre travail.

Nous remercions également les membres du corps professoral de notre institution, qui ont su nous transmettre les connaissances nécessaires et nous inspirer tout au long de notre parcours académique. Leur dévouement à l'enseignement et leur passion pour leur domaine d'expertise ont largement contribué à notre formation.

Nous tenons à exprimer notre gratitude à nos familles et amis pour leur soutien indéfectible, leur patience et leur compréhension. Leur encouragement constant nous a permis de surmonter les défis rencontrés et de mener à bien ce projet.

Enfin, nous remercions nos collègues et camarades de promotion pour leur collaboration et les moments de partage qui ont enrichi notre expérience académique.

Ce mémoire est le fruit d'un travail collectif et nous espérons qu'il reflète la qualité et l'engagement que chacun y a apporté.

Merci à tous.

# Table des matières

Table des matières	2
Table des figures	5
Liste des tableaux	8
Introduction générale	1
<b>1 Démarrage et commande des moteurs asynchrones</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction	3
1.2 Composants de commande	3
1.2.1 Sectionneurs	3
1.2.2 Disjoncteurs manuels	4
1.2.3 Relais	4
1.2.3.1 Relais de commande	4
1.2.3.2 Relais thermiques	4
1.2.4 Contacteur magnétique	4
1.2.4.1 Boutons poussoirs	4
1.2.5 Contacts normalement ouverts et normalement fermés	5
1.2.6 Démarreurs	5
1.2.6.1 Démarreurs manuels	5
1.2.6.2 Démarreurs magnétiques	5
1.3 Démarrage des moteurs	5
1.3.1 Démarrage direct dans deux sens de rotation	6
1.3.2 Démarrage étoile-triangle dans deux sens de rotation	6
1.3.3 Démarrage Progressif	7
1.3.3.1 Démarrage progressif avec thyristors	7
1.3.3.2 Démarrage progressif avec variateur de vitesse	8
1.4 Onduleurs	8
1.4.1 Définition de l'onduleur	8
1.4.2 Types des onduleurs	9
1.4.2.1 Selon la configuration du circuit	9
1.4.2.2 Selon la connexion au réseau	9
1.4.2.3 Selon la sortie	9
1.4.3 Commande des onduleurs	10
1.4.3.1 Commande symétrique	10
1.4.3.2 Commande décalée	11

1.4.3.3	Commande à pleine onde des onduleurs triphasés . . . . .	12
1.4.3.4	Commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI) . . . . .	14
1.5	Conclusion . . . . .	17
<b>2</b>	<b>Modélisation et commande scalaire du moteur asynchrone</b>	<b>19</b>
2.1	Introduction . . . . .	19
2.2	Description d'une machine asynchrone . . . . .	19
2.3	Construction de la machine asynchrone . . . . .	20
2.3.1	Glissement . . . . .	20
2.3.2	Fréquence rotorique . . . . .	20
2.4	Principe de fonctionnement . . . . .	20
2.5	Modélisation d'une machine asynchrone . . . . .	21
2.5.1	Équations électriques et magnétiques . . . . .	21
2.5.2	Équations mécaniques . . . . .	24
2.5.3	Équation du mouvement . . . . .	24
2.5.4	Équations de Concordia . . . . .	25
2.5.5	Équations de Park . . . . .	25
2.5.6	Choix du référentiel d-q . . . . .	27
2.6	Fonctionnement en V/f . . . . .	27
2.7	Commande en boucle ouverte de la machine asynchrone . . . . .	28
2.7.1	Alimentation par onduleur de tension . . . . .	29
2.7.2	Alimentation par onduleur de courant . . . . .	29
2.8	Commande en boucle fermée de la machine asynchrone . . . . .	29
2.8.1	Commande scalaire . . . . .	29
2.8.1.1	Contrôle du flux magnétique . . . . .	30
2.9	La simulation de la MAS . . . . .	31
2.9.1	Simulation de la transformée de Park . . . . .	31
2.9.2	Simulation de la machine asynchrone en boucle ouverte . . . . .	32
2.10	Simulation de l'onduleur . . . . .	35
2.10.1	Simulation de la commande scalaire . . . . .	36
2.10.2	Les paramètres utilisés dans les différentes simulations . . . . .	38
2.11	Conclusion . . . . .	39
<b>3</b>	<b>Le variateur de vitesse HITACHI X200</b>	<b>41</b>
3.1	Introduction . . . . .	41
3.2	Introduction aux variateurs de vitesse . . . . .	41
3.2.1	Définition d'un variateur de vitesse . . . . .	41
3.2.2	Structure d'un variateur de vitesse . . . . .	41
3.2.2.1	Le module de contrôle . . . . .	41
3.2.2.2	Le module de puissance . . . . .	42
3.2.3	Les principales fonctions des variateurs de vitesse électroniques . . . . .	42
3.2.4	Les principaux modes de fonctionnement . . . . .	42
3.2.4.1	Fonctionnement à couple variable . . . . .	42
3.2.4.2	Fonctionnement à couple constant . . . . .	43
3.2.4.3	Fonctionnement à puissance constante . . . . .	43
3.2.5	Les principaux types de variateur . . . . .	43
3.3	Caractéristiques et installation du variateur HITACHI X200 . . . . .	44

3.3.1	Circuit de commande . . . . .	44
3.3.2	Utilisation du clavier de commande . . . . .	45
3.3.3	Caractéristiques du variateur HITACHI X200 . . . . .	45
3.3.4	Raccordement avec l'API . . . . .	46
3.3.5	Montage et installation du variateur avec le moteur . . . . .	47
3.4	Configuration du variateur HITACHI X200 . . . . .	47
3.4.1	Fonctions principales . . . . .	47
3.4.2	Fonctions de base . . . . .	48
3.4.3	Fonctions des entrées intelligentes . . . . .	48
3.4.4	Fonctions de contrôle . . . . .	49
3.4.5	Fonctions des erreurs . . . . .	49
3.5	Conclusion . . . . .	51
<b>4</b>	<b>Commande d'un moteur asynchrone via le variateur de vitesse HITACHI X200 et l'API</b>	<b>53</b>
4.1	Introduction . . . . .	53
4.2	Présentation de l'automate programmables (API) . . . . .	53
4.2.1	Définition de l'API . . . . .	53
4.2.2	Structure d'un API . . . . .	53
4.2.3	Étude du CPU 314C-2 DP 6ES7314-6CH04-0AB0 . . . . .	54
4.2.3.1	Présentation du CPU 314C-2 DP . . . . .	54
4.2.3.2	Caractéristiques Techniques . . . . .	55
4.2.3.3	Applications Typiques . . . . .	55
4.2.3.4	Programmation et Configuration . . . . .	55
4.3	Banc d'essai . . . . .	56
4.3.1	Configuration matérielle et programme LADDER . . . . .	57
4.3.2	Supervision en utilisant logiciel WinCC flex . . . . .	61
4.3.3	Résultats pratiques . . . . .	63
4.3.3.1	Configuration utilisée dans le variateur HITACHI X200 . . . . .	63
4.3.3.2	Interprétations des résultats . . . . .	64
4.4	Conclusion . . . . .	66
	<b>Conclusions et Perspectives</b>	<b>69</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>71</b>

# Table des figures

1.1	Le symbole du sectionneur. . . . .	3
1.2	Le symbole du relais magnétique. . . . .	4
1.3	Le symbole du relais thermique. . . . .	4
1.4	Le symbole du contacteur. . . . .	4
1.5	Un bouton poussoir. . . . .	5
1.6	Démarreur magnétique. . . . .	5
1.7	Schéma de puissance du démarrage direct. . . . .	6
1.8	Schéma de commande du démarrage direct. . . . .	6
1.9	Schéma de puissance du démarrage étoile-triangle. . . . .	7
1.10	Schéma de commande du démarrage étoile-triangle. . . . .	7
1.11	Montage des thyristors avec le moteur. . . . .	7
1.12	Montage générale du démarrage progressif. . . . .	8
1.13	Montage du démarrage avec variateur de vitesse. . . . .	8
1.14	Onduleur demi pont. . . . .	9
1.15	Onduleur pont complet. . . . .	9
1.16	Les types d'onduleurs selon la configuration du circuit. . . . .	9
1.17	Interrupteur. . . . .	10
1.18	Onduleur triphasé. . . . .	10
1.19	Commande symétrique d'un onduleur monophasé demi pont . . . . .	11
1.20	Commande symétrique d'un onduleur monophasé pont complet . . . . .	11
1.21	Commande décalée d'un onduleur monophasé pont complet . . . . .	11
1.22	Tensions composées de la commande pleine onde d'un onduleur triphasé . . . . .	13
1.23	Tensions simples de la commande pleine onde d'un onduleur triphasé . . . . .	13
1.24	Principe de la modulation de largeur d'impulsion . . . . .	14
1.25	MLI bipolaire . . . . .	15
1.26	MLI unipolaire . . . . .	15
1.27	Modulation linéaire multiple . . . . .	16
1.28	Modulation sinusoïdale triangulaire unipolaire . . . . .	16
1.29	Modulation sinusoïdale modifiée . . . . .	16
2.1	Description du moteur asynchrone. . . . .	20
2.2	Un aimant permanent qui se déplace vers la droite tend à entraîner l'échelle conductrice. . . . .	21
2.3	La cage d'écureuil. . . . .	21
2.4	Schéma des enroulements de la machine asynchrone triphasée dans l'espace électrique. . . . .	24
2.5	Transformée de Park. . . . .	27
2.6	Déplacement de la caractéristique du Couple-Glisement en fonction de la fréquence d'alimentation. . . . .	28

2.7	Déplacement de la caractéristique du Couple-Vitesse en fonction de la fréquence d'alimentation. . . . .	28
2.8	Alimentation du moteur asynchrone. . . . .	29
2.9	Commande scalaire avec contrôle indirect du flux. . . . .	30
2.10	Commande scalaire avec contrôle direct du flux. . . . .	31
2.11	Schéma de simulation de la transformée de Park. . . . .	31
2.12	Comportement des tensions d'entrées triphasées. . . . .	32
2.13	Comportement des tensions d'entrées biphasées. . . . .	32
2.14	Schéma de simulation de la machine asynchrone. . . . .	33
2.15	Comportement du couple électromagnétique. . . . .	34
2.16	Comportement de la vitesse. . . . .	34
2.17	Comportement du courant statorique. . . . .	34
2.18	Comportement du flux statorique. . . . .	35
2.19	Schéma de simulation de l'onduleur. . . . .	35
2.20	Comportement de la modulation de largeur d'impulsion MLI. . . . .	35
2.21	Comportement des tensions de sortie de l'onduleur. . . . .	36
2.22	Schéma de simulation de la commande scalaire. . . . .	36
2.23	Comportement du couple électromagnétique. . . . .	37
2.24	Comportement de la vitesse. . . . .	37
2.25	Comportement de la vitesse avec différentes consignes. . . . .	37
2.26	Comportement du courant statorique. . . . .	38
2.27	Comportement du flux magnétique. . . . .	38
3.1	Structure d'un variateur de vitesse. . . . .	42
3.2	Courbe de fonctionnement à couple constant. . . . .	43
3.3	Courbe de fonctionnement à puissance constante. . . . .	43
3.4	Schéma de principe d'un convertisseur de fréquence. . . . .	44
3.5	Circuit de commande. . . . .	44
3.6	Clavier de commande. . . . .	45
3.7	Schéma de câblage du moteur et la variateur. . . . .	47
4.1	Structure d'un API. . . . .	54
4.2	Banc d'essai. . . . .	56
4.3	Configuration matérielle utilisée dans logiciel Step7. . . . .	57
4.4	Réseau de conversion analogique en vitesse. . . . .	57
4.5	Réseau de commande des différents sens de rotation et différentes vitesses. . . . .	58
4.6	Réseau de génération de tension à partir d'une fréquence. . . . .	59
4.7	Réseau de commande par fréquence. . . . .	59
4.8	Réseau de commande par temporisation. . . . .	60
4.9	Interface de commande par fréquence. . . . .	61
4.10	Interface de commande par des switches. . . . .	61
4.11	Interface de commande par temporisation. . . . .	62
4.12	Interface de commande par fréquence et temporisation. . . . .	62
4.13	Courbe de vitesse en utilisant la commande par fréquence. . . . .	64
4.14	Courbe de vitesse en utilisant les switches. . . . .	64
4.15	Courbe de vitesse en utilisant la temporisation. . . . .	65
4.16	Courbe de vitesse en utilisant la temporisation et la fréquence. . . . .	65

4.17 Courbe de vitesse en introduisant un couple résistant. . . . . 66

# Liste des tableaux

3.1	Description des bornes du circuit de commande. . . . .	44
3.2	Caractéristiques spécifiques aux variateur HITACHI X200 015SFEF. . . . .	45
3.3	Caractéristiques générales du variateur X200. . . . .	46
3.4	Fonctions principales "F". . . . .	48
3.5	Fonctions de base "A". . . . .	48
3.6	Fonctions des entrées intelligentes "C". . . . .	49
3.7	Fonctions de contrôle "D". . . . .	49
3.8	Fonctions des erreurs "E". . . . .	49
4.1	Valeurs des fonctions du variateur utilisées. . . . .	63

# Nomenclature

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsions  
 PWM : Pulse Width Modulation  
 MAS : Moteur Asynchrone  
 API : Automate Programmable Industriel  
 $R_s, R_r$  : Résistances Statorique et Rotorique  
 $M'_1, M'_2, M'_3$  : Inductance Mutuelle  
 $\phi_s$  : Flux Statorique  
 $V_s$  : Tensions statorique  
 $i_s$  : Courant Statorique  
 $\phi_r$  : Flux Rotorique  
 $V_r$  : Tensions Rotorique  
 $i_r$  : Courant Rotorique  
 $L(\theta)$  : Matrice des Inductances  
 $P_p$  : Nombre de paire de pôles  
 $\theta$  : L'angle Électrique  
 $M_s$  : Inductance mutuelles entre deux phases statoriques  
 $M_r$  : Inductance mutuelles entre deux phases rotoriques  
 $M_{sr}$  : Inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique  
 $M_{rs}$  : Inductance mutuelle entre une phase rotorique et une phase statorique  
 $L_s$  : Inductance cyclique d'une phase statorique  
 $L_r$  : Inductance cyclique d'une phase rotorique  
 $l_s$  : Inductance propre d'une phase statorique  
 $l_r$  : Inductance propre d'une phase rotorique  
 $\tau_{em}$  : Couple électromagnétique  
 $P_e$  : Puissance électrique  
 $P_d$  : Puissance dissipée  
 $P_m$  : Puissance mécanique  
 $\omega_s$  : Pulsation électrique statorique  
 $\omega_r$  : Pulsation électrique rotorique  
 $\omega$  : Vitesse de rotation du référentiel choisi  
 d,q : repère tournant  
 $\Omega$  : Vitesse de rotation  
 g : glissement  
 $N_s$  : Vitesse du synchronisme  $U_c$  : Tension de sortie du récepteur  
 $I_c$  : Courant de sortie du récepteur  
 $V_n$  : Tension simple  
 $U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$  : Tensions composées  $I_s$  : Courant d'entrée de la charge  
 $I_H$  : Courant d'entrée d'un interrupteur



# Introduction générale

Ces dernières années, l'évolution technologique de la microélectronique, de l'électronique de puissance, les techniques de commande et de l'informatique, a permis au domaine d'entraînement électrique à vitesse variable un essor considérable. Cet avantage a joué en faveur de la machine asynchrone, car actuellement elle est utilisée pour la réalisation de la majorité des entraînements à vitesse variable.

Ce mémoire de fin d'études traite la commande scalaire d'un moteur asynchrone triphasé, et le contrôle de vitesse via le variateur HITACHI X200 sachant que la commande efficace de ces moteurs est cruciale. L'objectif est de garantir non seulement la productivité, mais aussi la sécurité et la fiabilité des opérations dans divers secteurs industriels.

Le premier chapitre pose des fondations de notre étude en fournissant une vue d'ensemble sur les outils et techniques nécessaires pour la commande des moteurs asynchrones. Pour cela, nous présentons en détail les composants de commande tels que les sectionneurs, les relais et les dispositifs de protection. Ensuite, nous illustrons les diverses méthodes de démarrage des moteurs, des plus traditionnelles aux plus avancées, permettant ainsi une mise en marche précise et contrôlée des moteurs. Enfin, ce chapitre se penche sur les capacités des onduleurs, qui permettent de réguler la vitesse et le couple des moteurs, ouvrant ainsi de nouvelles possibilités pour le contrôle et l'optimisation des processus industriels.

Dans le deuxième chapitre, nous abordons la modélisation des moteurs asynchrones et les différentes méthodes de commande, avec une attention particulière à la commande scalaire. Cette technique, grâce à sa simplicité et son efficacité, est validée théoriquement par des simulations sous MATLAB, démontrant son potentiel pour répondre aux exigences variées pour des applications industrielles.

Dans le troisième chapitre, nous nous concentrons sur les variateurs de fréquence et leurs applications pour le contrôle de vitesse des moteurs asynchrones. Après une présentation générale, nous allons montrer en détail le variateur HITACHI X200. L'étude spécifique du variateur Hitachi Omron met en évidence ses multiples fonctions et sa capacité à optimiser le contrôle des moteurs dans diverses applications industrielles.

Enfin, le quatrième chapitre est dédié aux Automates Programmables Industriels (API). La deuxième partie du chapitre se concentre sur les résultats pratiques obtenus au laboratoire sachant qu'un banc d'essai a été réalisé en exploitant le variateur HITACHI X200. Par ailleurs, nous montrons les outils et logiciels utilisés, notamment Step7 pour le développement du programme Ladder et WinCC pour la création des interfaces de supervision. Par conséquent, des acquisitions sont obtenues et interprétées durant notre étude.



# Chapitre 1

## Démarrage et commande des moteurs asynchrones

### 1.1 Introduction

Ce chapitre vise à fournir une vue d'ensemble claire et concise des outils et des techniques nécessaires pour la commande efficace des moteurs asynchrones, essentiels à la productivité et à l'efficacité de nombreuses industries.

Nous débuterons par une exploration des composants clés de la commande, tels que les sectionneurs, les relais, et les dispositifs de protection, assurant ainsi une base solide pour la fiabilité et la sécurité des opérations.

Ensuite, nous plongerons dans les diverses méthodes de démarrage, des plus traditionnelles au plus avancées, pour ajuster avec précision la mise en marche des moteurs.

Enfin, nous explorerons les capacités des onduleurs, permettant une régulation de la vitesse et du couple des moteurs asynchrones, ouvrant ainsi de nouvelles possibilités dans le contrôle et l'optimisation des processus industriels.

### 1.2 Composants de commande [1]

La commande industrielle désigne, dans son sens l'ensemble des méthodes qui permettent de contrôler les performances d'un appareil électrique, d'une machine ou d'un système. La commande industrielle contrôle le démarrage, l'accélération, le sens de rotation, la vitesse, la décélération et l'arrêt des parties tournantes.

Tout circuit de commande comprend quelques composants de base raccordés entre eux de façon à assurer le contrôle désiré du moteur.

#### 1.2.1 Sectionneurs

Les sectionneurs isolent le circuit d'un moteur de celui de la source. Ils doivent pouvoir supporter indéfiniment le courant nominal ainsi que les courants de court-circuit pendant de courtes périodes. Ils comportent des contact à couteaux et des fusibles.

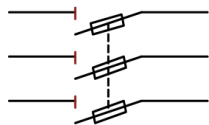


FIGURE 1.1 – Le symbole du sectionneur.

## 1.2.2 Disjoncteurs manuels

Les disjoncteurs manuels sont conçus pour ouvrir et fermer manuellement le circuit d'un moteur et pour ouvrir le circuit automatiquement si le courant dépasse une limite prédéterminée. On peut réenclencher le disjoncteur après une ouverture anormale. Souvent on utilise le disjoncteur manuel au lieu d'un sectionneur.

## 1.2.3 Relais

### 1.2.3.1 Relais de commande

Les relais de commande sont des interrupteurs électromagnétiques qui ouvrent ou ferment leurs contacts lorsqu'on excite leur bobine de maintien. On les utilise surtout dans les circuits de faible puissance.

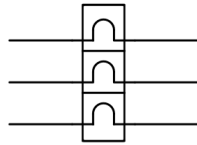


FIGURE 1.2 – Le symbole du relais magnétique.

### 1.2.3.2 Relais thermiques

Les relais thermiques sont des dispositifs de protection dont les contacts s'ouvrent (ou se ferment) lorsque la chaleur créée par le passage d'un courant dépasse une limite prédéterminée. Leur fonctionnement est temporisé, car la température ne peut pas suivre instantanément les variations du courant.

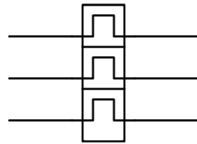


FIGURE 1.3 – Le symbole du relais thermique.

## 1.2.4 Contacteur magnétique

Les contacteurs magnétiques sont de gros relais destinés à ouvrir et à fermer un circuit de puissance. Une bobine de maintien sert à ouvrir et à fermer les contacts. On utilise les contacteurs dans la commande des moteurs dont la puissance est comprise entre 0,5 kW et plusieurs centaines de kilowatts. Comme pour les moteurs, la grosseur et les dimensions principales des contacteurs sont standardisées par les organismes de normalisation.

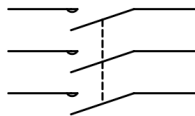


FIGURE 1.4 – Le symbole du contacteur.

### 1.2.4.1 Boutons poussoirs



Les boutons-poussoirs sont des commutateurs actionnés par une pression du doigt, et qui ouvrent ou ferment deux ou plusieurs contacts. Habituellement, un ressort ramène le bouton-poussoir à sa position normale dès que la pression est enlevée.



FIGURE 1.5 – Un bouton poussoir.

### 1.2.5 Contacts normalement ouverts et normalement fermés

Les diagrammes de commande montrent les divers organes à l'état de repos, c'est-à-dire lorsqu'ils ne sont pas alimentés (électriquement) ou actionnés (mécaniquement). Dans cet état, certains contacts sont ouverts alors que d'autres sont fermés. On les appelle, respectivement, contacts normalement ouverts (NO) et contacts normalement fermés (NF). Ils sont désignés par les symboles suivants :

- Contact normalement fermé : 
- Contact normalement ouvert : 

### 1.2.6 Démarreurs

#### 1.2.6.1 Démarreurs manuels

Les démarreurs manuels se présentent sous la forme d'un coffret comprenant un interrupteur tripolaire à commande manuelle et deux ou trois relais à protection thermique contre les surcharges. Ils conviennent aux moteurs de faible puissance (7 kW ou moins) sous des tensions de 120 V à 600 V. La pleine tension est appliquée sur la machine, ce qui assure un démarrage rapide.

#### 1.2.6.2 Démarreurs magnétiques

Lorsque l'on désire commander un moteur à partir d'un endroit éloigné ou lorsque sa puissance dépasse environ 7 kW, on doit utiliser un contacteur magnétique. Ces démarreurs magnétiques peuvent être commandés à distance par boutons-poussoirs, car ils comportent un contacteur qui ouvre ou ferme le circuit d'alimentation du moteur.

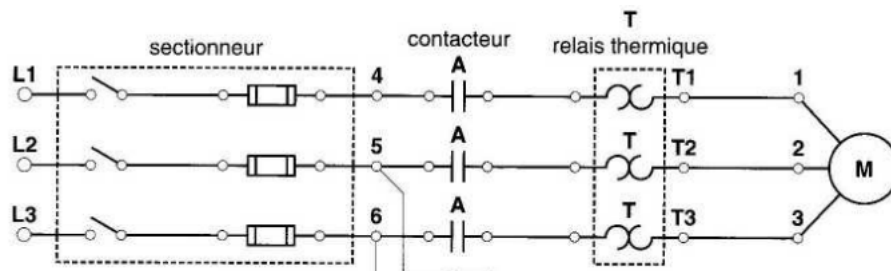


FIGURE 1.6 – Démarreur magnétique.

## 1.3 Démarrage des moteurs [2]

Lors du démarrage, l'intensité nécessaire à la mise en rotation du moteur à sa vitesse nominale peut atteindre 6 à 8 fois l'intensité nominale plaquée sur le moteur. Il est donc parfois nécessaire de limiter cette intensité si l'on ne veut pas devoir surdimensionner son installation.

Voici les 4 types principaux de démarrage d'un moteur électrique :

- Le démarrage direct.
- Le démarrage étoile triangle.
- Le démarrage progressif.
- Le démarrage avec variateur.

### 1.3.1 Démarrage direct dans deux sens de rotation

Pour un démarrage direct, il suffit d'un boîtier de démarrage classique. L'alimentation du relais de commande est prise entre 2 phases ou entre phase et neutre. Elle présente un auto-maintien permettant au contacteur de rester coller après avoir lâché le bouton de commande. Le problème est l'intensité de démarrage, lorsque le moteur est en triangle (6 à 8 fois l'intensité nominale).

Les schémas suivant permettent d'alimenter un moteur asynchrone triphasé directement sur le réseau. Le moteur est commandé par un bouton marche avant, arrière et un bouton d'arrêt, l'arrêt est prioritaire.

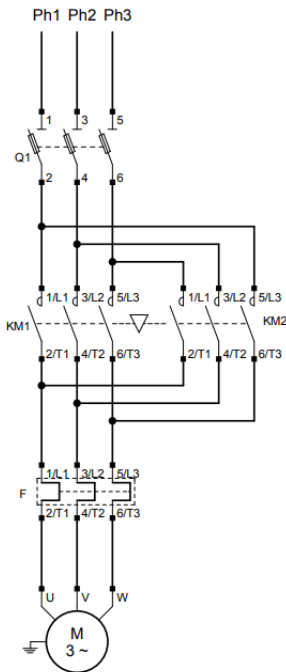


FIGURE 1.7 – Schéma de puissance du démarrage direct.

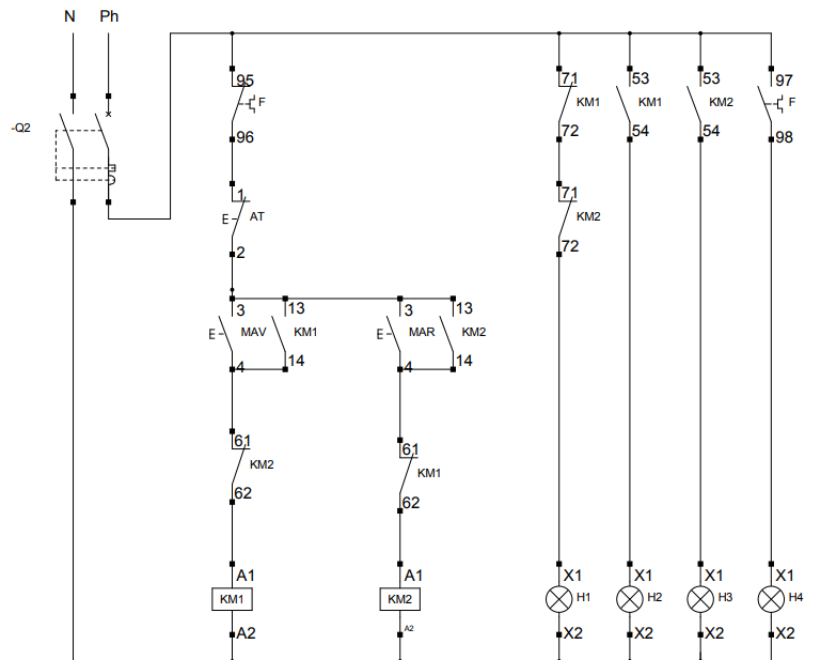


FIGURE 1.8 – Schéma de commande du démarrage direct.

### 1.3.2 Démarrage étoile-triangle dans deux sens de rotation

Afin de réduire l'intensité au démarrage, la solution peut-être un démarrage étoile-triangle. Le principe du montage étoile triangle consiste à alimenter le moteur en étoile, en sous alimentant par rapport à la tension attendue par les bobinages. On bascule ensuite (grâce à une temporisation réglable) sur un couplage triangle, correspondant à la tension d'alimentation du réseau.

**Remarque :** On doit bien respecter les principes suivants :

- Le moteur 220/400V doit être alimenté en 220V triphasé (couplage triangle en fin de démarrage).

- Le moteur 400/690V doit être alimenté en 400V triphasé (couplage triangle en fin de démarrage).
- Le câblage doit être réalisé avec soin ! Puisque le couplage s'effectue au niveau des contacteurs, il faut supprimer les barrettes de couplage du moteur.

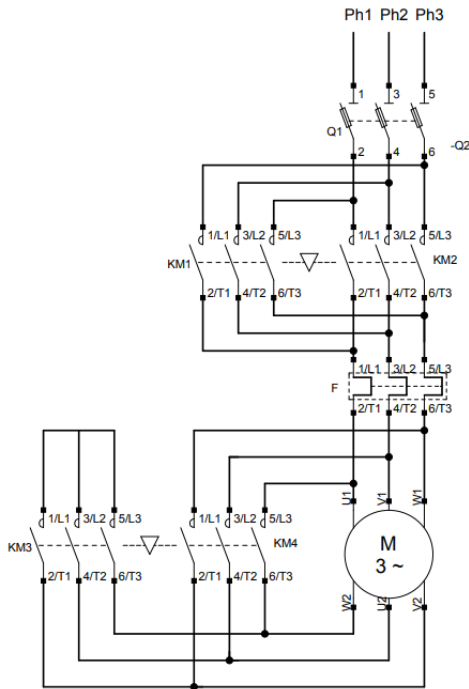


FIGURE 1.9 – Schéma de puissance du démarrage étoile-triangle.

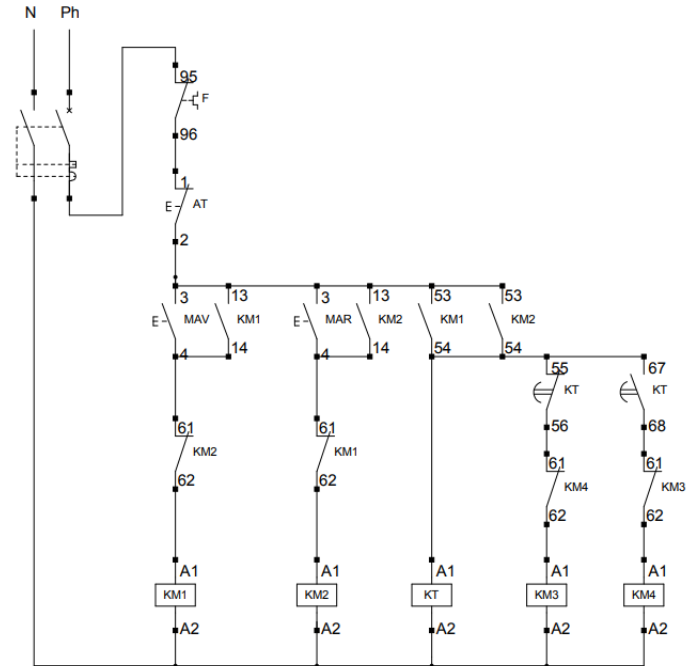


FIGURE 1.10 – Schéma de commande du démarrage étoile-triangle.

### 1.3.3 Démarrage Progressif

#### 1.3.3.1 Démarrage progressif avec thyristors

Pour un démarreur progressif électronique, il faut un algorithme contrôlant trois paires de thyristors SCR (Silicon Controlled Rectifier-redresseur contrôlé au silicium) montés dos à dos permet de démarrer et d'arrêter le moteur.

L'orientation dos à dos des thyristors SCR permet à la tension d'être régulée en changeant l'angle d'amorçage à chaque demi-cycle.

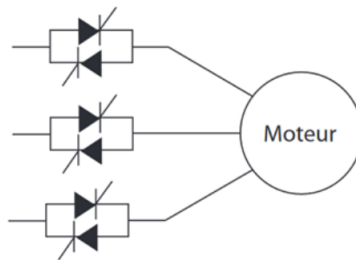


FIGURE 1.11 – Montage des thyristors avec le moteur.

Le principe est donc d'alimenter progressivement le stator du moteur, avec une tension qui va varier progressivement. L'électronique de commande permet de régler de façon précise :

- Le temps et la vitesse de démarrage.
- L'intensité à ne pas dépasser

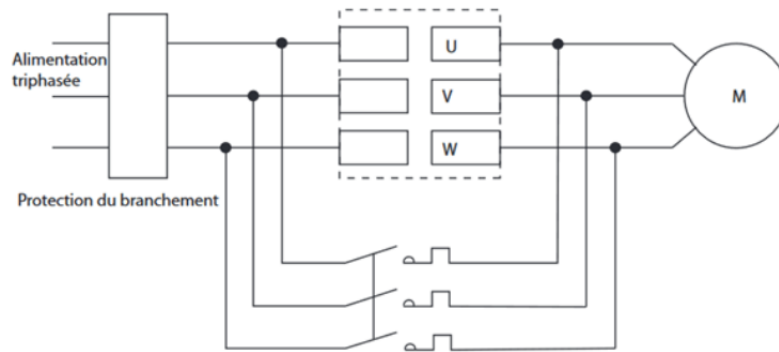


FIGURE 1.12 – Montage générale du démarrage progressif.

### 1.3.3.2 Démarrage progressif avec variateur de vitesse

Le variateur de fréquence permet également un démarrage progressif, mais cette fois en jouant sur la tension et la fréquence d'alimentation. Cela permet alors de mieux gérer le couple de démarrage. Il sert également à faire varier la vitesse lors du fonctionnement.

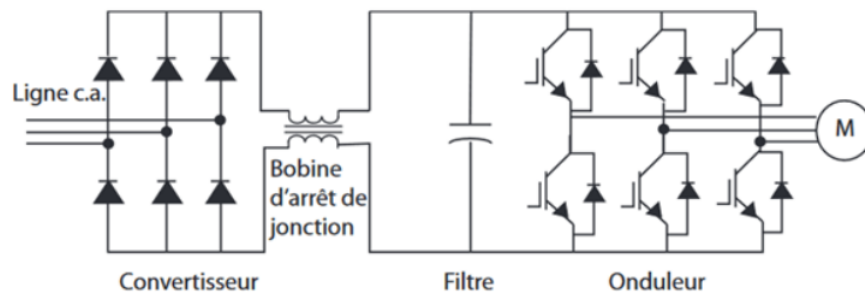


FIGURE 1.13 – Montage du démarrage avec variateur de vitesse.

**Remarque :** Pour les petites puissances, un variateur de fréquence est souvent la solution la moins coûteuse.

## 1.4 Onduleurs

### 1.4.1 Définition de l'onduleur

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continu-alternatif. Alimenté par une source continue, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie pour obtenir à la sortie une tension ou un courant alternatif.[3]

Ils sont utilisés dans deux grandes domaines :

**Alimentation à fréquence fixe :** Cet onduleur permet d'assurer la continuité de l'alimentation en cas de coupures sur le réseau, et de filtrer les éventuels défauts de la tension du réseau (parasites ou surtensions).[4]

**Alimentation à fréquence variable :** L'intérêt de cet onduleur est de pouvoir produire une tension alternative réglable en amplitude et en fréquence. La vitesse des moteurs synchrones ou asynchrones est directement liée à la fréquence d'alimentation, donc un onduleur réglable en fréquence permettra de faire varier la vitesse de ces moteurs.[4]

## 1.4.2 Types des onduleurs

### 1.4.2.1 Selon la configuration du circuit [5]

**Demi Pont :** A la fermeture de H1, le récepteur est alimenté dans un sens, H1 ouvert, H2 se referme et le récepteur est alimenté en sens inverse. Ce montage nécessite une source continue à point milieu.

**Pont Complet :** A la fermeture de H1 et H4, le courant s'établit selon les flèches en rouge, le récepteur est parcouru dans un sens. H1 et H4 étant ouverts, à la fermeture de H3 et H2, le courant s'établit dans le récepteur, mais en sens inverse.

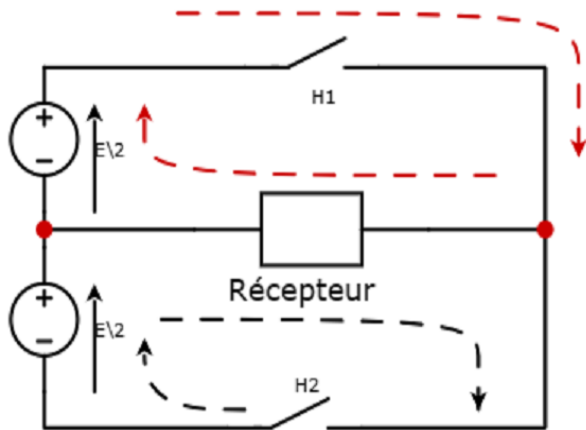


FIGURE 1.14 – Onduleur demi pont.

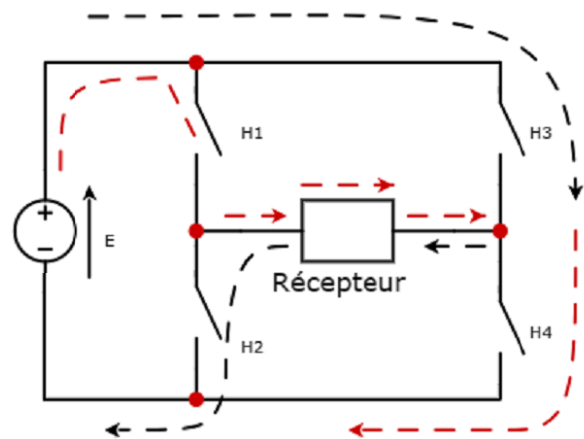


FIGURE 1.15 – Onduleur pont complet.

FIGURE 1.16 – Les types d'onduleurs selon la configuration du circuit.

**Remarque :** L'onduleur à pont complet peut être très dangereux car dans le cas où deux interrupteurs sont fermés sur des polarités inverses, il y aurait court-circuit de la source.

### 1.4.2.2 Selon la connexion au réseau[6][7]

**Autonome :** C'est un type d'onduleur qui délivre une tension de fréquence soit fixe, soit ajustable par l'utilisateur. Il n'a pas besoin de réseau électrique pour fonctionner. Il dépend essentiellement de la nature du générateur et du récepteur entre lesquels il est monté, on distingue deux types :

**Onduleur de courant :** C'est un onduleur qui est alimenté par une source de courant continu, avec une inductance interne si grande que le courant  $i$  qui la traverse ne peut être affecté par les variations de la tension  $U$  à ses bornes.

**Onduleur de tension :** C'est un onduleur qui est alimenté par une source de tension continue, la tension  $U$  n'est pas affecté par les variations du courant  $i$  qui la traverse, la source continue impose la tension à l'entrée de l'onduleur et donc à sa sortie.

**Non autonome :** Un onduleur est dit non autonome si l'énergie nécessaire pour la commutation des thyristors est fournie par le réseau alternatif qui est donc un réseau actif. C'est le cas du fonctionnement en onduleur des redresseurs. La fréquence et la forme d'onde de la tension sont imposées par le réseau alternatif.

### 1.4.2.3 Selon la sortie

**Monophasé :** Pour obtenir une tension alternative à partir d'une tension continue en utilisant deux interrupteurs, il faut un point milieu, soit du côté de la sortie alternative, soit du côté de l'entrée continue, cela correspond à :

**Onduleur monophasé en demi pont**(figure 1.14).

**Onduleur monophasé en pont complet**(figure 1.15).

**Remarque :** Les interrupteurs H1, H2, H3, H4 se composent d'un transistor met en anti-parallèle avec une diode.

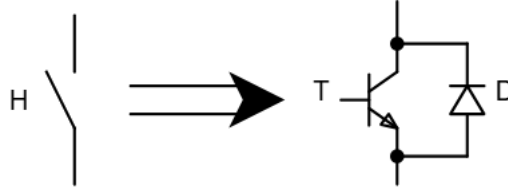


FIGURE 1.17 – Interrupteur.

**Triphasé :** On peut considérer qu'un onduleur triphasé équivaut à trois onduleurs en demi pont(figure 1.18).

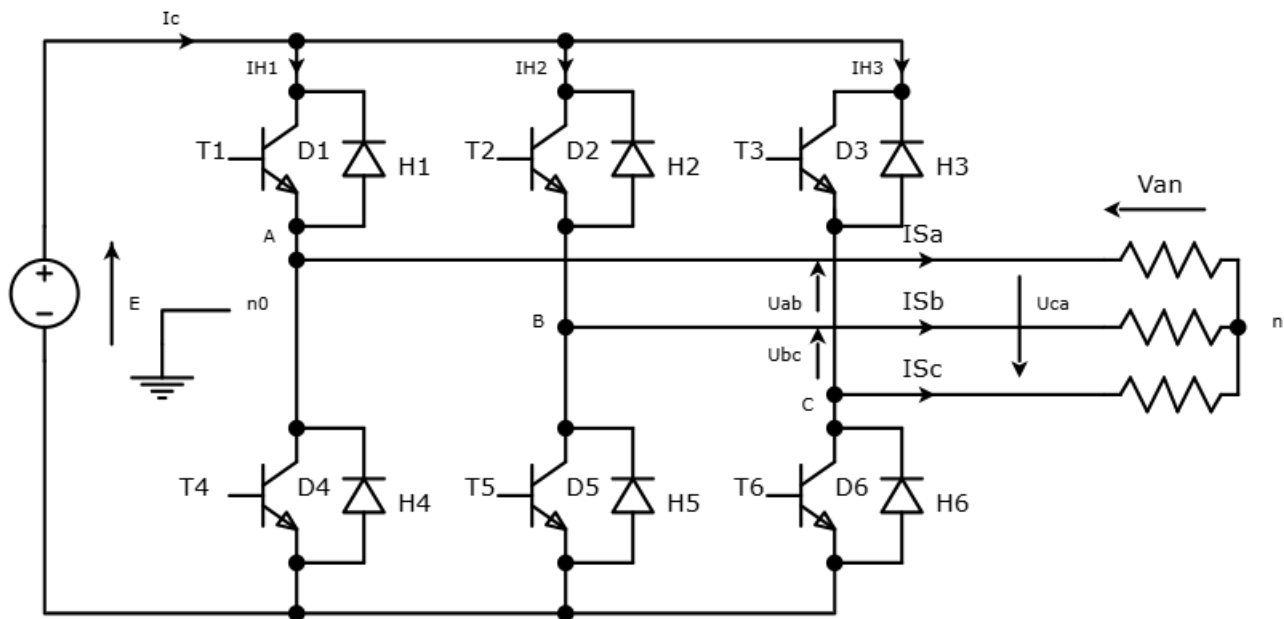


FIGURE 1.18 – Onduleur triphasé.

### 1.4.3 Commande des onduleurs

#### 1.4.3.1 Commande symétrique [5]

**Onduleur monophasé demi pont :** Dans ce cas, la tension continue totale est  $E$  (figure 1.14) et est divisée en deux parties égales  $E/2$ . Le temps pour un cycle est  $T$  secondes.

Pour une demi période de  $0 < t < T/2$ , l'interrupteur H1 conduit. Pour la deuxième demi-période de  $T/2 < t < T$ , l'interrupteur H2 conduit (figure 1.19).

**Onduleur monophasé pont complet :** Dans ce cas, la tension continue totale est  $E$ (figure 1.15). Pour une demi période de  $0 < t < T/2$ , les interrupteurs H1,H4 conduisent.

Pour la deuxième demi-période de  $T/2 < t < T$ , les interrupteurs H2,H3 conduisent (figure 1.20).

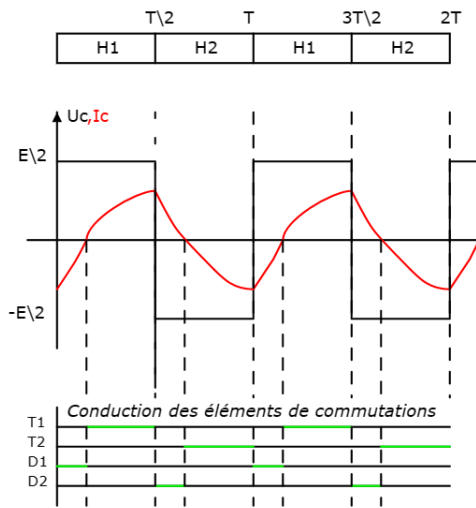


FIGURE 1.19 – Commande symétrique d'un onduleur monophasé demi pont

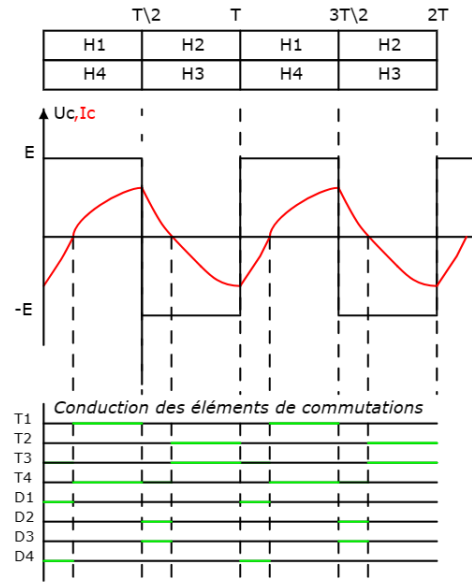


FIGURE 1.20 – Commande symétrique d'un onduleur monophasé pont complet

### 1.4.3.2 Commande décalée

**Onduleur monophasé pont complet :** On commande T1,T2 en complémentaires, mais on décale T3,T4 qui sont eux aussi commandés en complémentaires d'un angle  $\alpha$ , dans tous les cas, il n'y a que 2 éléments semi-conducteurs qui conduisent en même temps. [5]

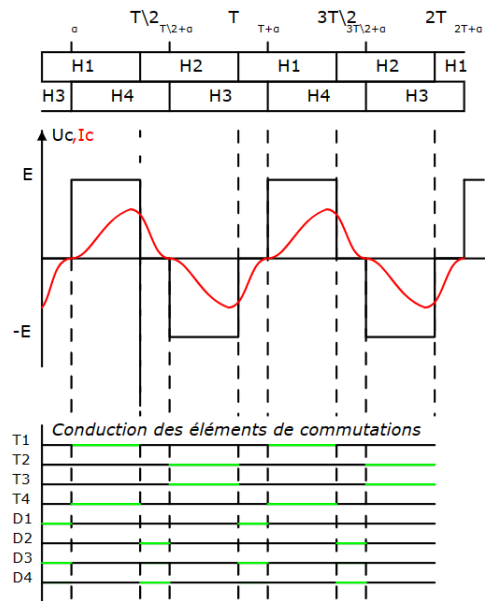


FIGURE 1.21 – Commande décalée d'un onduleur monophasé pont complet

**Remarque :** Dans le cas d'une charge résistive seulement le courant suit la courbe de la tension selon la loi d'Ohm :  $R = \frac{U}{I}$  tel que,  $U$  : la tension en volts,  $I$  le courant en ampère et  $R$  la valeur de la résistance en Ohm.

### 1.4.3.3 Commande à pleine onde des onduleurs triphasés

Les tensions simples des phases de la charge issues des tensions composées ont une somme nulle :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{U_{ab} - U_{ca}}{3} \\ V_{bn} = \frac{U_{bc} - U_{ab}}{3} \\ V_{cn} = \frac{U_{ca} - U_{bc}}{3} \end{cases} \quad (1.1)$$

Elles peuvent également s'écrire à partir des tensions de sorties de l'onduleur en introduisant la tension du neutre de la charge par rapport au point de référence  $n_0$ .

$$\begin{cases} V_{an} + V_{nn0} = V_{an0} \\ V_{bn} + V_{nn0} = V_{bn0} \\ V_{cn} + V_{nn0} = V_{cn0} \end{cases} \quad (1.2)$$

Donc on peut déduire :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{V_{an0} + V_{bn0} + V_{cn0}}{3} \end{cases} \quad (1.3)$$

**Caractéristiques des tensions :**

**Tensions de sorties :** La décomposition en série donne les valeurs crête et efficace des harmoniques :

$$\begin{cases} (V_{an0}^{2k+1})_{\text{crête}} = \frac{4 U_c}{\pi} \frac{1}{2} \frac{1}{2k+1} \\ (V_{an0}^{2k+1})_{\text{eff}} = \frac{4 U_c}{\pi} \frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{1}{2k+1} \end{cases} \quad (1.4)$$

On retrouve tous les harmoniques de rang impair.

**Tensions de phases :**

$$\begin{cases} (V_{an}^{2k+1})_{\text{crête}} = \frac{4 U_c}{\pi} \frac{1}{2} \frac{1}{2k+1} \quad \text{pour } (2k+1) = 1, 5, 7, \dots \\ (V_{an}^{2k+1})_{\text{crête}} = 0 \quad \text{pour } (2k+1) = 3, 9, \dots \end{cases} \quad (1.5)$$

**Caractéristiques du courant d'entrée :**

Les courants d'entrées ont une période égale à  $1/6$  de la période des grandeurs de sortie.

Si on considère pour simplifier que les courants triphasés dans la charge sont sinusoïdaux et s'expriment :

$$\begin{cases} I_{Sa} = I\sqrt{2} \cos(\omega t - \theta) \\ I_{Sb} = I\sqrt{2} \cos(\omega t - \theta - \frac{2\pi}{3}) \\ I_{Sc} = I\sqrt{2} \cos(\omega t - \theta - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (1.6)$$

alors :

pour  $0 < \omega t < \pi/3$  :

$$\begin{cases} I_c = -I_{Sb} = -I\sqrt{2} \cos(\omega t - \theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \text{donc } I_c = I\sqrt{2} \cos(\omega t - \theta + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (1.7)$$

**Remarque :**

On peut aussi écrire que :

$$\{I_c = I_{H1} + I_{H2} + I_{H3} \tag{1.8}$$

car  $I_c$  est la somme des 3 courants dans les 3 interrupteurs du 1/2 pont supérieur.

**Ondulation :**

Pour  $0 < \theta < \pi/6$  :

$$(I_c)_{max} = I\sqrt{2} \tag{1.9}$$

Pour  $\pi/6 < \theta < \pi/2$  et  $-\pi/2 < \theta < 0$  :

$$(I_c)_{max} = I\sqrt{2} \sin(2\pi/3 - \theta) \tag{1.10}$$

L'ondulation  $\Delta I_c$  dépend donc fortement de  $\theta$ . Elle est minimale pour  $\theta = 0$  et maximale pour  $\theta = \pi/2$ . Elle vaut alors  $I\sqrt{2}$ .

**Valeur moyenne :**

Elle peut être calculée directement ou par un bilan de puissance active :

$$\langle I_c \rangle = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} I \cos(\theta) \tag{1.11}$$

**Remarque :**

La tension générée par les stratégies précédentes a une forme rectangulaire, sa décomposition en série de Fourier a montré que cette forme d'onde est riche en harmoniques. Cet inconvénient disparaît si l'onduleur est alimenté à tension constante et si le réglage de la tension de sortie se fait par un découpage approprié qui neutralise les harmoniques de rang bien spécifique.[7]

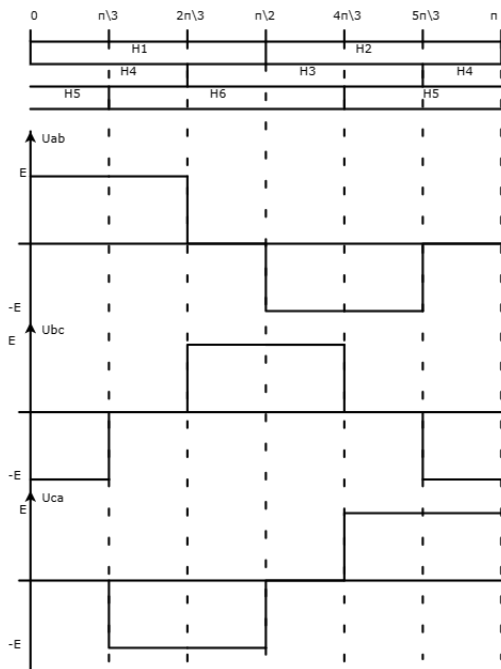


FIGURE 1.22 – Tensions composées de la commande pleine onde d'un onduleur triphasé

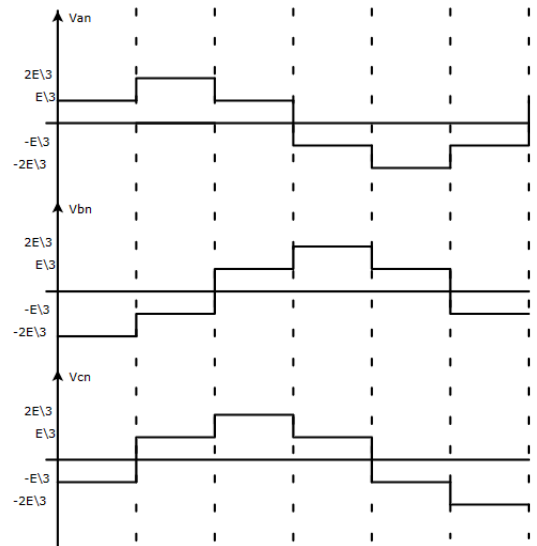


FIGURE 1.23 – Tensions simples de la commande pleine onde d'un onduleur triphasé

### 1.4.3.4 Commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI)

La conversion continue-alternative est assurée par les commutations des interrupteurs de l'onduleur qui vont ainsi effectuer des connexions temporaires entre les bornes de la source d'alimentation continue et les lignes de la charge triphasée alternative. Le transfert d'énergie est contrôlé par le rapport entre intervalles d'ouverture et de fermeture (rapport cyclique) de chaque interrupteur, donc par la modulation de largeurs d'impulsion de contrôle de ces interrupteurs (MLI).[7]

#### Principe de la modulation de largeur d'impulsion

La technique de génération des signaux de commande appelée PWM ou MLI consiste juste en la comparaison, au sens électronique du terme, d'un signal sinusoïdal dit de consigne avec une porteuse triangulaire de fréquence supérieur permettant de fixer par la même fréquence des commutations et ainsi la bande de fréquence occupée par le contenu harmonique.[8]

**Caractéristiques de la modulation largeur d'impulsion :** Les paramètres essentiels de la MLI sont :

- La fréquence de modulation :  $f_p$
- L'indice de modulation :  $m = \frac{f_p}{f_r}$  ou  $f_r$  est la fréquence du signal de consigne.
- Le coefficient de réglage en tension :  $r = \frac{A_r}{A_p}$  avec :  
 $A_r$  : Amplitude du signal de consigne,  $A_p$  : Amplitude du signal porteur.

#### Remarques :

- La modulation montre que plus  $m$  est grand et plus la neutralisation des harmoniques est efficace, d'autre part on cherche à obtenir une valeur de  $r$  la plus élevée possible.
- La modulation est dite synchrone si  $m$  est un nombre entier cela conduit à une tension de sortie qui se reproduit identiquement à elle-même.
- Dans certains cas la modulation est asynchrone, notamment quand à fréquence de modulation  $f_p$  donnée, on fait varier de façon continue la fréquence de la référence.[7]

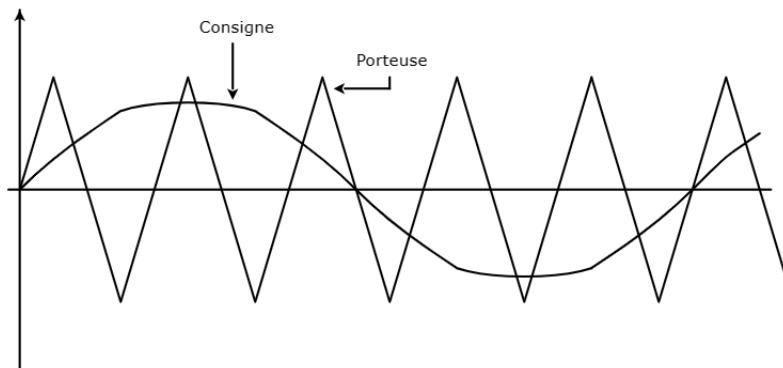


FIGURE 1.24 – Principe de la modulation de largeur d'impulsion

#### Différents types de la modulation largeur d'impulsion[4] :

**MLI bipolaire :** La commande MLI est bipolaire quand la tension de sortie  $U(t)$  ne peut prendre que deux valeurs opposées :  $U(t) = +V$  ou  $U(t) = -V$ .

- $U(t) = +V$
- $U(t) = -V$

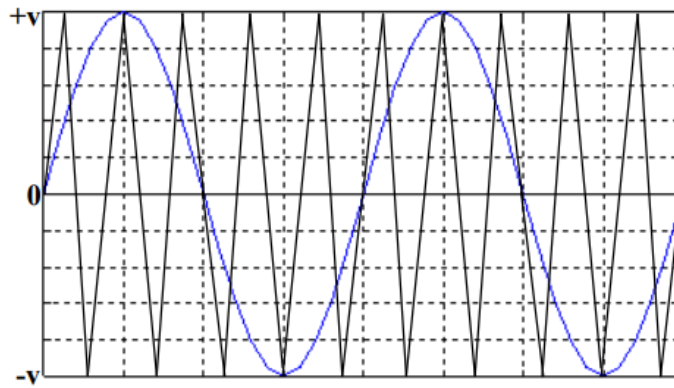


FIGURE 1.25 – MLI bipolaire

**MLI unipolaire :** La commande MLI est dite unipolaire dans le cas où la tension de sortie  $U(t)$  peut prendre les valeurs suivantes :

- $U(t) = (+V, 0)$  pour les alternances positives.
- $U(t) = (-V, 0)$  pour les alternances négatives.

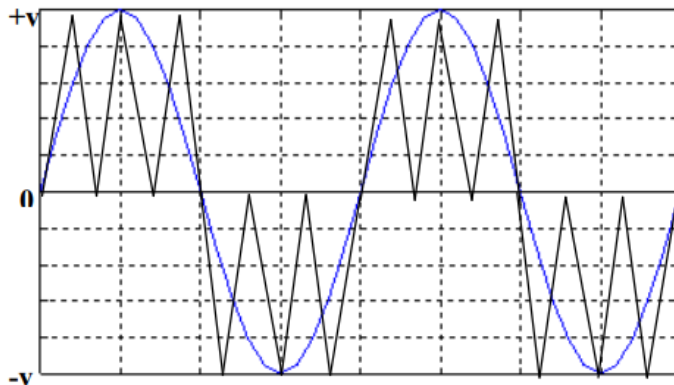


FIGURE 1.26 – MLI unipolaire

### Techniques de modulation largeur d'impulsion [7]

**La modulation linéaire multiple :** Dans cette technique on compare une porteuse triangulaire avec un signal de référence linéaire. L'onde de sortie est sous la forme d'un train d'impulsion en créneaux de largeurs égales. Si l'indice de modulation est égal à un, on obtient une modulation, dans laquelle le signal de sortie est formé d'une seule impulsion par demi-période (figure 1.27).

**La modulation sinusoïdale triangulaire unipolaire :** Dans ce cas, le signal de référence est sinusoïdal, on obtient à la sortie de l'onduleur une onde formée d'un train d'impulsion de largeur variable. Les instants de commutations sont déterminés par des points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse. Ce type de MLI est la plus utilisée dans les applications industrielles, car elle s'est avérée la plus efficace pour la neutralisation des harmoniques (figure 1.28).

**La modulation sinusoïdale modifiée :** Le signal de référence est toujours sinusoïdal, sauf que dans cette technique la porteuse n'est pas appliquée au milieu des alternances de la sinusoïde (figure 1.29).

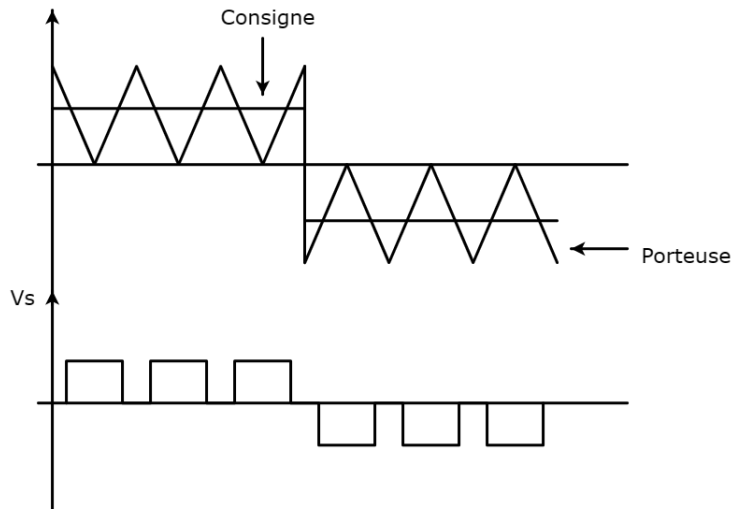


FIGURE 1.27 – Modulation linéaire multiple

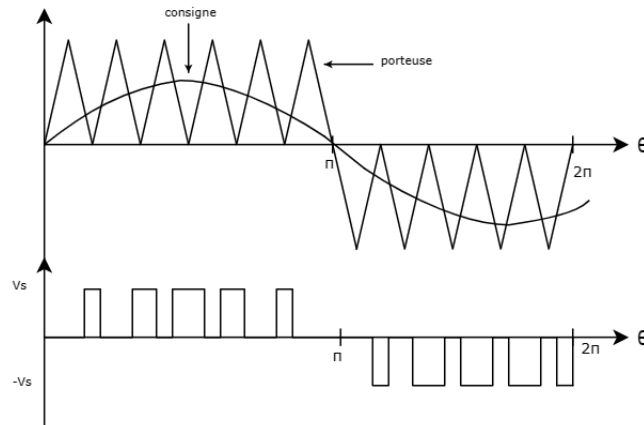


FIGURE 1.28 – Modulation sinusoidale triangulaire unipolaire

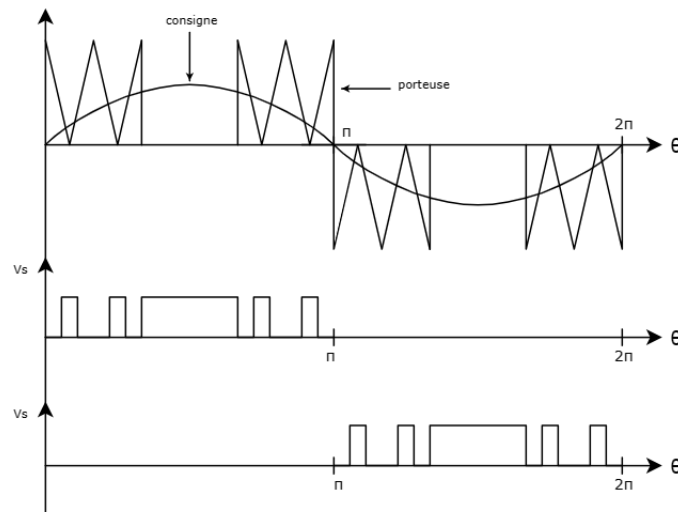


FIGURE 1.29 – Modulation sinusoidale modifiée

## 1.5 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'explorer les fondements de la commande des moteurs asynchrones, des éléments utilisés dans de nombreux domaines industriels. Nous avons examiné en détail les composants de commande, les types de démarrages et les principes des onduleurs pour réguler la vitesse et le couple de ces moteurs.

Dans le prochain chapitre, nous passerons à la commande scalaire d'un moteur asynchrone. Cette technique va nous permettre de contrôler la vitesse du moteur avec précision et de répondre aux exigences spécifiques de diverses applications industrielles.

Par ailleurs, la modélisation d'un moteur asynchrone et la commande scalaire de celui-ci ont été présentées sous forme de simulation sous MATLAB, ainsi l'interprétation des résultats obtenues a été faite.



# Chapitre 2

## Modélisation et commande scalaire du moteur asynchrone

### 2.1 Introduction

Ce chapitre se consacre à l'étude détaillée de la machine asynchrone, un élément crucial dans de nombreux systèmes industriels et d'automatisation. Nous débuterons par une description approfondie de la construction de cette machine, suivie d'une explication de son principe de fonctionnement. Ensuite, nous aborderons la modélisation de la machine asynchrone en présentant les différentes équations mathématiques nécessaires pour décrire son comportement dynamique.

La deuxième partie de ce chapitre se focalisera sur la commande scalaire de la machine asynchrone. Nous commencerons par expliquer le principe du fonctionnement en  $V/F$ , avant de présenter la commande en boucle ouverte en utilisant les onduleurs de tension et de courant. Nous discuterons ensuite de la commande en boucle fermée, en se concentrant sur la commande scalaire par le contrôle du flux magnétique. Enfin, nous présenterons les résultats des différentes simulations effectuées, y compris la simulation de la machine asynchrone et de la commande scalaire.

### 2.2 Description d'une machine asynchrone[9]

Un moteur asynchrone, ou moteur à induction, se présente sous la forme d'un carter entourant le circuit magnétique, ferromagnétique, statorique qui accueille dans des encoches l'enroulement statorique polyphasé (généralement triphasé) bobiné en fil de cuivre isolé.

A l'intérieur de ce circuit magnétique, qui se présente comme un cylindre creux, séparé par un entrefer, tourne le circuit magnétique rotorique qui accueille dans ses encoches les barreaux de la cage rotorique, en aluminium coulé ou en cuivre, court-circuités à chaque extrémité par des anneaux réalisés dans le même matériau. Le circuit magnétique rotorique est traversé par l'arbre qui repose sur des paliers montés dans les flasques, fixés au carter.

Le moteur asynchrone est donc caractérisé par :

- La présence d'un bobinage polyphasé alimenté par une source extérieure, au stator.
- La présence d'un bobinage massif en court-circuit, au rotor.

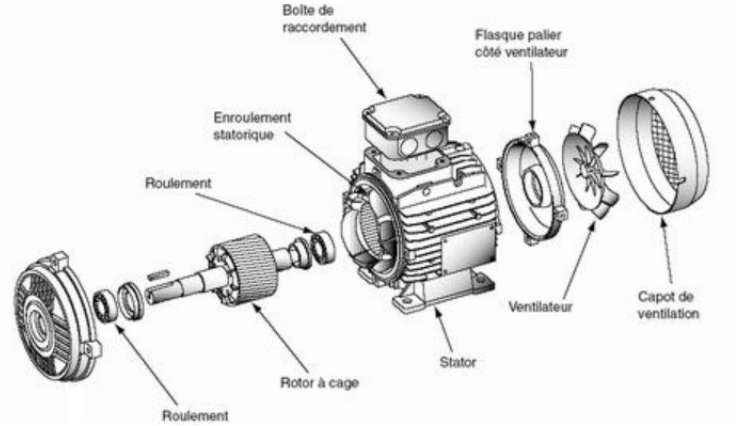


FIGURE 2.1 – Description du moteur asynchrone.

## 2.3 Construction de la machine asynchrone[10]

Le moteur asynchrone triphasé se compose de deux éléments principaux : le stator et le rotor.

Le stator porte un bobinage triphasé à  $2p$  pôles, relié à la source d'alimentation fournissant des tensions de fréquence  $f$ .

Quant au rotor, il est également polyphasé avec le même nombre de pôles. Dans le cas le plus courant, les enroulements du rotor sont mis en court-circuit sur eux-mêmes dès la construction. Cette configuration, appelée cage d'écurie, comprend une barre dans chaque encoche, toutes reliées par deux anneaux d'extrémités.

Une autre possibilité consiste à placer un bobinage similaire à celui du stator dans les encoches du moteur à rotor bobiné. Les extrémités des trois phases de ce bobinage sont reliées à trois bagues, sur lesquelles reposent trois balais constituant les bornes fixes du rotor.

### 2.3.1 Glissement

Le couple fait tourner le rotor dans le même sens que le champ tournant. La vitesse  $N$  du rotor est inférieure à la vitesse de synchronisme  $N'_S$ .

La vitesse  $N$  a pour valeur :  $N = N_S(1 - g)$ .

Le rapport  $g = \frac{N_S - N}{N_S}$  est appelé glissement.

### 2.3.2 Fréquence rotorique

La vitesse de balayage du rotor par le flux tournant est :  $N_S - N = gN_S$ . Or, le flux balayant le stator à la vitesse  $N_S$  y induit des f.é.m de fréquence  $f$ . Au rotor, les f.é.m et le courant auront pour fréquence :  $f_R = g.f$

Les courants rotoriques créent un flux tournant dont la vitesse par rapport au rotor est :  $\frac{f_R}{p} = \frac{gf}{p}$  donc par rapport au stator :

$$N + \frac{gf}{p} = \frac{f}{p}(1 - g) + \frac{gf}{p} = \frac{f}{p} = N_S$$

Les flux dus aux courants statoriques et aux courants rotoriques tournent à la même vitesse, quel que soit  $g$ . Ils se composent pour donner le flux tournant réel dans l'entrefer. C'est ce flux qui induit dans les phases statoriques une f.é.m sensiblement égale à la tension qui leur est appliquée.

## 2.4 Principe de fonctionnement[1]

Dans le moteur asynchrone, les conducteurs sont arrangés en forme de cage d'écurie. et l'aimant est remplacé par un champ tournant qui coupe les conducteurs du rotor. Ce champ tour-

nant est créé par l'ensemble des courants triphasés circulant dans les trois enroulements du stator, il tourne à la vitesse de synchronisme  $N_s$ , qui à la même fréquence que le courant statorique. Ce champ traverse le bobinage rotorique et y induit des forces électromotrices (f.é.m). Ces f.é.m produisent des courants de Foucaults car le bobinage du rotor est en court-circuit. L'action des courants sur le champ tournant qui les a induits crée le couple (Force de Laplace).

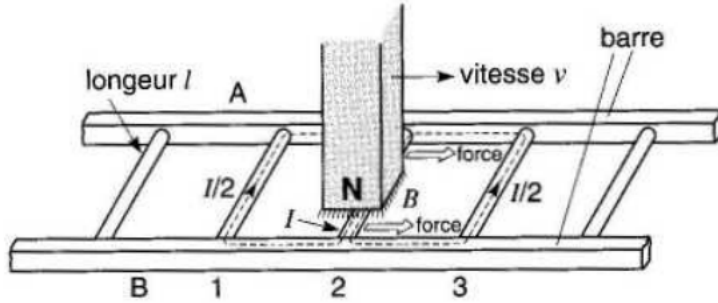


FIGURE 2.2 – Un aimant permanent qui se déplace vers la droite tend à entraîner l'échelle conductrice.

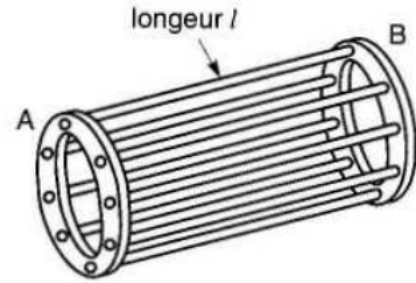


FIGURE 2.3 – La cage d'écureuil.

## 2.5 Modélisation d'une machine asynchrone

Le modèle général de la machine asynchrone est obtenu en considérant les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Parfaite symétrie de construction.
- Assimilation de la cage à un bobinage en court-circuit de même nombre de phases que le bobinage statorique.
- Répartition sinusoïdale, le long de l'entrefer, des champs magnétiques de chaque bobinage.
- Absence de saturation dans le circuit magnétique.

Dans ces conditions, les équations des circuits électriques font intervenir des inductances propres et mutuelles permettant de définir les flux en fonction des courants.

En appliquant la loi de Faraday sur les six enroulements statoriques et rotoriques, la loi des mailles pour les enroulements du stator s'exprime par les relations suivantes.

### 2.5.1 Équations électriques et magnétiques[9]

Pour le stator :

$$\begin{cases} V_{Sa} = R_S i_{Sa} + \frac{d\phi_{Sa}}{dt} \\ V_{Sb} = R_S i_{Sb} + \frac{d\phi_{Sb}}{dt} \\ V_{Sc} = R_S i_{Sc} + \frac{d\phi_{Sc}}{dt} \end{cases} \quad (2.1)$$

Se présentent sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_{Sa} \\ V_{Sb} \\ V_{Sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_S & 0 & 0 \\ 0 & R_S & 0 \\ 0 & 0 & R_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Sa} \\ i_{Sb} \\ i_{Sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{Sa} \\ \phi_{Sb} \\ \phi_{Sc} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Pour le rotor :

$$\begin{cases} V_{Ra} = R_R i_{Ra} + \frac{d\phi_{Ra}}{dt} \\ V_{Rb} = R_R i_{Rb} + \frac{d\phi_{Rb}}{dt} \\ V_{Rc} = R_R i_{Rc} + \frac{d\phi_{Rc}}{dt} \end{cases} \quad (2.3)$$

Se présentent sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_{Ra} \\ V_{Rb} \\ V_{Rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_R & 0 & 0 \\ 0 & R_R & 0 \\ 0 & 0 & R_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Ra} \\ i_{Rb} \\ i_{Rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{Ra} \\ \phi_{Rb} \\ \phi_{Rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Les équations des flux en fonction des courants s'obtiennent à partir de la matrice des inductances  $[L(\theta)]$ . Celle-ci comporte 36 coefficients non nuls, dont la moitié dépend du temps par l'intermédiaire de l'angle électrique  $\theta$ , position de la phase (a) du rotor par rapport à la phase (a) du stator. L'angle électrique s'exprime par  $\theta = P_p \theta_m$  où  $P_p$  est le nombre de paires de pôles magnétiques de la machine et  $\theta_m$  est la position mécanique du rotor par rapport au stator.

$$\begin{bmatrix} \phi_{Sa} \\ \phi_{Sb} \\ \phi_{Sc} \\ \phi_{Ra} \\ \phi_{Rb} \\ \phi_{Rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_S & M_S & M_S & M_1 & M_3 & M_2 \\ M_S & l_S & M_S & M_2 & M_1 & M_3 \\ M_S & M_S & l_S & M_3 & M_2 & M_1 \\ M_1 & M_2 & M_3 & l_R & M_R & M_R \\ M_3 & M_1 & M_2 & M_R & l_R & M_R \\ M_2 & M_3 & M_1 & M_R & M_R & l_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Sa} \\ i_{Sb} \\ i_{Sc} \\ i_{Ra} \\ i_{Rb} \\ i_{Rc} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

avec :

$$\begin{cases} M_1 = M \cos(\theta) \\ M_2 = M \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ M_3 = M \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (2.6)$$

où  $M$  représente la valeur maximale des inductances mutuelles entre phases statoriques et rotoriques. La matrice  $[L(\theta)]$  fait apparaître quatre sous-matrices d'inductances :

$$\begin{bmatrix} \phi_{Sabc} \\ \phi_{Rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_S] & [M_{SR}] \\ [M_{RS}] & [L_R] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Sabc} \\ i_{Rabc} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

avec la matrice des inductances statoriques  $[L_S]$  :

$$[L_S] = \begin{bmatrix} l_S & M_S & M_S \\ M_S & l_S & M_S \\ M_S & M_S & l_S \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

la matrice des inductances rotoriques  $[L_R]$  :

$$[L_R] = \begin{bmatrix} l_R & M_R & M_R \\ M_R & l_R & M_R \\ M_R & M_R & l_R \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

la matrice des inductances mutuelles Stator-Rotor  $[M_{SR}]$ , et  $[M_{RS}]$  la matrice des inductances mutuelles Rotor-Stator :

$$[M_{RS}] = [[M_{SR}]^T] = [M] \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Les couplages en étoile des bobinages permettent d'introduire les relations :

$$i_{Sa} + i_{Sb} + i_{Sc} = 0 \quad \text{et} \quad i_{Ra} + i_{Rb} + i_{Rc} = 0 \quad (2.11)$$

qui permettent par regroupement de termes d'écrire :

$$[L_S] = L_S[I_S] \quad \text{et} \quad [L_R] = L_R[I_R] \quad (2.12)$$

$L_S$  et  $L_R$  étant des inductances cycliques et  $[I_3]$  la matrice unitaire d'ordre 3.

$$L_S = \left(\frac{3}{2}\right) L_{0S} + L_{\sigma S} \quad \text{et} \quad L_R = \left(\frac{3}{2}\right) L_{0R} + L_{\sigma R} \quad (2.13)$$

On obtient finalement :

$$\begin{aligned} [v_{Sabc}] &= [R_S][i_{Sabc}] + \frac{d}{dt} \left\{ [L_S][i_{Sabc}] + [M_{SR}][i_{Rabc}] \right\} \\ [v_{Rabc}] &= [R_R][i_{Rabc}] + \frac{d}{dt} \left\{ [L_R][i_{Rabc}] + [M_{SR}][i_{Sabc}] \right\} \end{aligned} \quad (2.14)$$

Ce qui nous donne le système d'équations générales utilisables pour l'étude de tous les régimes concernant la machine asynchrone :

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s i_{sa} + l_s \frac{di_{sa}}{dt} + M_s \frac{di_{sb}}{dt} + M_s \frac{di_{sc}}{dt} + \frac{d}{dt} (M_1 i_{ra} + M_2 i_{rb} + M_3 i_{rc}) \\ V_{sb} = R_s i_{sb} + l_s \frac{di_{sb}}{dt} + M_s \frac{di_{sc}}{dt} + M_s \frac{di_{sa}}{dt} + \frac{d}{dt} (M_2 i_{ra} + M_1 i_{rb} + M_3 i_{rc}) \\ V_{sc} = R_s i_{sc} + l_s \frac{di_{sc}}{dt} + M_s \frac{di_{sa}}{dt} + M_s \frac{di_{sb}}{dt} + \frac{d}{dt} (M_3 i_{ra} + M_2 i_{rb} + M_1 i_{rc}) \\ V_{ra} = R_r i_{ra} + l_r \frac{di_{ra}}{dt} + M_s \frac{di_{rb}}{dt} + M_s \frac{di_{rc}}{dt} + \frac{d}{dt} (M_1 i_{sa} + M_2 i_{sb} + M_3 i_{sc}) \\ V_{rb} = R_r i_{rb} + l_r \frac{di_{rb}}{dt} + M_s \frac{di_{rc}}{dt} + M_s \frac{di_{ra}}{dt} + \frac{d}{dt} (M_3 i_{sa} + M_2 i_{sb} + M_1 i_{sc}) \\ V_{rc} = R_r i_{rc} + l_r \frac{di_{rc}}{dt} + M_s \frac{di_{ra}}{dt} + M_s \frac{di_{rb}}{dt} + \frac{d}{dt} (M_2 i_{sa} + M_3 i_{sb} + M_1 i_{sc}) \end{cases} \quad (2.15)$$

avec  $V_{ra} = V_{rb} = V_{rc} = 0$  car les circuits rotoriques sont en court-circuit.

Le couple est donné par l'expression suivante issue de considérations sur la conversion électromécanique de l'énergie :

$$C_{em} = P_p [i_{Sa} \quad i_{Sb} \quad i_{Sc}] \frac{d}{d\theta} [M_{SR}] \begin{bmatrix} i_{Ra} \\ i_{Rb} \\ i_{Rc} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

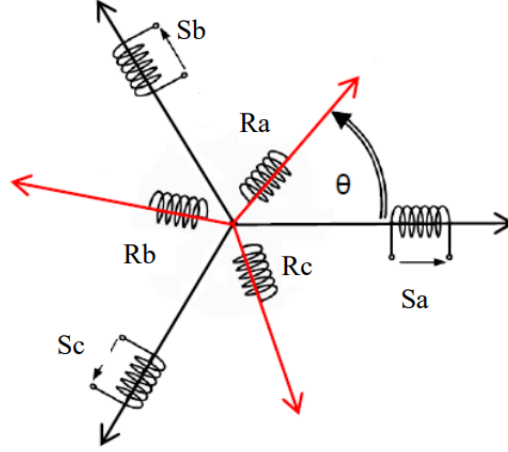


FIGURE 2.4 – Schéma des enroulements de la machine asynchrone triphasée dans l'espace électrique.

### 2.5.2 Équations mécaniques[11]

Dans l'étude des caractéristiques de la machine asynchrone, il est nécessaire d'introduire les paramètres mécaniques qui sont le couple et la vitesse avec les paramètres électriques comme les tensions, courants....

Le couple électromagnétique de la machine est calculé à partir d'un bilan de puissance, d'où la puissance électrique instantanée  $P_e$  fournie aux enroulements statoriques et rotoriques en fonction des grandeurs d'axes (d,q) est donnée comme suit :

$$P_e = (V_{sd}i_{sd} + V_{sq}i_{sq}) + (V_{rd}i_{rd} + V_{rq}i_{rq}) \quad (2.17)$$

Elle se décompose en trois séries de termes :

- Puissance dissipée en pertes joule :

$$P_d = R_s(i_{sd}^2 + i_{sq}^2) + R_r(i_{rd}^2 + i_{rq}^2) \quad (2.18)$$

- Puissance représentant les échanges d'énergie électromagnétique avec la source :

$$i_{sd} \frac{d\phi_{sd}}{dt} + i_{sq} \frac{d\phi_{sq}}{dt} + i_{rd} \frac{d\phi_{rd}}{dt} + i_{rq} \frac{d\phi_{rq}}{dt} \quad (2.19)$$

- Puissance mécanique :

$$P_m = (\phi_{sd}i_{sq} - \phi_{sq}i_{sd}) \frac{d\theta_s}{dt} + (\phi_{rd}i_{rq} - \phi_{rq}i_{rd}) \frac{d\theta_r}{dt} \quad (2.20)$$

En d'autre part, l'expression du couple électromagnétique est donnée par :

$$C_{em} = p(\phi_{sd}i_{sq} - \phi_{sq}i_{sd}) \quad (2.21)$$

### 2.5.3 Équation du mouvement[11]

La dynamique de la partie mobile de la machine est exprimée par l'équation du mouvement suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f_r \Omega \quad (2.22)$$

Avec :

- $J$  : Moment d'inertie du rotor ( $Kg.m^2$ ).
- $C_r$  : Couple résistant ( $N.m$ ).
- $\Omega$  : Vitesse rotorique ( $rad/s$ ).
- $C_{em}$  : Couple électromagnétique ( $N.m$ ).
- $f_r$  : Coefficient de frottement visqueux ( $N.m.rad^{-1}.s$ ).
- $f_r\Omega$  : Terme de couple de frottement visqueux ( $N.m$ ).

### 2.5.4 Équations de Concordia[9]

C'est une technique qui vise à transformer les grandeurs électriques triphasées en un système de coordonnées synchronisé avec le champ magnétique tournant pour simplifier l'analyse globale du système triphasé.

Elle est obtenue en faisant la projection des équations du modèle vectoriel dans le référentiel fixe lié au stator, sur les deux axes  $(\alpha, \beta)$  ce qui donne :

$$\begin{cases}
 V_{S\alpha} = R_S I_{S\alpha} + \frac{d\phi_{S\alpha}}{dt} \\
 V_{S\beta} = R_S I_{S\beta} + \frac{d\phi_{S\beta}}{dt} \\
 0 = V_{R\alpha} = R_R I_{R\alpha} + \frac{d\phi_{R\alpha}}{dt} + \frac{d\theta}{dt} \phi_{R\beta} \\
 0 = V_{R\beta} = R_R I_{R\beta} + \frac{d\phi_{R\beta}}{dt} + \frac{d\theta}{dt} \phi_{R\alpha} \\
 \tau_{elm} = P_P L_m [I_{R\alpha} I_{S\beta} - I_{R\beta} I_{S\alpha}] \\
 \begin{cases}
 \phi_{S\alpha} = L_S I_{S\alpha} + L_m I_{R\alpha} \\
 \phi_{S\beta} = L_S I_{S\beta} + L_m I_{R\beta} \\
 \phi_{R\alpha} = L_R I_{R\alpha} + L_m I_{S\alpha} \\
 \phi_{R\beta} = L_R I_{R\beta} + L_m I_{S\beta}
 \end{cases}
 \end{cases} \quad (2.23)$$

Ces équations auraient pu être également obtenues directement en appliquant aux équations matricielles la transformation de Concordia :

$$\begin{cases}
 \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_h \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_h \end{bmatrix}
 \end{cases} \quad (2.24)$$

Dans beaucoup de cas, le système de grandeurs triphasés est tel que la somme instantanée des grandeurs est nulle, ce qui permet d'annuler la composante homo polaire d'indice  $h$ .

### 2.5.5 Équations de Park[9]

Le principal objectif de la transformée de Park est de transformer les grandeurs électriques triphasées du système triphasé en un système de référence synchronisé avec le champ magnétique tournant de la machine en séparant d'avantage les composantes directes et quadrature.

Elle est obtenue en faisant la projection des équations du modèle vectoriel dans le référentiel tournant, sur les deux axes  $(d, q)$  ce qui donne :

$$\begin{cases}
 V_{Sd} = R_S I_{Sd} + \frac{d\phi_{Sd}}{dt} - \frac{d\theta_S}{dt} \phi_{Sq} \\
 V_{Sq} = R_S I_{Sq} + \frac{d\phi_{Sq}}{dt} + \frac{d\theta_S}{dt} \phi_{Sd} \\
 0 = V_{Rd} = R_R I_{Rd} + \frac{d\phi_{Rd}}{dt} - \frac{d\theta_R}{dt} \phi_{Rq} \\
 0 = V_{Rq} = R_R I_{Rq} + \frac{d\phi_{Rq}}{dt} + \frac{d\theta_R}{dt} \phi_{Rd} \\
 \tau_{elm} = P_P L_m [I_{Sq} I_{Rd} - I_{Sd} I_{Rq}] \\
 \begin{cases}
 \phi_{Sd} = L_S I_{Sd} + L_m I_{Rd} \\
 \phi_{Sq} = L_S I_{Sq} + L_m I_{Rq} \\
 \phi_{Rd} = L_R I_{Rd} + L_m I_{Sd} \\
 \phi_{Rq} = L_R I_{Rq} + L_m I_{Sq}
 \end{cases}
 \end{cases} \quad (2.25)$$

Ces équations auraient pu être également obtenues directement en appliquant aux équations matricielles la transformation de Park en prenant en compte le fait que dans beaucoup de cas la somme instantanée des grandeurs triphasées est nulle ce qui permet d'annuler la composante homopolaire d'indice  $h$ .

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\rho) & \cos(\rho - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\rho + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\rho) & -\sin(\rho - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\rho + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

L'angle  $\rho$  correspond à la position du repère choisi pour la transformation.  
La transformation inverse est donnée par :

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\rho) & -\sin(\rho) \\ \cos(\rho - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\rho - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\rho + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\rho + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

avec  $\rho = \theta_S$  pour le stator ou  $\rho = \theta_R$  pour le rotor, et  $\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$  et  $\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$

**Remarque :** La transformation de Park ( $d, q$ ) peut également être obtenue à partir des composantes de Concordia ( $\alpha, \beta$ ), et en faisant une rotation de l'angle  $\rho$ . Le passage des composantes de Concordia à celles de Park se fait par :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\rho) & \sin(\rho) \\ -\sin(\rho) & \cos(\rho) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

On définit également la transformation inverse :

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\rho) & -\sin(\rho) \\ \sin(\rho) & \cos(\rho) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

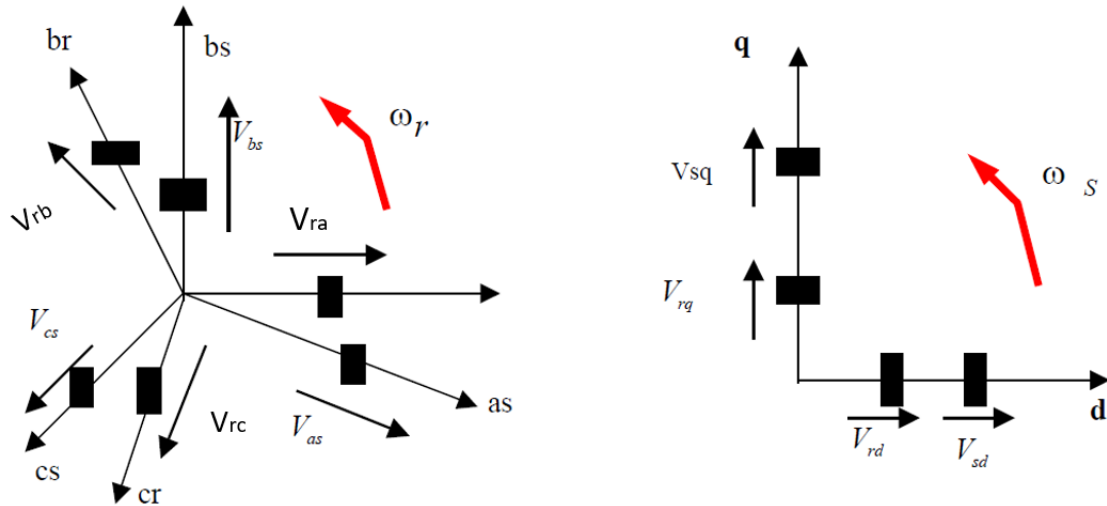


FIGURE 2.5 – Transformée de Park.

### 2.5.6 Choix du référentiel d-q[11]

Il existe trois choix importants concernant l'orientation du repère d'axes (d,q) :

- Repère (d,q) lié au stator :  $\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} = 0$  et  $\omega_r = -\omega$

Ce référentiel est immobile par rapport au stator, utilisé pour l'étude du démarrage et du freinage des machines à courant alternatif avec branchement de résistances.

- Repère (d,q) lié au rotor :  $\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} = \omega$  et  $\omega_r = 0$

Ce référentiel est immobile par rapport au rotor, utilisé pour l'étude des régimes transitoires dans les machines asynchrones et synchrones.

- Repère (d,q) lié au champ tournant :  $\omega_s = \omega_e$  et  $\omega_r = \omega_e - \omega$

Ce dernier est utilisé pour réaliser le contrôle vectoriel du fait que les grandeurs de réglage deviennent continues.

## 2.6 Fonctionnement en V/f[12][13]

Dans ce mode de fonctionnement, la vitesse de rotation du moteur est déterminée par la référence de vitesse, qui fixe la fréquence de sortie de l'onduleur. Cette fréquence, à son tour, est directement liée à la tension d'alimentation. Ce mode de fonctionnement est souvent appelé "fonctionnement à V/f constant" ou "fonctionnement scalaire". En l'absence de toute compensation, la vitesse réelle du moteur varie en fonction de la charge, ce qui restreint sa plage de fonctionnement. Cependant, une compensation sommaire peut être utilisée pour prendre en compte l'impédance interne du moteur et limiter la variation de vitesse sous charge.

Le principe de ce mode est de maintenir le rapport tension/fréquence ( $V/f$ ) constant, ce qui équivaut à maintenir le flux constant. Le contrôle du couple se réalise en agissant sur le glissement ou la différence entre la vitesse de rotation du rotor et la vitesse de synchronisme. Selon le modèle établi en régime permanent, le couple maximum est directement proportionnel au carré du rapport tension/fréquence statorique. En maintenant ce rapport constant et en ajustant la fréquence statorique, on déplace la courbe du couple électromagnétique de la machine asynchrone. En gardant le rapport constant, on maintient également le flux constant. Lorsque la tension atteint sa valeur maximale, on diminue progressivement ce rapport, ce qui entraîne une diminution du couple que

la machine peut produire.

On entre alors dans le régime de "défluxage", qui permet de dépasser la vitesse nominale de la machine, également appelée régime de sur-vitesse.

À basse vitesse, la chute de tension Ohmique dans le stator devient significative. Pour compenser cela, un terme de tension  $V_0$  est ajouté.

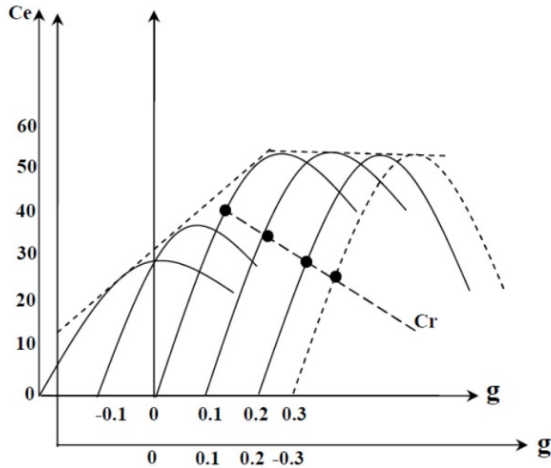


FIGURE 2.6 – Déplacement de la caractéristique du Couple-Glisement en fonction de la fréquence d'alimentation.

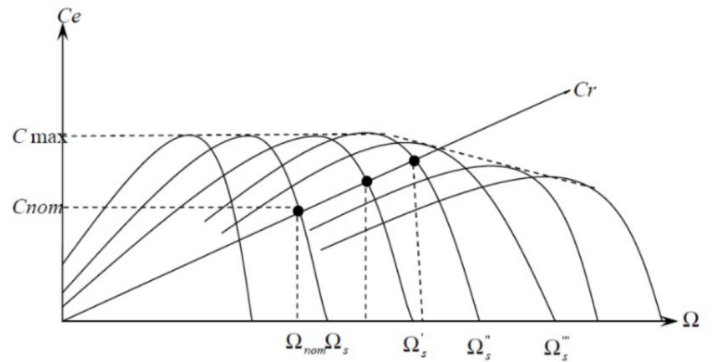


FIGURE 2.7 – Déplacement de la caractéristique du Couple-Vitesse en fonction de la fréquence d'alimentation.

## 2.7 Commande en boucle ouverte de la machine asynchrone

Dans un système de commande simple sans asservissement (boucle ouverte), la vitesse d'un moteur asynchrone est généralement déterminée en imposant une fréquence fixe aux courants dans le stator, représentée par la pulsation  $\omega_s$  tel que  $f = \omega_s/2\pi$ . Cependant, pour permettre un contrôle plus flexible de la vitesse et s'adapter à différentes charges mécaniques, il est possible d'utiliser une alimentation par onduleur qui rend la pulsation  $\omega_s$  des courants au stator réglable. Cela signifie qu'on peut ajuster la fréquence de la tension appliquée au moteur, ce qui influence sa vitesse de rotation.

Tout générateur (triphasé) de pulsation  $\omega_s$  réglable est souhaitable comme source d'alimentation du moteur pour obtenir une commande performante en vitesse, actuellement, le meilleur choix porte sur les onduleurs qu'ils soient de courant ou de tension.

La commande en boucle ouverte par onduleur du moteur asynchrone s'effectue :

- Par la pulsation  $\omega_s$  et la valeur efficace de la tension  $V_s$  phase-neutre du stator dans le cas d'une alimentation par onduleur de tension.
- Par la pulsation  $\omega_s$  et la valeur efficace du courant  $I_s$  du stator dans le cas d'une alimentation par onduleur de courant.

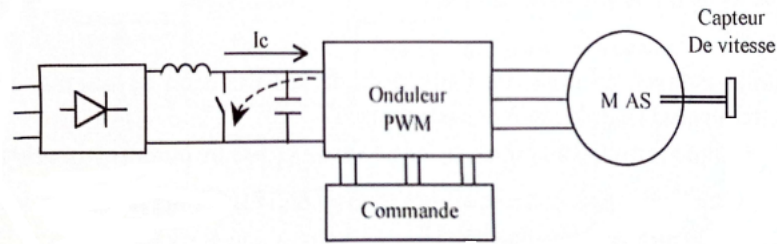


FIGURE 2.8 – Alimentation du moteur asynchrone.

### 2.7.1 Alimentation par onduleur de tension

Le moteur est alimenté au stator par un onduleur de tension à  $V/f$  constant imposé ( $V_s/\omega_s$ ). Le rapport est choisi le plus proche possible du rapport  $V_{sn}/\omega_{sn}$  où  $V_{sn}$  et  $\omega_{sn}$  sont respectivement la tension et la pulsation nominales au stator du moteur. La vitesse obtenue dépend de 3 variables :

- la valeur de la tension  $V_s$ .
- la valeur de la pulsation  $\omega_s$ .
- le couple résistant  $C_r$  de la charge mécanique du moteur.

Cette méthode d'alimentation présente un inconvénient majeur : elle suppose que le flux  $\phi$  statorique reste constant, quelle que soit la charge mécanique et la vitesse du moteur. Cependant, cette supposition devient difficile à maintenir aux basses vitesses, car la résistance du stator entraîne une chute de tension.

Pour surmonter ce problème, on utilise généralement une technique de boost aux basses valeurs de pulsation. Ensuite, on adopte un rapport constant entre  $V_s$  et  $\omega_s$ . Cela permet d'améliorer la commande en compensant la chute de tension due à la résistance du stator.

Malgré cette amélioration de la commande, le démarrage en charge du moteur reste difficile.

### 2.7.2 Alimentation par onduleur de courant

Dans ce cas, le moteur est alimenté au stator par un courant  $I_s$  constant, la valeur choisie généralement est la plus proche du courant nominal au stator du moteur  $I_{sn}$ .

Dans cette approche de commande en boucle ouverte, on ajuste la pulsation  $\omega_s$  en fonction de la vitesse désirée du moteur. La vitesse réelle du moteur dépend de trois facteurs : le courant statorique  $I_s$ , la pulsation  $\omega_s$  et le couple résistant  $C_r$  :  $\Omega = f(I_s, \omega_s, C_r)$ . Ainsi, dans ce mode de fonctionnement, le réglage de la vitesse dépend principalement de la valeur du couple résistant  $C_r$ .

Comparée à la méthode précédente, cette approche semble plus intéressante car le couple électromagnétique  $C_e$  n'est pas influencé par la résistance  $R_S$  du stator. Cependant, malgré ces avantages, le réglage de la vitesse en boucle ouverte n'est pas très flexible.

## 2.8 Commande en boucle fermée de la machine asynchrone

### 2.8.1 Commande scalaire

C'est la méthode classique de contrôle, largement utilisée dans de nombreux variateurs, elle convient à de nombreuses applications comme la ventilation ou la climatisation, où il n'est pas nécessaire d'avoir une forte puissance à basse vitesse ou une réponse rapide.

Cependant, elle n'est pas adaptée aux applications nécessitant un positionnement précis.

Pour contrôler la vitesse et le couple, il est nécessaire de contrôler son flux magnétique, en utilisant ces deux approches :

- Le contrôle indirect : on ajuste la tension ou le courant en fonction de la fréquence, basé sur des règles établies en régime permanent.
- Le contrôle direct : plus complexe, il implique de réguler directement le flux magnétique, ce qui nécessite de le mesurer ou de l'estimer. Cette méthode offre un meilleur contrôle pendant les changements rapides de régime.

Une fois que le flux est fixé, on peut ajuster la vitesse et le couple en agissant sur la fréquence des courants dans le rotor de la machine asynchrone.

### 2.8.1.1 Contrôle du flux magnétique

#### Contrôle indirect :

On utilise les relations liant la tension ou le courant aux fréquences statoriques et rotoriques :  $V_s = F(\phi_s, \omega_s, \omega_r)$  et  $I_s = G(\phi_s, \omega_r)$  pour un démarrage ou une inversion de sens de rotation de la machine, le flux oscille avec des amplitudes importantes et son module n'est pas maintenu constant durant les régimes transitoires de grande amplitude (figure 2.9).

Ceci est logique puisque les relations ne sont valables qu'en régime permanent. Ces oscillations se répercutent sur le couple et la vitesse et dégradent les performances dynamiques de la machine.

Pour certain processus, ce contrôle, par ailleurs très simple, est suffisant : le pompage ou la ventilation industriels ou la plage de vitesse est très limitée et des performances élevées peu nécessaires, en particulier à basses vitesses.

#### Contrôle direct :

Pour améliorer les performances, on régule le flux pour l'imposer aussi en régime transitoire et obtenir ainsi un comportement beaucoup plus acceptable. Excepté pour certaines machines asynchrones de très grande puissance et sur certain bancs d'essai.

On dispose pas de capteurs de flux. On doit donc estimer le flux et plusieurs solutions existent (figure 2.10). Une des plus simples consiste a mesurer deux courants et deux tensions statoriques de la machine.

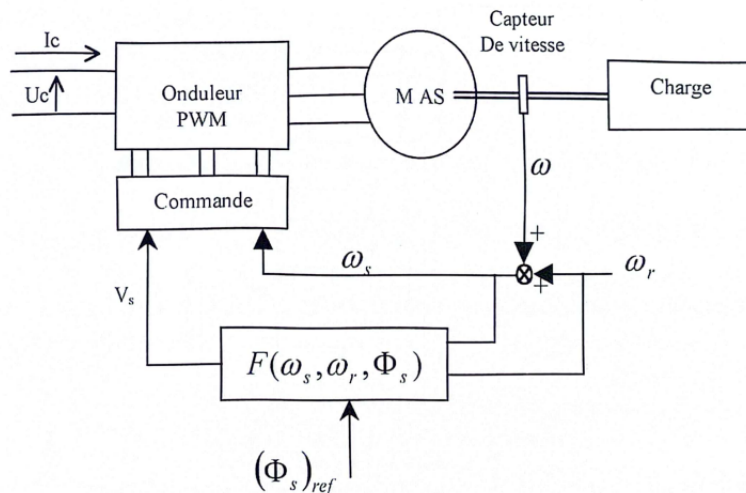


FIGURE 2.9 – Commande scalaire avec contrôle indirect du flux.

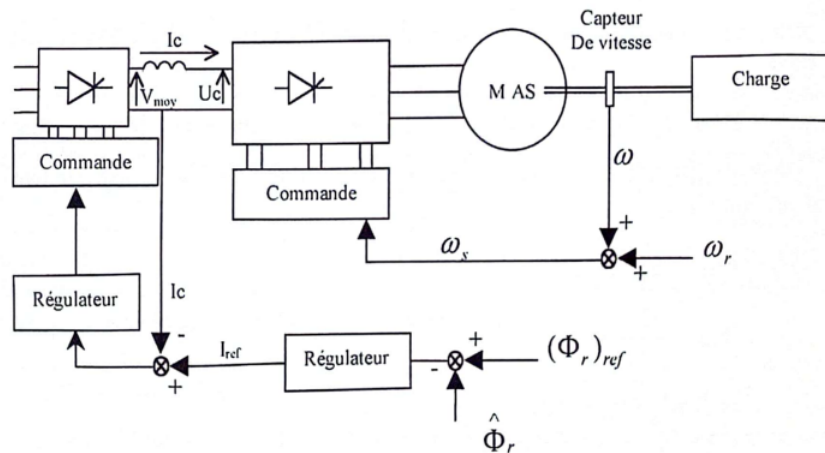


FIGURE 2.10 – Commande scalaire avec contrôle direct du flux.

## 2.9 La simulation de la MAS

Dans cette partie nous allons faire des simulations. Nous commençons par la manipulation de la transformée de Park qui permet de simplifier les équations complexes du moteur asynchrone. Ensuite, nous allons modéliser le moteur asynchrone qui est la partie essentielle de notre étude. Par ailleurs, l'alimentation du moteur par l'onduleur dont nous avons montré ses entrées et ses tensions de sortie qui permettent d'alimenter le moteur ont été présentées. Enfin, nous mettons en œuvre la commande scalaire en se basant sur la stratégie de contrôle en tenant compte d'un rapport constant entre la tension et la fréquence appliquée au moteur. Les paramètres utilisés dans les différentes simulation sont cités dans la partie 2.10.2.

### 2.9.1 Simulation de la transformée de Park

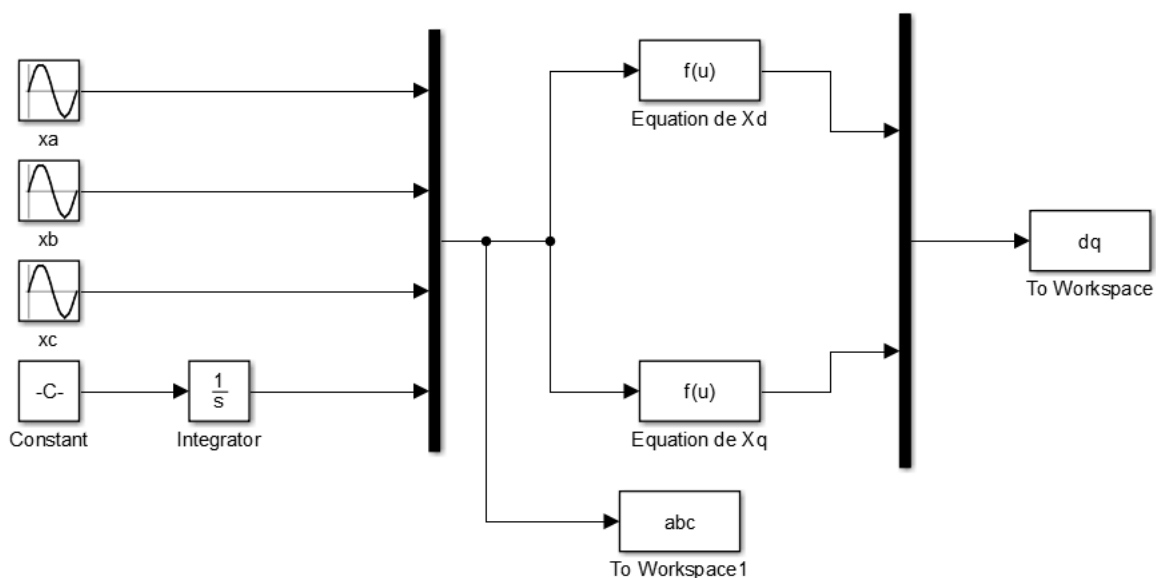


FIGURE 2.11 – Schéma de simulation de la transformée de Park.

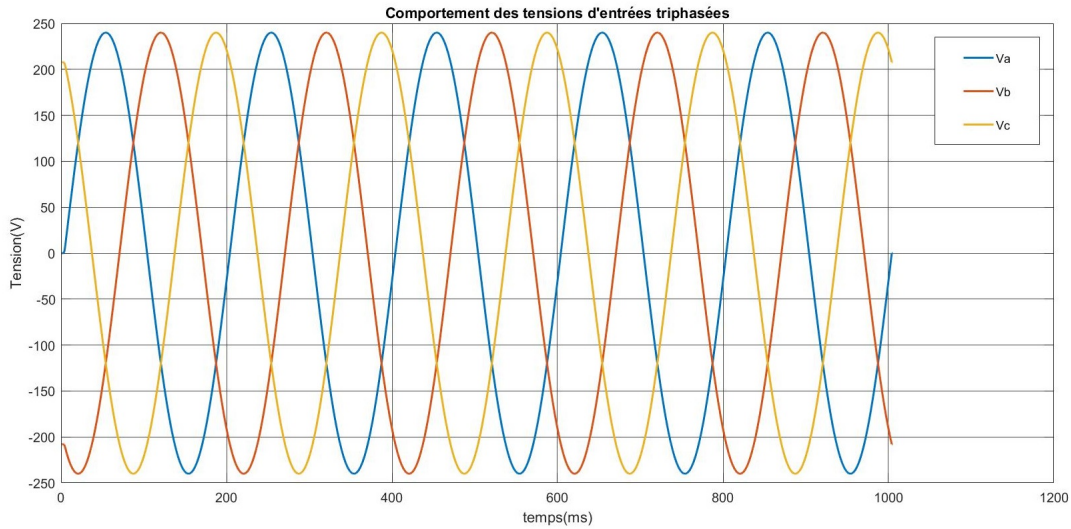


FIGURE 2.12 – Comportement des tensions d'entrées triphasées.

D'après la figure 2.12 et 2.13, nous pouvons dire que la transformée de Park est une étape préliminaire qui vise à adapter les signaux électriques pour simplifier l'analyse et le contrôle des systèmes AC en les convertissant en un système DC équivalent. Elle permet de convertir les tensions triphasées ( $V_a, V_b, V_c$ ) en tensions diphasées ( $V_d, V_q$ ) dans un référentiel tournant.

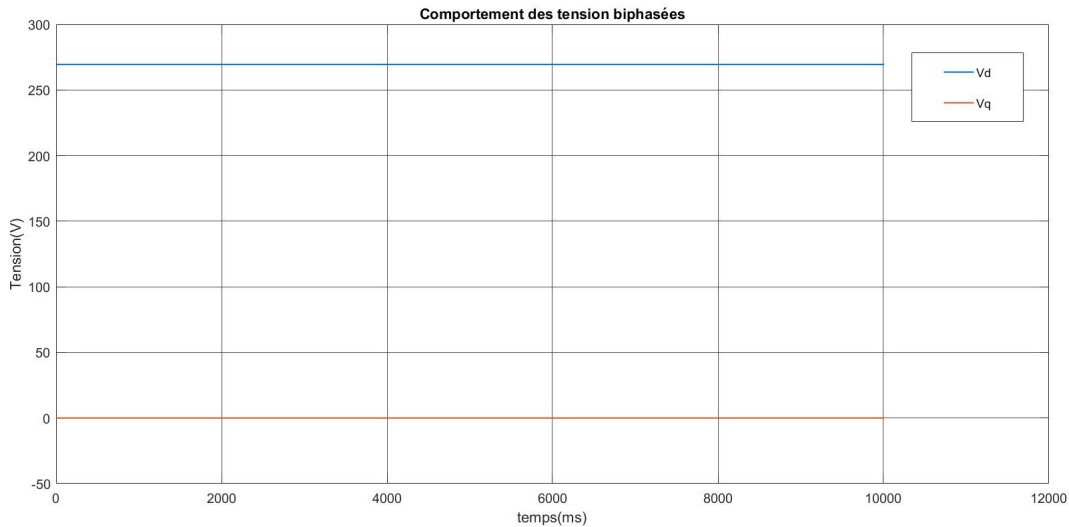


FIGURE 2.13 – Comportement des tensions d'entrées biphasées.

### 2.9.2 Simulation de la machine asynchrone en boucle ouverte

Selon les figures "2.15", "2.16", "2.17", "2.18" nous pouvons conclure qu'il existe deux régimes, l'un est transitoire, qui est une phase d'ajustement où la machine s'adapte aux nouvelles conditions et cherche à atteindre un nouvel équilibre. Nous remarquons dans cette phase que le courant et le couple subissent des variations significatives durant le démarrage en réponse à des changements dans les conditions de fonctionnement.

Un autre régime dit permanent, où les valeurs du couple et de vitesse se stabilisent sur des valeurs constante. Par ailleurs, le couple tend vers zéro car le moteur est à vide.

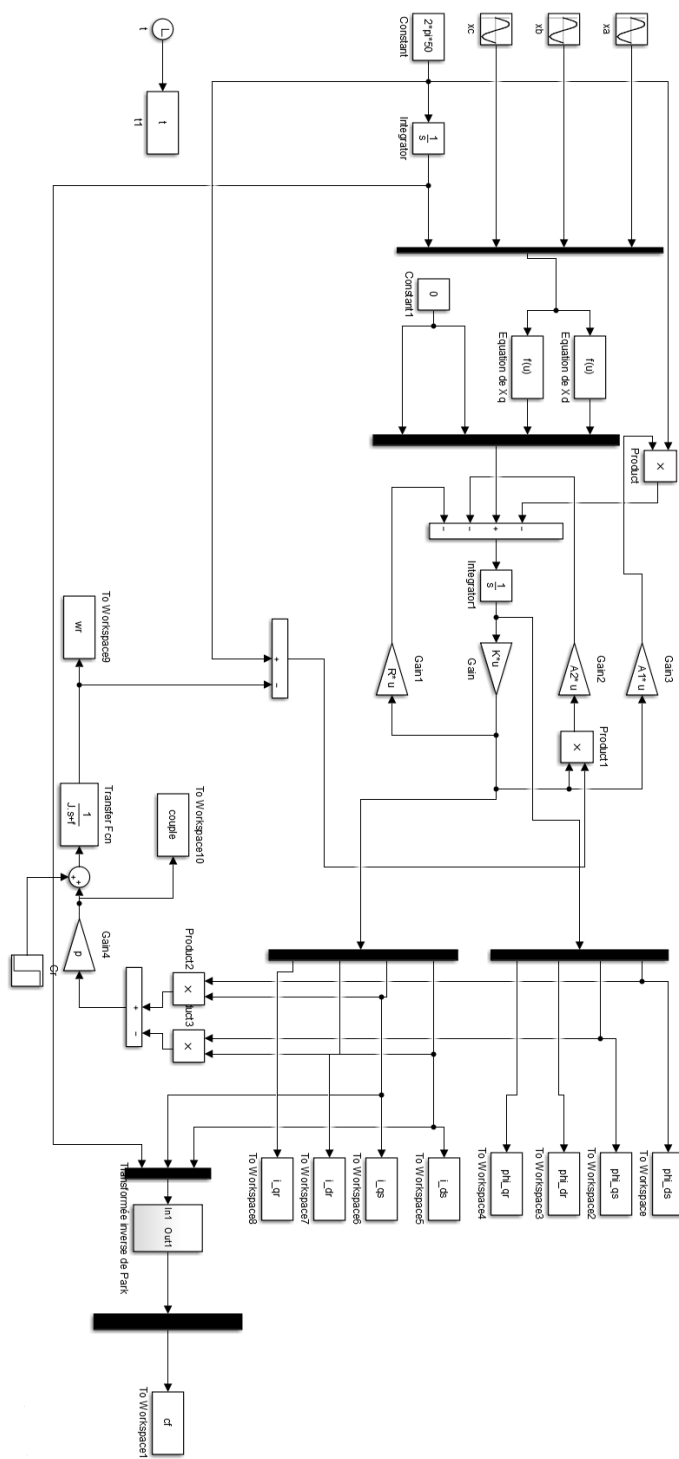


FIGURE 2.14 – Schéma de simulation de la machine asynchrone.

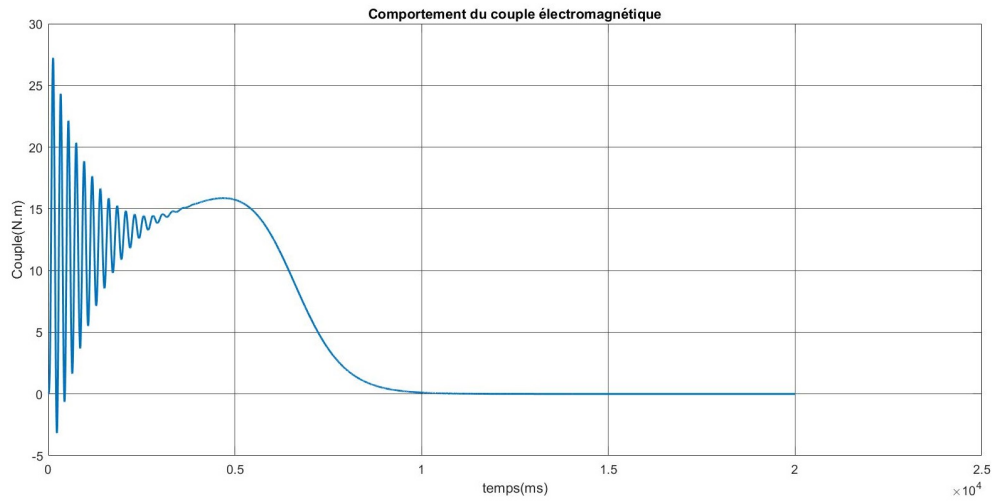


FIGURE 2.15 – Comportement du couple électromagnétique.

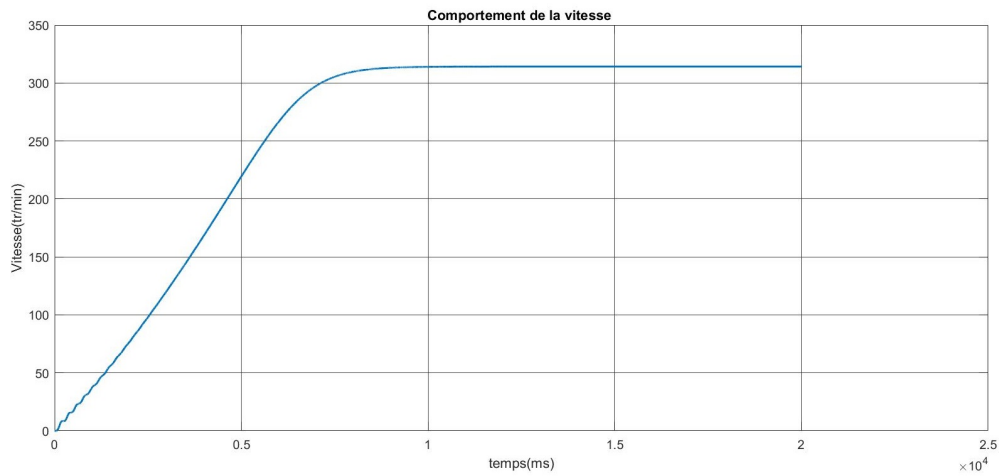


FIGURE 2.16 – Comportement de la vitesse.

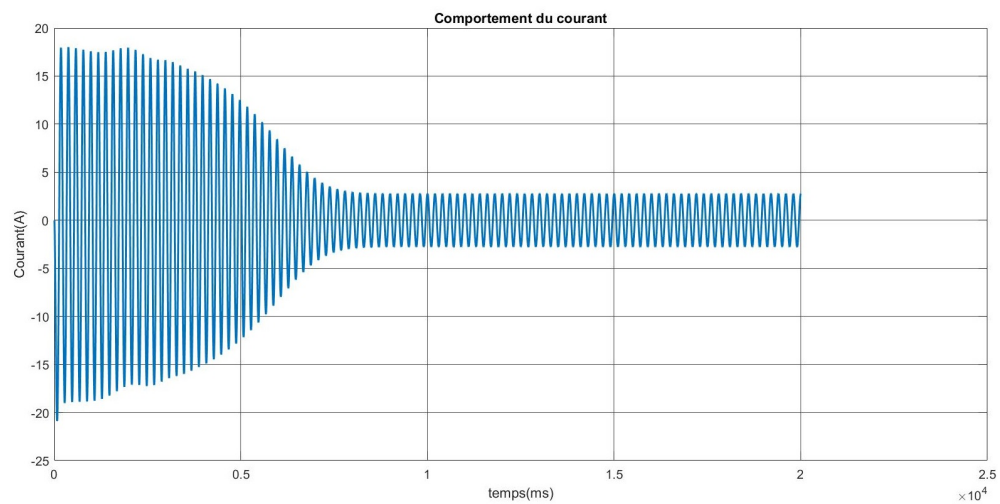


FIGURE 2.17 – Comportement du courant statorique.

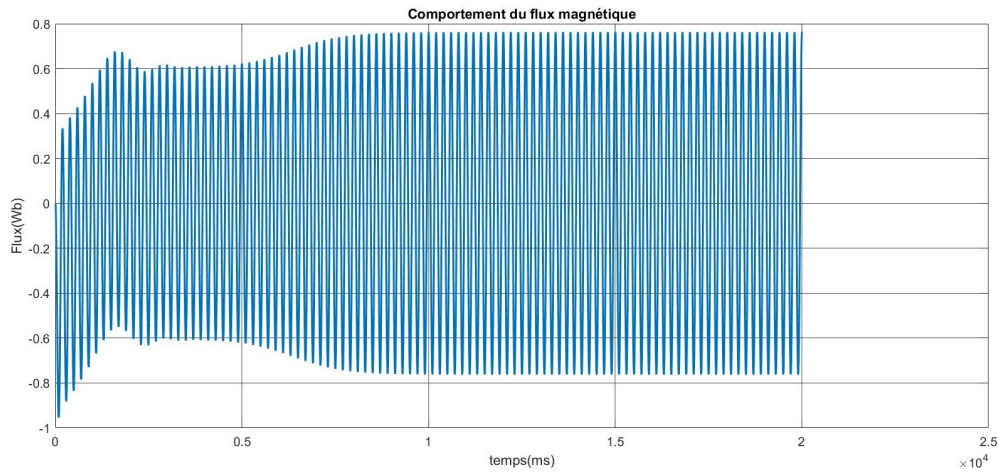


FIGURE 2.18 – Comportement du flux statorique.

## 2.10 Simulation de l'onduleur

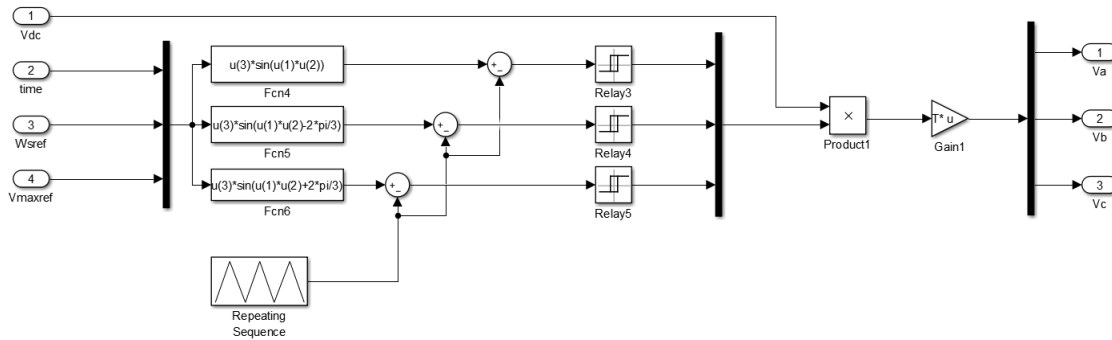


FIGURE 2.19 – Schéma de simulation de l'onduleur.

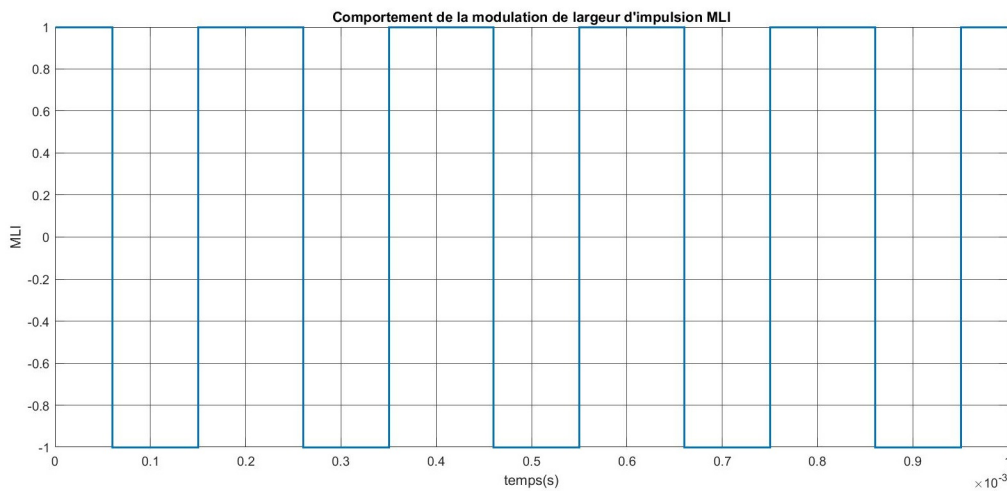


FIGURE 2.20 – Comportement de la modulation de largeur d'impulsion MLI.

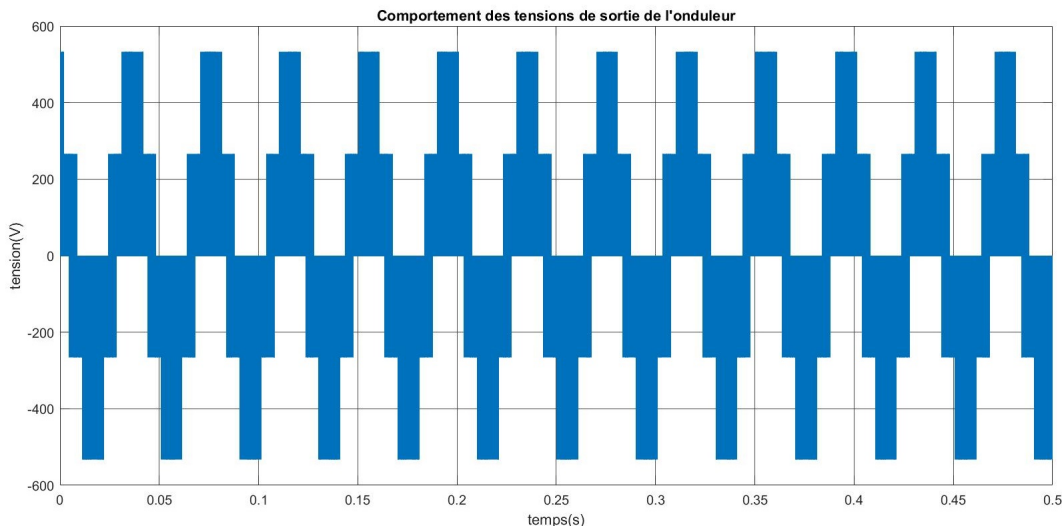


FIGURE 2.21 – Comportement des tensions de sortie de l'onduleur.

Selon les figures 2.20 et 2.21, nous avons généré des tensions MLI qui permettent d'alimenter le moteur asynchrone. Grâce à cette modulation, nous pouvons contrôler précisément la vitesse et le couple du moteur, tout en produisant un champ magnétique tournant nécessaire à son fonctionnement efficace.

### 2.10.1 Simulation de la commande scalaire

Nous allons simuler le moteur asynchrone sous la commande scalaire avec des changements de consignes (vitesse) et avec application d'une perturbation (couple résistant). Une conclusion a été tirée en analysant sa réponse et sa capacité à maintenir la vitesse autour de la consigne.

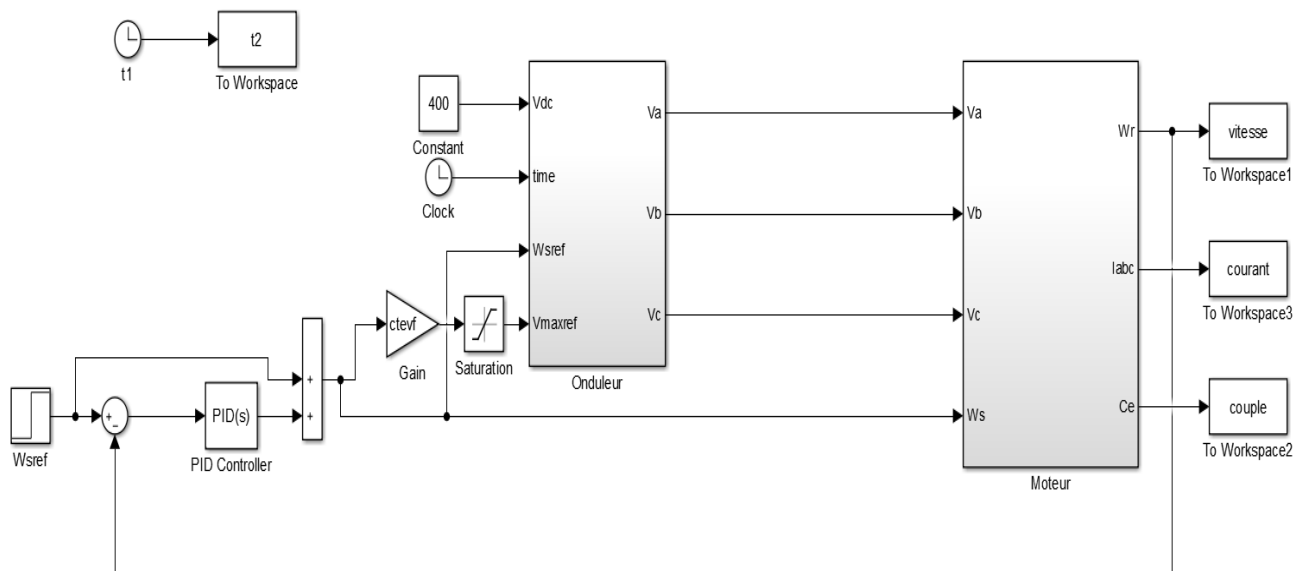


FIGURE 2.22 – Schéma de simulation de la commande scalaire.

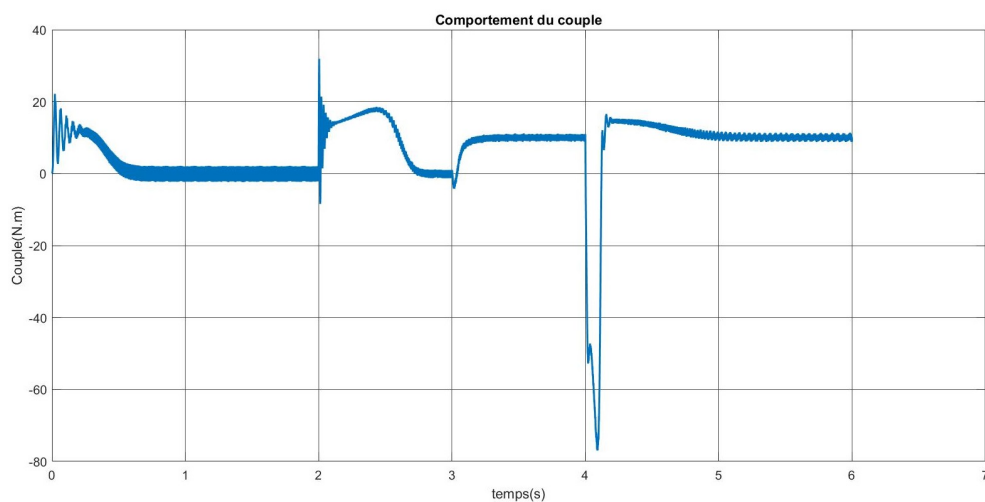


FIGURE 2.23 – Comportement du couple électromagnétique.

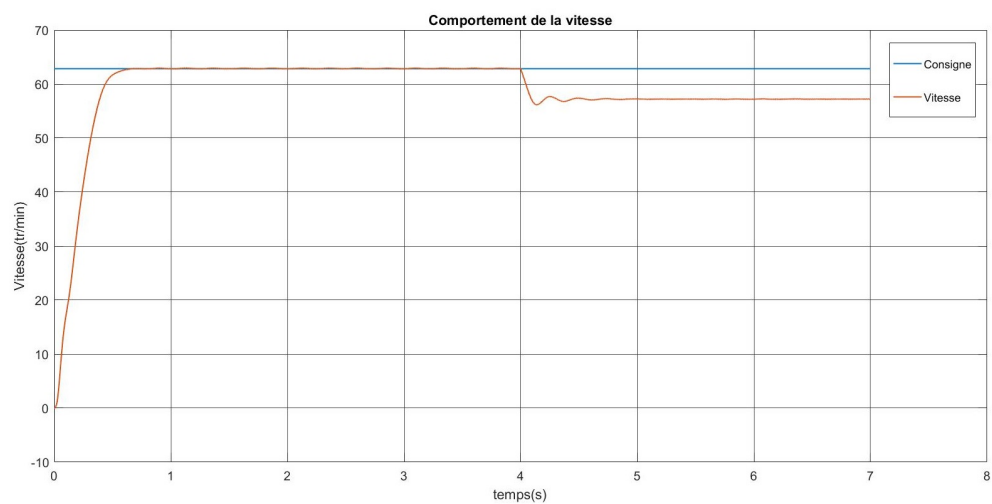


FIGURE 2.24 – Comportement de la vitesse.

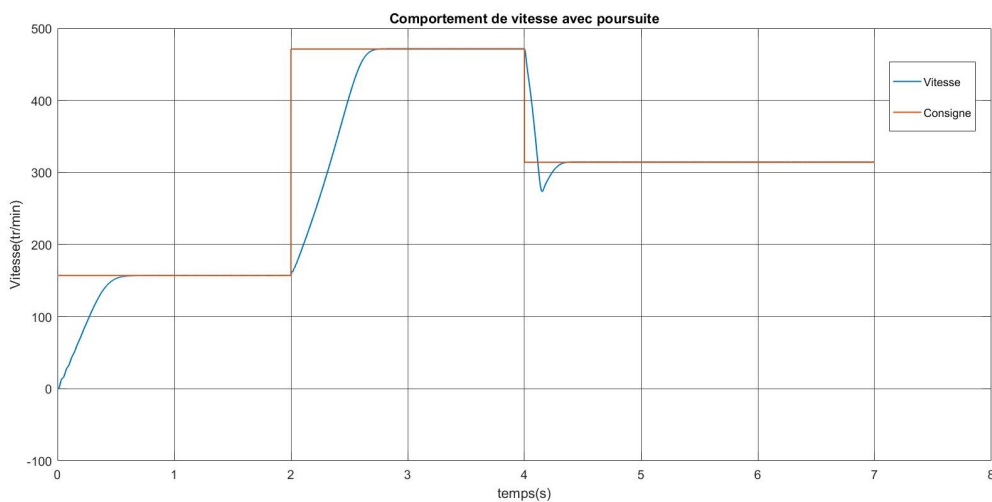


FIGURE 2.25 – Comportement de la vitesse avec différentes consignes.

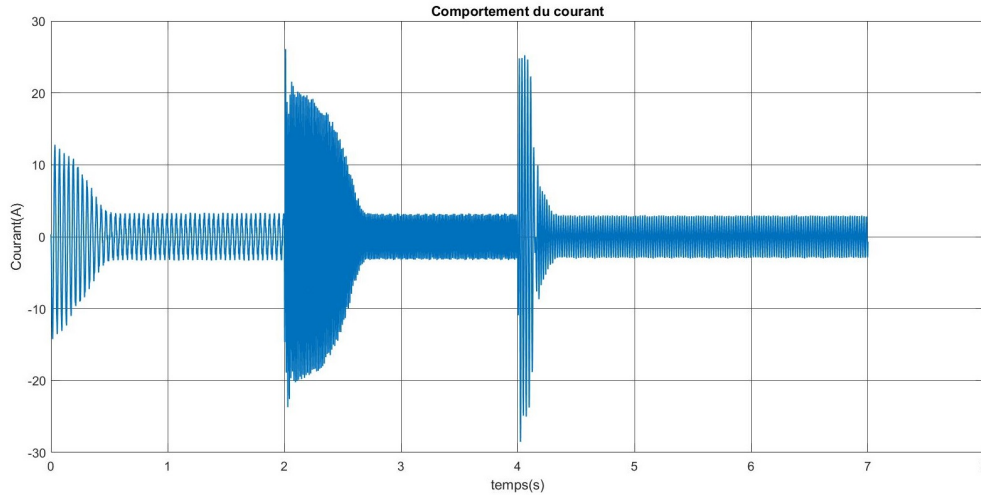


FIGURE 2.26 – Comportement du courant statorique.

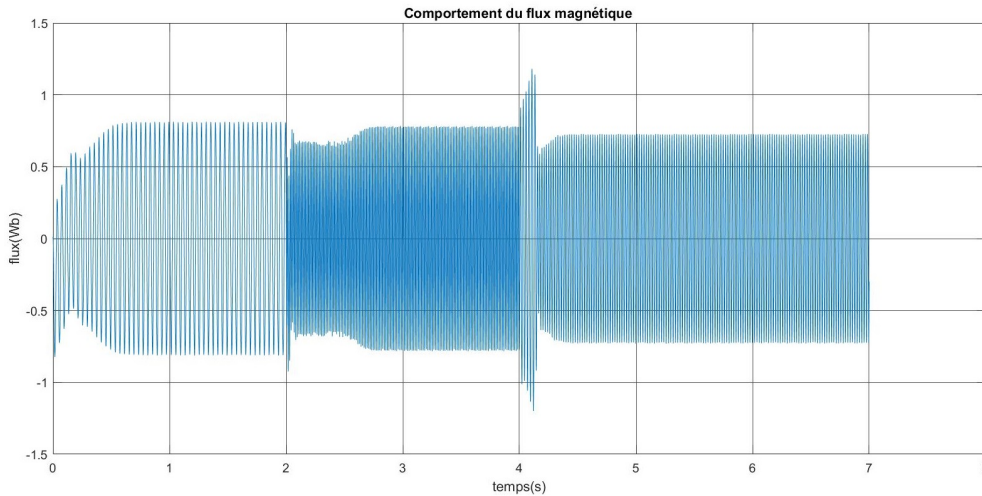


FIGURE 2.27 – Comportement du flux magnétique.

Nous avons évalué la réaction d’une machine asynchrone sous commande scalaire. Lors des changements de consigne de vitesse, la machine présente des oscillations transitoires avant de se stabiliser à la nouvelle consigne, démontrant l’adaptation de la fréquence et de la tension pour maintenir un flux constant.

Lorsque le couple résistant est appliqué, le couple électromagnétique augmente pour que la vitesse reste proche de la consigne. Cela montre que la commande scalaire ajuste efficacement le couple pour maintenir la performance de la machine malgré les variations de charge.

En conclusion, la simulation démontre que la commande scalaire est capable de suivre des consignes de vitesse variables et de maintenir la vitesse de la machine asynchrone malgré l’application d’un couple résistant. Les ajustements du couple électromagnétique montrent que la commande scalaire compense efficacement les charges mécaniques, garantissant ainsi une performance stable.

### 2.10.2 Les paramètres utilisés dans les différentes simulations

$$R_r = 3,805 \Omega$$

$$J = 0,031 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$p = 2$$

$$R_s = 4,85 \ \Omega$$

$$M = 0,258$$

$$L_s = 0,274 \text{ H}$$

$$L_r = 0,274 \text{ H}$$

$$R = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & -L_s & 0 & -M \\ L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -M & 0 & -L_r \\ M & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix}$$

$$f_{pr} = 5000 \text{ Hz}$$

$$c_{tevf} = \frac{240}{50 \cdot 2\pi} \text{ V} \cdot \text{s}$$

## 2.11 Conclusion

Ce chapitre permis une exploration approfondie de la machine asynchrone, depuis sa construction et son principe de fonctionnement jusqu'à sa modélisation détaillée à l'aide des équations fondamentales. Nous avons débuté par une description de la machine, mettant en évidence ses composants clés et leur rôle dans la conversion d'énergie électrique. Nous avons ensuite examiné le fonctionnement en V/f ainsi que le mode de fonctionnement en boucle ouverte, illustrant comment ces approches permettent de contrôler la vitesse de la machine.

Par la suite, nous avons introduit la commande scalaire en se concentrant sur le contrôle du flux magnétique, une technique avancée qui offre des avantages significatifs en termes de performances et d'efficacité énergétique. En contrôlant le flux, la commande scalaire permet une régulation précise du couple et de la vitesse, même dans des conditions de charge variable.

Enfin, nous avons complété notre étude par la simulation des modèles de Park de la machine asynchrone et de la commande scalaire, démontrant ainsi l'application pratique des concepts théoriques discutés. Ces simulations ont permis de valider nos analyses théoriques.

En somme, ce chapitre a présenté un aperçu complet et structuré de la machine asynchrone, de la théorie à la pratique, en explorant des techniques de contrôle avancées qui sont cruciales pour l'amélioration continue des systèmes électriques et industriels modernes.

# Chapitre 3

## Le variateur de vitesse HITACHI X200

### 3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous explorons les variateurs de vitesse qui sont des dispositifs essentiels dans le contrôle et la régulation de vitesse des moteurs électriques. Nous commençons par une présentation générale des variateurs de vitesse, leurs structures, leurs principales fonctionnalités, qu'ils peuvent adopter.

Par ailleurs, nous nous focalisons sur le variateur de vitesse Hitachi X200 utilisé dans notre application. Pour cela, quelques configurations de ce variateur ont été présentés.

Enfin, nous concluons ce chapitre par une description des différentes fonctions intégrées dans le variateur Hitachi Omron, démontrant ainsi sa polyvalence et son utilité dans diverses applications industrielles.

### 3.2 Introduction aux variateurs de vitesse[12]

#### 3.2.1 Définition d'un variateur de vitesse

Un variateur ou un démarreur électronique est un convertisseur d'énergie dont le rôle consiste à moduler l'énergie électrique fournie au moteur. Les variateurs de vitesse assurent une accélération et une décélération progressives des moteurs. Ils permettent aussi une adaptation précise de la vitesse aux conditions d'exploitation.

Il agit sur deux paramètres :

- **La fréquence du courant alternatif** : En variant la fréquence du variateur, elle influence directement la vitesse du moteur.
- **La tension du courant alternatif** : La tension du variateur est ajusté pour pouvoir maintenir le couple du moteur constant.

#### 3.2.2 Structure d'un variateur de vitesse

Il est composé de deux modules :

- Un module de contrôle qui gère le fonctionnement de l'appareil.
- Un module de puissance utiliser pour fournir le moteur de l'énergie électrique.

##### 3.2.2.1 Le module de contrôle

Sur les nouveaux variateurs, toutes les fonctions sont commandées par un microprocesseur qui exploite les réglages, les ordres transmis par un opérateur ou par une unité de traitement et les résultats de mesures comme la vitesse, le courant, etc.

Les réglages (limites de vitesse, rampes, limitation de courant, etc) se font soit par claviers

intégrés, soit à partir d'automates par des bus de terrain ou de PC. De même, les différents ordres (marche, arrêt, freinage, etc) peuvent être donnés à partir d'interfaces de dialogue homme / machine, par des automates programmables ou par des PC.

### 3.2.2.2 Le module de puissance

Le module de puissance est principalement constitué de :

- Composants de puissance (diodes, thyristors, IGBT, etc).
- Interfaces de mesure des tensions et/ou des courants.
- Fréquemment d'un ensemble de ventilation.

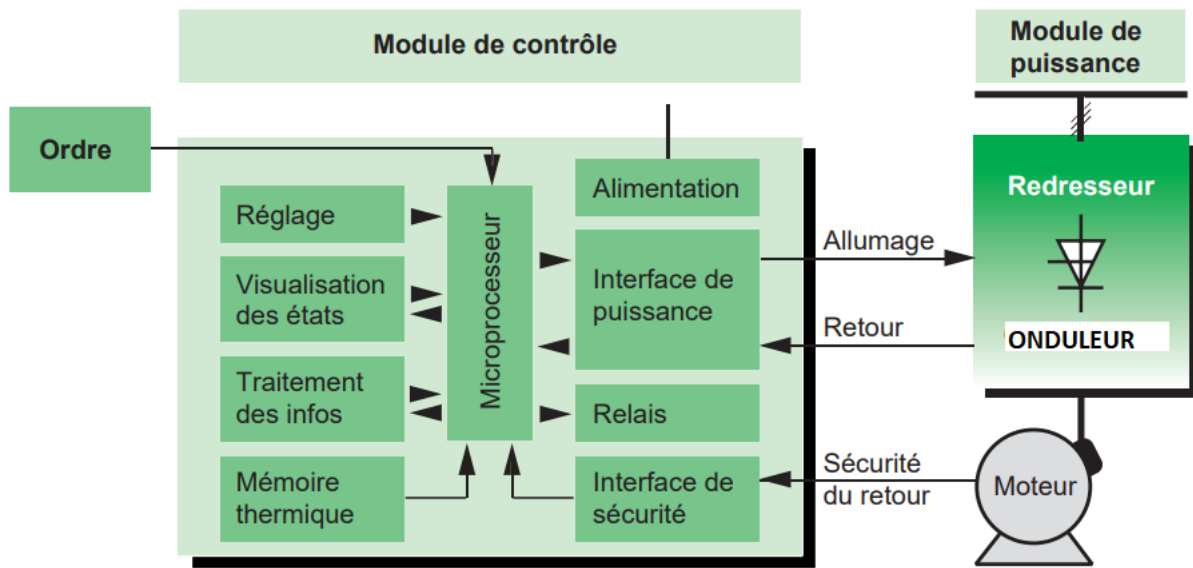


FIGURE 3.1 – Structure d'un variateur de vitesse.

### 3.2.3 Les principales fonctions des variateurs de vitesse électroniques

Les variateurs de vitesse assurent plusieurs fonctions, on cite parmi eux :

- **Accélération contrôlée.**
- **Variation de vitesse.**
- **Régulation de vitesse.**
- **Décélération contrôlée.**
- **Inversion du sens de marche.**
- **Freinage d'arrêt.**
- **Protections intégrées.**

### 3.2.4 Les principaux modes de fonctionnement

Les variateurs de vitesse peuvent, selon le convertisseur électronique, soit faire fonctionner un moteur dans un seul sens de rotation, ils sont alors dits « unidirectionnels », soit commander les deux sens de rotation, ils sont alors dits « bidirectionnels ».

#### 3.2.4.1 Fonctionnement à couple variable

Le fonctionnement est dit à couple variable quand le variateur module le couple tout dépend de la charge appliquée et de la vitesse de rotation du moteur. Un variateur destiné à ce type d'application, un couple de démarrage plus faible (en général 1,2 fois le couple nominal du moteur) est suffisant.

### 3.2.4.2 Fonctionnement à couple constant

Le fonctionnement est dit à couple constant quand les caractéristiques de la charge sont telles qu'en régime établi. Le variateur ajuste à la fois la fréquence et la tension du courant alternatif pour maintenir le couple du moteur constant.

Pour ce type d'applications le variateur doit avoir la capacité de fournir un couple de démarrage important (1,5 fois ou plus le couple nominal) pour vaincre les frottements statiques et pour accélérer la machine.

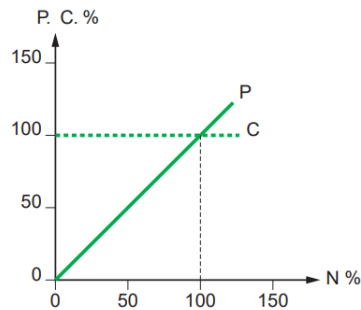


FIGURE 3.2 – Courbe de fonctionnement à couple constant.

### 3.2.4.3 Fonctionnement à puissance constante

Le fonctionnement est dit à puissance constante quand le moteur fournit un couple inversement proportionnel à la vitesse angulaire. Ce type de fonctionnement repose sur le principe de maintien d'une puissance mécanique constante délivrée par le moteur, quelle que soit sa vitesse de rotation.

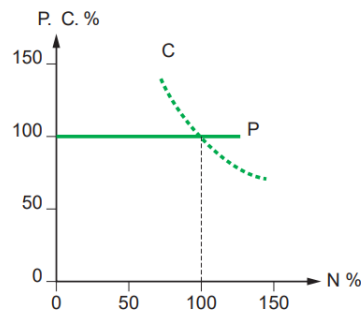


FIGURE 3.3 – Courbe de fonctionnement à puissance constante.

## 3.2.5 Les principaux types de variateur

### Redresseur contrôlé moteur à courant continu

Il fournit, à partir d'un réseau alternatif monophasé ou triphasé, un courant continu avec un contrôle de la valeur moyenne de la tension.

### Gradateur de tension pour le démarrage des moteurs asynchrones

Il fournit, à partir d'un réseau alternatif, un courant alternatif de fréquence fixe égale à celle du réseau avec un contrôle de la valeur efficace de la tension.

### Convertisseur de fréquence pour moteur asynchrone

Il fournit, à partir d'un réseau alternatif à fréquence fixe, une tension alternative triphasée

de valeur efficace et de fréquence variable. L'alimentation du variateur pourra être monophasée pour les faibles puissances et triphasée au-delà.

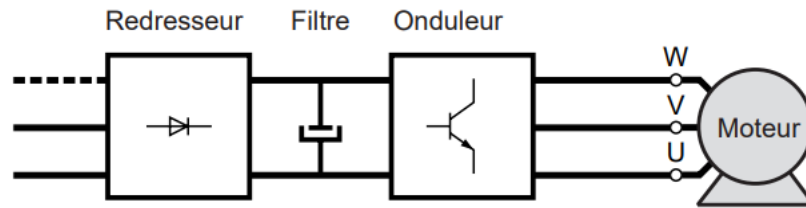


FIGURE 3.4 – Schéma de principe d'un convertisseur de fréquence.

### 3.3 Caractéristiques et installation du variateur HITACHI X200

#### 3.3.1 Circuit de commande

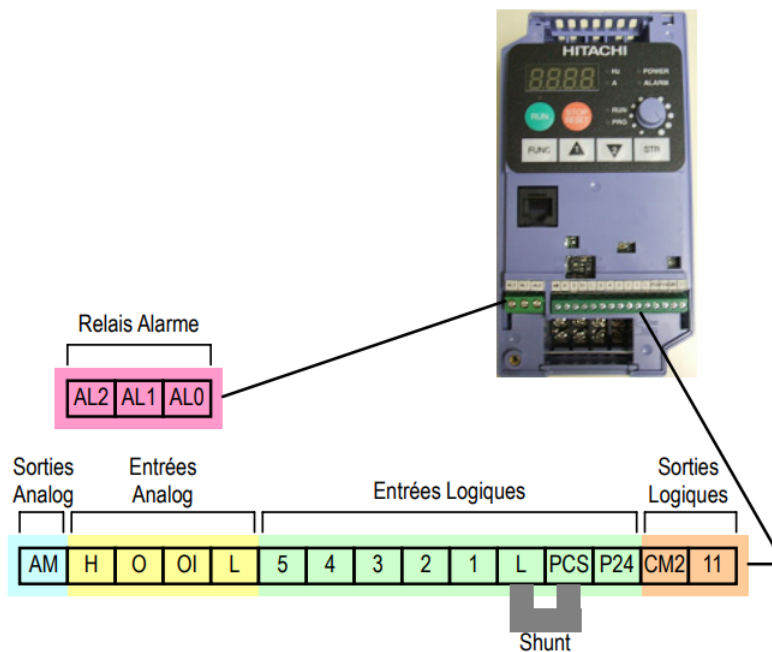


FIGURE 3.5 – Circuit de commande.

TABLE 3.1 – Description des bornes du circuit de commande.

Borne	Description	Valeurs nominales
P24	+24V pour les entrées logiques	Alimentation 24 VCC, 30 mA maxi.
1,2,3,4,5	Entrées logiques discrètes intelligentes (programmables)	27 VCC maxi avec impédance d'entrée de 4.7 k
11	Sorties logiques discrètes (Programmables)	Courant d'activation de 50 mA maxi, tension de désactivation de 27 VCC maxi.

L(droite)	Masse (GND) des entrées logiques	Somme des courants des entrées 1 à 5
CM2	Masse (GND) des sorties logiques	50 mA max pour le courant de la borne 11
AM	Sortie de tension analogique	0 à 10 VCC, 1mA maxi.
L(gauche)	Masse (GND) des signaux analogiques	Somme des courants OI, O, H
OI	Courant d'entrée analogique	Plage de 4 à 19,6 mA, 20 mA nominal
O	Tension d'entrée analogique	Plage de 0 à 9,6 VCC, 10 VCC nominal, 12 VCC max.
H	Référence analogique de +10V	10 VCC nominal, 10 mA maxi.
AL0	Contact commun de relais	Calibrage des contacts charge résistive maxi = 250 VAC, 2,5A ; 30 VCC 3A ; Charge inductive maxi = 250 VAC, 0,2 A ; 30 VCC, 0,7 A Charge minimale = 5 VCC 100 mA, 100 VAC
AL1	Contact de relais normalement fermé dans le mode RUN	
AL2	Contact de relais normalement ouvert dans le mode RUN	

### 3.3.2 Utilisation du clavier de commande

Le clavier de commande du variateur de fréquence X200 comporte tous les éléments nécessaire au contrôle et à la programmation des paramètres. L'agencement du clavier est illustré ci dessous.

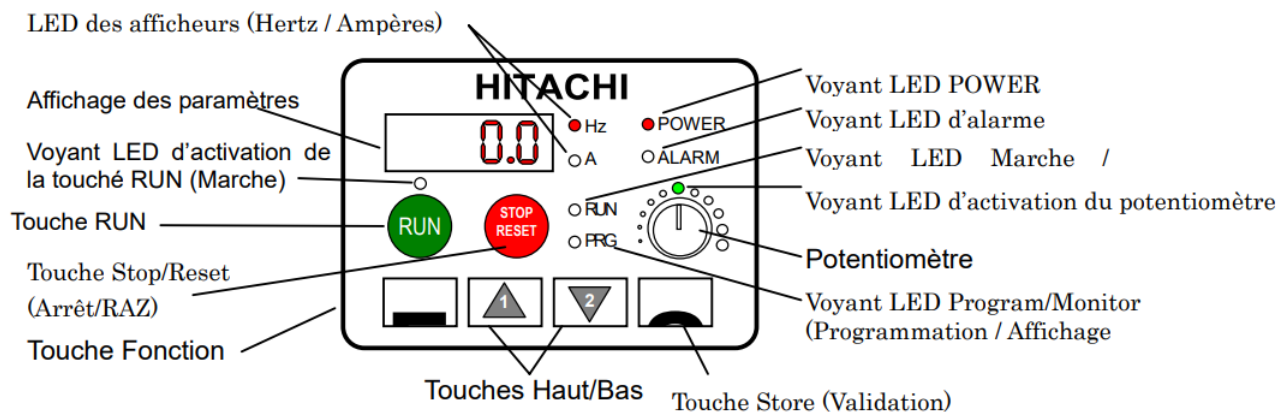


FIGURE 3.6 – Clavier de commande.

### 3.3.3 Caractéristiques du variateur HITACHI X200

TABLE 3.2 – Caractéristiques spécifiques aux variateur HITACHI X200 015SFEF.

Élément	Caractéristique
Taille du moteur applicable	1,5 kW
Puissance nominale(kVA)	2,8
Tension d'entrée nominale	Triphasé : 200V-15% à 240V $\pm$ 10%, 50/60Hz $\pm$ 5%.
Courant d'entrée nominal (A)	9,3
Tension de sortie nominale (V)	200 à 240 V (proportionnel à la tension d'entrée).
Courant de sortie nominal (A)	7,1
Couple de démarrage	100% à 6Hz

TABLE 3.3 – Caractéristiques générales du variateur X200.

Élément	Caractéristique
Méthode de contrôle	Commande de modulation de Largeur d'impulsion sinusoïdale (PWM).
Fréquence Porteuse	De 2kHz à 14 kHz (réglage par défaut : 3kHz).
Gamme de fréquence de sortie	De 0.5 à 400 Hz.
Précision de la fréquence	Commande numérique : 0.01% de la fréquence maximale Commande analogique : 0.4% de la fréquence maximale.
Résolution de réglage de la fréquence	Numérique : 0.1Hz ; analogique : fréquence maxi/1000.
Caractéristique de tension/fréquence	V/f variable en option, commande V/f (couple constant, couple réduit)
Capacité de surcharge	150% du courant nominal pendant 1min.
Temps d'accélération/décélération	De 0.01 à 3000s, courbe d'accélération et décélération linéaire sinusoïdale.
Réglage de fréquence par panneau de commande	Touches Haut/Bas/Réglages des valeurs.
Réglage de la fréquence par potentiomètre	Réglage analogique.
Réglage de fréquence par signal extérieur	De 0 à 10 VCC, 4 à 20 mA, Potentiomètre.
Entrées intelligentes programmables	( <b>FW</b> ) Marche avant, ( <b>RV</b> ) Marche arrière, ( <b>CF1-CF4</b> ) Vitesses préprogrammées (binaire et point par point), ( <b>DB</b> ) Freinage DC extérieur, ( <b>PID</b> ) PID on/off.
Sortie intelligentes programmables	<b>RUN</b> (signal d'état de marche), <b>FA1,2</b> signal d'arrivée de fréquence), <b>OL</b> (signal d'avertissement de surcharge), <b>AL</b> (signal d'alarme), <b>Dc</b> (détection de déconnexion d'entrée analogique)

### 3.3.4 Raccordement avec l'API[14]

Les variateurs Hitachi sont utiles dans de nombreuses applications. Pendant l'installation, le clavier du variateur (ou tout autre équipement de programmation) facilitera la configuration initiale. Après l'installation, le variateur recevra généralement ses ordres de commande via le connecteur de commande ou une interface série reliée à un autre périphérique de commande. Dans une application simple telle que la régulation de vitesse d'un tapis roulant, un inverseur Run/Stop (Marche/Arrêt) et un potentiomètre constitueront toutes les commandes dont l'opérateur a besoin. Dans une application sophistiquée, on disposera d'un automate programmable comme contrôleur du système doté de plusieurs raccordements avec le variateur.

Les raccordements entre le variateur et les autres équipements reposent sur les caractéristiques des entrées/sorties électriques aux deux extrémités de chaque liaison ainsi que le montre le schéma au dessous. Les entrées configurables du variateur acceptent une entrée de logique positive ou négative provenant d'un équipement extérieur (un automate).

### 3.3.5 Montage et installation du variateur avec le moteur

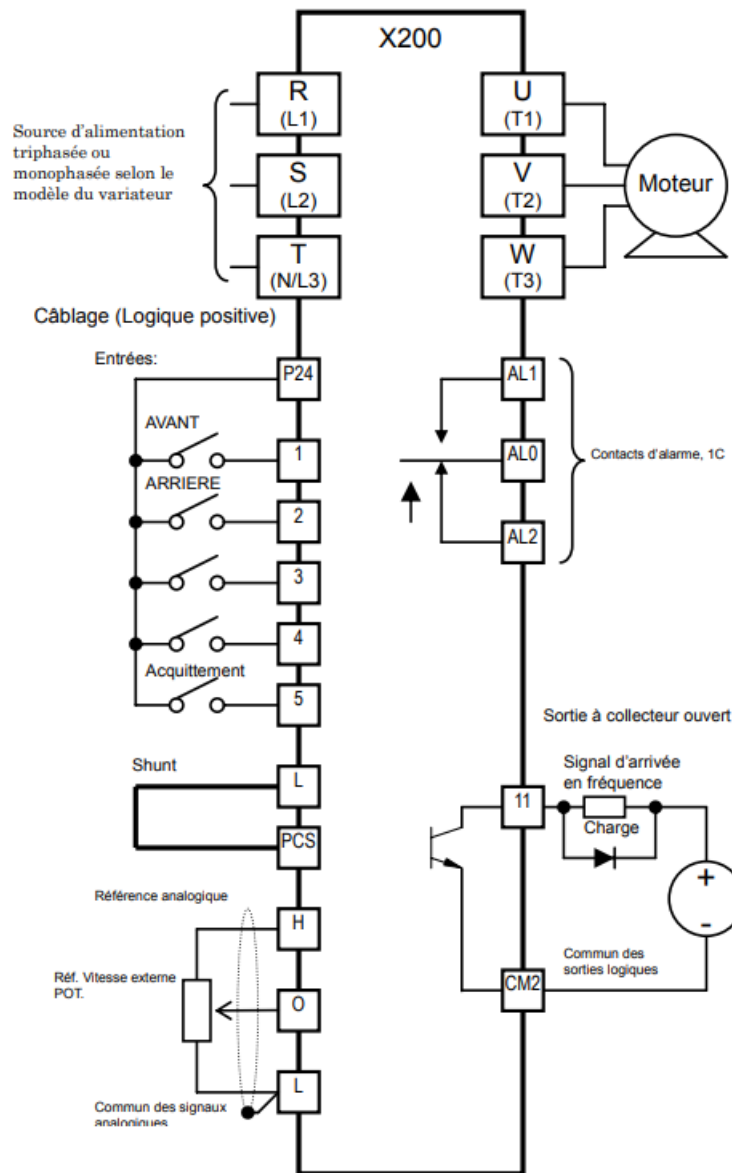


FIGURE 3.7 – Schéma de câblage du moteur et la variateur.

## 3.4 Configuration du variateur HITACHI X200[15]

### 3.4.1 Fonctions principales

La fréquence de base du moteur (vitesse) est défini par les paramètres du groupe de fonctions "F". Ce groupe de fonctions nous permet de régler les temps d'accélération décélération ainsi que le sens de rotation.

TABLE 3.4 – Fonctions principales "F".

Code fonction	Description	Valeur par défaut
F001	Réglage de la fréquence de sortie	0.0
F002	Paramétrage du temps d'accélération	10.0
F003	Paramétrage du temps de décélération	10.0
F004	Sens de marche <ul style="list-style-type: none"> <li>• 00 Avant</li> <li>• 01 Arrière</li> </ul>	00

### 3.4.2 Fonctions de base

Le variateur contient un grand nombre de commande des opérations de commande de la Marche/Arrêt et la fréquence du sortie qui est la vitesse su moteur.

TABLE 3.5 – Fonctions de base "A".

Code fonction	Description	Valeur par défaut
A001	Consigne en fréquence <ul style="list-style-type: none"> <li>• 00 Potentiomètre du clavier</li> <li>• 01 Bornier, entrée O, OI</li> <li>• 02 Clavier de l'appareil ou commande à distance, fonction F001 ou A20, A200 ou A300</li> <li>• 03 Liaisons série ModBus RS485</li> <li>• 10 Calcul de la fonction de sortie. Opération logique entre 2 types d'entrées O, OI</li> </ul>	01/00
A002	Ordre de marche (RUN) <ul style="list-style-type: none"> <li>• 01 Bornier</li> <li>• 02 Clavier de l'appareil ou commande à distance</li> <li>• 03 Liaisons série ModBus RS485</li> </ul>	01/00
A003	Paramétrage de la fréquence de base	50/60
A004	Réglage de la fréquence maximale	50/60
A021 à A035	Paramétrages de la fréquence de multi vitesses (pour les deux moteurs)	

### 3.4.3 Fonctions des entrées intelligentes

Le variateur comporte 5 entrées configurables. Ces entrées par défaut sont initialement uniques, chacun d'eux comportant ses propres paramètres.

TABLE 3.6 – Fonctions des entrées intelligentes "C".

Code fonction	Description	Valeur par défaut
C001	Fonction de l'entrée [1]	00
C002	Fonction de l'entrée [2]	01
C003	Fonction de l'entrée [3]	02/16
C004	Fonction de l'entrée [4]	03/13
C005	Fonction de l'entrée [5]	18

### 3.4.4 Fonctions de contrôle

On peut accéder aux valeurs des paramètres importants du système au moyen des fonctions de contrôle du groupe "D", que le variateur soit dans le mode marche ou arrêt. Après avoir sélectionné le numéro de code de la fonction associée au paramètre à contrôler.

TABLE 3.7 – Fonctions de contrôle "D".

Code fonction	Description	Unités
D001	Contrôle de la fréquence de sortie	Hz
D002	Contrôle du courant de sortie	A
D003	Contrôle du sens de rotation [3]	-
D004	Image de la mesure, Contrôle de retour PID	%
D005	État des entrées intelligentes	-
D006	État des sorties intelligentes	-
D007	Contrôle de la fréquence de sortie calibrée	Défini par l'utilisateur
D013	Contrôle de la tension de sortie	V

### 3.4.5 Fonctions des erreurs

Un code d'erreur apparaîtra automatiquement sur l'afficheur quand un défaut provoquera un déclenchement du variateur. Le tableau suivant répertorie la cause associée à l'erreur.

TABLE 3.8 – Fonctions des erreurs "E".

Code erreur	Désignation	Cause(s)
E 01	Surintensité survenue à vitesse constante	La sortie du variateur a été court-circuitée, ou l'arbre du moteur est grippé ou entraîne une lourde charge. Ces conditions appliquent un courant excessif au variateur. Par conséquent, la sortie du variateur est désactivée. Le moteur à double tension est incorrectement câblé.
E 02	Surintensité survenue pendant la décélération	
E 03	Surintensité survenue pendant l'accélération	
E 04	Surintensité survenue pendant d'autres conditions	

E 05	Protection contre les surcharges	Quand une surcharge du moteur est détectée par la fonction de protection thermique électronique, le variateur déclenche et met sa sortie hors tension.
E 07	Protection contre les surtensions	Quand la tension du bus CC dépasse un seuil provoqué par l'énergie de récupération délivrée par le moteur.
E 08	Erreur de mémoire EEPROM	Quand la mémoire EEPROM intégrée est perturbée par des parasites ou une température excessive, le variateur disjuncte et met hors tension sa sortie vers le moteur.
E 09	Erreur de sous-tension	Une diminution de la tension interne sur le bus CC en deçà d'un seuil donné se traduit par un défaut du circuit de commande. Cet état peut également générer un échauffement excessif du moteur ou engendrer un couple de faible puissance. Le variateur déclenche et met sa sortie hors tension.
E 11	Erreur de microprocesseur	Le microprocesseur intégré a subi un dysfonctionnement, par suite le variateur déclenche et met hors tension sa sortie vers le moteur.
E 15	Surtension en entrée	Le variateur effectue un test de surtension en entrée après un temps de 100 secondes dans le mode Stop (Arrêt). Si une surtension est détectée, le variateur passe dans un état de défaut. Après effacement du défaut, le variateur peut repasser dans le mode Run (Marche).
E 21	Disjonction thermique du variateur	Quand la température interne du variateur dépasse le seuil donné, le capteur thermique du variateur détecte la température excessive des blocs d'alimentation et déclenche afin de désactiver la sortie du variateur.
E 30	Erreur variateur	Une erreur interne s'est produite dans le variateur sur le circuit de protection entre le processeur et le variateur équipé. Un parasitage électrique excessif peut en être la cause. Le variateur a désactivé la sortie du module IGBT.
E 35	Surchauffe moteur	Quand une surchauffe moteur est raccordée aux entrées [6] et [L] et si le variateur a détecté une température excessive, il déclenche et désactive la sortie.

E 37	Arrêt d'urgence	Un signal d'arrêt d'urgence est donné.
E 60	Erreur de communication	La minuterie de chien de garde du réseau de communications du variateur est dépassée.

## 3.5 Conclusion

En somme, ce chapitre a permis de clarifier les fondamentaux des variateurs de vitesse, en abordant leur définition, leur structure générale, leurs principales fonctionnalités et les divers types de fonctionnement. Cette base théorique a été enrichie par une étude spécifique du variateur utilisé dans notre pratique, où nous avons examiné sa structure, son installation avec les moteurs et autres composants électroniques.

L'analyse détaillée du variateur Hitachi Omron a mis en lumière ses multiples fonctions, soulignant sa capacité à répondre à diverses exigences opérationnelles et à optimiser le contrôle des moteurs. Cette exploration nous a non seulement permis de mieux comprendre les aspects techniques des variateurs de vitesse, mais aussi d'apprécier leur importance cruciale dans les systèmes de contrôle industriel modernes.

Ainsi, cette étude nous prépare à aborder les prochaines étapes de notre projet avec une solide compréhension des outils et des technologies que nous mettons en œuvre.



# Chapitre 4

## Commande d'un moteur asynchrone via le variateur de vitesse HITACHI X200 et l'API

### 4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous avons présenté le banc d'essai, utilisé pour notre étude qui est constitué essentiellement des éléments suivants : API, moteur asynchrone, le variateur de vitesse Hitachi. Pour cela, nous avons commencé par l'exposition du CPU utilisé dans notre application, en examinant ses caractéristiques et ses performances.

La deuxième partie est consacré a la description de la structure du système installé, les outils et logiciels utilisés, notamment Step7 pour le développement du programme ladder et WinCC pour la création des interfaces de supervision.

Enfin, la dernière partie est dédiée a la présentation et l'interprétation des résultats obtenus.

### 4.2 Présentation de l'automate programmables (API)

#### 4.2.1 Définition de l'API[16]

Un automate programmable industriel (API) est un système à microprocesseur qui utilise une mémoire programmable pour stocker les instructions et qui implémente différentes fonctions, qu'elles soient logiques, de séquençement, de temporisation, de comptage ou arithmétique, pour commander les machines et les processus.

Les API présentent un avantage majeur : le même automate de base peut être utilisé avec une grande diversité de systèmes de commande. Pour modifier un système de commande et les règles appliquées, un opérateur doit simplement saisir une suite d'instructions différente.

#### 4.2.2 Structure d'un API[14]

L'Automate Programmable Industriel (API) est composé de plusieurs éléments clés :

- **Processeur ou unité centrale de traitement (CPU) :** Il contient le microprocesseur qui interprète les signaux d'entrée et exécute les actions de commande conformément au programme stocké en mémoire. Le CPU communique les décisions aux sorties sous forme de signaux d'action.
- **Unité d'alimentation :** Cette unité convertit une tension alternative en une basse tension continue (5 V), nécessaire au fonctionnement du processeur et des modules d'entrées

sorties.

- **Périphérique de programmation** : Utilisé pour entrer le programme dans la mémoire du processeur. Le programme est d'abord développé sur ce périphérique, puis transféré dans la mémoire de l'API.

- **Mémoire** : Elle contient le programme de commande qui définit les actions à effectuer par le microprocesseur. La mémoire stocke également les données provenant des entrées pour leur traitement ainsi que celles des sorties.

- **Interfaces d'entrées-sorties** : Elles permettent au processeur de recevoir des informations des dispositifs extérieurs et de leur envoyer des commandes. Les entrées peuvent inclure des interrupteurs, des capteurs photoélectriques, des sondes de température, des débitmètres, etc. Les sorties peuvent être des relais, des électrovannes, etc. Les dispositifs d'entrées-sorties sont classés en trois catégories :

- **Numériques** : Produisent des signaux TOR (interrupteur).

- **Analogiques** : Produisent des signaux dont l'amplitude est proportionnelle à la variable surveillée (comme un capteur de température).

- **Interface de communication** : Utilisée pour recevoir et transmettre des données sur des réseaux de communication qui relient l'API à d'autres API distants. Cette interface est impliquée dans des opérations telles que la vérification des périphériques, l'acquisition de données, la synchronisation entre applications et la gestion des connexions.

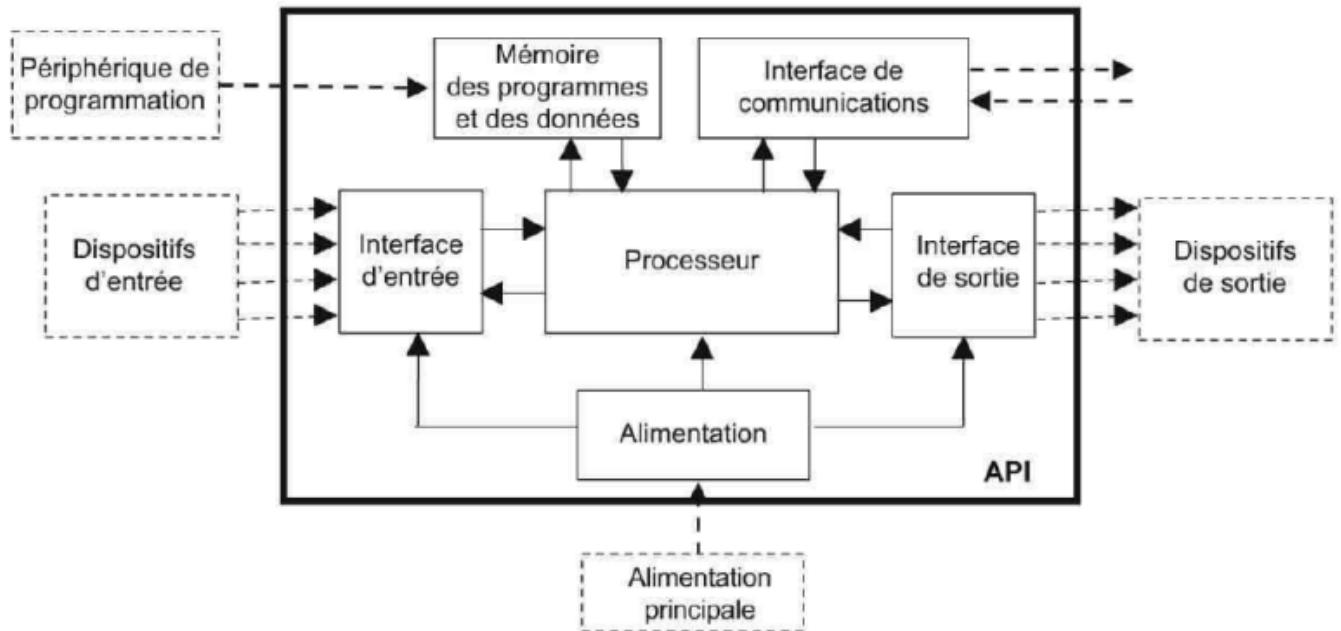


FIGURE 4.1 – Structure d'un API.

## 4.2.3 Étude du CPU 314C-2 DP 6ES7314-6CH04-0AB0[16]

### 4.2.3.1 Présentation du CPU 314C-2 DP

Le CPU 314C-2 DP, référencé 6ES7314-6CH04-0AB0, est un composant de la famille SIMATIC S7-300 de SIEMENS, conçu pour les applications d'automatisation industrielle. Il combine des capacités de traitement avancées avec des options de communication flexibles.

#### 4.2.3.2 Caractéristiques Techniques

- **Processeur** : Le CPU 314C-2 DP est équipé d'un processeur rapide pour des temps de traitement optimaux.
- **Mémoire** :
  - Mémoire de travail : 96 Ko pour les programmes et 128 Ko pour les données.
  - Mémoire de chargement : 128 Ko.
- **Interfaces de communication** :
  - MPI (Multi-Point Interface) : L'interface MPI permet la communication avec divers dispositifs et automates programmables industriels (API). Les appareils pouvant être raccordés via MPI incluent :
    - PG/PC (Personal Computer) : Ordinateurs de programmation et PC.
    - OP/TP (Operator Panels/Touch Panels) : Panneaux opérateurs et écrans tactiles.
    - S7-300/S7-400 : Automates de la série S7-300 et S7-400 équipés d'une interface MPI.
    - S7-200 : Automate S7-200, uniquement à une vitesse de transmission de 19,2 kbit/s.
  - PROFIBUS DP : Bus de terrain pour la communication avec les périphériques décentralisés. Le PROFIBUS DP permet, de monter de vastes sous-réseaux.
- **Modules intégrés** :
  - Entrées/Sorties numériques : 24 entrées et 16 sorties numériques.
  - Entrées analogiques : 5 entrées analogiques intégrées.
  - Sorties analogiques : 2 sorties analogiques intégrées.
- **Temps de cycle** : Optimisé pour des applications exigeantes avec un temps de traitement par instruction d'environ 0,1  $\mu$ s pour les opérations booléennes.
- **Fonctionnalités additionnelles** :
  - Horloge en temps réel pour des opérations synchronisées.
  - Diagnostique intégré et gestion des erreurs pour améliorer la fiabilité.

#### 4.2.3.3 Applications Typiques

Le CPU 314C-2 DP est adapté pour une variété d'applications industrielles, telles que :

- **Automatisation des machines** : Contrôle des machines nécessitant une réponse rapide et précise.
- **Systèmes de transport** : Gestion des systèmes de convoyage et de tri.
- **Processus de fabrication** : Surveillance et contrôle des processus de production en temps réel.
- **Automatisation des bâtiments** : Intégration dans des systèmes de gestion des bâtiments pour contrôler le chauffage, la ventilation et la climatisation.

#### 4.2.3.4 Programmation et Configuration

Le CPU 314C-2 DP est programmé à l'aide du logiciel STEP 7 de SIEMENS, qui offre une interface conviviale pour la création, le test et le déploiement de programmes d'automatisation. STEP7 supporte plusieurs langages de programmation conformes à la norme IEC 61131-3, tels que :

- Ladder Diagram (LD).
- Structured Text (ST).
- Function Block Diagram (FBD).
- Instruction List (IL).
- Sequential Function Chart (SFC).

Le CPU 314C-2 DP 6ES7314-6CH04-0AB0 de SIEMENS est un bon choix pour les applications d'automatisation industrielle. Avec ses interfaces de communication avancées, sa capacité de traitement rapide et ses fonctionnalités intégrées, il offre une solution complète pour les ingénieurs en automatisation cherchant à améliorer l'efficacité et la fiabilité de leurs systèmes.

Ces informations sont extraites du manuel technique de SIEMENS et fournissent une base solide pour comprendre les capacités et les applications du CPU 314C-2 DP.

### 4.3 Banc d'essai

Dans notre banc d'essai, nous avons utilisé un moteur asynchrone triphasé à deux paires de pôles, couplé en triangle et alimenté en 230/400 V, avec une fréquence maximale de 50 Hz, un courant nominal de 3,44 A et une puissance utile de 0,75 kW.

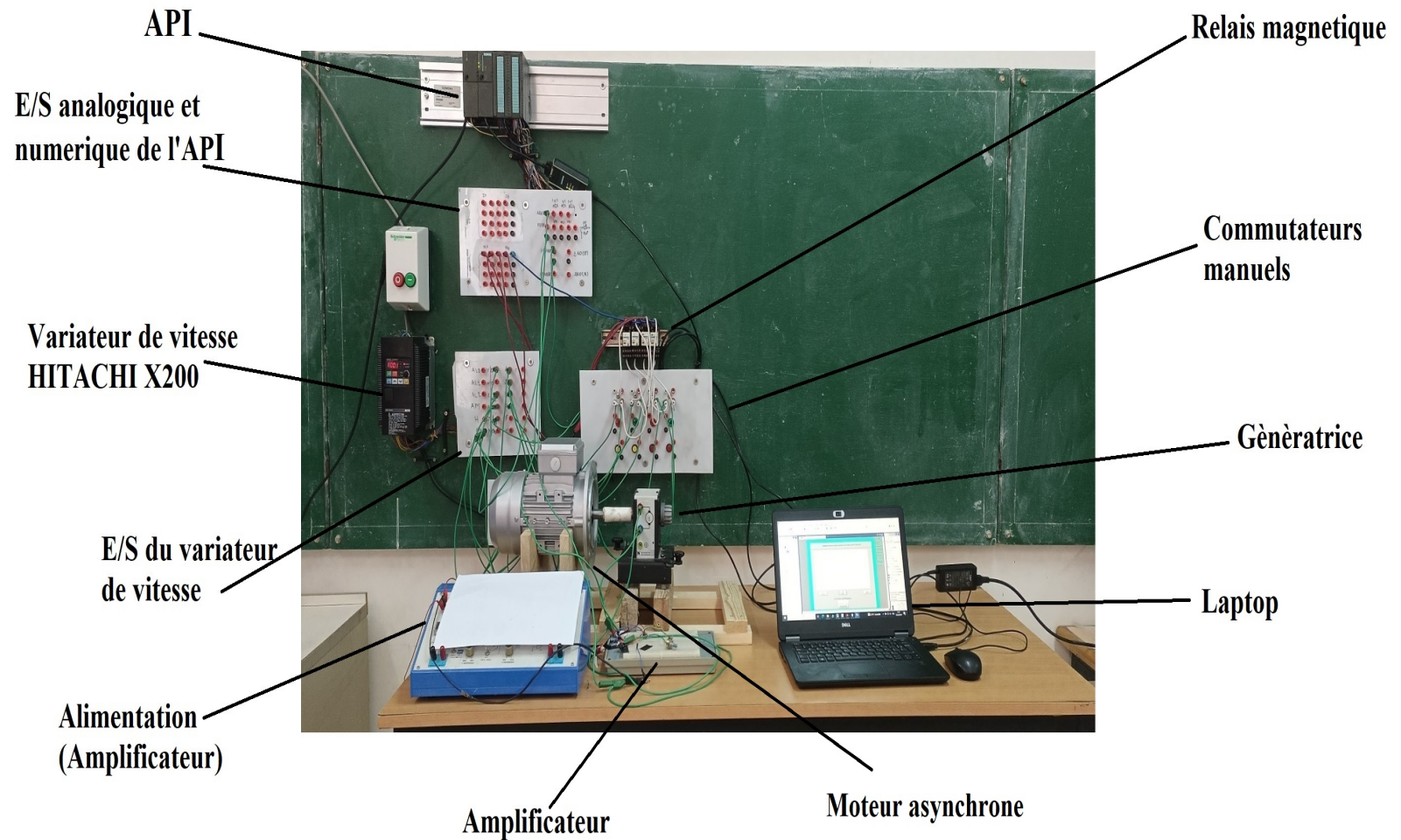


FIGURE 4.2 – Banc d'essai.

Dans le cadre de notre application au laboratoire d'API et réseaux, nous avons mis en place un système de commande et de supervision d'un moteur asynchrone. Nous avons utilisé un variateur de vitesse qui pilote un moteur asynchrone.

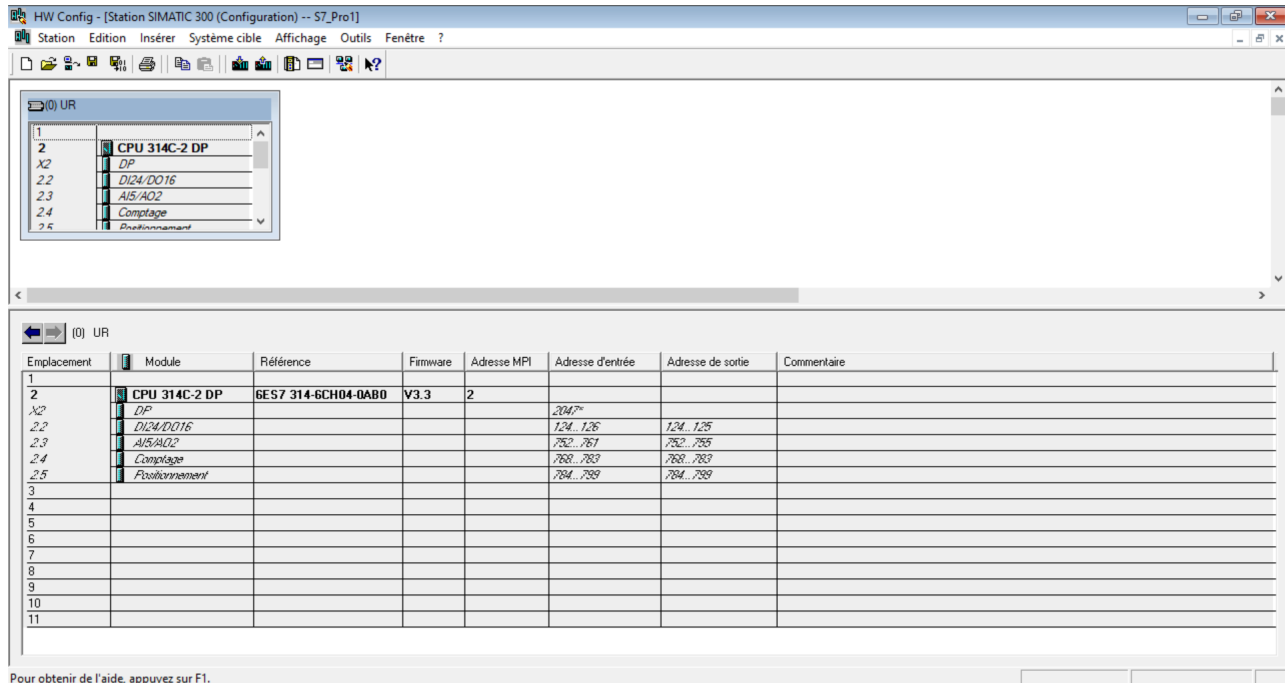
En d'autres termes, permet de contrôler la fréquence et la tension d'alimentation du moteur.

Une fois le variateur est connecté au moteur, nous avons installé une génératrice pour convertir la vitesse en tension qui est ensuite transmise à l'API.

Pour mieux commander le système décrit précédemment, nous avons utilisé un API pour recevoir et transmettre des signaux au variateur.

Par ailleurs, nous avons développé des programmes pour step 7 et des supervisions pour la gestion de notre application.

### 4.3.1 Configuration matérielle et programme LADDER



Emplacement	Module	Référence	Firmware	Adresse MPI	Adresse d'entrée	Adresse de sortie	Commentaire
1							
2	CPU 314C-2 DP	6ES7 314-6CH04-0AB0	V3.3	2			
X2	DP				2047*		
2.2	DI24/DO16				124...126	124...126	
2.3	AI5/AO2				762...767	762...765	
2.4	Comptage				768...783	768...783	
2.5	Positionnement				784...789	784...789	
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							

Pour obtenir de l'aide, appuyez sur F1.

FIGURE 4.3 – Configuration matérielle utilisée dans logiciel Step7.

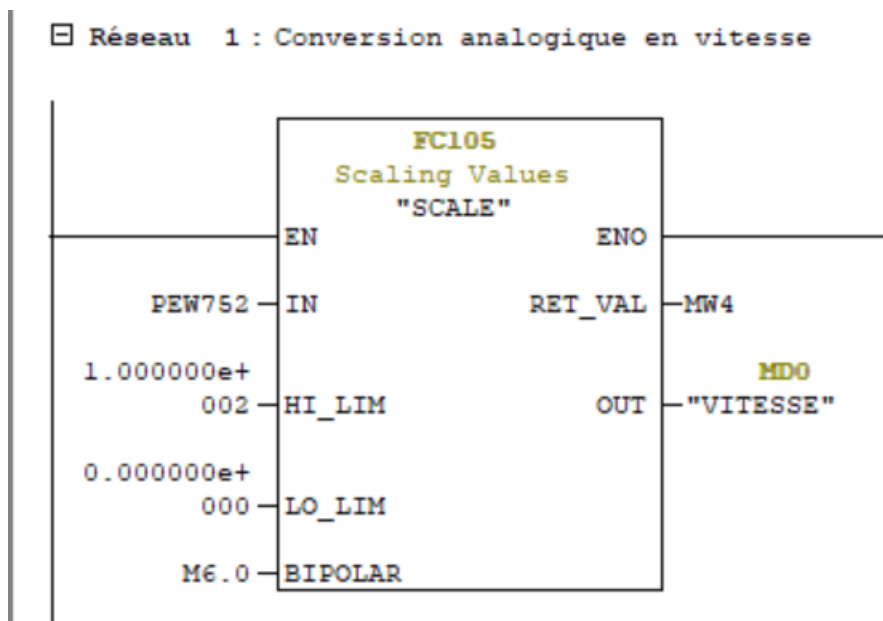


FIGURE 4.4 – Réseau de conversion analogique en vitesse.

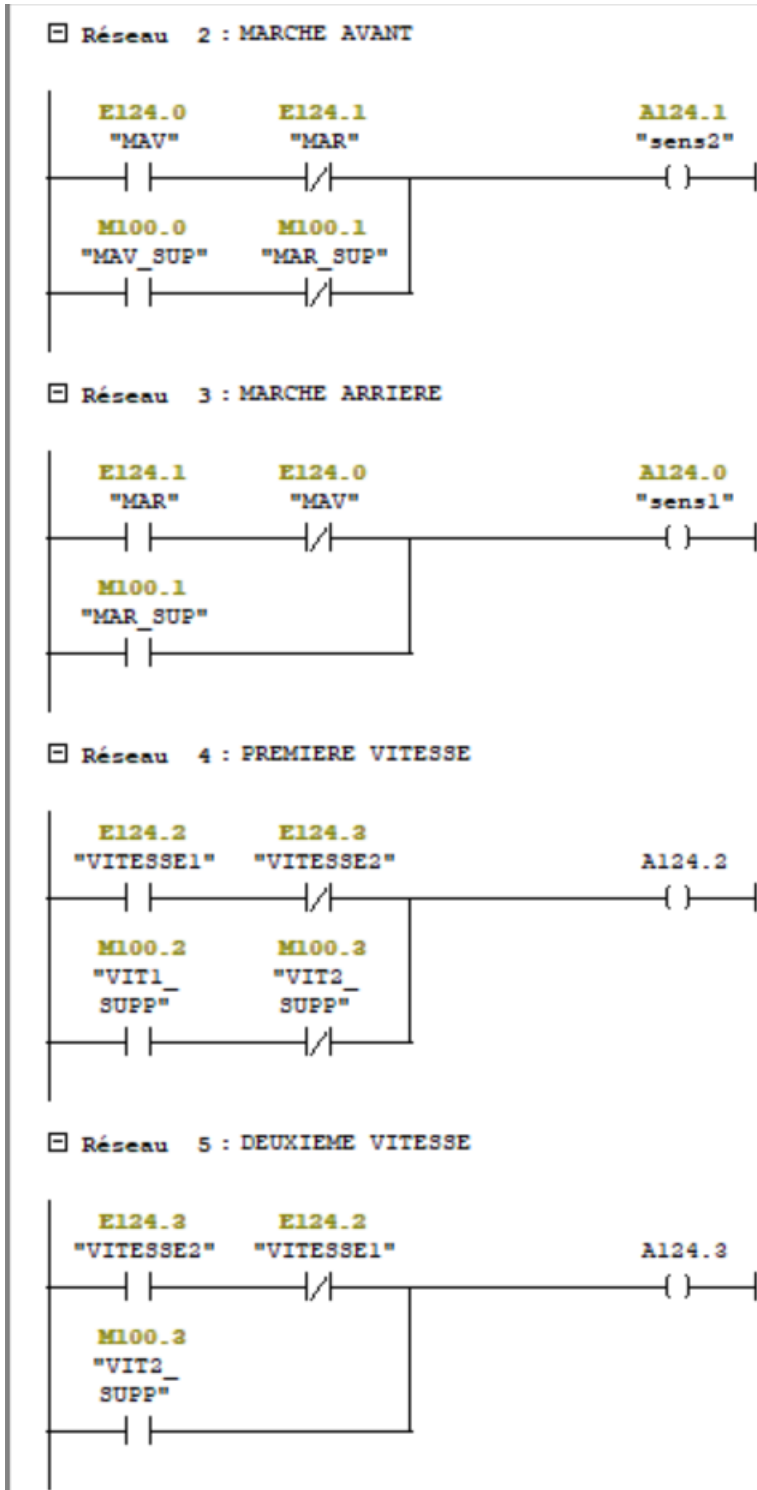


FIGURE 4.5 – Réseau de commande des différents sens de rotation et différentes vitesses.

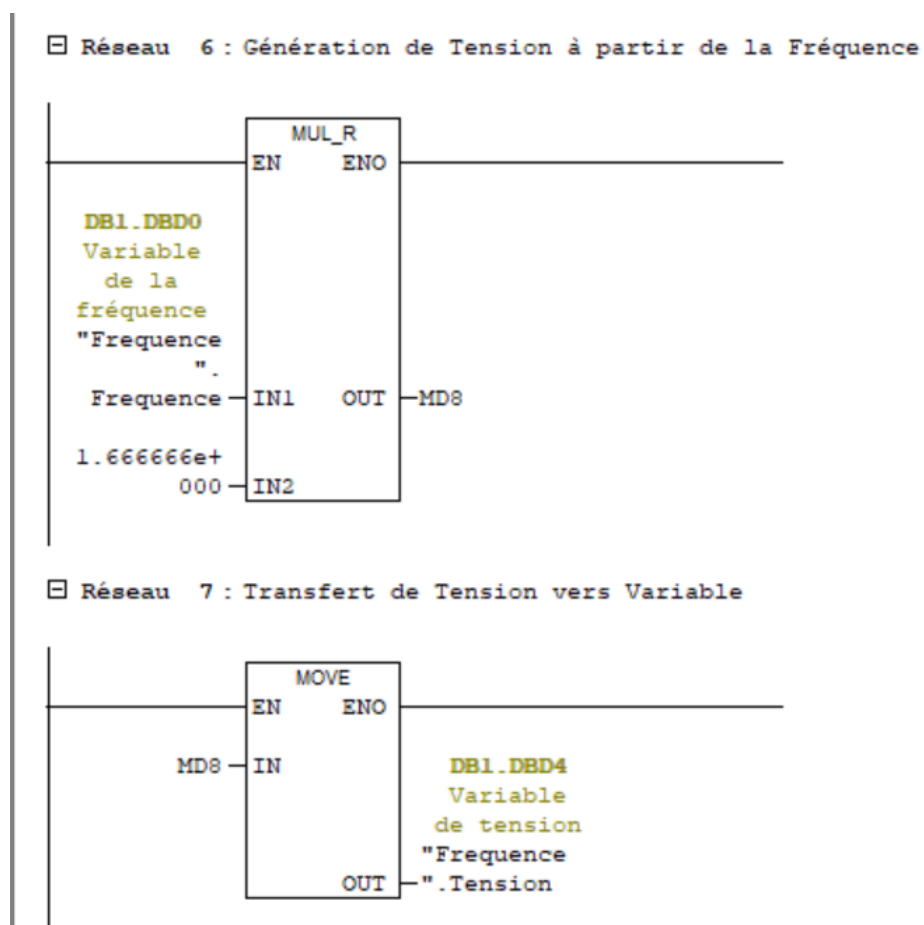


FIGURE 4.6 – Réseau de génération de tension à partir d'une fréquence.

▣ Réseau 8 : Conversion de Tension en Valeur Analogique

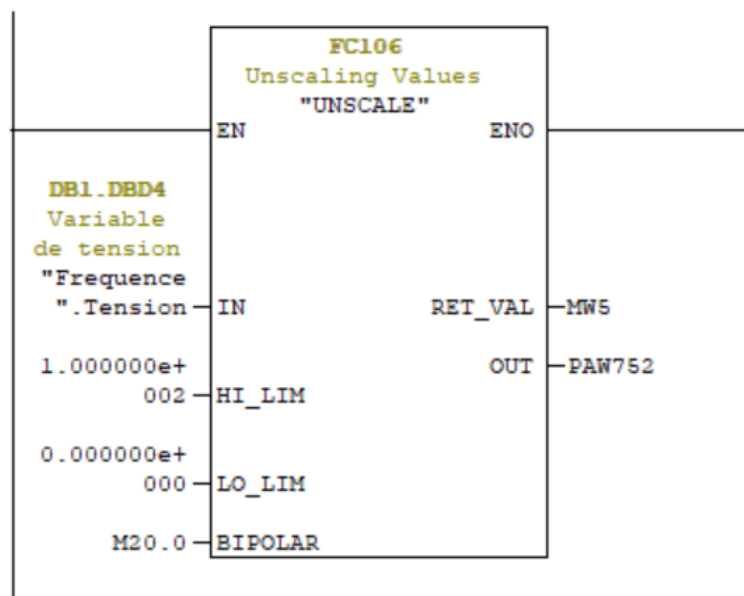


FIGURE 4.7 – Réseau de commande par fréquence.

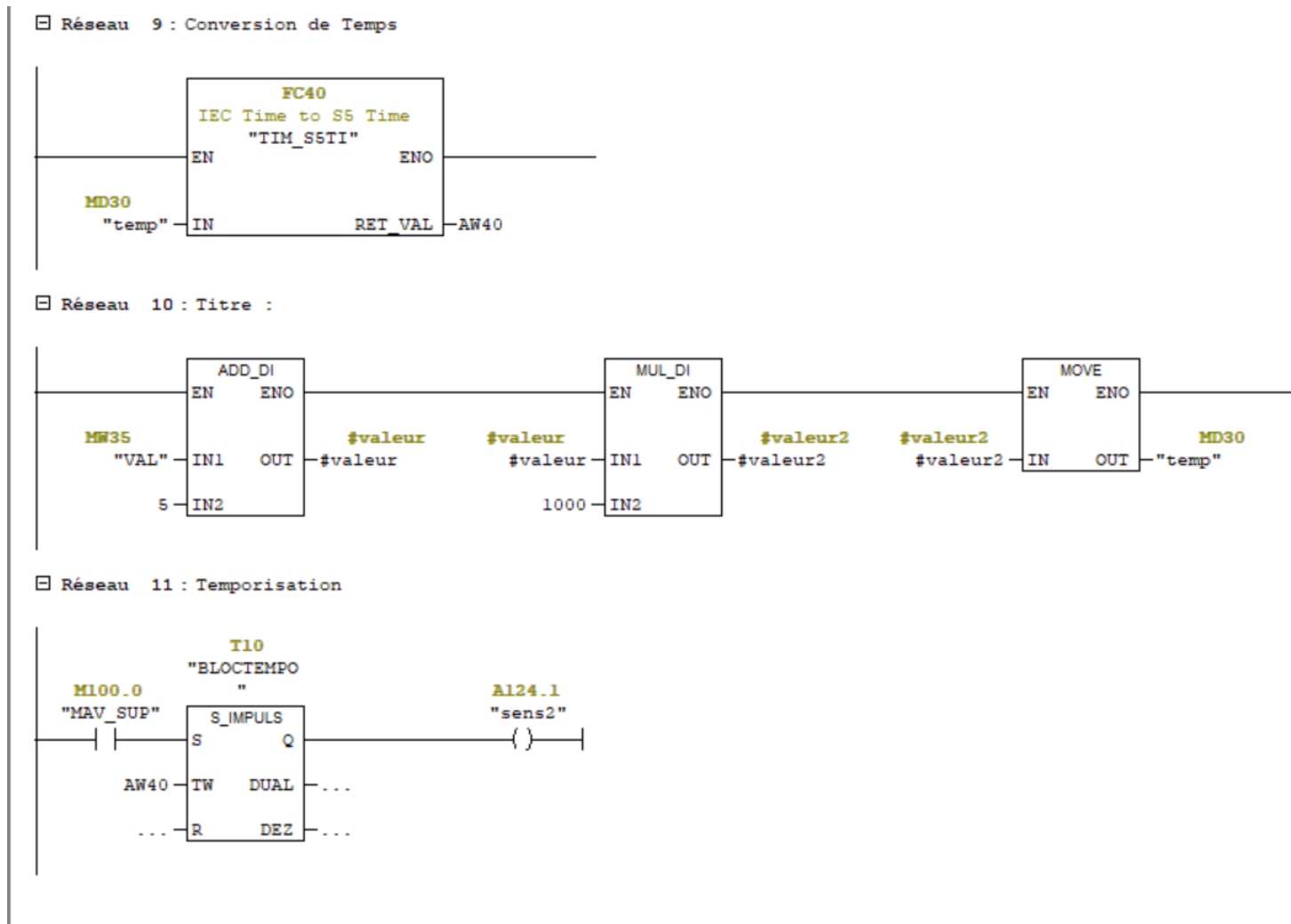


FIGURE 4.8 – Réseau de commande par temporisation.

Dans cette partie de notre projet, nous avons présenté la configuration matérielle du CPU utilisé (figure 4.5), ainsi que le programme ladder que nous avons développé.

Le programme LADDER, développé dans Step7 permet de réaliser plusieurs tâches importantes :

- **Visualisation de la courbe de vitesse** : Le programme représenté sur la figure 4.6 nous permet de surveiller en temps réel les valeurs de vitesse du moteur.
- **Commande des deux sens de rotation** : Les deux premiers blocs représentés sur la figure 4.7 nous permettent de contrôler les deux sens de rotation du moteur.
- **Commande de deux vitesses** : En utilisant le variateur et les différentes fonctions, nous sommes arrivés à fixer deux vitesses de rotations du moteur. Les deux derniers blocs de la figure 4.7 nous permettent de sélectionner entre ces deux vitesses prédéfinies.
- **Fixation de la vitesse selon l'entrée utilisateur** : La figure 4.8 contient le programme LADDER nécessaire pour fixer la fréquence de rotation du moteur par l'utilisateur en utilisant le PC.
- **Fonctionnement temporisé selon l'entrée utilisateur** : Les blocs de la figure 4.9 permettent de faire fonctionner le moteur pendant une durée de temps définie par l'utilisateur. Cette fonctionnalité est utile pour les opérations nécessitant un contrôle temporel précis.

### 4.3.2 Supervision en utilisant logiciel WinCC flex

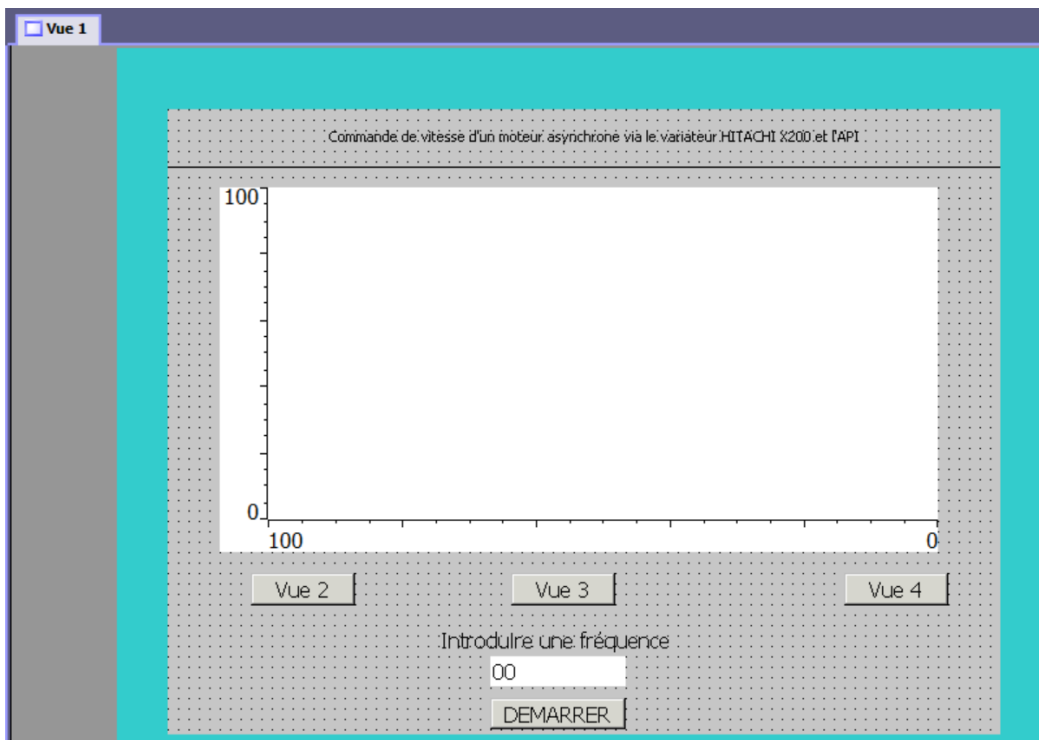


FIGURE 4.9 – Interface de commande par fréquence.

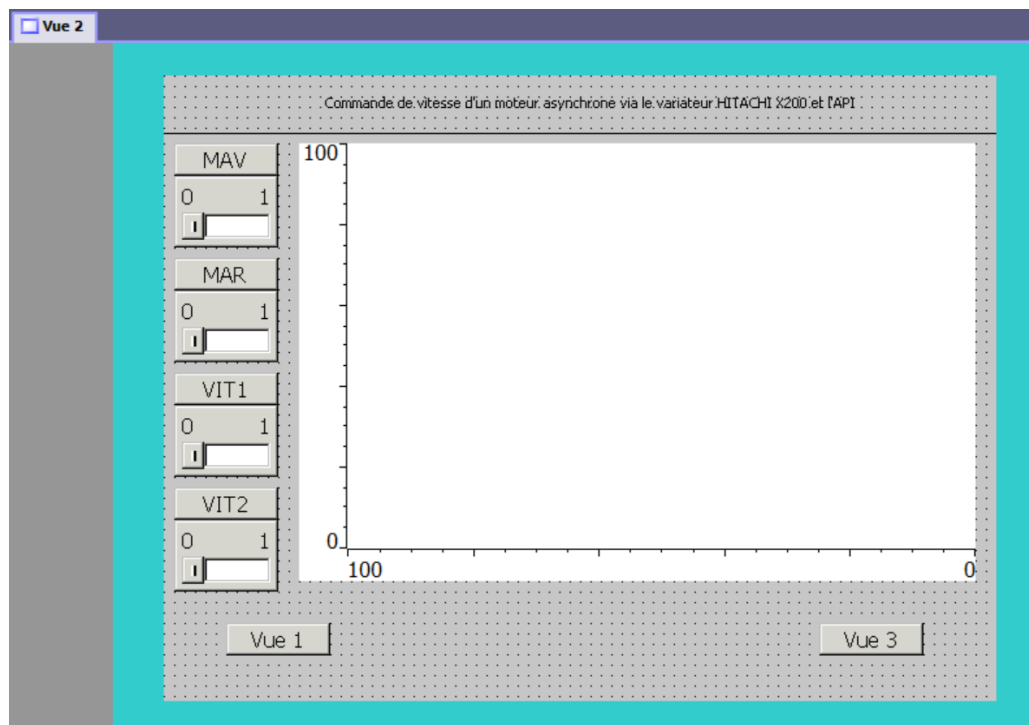


FIGURE 4.10 – Interface de commande par des switches.

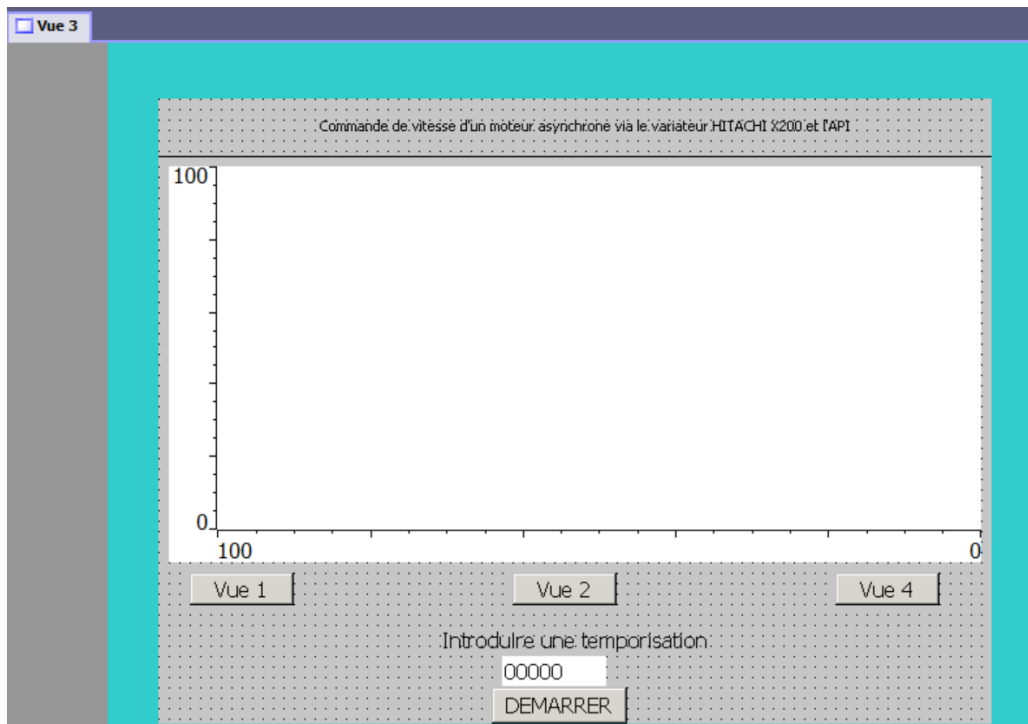


FIGURE 4.11 – Interface de commande par temporisation.

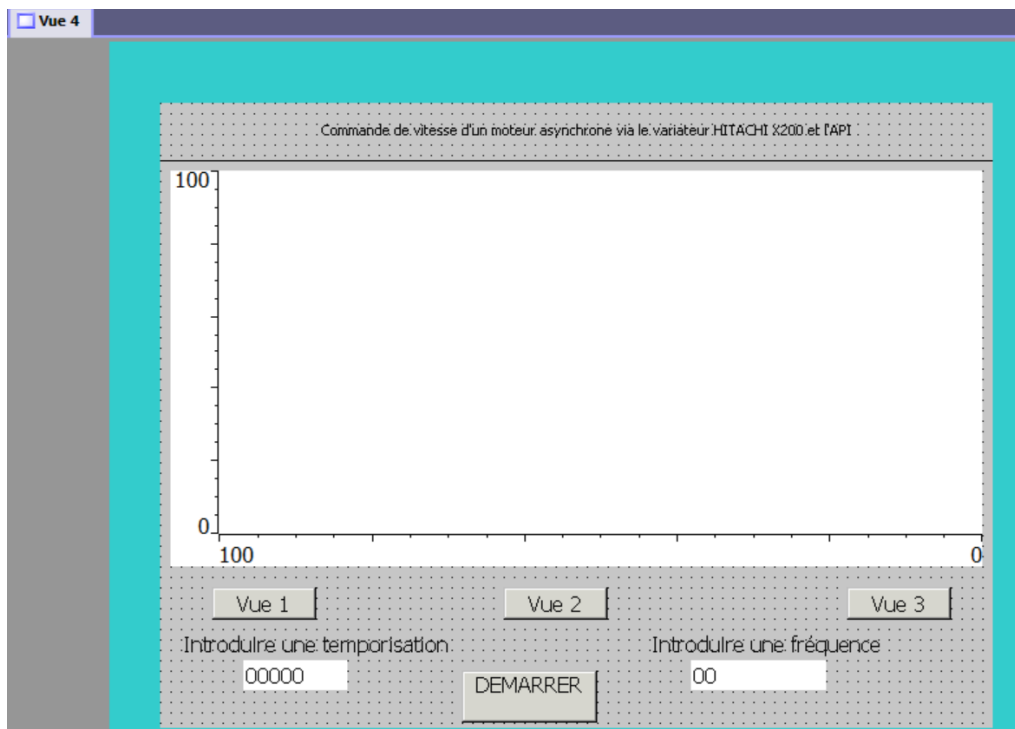


FIGURE 4.12 – Interface de commande par fréquence et temporisation.

Pour la supervision de la vitesse et la commande du moteur, nous avons utilisé le logiciel WinCC. Nous avons créé quatre interfaces distinctes pour gérer les différentes fonctions voulues, sur les quatre interfaces l'utilisateur peut également visualiser la vitesse du moteur sous forme de courbe :

- **Première interface** : Cette interface permet à l'utilisateur de saisir une fréquence. Cette fréquence est envoyée à l'API, qui la transmet ensuite au variateur pour ajuster la fréquence du moteur.
- **Deuxième interface** : Nous avons utilisé quatre boutons switch. L'activation de chacun de ces boutons déclenche une des quatre fonctionnalités suivantes : marche avant, marche arrière, activation de la vitesse 1, et activation de la vitesse 2.
- **Troisième interface** : Cette interface permet à l'utilisateur de faire fonctionner le moteur pendant une durée spécifiée. L'utilisateur introduit la période de temps souhaitée dans le champs d'entrée/sortie, et le moteur fonctionne pendant cette durée.
- **Quatrième interface** : Cette interface combine les fonctionnalités des autres vues citées précédemment. L'utilisateur peut à la fois fixer la fréquence et régler la temporisation de fonctionnement du moteur.

### 4.3.3 Résultats pratiques

#### 4.3.3.1 Configuration utilisée dans le variateur HITACHI X200

TABLE 4.1 – Valeurs des fonctions du variateur utilisées.

Code fonction	Valeur réglée
F001	15 Hz / 25 Hz
F002	10 s
F003	5 s
A001	01
A002	01
A003	50 Hz
A004	50 Hz
A005	04
A011	0 Hz
A012	50 Hz
A013	0 %
A014	100 %
A015	00
A021	30 Hz
A022	50 Hz
C001	01
C002	02
C003	03
C004	04

### 4.3.3.2 Interprétations des résultats

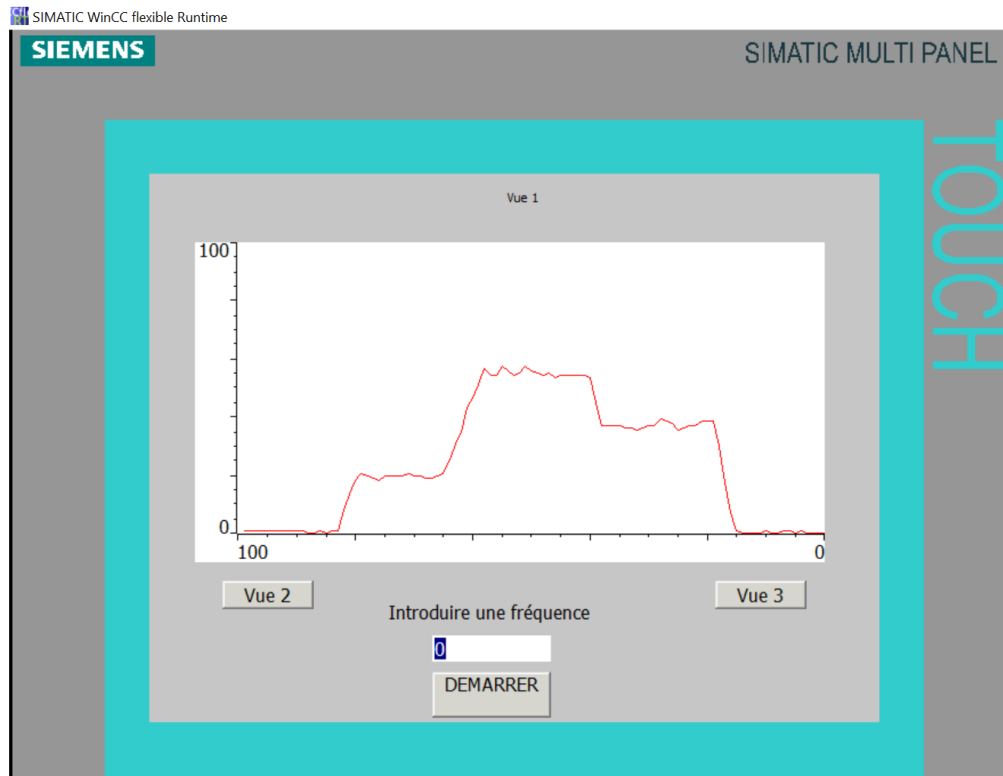


FIGURE 4.13 – Courbe de vitesse en utilisant la commande par fréquence.

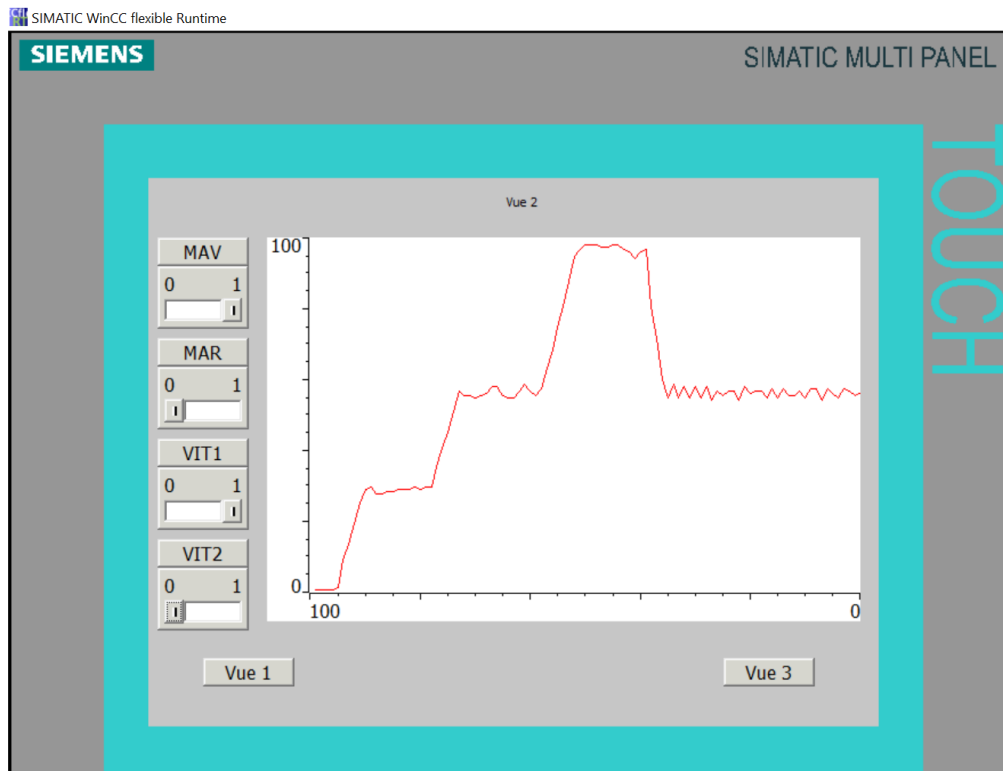


FIGURE 4.14 – Courbe de vitesse en utilisant les switches.

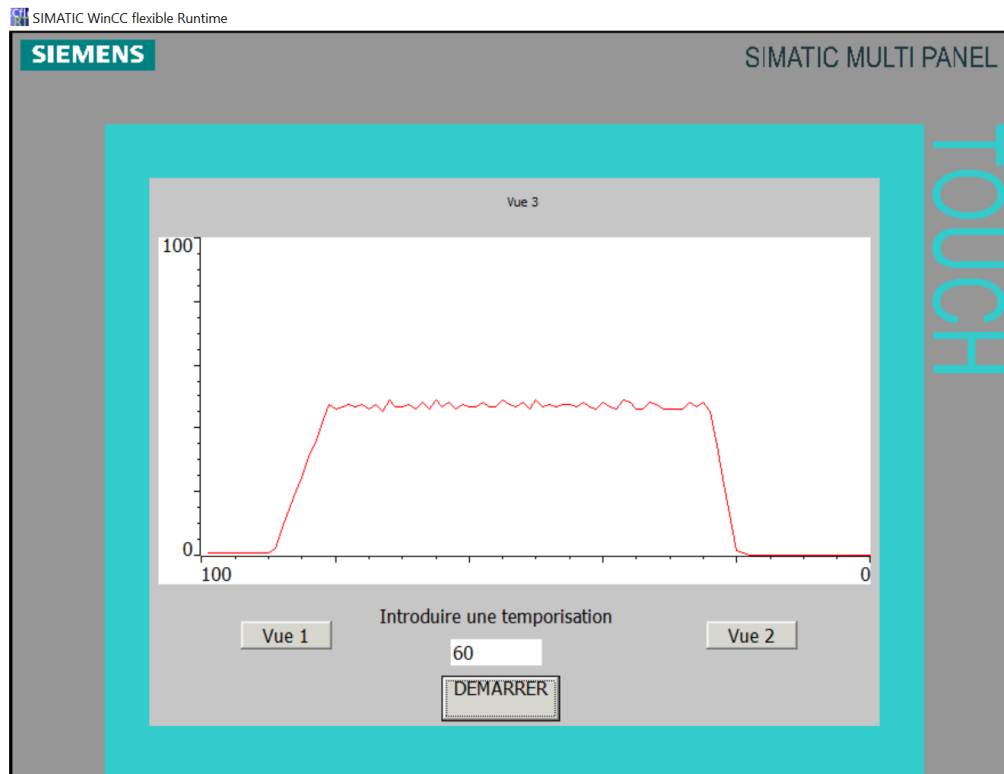


FIGURE 4.15 – Courbe de vitesse en utilisant la temporisation.

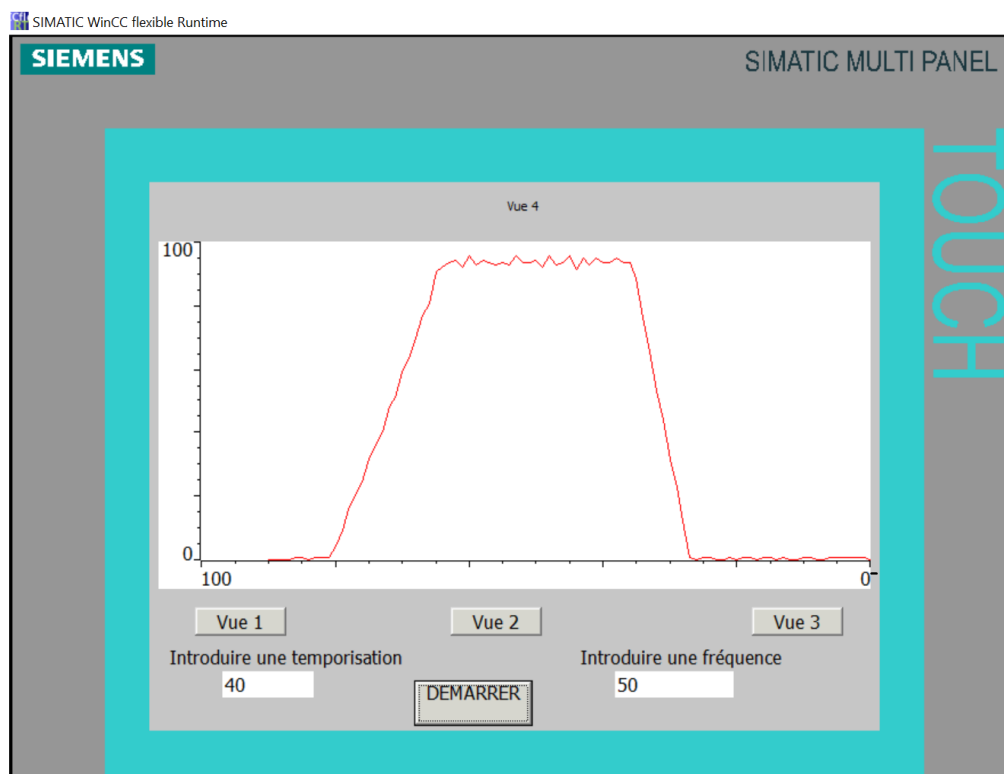


FIGURE 4.16 – Courbe de vitesse en utilisant la temporisation et la fréquence.

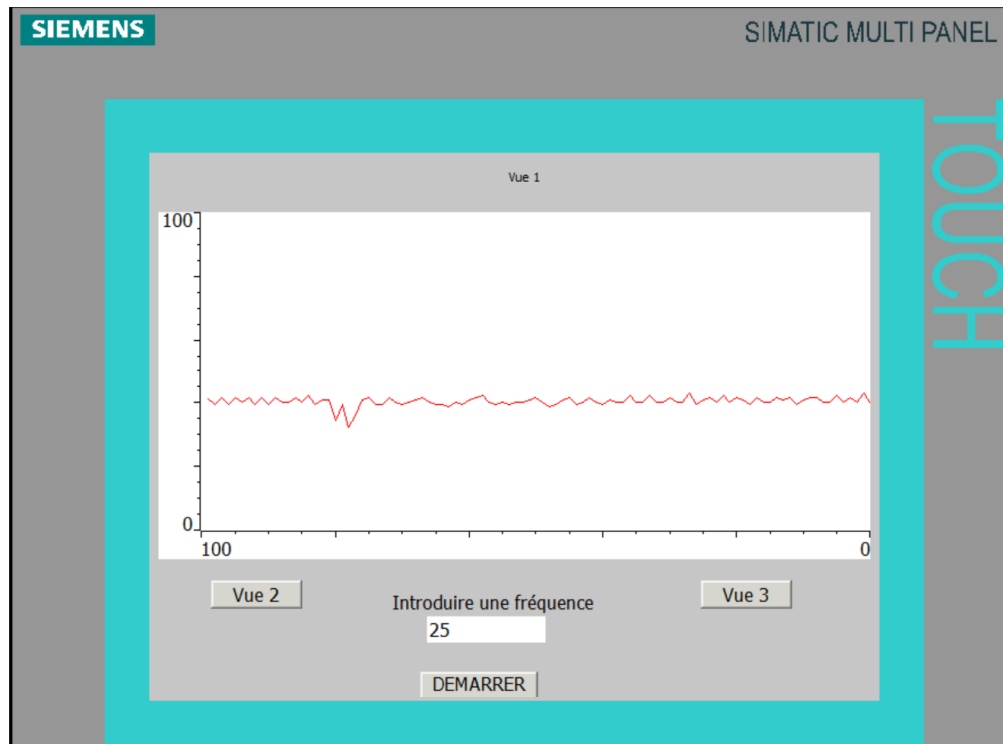


FIGURE 4.17 – Courbe de vitesse en introduisant un couple résistant.

L'interface de Wincc de la figure 4.15 représente les différents contacts qui activent des relais. En commençant par la marche avant "MAV", une fois activé le moteur démarre et la vitesse augmente progressivement jusqu'à atteindre la vitesse mentionnée en F001 (15 Hz) du variateur (Table 4.1). Ensuite, en cliquant sur le bouton de la première vitesse "VIT1" la fréquence augmente rapidement jusqu'à la valeur saisie dans le code de la fonction A021 (30 Hz) et contrôlée par l'entrée C003 du variateur. En activant "VIT2" la fréquence monte jusqu'à la valeur définie en A022 (50 Hz) et contrôlée par l'entrée C004. En retournant à "VIT1", la fréquence revient à la valeur initiale.

Une temporisation a été programmée sous step 7 pour générer une consigne qui dure un moment. La vitesse du moteur augmente progressivement jusqu'à atteindre la valeur fixée en F001 (25 Hz). D'après la figure 4.16 cette vitesse est maintenue jusqu'à l'expiration de la temporisation qui est égale à 60 s introduite par l'utilisateur comme le montre la figure 4.16.

La figure 4.17 illustre une introduction en même temps de la consigne de fréquence et de la temporisation. Dans ce cas, la fréquence est fixée à 50 Hz et la temporisation à 40 s.

Pour tester le rejet de perturbation, nous avons laissé le moteur pour qu'il tourne à une fréquence égale à 25 Hz. Ensuite, à un temps donné comme le montre la figure 4.18, nous avons appliqué un couple résistant pendant un moment et nous remarquons un bon rejet.

## 4.4 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a permis de démontrer l'importance des API pour l'automatisation des systèmes industriels. Après une étude théorique approfondie suivie des tests pratiques au laboratoire, nous avons pu mettre en œuvre nos connaissances acquises.

Les résultats pratiques obtenus, notamment à travers les programmes développés dans Step7 et

les interfaces créées dans WinCC, montrent l'efficacité de notre solution pour le contrôle et la supervision du comportement d'un moteur asynchrone.

Par ailleurs, les différents résultats obtenus nous montrent l'intérêt de notre étude et surtout de découvrir une partie sur le fonctionnement d'un variateur de vitesse.

Par conséquent, ce travail ouvre d'autres voies pour élargir nos connaissances encore davantage sur les variateurs.



# Conclusions et Perspectives

Dans ce mémoire, nous avons présenté une modélisation détaillée d'un moteur asynchrone et une commande scalaire a été appliquée. En plus, nous avons réalisé un banc d'essai composé du variateur de vitesse HITACHI X200 et l'API pour contrôler le même système.

Pour atteindre cet objectif, une large recherche bibliographique en électrotechnique et en commande des moteurs asynchrones a été menée au préalable.

En premier lieu, après l'extraction du modèle mathématique du moteur asynchrone triphasé, nous avons créé son block Simulink sous MATLAB. Par ailleurs, nous avons extrait et interprété son comportement en boucle ouverte et après l'application de la commande scalaire.

En second lieu, nous avons réalisé un banc d'essai dans le but de commander le moteur asynchrone qui est disponible au niveau de notre laboratoire en utilisant le variateur de fréquence HITACHI X200 via l'API. Après la maîtrise des différentes configurations de ce dernier, nous avons réalisé quelques programmes sous Step 7 pour contrôler ce moteur. Une plateforme de supervision a été conçue dans le but d'acquérir les différents comportements. Des clarifications et des interprétations ont été présentées.

Les résultats obtenus en simulations après application de la commande scalaire nous rendent optimiste si nous allons l'implémenter sur un système réel. Par ailleurs, les différents tests pratiques nous ont permis de découvrir le fonctionnement du variateur de vitesse.

Les perspectives qu'ouvrent ces travaux sont, de notre point de vue, très importantes. Ce travail constitue une étude dans le domaine des moteurs asynchrones qui demande à être poursuivie. En effet, des limites ont également été identifiées, notamment une performance limitée pour des applications à vitesse variable importante et une sensibilité aux variations de couple de charge. Ces limites ouvrent la voie à des perspectives de recherche futures, telles que l'étude de la commande vectorielle pour avoir des meilleures performances et l'utilisation de nouvelles techniques de commande. Par ailleurs, une technique ne peut être concrétisée qu'une fois est implémentée. Au sein de ce mémoire nous avons utilisé uniquement quelques configurations du variateur, pour cela, nous espérons que les prochaines promotions vont continuer à découvrir les autres configurations. En plus, nous recommandons également d'installer des modules de communications au niveau de l'API.

Enfin, nous espérons que nos efforts puissent servir à quelque chose et que ce mémoire soit un bon guide pour les promotions futures et que notre travail va contribuer pour enrichir notre équipement et la qualité des travaux pratiques au sein du laboratoire d'automates programmables et des réseaux industriels.



# Bibliographie

- [1] T. WILDI et G. SYBILLE, *Electrotechnique*. Pearson Education France, 2005.
- [2] blog.technic ACHAT. “Les Différents types de démarrage des moteurs asynchrones triphasés.” (2018), adresse : <https://blog.technic-achat.com/les-differents-types-de-demarrage-des-moteurs-asynchrones-triphases/?replytocom=104#respond>.
- [3] G. SÉGUIER, F. LABRIQUE et P. DELARUE, *Electronique de puissance : Structures, commandes et applications*. 2015.
- [4] D. MOKRANE et A. FERHAT, “Réalisation d’un onduleur triphasé à base de transistors IGBT,” Thèse de mémoire pour ingénieur d’État en électrotechnique, Université Mouloud Maameri, 2009.
- [5] H. NEY, *Electrotechnique et normalisation : Equipements de puissance*. 1988.
- [6] M. RABIAA, “Contribution à l’étude des onduleurs dans les systèmes photovoltaïques : Applications pour les charges commerciales,” Thèse de DOCTORAT, Université Hadj Lakhdar – Batna, 2015.
- [7] B. FARID, “Etude des Différentes Techniques de Commande des Onduleurs à MLI Associés à une Machine Asynchrone,” Thèse de MAGISTER, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA, 2006.
- [8] L. LASNE, *Electronique de puissance : cours, études de cas et exercices corrigés*. 2015.
- [9] C. C. de WIT, *Modélisation contrôle vectoriel et DTC*. Springer, 2000.
- [10] *Principes d’électrotechnique*. Dunod, 2005.
- [11] K. BENABDALLAH, “Conception de la commande d’une machine asynchrone,” Magister, Université des Sciences et de la Technologie d’Oran, 2015.
- [12] *Cahier technique n° 208 de Schneider Electrique : Démarreurs et variateurs de vitesse électroniques*.
- [13] M. HADJAM, “Etude comparative des différentes par accélération du champ d’une machine à induction,” Magister, Université Larbi Ben m’hidi, Oum El Bouaghi.
- [14] H. SOULARD, *Automates programmables industriels*. 2015.
- [15] HITACHI, “Manuel d’utilisation du variateur HITACHI X200,” rapp. tech., 2007.
- [16] SIEMENS, “S7-300 CPU 31xC et CPU 31x : Caractéristiques techniques,” rapp. tech., 2011.