

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté de Technologie
Département Génie Mécanique

Mémoire de Master

Filière : Génie mécanique
Spécialité : Electromécanique

THEME

**Adaptation d'un variateur de vitesse à un moteur
asynchrone d'entraînement d'une pompe centrifuge pour
résolution de problème de pression hydrodynamique**

Présenté par :

M^{elle}. HENNEB YASMINE

Promoteur :

M^{me}. BAHLOUL HASSIBA

Promotion 2021- 2022

Remerciements

*C'est avec une grande émotion
et beaucoup de sincérité que j'exprime ma gratitude à
toutes les personnes ayant participé, soutenu et
apprécié ce travail.*

*Tout d'abord, je remercie Le Bon Dieu qui m'a donné
la force de réaliser ce modeste travail.*

*Mes reconnaissances et vifs remerciements vont à ma
promotrice Mme BAHLOUL pour son encadrement, et
aussi Mr chekerker pour ses orientations et toute l'aide
qu'il m'a apportée.*

*Mes remerciements sont formulés aussi à mes parents
pour leur support qui m'a été très significatifs.*

Dédicaces

*Aux deux êtres qui me sont les plus chers au monde, ceux qui ont fait que je sois ici aujourd'hui, qui m'ont élevé et éduqué, qui ont toujours été là pour moi,
A mes chers parents*

A mon frère

A mes tantes et oncles

A mes cousins

A tous mes amis

A tous ceux que j'aime et qui m'aiment,

Je dédie ce modeste travail.

Sommaire

Remerciement

Dédicace

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Abréviations et acronymes

Introduction générale..... 1

Chapitre I : présentation de l'entreprise (GCB)

I.1. Présentation générale de GCB..... 3

I.2. Secteur d'activité de GCB..... 3

I.3. Ressources, organisation et chiffre d'affaire..... 3

I.3.1. Ressources..... 3

I.3.1.a Ressources matériels..... 3

I.3.1.b Ressources humaines..... 4

I.3.2. Structure organisationnelle..... 4

I.3.3. Les différentes directions de GCB..... 5

I.3.4. Implantation..... 6

I.3.5. Évolution du chiffre d'affaires..... 6

I.4. Direction Engineering & Procurement (DEP/EPE..... 7

I.4.1. Présentation de la DEP..... 7

I.4.2. Activités mécanique pétrolière (OIL & GAS) 7

I.5. Conclusion..... 8

Chapitre II : problématique et objectifs

II.1. Présentation du projet.....	9
II.1.1. Description du projet HRM.....	9
II.1.2. Description de l'installation nord.....	10
II.1.3. Description de l'installation centre.....	11
II.2. Philosophie générale de fonctionnement.....	13
II.2.1. Fonctionnement générale.....	13
II.2.2. Fonctionnement station nord.....	13
II.3. Problématique et objectifs.....	15
II.3.1. Problème posé.....	15
II.3.2. Proposition de solutions.....	15
II.3.3. Présentation et caractéristique de la pompe.....	15
II.5 Conclusion.....	16

Chapitre III : le moteur asynchrone et sa modélisation analytique

III.1. Introduction.....	17
III.2. Généralités sur les machines asynchrones.....	17
III.2.1. Classification des machines électriques tournantes.....	17
III.2.2. Constitution de la machine.	18
III.2.2.1. Le stator.....	19
III.2.2.2. Le rotor.....	20
III.2.2.3. L'entrefer.....	21
III.2.2.4. Les organes mécaniques.....	21
III.2.3. Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone.....	22
III.2.4. Plaque signalétique.....	24
III.2.5. Les Types des moteurs asynchrones.....	24
III.2.6. Le bobinage d'un moteur asynchrone.....	26

III.2.7. Choix du couplage.....	26
III.2.8. Bilan des puissances.....	27
III.2.9. Le choix d'un moteur asynchrone.....	29
III.2.9.1 Critères de choix.....	29
III.2.9.2 Le couple de démarrage.....	30
III.2.9.3 Couple d'accélération.....	31
III.2.10. Démarrage du moteur asynchrone.....	32
III.2.11. Domaine d'utilisation.....	32
III.2.12. Avantages et inconvénients de la machine asynchrone.....	32
III.2.13. Maintenance du moteur asynchrone.....	33
III.3. Modélisation du moteur asynchrone triphasé.....	34
III.3.1. Les hypothèses simplificatrices.....	34
III.3.2. Représentation des enroulements de la machine.....	35
III.3.3. Transformation de Park.....	37
III.3.4. Choix de référentiel.....	42
III.3.5. Expressions de couple électromagnétique.....	42
III.4. Conclusion.....	43

Chapitre IV : Variateurs de vitesse

IV.1. Introduction.....	44
IV.2. Variateur de vitesse.....	44
IV.2.1. Principe de fonctionnement des variateurs de vitesses.....	44
IV.2.2. Fonction des variateurs de vitesse.....	44
IV.2.2.1 L'accélération contrôlée.....	44
IV.2.2.2 La décélération contrôlée.....	44
IV.2.2.3 La variation et la régulation de vitesse.....	45
IV.2.2.4 L'inversion du sens de marche.....	46
IV.2.2.5 Le freinage d'arrêt.....	46
IV.2.3 Choix des variateurs de vitesse pour moteurs asynchrones.....	47

IV.2.4 Les type des variateurs de vitesse.....	47
IV.3. Procédés de variation de vitesse des moteurs asynchrone.....	48
IV.3.1 Réglage par variation du nombre de paires de pôles.....	49
IV.3.2 Réglage par variation de tension.....	50
IV.3.3 Réglage par action sur le glissement.....	50
IV.3.4 Réglage par variation de fréquence.....	50
IV.4. Convertisseur de fréquence électronique pour moteur asynchrone.....	51
IV.4.1 Principe.....	51
IV.4.2 Les principaux types de convertisseurs de fréquence.....	51
IV.4.3. La commande MLI.....	53
IV.4.4 Constitution du convertisseur de fréquence.....	54
IV.4.4.1. Le redresseur.....	54
IV.4.4.2 Le filtre.....	56
IV.4.4.3 L'onduleur de tension triphasé à MLI.....	56
a. Structure et modèle analytique de l'onduleur de tension à deux niveaux.....	57
b. Stratégie de commande de l'onduleur (Commande triangulo-sinusoidale à une porteuse).....	59
IV.5. Protections intégrées aux variateurs.....	60
IV.5.1 Protection de surcharge du moteur.....	60
IV.5.2 Protection contre le court-circuit moteur ligne en aval du variateur.....	60
IV.5.3 Autres protections intégrées aux variateurs.....	61
IV.6. Les avantages et inconvénients du variateur de vitesse.....	61
IV.7. Conclusion.....	62

Chapitre V : simulation numérique et régulation de pression

V.1. Introduction.....	63
V.2. Principe général de la simulation.....	63

V.3. Simulation du moteur asynchrone.....	63
V.3.1. Démarrage à vide.....	64
V.3.2. Démarrage en charge (Cr=200 N.m).....	65
V.3.3. Interprétation.....	66
V.4. La commande MLI.....	67
V.4.1. Résultat de simulation de l'onduleur sous MATLAB.....	67
V.5. Association machine asynchrone-onduleur.....	69
V.5.1. Démarrage à vide.....	69
V.5.2. Démarrage en charge.....	70
V.5.3. Interprétation.....	71
V.6. Régulation de la pression hydrodynamique d'une pompe centrifuge.....	72
V.6.1. Présentation et principe de l'installation de la pompe.....	72
V.6.2. Calcul de la pression de sortie théorique.....	73
V.6. Conclusion.....	74
Conclusion générale.....	75
Bibliographie	
Annexe	
Résumé	

Liste des figures

Chapitre I : Présentation de l'entreprise

Figure I.1 : Effectifs totale de GCB.....	4
Figure I.2 : Structure organisationnelle de GCB.....	4
Figure I.3 : Organigramme des directions de GCB.....	5
Figure I.4 : Implantation de la GCB.....	6
Figure I.5 : Évolution du chiffre d'affaires de GCB.....	6

Chapitre II : Problématique et objectifs

Figure II.1 : Position géographique du site du projet.....	9
Figure II.2 : Schéma synoptique du centre de déshuilage Nord.....	10
Figure II.3 : Schéma synoptique du centre de déshuilage centre.....	12
Figure II.4 : La pompe centrifuge horizontale multi-étages 3009-p-966B CHTR 2/1....	15
Figure II.5 : Plaque signalétique de la pompe.....	16

Chapitre III : Le moteur asynchrone et sa modélisation analytique

Figure III.1 : Classifications de machines électriques alternatives.....	18
Figure III.2 : Constitution de la machine asynchrone.....	19
Figure III.3 : Schéma présente l'enroulement du stator.....	19
Figure III.4.a : Rotor à cage.....	20
Figure III.4.b : Rotor à bague.....	21
Figure III.5 : Schéma désignant les éléments constituant une machine asynchrone.....	22
Figure III.6 : Schéma présent principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone.....	23
Figure III.7 : Plaque signalétique d'un moteur asynchrone triphasé.....	24

Figure III.8 : Branchements des bobines internes de la machines asynchrone.....	26
Figure III.9 : Couplage étoile/triangle d'un moteur asynchrone.....	27
Figure III.10 : bilan de puissance d'une machine asynchrone.....	28
Figure III.11 : Les divers couples résistant.....	30
Figure III.12 : Courbe de couple du moteur asynchrone (démarrage direct).....	31
Figure III.13 : Modèle de la machine asynchrone dans le repère triphasé....	35
Figure III.14 : Model de Park de la machine asynchrone.....	37
Figure III.15 : Modèle équivalent transformateur triphasé.....	41
Figure III.16 : Modèle avec fuites réparties.....	41
Figure III.17 : Modèle avec fuites ramenées au stator.....	42

Chapitre IV : Variateurs de vitesse

Figure IV.1 : Variation et la régulation de vitesse en boucle ouvert/fermé.....	45
Figure. IV.2 : Allure de la variation de vitesse.....	46
Figure IV.3 : Schéma d'un signal PWM.....	53
Figure IV.4 : Structure d'un variateur de fréquence.....	54
Figure IV.5 : Redresseur triphasé a pont de diode PD3.....	55
Figure IV.6 : Allure de la tension de sortie redressée.....	55
Figure IV.7 : Structure de filtre.....	56
Figure IV.8 : Structure de l'onduleur de tension à deux niveaux.....	57
Figure IV.9 : Un bras de l'onduleur à deux niveaux.....	57
Figure IV.10 : Schéma principale de l'onduleur.....	58
Figure IV.11 : Schéma de principe de la technique triangulo-sinusoidale.....	60

Chapitre V : Simulation numérique et régulation de pression

Figure V.1 : Evolution des courants I_{abc} de la MAS.....	64
---	----

Figure V.2 : Evolution du couple C_e de la MAS.....	64
Figure V.3 : Evolution de la vitesse angulaire de la rotation W_r de la MAS.....	65
Figure V.4 : Evolution des courants I_{abc} de la MAS alimentée en charge.....	65
Figure V.5 : Evolution du couple électromagnétique C_e de la MAS alimentée en charge.....	65
Figure V.6 : Evolution de la vitesse W_r de la MAS alimentée en charge.....	66
Figure V.7 : Evolution de signal de commande de l'onduleur en fonction de temps.....	67
Figure V.8 : Evolution des tensions de sortie de l'onduleur en fonction du temps.....	68
Figure V.9 : Les courants statorique.....	69
Figure V.10 : Le couple électromagnétique.....	69
Figure V.11 : La vitesse de rotation.....	70
Figure V.12 : Les courants statorique en charge.....	70
Figure V.13 : Le couple électromagnétique en charge.....	71
Figure V.14 : La vitesse de rotation en charge.....	71
Figure V.15 : Schéma du principe de l'installation.....	72
Figure V.16 : Schéma d'un moteur soumis à un débit Q et une différence de pression...	73

Annexe

- Figure A.1** : Schéma bloc de moteur asynchrone.
- Figure A.2** : Schéma bloc de l'onduleur de tension à commande MLI.
- Figure A.3** : Schéma bloc de la simulation de la commande scalaire.
- Figure B.1** : performance de la pompe.

Liste des tableaux

Chapitre III : le moteur asynchrone et sa modélisation analytique

Tableau III.1 : Choix de couplage.....	27
Tableau III.2 : Plan de la maintenance préventive d'un moteur asynchrone.	33

Chapitre IV : les variateurs de vitesse

Tableau IV.1 : Une action sur le nombre de pair de pôles.....	50
Tableau IV.2 : comparatif des caractéristiques de fonctionnement normale et avec un variateur de vitesse d'un moteur asynchrone.....	52

Abréviations et acronymes

HRM :	Hassi R'mel
MAS :	Machine asynchrone
VDV :	variateur de vitesse
MLI :	Modulation de largeur d'impulsion
PWM :	Pulse Width Modulation
GCB :	Génie Civil et Bâtiment
i :	Le courant d'induit.
I_{abc} :	Courant statorique phase a, b, ou c.
i_{dc} :	Courant statorique sur l'axe d.
i_{qc} :	Courant statorique sur l'axe q.
S, R :	Indice correspondants au stator et au rotor.
K :	Coefficient qui dépend des caractéristiques constructives de la machine.
ω :	Vitesse de rotation du moteur (vitesse angulaire).
e :	Force contre électromotrice créée par la rotation du moteur.
J :	L'inertie du rotor de la machine et du système entraîné.
a ; b ; c :	Axes liés enroulements triphasée.
d, q :	Axes de référence de PARK.
[X (d,q)]:	Matrice de PARK.
V_s :	Tension statorique (V).
T_R :	Constante de temps rotorique.
T_s :	Constante de temps statorique.
P :	Nombre de pair de pôle.

J :	Moment d'inertie de la partie tournante.
L_S, L_R :	Inductance cyclique propre statorique et rotorique par phase.
R_S, R_R :	Résistances par phase du stator et du rotor.
M :	Inductance cyclique mutuelle stator-rotor.
θ :	Angle électrique.
φ_R :	Flux rotorique.
$\varphi_{R\alpha}, \varphi_{R\beta}$:	Flux rotorique dans le référentiel (α, β) .
$\varphi_{Rd}, \varphi_{Rq}$:	Flux rotorique dans le référentiel (d, q) .
φ_S :	Flux statorique.
σ :	Coefficient de dispersion total.
Fr :	Coefficient de frottement (Nm.s.rad ⁻¹).
C_e :	Couple électromagnétique.
C_r :	Couple résistant (N.m).
W_r :	La vitesse référentielle.
T_{em} :	Le couple électromagnétique.
P_e :	La pression d'entrée.
P_s :	La pression de sortie.
C_{th} :	La cylindrée théorique.
C :	Le couple théorique.
Q :	Le débit volumétrique.
ΔP_{th} :	La différence de pression.

Introduction générale

De nos jours, de nombreux systèmes utilisent des machines électriques pour assurer une conversion électromécanique (vitesse, position, couple variable via la modulation des sources électriques), les applications sont très diverses et dans multiples domaine électrique, électronique, mécanique et hydraulique (électroménager, robotique, traction, pompage, système de démarrage de turbines...).

L'étude des performances des moteurs électriques alimentés par des onduleurs, fait l'objet d'innombrables publications scientifiques. La possibilité de la variation de vitesse par machine à courant alternatif intéresse tous les domaines industriels et techniques.

Le développement de l'électronique de puissance nous a offert la possibilité et le choix d'utilisé des composant a semi-conducteurs (diode, transistor, thyristors,...) dans la conversion et le contrôle de l'énergie électrique à travers des convertisseurs. Le grand nombre des convertisseurs développés récemment permettent le choix d'une association optimal d'un moteur à courant alternatif et d'un onduleur de tension ou du courant.

Parmi les moteurs à courants alternatifs, le moteur asynchrone attire particulièrement l'attention à cause de sa robustesse et son faible coût de fabrication. Il présente une grande dynamique de réglage et autorise des vitesses élevées. Le moteur à cage offre en plus une grande puissance massique et constitue une machine fiable grâce à l'absence de collecteur.

Un variateur électronique de vitesse est un dispositif destiné à régler la vitesse et le couple d'un moteur électrique à courant alternatif, en faisant varier respectivement la fréquence et le courant, délivré à la sortie.

Dans le cas de notre projet de fin d'étude, nous intéressons à l'élaboration d'un programme par simulation numérique pour l'adaptation d'un variateur de vitesse électronique constitué d'un onduleur à MLI à deux niveaux, par la commande scalaire, en maintenant le rapport tension / fréquences en sublimit constant, pour permettre l'entraînement du couple d'une pompe à fin de réglé la pression d'exploitation voulu dans le projet SONATRACH / GCB.

Ce mémoire ce compose de cinq chapitre :

Le premier chapitre est consacré à donner un aperçu sur l'entreprise GCB, de son métier, et de ses directions.

Le deuxième chapitre sera consacré pour la présentation de la problématique et l'objectif de cette étude.

Le troisième chapitre est consacré à la description et modalisation de la machine asynchrone.

Le quatrième chapitre traite les variateurs de vitesse. Nous avons fait l'étude des différents montages constituant (redresseur/onduleur), et on a aussi modélisé l'onduleur de deux niveaux de tension.

Le cinquième chapitre est consacré au résultat de la simulation numérique du moteur asynchrone, de l'onduleur, et de leur l'association sur le logiciel Matlab/Simulink. Après avoir obtenu le couple, nous avons ensuite fait les calculs de la régulation de la pression hydrodynamique d'une pompe centrifuge.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale.

I.1. Présentation générale de GCB

La GCB « Génie Civil et Bâtiment » par abréviation est une Entreprise Nationale de construction. C'est une filiale du Groupe SONATRACH créée par décret présidentiel n° 81-173 du 1^{er} Aout 1981 portant création de l'entreprise nationale de génie-civil et bâtiment et a été constituée en juillet 1998 sous la forme d'une société par actions. [1]

La connaissance des technologies de la construction, l'utilisation de moyens de production modernes et le savoir-faire, de ses hommes aguerris aux situations les plus difficiles, permettent à la société GCB de suivre et de satisfaire les cahiers de charge les plus exigeants.

I.2. Secteur d'activité de GCB

GCB capitalise une longue expérience dans des différents domaines de la construction, une existence couronnée de succès qui lui a valu une excellente maîtrise de ses activités, elle opère dans les secteurs suivant :

- L'Engineering et procurement ;
- Les ouvrages hydrauliques et transferts ;
- Le pipeline ;
- Le montage mécanique et maintenance industrielle ;
- Les terrassements en grande masse ;
- Les plates-formes de forage et pistes d'accès ;
- Le génie-civil industriel des grandes installations pétrolières et gazières ;
- La construction en charpente métallique et chaudronnerie et travaux de canalisation ;
- Le génie-civil ferroviaire ;
- Les réalisations des routes et autoroutes et des pistes d'atterrissage et aérodromes.

I.3. Ressources, organisation et chiffre d'affaire

I.3.1 Ressources

I.3.1.a Ressources matériels

GCB met en œuvre un parc matériel de plus de 4900 article dont 3500 engins et équipements lourds.

I.3.1.b Ressources humaines

GCB emploie en moyenne 16 000 travailleurs, la plus part spécialisés dans le domaine des grands travaux de construction et se répartissent par catégorie socio professionnelle comme suite (Figure I.1). [1]

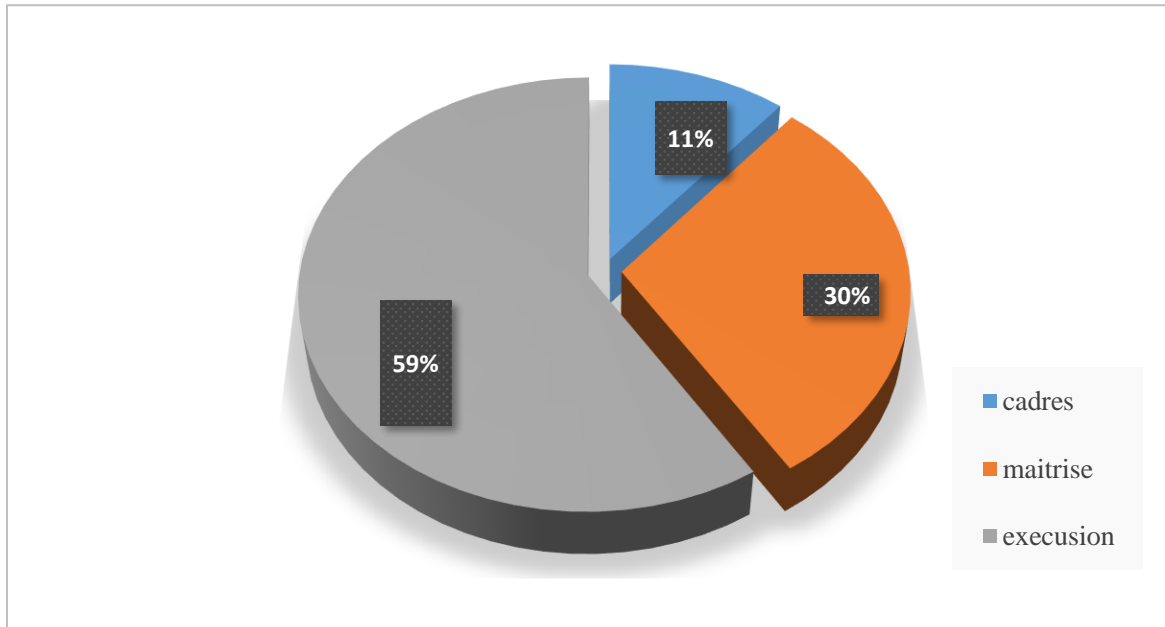


Figure I.1 : Effectifs totale de GCB. [1]

I.3.2 Structure organisationnelle

La structure organisationnelle de GCB se compose par 3 niveaux comme suivant (Figure I.2) :

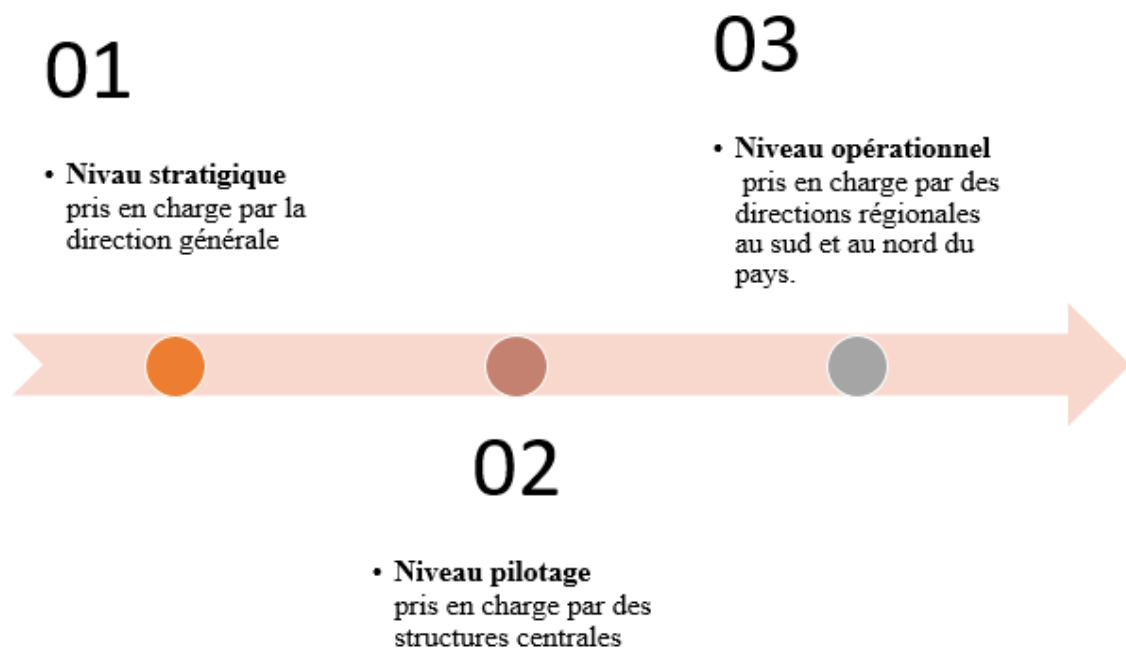


Figure I.2 : Structure organisationnelle de GCB.

I.3.3 Les différentes directions de GCB

La Société est organisée en structures régionales dont chacune dispose des capacités matérielles et managériales pour répondre aux besoins des clients de GCB dans sa région.

Ces structures régionales ont l'appui des structures support en matière de matériel de transport, moyens généraux, techniques et financiers en fonction des besoins tout en jouant un rôle régulateur pour optimiser les moyens de la Société.[2]

Les différentes directions de GCB se résument dans l'organigramme suivant :

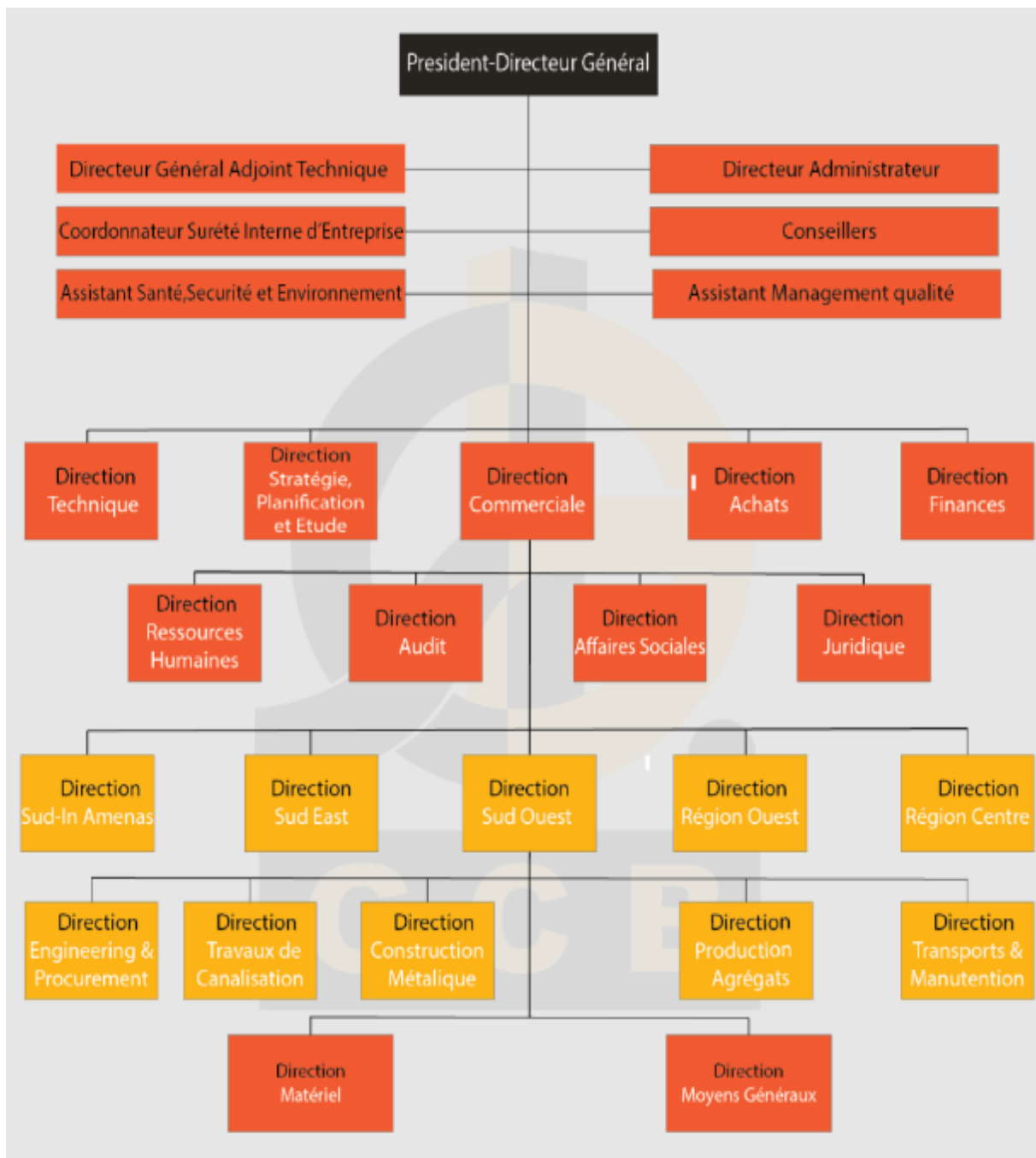


Figure I.3 : Organigramme des directions de GCB. [2]

I.3.4 Implantation

GCB occupe d'infrastructures fixes, a usage industrielles, administrative et socioprofessionnelles et sont situées à Alger (El Harrach / Ouad-Smar), Boumerdes (Boumerdes et Boudouaou), Arzew (zone industrielle), Hassi Rmel, In Sallah, Adrar, Hassi Messaoud, Irar, Hassi Berkine, In Amennas, Tiguentourin, Alrar. (Figure I.4). [2]

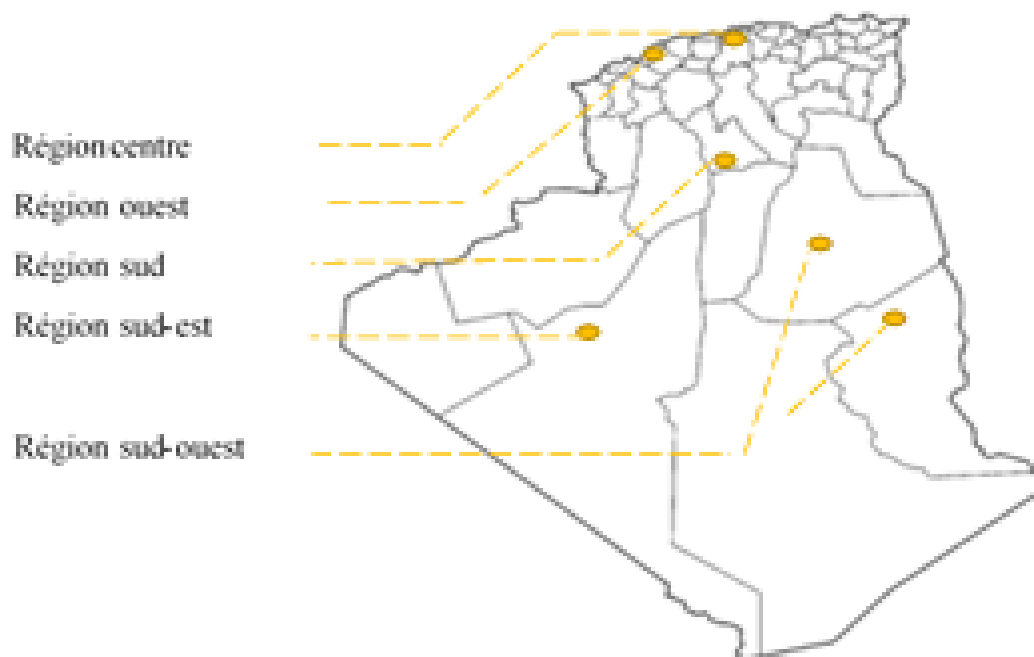


Figure I.4 : Implantation de la GCB.

I.3.5 Évolution du chiffre d'affaires

Pendant une période de 4 ans GCB a réussie à augmenter son chiffre d'affaire à 92% comme présenté dans la figure suivante :

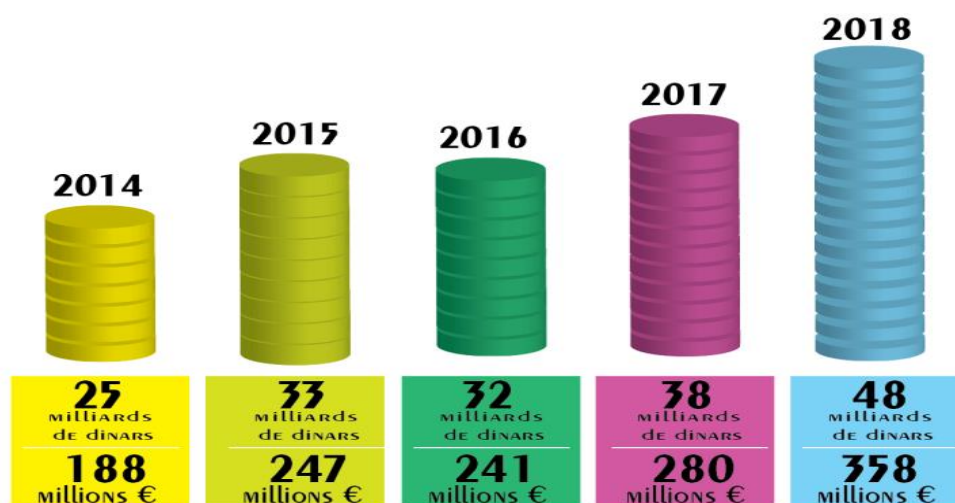


Figure I.5 : Évolution du chiffre d'affaires de GCB. [2]

I.4. Direction Engineering & Procurement (DEP/EPE)

I.4.1 Présentation de la DEP

L'Engineering & Procurement se focalise dans :

- L'étude d'engineering pétrolier et gazier d'où le pipeline, les stations de pompage de compression et de déshuilage, le raccordement des puits et manifolds, les EPF (Early Production Facility), le FEED (Front End Engineering Design), les bacs de stockage, le montage mécanique des infrastructures pétrolières et gazières, la maintenance des équipements industrielle, l'exploitation industrielle et le montage et démontage des pompes.
- Le procurment de tous les incorporables nécessaires au fonctionnement des installations industrielles.

L'ensemble des départements constituant la direction DEP/EPE se présente comme suit :

- Département Process & Safety ;
- Département Mécanique ;
- Département Piping & Pipeline ;
- Département Electricité ;
- Département instrumentation & telecom ;
- Département Protection Cathodique ;
- Département QA/QC ;
- Département Projet ;
- Département Procurement.

I.4.2 Activités mécanique pétrolière (OIL & GAS)

Le département mécanique réalise toutes les études techniques de conception, d'exécution dans les spécialités Mécanique et Tuyauterie (piping).

Les relations fonctionnelles et techniques seront :

- Avec les autres Départements de la Sous-Direction des Etudes EPE, et départements Technique ;
- La direction Réalisation et notamment les directeurs et les chefs de projets ;
- La direction commerciale ;

- La direction Achat ;
- La direction Fabrication.

a. Activité actuelle

- Etude, dimensionnement et spécification des réservoirs atmosphérique selon API650 ;
- Etude, dimensionnement et spécification des cuves sous pression selon ASME ;
- Etude, dimensionnement et spécification du matériels pour les installations de surface, ouvrages concentrés (Piping) ;
- Etude et Analyse de contrainte en statique en piping ;
- Etude de faisabilité/Expertise des installations mécaniques ayant pour objet le remplacement ou modifications ;
- Elaboration sur la base d'un cahier des charges les dossiers de consultation pour les pompes, skids de filtration, skids d'injection, déshuilage ;
- Elaboration sur la base d'un cahier des charges les dossiers de consultation du matériel de protection anti-incendie (moyens fixes, moyens mobiles).

b. Activité à long terme :

- Etude, dimensionnement et spécification des systèmes de chauffages pour les installations de bitume (réseaux, stockage) ;
- Etude, dimensionnement et spécification des chaudières, bruleurs, refroidisseurs, Aero-refroidisseurs ;
- Etude, dimensionnement et spécification des colonnes de séparation, de torchage ;
- Etude, dimensionnement et spécification des installations de forage pétrolier.

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre, un bref aperçu sur l'entreprise GCB de son métier et de ses directions est présenté. Et aussi du département mécanique de la direction engineering et procurement d'où l'étude de ce projet a été faite.

II.1 Présentation du projet [3]

II.1.1 Description du projet HRM

Le projet consiste à réaliser en EPC de deux (02) bacs de stockage d'eau traitée d'une capacité de 2000 m³ et 4000 m³, au niveau des stations de déshuilage nord et centre existantes. Avec la pose d'un réseau de transfert des eaux traitées provenant des stations boosting sud (SBS), centre (SBC) et nord (SBN) vers les deux centres déshuilage (centre et nord).

La pose d'une conduite de transfert reliant la station boosting sud et le centre de déshuilage centre, ainsi que l'installation de six (06) pompes de réinjection fournies par SONATRACH à Hassi R'mel. (Figure II.1)

L'étendue des prestations seront exécutées conformément aux règlements, codes et standards applicables en matière d'engineering, procurement et construction ainsi qu'aux spécifications et documents fournis par SONATRACH.



Figure II.1 : Position géographique du site du projet.

II.1.2 Description de l'installation nord

L'installation représente une station de pompage dont le but est l'injection d'eau traité au niveau des puits d'injection, l'installation est composée de : (Figure II.2)

- ❖ Un bac de stockage pressurisé avec du gaz inerte, de volume nominal de 2000m³, l'alimentation en eau du bac sera assurée à partir de deux (2) sources différentes :
 - Station déshuilage nord
 - Station boosting nord
- ❖ Une Station de pompage composé de deux pompes identiques et interchangeables, ont pour rôle l'aspiration de l'eau traitée du bac de stockage et son injection dans les puits. (Figure II.3)

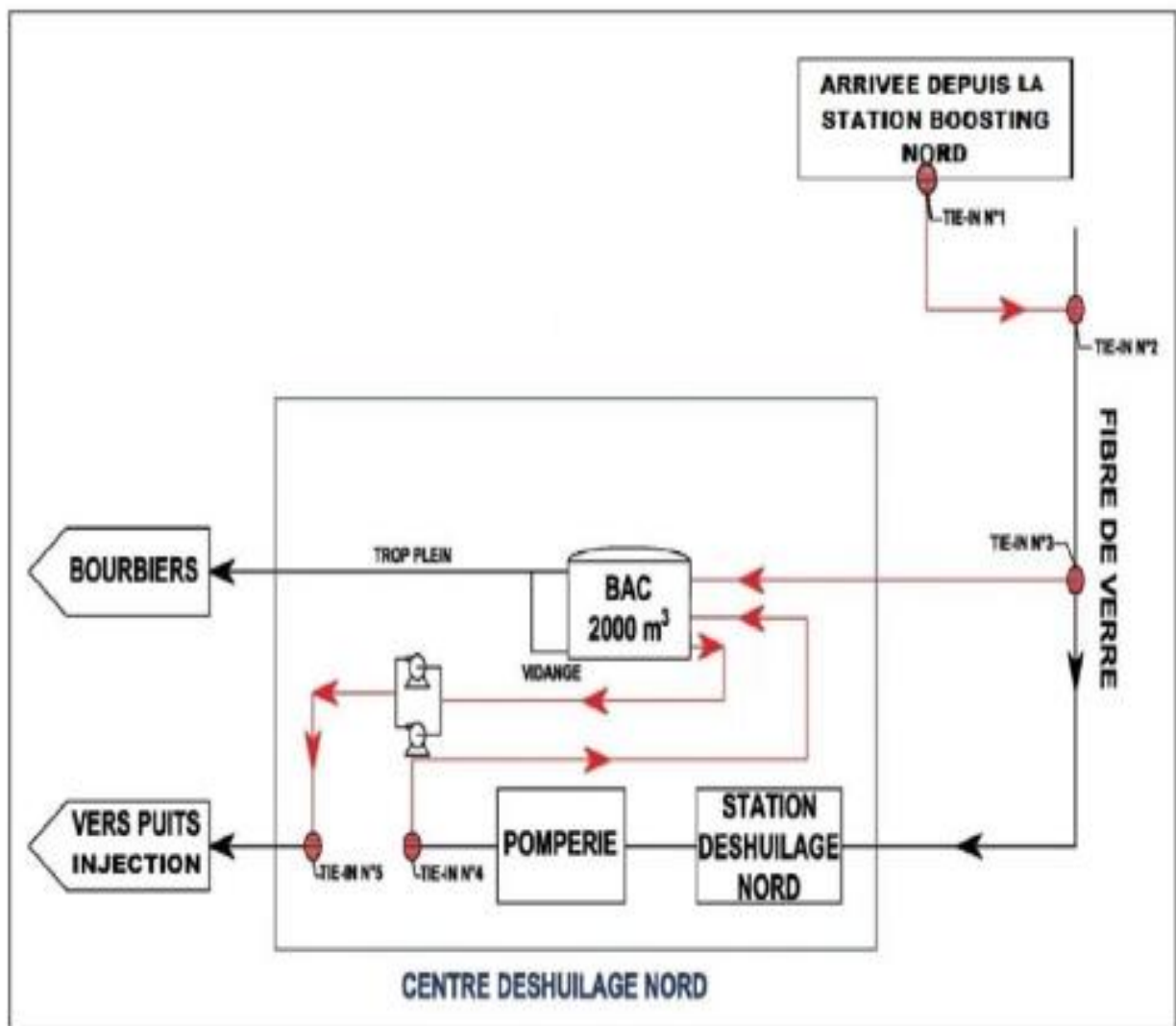


Figure II.2 : Schéma synoptique du centre de déshuilage Nord.

Chacune des pompes installées présente les caractéristiques suivantes :

- Type : Centrifuge ;
- Capacité de Conception : 40m³/h ;
- Mode d'entraînement : Moteur électrique ;
- Opération : Parallèle ;
- Puissance : 250 Kw ;
- Tension : 5.5 Kv.

Chaque pompe sera dotée d'un circuit minimum flow pour assurer la protection des pompes lors du fonctionnement en régime à débit bas. Le retour des lignes minimum flow est collecté vers le bac.

Le collecteur de refoulement de la pomperie sera relié à la ligne d'injection existante. Un débitmètre électromagnétique sera prévu ; afin de mesurer le débit total véhiculé par le collecteur.

La ligne d'injection existante actuellement, partant de la station de déshuilage Nord vers les puits d'injection, sera maintenue afin de être bypassée la nouvelle installation en cas de maintenance ou défaillance.

II.1.3 Description de l'installation centre

L'installation représente une station de pompage dont le but est l'injection d'eau traitée au niveau des puits d'injection, l'installation est composée de :

- ❖ Un Bac de stockage pressurisé avec du gaz inerte, de volume nominal de 4000m³, l'alimentation en eau traitée du bac sera assurée à partir de trois 3 sources différentes :
 - Station déshuilage centre
 - Station boosting centre
 - Station boosting Sud

- ❖ Station de pompage composée de quatre pompes, deux pompes de 40m³/h et deux pompes de 75m³/h.

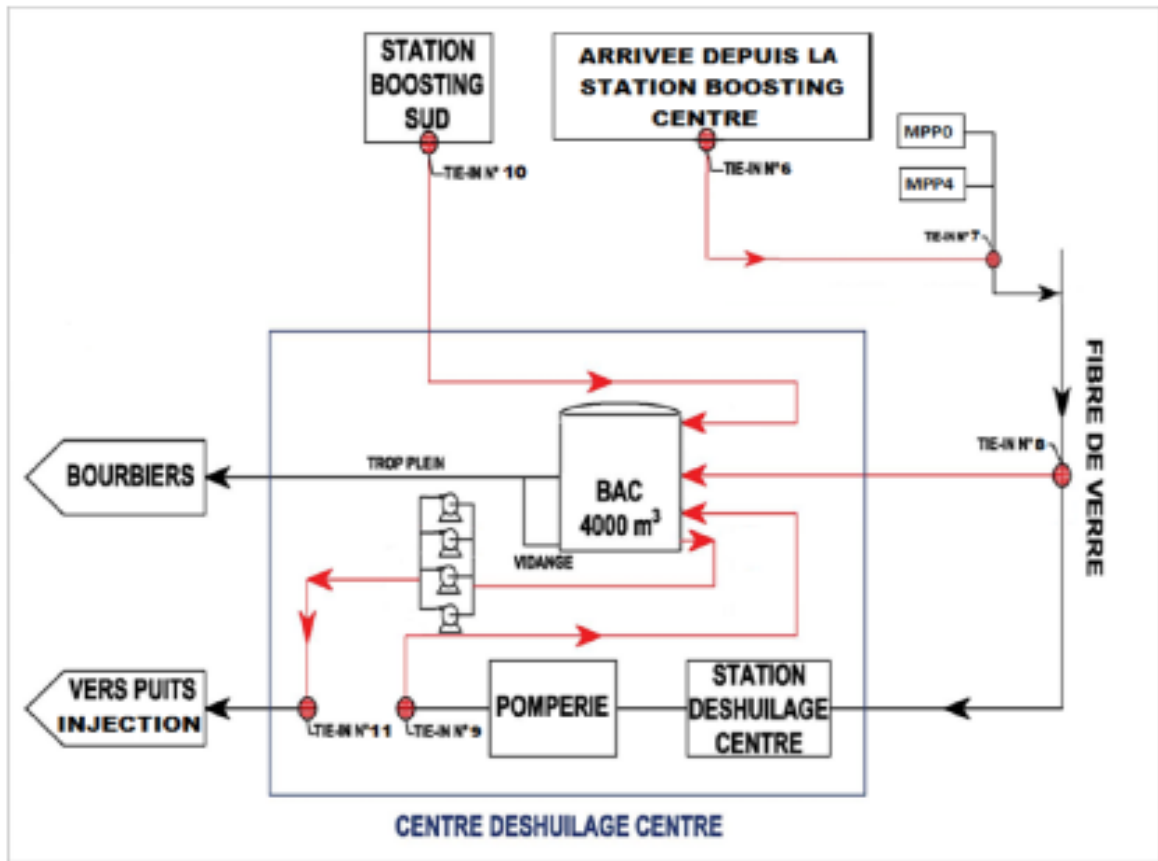


Figure II.3 : Schéma synoptique du centre de déshuilage centre.

Chacune des pompes installées présente les caractéristiques suivantes :

- Capacité de Conception : 40m³/h – 75m³/h deux à deux
- Mode d'entraînement : Moteur électrique
- Opération : Parallèle
- Puissance pompe 75 m³/h : 400 Kw
- Puissance pompe 40 m³/h : 250 Kw
- Tension : 5.5 Kv

Ces pompes sont identiques et interchangeable deux à deux, elles ont pour rôle l'aspiration de l'eau traitée du bac de stockage et son injection dans les puits.

Le collecteur de refoulement de la pomperie sera relié à la ligne d'injection existante. Un débitmètre électromagnétique sera installé afin de mesurer le débit total véhiculé par le collecteur.

La ligne d'injection existante actuellement, partante de la station de déshuilage Centre vers les puits d'injection sera maintenue afin de être bypassée la nouvelle installation (Bac + pomperie) en cas de maintenance ou défaillance.

II.2. Philosophie générale de fonctionnement [4]

II.2.1. Fonctionnement générale

Les vannes de contrôle de débit du circuit minimum flow jumelées, avec les débitmètres installés au refoulement des pompes auront un rôle primordial pour la protection des pompes, lors d'un fonctionnement à un débit bas, et surtout de leurs démarrages ; car ils permettent d'éviter des défaillances pendant la période transitoire particulière au démarrage des moteurs électriques.

Avant la mise en marche des pompes, il faut vérifier, la condition du filtre d'aspiration. La pompe ne peut pas démarrer si l'état du filtre (colmaté) ne permet pas le bon fonctionnement.

II.2.2. Fonctionnement station nord

a. Vu générale

Les deux pompes centrifuges sont de conception horizontale et multi-étage dont chacune peut refouler un débit de 40m³/h. Le nombre de pompe est en fonction du débit d'injection. Le débit sera régulé par la vanne de contrôle automatique installé sur la ligne d'injection avec le débitmètre électromagnétique qui servira à contrôler et enregistrer le débit d'injection.

Le moteur de la pompe n'est pas conçu pour fonctionner aux alentours des extrémités de la courbe des pompes ; c'est pourquoi les pompes ne peuvent être démarrées qu'avec la vanne de refoulement et la vanne de recyclage (minimum flow) en position fermée. Le moteur peut accélérer la pompe avec un voltage réduit. La vanne de recyclage restera fermée, restreindra le flow jusqu'à ce que le débit minimum de fonctionnement soit atteint, si ce débit n'est pas atteint, la pompe est arrêtée automatiquement.

La vanne de refoulement ne devra s'ouvrir que quand la ligne d'injection d'eau est pressurisée. La pressurisation de la ligne d'injection d'eau se fera progressivement par le bypass de la vanne de refoulement et le bypass de la vanne de contrôle d'injection eau

b. Mise en marche

Les pompes peuvent être démarrées localement depuis le panneau de commande local, ou à distance depuis la salle de contrôle de la station déshuilage.

Pour la mise en marche de la première pompe, le démarrage doit se faire manuellement. La procédure est indiquée ci-dessous :

1. Tous les autres systèmes, collecte de l'eau, filtration et ligne doivent avoir été mis en service et prêts au démarrage.
2. La pompe est remplie d'eau et son air est éventé.
3. Ouvrir la vanne d'aspiration.
4. Toutes les permissivités suivantes doivent être accomplies :
 - Vanne d'aspiration ouverte.
 - Vannes de refoulement et de recyclage fermées.
5. Pousser le bouton "Marche" pour démarrer la pompe. La pompe devrait démarrer si toutes les conditions sont satisfaisantes par rapport aux exigences du fournisseur. Se référer au manuel fournisseur pour plus de détail.
6. La vanne de recyclage s'ouvrira dès détection de débit minimum par le débitmètre de refoulement. Le débit minimal de recyclage doit être établi après quelques secondes du lancement de la pompe.
7. Ouvrir la vanne de by-pass située autour de la vanne de refoulement pour pressuriser la ligne d'injection.
8. Ouvrir la vanne de refoulement après que la pression de la ligne de refoulement ait atteint le point de consigne (à vérifier par le manomètre de la ligne de refoulement de la pompe).

Une fois la première pompe lancée, la ligne d'injection fonctionnera à pression élevée. La seconde pompe pourra alors être mise en marche en cas de besoin.

c. Arrêt

La pompe doit s'arrêter dans le cas de l'une des conditions suivantes :

- Très bas débit ;
- Très basse pression d'aspiration ;
- La vanne d'aspiration n'est pas en position ouverte ;
- Très basse pression sur la ligne d'injection ;
- Très haute perte de charge au niveau des filtres ;
- Très haute température des pompes ;
- Très haute température du bobinage du moteur ;
- Très hautes vibrations de la pompe ;
- Très basse pression de l'huile de lubrification ;

II.3 Problématique et objectifs

II.3.1 Problème posé

La pompe doit aspirer l'eau traitée du bac de stockage et l'injecté dans le puits. Sauf que la pression de la pompe est beaucoup trop supérieure à celle du puits, ce qui va engendrer des problèmes dans l'installation et pas mal de conséquences que vont forcer l'arrêt de la pompe.

II.3.2 Proposition de solutions

Pour régler ce problème GCB a proposé deux solutions :

1. Opté pour des vannes de régulation :
2. Adaptation d'un variateur de fréquence : installation d'un variateur de fréquence pour diminué la vitesse de rotation du moteur de la pompe pour réduire la pression.

Donc notre travail consiste à faire l'étude d'adaptation d'un variateur de fréquence au moteur (moteur asynchrone triphasé a cage d'écureuil) de la pompe.

II.3.3 Présentation et caractéristiques de la pompe

La pompe utilisée dans l'installation est une pompe type centrifuge horizontale multi-étages « 3009-P-966B Model CHTR 2/16 ».

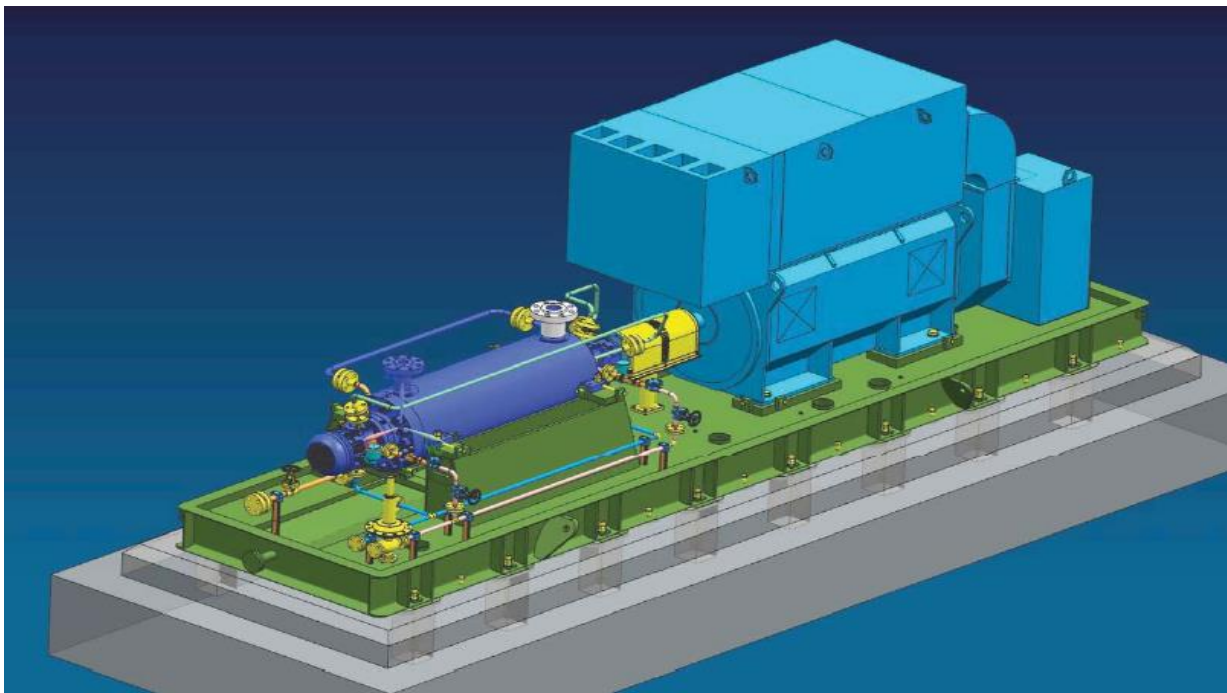


Figure II.4 : La pompe centrifuge horizontale multi-étages 3009-p-966B CHTR 2/1. [5]

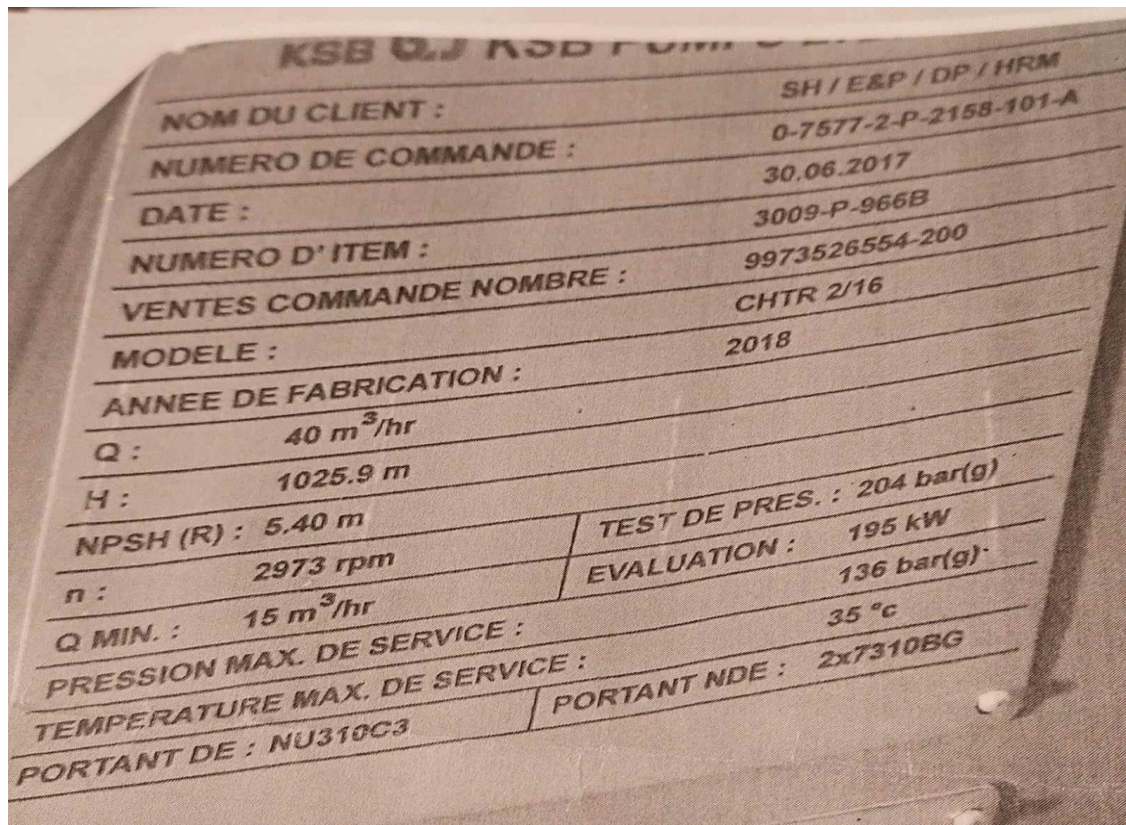


Figure II.5 : Plaque signalétique de la pompe.

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, la problématique et l'objectif de cette étude est présenté. L'une des unités les plus importantes de l'entreprise, département d'engineering et procurment, est concernée principalement par cette étude. D'où le projet de la station boosting de déshuilage a Hassi R'mel a été exposé a un problème dans l'installation des pompes d'injection.

III.1. Introduction

Les moteurs asynchrones sont les plus couramment utilisés dans l'industrie. Leur principal avantage est du fait qu'ils ne contiennent pas de contact électrique glissant ; ce qui assure une structure robuste et facile à fabriquer. Leur stator est directement connecté au réseau industriel, de tension et fréquence constante, qui tourne à une vitesse légèrement différente de la vitesse synchrone. Ils sont utilisés pour mettre en œuvre presque tous les entraînements à vitesse constante et permet également la réalisation d'entraînements à vitesse variable. La position que le moteur synchrone occupe dans ce domaine ne cesse de s'étendre.

Ce chapitre est consacré à l'élaboration d'une présentation générale du moteur asynchrone en commençant par décrire initialement ses composants, son principe de fonctionnement, ses caractéristiques et ses applications et en fin les avantages et les inconvénients. Ainsi la modélisation théorique de la machine asynchrone à cage d'écureuil.

III.2. Généralités sur les machines asynchrones

III.2.1. Classification des machines électriques tournantes

Les moteurs électriques sont généralement classés selon le type du réseau électrique dans lequel le moteur est relié : moteurs à courant continu (DC) et des moteurs à courant alternatif (AC).

Ces moteurs avec alimentation AC sont subdivisés en deux synchrones et asynchrones. La différence fondamentale entre une machine à induction et une machine synchrone réside dans la vitesse du rotor de la machine à induction sous charge ne coïncide pas (est asynchrone) avec la vitesse du champ magnétique, généré par la tension d'alimentation.

Les moteurs à induction sont divisés en deux catégories principales ; monophasé et triphasé, le premier type de moteurs à induction n'est pas écrit dans notre travail. Les moteurs à induction triphasés sont classés en fonction du type du rotor : rotor à cage et rotor bobiné. La classification principale est illustrée à la figure (III.1). [6]

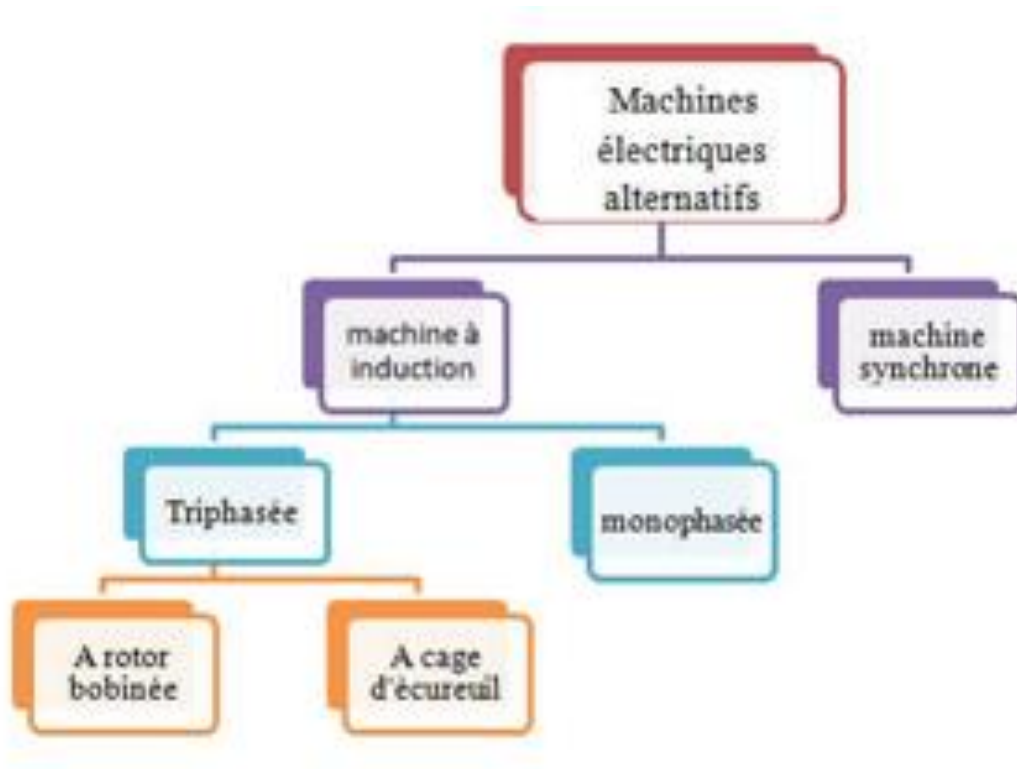


Figure III.1 : Classifications de machines électriques alternatives [6].

III.2.2. Constitution de la machine asynchrone [7]

La machine asynchrone est composée d'une partie fixe appelée stator et d'une partie tournante appelée rotor (figure III.2). Contrairement aux machines synchrones et à courant continu, seuls les enroulements statoriques sont couplés à un réseau d'alimentation dont les tensions (amplitude et fréquence) définissent l'état magnétique de l'entrefer. Les enroulements du rotor sont raccordés sur eux-mêmes.

Le moteur asynchrone ne possède donc ni enroulement d'excitation ni aimants permanents. Pour ce qui est du flux rotorique nécessaire pour la formation du couple électromagnétique, il est produit à partir de l'induction. La figure (III.2) représente la machine asynchrone. Du point de vue mécanique, la machine asynchrone est subdivisée en trois parties distinctes :

- Le stator : partie immobile est la partie où est connectée l'alimentation électrique
- Le rotor : partie tournante, elle permet de mettre en rotation la charge magnétique
- Les paliers : organes de support, ces derniers constituent la partie mécanique Permettant ainsi la mise en rotation de l'arbre moteur.
- L'entrefer : Cette partie est amagnétique (c'est le vide entre le rotor et le stator). [7]

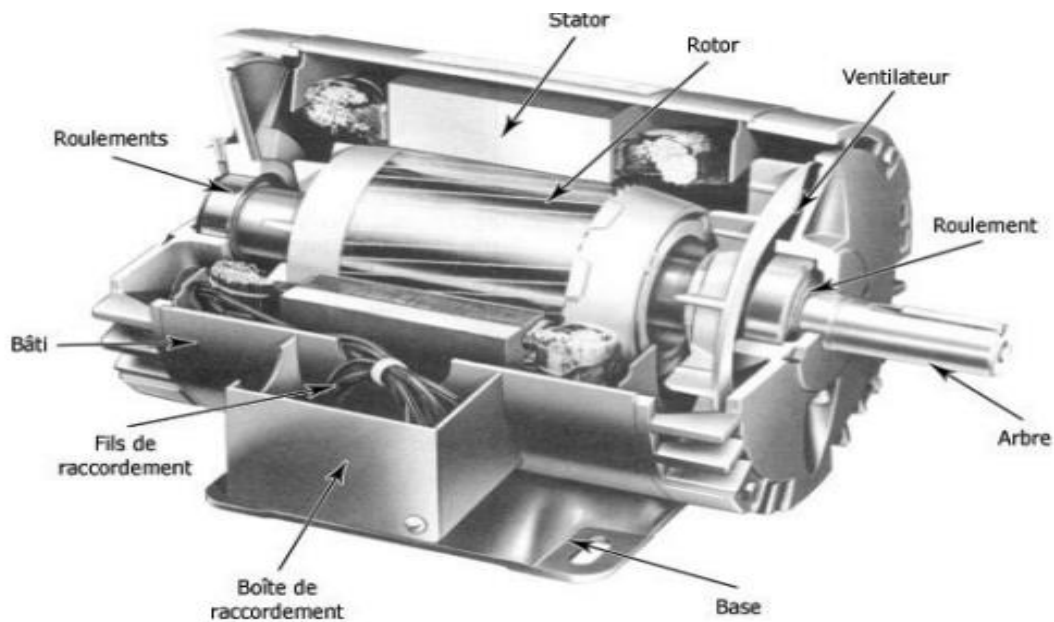


Figure III.2 : Constitution de la machine asynchrone. [8]

III.2.2.1. Le stator

C'est la partie fixe du moteur ou une carcasse en fonte ou en alliage léger renferme une couronne de tôles minces (de l'ordre de 0,5 mm d'épaisseur) en acier au silicium. Les tôles sont isolées entre elles par oxydation ou par un vernis isolant. Le « feuilletage » du circuit magnétique réduit les pertes par hystérésis et par courants de Foucault. Les tôles sont munies d'encoches dans les quelles prennent place les enroulements statoriques destinés à produire le champ tournant (trois enroulements dans le cas moteur triphasé). Chaque enroulement est constitué de plusieurs bobines. Le mode de couplage de ces bobines entre elles définit le nombre de paires de pôles du moteur, donc la vitesse de rotation. [9]



Figure III.3 : Schéma présente l'enroulement du stator [9].

III.2.2.2. Le rotor

C'est la partie mobile du moteur qui se compose d'un empilement de tôles minces isolées les unes des autres et formant un cylindre claveté sur l'arbre moteur.

On distingue deux types de rotor dans la machine asynchrone :

a. Rotor à cage

Tous les conducteurs du rotor sont reliés entre eux par deux bagues. Ces bagues placent les conducteurs en court-circuit, de manière permanente (Figure2). Les limites du moteur asynchrone à cage d'écureuil se situent lors du démarrage ou le couple et/ou le courant ne sont pas raisonnables. [10]

Ce type de moteur est utilisé pour les petites puissances ou pour des puissances élevées n'ayant pas besoin de démarrage à pleine charge. [10]

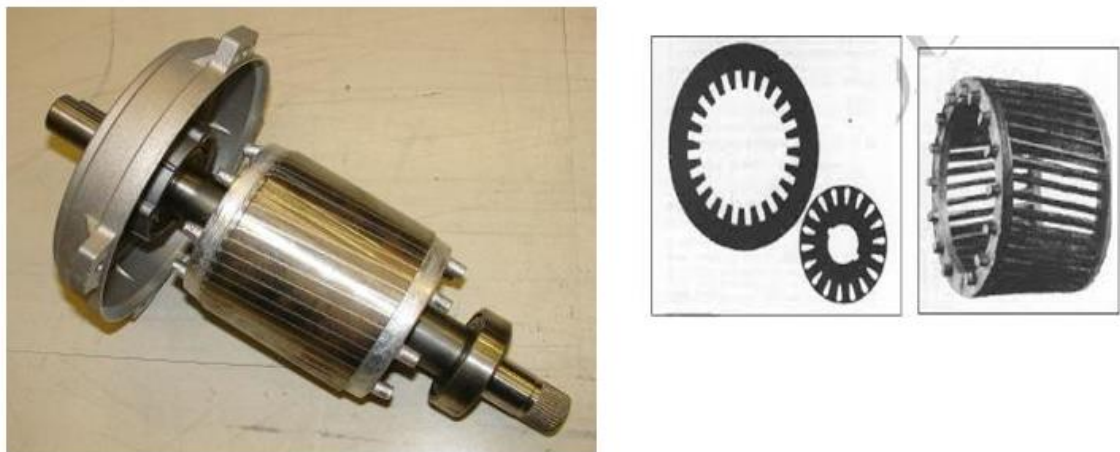


Figure III.4.a : Rotor à cage [10].

b. Rotor à bague

Chaque phase est reliée à une bague, sur laquelle vient frotter un balai utilisant les bobinages rotoriques à l'extérieur (Figure 3). Pour augmenter le couple à faible vitesse de rotation, il faudrait agir sur le courant circulant dans le rotor. Dans le cas d'un moteur à cage, le rotor massif est inaccessible. [10]



Figure III.4.b : Rotor à bague [10].

III.2.2.3. L'entrefer

Cette partie amagnétique (c'est un vide entre le stator et le rotor) est d'épaisseur la plus faible (de l'ordre du millimètre), cette épaisseur réduite rend la taille de l'entrefer sensible aux variations dues aux encoches statoriques. Ceci crée des harmoniques dites d'encoches, pour les réduire, les encoches sont fermées par des cales magnétiques qui maintiennent le bobinage. [6]

III.2.2.4. Les organes mécaniques

- **La carcasse** sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur.
- **L'arbre** est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces derniers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation.
- **Le second palier** est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre. [6]

Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dû aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique. Ils sont généralement à roulements. [2]

Pour les machines de petite et moyenne puissance. Dans La plupart du temps on trouve aussi un ventilateur de refroidissement. [6]

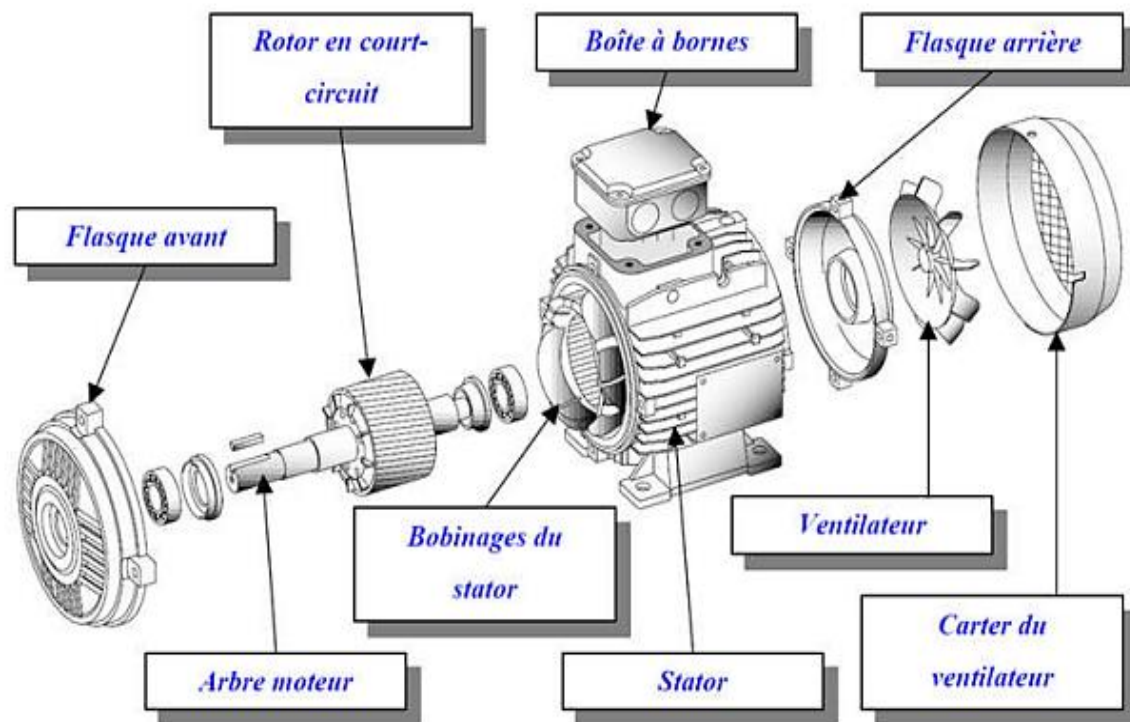


Figure III.5 : Schéma désignant les éléments constituant une machine asynchrone [6].

III.2.3. Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone

Le principe de fonctionnement de la machine asynchrone est basé entièrement sur la loi de l'induction ; la machine asynchrone est considérée comme un transformateur à champ magnétique tournant dont le stator étant comparable à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire en court-circuit. Ce fonctionnement repose sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant, crée par les courants triphasés fournis à l'enroulement statoriques par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant. [11]

Lorsque le rotor tourne à une vitesse N_s différente du synchronisme, l'application de la loi de FARADAY à un des enroulements rotoriques montre que celui-ci devient le siège d'une force électromotrice ; qui étant court-circuité sur les enroulements ; qui donne naissance à un courant dont l'intensité est limitée par l'impédance de ce dernier. [11]

L'interaction entre ce courant et le champ glissant donne naissance à des forces s'exerçant sur les brins du rotor dont le moment par rapport à l'axe de rotation constituera le couple de la machine lorsque le champ est sinusoïdale vitesse de rotation est :

$$n_1 = \frac{f}{p} \quad (\text{III.1})$$

Avec :

f : la fréquence d'alimentation.

P : nombre de pair de pôles.

L'interaction électromagnétique des deux parties de la machine n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant (n_1) diffère de celle du rotor (n), c'est-à-dire lorsque $n \neq n_1$, car dans le cas contraire ($n = n_1$), le champ serait immobile par rapport au rotor et aucun courant ne serait induit dans l'enroulement rotorique. [11]

Le rapport :

$$g = \frac{n_1 - n}{n_1} : \text{glissement de la machine asynchrone. [11]}$$

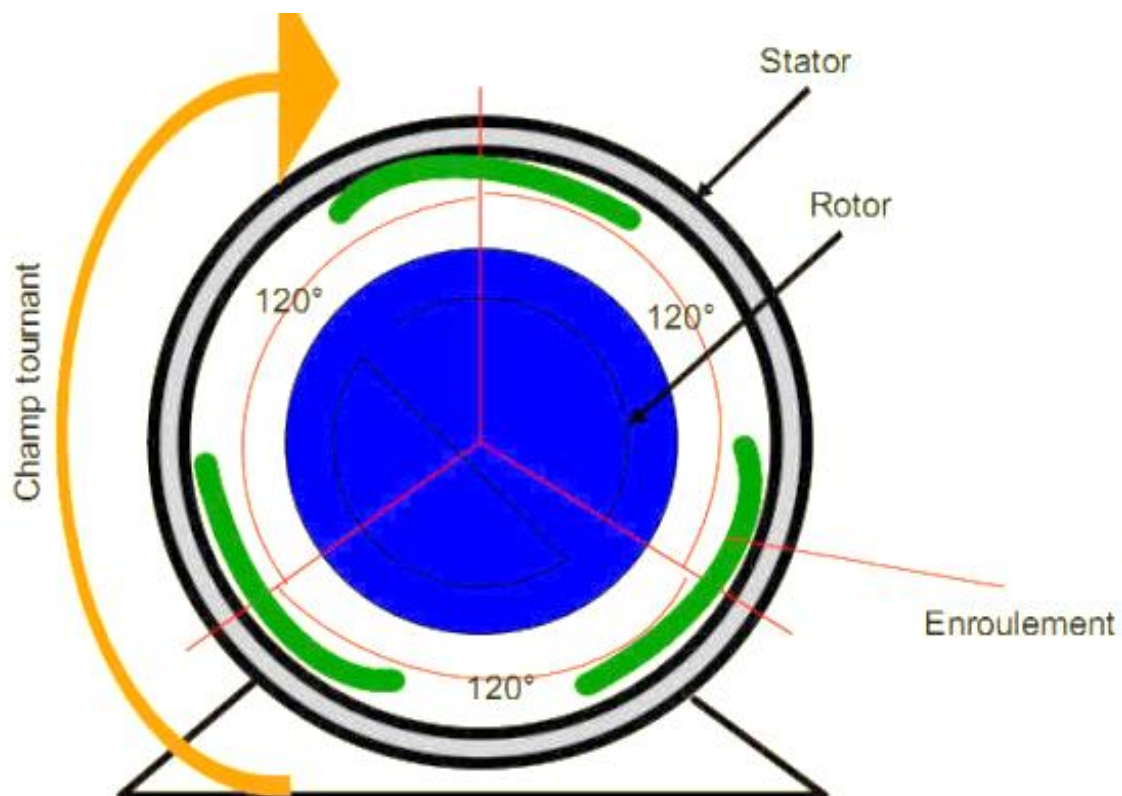


Figure III.6 : Schéma présent principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone [11].

III.2.4. Plaque signalétique

La plaque signalétique est positionnée généralement sur le dessus du moteur électrique. Il s'agit d'une plaque en métal regroupant un tableau qui comprend les caractéristiques techniques du moteur.

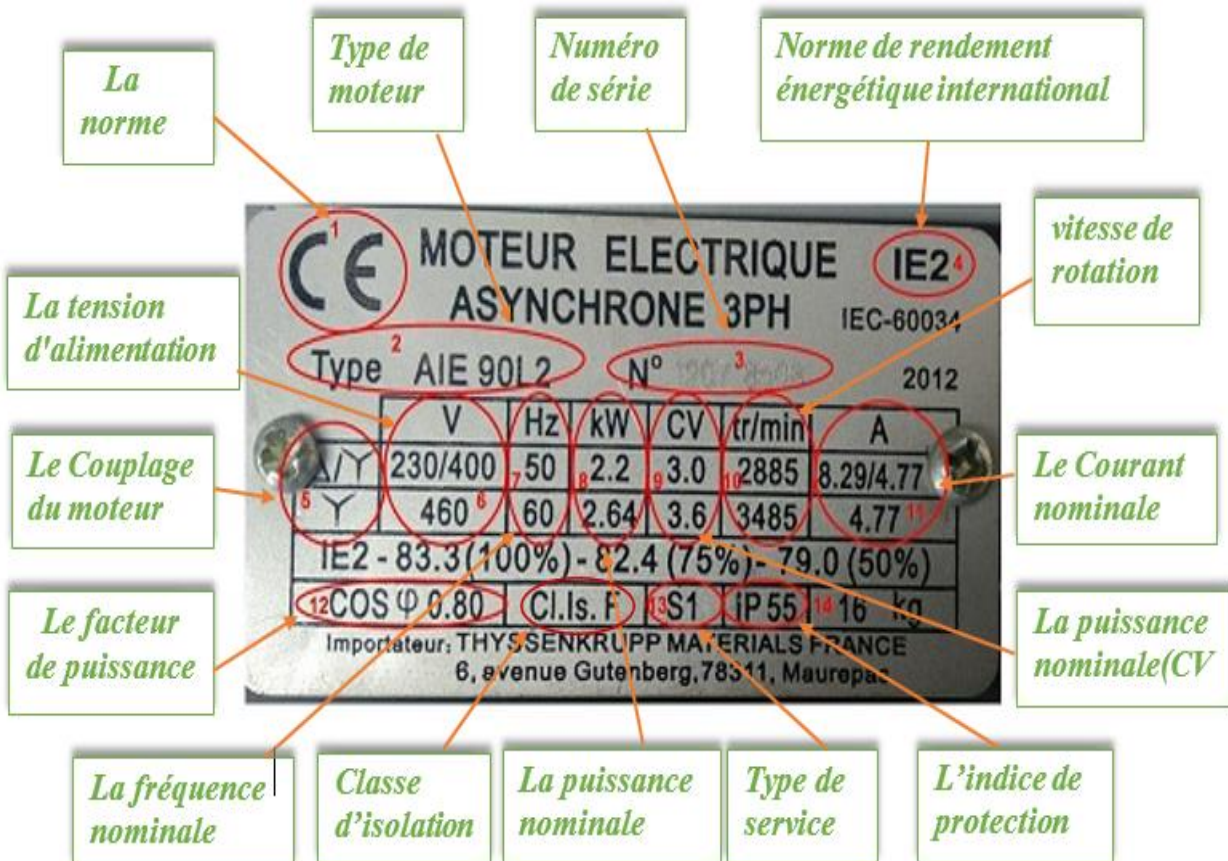


Figure III.7 : Plaque signalétique d'un moteur asynchrone triphasé [12].

III.2.5. Les Types des moteurs asynchrones

Il existe plusieurs types de moteurs asynchrones. On retrouve :

➤ **La machine asynchrone à rotor bobiné :**

Dans un moteur à rotor bobiné on retrouve 3 enroulements (bobines) en périphérie du rotor qui sont reliés à des bagues. Sur ces bagues viennent frotter des balais qui vont alimenter le rotor.

Le moteur bobiné est utilisé pour des applications qui demandent un fort couple au démarrage et beaucoup de puissance (ex : l'industrie minérale). Ce type de moteur offre la possibilité de diminuer ou augmenter la résistance du rotor.

➤ **La machine asynchrone à cage**

Dans un moteur à cage, appelé aussi moteur à cage d'écureuil, on trouve un rotor en circuit court. Le rotor est constitué de barres (souvent en aluminium) qui sont fixées à chaque extrémité à un anneau. La succession de barres reliées aux 2 anneaux forment ce que l'on appelle la cage d'écureuil.

Ici, pas de balais d'alimentation, ce qui réduit les coûts d'entretien du moteur. Sa construction simple facilite également son entretien. Les moteurs à cage sont aussi considérés comme plus résistants.

C'est le moteur le plus utilisé dans l'industrie, du fait de son prix, de sa facilité d'entretien, de sa robustesse mais aussi de la possibilité de faire varier la vitesse électroniquement.

Le point noir d'un moteur à cage est qu'il possède un couple de démarrage faible. On réserve les moteurs à cage pour les cas où le démarrage demande une faible charge (machines-outils, pompes, ventilateurs...) et on les évite pour les cas de démarrage en charge (ex : ascenseurs).

➤ **Les moteurs à double cage**

Il se compose de deux cages à écureuil, une pour le démarrage (à l'extérieur) et une pour le fonctionnement normal du moteur (à l'intérieur). Il combine les caractéristiques du moteur à cage avec les qualités du moteur à rotor bobiné

➤ **Le moteur à encoches profondes**

Il utilise l'effet pelliculaire (l'effet de peau), grâce à des encoches plus profondes dans le rotor pour optimiser le démarrage.

On obtient avec ces deux modèles un meilleur couple de démarrage : ils sont plus adaptés aux démarrages en charge que les moteurs à cage simple.

➤ **La machine asynchrone à double alimentation**

C'est un dispositif qui permet la commande de la vitesse et la consommation de la puissance réactive d'une machine à rotor bobiné, En cas de la réduction de la vitesse, ce montage à l'avantage de ne pas diminuer le rendement.

Cette technique consiste à placer un convertisseur de fréquence entre le réseau électrique et l'alimentation du rotor de moteur.

➤ La machine asynchrone double étoile

Elle se compose d'un stator portant deux enroulement identiques et décalés d'un angle $\alpha=30$ degrés et d'un rotor a cage d'écureuil.

III.2.6. Le bobinage d'un moteur asynchrone

Les bobines sont logées dans les encoches du stator. Le branchement des bobines sur le réseau se fait au niveau de la plaque à borne située au-dessus du moteur. On dispose ainsi de 6 connexions, une pour chacune des extrémités des trois bobines [13].

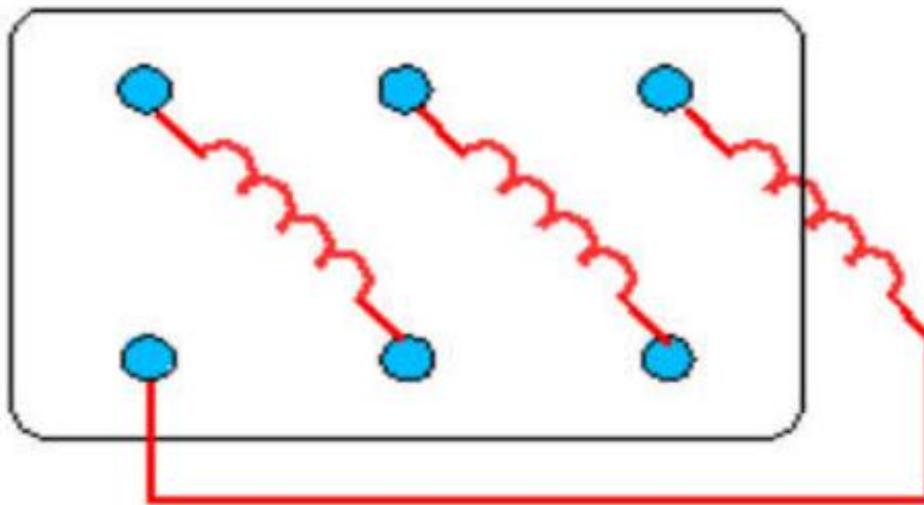


Figure III.8 : Branchements des bobines internes de la machines asynchrone [13].

La disposition des bobines dans les encoches différencie ces types d'enroulement ; d'où on trouve habituellement trois types : l'enroulement imbriqué, concentrique et ondulé.

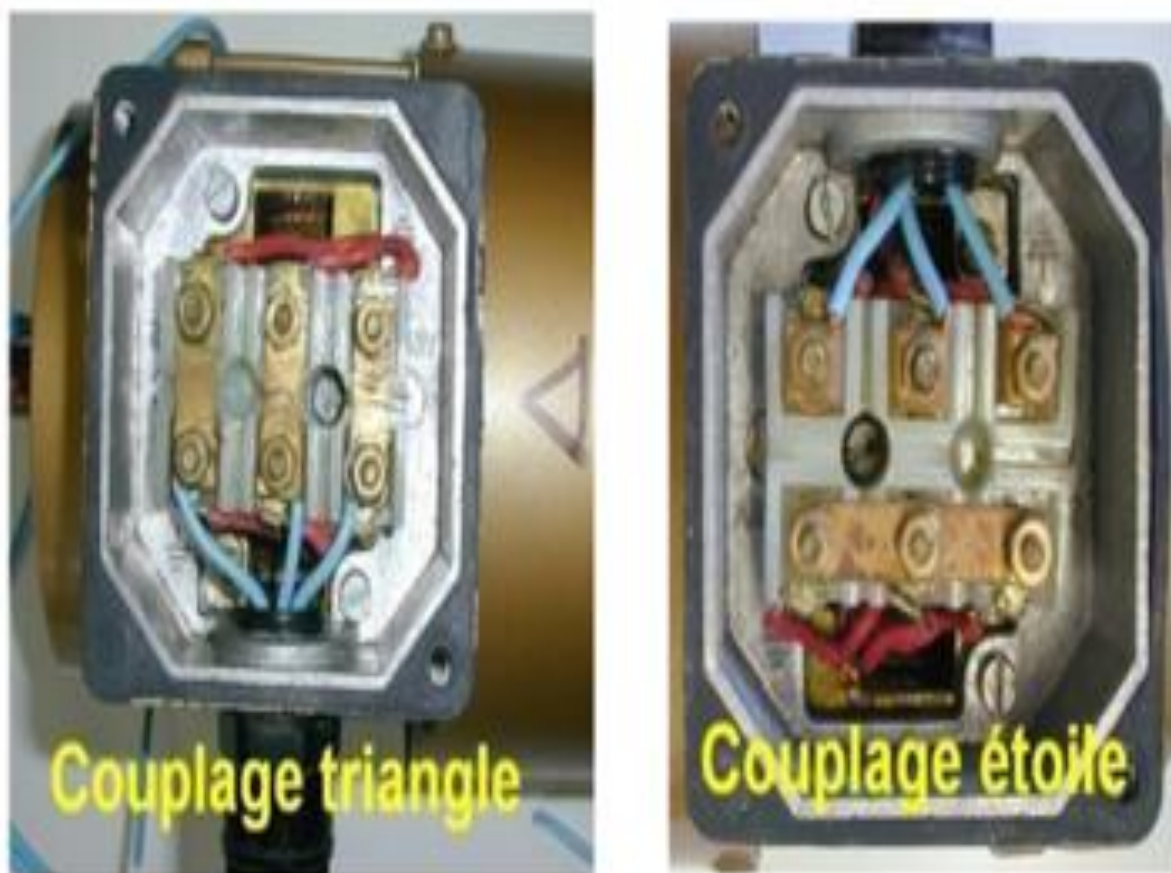
III.2.7. Choix du couplage

Il existe deux possibilités de branchement du moteur au réseau électrique triphasé. Le montage en étoile et le montage en triangle :

- Si la plus grande tension de la plaque signalétique du moteur correspond à la tension entre phase du réseau, on adopte le couplage Y. [10]
- Si la plus petite tension de la plaque signalétique du moteur correspond à la tension entre phase du réseau on adopte le couplage Δ . [10]

Tableau III.1 : Choix de couplage [10].

Réseau d'alimentation		Plaque signalétique		couplage
Tension simple	Tension composée	Tension d'un enroulement	Tension entre deux enroulements	
230 V	400 V	230 V	400 V	Y
230 V	400 V	400 V	690 V	Δ

**Figure III.9** : Couplage étoile/triangle d'un moteur asynchrone [10]

III.2.8. Bilan des puissances

Le principe de MAS consiste à transmettre une puissance absorbée (électrique) vers une puissance utile (mécanique) passe par quelque étapes (Figure III.10). [11]

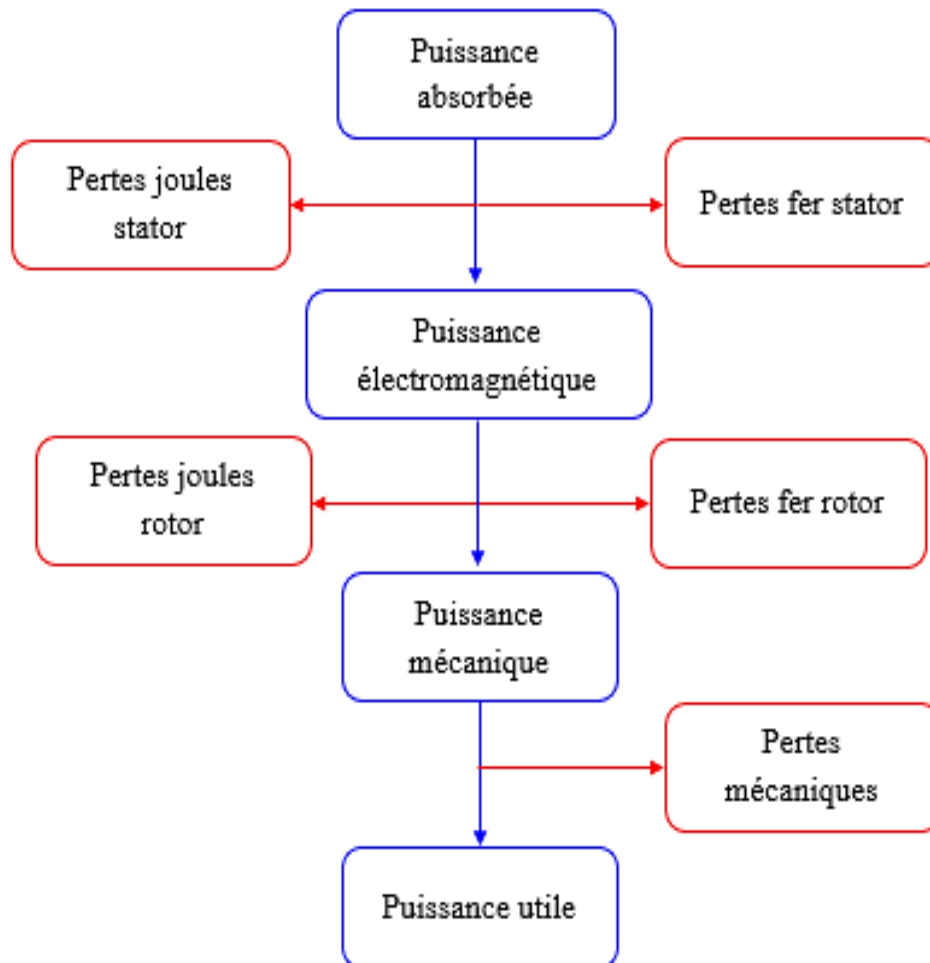


Figure III.10 : bilan de puissance d'une machine asynchrone. [10]

- **Puissance absorbée**

La puissance absorbée par un moteur asynchrone est une puissance active électrique. Lorsque le moteur est connecté à un réseau triphasé, P_a vérifie la relation :

$$P_a = \sqrt{3}U_1I_1\cos\phi. \quad (\text{III.2})$$

- **Pertes par effet joule au stator :**

Le stator peut être câblé en étoile ou en triangle. Puisque le moteur constitue un récepteur triphasé équilibré, alors [9] :

$$P_{JS} = \frac{3}{2} R_m I_1^2 \quad (\text{III.3})$$

Dans le montage étoile, la résistance entre deux bornes R_1 est reliée à la résistance de chaque enroulement R_m par la relation [9] :

$$R_m = 2 R_1 \quad (\text{III.4})$$

Dans le montage triangle, cette relation devient [9]:

$$R_m = (2/3) R_1. \quad (\text{III.5})$$

- **Pertes fer au stator :**

Elles ne dépendent que de la tension U et de la fréquence f et sont donc constantes si le moteur est couplé au réseau. [9]

- **La puissance électromagnétique :**

$$P_{em} = 3 \frac{R_r}{g m^2} I_2'^2 = \frac{R_r}{g} I_2'^2 \quad (\text{III.6})$$

$$P_{em} = T_{em} \Omega_s = T_{em} \frac{\omega_s}{p}$$

- **Perte joule au rotor :**

$$P_{Jr} = 3 R_r I_2'^2 = g P_{em} \quad (\text{III.7})$$

- **La puissance mécanique :**

$$P_m = T_{em} \Omega_s = T_{em} (1-g) \Omega_s = P_{em}(1-g) \quad (\text{III.8})$$

- **La puissance utile :**

$$P_u = T_u \Omega_r = T_u (1-g) \Omega_s \quad (\text{III.9})$$

- **Les pertes mécaniques :**

$$P_{mé} = f_v \Omega_r^2 = P_u - P_{mé} ; \quad (\text{III.10})$$

Avec f_v est le coefficient de frottement.

III.2.9. Le choix d'un moteur asynchrone

III.2.9.1 Critères de choix

Le choix d'un MAS et de son mode de démarrage dépend de :

- La puissance installée du réseau d'alimentation.
- La tension d'alimentation du moteur doit être compatible à celle du réseau.
- La chute de tension du démarrage doit être $\leq \pm 5\%$ de la tension du réseau.
- Le MAS doit être choisi pour fonctionner à la puissance nominale (le rendement et le facteur de puissance sont les meilleurs).
- Le couple du moteur doit être supérieur à chaque instant au couple résistant de la machine à entrainé.

Le couple résistant, la puissance et réseau constituent les facteurs principaux pour le choix d'un moteur asynchrone triphasé et son mode de démarrage. [10]

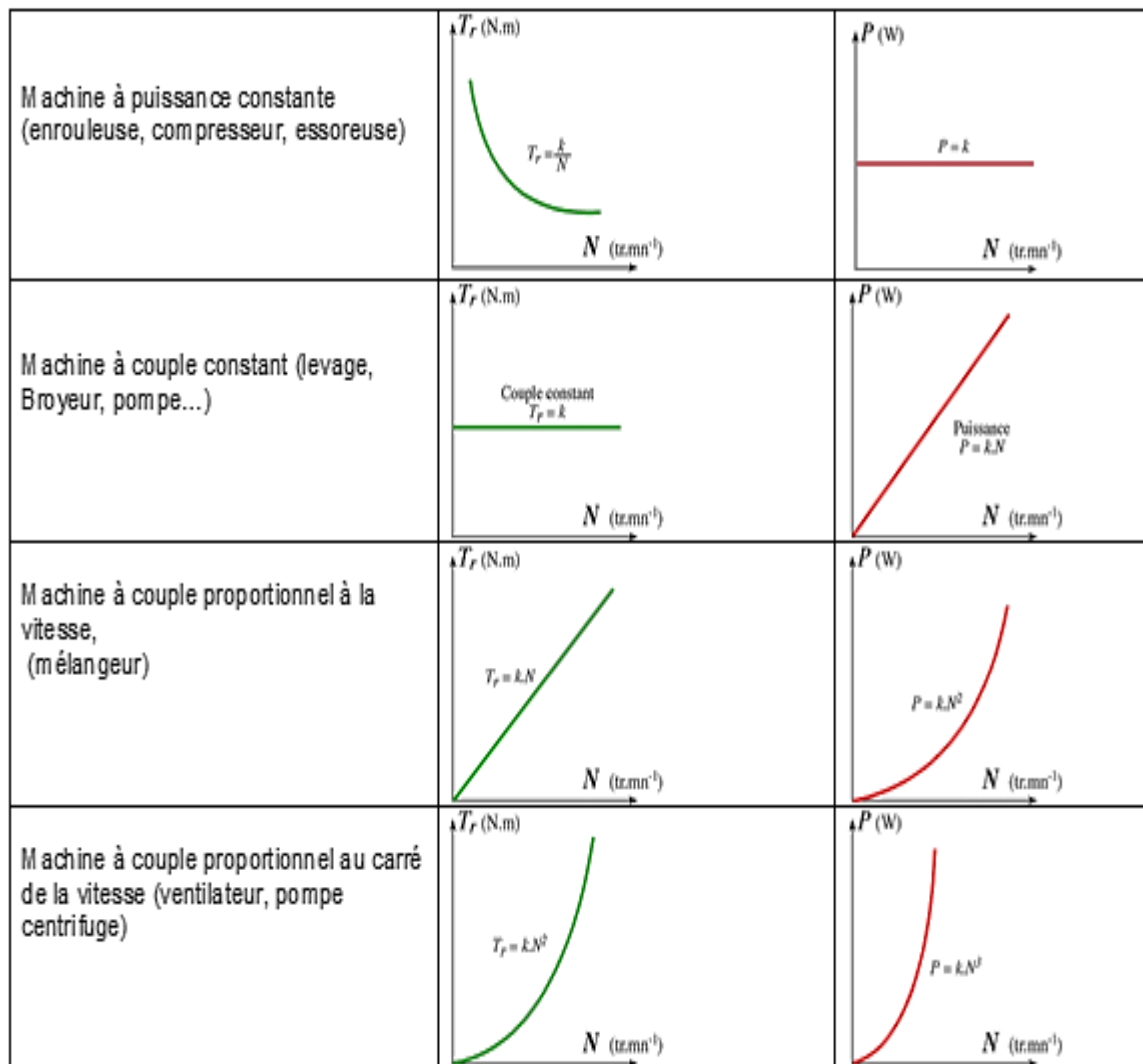


Figure III.11 : Les divers couples résistant. [10]

III.2.9.2 Le couple de démarrage

Pour que le moteur entraîne une machine, il lui faut un couple de démarrage. Celui-ci doit d'une part décoller la masse (de moment d'inertie J) de la machine et d'autre part vaincre le couple résistant relatif à la machine. [10]

On désigne par T_a le couple d'accélération (qui n'existe que pendant la mise en vitesse de la masse d'inertie J). ainsi le couple de démarrage T_d peut se calculer :

$$T_d = T_a + T_r \quad (\text{III.11})$$

Avec T_r : le couple résistant.

Au moment du démarrage, le couple moteur est en moyenne de 1,5 à 2 fois le couple nominale.[10]

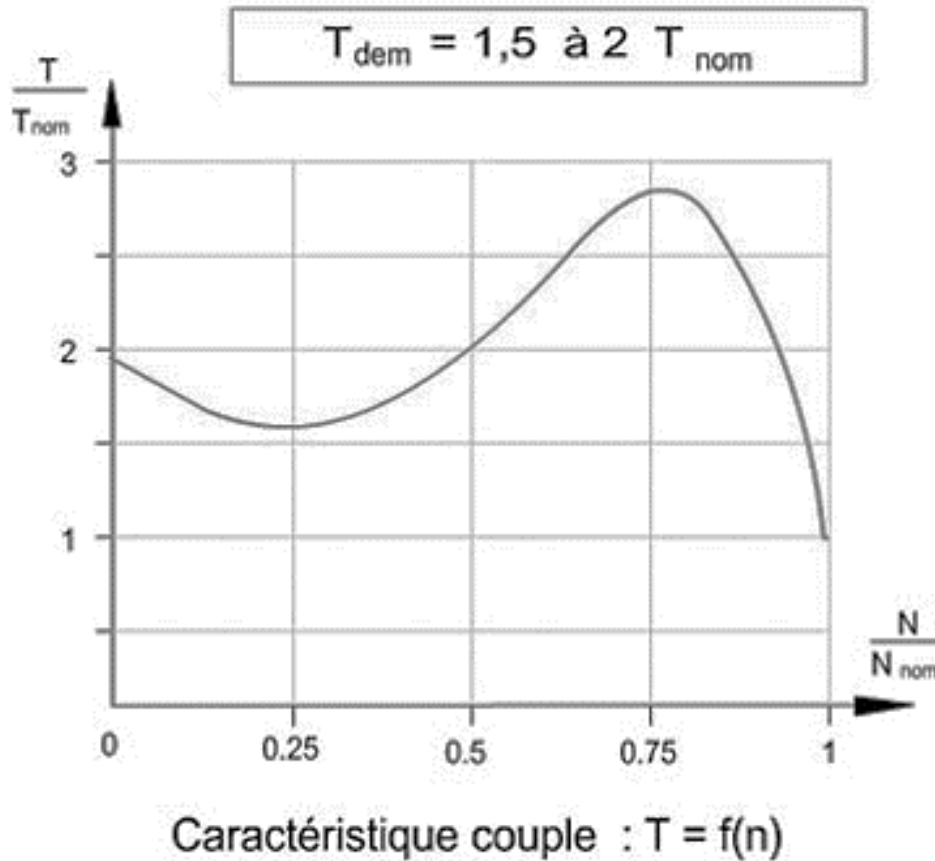


Figure III.12 : Courbe de couple du moteur asynchrone (démarrage direct). [10]

III.2.9.3 Couple d'accélération

Le couple d'accélération sera plus ou moins important, selon le temps mis à la machine à entrainer pour atteindre sa vitesse nominale. Il dépend des masses à mettre en mouvement (J) et de la variation de la vitesse de rotation (vitesse angulaire) dans le temps. [10]

$$T_a = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{III.12})$$

Avec : T_a : couple d'accélération en Nm.

J : moment d'inertie des masses à mettre en mouvement en Kg.m^2 .

$d\Omega$: variation de vitesse angulaire en rad/s $\Omega = 2.\pi.n$

dt : durée de démarrage en s.

III.2.10. Démarrage du moteur asynchrone

Les principaux modes de démarrage sont :

- Démarrage direct.
- Démarrage progressif.
- Démarrage sous tension réduite.
- Démarrage étoile-triangle.
- Démarrage statorique à résistance.
- Démarrage par variateur de vitesse.

III.2.11. Domaine d'utilisation

On retrouve la MAS aujourd'hui dans de nombreuses applications quotidiennes comme le transport (trains, métro...), les pompes, la production de l'énergie électrique (éolienne), l'industrie (machine et outils), etc.

III.2.12. Avantages et inconvénients de la machine asynchrone

Comme les autres machines électriques, la MAS présente quelques avantages et inconvénients qui sont liés à plusieurs facteurs : sa structure, sa stratégie de commande et ses applications [14].

a. Avantages

Parmi les avantages de la machine asynchrone et notamment en fonctionnement moteur, on peut citer [14] :

- sa robustesse mécanique.
- son faible coût.
- l'absence d'entretien constant.

b. Inconvénients

Les inconvénients majeurs du moteur asynchrone sont liés à :

- L'absorption du réactif qu'il faut parfois compenser, à des pertes de glissement et surtout à la nécessité de fonctionner pratiquement au voisinage de la vitesse de synchronisme.
- Le courant de démarrage plus élevé (5 à 8 fois le courant nominal).
- Difficile de contrôler la vitesse [14].

III.2.13. Maintenance du moteur asynchrone

Le moteur asynchrone rencontre plusieurs défaillances lors de son utilisation. Le tableau suivant (tableau III.2) montre les divers moyens de maintenance pour chaque cause.

Tableau III.2 : Plan de la maintenance préventive d'un moteur asynchrone. [10]

Défauts	Causes	Remèdes
Le moteur ne démarre pas	Alimentation coupée	Vérifier et corrigé le raccordement
Le moteur démarre difficilement	Moteur prévu en démarrage triangle mais raccordé en Etoile	corrigé le raccordement
Mauvais sens de rotation	Moteur mal raccordé	Inversé deux phase du réseau
Le moteur refoule est absorbe beaucoup de courant	Bobinage défectueux Le rotor frotte	Amené le moteur un établissement de réparation
Fusible sautent ou disjonctent	Court-circuit dans les câbles d'alimentation	Eliminé le Court-circuit
	Court-circuit dans le moteur	Faire Eliminé le Court-circuit dans un établissement agréé
	Câbles mal raccordé	Corrigé le raccordement
	Défaut à la terre du moteur	Faire Eliminé le Court-circuit dans un établissement agréé

Sous charge, vitesse fortement réduite	Surcharge	Faire une mesure de puissance et installer un moteur plus grand ou réduire la charge si nécessaire
	Chute de tension	Augmenté la sélection du câble d'alimentation
Moteur trop chaud	Surcharge	Faire une mesure de puissance et installer un moteur plus grand ou réduire la charge si nécessaire
	Ventilation insuffisante	Dégager les couloirs de ventilation
	Température ambiante trop élevé	Respecter la plaque de température autorisée
	Moteur branché en triangle non en Etoile	Corrigé les raccordements
	Mauvais contacte au niveau du câble d'alimentation	Supprimé les mauvais contacts

III.3. Modélisation du moteur asynchrone triphasé

III.3.1 Les hypothèses simplificatrices [15]

Le modèle de la machine est établi en tenant compte des hypothèses de base suivantes :

- La machine est symétrique à entrefer constant ;
- La répartition dans l'entrefer de la FMM et du flux est sinusoïdale ;
- Le circuit magnétique n'est pas saturé et à perméabilité constante ;
- Les pertes fer par hystérésis et courants de Foucault, l'effet de peau et les effets de dentures sont négligeables ;
- L'effet des encoches est négligeable.

III.3.2 Représentation des enroulements de la machine

La machine est représentée à la (Figure III.13) par six enroulements dans l'espace électrique ; l'angle(θ) définie la position du rotor/stator. Les grandeurs statoriques (tension, courant et flux) sont exprimées dans un repère stationnaire.

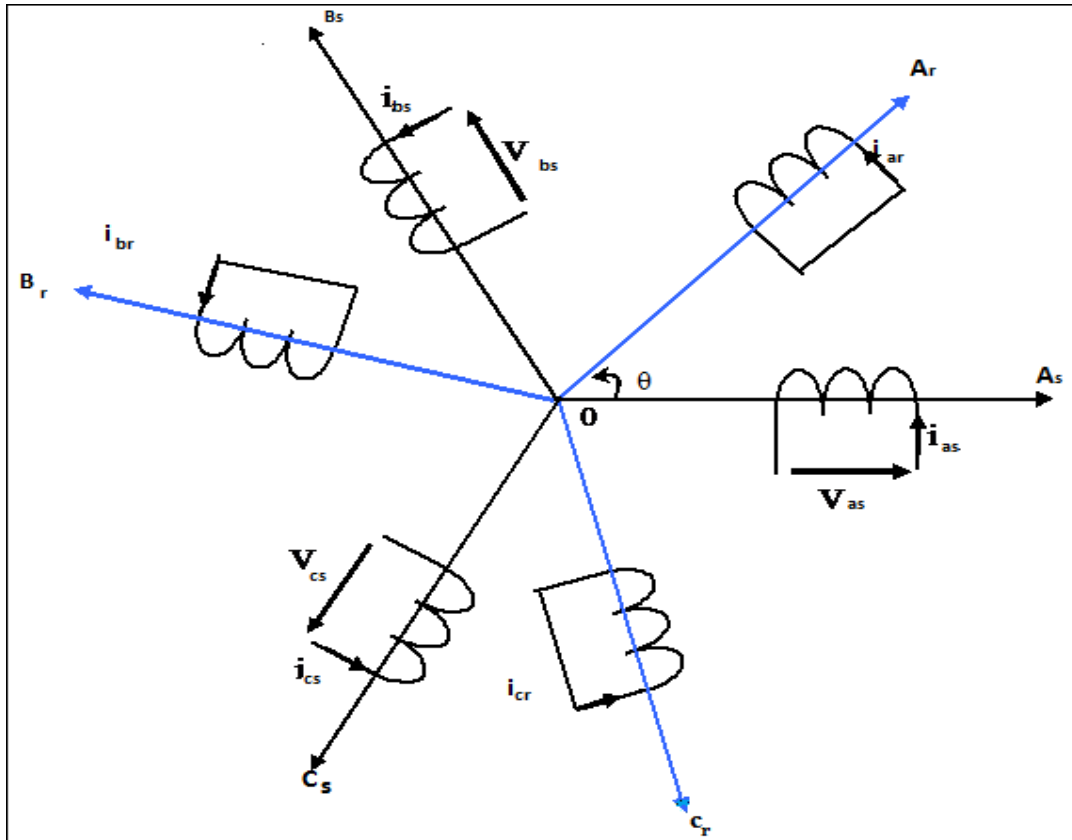


Figure III.13. Modèle de la machine asynchrone dans le repère triphasé.

Les équations de la tension statoriques et rotoriques sont données par :

$$\begin{cases} V_{sa}(t) = R_s I_{sa}(t) + \frac{d\varphi_{sa}(t)}{dt} \\ V_{sb}(t) = R_s I_{sb}(t) + \frac{d\varphi_{sb}(t)}{dt} \\ V_{sc}(t) = R_s I_{sc}(t) + \frac{d\varphi_{sc}(t)}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

$$\begin{cases} V_{ra}(t) = R_r I_{ra}(t) + \frac{d\varphi_{ra}(t)}{dt} \\ V_{rb}(t) = R_r I_{rb}(t) + \frac{d\varphi_{rb}(t)}{dt} \\ V_{rc}(t) = R_r I_{rc}(t) + \frac{d\varphi_{rc}(t)}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

Dans la machine asynchrone (MAS), il y a six bobines couplées magnétiquement, chacune d'entre-elle va influencer ses voisines. Les tensions que l'on retrouve aux bornes de ces bobines vont donc être marquées par les mutuelles inductances des autres. Ainsi, il vient les équations suivantes liant les trois bobines du stator et les trois bobines du rotor :

$$V_{sa} = R_{s1}I_{sa} + l_{sa} \frac{dI_{sa}}{dt} + \frac{d}{dt} [M_{s12}I_{sb} + M_{s13}I_{sc}] + \frac{d}{dt} \left[M_{sr11}I_{ra} \cos p\theta + M_{sr12}I_{rb} \cos\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + M_{sr13}I_{rc} \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (\text{III. 15})$$

$$V_{sb} = R_{s2}I_{sb} + l_{sb} \frac{dI_{sb}}{dt} + \frac{d}{dt} [M_{sab}I_{sa} + M_{sbc}I_{sc}] + \frac{d}{dt} \left[M_{sr22}I_{rb} \cos p\theta + M_{sr23}I_{ra} \cos\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + M_{sr21}I_{rc} \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (\text{III. 16})$$

$$V_{sc} = R_{s3}I_{sc} + l_{sc} \frac{dI_{sc}}{dt} + \frac{d}{dt} [M_{sac}I_{sa} + M_{sbc}I_{sb}] + \frac{d}{dt} \left[M_{sr33}I_{rc} \cos p\theta + M_{sr31}I_{ra} \cos\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + M_{sr32}I_{rb} \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (\text{III. 17})$$

Il viendrait ensuite de la même manière les équations des trois bobines rotoriques, mais pour ne pas surcharger, nous nous en tiendrons à celle du stator, sachant qu'il suffit de changer les indice s par r pour se faire une idée des équations de rotor.

On peut écrit :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d[\varphi_s]}{dt} \quad (\text{III. 18})$$

Avec
$$[\varphi_s] = [L_s][I_s] + [M_{sr}][I_r] \quad (\text{III. 19})$$

De même chose pour le rotor :

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d[\varphi_r]}{dt} \quad (\text{III. 20})$$

Avec
$$[\varphi_r] = [L_r][I_r] + [M_{sr}][I_s] \quad (\text{III. 21})$$

Ou :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_{s1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s3} \end{bmatrix} \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_{r1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{r2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{r3} \end{bmatrix}$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{s1} & M_{s12} & M_{s13} \\ M_{s21} & L_{s2} & M_{s23} \\ M_{s31} & M_{s32} & L_{s3} \end{bmatrix} \quad [L_r] = \begin{bmatrix} L_{r1} & M_{r12} & M_{r13} \\ M_{r21} & L_{r2} & M_{r23} \\ M_{r31} & M_{r32} & L_{r3} \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} M_{sr11} \cos(p\theta) & M_{12} \cos(p\theta - \frac{2\pi}{3}) & M_{13} \cos(p\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ M_{sr21} \cos(p\theta + \frac{2\pi}{3}) & M_{22} \cos(p\theta) & M_{23} \cos(p\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ M_{sr31} \cos(p\theta - \frac{2\pi}{3}) & M_{32} \cos(p\theta + \frac{2\pi}{3}) & M_{33} \cos(p\theta) \end{bmatrix}$$

III.3.3 Transformation de Park [16]

En réalité, nous allons opérer deux transformations : celle de Concordia et celle de Park. La première transformera notre système triphasé en système biphasé. La seconde exprimera ce dernier dans un repère tournant qu'il conviendra de choisir plus tard.

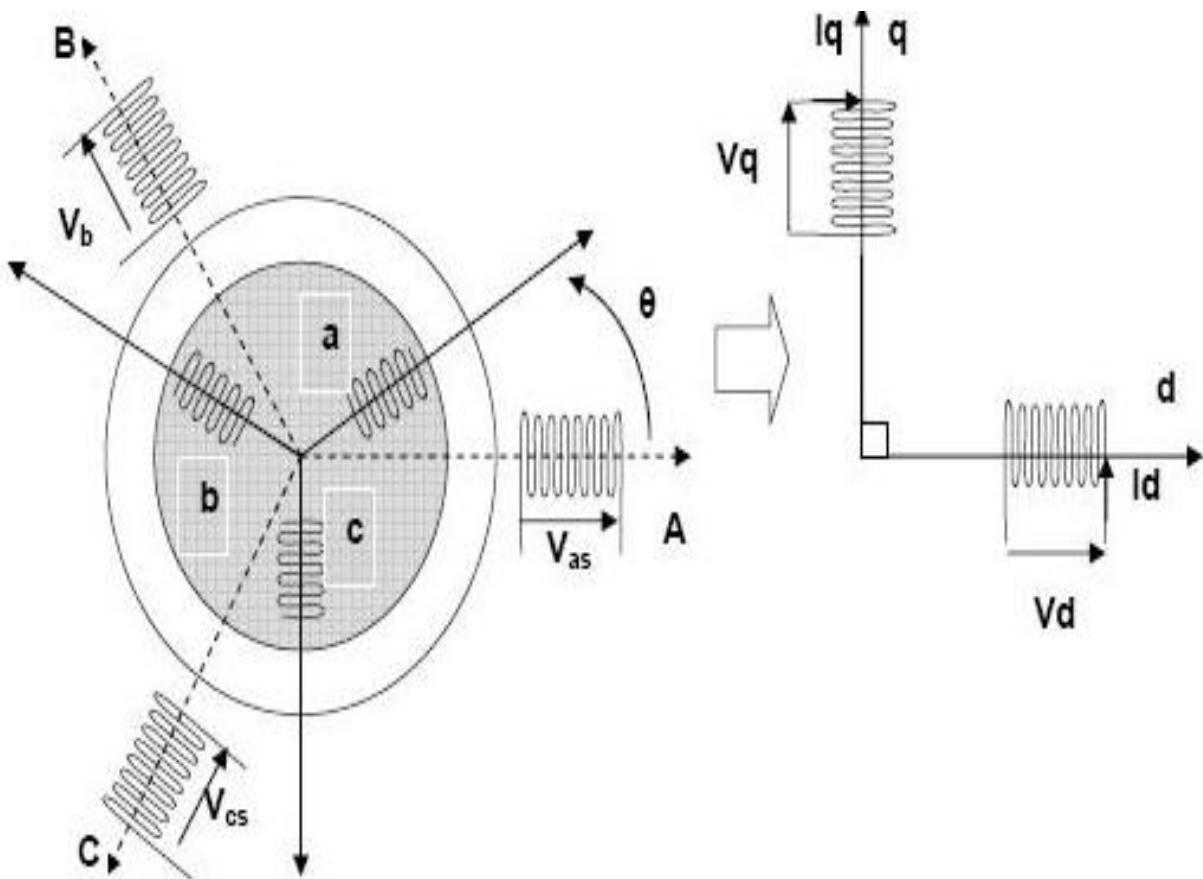


Figure III.14 Model de park de la machine asynchrone.

a. Transformation de Concordia

L'idée de cette transformation repose sur le fait qu'un champ tournant créé par un système triphasé équilibré peut l'être aussi ; à l'identique ; par un système biphasé de deux bobines décalées de $\frac{\pi}{2}$ dans l'espace, alimentées par des courants déphasés de $\frac{\pi}{2}$ dans le temps, à condition que les forces magnétomotrices et la puissance instantanée soient conservées.

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (\text{III. 22})$$

Cette relation particulière a l'avantage de conserver la puissance instantanée.

$$[X_{\alpha,\beta,o}] = [C]^t [X_{a,b,c}] \quad (\text{III. 23})$$

Et

$$[X_{a,b,c}] = [C] [X_{\alpha,\beta,o}] \quad (\text{III. 24})$$

Pour la suite, nous négligerons la composante homopolaire, définie par l'indice o, car nous considérons un système de tensions équilibrées.

b. Transformation de Park

Pour imaginer les nouvelles grandeurs biphasées $[X_{\alpha,\beta,o}]$ dans un repère tournant, il suffit de les exprimer dans un repère supplémentaire faisant un angle ψ_s pour le stator et ψ_r pour le rotor, par rapport au repère (α, β) . Ces angles ont les propriétés suivantes :

- $\psi_s = p\theta + \psi_r$, c'est-à-dire il faut respecter la position relative du rotor par rapport à celle du stator.
- Ces angles possèdent une vitesse relative qui dépendra du repère choisi : nulle si on se place au stator, et égale à la vitesse mécanique si on se place au rotor. On notera alors $\frac{d\psi_s}{dt} = \omega_s$ et $\frac{d\psi_r}{dt} = \omega_r$

Présentées sous forme matricielle avec l'ordre d,q il vient :

$$\begin{pmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_d \\ X_q \end{pmatrix} \quad (\text{III. 25})$$

La Transformation de Park général $[X_{d,q}] = [C_p][C]^t[X_{a,b,c}]$

$$[P(\psi)] = [C_p][C]^t = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \cos\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\psi + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\psi) & -\sin\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\psi + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Cette transformation ne peut être appliquée à la machine asynchrone sauf avec une certaine condition : la machine est symétrique. Il parait donc indispensable de faire quelques suppositions :

- les mutuelles inductances entre les phases du stator sont identiques ;
- les mutuelles inductances entre les phases du rotor sont elle aussi identiques ;
- les mutuelles inductances entre les phases du stator et les phases du rotor sont toutes identiques ($M_{sr_{ij}}=M_0$).

Il vient alors les simplifications suivantes :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad [L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = M_0 \begin{bmatrix} \cos(p\theta) & \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(p\theta) & \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(p\theta) \end{bmatrix}$$

Nous pouvons maintenant appliquer la transformation de Park sur les équations générales de la MAS. Pour cela nous définissons deux transformations : $[P(\psi_s)]$ pour le stator et $[P(\psi_r)]$ pour le rotor. Soit par exemple l'enroulement statorique défini par l'expression :

$$[V_{s,a,b,c}] = [R_s][I_{s,a,b,c}] + \frac{d[\varphi_{s,a,b,c}]}{dt} \quad (\text{III. 26})$$

On applique la transformation de Park :

$$[P(\psi_s)]^t [V_{s,d,q,o}] = [R_s][P(\psi_s)]^t [I_{s,d,q,o}] + \frac{d([P(\psi_s)]^t [\varphi_{s,d,q,o}])}{dt} \quad (\text{III. 27})$$

En multipliant à gauche par $[P(\psi_s)]$

$$[V_{s,d,q,o}] = [R_s][i_{s,d,q,o}] + [P(\psi_s)] \frac{d[P(\psi_s)]^t}{dt} [\varphi_{s,d,q,o}] + \frac{d[\varphi_{s,d,q,o}]}{dt} \quad (\text{III. 28})$$

Sachant que : $[P(\psi_s)] \frac{d[P(\psi_s)]^t}{dt} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \frac{d[\psi_s]}{dt}$

On obtient alors :

$$\begin{pmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{so} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_o \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \\ \varphi_{so} \end{pmatrix} + \frac{d\psi_s}{dt} \begin{pmatrix} -\varphi_{sq} \\ \varphi_{sd} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{III. 29})$$

De la même façon, l'application de la transformation $[P(\psi_r)]$ au rotor nous mène au modèle de Park complet de la machine asynchrone. La composante homopolaire étant négligée. De plus si nous supposons que le rotor est à cage, les enroulements virtuels de celui-ci sont en court-circuit.

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \varphi_{sd} - \varphi_{sq} \omega_s \quad (\text{III. 30})$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \varphi_{sq} + \varphi_{sd} \omega_s \quad (\text{III. 31})$$

$$0 = R_s i_{rd} + \frac{d}{dt} \varphi_{rd} - \varphi_{rq} (\omega_s - P\Omega) \quad (\text{III. 32})$$

$$0 = R_s i_{rq} + \frac{d}{dt} \varphi_{rq} - \varphi_{rd} (\omega_s - P\Omega) \quad (\text{III. 33})$$

$$\text{Avec: } \omega_s - P\Omega = \frac{d\psi_r}{dt} = \omega_r \text{ et } \Omega = \frac{d\theta}{dt}$$

$$Et \begin{pmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \\ \varphi_{rd} \\ \varphi_{rq} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{pmatrix} \quad (III. 34)$$

$$L_s = l_s - M_s ; L_r = l_r - M_r ; M = \frac{3}{2} M_0$$

Avec ce système d'écriture on peut poser $X = X_d + jX_q$

En réduisant les équations ci-dessus (V_{sd} et V_{sq})

$$V_s = R_s i_s + j\omega_s L_s i_s + jM\omega_r i_r + j\omega_s \varphi_s \quad (III. 35)$$

$$0 = R_r i_r + j\omega_r L_s i_r + jM\omega_s i_s + j(\omega_s - p\Omega)\varphi_r \quad (III. 36)$$

Si on réalise le schéma électrique équivalent de ces équations, On aura :

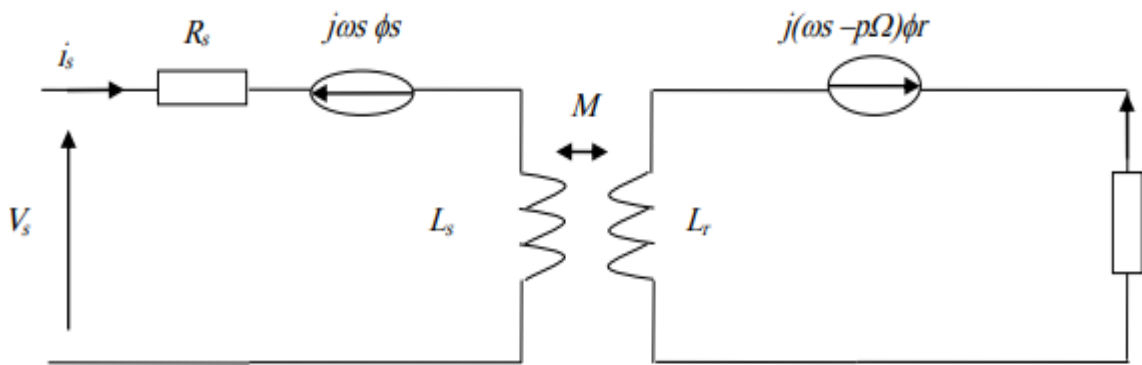
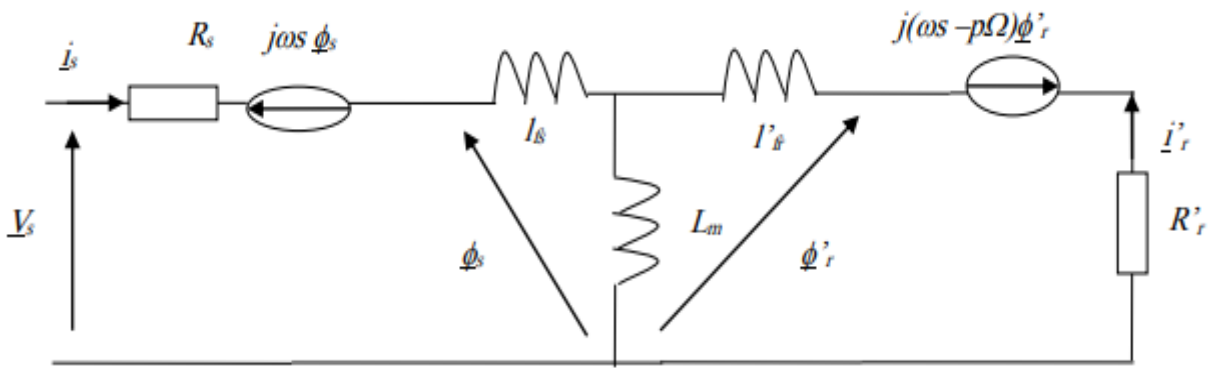


Figure III.15. Modèle équivalent transformateur triphasé.



$$L_s = l_{fs} + L_m \text{ et } L'_r = l'_{fr} + L_m$$

$$\text{Avec } X' = m^2 X$$

Figure III.16. Modèle avec fuites réparties

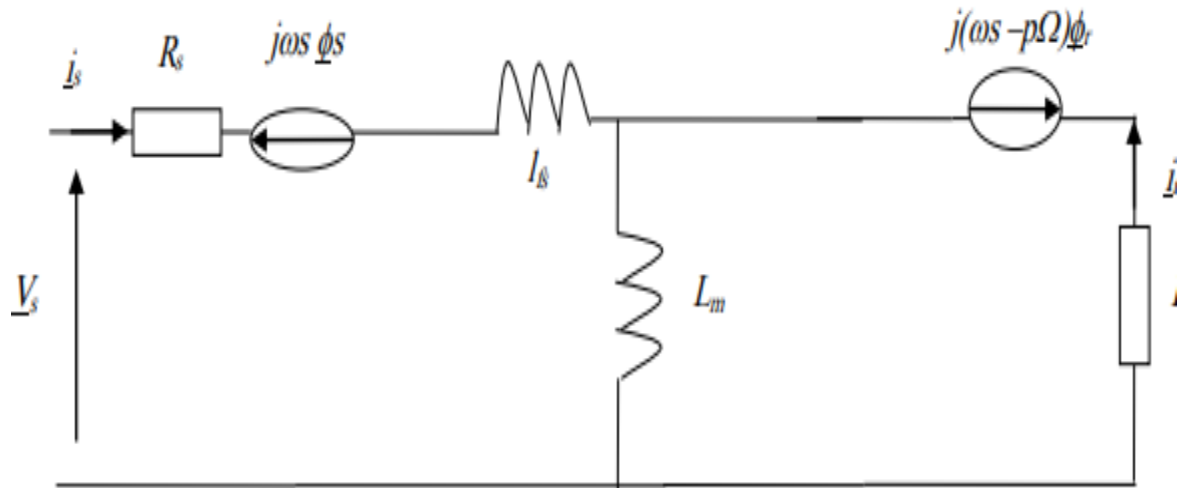


Figure III.17. Modèle avec fuites ramenées au stator.

III.3.4 Choix de référentiel [16]

Nous avons vu précédemment qu'il existe trois types de repères pour la transformation de Park et grâce à l'équation $\psi_s = p\theta + \psi_r$, Nous avons :

- le repère statorique qui impose $\psi_s = 0$, $\psi_r = -p\theta$ et $\omega_s = 0$;
- le repère rotorique qui impose $\psi_s = p\theta$, $\psi_r = 0$, et $\omega_s = p\Omega$;
- le repère synchrone au champ tournant qui impose $\omega_s = \omega = 2\pi f_{alim}$, f_{alim} étant la fréquence du réseau.

Notre choix s'est porté sur le repère rotorique où les grandeurs sont proches du continu, l'information contenue dans l'équation mécanique nous renseigne sur la vitesse de rotation du rotor. En utilisant le repère rotorique, nous pourrions utiliser cette information plus facilement.

III.3.5 Expressions de couple électromagnétique [16]

L'équation électromécanique de la machine :

$$I_m \frac{d\Omega(t)}{dt} = T_{em} - f\Omega - T_r \quad (\text{III. 37})$$

Ω : la vitesse de l'arbre moteur, I_m le moment d'inertie, T_{em} le couple électromagnétique, T_r l'ensemble des couples résistifs.

L'expression du couple T_{em} dans le repère de Park avec fuite ramenée au stator s'écrit :

$$T_{em} = P(i_{qs}\varphi_{dr} - i_{ds}\varphi_{qr}) \quad (\text{III. 38})$$

En reprenant les équations générales simplifiées de la machine, nous pouvons ramener leurs écritures au système suivant :

$$\begin{aligned}
 L_f \frac{di_{sd}}{dt} &= -(R_s + R_r)i_{sd} + L_f P \Omega i_{sq} + \frac{R_r}{L_m} \varphi_{rd} + P \Omega \varphi_{rq} + u_{sd} \\
 L_f \frac{di_{sq}}{dt} &= -(R_s + R_r)i_{sq} - L_f P \Omega i_{sd} + \frac{R_r}{L_m} \varphi_{rq} - P \Omega \varphi_{rd} + u_{sq} \\
 L_m \frac{d\varphi_{rd}}{dt} &= L_m R_r i_{sd} - R_r \varphi_{rd} \\
 L_m \frac{d\varphi_{rq}}{dt} &= L_m R_r i_{sq} - R_r \varphi_{rq} \\
 I_m \frac{d\Omega(t)}{dt} &= T_{em}(t) - f \Omega - T_r
 \end{aligned} \tag{III. 39}$$

Avec :

L_f : inductance de fuite totalisée au stator.

L_m : inductance magnétisante.

III.4 Conclusion

Le modèle de la machine asynchrone triphasée est un système de six équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps. La résolution d'un tel système est difficile même avec l'utilisation de l'outil numérique.

Ce chapitre présente dans la première partie des généralités sur la machine asynchrone triphasée, et dans la deuxième sa modélisation, celle-ci est basée sur la théorie de Park, dont l'intérêt primordial est de simplifier le problème dans le modèle triphasé. La modélisation en régime transitoire nécessite une meilleure connaissance du comportement du moteur et la transformation de Park nous permet une simplification des expressions analytiques du modèle de commande.

IV.1 Introduction

Les progrès récemment réalisés dans les domaines de l'électronique de puissance et de la commande numérique ont permis, depuis peu, l'essor des variateurs de vitesse. Aujourd'hui, les machines asynchrones vont se placer au rang de pionniers dans la plupart des entraînements à vitesse variable dans de nombreux secteurs industriels. Il faut donc s'attendre à la disparition progressive des entraînements utilisant la machine à courant continu.

Un variateur électronique de vitesse est un équipement électrotechnique alimentant un moteur électrique, de façon à pouvoir faire varier sa vitesse en continu, de l'arrêt jusqu'à sa vitesse nominale. La vitesse peut être proportionnelle à une valeur analogique fournie par un potentiomètre, ou par une commande externe : un signal de commande analogique ou numérique, issue d'une unité de contrôle [17].

Les moteurs électriques à courant alternatif utilisés dans les variateurs de vitesse sont principalement des moteurs asynchrones triphasés. Mais, il est également possible d'employer des moteurs monophasés.

IV.2 Variateur de vitesse

IV.2.1. Principe de fonctionnement des variateurs de vitesses

Les variateurs de vitesses sont utilisés pour faire varier la vitesse des moteurs asynchrones avec une conception à vitesse de rotation constante. La variation de vitesse est obtenue par la variation de la fréquence de la tension d'alimentation du moteur.

IV.2.2. Fonction des variateurs de vitesse [18]

Parmi les multitudes de fonctions qu'offrent les variateurs de vitesse actuels, on citera :

IV.2.2.1 L'accélération contrôlée

Le profil de la courbe de démarrage d'un moteur d'ascenseur est avant tout lié au confort des utilisateurs dans la cabine. Il peut être soit linéaire ou en forme de "s". Ce profil ou "rampe" est la plupart du temps ajustable en permettant de choisir le temps de mise en vitesse de l'ascenseur.

IV.2.2.2 La décélération contrôlée

Les variateurs de vitesse permettent une décélération contrôlée sur le même principe que l'accélération. Dans le cas des ascenseurs, cette fonction est capitale dans sens où l'on ne

peut pas se permettre de simplement mettre le moteur hors tension et d'attendre son arrêt complet suivant l'importance du couple résistant (le poids du système cabine/contre-poids varie en permanence). Il faut impérativement contrôler le confort et la sécurité des utilisateurs par le respect d'une décélération supportable, d'une mise à niveau correcte.

On distingue, au niveau du variateur de vitesse deux types de freinage :

- En cas de décélération désirée plus importante que la décélération naturelle, le freinage peut être électrique soit par renvoi d'énergie au réseau d'alimentation, soit par dissipation de l'énergie dans un système de freinage statique.
- En cas de décélération désirée moins importante que la décélération naturelle, le moteur peut développer un couple moteur supérieur au couple résistant de l'ascenseur et continuer à entraîner la cabine jusqu'à l'arrêt.

IV.2.2.3 La variation et la régulation de vitesse

Parmi les fonctionnements classiques des variateurs de vitesse, on distingue :

- La variation de vitesse proprement dite où la vitesse du moteur est définie par une consigne d'entrée (tension ou courant) sans tenir compte de la valeur réelle de la vitesse du moteur qui peut varier en fonction de la charge, de la tension d'alimentation, ... On est en boucle "ouverte" (pas de feedback).
- La régulation de vitesse où la consigne de la vitesse du moteur est corrigée en fonction d'une mesure réelle de la vitesse à l'arbre du moteur introduite dans un comparateur. La consigne et la valeur réelle de la vitesse sont comparées, la différence éventuelle étant corrigée. On est en boucle "fermée".

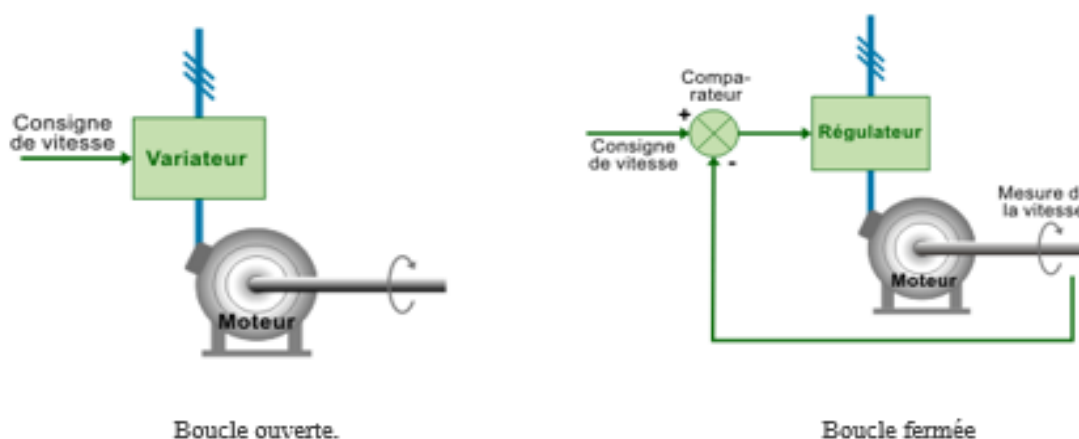


Figure IV.1 : Variation et la régulation de vitesse en boucle ouvert/fermé.

IV.2.2.4 L'inversion du sens de marche

Sur la plupart des variateurs de vitesse, il est possible d'inverser automatiquement le sens de marche. L'inversion de l'ordre des phases d'alimentation du moteur de l'ascenseur s'effectue :

- soit par inversion de la consigne d'entrée,
- soit par un ordre logique sur une borne,
- soit par une information transmise par une connexion à un réseau de gestion.

IV.2.2.5 Le freinage d'arrêt

C'est un freinage de sécurité.

Avec des moteurs asynchrones, le variateur de vitesse est capable d'injecter du courant continu au niveau des enroulements statoriques et par conséquent stopper net le champ tournant. La dissipation de l'énergie mécanique s'effectuant au niveau du rotor du moteur (danger d'échauffement important).

Avec des moteurs à courant continu, le freinage s'effectue au moyen d'une résistance connectée sur l'induit de la machine.

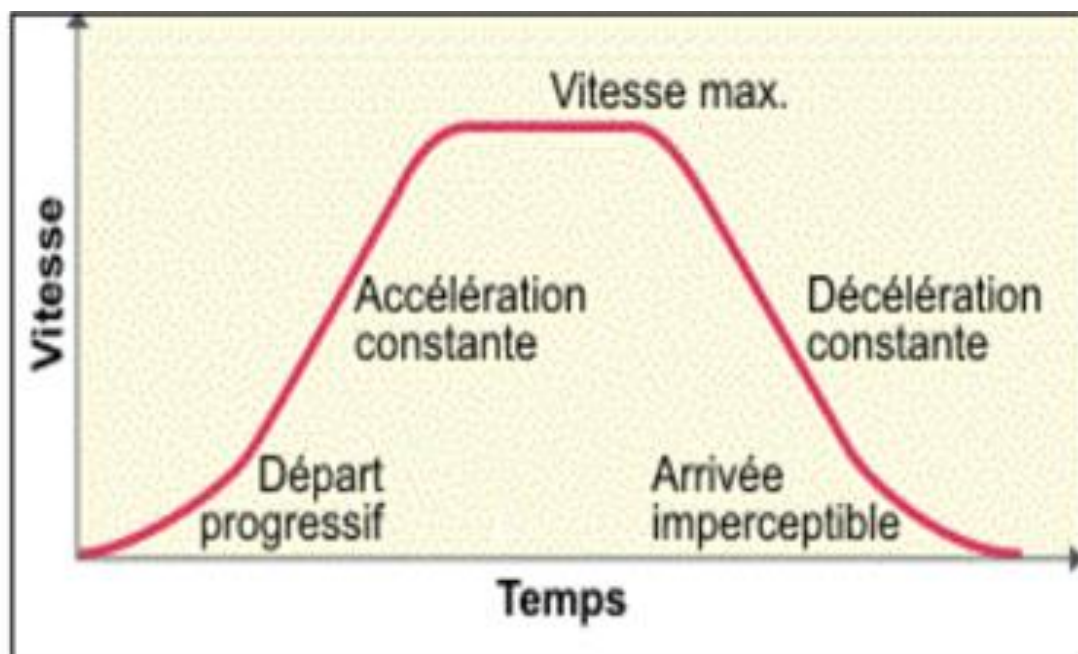


Figure. IV.2 : Allure de la variation de vitesse. [18]

IV.2.3 Choix des variateurs de vitesse pour moteurs asynchrones [19]

Le choix du variateur de vitesse dépend de plusieurs facteurs liés à l'application envisagée.

a. Facteurs techniques

Parmi les principaux facteurs techniques de choix :

- la puissance et la vitesse nominales.
- la tension du réseau d'alimentation.
- le régime d'utilisation (utilisation en régime permanent ou intermittent).
- la plage de variation de vitesse et le domaine de fonctionnement dans le plan puissance-vitesse (1 quadrant, 2 quadrants, 4quadrants).
- les contraintes d'installation (encombrement, degré de protection, etc.).
- le type de la machine entraînée (inertie, allure du couple résistant en fonction de la vitesse).

b. Facteur économique

Un critère important est bien sûr le coût d'investissement de l'entraînement total, y compris le coût du variateur, du moteur et de son installation. Le coût d'exploitation du variateur (maintenance, coûts d'immobilisation, perte d'énergie) est un critère de choix économique supplémentaire.

IV.2.4 Les type des variateurs de vitesse [20]

Il existe trois principaux types de variateurs de fréquence sur le marché :

a. Variateurs de vitesse mécaniques

Le variateur de vitesse mécanique utilise des moyens mécaniques pour convertir une sortie de moteur à vitesse fixe en une sortie à vitesse variable. Ces entraînements sont de deux types et ce sont des entraînements à pas variable et des entraînements de traction.

Les entraînements à pas variable sont des poulies et des entraînements par courroie dans lesquels le diamètre primitif d'une ou des deux poulies peut être ajusté.

Le type d'entraînement par traction transmettrait la puissance à travers des rouleaux métalliques. L'entrée et la sortie peuvent être ajustées en déplaçant les rouleaux pour modifier les diamètres du chemin de contact.

Ce type de variateur de vitesse n'est pas efficace par rapport à un variateur électronique.

b. Variateur de vitesse hydraulique

Ce type d'entraînement utiliserait l'huile hydraulique comme fluide et à travers lequel le couple serait transmis. Ce dispositif présente des pertes mécaniques et hydrauliques élevées par rapport aux autres types de variateurs de vitesse.

Il existe trois types d'entraînements hydrauliques à vitesse variable et ce sont les entraînements hydrostatiques, les entraînements hydrodynamiques et les entraînements hydro-visqueux.

L'entraînement hydraulique est composé d'une pompe hydraulique et également d'un moteur hydraulique. La vitesse est régulée en faisant varier la cylindrée de la pompe ou du moteur. Les entraînements hydrodynamiques utiliseraient de l'huile pour transférer le couple entre une turbine sur l'arbre d'entrée à vitesse constante et également un rotor sur l'arbre de sortie à vitesse réglable.

Dans le type hydro visqueux de variateur de vitesse il aurait un ou plusieurs disques connectés à l'arbre de sortie. Le couple sera transmis de l'arbre d'entrée à l'arbre de sortie à travers un film d'huile entre les disques. Le couple transmis sera proportionnel à la pression exercée par le vérin hydraulique qui comprime le disque.

c. Variateur de vitesse électronique

Dans ce type de variateur de vitesse, des dispositifs électroniques sont utilisés pour contrôler la vitesse et le couple d'un moteur électrique. Il existe trois types de VDV électriques et ce sont les entraînements de moteur à courant continu, les entraînements de moteur à courant alternatif et les entraînements à courant de Foucault. Le VDV électrique est composé d'un moteur électrique et également d'une unité de contrôle de vitesse ou d'un système.

IV.3 Procédés de variation de vitesse des moteurs asynchrone

La technologie électronique ; variateurs de vitesse ; présente de nombreux avantages comme : diminution des pertes mécaniques, diminution des surintensités et réglage précis et modification facile de la valeur de la vitesse [21].

$$n = n_s (1-g) = \frac{f^*(1-g)}{p} \quad (\text{IV.1})$$

Avec :

n : vitesse de rotation [rad/s]

n_s : vitesse du champ tournant [rad/s]

g : Glissement

f : Fréquence

p : Nombre de Paire de pôles

D'après l'équation (IV.1), la variation de la vitesse d'une MAS, peut se faire à partir de : Action sur la vitesse de synchronisme (vitesse du champ tournant), action sur le glissement, action sur le nombre de pair de pôles et action sur la fréquence.

Dans un moteur à courant alternatif, la vitesse mécanique du rotor est liée à la fréquence des courants au stator. Ce lien mathématique rend possible une commande de la vitesse du rotor par la commande de la fréquence du courant au stator [22].

Le glissement compare la vitesse rotorique à celle de synchronisme par rapport à cette dernière en utilisant la relation suivante :

$$g = \frac{w_s - w_r}{w_s} \quad (\text{IV.2})$$

$$W_r = \frac{2\pi * f}{p} (1 - g) \quad (\text{IV.3})$$

L'équation (IV.3) vient donc confirmer ce qui a été dit au paravent.

IV.3.1 Réglage par variation du nombre de paires de pôles

Ce mode n'est pas envisagé pour un réglage fin du point de fonctionnement désiré. Car il donne une variation non continue de la vitesse

- Si le nombre de pair de pôle augmente, la fréquence de rotation d'un moteur diminue.
- Si le nombre de pair de pôles diminue, la fréquence de rotation d'un moteur augmente.

Le tableau ci-dessous (Tableau IV-1) est rempli avec la principale fréquence de rotation du champ tournant d'un moteur asynchrone triphasé pour un réseau de 50 Hz. [23]

Tableau IV.1 : Une action sur le nombre de pair de pôles.

Nombre de pair de pôles	1	2	3	4
fréquence de rotation du champ tournant pour un réseau 50 Hz	3000 tr / min	1500 tr / min	1000 tr / min	750 tr / min

IV.3.2 Réglage par variation de tension

Le couple électromagnétique de la machine asynchrone est proportionnel au carré de la tension d'alimentation statorique. Il est donc possible d'envisager un ajustement de la vitesse au-dessous de la vitesse nominale en modifiant la tension d'alimentation statorique avec un gradateur triphasé.

Cette solution est le plus souvent utilisée pour le démarrage de charges à caractéristique de couple quadratique ($Cr = k \cdot \Omega^2$).

IV.3.3 Réglage par action sur le glissement

L'action sur le glissement se fait par :

- Action sur la tension d'alimentation statorique (autotransformateur, gradateur).
- Rhéostat de glissement au rotor dans le cas d'une machine à rotor bobiné.

Si la charge (machine entraînée) appliquée au moteur augmente, le rotor va ralentir, et le glissement augmente [23].

IV.3.4 Réglage par variation de fréquence

La fréquence de rotation de la machine étant au glissement près proportionnel à la fréquence d'alimentation des enroulements statoriques, on essaiera de créer pour ces enroulements un réseau à fréquence variable, ce sont les onduleurs de tension.

On peut aussi chercher à injecter des courants dans l'enroulement pour imposer le couple de la machine ce sont les onduleurs de courant ou commutateurs de courant. On peut également convertir directement la fréquence du réseau industriel en une fréquence variable plus faible [23]

- Si la fréquence augmente, la fréquence de rotation d'un moteur augmente.
- Si la fréquence diminue, la fréquence de rotation d'un moteur diminue.

L'action sur la fréquence f_s tout en conservant le rapport V/f_s constant, permet de maintenir la valeur du couple à sa valeur maximale. Elle permet donc, la modification de la vitesse de rotation en charge de la machine tout en plaçant le point de fonctionnement là où le couple d'entraînement est le plus satisfaisant pour mouvoir la charge [22].

IV.4 Convertisseur de fréquence électronique pour moteur asynchrone

La solution la plus simple pour modifier la vitesse d'un moteur asynchrone est de modifier la fréquence de sa source d'alimentation. Le variateur alimente le moteur asynchrone avec une onde de tension d'amplitude et de fréquence variables, tout en maintenant la tension par rapport à la fréquence fondamentalement constante.

En modifiant la fréquence de la tension d'alimentation du moteur, le variateur peut modifier la vitesse du champ magnétique tournant du stator, et donc la vitesse de rotation du moteur.

IV.4.1 Principe

Il consiste à fournir au moteur une onde de tension à amplitude et fréquence variables, en maintenant le rapport tension / fréquences en subliment constant.

La tension d'alimentation est en relation directe avec la fréquence. Ce fonctionnement est souvent nommé fonctionnement à U/f constant ou fonctionnement scalaire.

IV.4.2 Les principaux types de convertisseurs de fréquence [24]

a. Convertisseurs directs de fréquence

Dénommés cyclo convertisseurs, qui réalisent la conversion de fréquence sans recourir à un étage intermédiaire à fréquence nulle.

a. Convertisseurs indirects de fréquence

Les convertisseurs indirects de fréquence sont aujourd'hui les plus utilisés, qui utilisent un étage intermédiaire à fréquence nulle (tension ou courant continu) par l'association d'un convertisseur alternatif-continu (redresseur) et d'un convertisseur continu –alternatif (onduleur).

Le tableau suivant montre la variation des différents paramètres du moteur asynchrone alimenté à travers un convertisseur de fréquence comparés au cas de l'alimentation directe. [24]

Tableau IV.2 : Comparatif des caractéristiques de fonctionnement normale et avec un variateur de vitesse d'un moteur asynchrone. [9]

Moteur asynchrone	usage normal	Avec un variateur de vitesse
Courant de démarrage	Très élevé, de l'ordre de 6 à 8 fois le courant nominal	Limité dans le moteur (en générale de 1.5 fois I_N).
Couple de démarrage C_d	Élevé et non contrôlé, de l'ordre de 2 à 3 C_N	De 1.5 fois le C_N , Contrôlé pendant toute l'accélération
Démarrage	Brutal ; la durée n'est fonction que des caractéristiques du moteur et de la charge entraînée	Progressif sans à-coup et contrôlé
Vitesse	Varié légèrement selon la charge (proche de N_S)	Variation possible de 0 jusqu'à une valeur supérieure à N_S
Couple maximal C_M	Elevé, de l'ordre de 2 à 3 le couple nominal	Elevé disponible sur toute la plage de vitesse (de 1.5 C_N)
Freinage électrique	Relativement complexe	Facile
Inversion du sens de marche	Facile seulement après L'arrêt du moteur	Facile
Risque de décrochage	Oui, en cas de sur couple, ou en cas de baisse de tension	Non

IV.4.3. La commande MLI

Les différentes stratégies de commande du variateur peuvent être classées comme suit :

- Commande à pleine onde
- Commande à modulation de largeurs d'impulsions (MLI).
- La modulation vectorielle.

Dans notre cas on a choisi la commande à modulation de largeur d'impulsions MLI sinusoïdale. La MLI sinusoïdale consiste alors à former chaque alternance de la tension de sortie d'une succession de créneaux de largeur convenable, en adaptant une fréquence de commutation supérieure à celle des grandeurs de sortie de l'onduleur elle permet de faire varier la valeur du fondamental de la tension de sortie.

La PWM (pulse width modulation) ou MLI (Modulation de largeur d'impulsion) est un signal auquel on fait varier la tension sans modifier ni l'amplitude ni la fréquence mais la largeur de l'impulsion. [25]

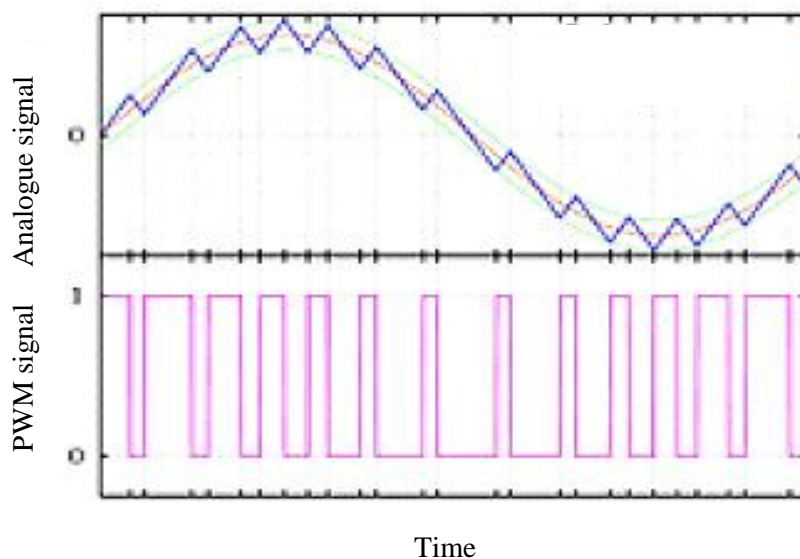


Figure IV.3 : Schéma d'un signal PWM. [25]

L'intérêt de la commande MLI est de pouvoir générer un signal continu à partir d'un système fonctionnant en tout ou rien. On la trouve dans :

- La conversion numérique- analogique.
- Les amplificateurs de classe D, en audio.
- Les alimentations à découpage, variateur de vitesse et plus généralement tous les dispositifs d'électronique de puissance utilisant des composants de type MOSFET IGBT et GTO. [25]

IV.4.4 Constitution du convertisseur de fréquence

Le circuit de puissance est constitué par un redresseur et un onduleur qui, à partir de la tension redressée, produit une tension d'amplitude et fréquence variable, et un filtre.

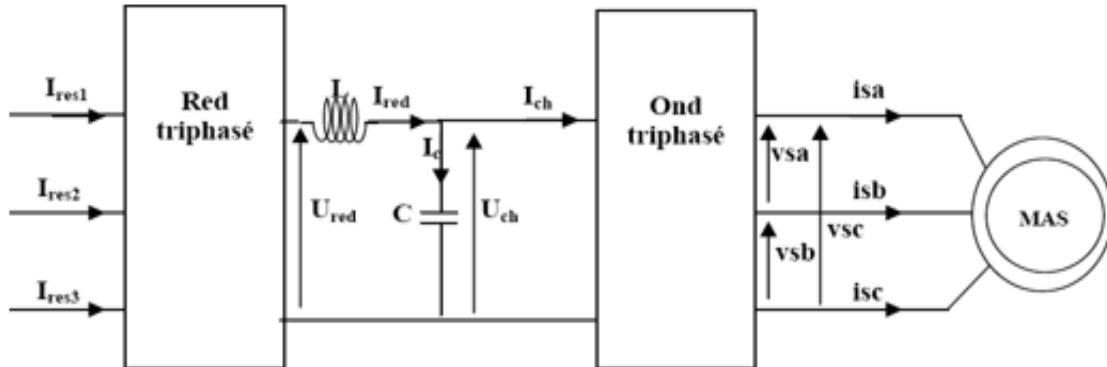


Figure IV.4 : Structure d'un variateur de fréquence.

Le modèle du variateur de vitesse choisi pour cette étude est de type convertisseur de fréquence avec onduleur de tension à M.L.I Le variateur comporte :

- un pont redresseur triphasé à diodes qui délivre une tension continue d'amplitude pratiquement constante.
- un étage de filtration comportant un condensateur de forte capacité plus une inductance de lissage.
- un pont onduleur de tension alimenté par la tension continue et générant une onde de tension alternative à amplitude et fréquence variables par la technique de MLI.

Le convertisseur statique, de type onduleur, permet un fonctionnement du moteur avec un couple maximal, par action simultanée sur la fréquence et sur l'amplitude des tensions statoriques, tout en conservant le caractère constant du rapport V/f . Si nous augmentons la vitesse il faut augmenter la fréquence et la tension d'alimentation dans les limites du bon fonctionnement de la machine. [27].

IV.4.3.1. Le redresseur

Les montages redresseurs, sont des convertisseurs de l'électronique de puissance qui assurent la conversion alternatif-continu.

Les redresseurs à diodes ou redresseurs non commandés, ne permettent pas de faire varier le rapport entre les tensions alternatives d'entrées et la tension continue de sortie. De plus ils sont irréversibles, c'est à dire que la puissance ne peut aller que du côté alternatif vers le côté continu.

Montage parallèle double

Les redresseurs parallèles double (en pont) sont constitué de deux commutateurs un plus positif et l'autre plus négatif.

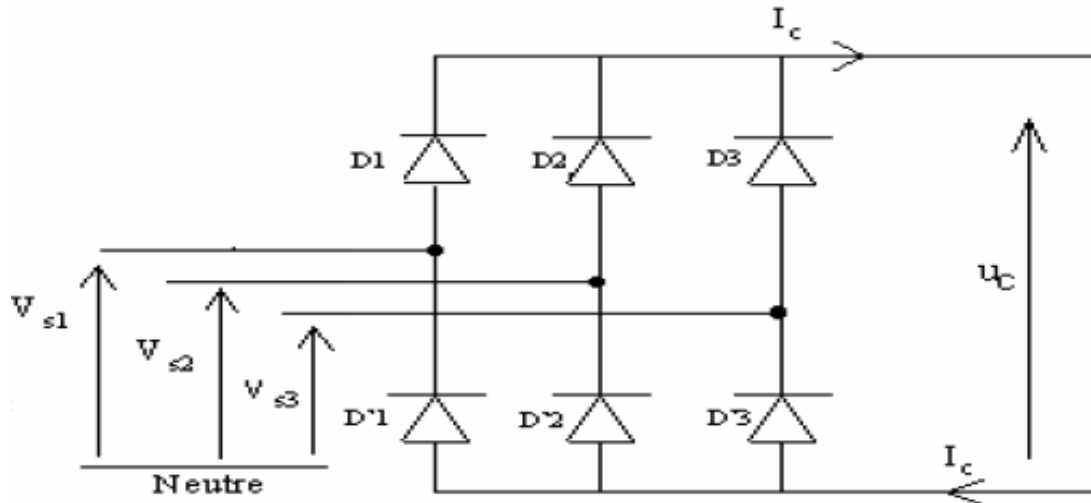


Figure IV.5 : Redresseur triphasé a pont de diode PD3. [28]

Les trois diodes D1, D2, D3 forment un commutateur plus positif, qui laisse passer à tout instant la plus positive des tensions, et les diodes D'1, D'2, D'3 forment un commutateur plus négatif, qui laisse passer la plus négative des tensions [28].

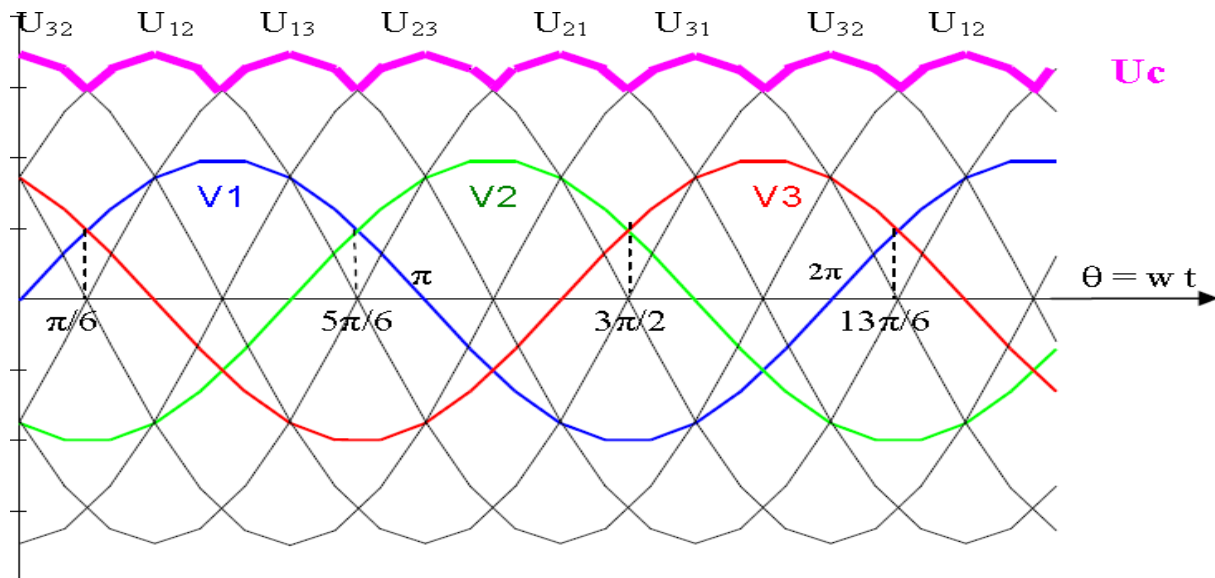


Figure IV.6 : Allure de la tension de sortie redressée. [28]

- Valeur moyenne de la tension redresse :

$$U_{cmoy} = 1/\int_0^T U_c(t)dt = 3/\pi \int_{\pi/6}^{\pi/2} V_m [\sin(\omega t) - \sin(\omega t - 2\pi/3)]d(\omega t) = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \quad (IV.4)$$

- Tension inverse :

La tension maximale à supporter par les diodes.

$$V_D = \sqrt{3}V_m \quad (\text{IV.5})$$

IV.4.3.2 Le filtre

Le filtre est constitué d'une inductance montée en série avec un condensateur

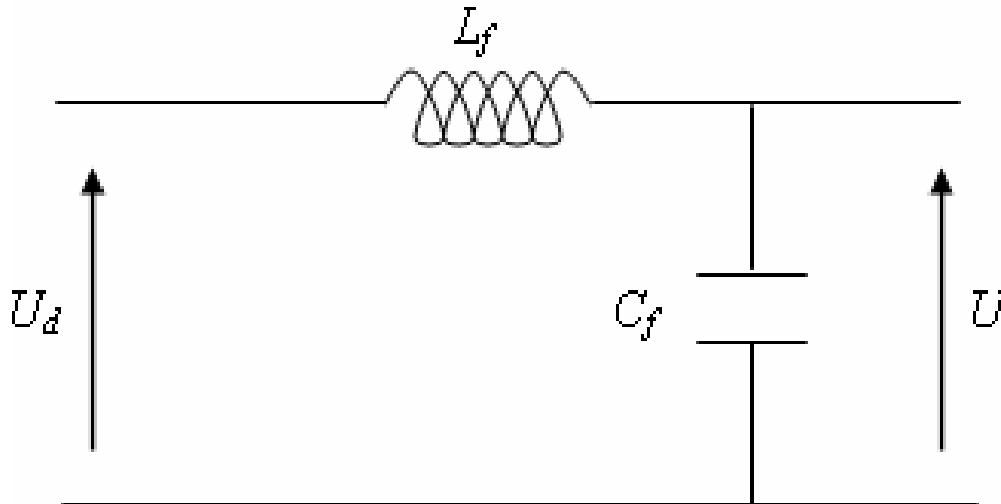


Figure IV.7 : Structure de filtre.

- Le condensateur permet d'obtenir à l'entrée de l'onduleur une tension sensiblement constante, et d'absorber le courant négatif restitué par la charge.
- L'inductance permet de rendre sensiblement le courant constant [29].

Les équations du filtre sont données :

$$\frac{dI_d}{dt} = \frac{1}{L_f} (U - U_d) \quad (\text{IV.6})$$

$$\frac{dU}{dt} = \frac{1}{C_f} (I_d - I) \quad (\text{IV.7})$$

IV.4.3.3 L'onduleur de tension triphasé à MLI

L'onduleur est la dernière partie du variateur de vitesse située avant le moteur. Il fournit des grandeurs électriques variables au moteur. Dans tous les cas, l'onduleur est composé de semi-conducteurs (en général des IGBT et des diodes de roue libre associées) disposés par paires en trois bras. Les semi commutent sur des signaux en provenance du circuit de commande.

L'onduleur de tension est constitué de cellule de commutation généralement à transistor ou thyristor pour les grandes puissances. Donc Les onduleurs sont des convertisseurs statiques

continu-alternatif permettant de fabriquer une source de tension alternative à partir d'une source de tension continue.

La modulation de largeur d'impulsions consiste à commander les interrupteurs de manière à délivrer au moteur une suite d'impulsions d'amplitude fixe, positives ou négatives et modulées en largeur [30].

a. Structure et modèle analytique de l'onduleur de tension à deux niveaux

L'onduleur à deux niveaux est constituée de trois bras, chaque bras comporte deux interrupteurs il est schématisé dans la figure :

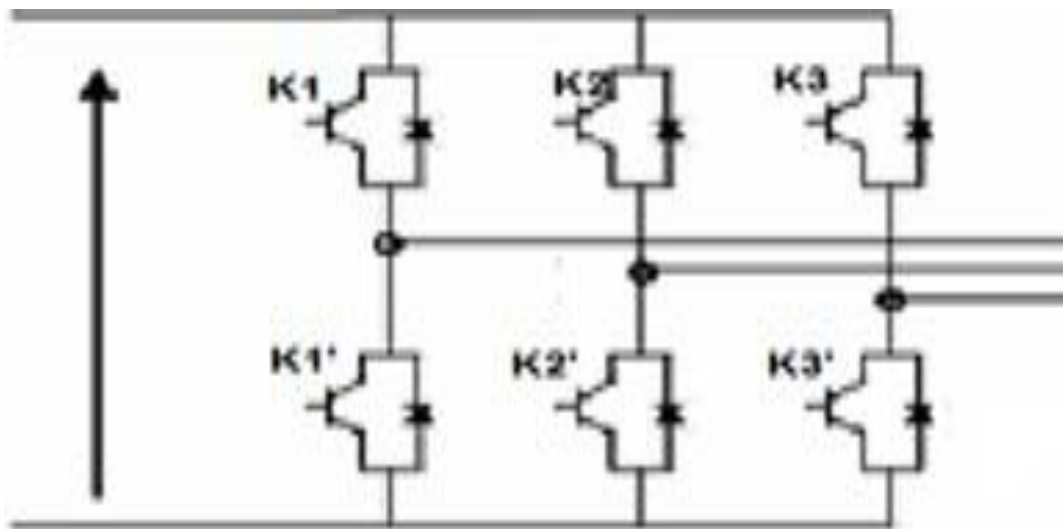


Figure IV.8 : Structure de l'onduleur de tension à deux niveaux.

En mode commandable, le bras est un commutateur à deux positions qui permet d'obtenir à la sortie de l'onduleur deux niveaux de tension.

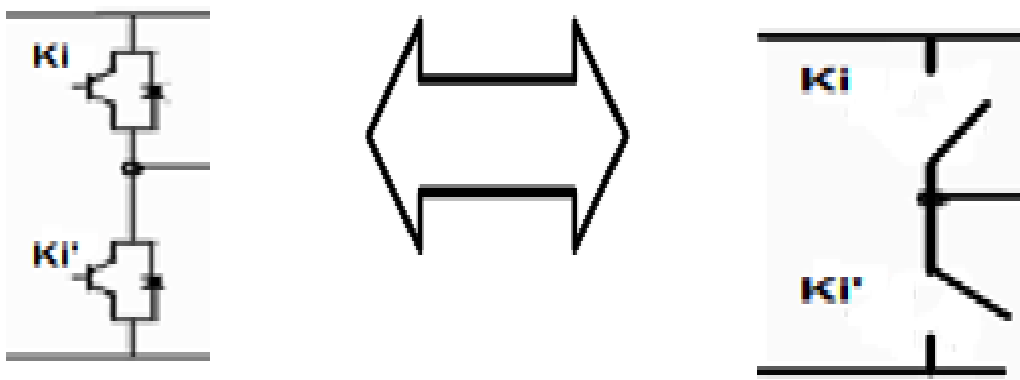


Figure IV.9 : Un bras de l'onduleur à deux niveaux.

Le schéma principal de l'onduleur est donné sur la figure suivante :

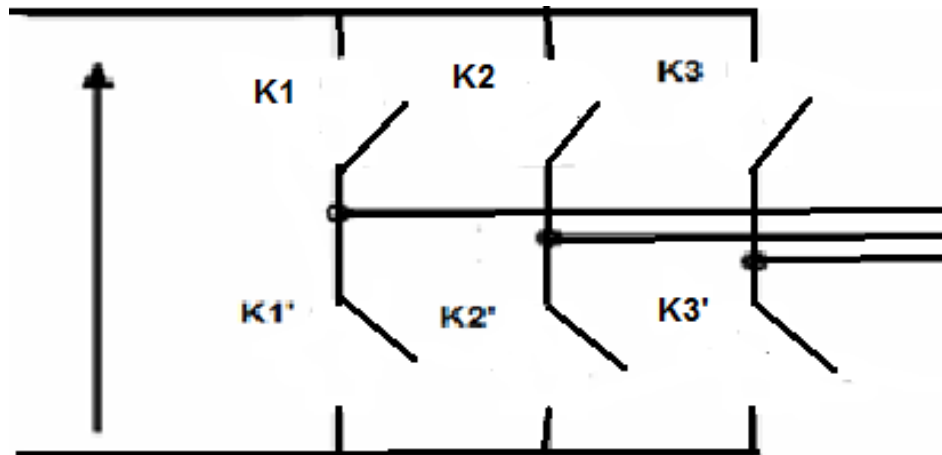


Figure IV.10 : Schéma principale de l'onduleur.

Les couples d'interrupteur (K_1 et K_1'), (K_2 et K_2'), (K_3 et K_3') doivent être commandés de manière complémentaire pour assurer la continuité des courants alternatifs dans la charge d'une part et d'éviter le court-circuit de la source d'autre part.

Les commandes des interrupteurs d'un bras sont complémentaires du fait que chacun des trois bras de l'onduleur ne peut avoir que deux états logiques possibles (0, 1). Ces deux états peuvent être considérés comme une grandeur booléenne

$$F_j = \begin{cases} 1 & \text{si } K_i \text{ est fermé et } K_i' \text{ ouvert} \\ 0 & \text{si } K_i \text{ est ouvert et } K_i' \text{ fermé} \end{cases}$$

Les tensions de lignes délivrées par l'onduleur sont :

$$\begin{cases} U_{ab} = U_c (F_1 - F_2) \\ U_{bc} = U_c (F_2 - F_3) \\ U_{ca} = U_c (F_3 - F_1) \end{cases} \quad (\text{IV.8})$$

On suppose que la charge est équilibrée et le neutre est isolé c.-à-d.

$$V_a + V_b + V_c = 0 \quad (\text{IV.9})$$

Sachant que :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_a - V_b \\ U_{bc} = V_b - V_c \\ U_{ca} = V_c - V_a \end{cases} \quad (\text{IV.10})$$

En tenant compte les trois relations, on obtient les tensions simples suivantes :

$$\begin{cases} V_a = \frac{U_c}{3} (2F_1 + F_2 - F_3) \\ V_b = \frac{U_c}{3} (-F_1 + 2F_2 - F_3) \\ V_c = \frac{U_c}{3} (-F_1 - F_2 + 2F_3) \end{cases} \quad (\text{IV.11})$$

Le système des équations peut s'écrire sous la forme matricielle

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{pmatrix} \cdot \frac{U_c}{3} \quad (\text{IV.12})$$

b. Stratégie de commande de l'onduleur (Commande triangulo-sinusoïdale à une porteuse)

Pour produire une tension de sortie proche de la sinusoïde, il existe différents stratégies de commande. Nous proposons la stratégie Triangulo-Sinusoïdale à une porteuse (Par modulation de largeur d'impulsions)

La commande triangulo-sinusoïdale consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante, généralement sinusoïdale, avec une ou plusieurs porteuses ondes de modulation ou porteuses, généralement triangulaire ou en dents de scie, unipolaires ou bipolaires, cette technique exige une commande séparée pour chaque phase de l'onduleur.

La détermination des instants d'ouverture et de fermeture des interrupteurs est réalisée en temps réel, par une électronique de commande analogique ou numérique ou par fois hybride. [31]

La technique de modulation à une porteuse consiste à comparer trois signaux de référence V_m qui imagent les tensions de sortie recherchées des fréquences f décalées entre eux de $2\pi/3$, à un signal triangulaire commun V_p appelée « porteuse » de référence f_p [32].

L'indice de modulation (m), égal au rapport des fréquences de modulation et de références

$$m = \frac{f_p}{f} \quad (\text{IV.13})$$

Le coefficient de réglage en tension (r), égal au rapport de l'amplitude de la référence à la valeur de Crête de modulation

$$r = \frac{V_m}{V_{pm}} \quad (\text{IV.14})$$

La figure ci-dessous illustre le principe de base de cette technique

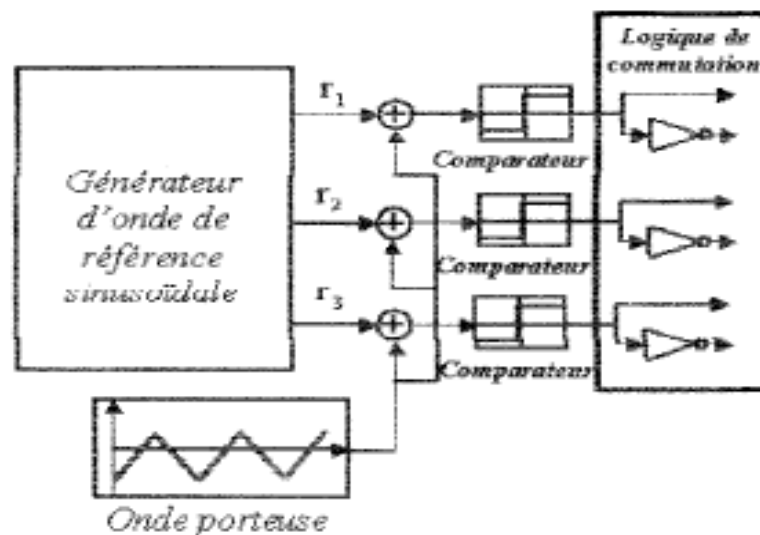


Figure IV.11 : Schéma de principe de la technique triangulo-sinusoidale. [31]

IV.5 Protections intégrées aux variateurs

IV.5.1 Protection de surcharge du moteur

Les variateurs modernes assurent la protection du moteur contre les surcharges :

- par une limitation instantanée du courant efficace à 1,5 fois le courant nominal
- par un calcul permanent de $I(t)$, avec prise en compte de la vitesse.

Lorsqu'un départ n'alimente qu'un moteur et son variateur, cette protection de surcharge du moteur assure simultanément la protection de surcharge de l'ensemble appareillage et câblage.

IV.5.2 Protection contre le court-circuit moteur ou ligne en aval du variateur

En cas de court-circuit entre phases en sortie de variateur (aux bornes du moteur ou à un endroit quelconque de la ligne entre le variateur et le moteur), la sur intensité est détectée au sein du variateur et un ordre de blocage est envoyé très rapidement aux IGBT.

Le courant de court-circuit est interrompu en quelques micros secondes, ce qui assure la protection du variateur. Ce courant très bref est essentiellement fourni par le condensateur de filtrage associé au redresseur, et est donc indiscernable dans la ligne d'alimentation.

IV.5.3 Autres protections intégrées aux variateurs

Les variateurs disposent d'autres fonctions d'autoprotection contre :

- Les sur chauffés de leurs composants électroniques pouvant entraîner leur destruction. Un capteur placé sur le dissipateur thermique provoque l'arrêt du variateur, lorsque la température dépasse un certain seuil.
- Les creux de tension du réseau : cette protection est nécessaire pour éviter tout dysfonctionnement des circuits de contrôle et du moteur, ainsi que toute sur intensité dangereuse lorsque la tension réseau reprend sa valeur normale.
- Les sur tensions à fréquence industrielle du réseau : il s'agit d'éviter les destructions éventuelles de leurs composants.
- La coupure d'une phase (pour les variateurs triphasés) : car l'alimentation en monophasé qui se substitue à l'alimentation en triphasé provoque une augmentation du courant absorbé.

IV.6 Les avantages et inconvénients du variateur de vitesse

IV.6.1 Avantages

- démarrage progressif des moteurs réduisant les chutes de tension dans le réseau et limitant les courants de démarrage.
- amélioration du facteur de puissance.
- précision accrue de la régulation de vitesse.
- prolongement de la durée de service du matériel entraîné.
- diminution de la consommation d'électricité.

IV.6.2 Inconvénients

Tous les variateurs de vitesse intégrant des dispositifs de commutation (diodes, thyristors...) forment une charge non linéaire qui engendre des courants harmoniques, sources de distorsion de l'onde (chute ou perturbation de la tension) dans le réseau électrique. Cette dégradation de l'onde peut perturber tant les équipements électriques du client que ceux du réseau électrique si aucune mesure d'immunité n'est prise.

Les effets néfastes peuvent se manifester par la défaillance prématurée des équipements électriques (surchauffe des moteurs, des câbles et des transformateurs), par la dégradation de l'isolation des moteurs commandés ou par l'interruption des procédés (fusibles brûlés). Par ailleurs, des résonances harmoniques peuvent également apparaître entre les variateurs de vitesse et les batteries de condensateurs. [32]

IV.7 Conclusion

De nombreux types d'entraînements à vitesse variable ont été utilisés au fil des ans. L'un des développements les plus importants de ces dernières années a été l'avancement de la technologie d'entraînement à fréquence variable.

Actuellement, les moteurs asynchrones sont souvent associés à un démarreur électronique ou à un variateur de vitesse assurant en plus de la variation de vitesse, la tâche du démarrage, freinage, variation de sens de rotation...etc.

Parmi les convertisseurs de fréquence utilisés pour la variation de la vitesse des moteurs asynchrones, le montage redresseur-onduleur de tension à M.L.I a été choisi, car c'est une technologie de référence pour les applications industrielles.

V.1. Introduction

Il existe de nombreux logiciels de simulation en électronique : electronicsworkbench, pspice, s'implorer etc... Tous ces logiciels ont leur domaine de prédilection, l'électronique petit signal, l'électronique numérique, l'électronique de puissance.

Matlab est un environnement de calcul numérique interactif dans le domaine scientifique. Il fournit à travers son concept d'espace de travail, des facilités graphiques pour construire et afficher les courbes ainsi que des possibilités de communiquer avec des entrées-sortie de données. Il existe un très grand nombre d'opérateurs et fonctions distribués dans le logiciel de base et dans des boites à outils spécialisées.

A ceci s'ajoute un outil de programmation graphique, Simulink, essentiel pour la simulation de systèmes dynamiques non linéaires.

Simulink / Matlab permet de simuler par nature les commandes de moteurs : machines à courant continu, machines synchrones, machines asynchrones, etc... ainsi que les convertisseurs statiques, pour cela nous allons l'utiliser pour simuler le moteur asynchrone et le variateur de vitesse.

V.2. Principe général de la simulation

Après avoir lancé le logiciel, il faut successivement :

- Dessiner le schéma bloc du système à simuler.
- Attribuer des valeurs aux composants.
- Paramétrer la simulation souhaitée.
- Lancer l'exécution.
- Exploiter les résultats.

V.3. Simulation du moteur asynchrone

Après avoir fait le modèle analytique du moteur asynchrone dans le troisième chapitre, nous allons convertir les équations trouvées en modèle numérique.

Nous obtenons le schéma bloc du moteur dans Simulink. Les paramètres du modèle vont être définis dans la section Editor/Commande Windows du logiciel.

En effectuant les essais de simulation numérique, nous allons voir l'évolution :

- De la vitesse angulaire de rotation ω_r ;
- Du couple électromagnétique C_e ;
- Du courant statorique I_s .

V.3.1. Démarrage à vide

La machine étant alimentée par un système de tensions sinusoïdales, Pour un démarrage à vide ($C_r = 0 \text{ N.m}$).

Les Résultats de la simulation du démarrage à vide du moteur asynchrone sont présentés comme suivant :

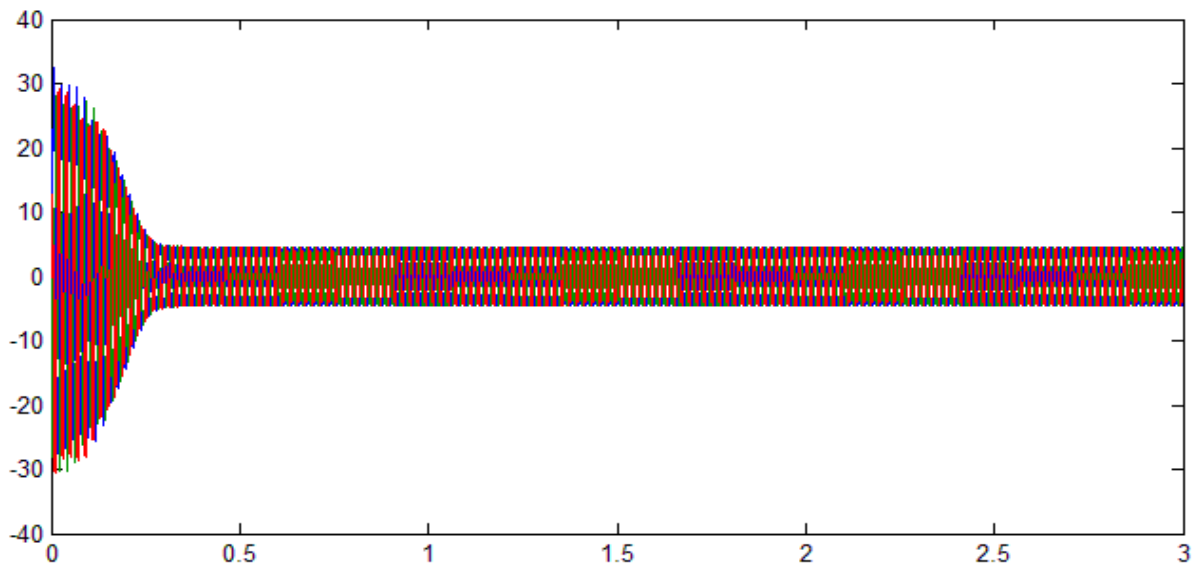


Figure V.1 : Evolution des courants I_{abc} de la MAS.

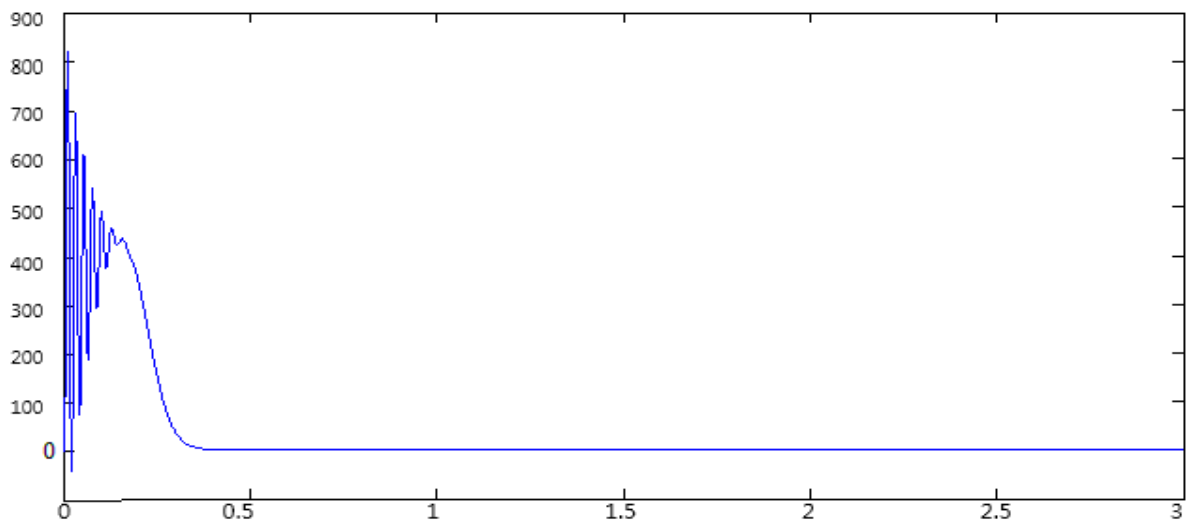


Figure V.2 : Evolution du couple C_e de la MAS.

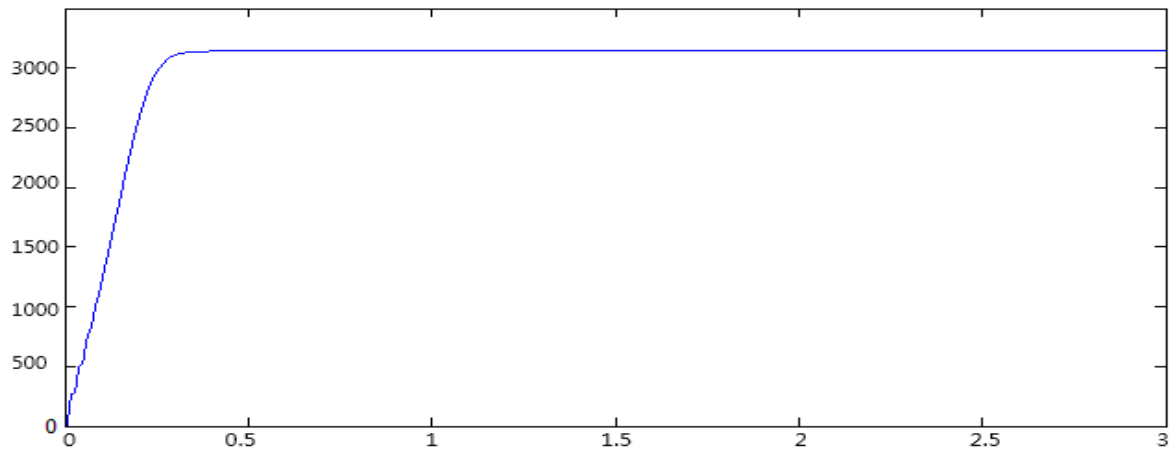


Figure V.3 : Evolution de la vitesse angulaire de la rotation W_r de la MAS.

V.3.2. Démarrage en charge ($C_r=200$ N.m)

La machine étant alimentée par un système de tensions sinusoïdales .Pour un démarrage en charge ($C_r= 200$ N.m) à l'instant ($t=2s$)

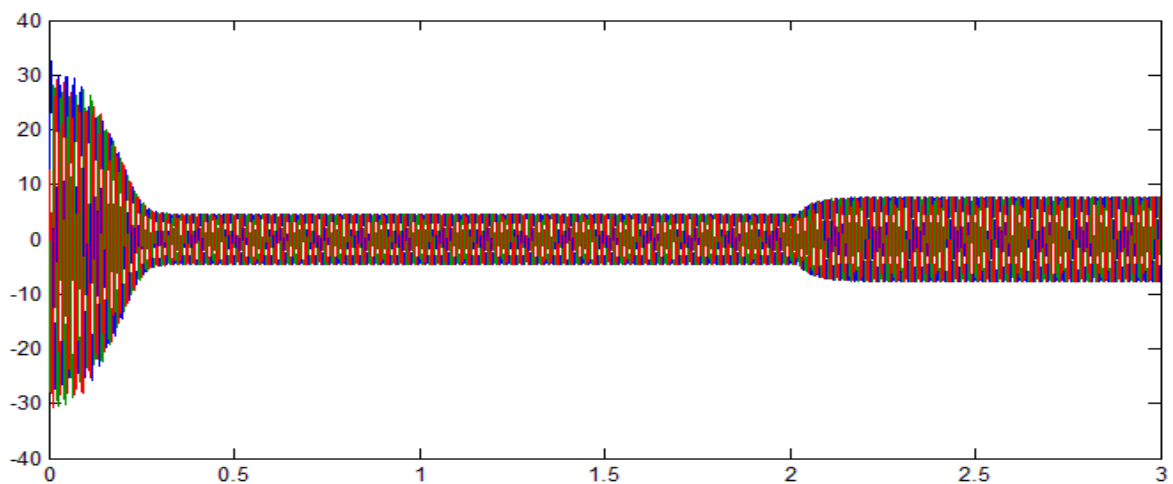


Figure V.4 : Evolution des courants I_{abc} de la MAS alimentée en charge.

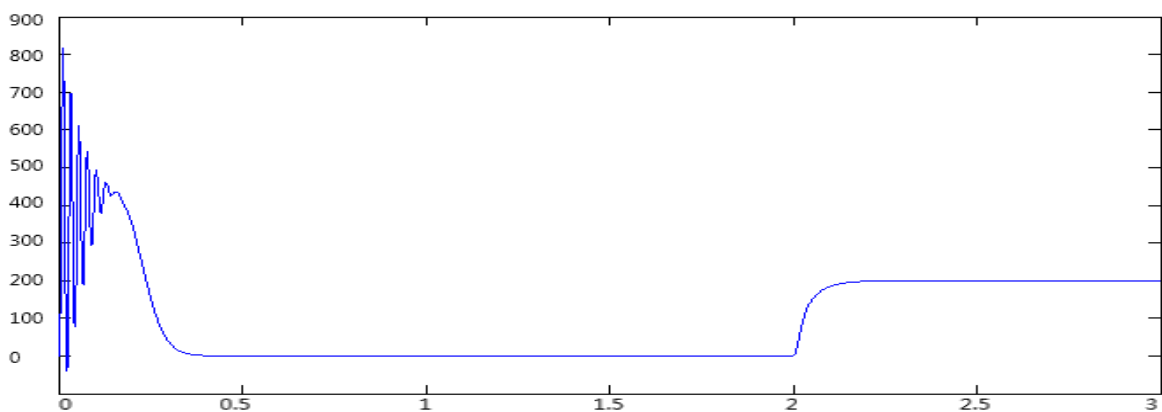


Figure V.5 : Evolution du couple électromagnétique C_e de la MAS alimentée en charge.

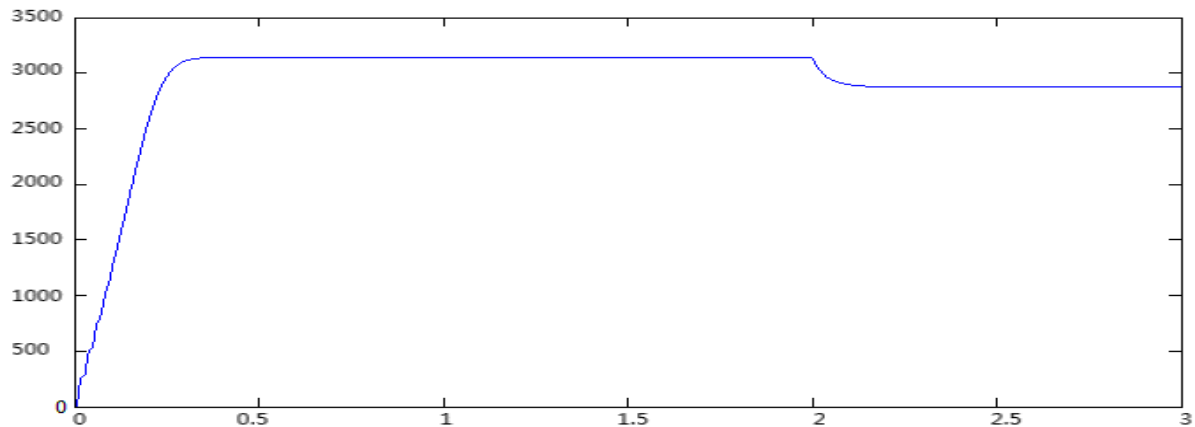


Figure V.6 : Evolution de la vitesse W_r de la MAS alimentée en charge.

V.3.3. Interprétation

a. Le courant statorique

Au démarrage, le courant prend sa valeur maximale, au moment où le moteur joue un rôle de transformateur. Le courant oscille autour de zéro jusqu'à l'instant où il prend sa valeur permanente (sinusoïdal).

Lorsqu'on applique une charge (perturbation), on remarque naturellement une demande (augmentation) du courant ce qui implique un échauffement des enroulements du moteur surtout lorsque le couple résistant devient plus grand que celui du nominal.

b. Le couple électromagnétique

La croissance de la vitesse au démarrage indique la présence du fort couple électromagnétique (ou plus un couple résistant). Ce dernier varie d'une façon brusque au démarrage de la machine, en suite se stabilise en régime permanent, il oscille de manière décroissante jusqu'à la valeur 0.

Lorsqu'on applique un couple résistant à $t=2s$ (au démarrage ou après), on remarque une augmentation du couple électromagnétique jusqu'à la valeur de perturbation associée.

c. La vitesse

Au démarrage et dans un temps étroit, la vitesse présente une oscillation inclinée suivie par un accroissement presque linéaire jusqu'à la valeur de synchronisme, cette variation instantanée dépend de la caractéristique du moteur choisi

Lorsqu'on applique un couple résistant à $t=2s$ (perturbation) on remarque que la vitesse est décroissante ce qui signifie qu'il y a un glissement.

V.4. La commande MLI

La commande triangulo-sinusoïdale de bras consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante, généralement sinusoïdale, avec une ou plusieurs porteuses ondes de modulation ou porteuses, généralement triangulaire ou en dents de scie, unipolaires ou bipolaires, cette technique exige une commande séparée pour chaque phase de l'onduleur. La détermination des instants d'ouverture et de fermeture des interrupteurs est réalisée en temps réel, par une électronique de commande analogique ou numérique ou par fois hybride. [9]

V.4.1. Résultat de simulation de l'onduleur sous MATLAB

On adapte une alimentation du moteur par onduleur triphasé commande par la stratégie triangulo-sinusoïdale a une porteuse.

La commande MLI sinus-triangle d'un onduleur à deux niveaux se fait par la génération d'un seul signal de porteuse avec un le signal de référence.

Les figures ci-dessous présentent Evolution de signal de commande de l'onduleur en fonction de temps, Et l'Evolution des tensions de sortie de l'onduleur en fonction du temps

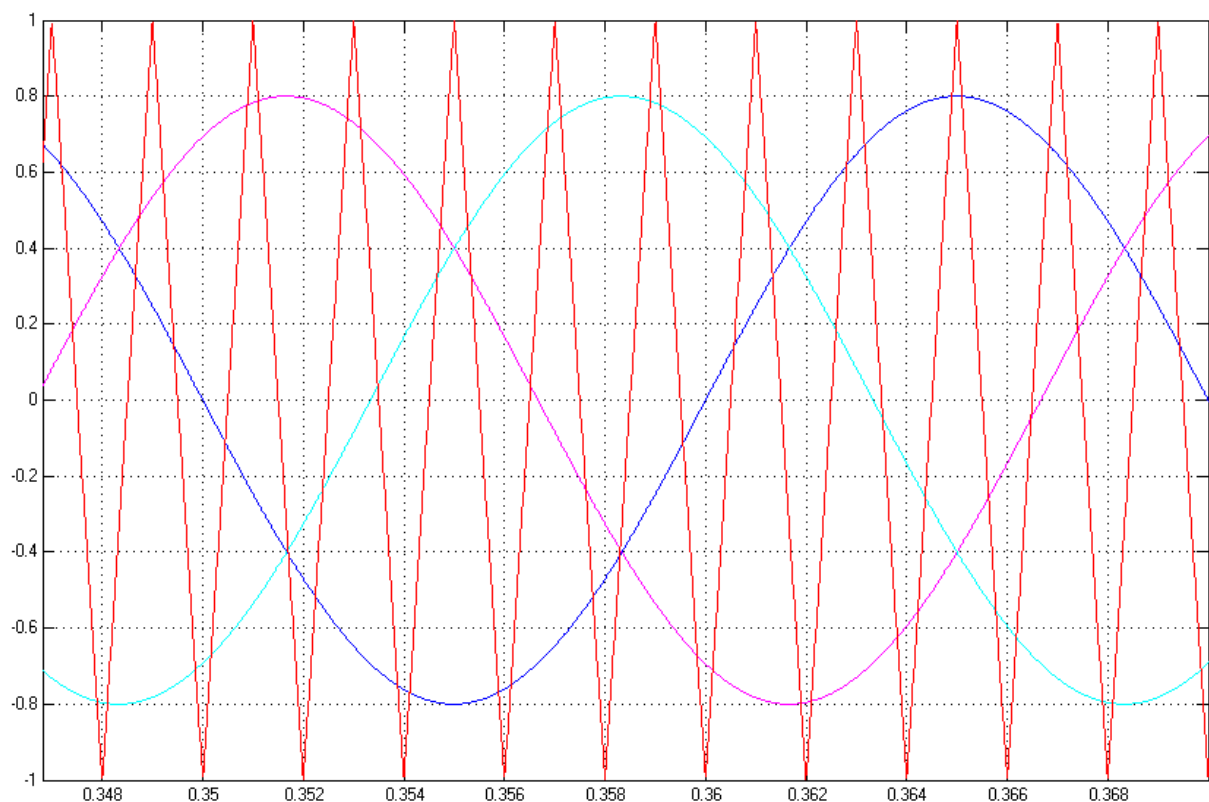


Figure V.7 : Evolution de signal de commande de l'onduleur en fonction de temps.

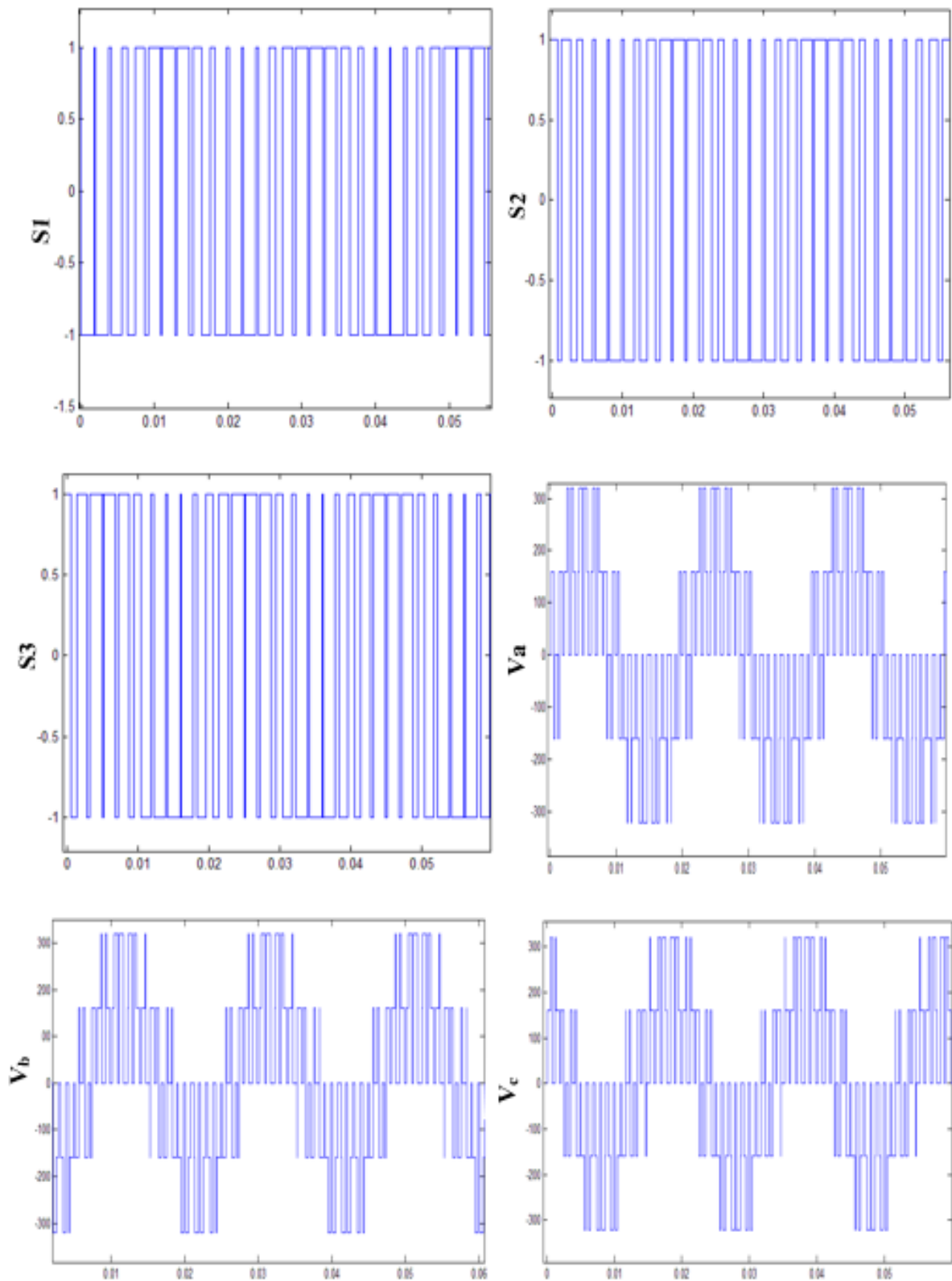


Figure V.8 : Evolution des tensions de sortie de l'onduleur en fonction du temps.

V.5. Association machine asynchrone-onduleur

Nous simulons sous MATLAB le démarrage du moteur synchrone alimenté par la cascade-onduleur MLI alimentée par le redresseur triphasé pour varier la fréquence : les trois courants des enroulements de caque réseau ; la vitesse de rotation et les couples électromagnétiques.

V.5.1. Démarrage à vide

Les figures (V.9 ; 10 et 11) : représente les résultats de simulation de la commande scalaire d'une machine asynchrone, avec réglage de vitesse par un controleur PID, lors d'un démarrage à vide, avec une consigne de vitesse de réf $\omega=300$ rad/s.

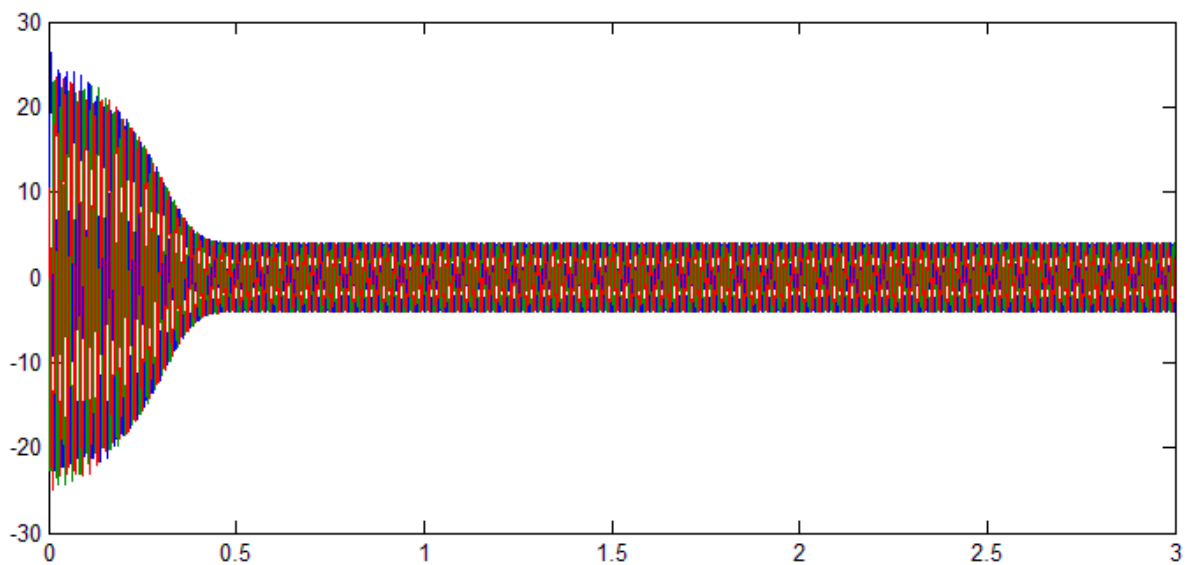


Figure V.9 : Les courants statorique.

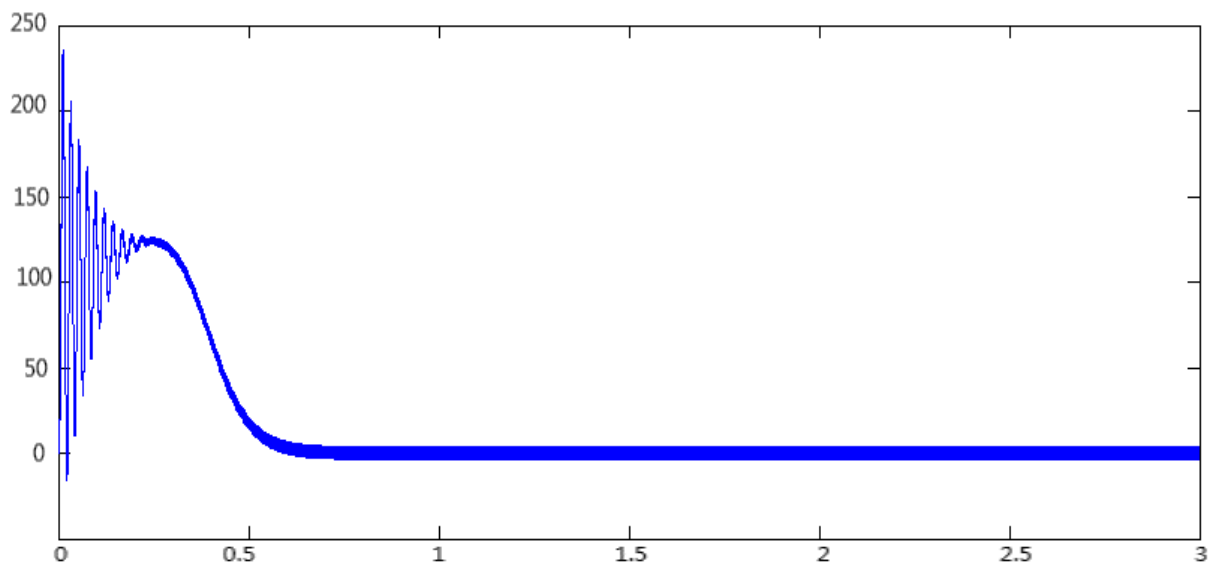


Figure V.10 : Le couple électromagnétique.

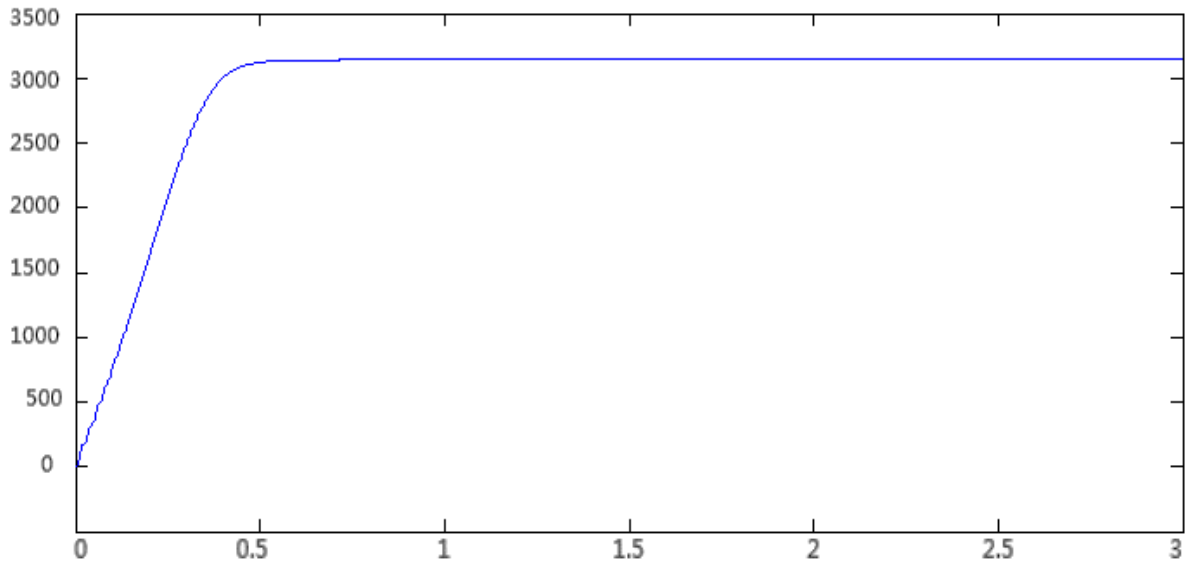


Figure V.11 : La vitesse de rotation.

V.5.2. Démarrage en charge

On a appliqué un couple résistance égale à 200 N.m à l'instant $t=2$ s)

Les Figures (V.12, 13 et 14) présente les résultats de simulation du système pour un démarrage à vide suivi d'un couple de charge de 200 Nm à l'instant $t=2$ s, pour les réponses des courants statorique, la vitesse de rotation et le couple électromagnétique.

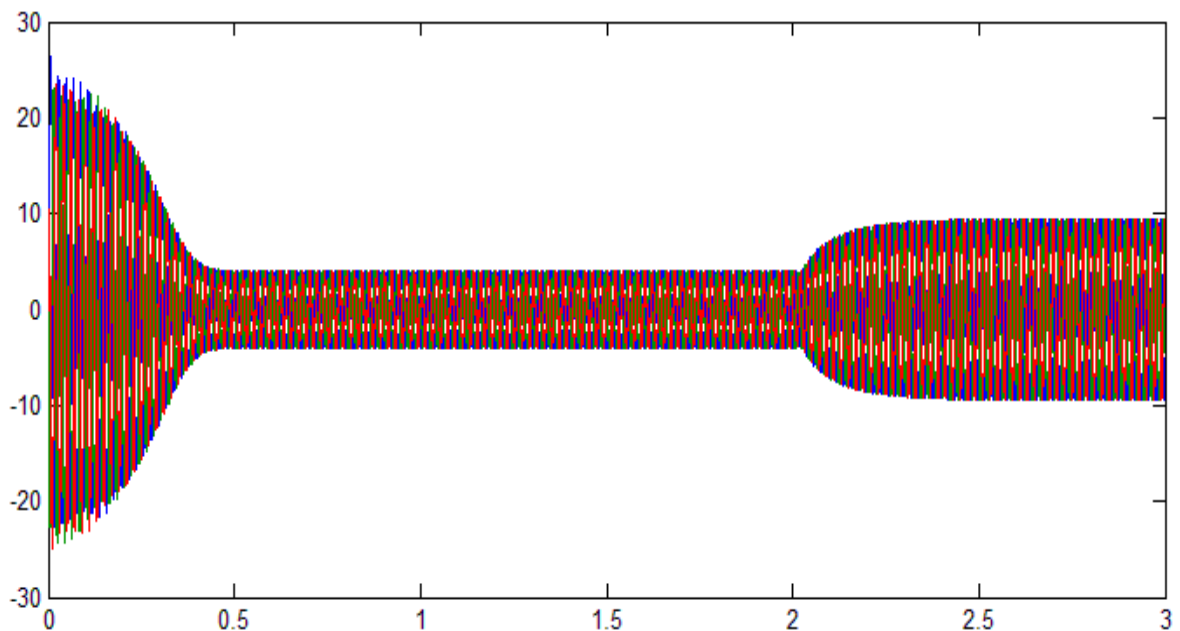


Figure V.12 : Les courants statorique en charge.

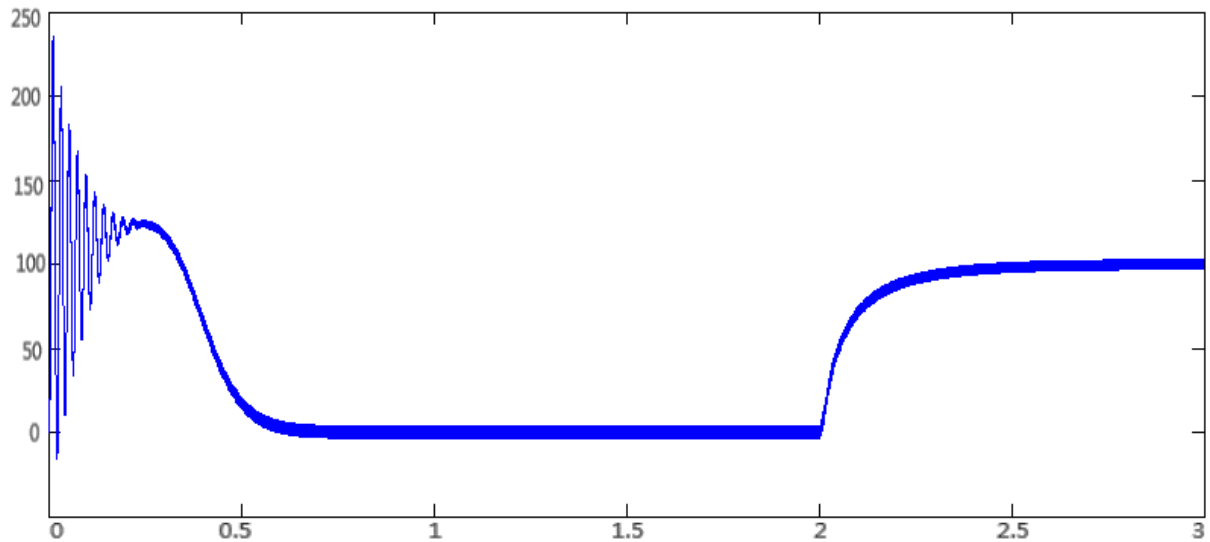


Figure V.13 : Le couple électromagnétique en charge.

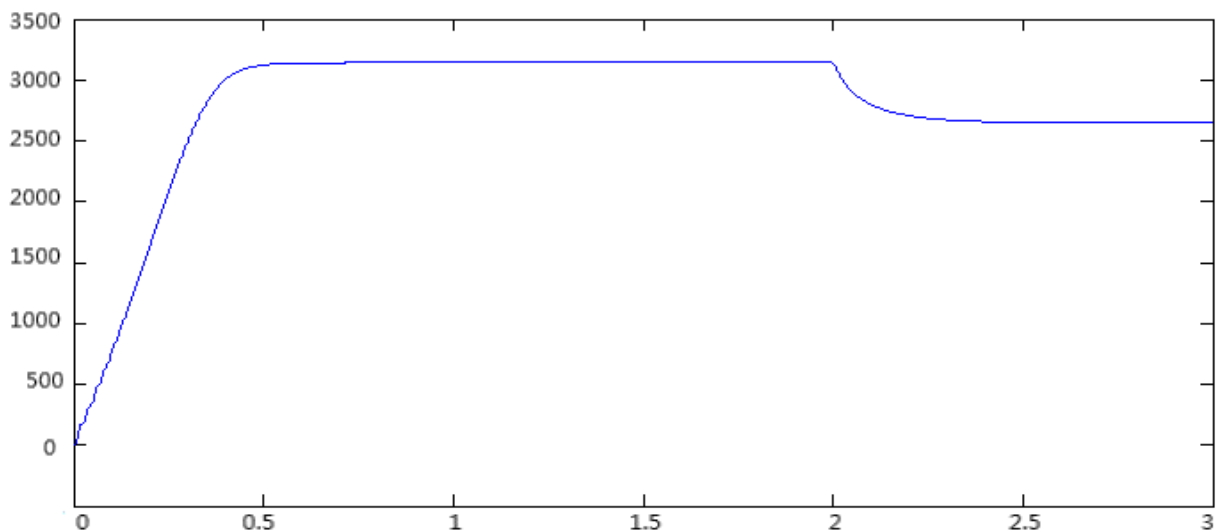


Figure V.14 : La vitesse de rotation en charge.

V.5.3. Interprétation

a. Le courant

Lorsqu'on applique une charge (perturbation), on remarque naturellement une demande (augmentation) du courant ce qui implique un échauffement des enroulements du moteur surtout lorsque le couple résistant devient plus grand que celui du nominal.

b. Le couple électromagnétique

Cette caractéristique illustre la diminution du couple électromagnétique aux premiers instants de démarrage presque à trois fois du couple du moteur avant l'association de l'onduleur,

après un temps de réponse le couple atteindre le 0, et après le couplément de la charge en observe l'augmentation de couple à cause du couple résistant.

c. La vitesse

La vitesse atteint sa valeur nominale après un régime transitoire avec une légère ondulation autour de cette valeur. En appliquant un couple de charge de 200 N.m à $t=2s$ la vitesse diminue à 2800 tr/min.

V.6. Régulation de la pression hydrodynamique d'une pompe centrifuge

V.6.1. Présentation et principe de l'installation de la pompe

Après la séparation des huiles de l'eau dans la station de déshuilage, l'eau traité restera pollué et inutilisable ; car 5 litre d'huile (pétrole) peut contaminer approximativement jusqu'à 3.8 millions de litres de d'eau douce.

Cette eau traitée va donc être aspiré du réservoir, et injecté dans des puits, par une pompe centrifuge entraînée par un moteur asynchrone, comme présenté dans la figure suivante :

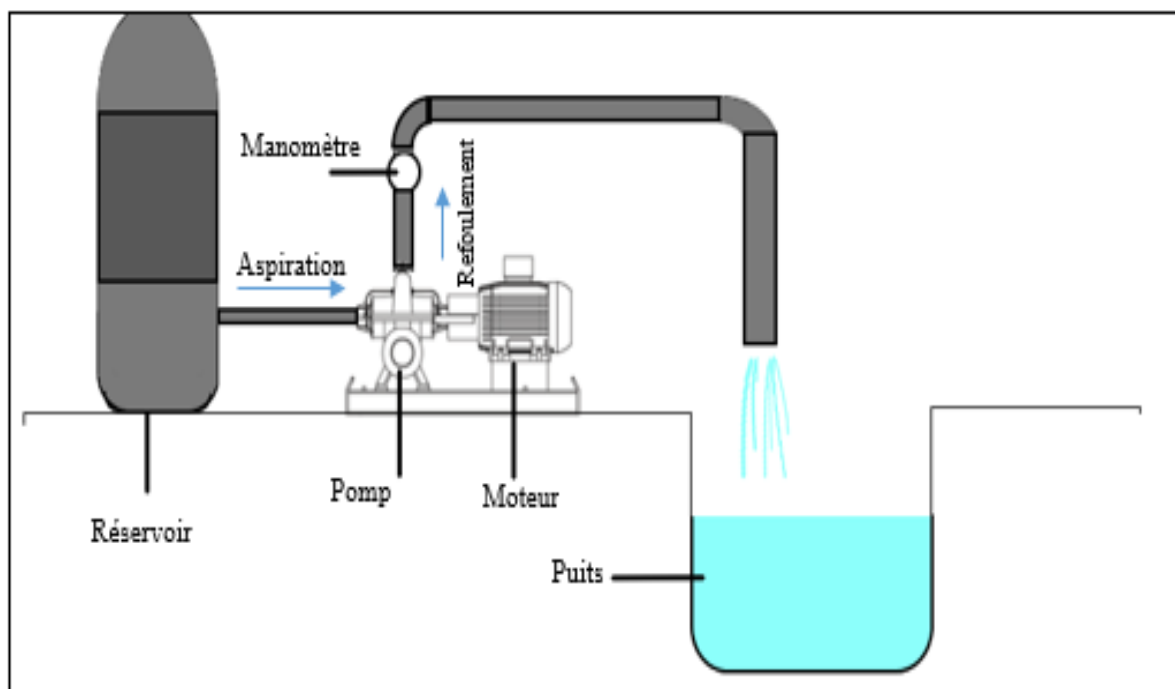


Figure V.15 : Schéma du principe de l'installation.

En adaptant un variateur de vitesse, le moteur est soumis à une différence de pression ΔP et à un débit Q , comme présenté dans la figure (V.16).

Le moteur ici est un transformateur de puissance hydraulique en puissance mécanique.

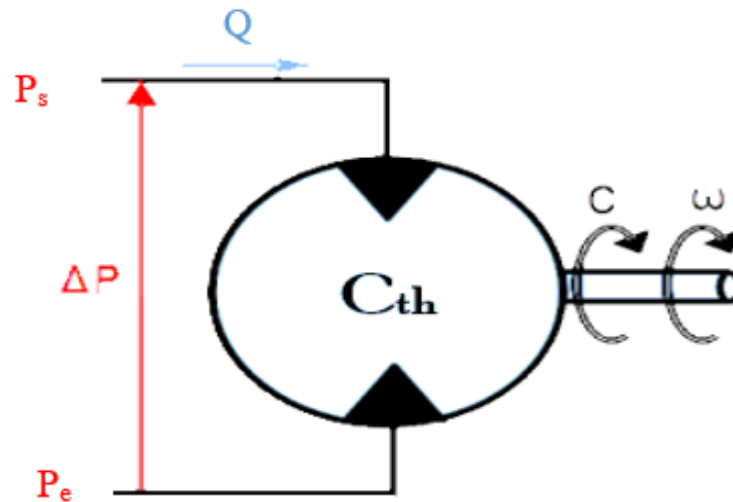


Figure V.16 : Schéma d'un moteur soumis à un débit Q et une différence de pression.

Avec : $\omega = 2\pi f$

P_e : la pression d'entrée.

P_s : la pression de sortie.

C_{th} : la cylindrée théorique.

C : le couple théorique.

Le fluide étant considéré comme incompressible, le débit volumétrique Q s'exprime en fonction de la cylindrée théorique C_{th} et de la fréquence de rotation N (tour/s). La cylindrée d'un moteur ou d'une pompe correspond au volume déplacé en 1 tour.

On en déduit : $Q = C_{th} \cdot N$ (V.1)

La différence de pression théorique est la différence de la pression du fluide théorique en sortie et la pression du fluide en entrée.

$$\Delta P_{th} = P_e - P_{s, th} \quad (V.2)$$

Le couple théorique C , est le couple fourni par le moteur en entrée pour produire la différence de pression théorique.

$$C = C_{th} \Delta P_{th} \quad (V.3)$$

V.6.2. Calcul de la pression de sortie théorique

Le couple théorique défini par la simulation sur Simulink après l'adaptation du variateur de vitesse est égale à 240 Nm.

On a aussi :
$$C_{th} = \frac{Q}{N}$$

Le débit volumétrique de la pompe et la vitesse de rotation sont donné :

$$Q = 40 \text{ m}^3/\text{h} = 0.011111 \text{ m}^3/\text{s} \quad \text{et} \quad N = 2973 \text{ rpm}$$

Donc :
$$C_{th} = 3.7373360 * 10^{-6} \text{ m}^3/\text{mouvement} = 2.999 \text{ cm}^3$$

$$\Delta P_{th} = \frac{C}{C_{th}} = \frac{240}{2.99} = 82.26 \text{ bars}$$

$$P_{s, Th} = P_e - \Delta P_{th} = 136 - 82.26 = 55.75 \text{ bars}$$

La pression du puits de centre de déshuilage à Hassi R'mel est de 50 bars. Après la régulation de la pression hydrodynamique d'une pompe centrifuge, nous avons trouvé la pression de sortie théorique $P_{s, th} = 55.75$ bars.

V.6. Conclusion

Dans ce dernier chapitre-nous avons effectué la simulation d'une machine asynchrone alimentée par une source de tension sinusoïdale triphasée équilibrée. Puis nous avons effectué la simulation de l'association entre l'onduleur et la machine asynchrone triphasé.

Grâce à ce type de variateur, il est possible de contrôler parfaitement les phases de mise en rotation et d'arrêt de l'application, mais aussi d'effectuer un contrôle indépendant de la vitesse et du couple.

En réduisant le couple nous avons réussi à avoir la pression de sortie voulue pour cette installation. Donc on peut dire que d'adapté un variateur de vitesse résout le problème de pression.

Conclusion générale

Ce travail est effectué dans le cadre de la préparation de mémoire de fin d'études Master qui consiste à l'étude de l'adaptation d'un variateur électronique de vitesse avec commande scalaire pour varier le couple d'un moteur asynchrone pour l'entraînement d'une pompe centrifuge horizontale multi-étage « 3009-P-966B Model CHTR 2/16 » ceci afin de résoudre un problème de pression dans la pompe.

Afin d'aborder cette étude nous avons élaboré une étude de moteur asynchrone. Nous sommes passés à sa modélisation dans le repère de Park (d, q) qui permet la mise sous forme d'équations d'état de la machine alimentée en tension.

Nous avons étudié le fonctionnement de l'onduleur de tension à deux niveaux. Le modèle du variateur de vitesse choisi pour cette étude est de type convertisseur de fréquence avec onduleur de tension à M.L.I.

Pour produire une tension de sortie proche de la sinusoïde, il existe différentes stratégies de commande. Nous avons proposé la stratégie Triangulo-Sinusoïdale à une porteuse (Par modulation de largeur d'impulsions), car c'est simple à mettre en œuvre, et efficace pour piloter une machine asynchrone.

Pour interpréter les résultats, nous avons réalisé une simulation numérique sous logiciel MATLAB/SIMULINK, nous montrons une interprétation des résultats de simulation du moteur asynchrone, de l'onduleur et de leur association. Après avoir obtenu le couple du moteur après l'adaptation du variateur de vitesse, une régulation de la pression hydrodynamique de la pompe centrifuge a été faite.

L'adaptation du variateur nous a permis de diminuer la fréquence, qui de son tour a réduit le couple du moteur, qui a impliqué ensuite la régulation du débit et de la pression de la pompe.

Les résultats obtenus approchent les valeurs voulues et demandées pour l'installation. Donc, on peut dire que l'adaptation du variateur de vitesse, est une solution fiable pour la régulation de la pression.

Bibliographie

- [1] : Catalogue « GCB Spa, Filiale du groupe SONATRACH », cellule de communication, 2021.
- [2] : GCB site internet « www.gcb.dz ».
- [3] : Projet hassi r'mel, SONATRACH, réalisation d'une ligne de transfert des eaux traitées provenant de lactation boosting sud phase iii (sbs) vers la station de déshuilage centre et réalisation en epc de deux bacs de stockage d'eau traitée d'une capacité de 2000 et 4000 m³, contrat n°: I/073/SH/EP-DP/HR/DT,2020.
- [4] : Etude de la philosophie de fonctionnement du projet hassi r'mel, GCP /DEP, Doc N° : C7521-GCB-000-PRO-PHY-001.
- [5] : Data sheet pompe 3009-P-966A, installation Nord, GCB/SONATRACH, H'assi r'mel.
- [6] : Sabour.K, Elazazi.S, « Commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation » mémoire master, université AKLI Mohamed Oulhadj de Bouira, année 2015.
- [7] : Cherier.F, Amade. G, « Modélisation en vue du diagnostic des défauts dans une machine asynchrone » mémoire d'Ingénieur d'Etat, Université M'hamed Bougara-Boumerdès, 2009.
- [8] : Maxirous, « Le moteur asynchrone triphasé », Site internet «<https://www.maxicours.com/se/cours/moteurs-asynchrones-triphases/>», avril2018.
- [9] : E. Gaucheron, «Les moteurs électriques... pour mieux les piloter et les protéger», <http://www.schneider-electric.com> , avril 2018.
- [10] :ch. rahmoun, « machine asynchrone », cour électrotechnique fondamentale II, département mécanique, faculté de science et technologie, Université M'hamed Bougara Boumerdès, 2019.
- [11] : Hakim Cherif, « détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et ondelettes » mémoire de magister, Université Mohamed khider Biskra, 2014.
- [12] : « Lire et comprendre la plaque signalétique de son moteur », Site internet <https://www.pompe-moteur.fr/blog/lire-et-comprendre-la-plaque-signalétique-de-son-moteur-n2>, juillet 2015.
- [13] : Alain Charbonne, « Le moteur asynchrone triphasé », Site internet «<https://sti.discip.ac-caen.fr> » avril2018.
- [14] :Z.Ait Ouali, « Application de FPGA à la commande d'un moteur asynchrone » mémoire magister, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou ,2015.
- [15] :J.P. Caron, J.P. Hautier : “Modélisation et Commande de la machine asynchrone”, Edition Technip, France 1995.

- [16] : Ch. rahmoune, cours master 1 et master 2 machine électrique, département mécanique, faculté de science et technologie, Université M'hamed Bougera Boumerdès, 2020/2021, 2021/2022.
- [17] : M.BENAOUICHA et Y.GUERROUT, « Réalisation d'un Onduleur de Tension Commandé par la Carte Dspace1104 », Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira Bejaïa, 2014/2015.
- [18] : F. BOUABIDA, A. BENKHALIFA, « Migration D'un Variateur de Vitesse (SEW) de L'ancienne version Vers la Nouvelle », mémoire de Master, Université de Bejaïa, 2016.
- [19] : Bellach.Omar, étude d'un variateur de vitesse mémoire master, université de Blida, 2017.
- [20] : Ashlin, Site internet « <https://automationforum.co/what-is-a-variable-speed-drive-and-why-are-they-used-in-the-industrial-process> », 21 juin 2021.
- [21] : M.BENAOUICHA et Y.GUERROUT, « Réalisation d'un Onduleur de Tension Commandé par la Carte Dspace1104 », Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira Bejaïa, 2014/2015.
- [22] : site internet, « <https://sites.google.com/site/1stigetone/varv> ».
- [23] : Mémoire de magister université BADJI MOKHTAR – Annaba – « étude des différentes techniques de commande des onduleurs à MLI associés à une machine asynchrone ».
- [24] : Jacques schonek yves nebon Cahier Technique Schneider Electric n° 204.
- [25] : Ramdane LATEB, Modélisation Des Machines Asynchrones Et Synchrones A Aimants Avec Prise En Compte Des Harmoniques D'espace Et De Temps, L'Institut National Polytechnique de Lorraine, le 19 octobre 2006.
- [28] : Mr BENGMAIH : “ Redressement non commandé ”, C.P.G.E-TSI-SAFI.
- [29] : Yousfi Massinissa et Bouhenaf Zidane : “ commande directe de couple de la machine.
- [30] : onduleur autonome (chapitre 5 université de Savoie licence EFA module U6 énergie et convertisseur d'énergie).
- [31] : BOUAKAZ OUAHID, contribution à l'analyse des onduleurs multi niveaux, université de BATNA, année 2005.
- [32] : .SEGUIER. J.BONAL : “ entrainement électrique a vitesse variable ”, Edition Tech &doc, 1998.