



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أمحمد بوقرة بومرداس
Université M'Hamed Bougara de Boumerdès
كلية المحروقات والكيمياء
Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie



Département Automatisation des procédés industriels

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Instrumentation dans l'industrie pétrochimique

Thème

Etude d'un variateur de vitesse pour un moteur asynchrone triphasé.

Présenté par :

**TOUAM Abdelhak
FENNOUH Mohamed**

Devant le jury composé de :

M BOUMEDDINE.B	MCA	Président
Mme KATEB.Y	DOCTEUR	Examineur
M Aguib.S	Professeur	Examineur
M.KHEBLI.A	MCA	Encadrant

Année universitaire : 2024/2025

Remercîments

Louange à Dieu qui nous a accordé la force, la patience et la persévérance pour mener à bien ce travail. Que la paix et la bénédiction soient sur Son Prophète Mohammad, ainsi que sur sa famille et ses compagnons.

Ce mémoire représente l'aboutissement d'un long parcours universitaire au sein du département d'Automatique, et nous tenons, en tant que co-auteurs, à exprimer notre profonde reconnaissance à toutes les personnes qui ont contribué à sa réalisation.

Nous remercions tout particulièrement notre encadrant, Monsieur Khebli Abdelmalek, pour sa disponibilité, ses orientations précieuses, sa rigueur scientifique et son accompagnement constant tout au long de cette étude. Ses conseils nous ont été d'une grande valeur.

Nos remerciements vont également aux Professeurs membres du jury, pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de juger ce mémoire, et pour l'attention qu'ils accorderont à notre travail..

Enfin, nous remercions nos camarades, amis et toutes les personnes qui nous ont soutenus de près ou de loin, avec une pensée particulière à ceux qui ont partagé avec nous les moments

Dédicace

Avant tout, je remercie Dieu, le Tout-Puissant, de m'avoir donné la force, le courage et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail, malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents, que Dieu les protège et les garde en bonne santé, pour leur soutien moral, leurs encouragements constants et tous les sacrifices qu'ils ont endurés pour moi.

À ma grande famille, source d'amour et de stabilité.

À mes frères TiTi et Koukoul, et à ma sœur Khadidja, pour leur affection et leur présence réconfortante.

À mes amis proches : Achref, Merouan, Hadjer , Samia, Boucif, Nounou, Oussama, Anouar... et bien d'autres qui se reconnaîtront.

À tous mes camarades d'études, en particulier ceux de la spécialité Instrumentation, promotion 2020, avec qui j'ai partagé de précieux souvenirs, les moments de doute comme les éclats de rire.

À toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont cru en moi et m'ont soutenu durant cette belle aventure académique.

Ce travail est le fruit de nombreuses années d'efforts, d'entraide, et d'amitiés sincères.

Abdelhak

Dédicace :

Avant tout, je remercie Allah le tout puissant de m'avoir donné la force, la patience et le courage pour accomplir ce travail malgré les difficultés, je dédie ce mémoire avec tout mon respect à mes chers parents, que Allah protège pour leurs amour, leurs prières et leurs sacrifices, A tout ma famille, pour leur soutien. A mon encadrant Monsieur Khebli Abdelmalek, pour ses conseils et son accompagnement précieux, ainsi qu'à tous mes professeurs qui m'ont guidé et transmis leur savoir tout au long de mon parcours, Et enfin, à mes amis et camarades d'études, pour leur aide, leur soutien et les bons moments partagés.

Mohamed

Sommaire :

I.1 Introduction	1
I .2 Présentation du Complexe GL2Z	1
I .3 Fonctions du Complexe GL2Z	2
I .4 Organisation du complexe GL2Z	3
I .4.1 DEPARTEMENT MAINTENACE	3
I .4.1.1 Service Planning et Méthode	5
I .4.1.2 Service Electricité (E)	6
I .4.1.3 Service Mécanique (T)	6
I .4.1.4 Service chaudronnerie (C)	7
I .4.1.5 Service instrumentation (R)	7
I .4.1.6 Service logistique (L)	7
I .4.2 DEPARTEMENT TRAVAUX NEUFS	7
I .4.3 DEPARTEMENT TECHNIQUE	9
I .4.4 DEPARTEMENT PRODUCTION	10
Chapitre 2 :Généralités sur le variateur de vitesse	
II.1 Introduction	14
II.2 Présentation d'un variateur de vitesse	14
II.2.1 Définition	14
II.2.2 Intérêt de la variation de vitesse	15
II.3 Schéma synoptique du variateur de vitesse	16
II.4 Classification des onduleurs	16
II.5 Types d'onduleurs autonomes de tension	19
II.5.1 Onduleur monophasé	19
II.5.1.1 Fonctionnement en pleine onde (pont complet)	20
II.5.1.2 Autres modes de fonctionnement	21
II.5.1.3 Forme des signaux fournis par l'onduleur	21
II.5.2 Modélisation d'un onduleur monophasé	22
II.5.3 Simulation sous Matlab	24
II.5.4 Onduleur triphasé de tension	27
II.5.4.1 Modélisation de l'onduleur triphasée	29
II.5.4.2 Commande de l'onduleur par du signal MLI	33

II.5.4.3 Commande à 120°	33
II.5.3 Conclusion	37
Chapitre 3 Généralité sur les machines asynchrones	
III.1 Introduction	39
III.2 Généralités	39
III.2.1 Constitution de la machine asynchrone	39
III.2.1.1 Le stator	40
III.2.1.2 Le rotor	40
III.2.2 Branchement en étoile ou en triangle	41
III.2.3 Principe de fonctionnement général d'une machine asynchrone	41
III.2.4 Bilan énergétique d'un moteur asynchrone et formules	42
III.3. Modélisation de la machine asynchrone	44
III.3.1 Hypothèses simplificatrices	44
III.3.2 Modélisation dans le plan triphasé (abc)	44
III.3.3 Équations générales de la machine asynchrone triphasée	45
III.4 Démarrage de la machine asynchrone	46
III.4.1 Démarrage direct semi-automatique 1 sens de marche	46
III.4.2 Démarrage direct semi-automatique deux sens de marche	48
III.4.3 Démarrage étoile-triangle 1 sens de marche	50
III.4.4 Démarrage par élimination des résistances statorique	52
III.5. Programmation d'un variateur avec SoMove	54
III.5.1. Introduction	54
III.5.3. Mise en service pas à pas du variateur avec SoMove	56
III.5.3. 1. Connexion du PC au variateur	57
III.5.3. 2. Création d'un nouveau projet	57
III.5.3. 3. Paramétrage moteur	57
III.5.3. 4. Paramètres de fonctionnement	57
III.5.3. 5. Configuration des entrées/sorties	57
III.5.3. 6. Téléchargement dans le variateur	57
III.5.4. Avantages de l'utilisation de SoMove	58
III.5.5. Conclusion	58
Chapitre 4 : Variateur de vitesse à source divisée	59

IV.1 Introduction	60
IV.2 Onduleur triphasé à source divisée	60
IV.2.1 Fonctionnement	61
IV.2.2 Facteur de suralimentation et gain de tension alternative	63
IV.2.3 Analyse des courants et tensions	64
IV.2.4 Rendement et pertes	64
IV.2.5 Avantages et limitations du SSI	66
IV.2.6 Facteur de suralimentation et gain de tension alternative	66
IV.2.7 Conclusion	67
IV.3 Commande d'un variateur de vitesse par IA	68
IV.3.1 Architecture du Système	68
IV.3.2. Techniques d'IA Appliquées aux Variateur	68
IV.3.2.1 Réseaux de Neurones Profonds (Deep Learning)	68
IV.3.2.2 Logique Floue (Fuzzy Logic)	68
IV.3.2.3 Reinforcement Learning (RL)	69
IV.3.3 Implémentation Pratique	69
IV.3.3.1 Matériel Requis	69
IV.3.3.2 Flux de Déploiement	69
IV.3.3.3 Comparaison IA vs PID Classique	69
IV.3.4 Conclusion	70

LES FIGURES

Figure (I.1) : Complexe GL2Z	2
Figure (I.2) : L'organigramme général du complexe GL2Z	3
Figure (I.4) : L'organigramme Service Planning Et Methodes	4
Figure (I.3) : L'organigramme département maintenance	5
Figure (I.5) : L'organigramme Service Planning Et Methodes	8
Figure (I.6) : L'organigramme Département Technique	9
Figure (I.7) : L'organigramme Département production :	11
Figure (II.1) : Variateur de vitesse	14
Figure (II.2) : Schéma synoptique d'un variateur de vitesse	16

Figure (II.3) : Schéma de principe de l'onduleur en Pont	19
Figure (II.4) : chronogramme de commande	20
Figure (II.5) : Forme de la tension et du courant	22
Figure (II.6) :circuit d'un onduleur monophasé en demi pont	22
Figure (II.7) :circuit d'un onduleur monophasé en pont complet	23
Figure (II.8) Simulation détaillé d'un onduleur monophasé	26
Figure (II.9) Résultats de la simulation d'un onduleur monophasé précédente	27
Figure (II.10) Simulation détaillé d'un onduleur monophasé à pont complet	27
Figure (II.11) Résultats simulation d'un onduleur monophasé à pont	28
Figure (II.12) : Circuit de puissance d'un onduleur triphasé	28
Figure (II.13) : Générateur de la PWM à Comparateur à deux seuils	33
figure (II.14) montre les six étapes de fonctionnement de l'onduleur pendant une période	34
Figure (II.15) : Séquences de conduction des interrupteurs (commande à 120°)	34
Figure (II.16) : Chronogrammes des tensions composées	36
Figure (II.17) : Chronogrammes des tensions simples	37
Chapitre 3 Généralité sur les machines asynchrones	
Figure (III.1) : Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage	41
Figure (III.2) :le stator	40
Figure (III.3) : le rotor	40
Figure (III.4) : Façon de couplage étoile et triangle dans la boite à borne d'une machine asynchrone	41
Figure (III.5) : Bilan des puissances	42
Figure III.6 : Représentation schématique d'une MAS Triphasée	45
Figure III.7 : Démarrage direct semi-automatique 1 sens de marche	47
Figure III .8 :Démarrage direct semi-automatique deux sens de	49

marche	
Figure III.9 : Démarrage étoile-triangle 1 sens de marche	50
Figure III.10 : Démarrage par élimination des résistances statorique	52
Figure III.12 : Sélectionner un variateur la famille Altivar Process ATV600	54
Figure III.11: Créer un nouveau projet	54
Figure III.13 : Sélection du variateur ATV650U07N4 et accès aux paramètres de configuration	55
Figure III.14 : Courbes de démarrage et de freinage du moteur	56
Chapitre 4 : Variateur de vitesse à source divisée	
Figure (IV.1) : la topologie de l'onduleur triphasé a source divisée	60
Figure (IV.2) : Vecteurs de tensions délivrées par l'onduleur SSI	61
Figure (IV.4) : Décharge de l'inductance via l'état V7	62
Figure (IV.3) : Charge de l'inductance via le états (V0-V6)	62
Figure (IV.5) : Graphe Représentation temporelle de $i_s(t)$ et $V_{dc}(t)$ pendant un cycle de commutation	64
Figure (IV.6) : graphe représentant la variation de $V_{dc}/E=\beta$ en fonction de D_{av}	66
Figure (IV.7) : Boucle de Commande Intelligente	67
Figure (IV.7) : Architecture globale	68

Liste des tableaux

Tableau (III.1) : Avantages de l'utilisation de SoMove	58
Tableau IV.1 : Résumé des paramètres principaux du variateur à source divisée	64
Tableau (IV.2) : Avantages et limitations du SSI	66
Tableau (IV.3) : Matériel Requis Tableau (IV.4) : Comparaison IA vs PID Classique	70
Tableau (IV.3) : Matériel Requis Tableau (IV.4) : Comparaison IA vs PID Classique	70

Résumé en français :

Ce mémoire porte sur l'étude de la commande d'un moteur asynchrone triphasé à l'aide d'un variateur de vitesse. Le travail a été réalisé au sein du complexe GL2Z de Sonatrach à Arzew, spécialisé dans la liquéfaction du gaz naturel. L'objectif principal est d'optimiser les performances du moteur et de permettre une variation de vitesse selon les besoins industriels. Le mémoire explore les différentes topologies d'onduleurs, notamment les onduleurs triphasés, et les techniques de modulation comme la MLI. Des simulations sur MATLAB/Simulink sont également réalisées pour valider les performances des systèmes étudiés.

الملخص باللغة العربية :

يتناول هذا المذكرة دراسة قيادة محرك غير متزامن ثلاثي الطور باستخدام جهاز تغيير السرعة. تم إنجاز هذا العمل التابع لشركة سوناطراك في أرزيو، المختص في تمبيع الغاز الطبيعي. الهدف الرئيسي هو تحسين أداء GL2Z مجمع المحرك وإمكانية تغيير سرعته حسب متطلبات العملية الصناعية. تطرقت الدراسة إلى مختلف أنواع محولات الجهد، تم دعم الدراسة بمحاكاة باستخدام برنامج MLI خاصة المحول الثلاثي، وتقنيات التعديل مثل تقنية MATLAB/Simulink.

Abstract in English:

This thesis focuses on the study of controlling a three-phase induction motor using a variable speed drive (VSD). The work was carried out at the GL2Z complex of Sonatrach in Arzew, specialized in natural gas liquefaction. The main objective is to enhance the motor's performance and allow speed variation according to industrial requirements. The thesis discusses various inverter topologies, particularly the three-phase inverter, and modulation techniques such as PWM. MATLAB/Simulink simulations are performed to evaluate system performance.

Introduction Générale

Aujourd'hui, dans le monde de l'industrie, les entreprises cherchent à améliorer la qualité, la sécurité et la performance de leurs installations. Cela passe souvent par l'automatisation et le bon fonctionnement des machines. Parmi les équipements les plus utilisés, on trouve les moteurs électriques, et en particulier les moteurs asynchrones triphasés. Ces moteurs sont solides, fiables et bien adaptés aux besoins industriels.

Cependant, un moteur alimenté directement par le réseau électrique tourne à une vitesse fixe. Or, dans de nombreuses applications, il est nécessaire de faire varier cette vitesse, par exemple pour suivre une consigne, s'adapter à une charge ou économiser de l'énergie. C'est pourquoi on utilise des variateurs de vitesse, qui permettent de contrôler la fréquence et la tension envoyées au moteur. Grâce à eux, on peut ajuster la vitesse du moteur selon les besoins, ce qui rend les systèmes plus efficaces et plus souples.

Ce mémoire a été réalisé dans le cadre d'un stage au complexe GL2Z de Sonatrach à Arzew, qui est spécialisé dans la liquéfaction du gaz naturel. Dans ce complexe, on utilise de nombreux moteurs asynchrones dans les processus de production, et leur bon fonctionnement est essentiel.

L'objectif de ce travail est donc d'étudier comment un variateur de vitesse peut être utilisé pour piloter un moteur asynchrone triphasé de manière efficace. Pour cela, le mémoire est organisé en plusieurs parties.

On commence par présenter le complexe GL2Z et son fonctionnement. Ensuite, on explique les principes de base des moteurs asynchrones et des variateurs de vitesse. On décrit ensuite un modèle de commande du moteur par un variateur, avec des explications simples et des schémas. Enfin, on présente des résultats de simulation réalisés sous MATLAB/Simulink, qui montrent comment le système réagit dans différentes situations.

Ce mémoire est divisé en quatre chapitres principaux :

- **Le premier chapitre** est consacré à la présentation générale du complexe industriel GL2Z de Sonatrach. Il décrit son organisation, ses départements techniques, ainsi que le rôle central de la maintenance dans la continuité de la production.
- **Le deuxième chapitre** traite des variateurs de vitesse. On y aborde leur définition, leur utilité, les différents types d'onduleurs et leurs principes de fonctionnement, avec des exemples de simulations sous MATLAB/Simulink.
- **Le troisième chapitre** est consacré aux machines asynchrones. On y explique leur fonctionnement, leur modélisation électrique et mécanique, ainsi que différentes méthodes de démarrage. Ce chapitre inclut également un exemple de mise en service d'un variateur Schneider via le logiciel SoMove.
- **Le quatrième et dernier chapitre** présente une étude approfondie d'un variateur de vitesse à source divisée. Il introduit la commande MLI, les performances de l'onduleur triphasé, et des techniques de commande intelligente comme les réseaux de neurones et la logique floue.

Chapitre 1

Présentation générale du complexe GL2Z

I.1 Introduction

Depuis 1964 SONATRACH exporte du gaz naturel, date de la mise en service de la première usine de GNL au monde à Arzew, la vocation gazière de SONATRACH s'est ainsi confirmée au rythme d'une démarche résolue qui se traduit depuis plus de 40 ans par un effort propre considérable en termes d'investissement humains, financiers et technologiques consacrés au développement de l'amont, du transport par canalisations, et la filière GNL l'option stratégique du partenariat et tout le long de la chaîne gaz, élargit les perspectives de cette vocation qui fait de la SONATRACH la première Société gazière en méditerranée. La compagnie SONATRACH a été créée par le décret N63-491 Du 31-12-1963 afin de couvrir tous les domaines des hydrocarbures: exploitation, forage, production, transport, liquéfaction, transformation et commercialisation.

Grace à ses réserves énergétiques, sa technologie ainsi que ses ressources humaines elle occupe une place importante dans la cour internationale où elle est classée régulièrement parmi les douze plus grandes compagnies pétrolières mondiales.

La division LQS de l'activité aval est chargée du développement et de l'exploitation des activités de liquéfaction du Gaz naturel. Pour ce elle dispose de quatre complexes:

GLAZ: situé à Arzew opérationnel en 1964.

GLIK: situé à Skikda opérationnel en 1972.

GLIZ: situé à Bethioua opérationnel en 1978.

GL2Z: situé à Bethioua opérationnel en 1981.

I.2 Présentation du Complexe GL2Z

Le Complexe GL2Z de l'entreprise Nationale SONATRACH, pour ses grandes capacités est l'avant dernier né des ensembles industriels dans la Zone Industrielle d'Arzew.

Le Complexe GL2Z s'étend sur 72 hectares, il a été construit par la société Américaine " PULLMAN KELLOGG " et " PULLMAN KELLOGG ALGERIA INC " (cette dernière s'occupant des opérations de constructions et approvisionnements en Algérie) dans le cadre d'un contrat à coût remboursable. Il a été réceptionné en date du 11 Septembre 1981 par l'entreprise Nationale SONATRACH.



Figure (I.1) : Complexe GL2Z

I.3 Fonctions du Complexe GL2Z

Complexe GL2Z a été conçu pour permettre d'assurer le transport sous forme liquide du gaz naturel provenant de HASSI R'MEL ce gaz et acheminé par des pipelines vers l'usine; il y est traité liquéfié et stocké. Le GNL est ensuite chargé à bord de navires méthaniers de haut mer spécialement prévu pour le transport cryogénique et il est livré à l'étranger. GL2Z comprend (06) trains de liquéfaction indépendants et identiques fonctionnant en parallèle. GN d'alimentation est également distribué à chacun des trains par un réseau de canalisation. Le débit du GN distribué est d'environ 1500 000 m³/h pour les 06 trains, soit en moyenne 250 000 m³ /h /train. Dans chaque train le GN d'alimentation est traité pour éliminer le gaz carbonique et la vapeur d'eau, il est ensuite réfrigéré et distillé pour en extraire les hydrocarbures lourds et il est finalement liquéfié à (-162°C). Une fois liquéfié le gaz naturel est envoyé par pompage dans trois bacs réservoirs à une pression de « 1,03 » bar absolu qui Desservent l'ensemble des 06 trains. Il est prévu que chaque train de liquéfaction produira en moyenne 8400 m³/jour de GNL. Les réservoirs de stockage correspondent à 05 jours de production sur l'ensemble des 06 trains. Chaque méthanier à une capacité moyenne de 125 000 m³ et lorsque ses réservoirs sont préparés, le chargement peut s'effectuer en« 12h30 » à raison d'un débit de chargement 10 000 m³ GNL/h.

I.4 Organisation du complexe GL2Z

Le complexe GL2Z est composé de différents départements et services représentés dans :

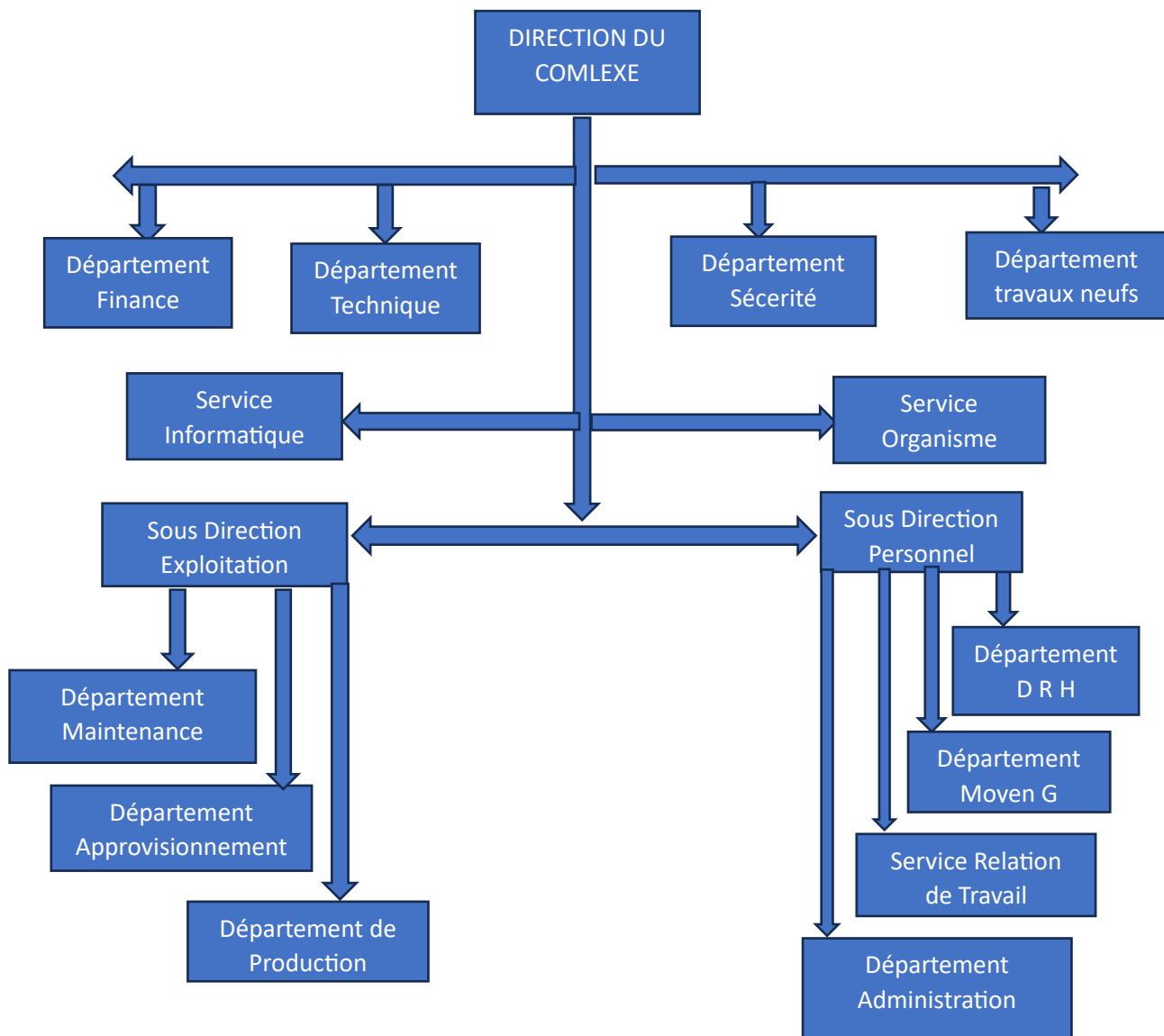


Figure (I.2) : L'organigramme général du complexe GL2Z

I.4.1 DEPARTEMENT MAINTENACE

Le département maintenance est considéré comme le poumon du complexe vu son importance à veiller sur le bon fonctionnement des équipements de production dans le but de conserver la cadence de travail au même rendement quotidien et mensuel. Tout en étant synchronisé avec les départements Production et technique, autant du point de vue planification et exécution des travaux que du côté amélioration et fiabilité des équipements. Avant il s'occupait que de l'accidentel alors que c'était le rôle du pompier, c'est-à-dire agir sur la panne mais l'aspect économique a développé la notion des coûts ce

qui implique le Les sites de productions ont étaient décortiqués afin d'agir sur le préventif, c'est appliqué les gammes du fournisseur (durée, devise des gammes), mais ce service a un coût de revient très cher, donc il a fallu améliorer le préventif et passer au prédictive ce qui veut dire maîtriser les machines par des éléments de surveillance donc agir plus profondément sur l'usure des machines et ces composants. Ce département comprend six (06) services :

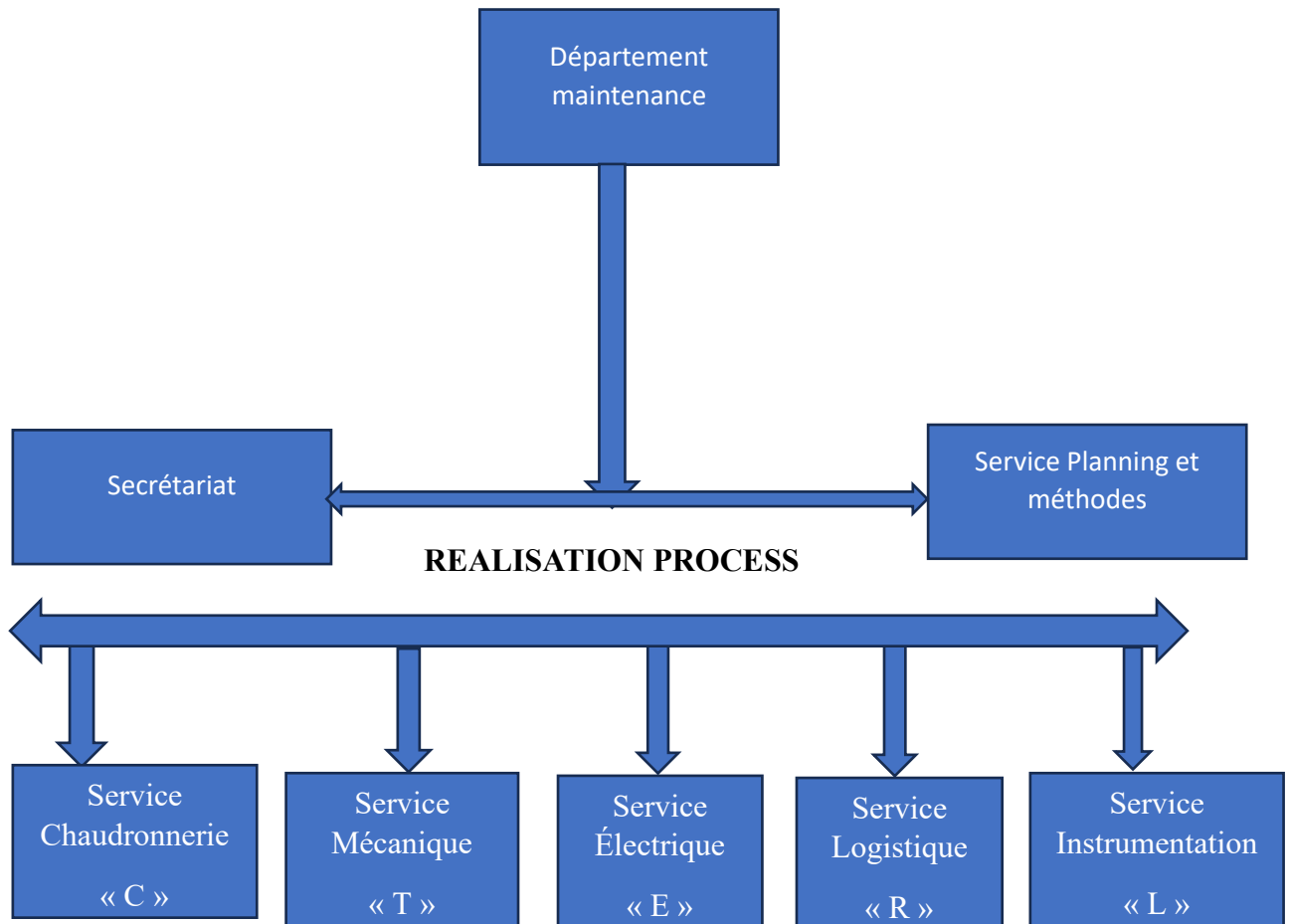


Figure (I.3) : L'organigramme département maintenance

I.4.1.1 Service Planning et Méthode

Il coordonne et prévoit les interventions des services exécutifs de la maintenance ou «Crafts», avec la production et les approvisionnements. Il est considéré comme étant le cerveau du département. C'est lui qui se charge de la préparation, planification et la réalisation des travaux de maintenance du complexe. Pour ce, il se divise en plusieurs sections :

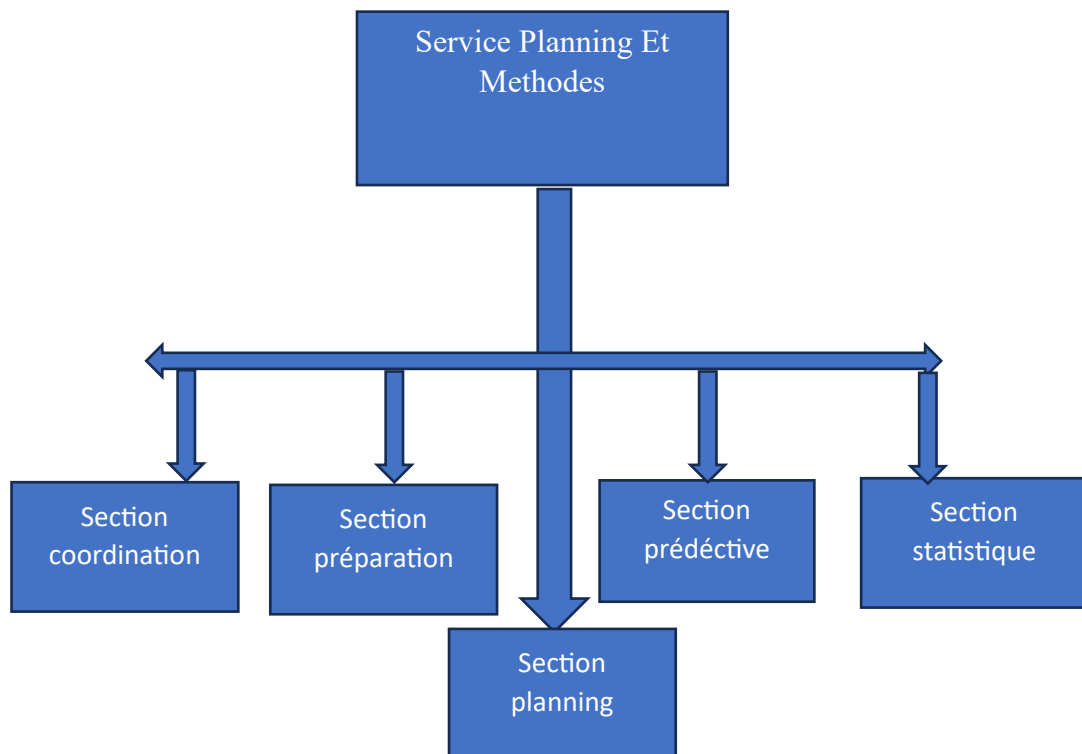


Figure (I.4) : L'organigramme Service Planning Et Methodes

• Section Coordination

Cette section est chapeauté par un chef coordinateur qui tiens chaque début de journée un Briefing avec les cinq ingénieurs (coordinateurs,) pour étudier les demandes de travail

(DT), qui les analyses, complète le diagnostic, fixe les priorités, établi les permis de travail et ensuite la procédure jusqu'à la fin des travaux, puis elle les transmet à la section préparation.

Elle reste l'interface entre la production et le département maintenance.

• Section préparation :

Cette section reçoit la demande de travail, la transforme en ordre de travail (OT) puis l'oriente vers les différents krafts suivant la nature de la panne et des priorités en estimant

le nombre de personne et d'heures et la liste des pièces nécessaires à utiliser pour sa réalisation.

- Section planning :

Cette section se charge de programmer les travaux, vérifier la disponibilité des pièces ou bien de mettre en place un calendrier de maintenance préventif et superviser les travaux.

- Section prédictive :

A été créée pour réduire les coûts de la production par des inspections journalières sur site, le rôle des inspecteurs et de vérifier la viabilité du matériel par des suivis de vibration (offline - online), suivi par caméra infrarouge, analyse de l'huile...

Le but de cette section est d'assurer une meilleure durée de vie des équipements, elle développe le préventif et arrive à éviter que tout problème même minime, engendre un autre plus grave.

- **Section statistique**

Cette section a pour mission d'établir des rapports mensuels, hebdomadaires, annuels ou des bilans exceptionnels sur les travaux accomplis par la maintenance (NHM : nombre -homme - heure), BACKLOG : enregistrement des DT en souffrance ou en retard c'est surtout vis-à-vis des pièces de rechanges.

I.4.1.2 Service Electricité (E)

Il prend en charge la réparation de tout ce qui touche de près ou de loin à l'électricité dans le complexe, maintenance curative, préventive et de la réalisation des travaux suite à la demande des départements concernés, il va jusqu'à l'installation des climatiseurs, ses diverses interventions se font à l'aide des multimètres, schéma...

Ce service est composé d'ingénieurs électricité sur trois sections :

- Section atelier : Elle prend en charge les travaux des départements.
- Section utilités et terminal (off site) : Elle s'occupe des travaux électriques relatifs aux utilités et terminale.
- Section process : Elle s'occupe des travaux électriques sur la zone process.

I.4.1.3 Service Mécanique (T)

C'est un service de prestation à la demande de la production il assure la maintenance mécanique des équipements. Il est divisé en quatre sections :

- Section atelier.
- Section process.
- Section utilité et terminal « off site ».

Tournage.

I.4.1.4 Service chaudronnerie (C)

Il prend sous sa responsabilité les canalisations et les équipements statiques. Et il se divise sur l'atelier, la zone utilité et terminale et la zone process.

I.4.1.5 Service instrumentation (R)

Il veille à la bonne marche des instruments de mesure installés sur les équipements, il est composé de 04 sections :

- Section atelier.
- section process.
- utilités et terminale.
- section électronique.

Ces quatre services assurent aussi un service quart 24/24 pour les petites pannes pouvant arriver notamment durant la nuit.

I.4.1.6 Service logistique (L)

C'est un service de soutien et d'assistance pour le département et pour l'ensemble du complexe. Il est composé de 03 sections :

- Section protection: Elle protège et entretient les équipements par le calorifugeage (canalisation etc.....), la peinture anticorrosion et la galvanisation
- Section de moyens de manutention: Elle assure aux krafts les moyens de manutention (grue, Clark, camion...) et les travaux en hauteur par l'apport d'échafaudage....
- Section génie civil (travaux) : Elle de charge des petits travaux de bâtiments (maçonnerie, plomberie, vitrage et autres.)
- Task-force :

Cette section s'occupe de la maintenance de toutes les chaudières du complexe, vu l'importance des interventions sur les chaudières et ceci par un responsable délégué du département G avec un groupe d'agents de maintenance des différents services qui est désigné par task-force.

I.4.2 DEPARTEMENT TRAVAUX NEUFS

Le complexe de la division liquéfaction ont été dotés d'une structure d'organisation dénommée département Travaux Neufs (décision A-368 (R5) du 27mai 1998). La création de cette structure a été motivée essentiellement par :

Les faibles taux de réalisation des investissements, faute d'une structure spécialisée de prise en charge.

La nécessité de libérer les autres structures du complexe des contraintes liées à la réalisation de divers travaux neufs, en vue de leur permettre de se consacrer pleinement aux missions fondamentales qui leur sont dévouées.

Le département travaux neufs est une structure de contrôle et s'occupe du suivi, la réalisation des investissements ainsi que la grande maintenance et assure le procurement, c'est l'interface entre le département technique et le département finance.

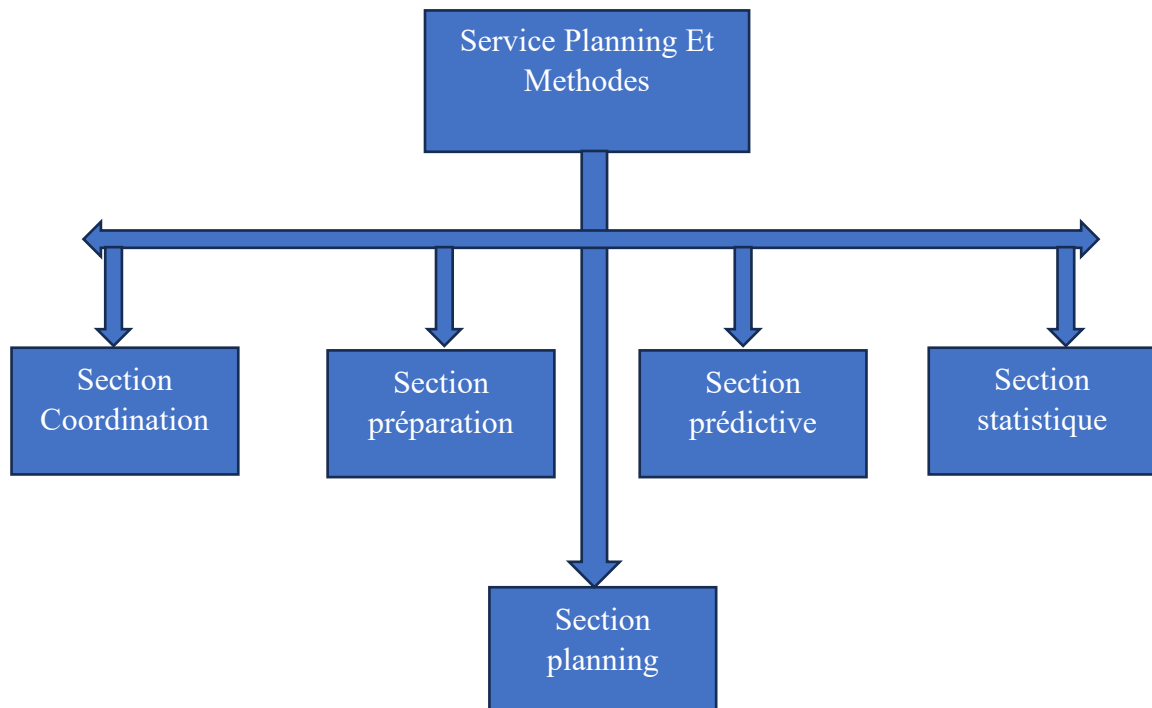


Figure (I.5) : L'organigramme Service Planning Et Methodes

1 . Service Procurement

Il est chargé de l'étude des différents travaux ILP ou INLP, l'élaboration des cahiers de charge en collaboration avec le département technique et le service juridique du département finance ainsi que le suivi du contrat jusqu'à la signature du fournisseur retenu.

2 . Service Travaux

Après la réalisation des moyens d'exécution fournis par le service procurement, ce service gère les réalisations des travaux (ILP - INLP) et établit un rapport de mise en situation chaque semaine.

3 . Staff ingénieurs planning Ce staff assure le suivi des réalisations des travaux au complexe et détermine la durée de réalisation du projet,

4. Staff ingénieurs control coûts

Ces ingénieurs control le processus de paiement et analyse les écarts des coûts.

5. DEPARTEMENT TECHNIQUE

Le département technique est un département relié directement avec la direction vu son importance car c'est l'organe de control du complexe constitué de cinq services, Il a pour mission l'étude des projets d'installation des moyens de production dont il doit assurer une assistance technique en permanence avec toutes ces sections comme l'organigramme le montre dans cette figure:

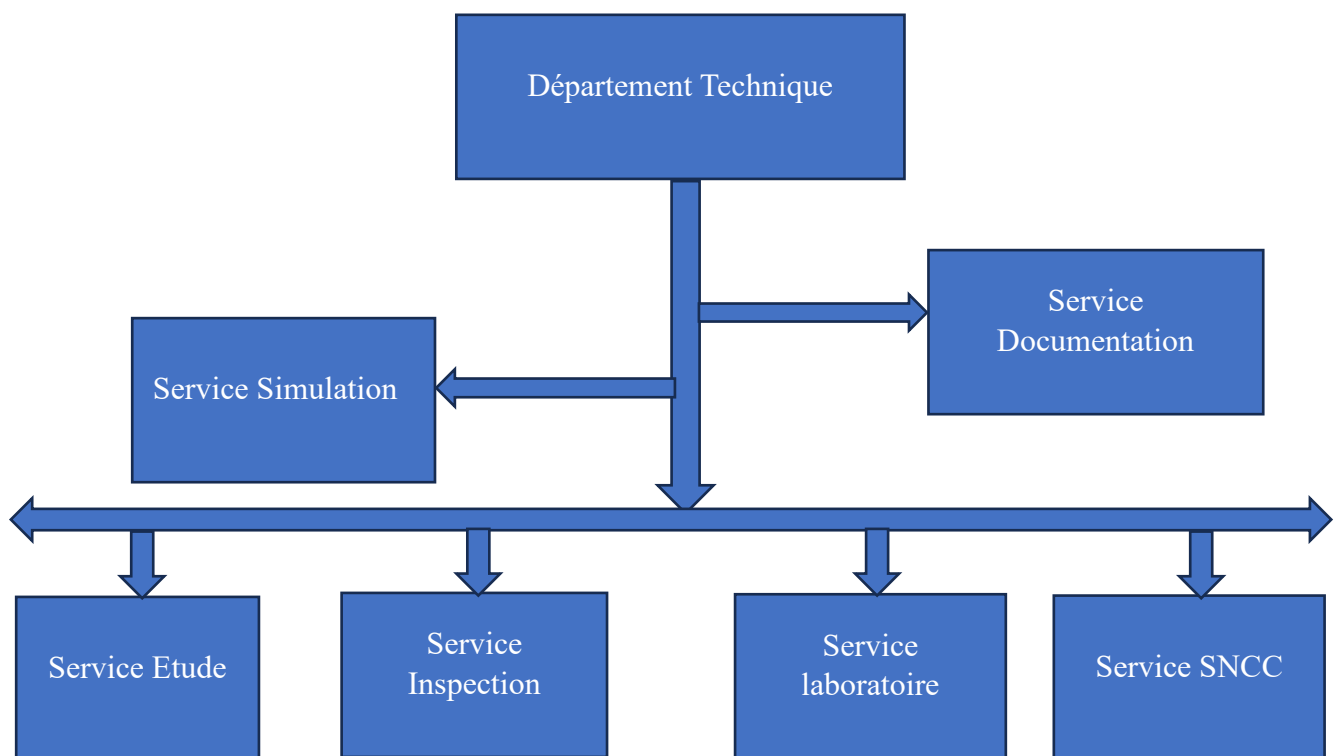


Figure (I.6) : L'organigramme Département Technique

1. Service Etude

Ce service élabore toutes les études techniques, exploitations, développement, modifications rapport d'incident, le rapport de manque à produire, assister les installations d'exploitation propose toutes bonne procédure pour le bon fonctionnement des moyens de production aussi assiste le département des Approvisionnement et le département Maintenance pour tous les travaux il est composé de deux sections :

Section études :

Cette section chapote toutes les activités de l'entreprise en matière de suivi compte parmi son personnel des ingénieurs en mécanique, instrumentation, process, chimie industrielle ce staff opérationnel assure les études et les analyses approfondis pour subvenir aux corrections des anomalies.

Section dessin :

Le rôle de cette section est de mettre à jour le dessin et l'architecture du procédé concernant les modifications en ajoutant un outil qui permet d'améliorer les conduites et As Built. Elle apporte un support à la section étude dans la réalisation des schémas techniques.

2. Service Inspection

Vu son nom il inspecte et contrôle l'unité de production et les installations composées de :

- Section machines tournantes: inspecte les turbines, moteurs, compresseurs, pompes, ventilateurs et ce en utilisant des vibromètre (on-line ou off-line) pour le bruit aussi les pressions.
- Section équipement statique: inspecte les chaudières, échangeurs, tuyauteries.
- Section électricité: inspecte les installations électriques.
- Section métallurgie: inspecte et vérifie l'état des installations afin d'éviter les corrosions

3. Service Laboratoire

Il est chargé d'établir le certificat de conformité pour le produit lors de sa commercialisation par l'analyse des échantillons, il effectue parfois des analyses à la demande de la production et gère lui-même son stock de produit chimique.

4. Service S.N.C.C

S.N.C.C: Service Numérique de Contrôle Commandé (à vue le jour grâce au DCS Digital Control System), le service fonctionne à l'aide de capteurs placés sur les équipements qui transmettent à des récepteurs le bon fonctionnement des installations afin d'éviter des catastrophes.

5. Service Simulation

Il complète le département «I», il sert à simuler des procédés, des actions de sécurité, et une gestion de projet. au lieu de passer directement à l'application il simule plusieurs cas pour minimiser les risques de défaillances ou peut échouer le projet, au lieu de passer par l'engineering.

6. Section Documentation

C'est la bibliothèque du complexe elle contient tous les rapports d'études des départements.

7. DEPARTEMENT PRODUCTION

Le département de production est une structure d'exploitation, c'est le cœur du complexe, sa mission principale est la liquéfaction du gaz naturel ainsi que le contrôle de la production du GNL, propane, butane et la gazoline et de leur exportation. Il est structuré comme suit :

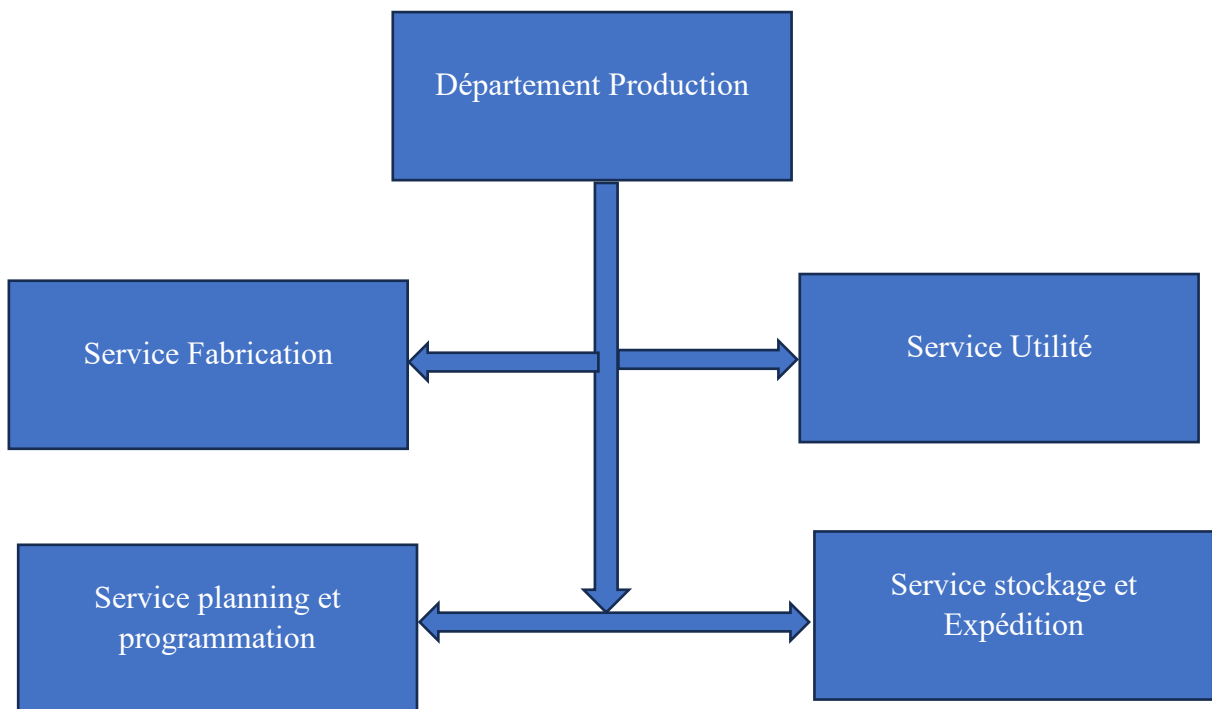


Figure (I.7) : L'organigramme Département production :

1. Service Utilité

Cette zone est autonome et assure la fourniture de toutes les utilités pendant le démarrage et la mise en marche des six (06) trains de liquéfaction ainsi, de toutes les installations de production. Elle consiste principalement à la production et la fourniture.

Ce service est constitué de deux zones :

› Zone chaudière :

Elle est composée de plusieurs chaudières qui fournissent de la vapeur.

04 chaudières ABB d'une capacité de production de 400 T/H.

12 process d'une capacité de 120 T/H.

02 1HI récemment construites d'une capacité chacune de 400 T/H.

Zone des utilités :

Cette zone est essentiellement autonome et assure la fourniture de toutes les utilités pendant le démarrage et la mise en marche des six (06) trains de liquéfaction ainsi, de toutes les

Installations de production. Elle consiste principalement à la production et la fourniture de ce que suit :

- Energie électrique :

Elle est fournie en grande partie par trois (03) turbogénérateurs d'une capacité de 20 MW chacun et de la source SONELGAZ pour également 20 M/W, soit un total de 80 MM.

- Vapeur :

Elle est fournie par un ensemble de chaudières de différents tonnages répartis comme suit :

Quatre (04) chaudières ABB de 400 T/H chacune.

Douze (12) chaudières process de 120 T/H chacune.

Deux (02) chaudières IHI d'une capacité de 400 Tonne/Heure.

- Eau dessale :

Elle est fournie par cinq (05) unités de dessalement produisant chacune 45 Tonnes par heure utilisée comme eau d'appoint pour les chaudières.

- Air:

"est fourni par quatre (04) compresseurs d'air permettant la production de l'air instrument qui est séché par les sécheurs d'air, servant pour toutes les installations de productions et de l'air service pour les autres besoins du complexe.

- Eau de refroidissement:

Elle est fournie par six (06) pompes d'eau de mer d'une capacité de 37 000 m par heure chacune

Chapitre 2

Généralités sur le variateur de vitesse

Généralités sur le variateur de vitesse

II.1 Introduction

Dans le contexte industriel moderne, les performances d'un système de production dépendent fortement de sa capacité à s'adapter aux exigences du procédé, en particulier en matière de vitesse et de couple mécanique. La majorité des applications utilisent des moteurs électriques, en particulier asynchrones, pour effectuer les tâches mécaniques.

Traditionnellement, la vitesse d'un moteur était fixe, dépendant directement de la fréquence du réseau (50 Hz en Europe). Or, le besoin de flexibilité, de performance énergétique et de précision a conduit au développement de dispositifs permettant de faire varier la vitesse des moteurs en temps réel : les variateurs de vitesse.

II.2 Présentation d'un variateur de vitesse

II.2.1 Définition

Un variateur de vitesse est un équipement électronique de puissance qui permet de contrôler dynamiquement la vitesse, le couple et parfois la position d'un moteur électrique, en agissant sur la tension et la fréquence de l'alimentation qu'il reçoit.



Figure (II.1) : Variateur de vitesse

Le variateur peut fonctionner en boucle ouverte (sans capteur de retour) ou en boucle fermée (avec retour capteur), selon le niveau de précision recherché.

Il est souvent utilisé pour les moteurs asynchrones triphasés, mais on le retrouve aussi avec :

- .Moteurs synchrones à aimants permanents (PMSM)
- .Moteurs à courant continu (dans des variantes spécifiques)
- .Moteurs brushless (BLDC)

II.2.2 Intérêt de la variation de vitesse

L'utilisation d'un variateur de vitesse présente de multiples avantages technico-économiques :

a. Maîtrise de l'énergie

Les moteurs électriques sont responsables de plus de 60 % de la consommation énergétique industrielle.

Les variateurs permettent une réduction significative de la consommation, notamment pour les systèmes de pompage ou de ventilation.

Ex : une baisse de vitesse de 20 % peut générer jusqu'à 50 % d'économies d'énergie (loi de l'affinité : $P \propto N^3$)

b. Adaptabilité du procédé

Vitesse ajustable selon la charge ou le type de produit transporté.

Idéal dans les chaînes de production, les ascenseurs, les centrifugeuses, etc.

c. Protection et longévité

Démarrage progressif (soft-start), réduction du courant de démarrage.

Moins de contraintes mécaniques \Rightarrow moins d'usure, moins de maintenance.

d. Réduction des nuisances

Moins de bruits mécaniques

Moins de pics de courant

Moins d'échauffement moteur

e. Communication et supervision

Les variateurs modernes intègrent des interfaces de communication industrielle (Modbus, Profibus, CANopen...).

Intégration dans des systèmes de supervision (SCADA, automates).

II.3 Schéma synoptique du variateur de vitesse

Voici une description complète du schéma fonctionnel d'un variateur de vitesse pour moteur asynchrone.

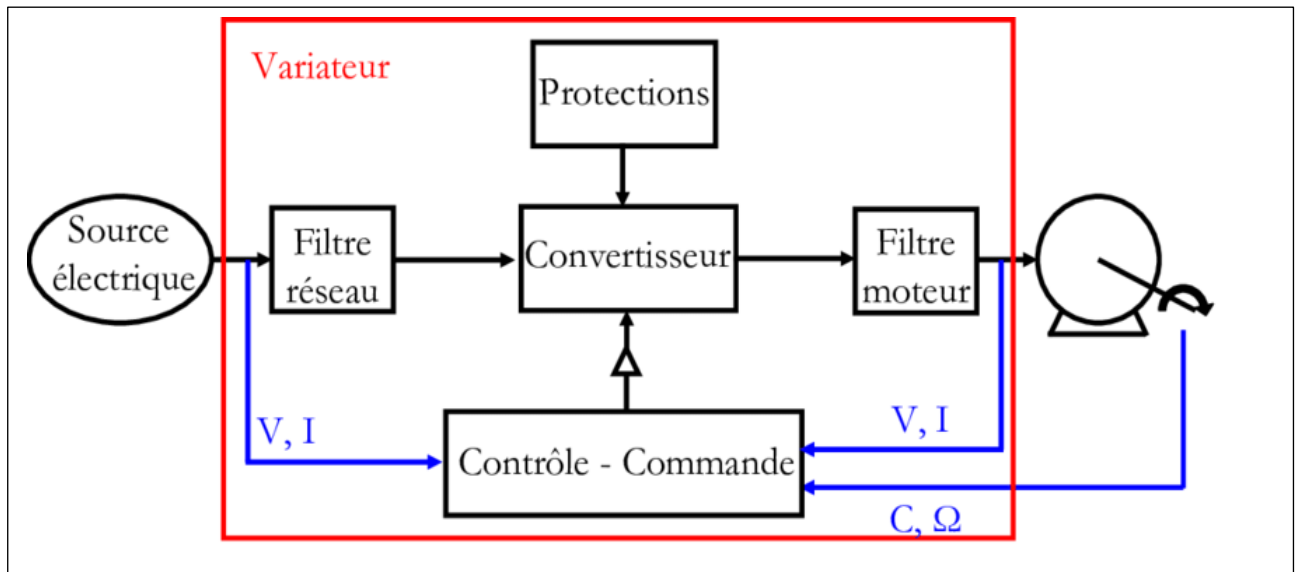


Figure (II.2) : Schéma synoptique d'un variateur de vitesse

Un variateur de vitesse pour des machines alternatives ce n'est qu'un onduleur à fréquence variable. Ce dernier est un convertisseur statique assurant la conversion continu alternatif, alimenté en continu, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir de l'alternatif à la sortie.

II.4 Classification des onduleurs

Un onduleur est un convertisseur statique de puissance qui transforme une tension continue (DC) en une tension alternative (AC), à fréquence et tension contrôlées.

Selon leur mode de fonctionnement, de commande, et d'alimentation, les onduleurs se classent en différentes catégories :

1. Onduleurs non autonomes (ou onduleurs à source synchronisée)

◆ Définition

Les onduleurs non autonomes ne peuvent pas fonctionner sans être connectés à une source AC externe. Ils n'imposent pas la fréquence ni la tension de sortie, mais se synchronisent avec le réseau électrique (ex : réseau EDF).

Ils ne sont donc pas capables de générer eux-mêmes une fréquence. Ils injectent simplement du courant dans un réseau existant.

◆ Application

- .Systèmes d'injection réseau (photovoltaïque, éolien)
- .Onduleurs grid-tied (avec MPPT pour panneaux solaires)
- .Convertisseurs back-to-back pour moteurs synchrones

- **Exemples**

Onduleurs photovoltaïques raccordés au réseau (ex : Huawei, SMA, Fronius)

Variateurs de fréquence synchronisés à un réseau industriel

2. Onduleurs autonomes (self-commutated)

- **Définition**

Les onduleurs autonomes peuvent fonctionner indépendamment du réseau. Ils génèrent une tension alternative auto-soutenue, à fréquence et amplitude contrôlées.

Ces onduleurs sont utilisés dans les systèmes hors réseau (off-grid), ou pour alimenter une charge isolée.

- **Caractéristiques**

.Fournissent une tension stable et indépendante.

.Permettent un contrôle précis de la fréquence et de la forme d'onde (souvent sinusoïdale ou modulée en PWM).

.Nécessitent souvent une commande par microcontrôleur ou DSP.

- **Applications**

.Groupes électrogènes à onduleurs

.Onduleurs UPS (alimentation sans coupure)

.Systèmes solaires autonomes

.Variateurs de fréquence (VFD) pour moteurs

3. Onduleurs autonomes de tension (Voltage Source Inverter - VSI)

- **Définition**

Les VSI sont des onduleurs alimentés par une source de tension rigide (ex : condensateur DC ou batterie). La tension d'entrée est supposée constante.

Ils sont les plus courants aujourd'hui et utilisent généralement des transistors IGBT ou MOSFET, commandés par modulation de largeur d'impulsion (PWM).

- **Fonctionnement**

.Le courant de sortie est imposé par la charge.

.Ils produisent une tension alternative modulée.

.Nécessitent un filtrage en sortie pour lisser la sinusoïde.

- **Applications**

- .Variateurs pour moteurs asynchrones
- .Onduleurs domestiques ou industriels
- .Propulsion électrique (véhicules, trains)

4. Onduleurs autonomes de courant (Current Source Inverter - CSI)

- **Définition**

Les CSI sont alimentés par une source de courant quasi constante (ex : inductance série importante).

La forme d'onde du courant est imposée, tandis que la tension dépend de la charge. Ils utilisent souvent des thyristors ou IGBT avec contrôle spécifique.

- **Caractéristiques**

- .Plus complexes à commander que les VSI.
- .Génèrent des surtensions importantes (problème de commutation).
- .Moins courants que les VSI aujourd'hui.

- **Applications**

- .Systèmes de puissance moyenne à élevée.
- .Commande de moteurs synchrones ou asynchrones à courant contrôlé.
- .Anciennes générations de variateurs industriels.

5. Onduleurs à résonance

- **Définition**

Les onduleurs à résonance utilisent des circuits LC (inductance + capacité) pour générer une commutation douce (soft switching), ce qui diminue les pertes par commutation et améliore le rendement.

Ils sont souvent utilisés dans les applications où les pertes de commutation et le bruit électromagnétique (EMI) doivent être réduits.

- **Types**

- Onduleur série résonant
- Onduleur parallèle résonant
- Onduleur à résonance quasi-résonante (QRI)

- **Avantages**

- Moins de perte par commutation (ZVS : Zero Voltage Switching ou ZCS : Zero Current Switching) .
- Moins d'échauffement .

Moins de bruit EMI.

- **Inconvénients**

Conception complexe

Dépendance vis-à-vis de la fréquence de résonance

Moins robuste aux variations de charge

- **Applications**

Chargeurs inductifs sans fil (wireless)

Alimentation à découpage de haute fréquence (SMPS)

Conversion DC/AC haute fréquence pour traitement plasma, induction, etc.

II.5 Types d'onduleurs autonomes de tension

Les onduleurs autonomes de tension (VSI – Voltage Source Inverter) peuvent être classés selon:

.La nature de la charge (monophasée ou triphasée),

.Le type de modulation utilisé (carré, PWM, sinus...),

.Le mode de conduction des interrupteurs (commutation pleine onde ou demi-onde),

.Le type de composant utilisé (IGBT, MOSFET, thyristors).

II.5.1 Onduleur monophasé

Un onduleur monophasé autonome convertit une source de tension continue (typiquement issue d'un redresseur ou d'une batterie) en une tension alternative monophasée.

Il est souvent composé de quatre interrupteurs électroniques (MOSFET ou IGBT) et fonctionne avec une commande en pont complet (H-bridge) ou demi-pont.

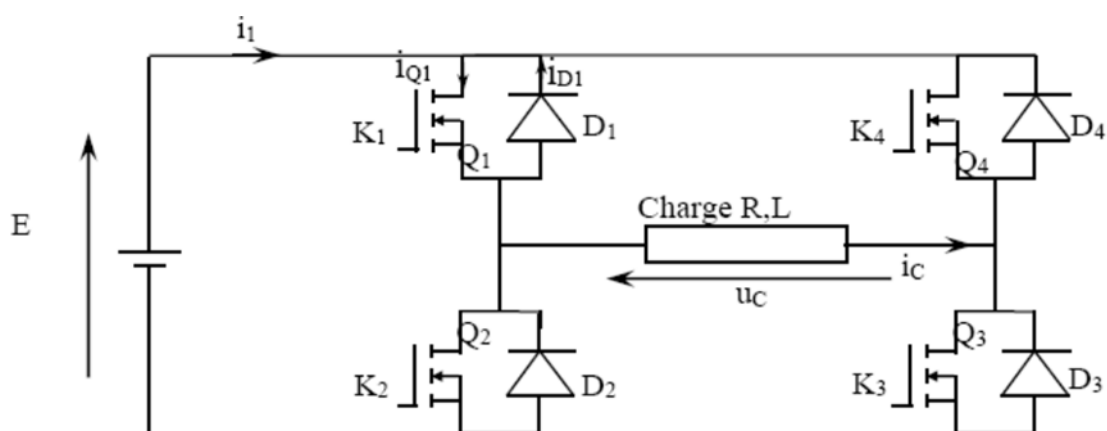


Figure (II.3) : Schéma de principe de l'onduleur en Pont

Le montage est constitué de deux bras d'onduleur : le bras A constitué de K1 et K2, le bras B constitué de K4 et K3.

- La source est un générateur de tension continue réversible en courant.
- Les interrupteurs Q1, Q2, Q3 et Q4 sont des interrupteurs commandable à l'ouverture et à la fermeture. D1, D2, D3 et D4 sont des diodes supposées idéales
- Si on considère A, K1, K2, B, K4, K3 comme des variables logiques (fonctionnement en soupapes), on obtient les équations logiques suivantes :

- Soupape Ki Ki=0 alors Transistor bloqué Ki=1 alors Transistor saturé
- Bras A A=0 alors K1 = 0, K2 = 1 A = 1 alors K1 = 1, K2 = 0
- Bras B B=0 alors K3 = 1, K4 = 0 B = 1 alors K3 = 0, K4 = 1

II.5.1.1 Fonctionnement en pleine onde (pont complet)

Dans un onduleur en pont complet, les interrupteurs K1 et K3 fonctionnent en commutation simultanée lors de l'alternance positive de la tension de sortie. Cela signifie qu'ils sont fermés (conducteurs) durant cette période, permettant à la tension continue Vdc de s'appliquer aux bornes de la charge dans le sens positif.

En parallèle, les interrupteurs K2 et K4 restent ouverts (bloqués) pendant cette phase.

Lors de l'alternance négative, la situation s'inverse :

.K1 et K3 s'ouvrent (se bloquent),

.K2 et K4 se ferment (passent en conduction), appliquant ainsi la tension dans le sens inverse sur la charge.

D'après le schéma, on peut écrire :

$$S = A = \bar{B} = K1 = \bar{K2} = K3 = \bar{K4}$$

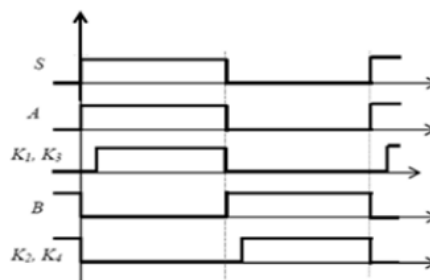


Figure (I.4) : Chronogramme de commande

Le chronogramme met en évidence que les signaux A et B sont complémentaires, ce qui signifie que lorsque l'un est à l'état haut, l'autre est à l'état bas, et inversement. Cette commande en opposition de phase permet de garantir que les interrupteurs commandés par A et ceux commandés par B ne conduisent jamais simultanément.

Au début de chaque alternance, un temps mort (dead time) est volontairement introduit entre l'extinction d'un interrupteur et l'activation du suivant. Cela permet de laisser le temps au transistor précédemment actif de se bloquer totalement, évitant ainsi les courts-circuits entre les bras de l'onduleur.

Enfin, ce sont les périodes de blocage des transistors (aucun transistor ne conduit momentanément) qui définissent les limites entre deux alternances successives de la tension de sortie.

Remarques :

Pour éviter les courts-circuits, les interrupteurs d'une même branche ne doivent jamais être fermés simultanément.

La fréquence de sortie est dictée par la fréquence de commutation des interrupteurs.

II.5.1.2 Autres modes de fonctionnement

a. Fonctionnement à demi-onde (pont demi)

Dans ce cas, l'onduleur utilise deux interrupteurs et deux diodes. La tension maximale de sortie est $V_{dc}/2$, ce qui limite la puissance disponible.

b. Modulation PWM (sinusoïdale)

Plutôt que de produire un signal carré, les interrupteurs sont commandés en haute fréquence avec une modulation PWM pour approcher une onde sinusoïdale :

- .Meilleure qualité du signal
- .Moins d'harmoniques
- .Compatible avec des moteurs ou équipements sensibles

II.5.1.3 Forme des signaux fournis par l'onduleur

La représentation des **formes d'onde** de la **tension** et du **courant** appliqués à la charge permet de visualiser leur évolution dans le temps. On observe que la **période** et donc la **fréquence** du signal de sortie sont **déterminées par le circuit de commande** (générateur de commande des interrupteurs), et **non par les caractéristiques de la charge**. Autrement dit, la charge n'a aucune influence sur la fréquence de la tension appliquée : celle-ci est **imposée par le système de contrôle** de l'onduleur (souvent via un signal PWM ou logique tout-ou-rien à fréquence fixe).

Par ailleurs, dans le cas d'un onduleur à **onde carrée parfaite** alimentant une **charge purement résistive**, la **valeur efficace de la tension** délivrée à la charge est équivalente à la **tension continue d'entrée**, notée :

$$U_{eff}=E \quad (II.1)$$

où :

- U_{eff} est la tension efficace aux bornes de la charge,
- E est la tension continue fournie par la source d'alimentation de l'onduleur.

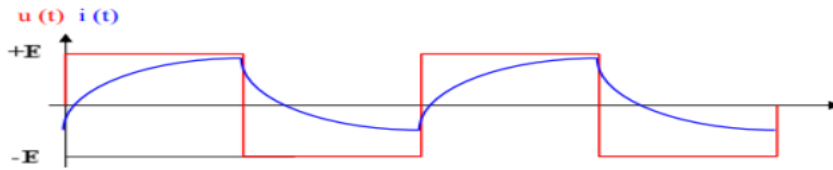


Figure (II.5) : Forme de la tension et du courant

II.5.2 Modélisation d'un onduleur monophasé

L'onduleur monophasé est constitué d'une source d'alimentation en tension continue, associée à des interrupteurs électroniques commandés (tels que des transistors) et des diodes de roue libre permettant d'assurer la continuité du courant dans la charge lors des phases de commutation.

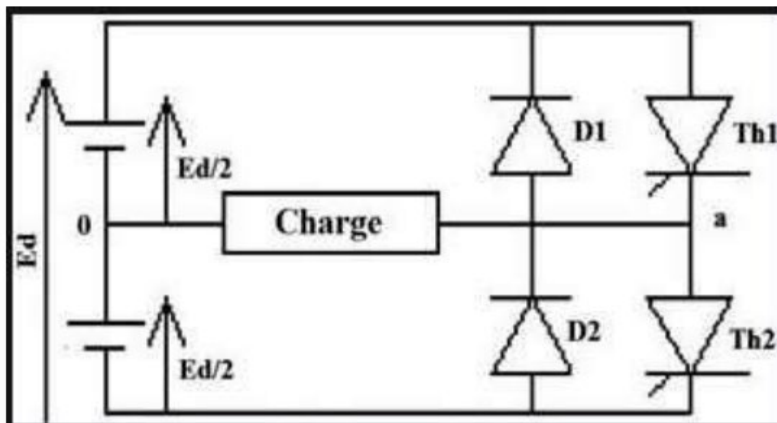


Figure (II.6) : circuit d'un onduleur monophasé en demi pont

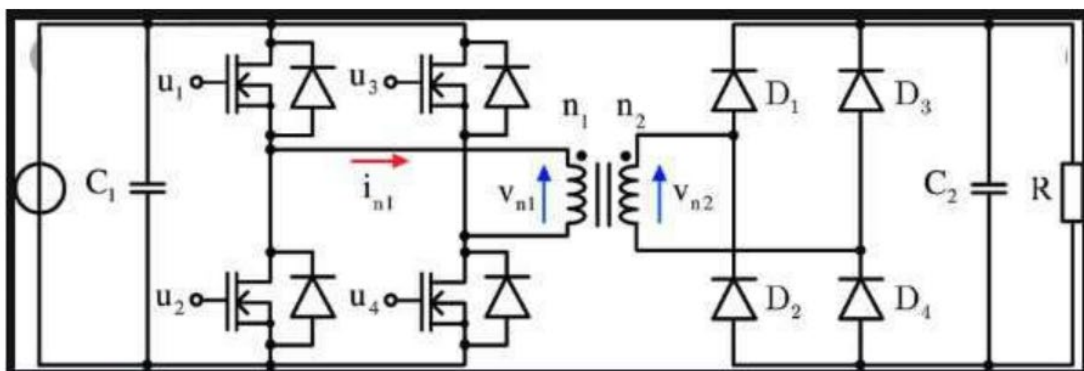


Figure (II.7) : circuit d'un onduleur monophasé en pont complet

a. Le model mathématique

La tension est la tension au borne d'une résistance plus celle au bornes d'une bobine :

$$u(t) = R \times i(t) + L \times \frac{di}{dt} \tag{II.2}$$

En intégrant l'équation on trouve :

$$i(t) = \exp\left(-\frac{R}{L}t\right) + cste \tag{II.3}$$

Pour la solution particulière, elle s'exprime sous la forme :

$$ip = At + B \qquad ip(t) = E/R \tag{II.4}$$

Comme solution générale on a :

$$i(t) = ip(t) + i(t) \tag{II.5}$$

$$it(t) = K \times e^{(-\frac{t}{Rc})} + \frac{E}{R} \tag{II.6}$$

Aux conditions initiales, on a

$$it(0) = 0$$

$$K = -Im - \frac{E}{R} \tag{II.7}$$

La solution totale s'écrit donc sous la forme suivante :

$$i(t) = \frac{E}{R} \left(1 - e^{\frac{t}{Rc}}\right) - Im \times e^{\frac{t}{Rc}} \tag{II.8}$$

De la même manière, la solution totale de cette équation est la somme de la solution générale sans second membre (SSM) et d'une solution particulière.

La solution SSM : est la même que le premier cas, on obtient ainsi,

$$i(t) = K \times e^{\frac{t}{Rc}} \tag{II.9}$$

La solution particulière, on obtient le terme :

$$i(t) = -E/R \tag{II.10}$$

Ainsi la solution totale de l'équation s'écrit :

$$it(t) = ip(t) + i(t) \tag{II.11}$$

D'où :

$$it(t) = K \times e^{-\frac{t}{Rc}} - \frac{E}{R} \quad (\text{II.12})$$

Dans les conditions suivantes :

$$At = T/2 \quad (\text{II.13})$$

$$it\left(\frac{T}{2}\right) = Im \quad (\text{II.14})$$

$$K = +Im + \frac{E}{R} \quad (\text{II.15})$$

Finalement la solution totale s'exprime dans ce cas comme suit :

$$it(t) = \frac{E}{R} \times \left(-1 + e^{-\frac{t-T}{Rc}} + Im \times e^{-\frac{t-T}{Rc}}\right) \quad (\text{II.16})$$

II.5.3 Simulation sous Matlab

Description

Le système étudié comprend deux circuits indépendants représentant chacun un convertisseur monophasé :

- .Un convertisseur demi-pont.
- .Un convertisseur pont complet.

Ces convertisseurs sont réalisés à partir d'un bloc de base IGBT/Diode. Ce bloc modélise de manière simplifiée une paire IGBT (ou GTO ou MOSFET) avec diode, en négligeant les tensions directes des dispositifs lors de la commutation.

À noter : il est possible de remplacer ce bloc simplifié par des composants IGBT et diodes séparés pour obtenir un modèle plus détaillé.

Le contrôle des convertisseurs est effectué en boucle ouverte à l'aide d'un générateur PWM discret.

Les deux circuits partagent les mêmes paramètres :

- .Tension continue d'alimentation : $V_{dc} = 400 \text{ V}$.
- .Fréquence de la porteuse PWM : 1080 Hz.
- .Indice de modulation : $m = 0,8$.

Pour l'analyse, les signaux issus des deux blocs sont enregistrés dans des structures temporelles afin de permettre leur traitement ultérieur.

Simulation :

Lors de l'exécution de la simulation, deux grandeurs principales sont affichées pour chaque convertisseur :

- 1 Courant dans la charge (trace 1).
- 2 Tension générée par l'onduleur PWM (trace 2).

Ensuite, une analyse FFT est réalisée :

.Sur une fenêtre de deux cycles, commençant à $t = 0,1 - (2/60)$ s (correspondant aux deux derniers cycles du signal).

.Sur l'entrée intitulée "V inverter".

On observe alors :

.Le spectre de fréquence des deux derniers cycles.

.L'amplitude de la composante fondamentale de la tension de l'onduleur

Comparaisons théoriques :

- Le **convertisseur demi-pont** produit une tension bipolaire : ± 200 V.
 - Les harmoniques apparaissent autour de la fréquence porteuse (**1080 Hz $\pm k \times 60$ Hz**).
 - L'amplitude maximale est d'environ **103 % à 1080 Hz**.
- Le **convertisseur pont complet** génère une tension monopolaire :
 - De **0 à +400 V** pendant un demi-cycle,
 - De **0 à -400 V** pendant l'autre demi-cycle.
 - Pour la même tension continue et le même indice de modulation, l'amplitude de la composante fondamentale est **le double** de celle du demi-pont.
 - Les harmoniques sont beaucoup plus faibles, apparaissant principalement autour du **double** de la fréquence porteuse (**$2 \times 1080 \pm 60$ Hz**), avec une amplitude maximale d'environ **40 %**.

Résultat sur le courant de charge :

- Avec le demi-pont : **THD $\approx 7,3$ %**.
- Avec le pont complet : **THD ≈ 2 %**.

Le pont complet fournit donc un **courant de charge plus lisse**.

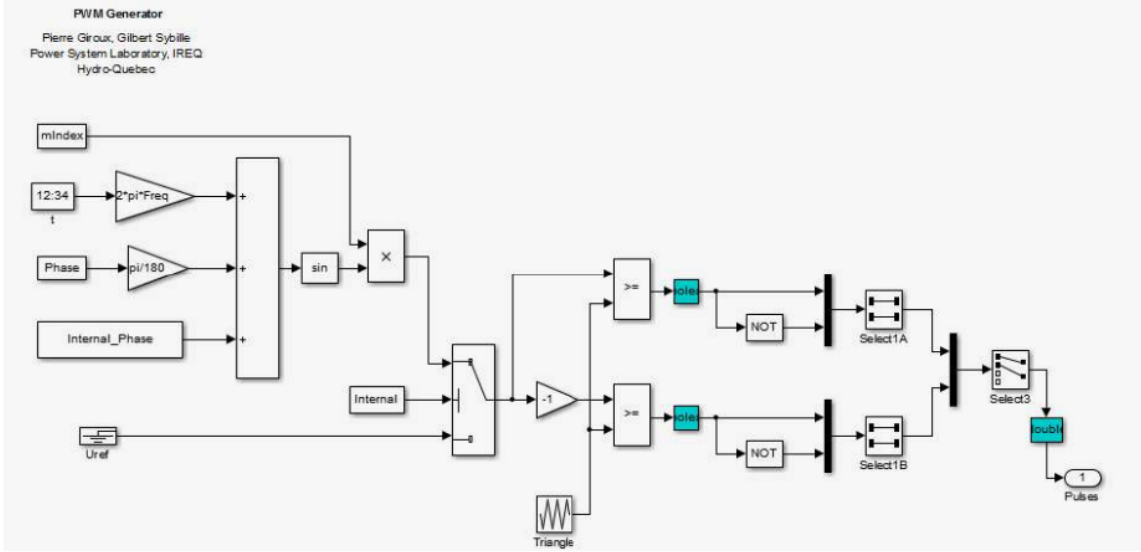


Figure (II.8) Simulation détaillé d'un onduleur monophasé

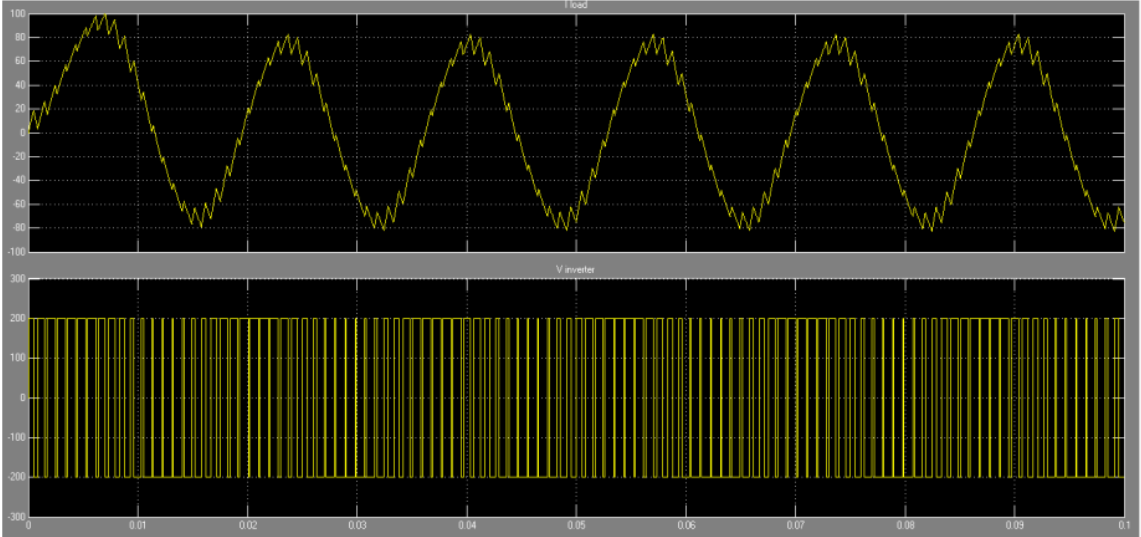


Figure (II.9) Résultats de la simulation d'un onduleur monophasé précédente

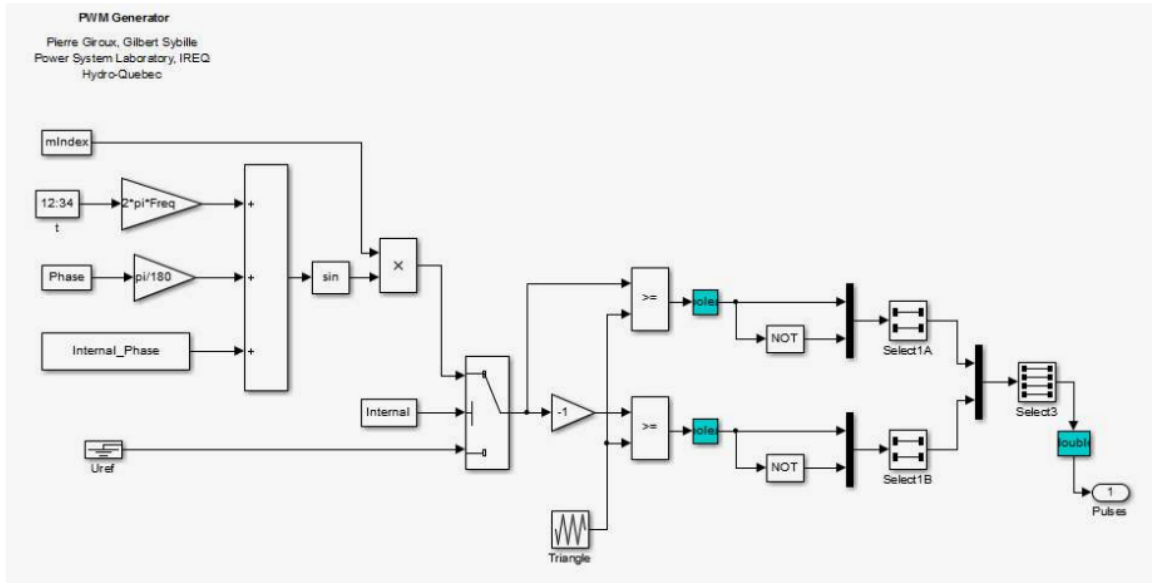


Figure (II.10) Simulation détaillé d'un onduleur monophasé à pont complet

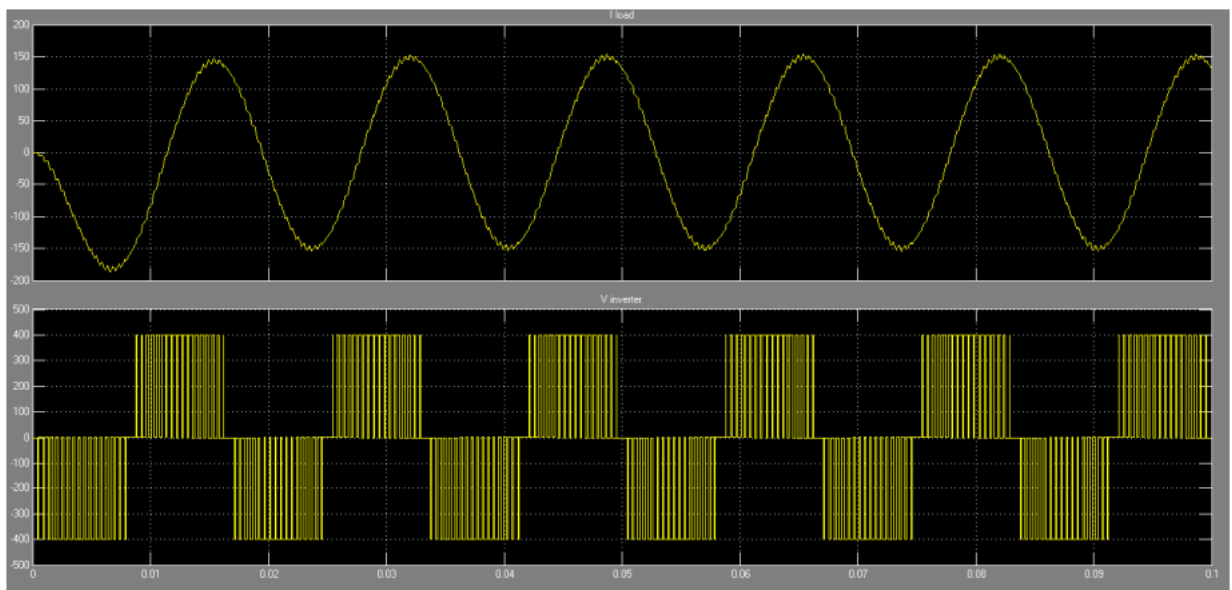


Figure (II.11) Résultats simulation d'un onduleur monophasé à pont complet

complet

II.5.4 Onduleur triphasé de tension

Comme pour les onduleurs monophasés, les onduleurs triphasés utilisent également des IGBT. Les modèles les plus classiques en intègrent six, soit deux interrupteurs complémentaires par bras de l'onduleur.

Un onduleur triphasé est constitué d'une source de tension continue et de six interrupteurs disposés en pont. Son architecture peut être vue comme la superposition de trois demi-onduleurs monophasés montés en parallèle.

Ces six interrupteurs forment trois cellules de commutation, qui permettent de découper (ou hacher) la tension continue afin de générer une tension triphasée sinusoïdale équilibrée. Ce type de tension est notamment nécessaire pour alimenter des moteurs synchrones ou asynchrones.

La commande de l'onduleur triphasé repose sur le contrôle précis de la commutation de chaque branche pour obtenir trois tensions de sortie décalées entre elles de 120° .

Comme pour les onduleurs monophasés, il est possible d'ajouter davantage d'interrupteurs afin d'améliorer la qualité de la tension obtenue et de réduire les harmoniques. Cependant, cette amélioration présente un inconvénient : le coût. C'est particulièrement vrai dans les architectures de type MMC (Modular Multilevel Converter), où l'augmentation du nombre d'IGBT, même peu coûteux individuellement, peut devenir onéreuse pour une production de masse, comme c'est le cas dans l'industrie des véhicules électriques.

Dans l'onduleur, les deux interrupteurs d'un même bras doivent fonctionner de manière complémentaire : lorsque l'un est fermé, l'autre doit être ouvert. Cela permet d'éviter les courts-circuits sur la source continue et d'assurer que les circuits de courant i_{ai_aia} , i_{bi_bib} et i_{ci_cicne} soient jamais interrompus.

Grâce à cette stratégie de commutation, l'onduleur parvient à fournir trois tensions de sortie équilibrées.

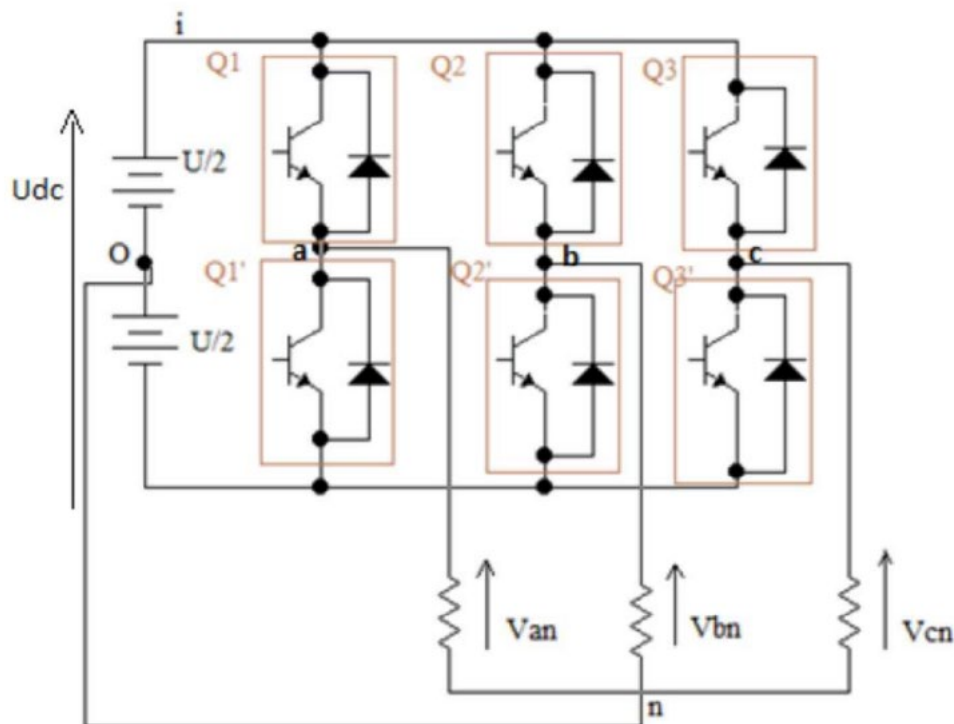


Figure (II .12) : Circuit de puissance d'un onduleur triphasé

II.5.4.1 Modélisation de l'onduleur triphasé

Un onduleur triphasé classique est constitué d'une source de tension continue VDC et de six interrupteurs semi-conducteurs (souvent des IGBT ou MOSFETs), organisés en trois branches correspondant aux trois phases : A, B et C.

Chaque bras de l'onduleur est formé par deux interrupteurs montés en série, avec leur point milieu relié respectivement aux phases de la charge triphasée. L'ensemble du montage constitue un pont triphasé, où chaque paire d'interrupteurs agit pour générer la tension de phase souhaitée.

Hypothèses de base

- Les interrupteurs sont considérés idéaux (pas de perte de conduction ni de commutation, temps de commutation négligeable).
- La source continue est parfaite (tension constant VDC).
- La charge est équilibrée et peut être représentée par un réseau d'impédances triphasées.

Définissons S_a , S_b et S_c comme les signaux de commande des interrupteurs supérieurs des phases A, B et C respectivement :

- $S_x=1 \Rightarrow S_{x-} = 1 \Rightarrow S_x=1$ si l'interrupteur supérieur de la phase x est fermé,
- $S_x=0 \Rightarrow S_{x-} = 0 \Rightarrow S_x=0$ si l'interrupteur inférieur est fermé.

Les tensions de phase par rapport au point commun de la source continue (appelé 000) sont données par :

$$V_{a0} = (2S_a - 1) \times \frac{V_{dc}}{2} \quad \text{(II.17)}$$

$$V_{b0} = (2S_b - 1) \times \frac{V_{dc}}{2} \quad \text{(II.18)}$$

$$V_{c0} = (2S_c - 1) \times \frac{V_{dc}}{2} \quad \text{(II.19)}$$

Ces tensions sont ensuite utilisées pour alimenter la charge triphasée.

Tensions de phase par rapport au neutre N :

Si la charge est étoilée avec un neutre accessible, les tensions de phase V_{aN} , V_{bN} et V_{cN} sont obtenues par :

$$V_{aN} = V_{a0} - V_{n0} \quad \text{(II.20)}$$

$$V_{bN} = V_{b0} - V_{n0} \quad \text{(II.21)}$$

$$V_{cN} = V_{c0} - V_{n0} \quad \text{(II.22)}$$

où V_{n0} est la tension du point neutre de la charge par rapport au 0 de la source continue, et peut s'écrire :

$$V_{n0} = \frac{V_{a0} + V_{b0} + V_{c0}}{3} \quad (\text{II.23})$$

Ainsi, on peut exprimer les tensions de phase équilibrées directement en fonction des signaux de commande et de VDC.

Modélisation en termes de commutation :

Chaque interrupteur (haut et bas) d'une même branche est commandé de manière complémentaire pour éviter :

- Un court-circuit de la source continue,
- Une interruption du courant dans la charge.

Cela impose la règle suivante :

$$S_x + \overline{S_x} = 1 \quad (\text{II.24})$$

où $\overline{S_x}$ est le complémentaire de S_x .

Représentation schématique :

Le schéma de modélisation standard comprend :

- Une source continue VDC,
- Trois bras de deux interrupteurs (IGBT ou autres),
- Le point milieu de chaque bras connecté respectivement aux phases A, B et C de la charge.

Modélisation Matricielle de l'Onduleur Triphasé

On considère :

$$\overrightarrow{V_{abc}} = \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

Les tensions de phases par rapport au neutre N.

$$\vec{S} = \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

le vecteur des signaux de commande des interrupteur supérieurs

- Vdc la tension continue de la source

Rappelons que :

$$V_{x0} = (2S_x - 1) \frac{V_{dc}}{2} \quad \text{pour } x=a,b,c \quad (\text{II.27})$$

Et que la tension du neutre V_{n0} est :

$$V_{n0} = \frac{V_{a0} + V_{b0} + V_{c0}}{3} \quad (\text{II.28})$$

La tension de phase par rapport au neutre sont alors données par :

$$V_{xn} = V_{x0} - V_{n0} \quad \text{Pour } x=a,b,c \quad (\text{II.29})$$

En développant les expressions :

Expression vectorielle :

$$\overrightarrow{V_{abc}} = \left(\frac{V_{dc}}{2}\right) (2\vec{S} - \vec{I}) - V_{n0}\vec{I} \quad (\text{II.30})$$

Avec

$$\vec{I} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

Calcul de V_{n0} :

$$\begin{aligned} V_{n0} &= \frac{1}{3} \sum_{x=a}^c V_{x0} = \frac{1}{3} \left(\frac{V_{dc}}{2} (2S_a - 1) + \frac{V_{dc}}{2} (2S_b - 1) + \frac{V_{dc}}{2} (2S_c - 1) \right) \\ V_{n0} &= \frac{V_{dc}}{6} (2(S_a + S_b + S_c) - 3) \end{aligned} \quad (\text{II.32})$$

Finalement , on obtien :

$$\overrightarrow{V_{abc}} = \frac{V_{dc}}{3} \times \begin{bmatrix} 2S_a & -S_b & -S_c \\ 2S_b & -S_c & -S_a \\ 2S_c & -S_a & -S_b \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

Ou sous forme matricielle compacte :

$$\overrightarrow{V_{abc}} = \frac{v_{dc}}{3} \times \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.34})$$

II.5.4.2 Commande de l'onduleur par du signal MLI

La **Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI)** est une méthode utilisée pour contrôler un **onduleur**, afin de produire une tension alternative (AC) à partir d'une source continue (DC).

Le principe est simple :

On compare un **signal sinusoïdal** (la tension qu'on veut obtenir) avec un **signal triangulaire** (porteuse). Cette comparaison permet de générer des **impulsions** qui commandent les interrupteurs de l'onduleur (IGBT, MOSFET, etc.).

Ces impulsions permettent de **reproduire une tension proche d'une sinusoïde**, avec une **fréquence et une amplitude contrôlées**.

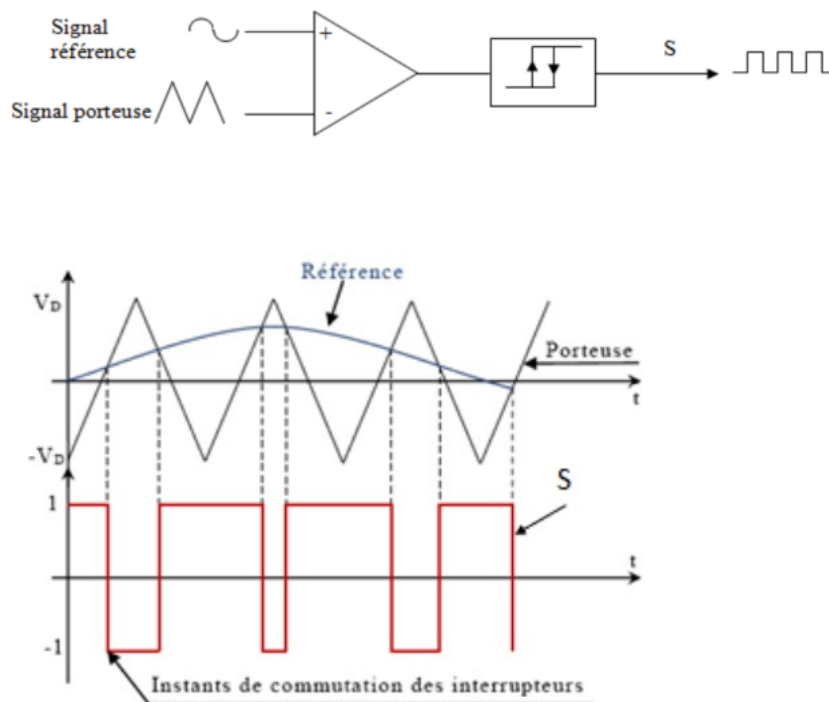


Figure (II.13) : Générateur de la PWM à Comparateur à deux seuils

II.5.4.3 Commande à 120°

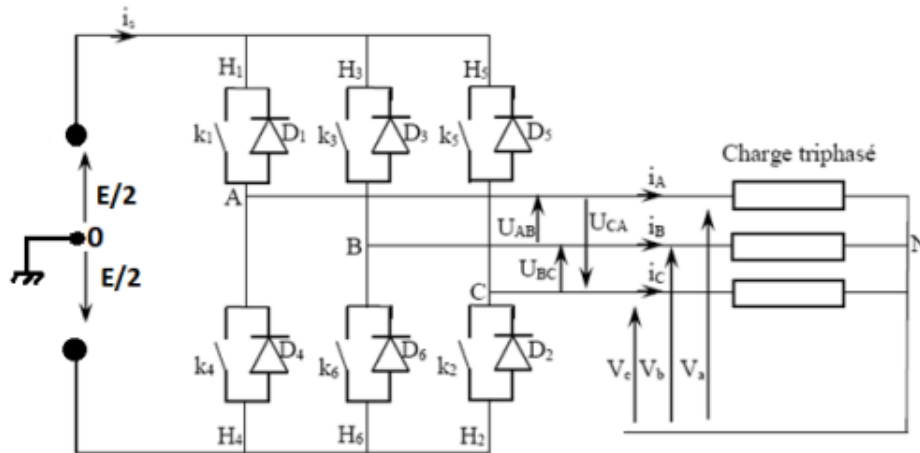
Commande à 120° de l'onduleur triphasé

La commande à 120° est une technique de pilotage des interrupteurs d'un onduleur triphasé. Elle consiste à faire fonctionner chaque interrupteur pendant 120° électriques de la période d'un cycle (soit $1/3$ du cycle).

Dans un onduleur triphasé à 6 interrupteurs (K1 à K6), les transistors sont activés selon un cycle fixe et décalé, pour créer une tension triphasée équilibrée. À chaque instant, deux phases sont connectées à la source (une au +, une au -), et la troisième est libre (non connectée).

Principe :

- Chaque transistor est **conduit pendant 120°** .
- Les signaux de commande sont **décalés de 120°** entre les phases.
- Cela permet de générer une tension **triphasee à 6 étapes** (appelée "6-pulses").



La figure (II.14) montre les six étapes de fonctionnement de l'onduleur pendant une période.

Dans ce cas, l'onduleur triphasé est vu comme une combinaison de trois onduleurs monophasés, chacun étant en configuration demi-pont.

La source continue d'alimentation est divisée en deux tensions égales ($E/2$), reliées par un point central noté O, qui sert de référence commune pour les trois branches de l'onduleur.

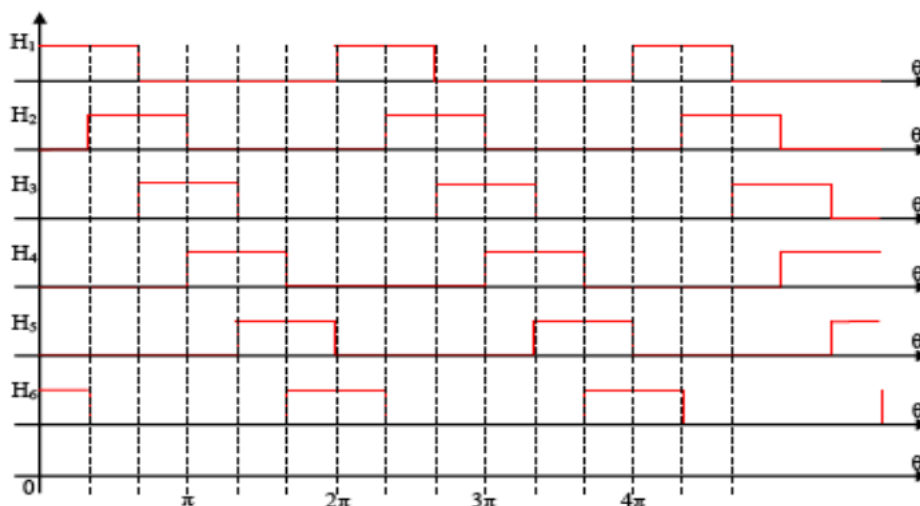


Figure (II.15) : Séquences de conduction des interrupteurs (commande à 120°)

1. Tensions composées (entre phases) :

- Elles sont obtenues à partir des tensions de phase par rapport au point milieu (V_{A0} , V_{B0} , V_{C0}) :

$$V_{AB} = V_{A0} - V_{B0}$$

$$V_{BC} = V_{B0} - V_{C0} \quad (\text{II.35})$$

$$V_{CA} = V_{C0} - V_{A0}$$

- Ces tensions forment un système triphasé en "marches d'escalier", d'amplitude E , de période T , et déphasées de 120°

2. Tensions simples (aux bornes de la charge) :

- Elles sont déduites des tensions composées :

$$V_a = 1/3(V_{AB} - V_{CA})$$

$$V_b = 1/3(V_{BC} - V_{AB}) \quad (\text{II.36})$$

$$V_c = 1/3(V_{CA} - V_{BC})$$

- Leur allure est en "créneaux" alternés, d'amplitude $E/2$, de période T , et également déphasées de 120°

3. Observations :

- Les tensions simples et composées forment des systèmes triphasés équilibrés.
- La figure 1.14 illustre les tensions simples, mettant en évidence leur forme et leur déphasage.

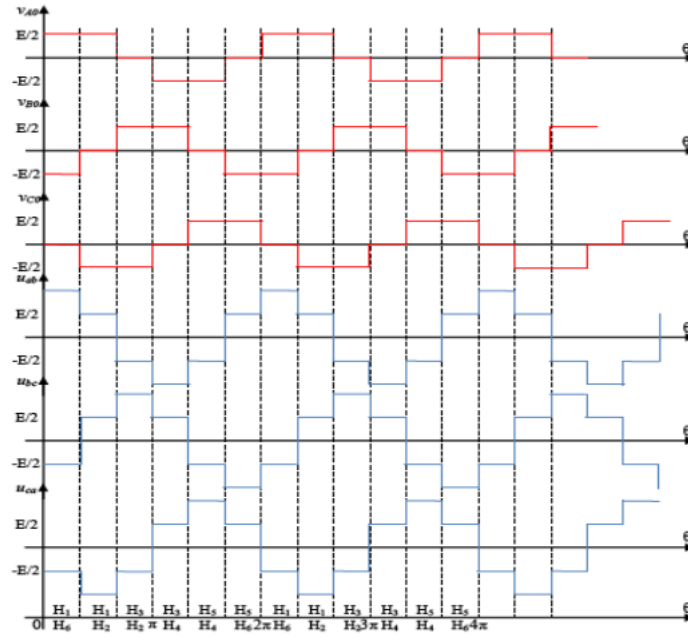


Figure (II.16) : Chronogrammes des tensions composées

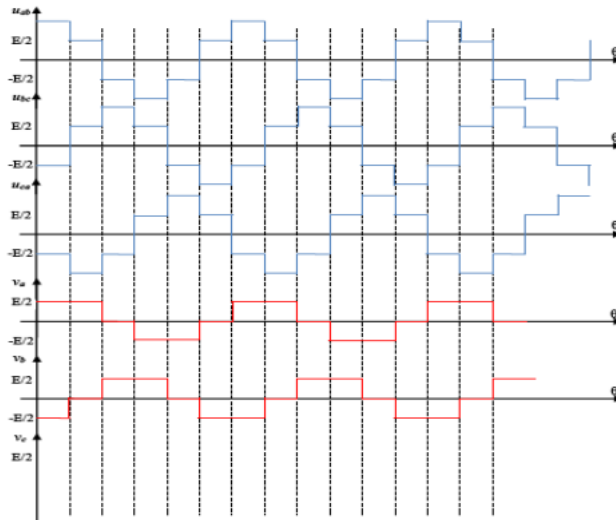


Figure (II.17) : Chronogrammes des tensions simples

Les expressions des valeurs efficaces sont données par :

Tension composée :

$$U_{eff} = \frac{E}{\sqrt{2}} \quad (II.37)$$

Tension simple :

$$V_{eff} = \frac{E}{\sqrt{6}} \quad (\text{II.38})$$

On peut écrire la relation suivante :

$$U_{eff} = \sqrt{3}V_{eff} \quad (\text{II.39})$$

Un onduleur triphasé commandé selon une logique à 120° permet de **contrôler la fréquence** des tensions alternatives qu'il génère.

La **valeur efficace** des tensions (simples et composées) en sortie peut être ajustée en faisant varier la tension d'alimentation continue

II.5.5 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'**analyse approfondie** des variateurs de vitesse appliqués aux machines asynchrones triphasées, avec un focus particulier sur la **commande à 120°**.

Validation Expérimentale par Simulation MATLAB

Une **campagne de simulation** a été menée sous MATLAB/Simulink pour :

- ✓ **Évaluer les performances** de l'onduleur triphasé comme variateur de vitesse
- ✓ **Contrôler efficacement** la vitesse d'un moteur asynchrone à cage
- ✓ **Vérifier la robustesse** du système en régime permanent et transitoire

Chapitre 3 Généralité sur les machines asynchrones

III.1 Introduction :

Les moteurs asynchrones triphasés sont très utilisés dans l'industrie. Ils sont simples à fabriquer, solides et ne demandent pas beaucoup d'entretien. Leur prix est raisonnable, leur coût d'entretien qui est relativement faible par rapport aux autres types de moteurs. ce qui les rend pratiques pour de nombreuses machines.

Dans ce chapitre, on va expliquer comment ces moteurs fonctionnent. On va aussi présenter les équations qui décrivent leur comportement électrique et mécanique.

III.2 Généralités

La machine asynchrone triphasée à cage, également appelée moteur à induction, est une machine électrique tournante qui convertit l'énergie électrique, reçue sous forme de courant alternatif, en énergie mécanique. Elle constitue l'un des éléments fondamentaux de l'électromécanique industrielle.

Dotée de $2p$ pôles et alimentée par un réseau de fréquence f , cette machine fonctionne à une vitesse de rotation légèrement inférieure à la vitesse dite **synchrone**, notée n_s , et définie par la relation suivante :

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

III.2.1 Constitution de la machine asynchrone

La machine asynchrone est composée de deux éléments principaux : un **stator** fixe, contenant le circuit magnétique et les enroulements, et un **rotor** mobile, qui tourne à l'intérieur du stator.

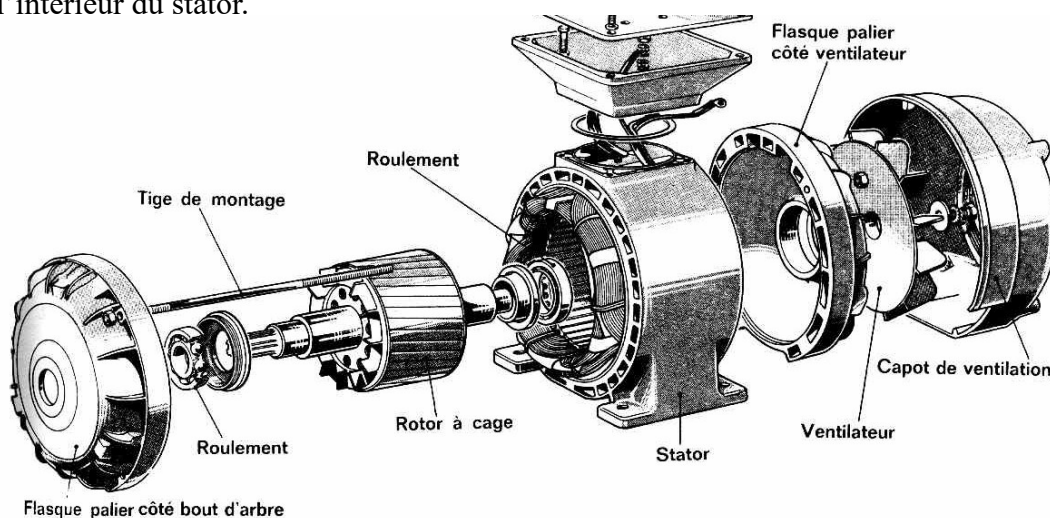


Figure (III.1) : Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage

III.2.1.1 Le stator :

Le stator est la partie fixe du moteur. Il est formé d'un anneau de fines tôles avec des rainures à l'intérieur, dans lesquelles sont placés des enroulements électriques triphasés. Ces enroulements sont espacés de façon régulière (décalés de 120°) pour produire un champ magnétique tournant. Ils sont alimentés par un courant triphasé à partir de la plaque à bornes du moteur, qui permet de le brancher en étoile (Y) ou en triangle (Δ).



Figure (III.2) :le stator

III.2.1.2 Le rotor :

Le rotor est la partie tournante du moteur asynchrone. Il a la forme d'un cylindre. Selon les besoins des applications, sa conception a évolué avec le temps, ce qui explique l'existence de plusieurs types de rotors adaptés à différents usages.



Figure (III.3) : le rotor

III.2.2 Branchement en étoile ou en triangle

Il existe deux façons de connecter un moteur asynchrone à un réseau électrique triphasé : le montage en étoile et le montage en triangle.

- **En étoile (Y)** : Chaque bobine reçoit une tension plus faible, appelée tension simple. Par exemple, si le réseau fournit 400V, chaque bobine reçoit environ 230V.
- **En triangle (Δ)** : Chaque bobine reçoit la tension complète du réseau, donc 400V si le réseau est de 400V.

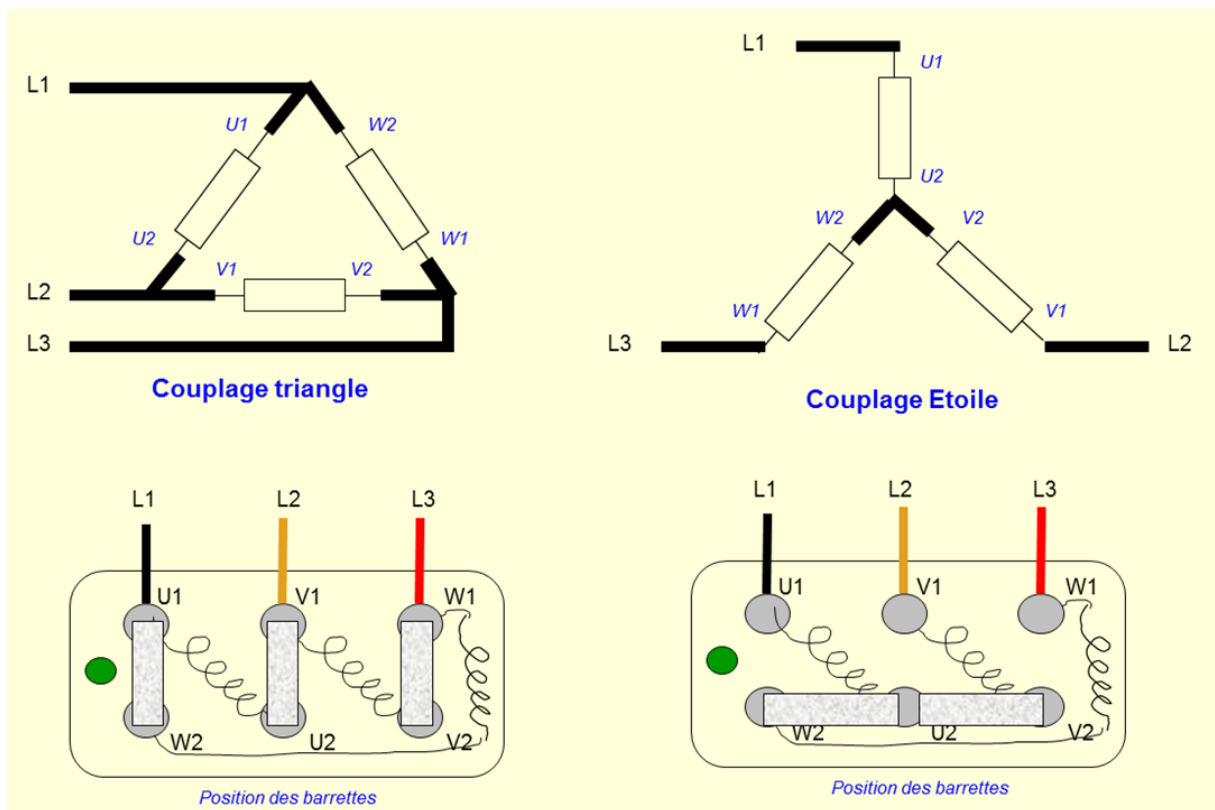


Figure (III.4) : Façon de couplage étoile et triangle dans la boîte à borne d’une machine asynchrone

Le montage en étoile est utilisé dans deux cas :

- Quand le moteur est prévu pour 230V mais qu’il est branché sur un réseau de 400V.
- Pour démarrer un moteur en réduisant sa puissance , surtout si la machine entraînée a une grande inertie (c’est-à-dire qu’elle est lourde à mettre en mouvement).

III.2.3 Principe de fonctionnement général d’une machine asynchrone

Le moteur asynchrone fonctionne grâce à l’interaction entre deux champs magnétiques :

- Le champ tournant est créé dans le stator (partie fixe) par le courant triphasé fourni par le réseau électrique.

- Ce champ tourne et coupe les conducteurs du rotor (partie mobile), ce qui provoque l'apparition de courants induits dans celui-ci.

Ces courants dans le rotor génèrent à leur tour un champ magnétique qui réagit avec celui du stator, ce qui produit une force et fait tourner le rotor.

Le fonctionnement est comparable à celui d'un transformateur, où :

- Le stator joue le rôle de l'enroulement primaire (alimenté directement),
- Le rotor joue le rôle du secondaire (où le courant est induit).

La vitesse théorique du champ tournant, appelée vitesse synchrone (n_s), dépend de la fréquence (f) du réseau et du nombre de paires de pôles (p) :

$$n_s = (60 \times f) / p \tag{III.2}$$

Le rotor ne peut pas atteindre exactement cette vitesse n_s , sinon aucun courant ne serait induit. Il tourne donc à une vitesse légèrement plus faible (n). La différence relative entre ces deux vitesses est appelée glissement (g), défini par :

$$g = (n_s - n) / n_s \tag{III.3}$$

Ce glissement est indispensable pour que le moteur fonctionne.

III.2.4 Bilan énergétique d'un moteur asynchrone et formules:

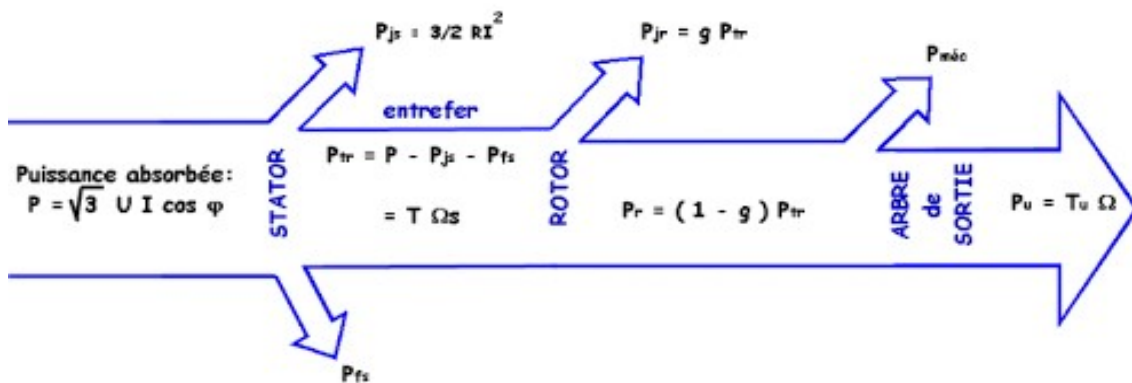


Figure (III.5) : Bilan des puissances.

I: courant en ligne

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

$$P_{js} = 3/2 R I^2 \tag{III.4}$$

R: résistance entre deux bornes du stator

- **Pertes fer au stator: pfs**

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

- **Puissance transmise: P_{tr}**

$$P_{tr} = P_a - P_{js} - P_{fs} \quad (\text{III.5})$$

C'est la puissance que reçoit le rotor.

- **Moment du couple électromagnétique: T_{em}**

Les forces qui s'exercent sur les conducteurs du rotor tournent à la vitesse Ω_s : elles glissent sur le rotor qui, lui, ne tourne qu'à la vitesse Ω . L'action de l'ensemble des forces électromagnétiques se réduit à un couple électromagnétique résultant de moment T_{em} .

$$T_{em} = P_{tr} / \Omega_s \quad (\text{III.6})$$

T_{em} (N.m)

P_{tr} (W)

Ω_s (rad/s)

- **Puissance mécanique totale: P_M**

Le couple électromagnétique de moment T_{em} entraîne le rotor à la vitesse Ω , il lui communique donc la puissance mécanique totale P_M

$$P_M = T_{em} \Omega \quad (\text{III.7})$$

soit

$$P_M = T_{em} \Omega = P_{tr} \Omega / \Omega_s = P_{tr}(1 - g)$$

$$P_M = P_{tr}(1 - g) \quad (\text{III.8})$$

Cette puissance comprend la puissance utile et les pertes mécaniques.

- **Pertes par effet joule et pertes dans le fer au rotor: P_{jr} et P_{fr}**

Ces pertes représentent la différence entre P_{tr} et P_M . Elles sont dues aux courants induits.

Elles ne sont pas mesurables car le rotor est court-circuité. On les calcule donc:

$$P_{jr} + P_{fr} = P_{tr} - P_M = P_{tr} - P_{tr}(1 - g) = g P_{tr} \quad (\text{III.9})$$

$$P_{jr} \approx g P_{tr}$$

Les pertes fer du rotor sont négligeables.

- **Pertes mécaniques: p_m**

$$P_m = P_u - P_M \quad (\text{III.10})$$

La vitesse de rotation variant peu en marche normale, ces pertes sont pratiquement constants.

- **Pertes collectives: P_c**

Ces pertes ne dépendent que de U , f et n . Comme ces grandeurs sont généralement constantes, les pertes fer au stator et les pertes mécaniques le sont aussi.

$$P_c = P_{fs} + P_m \quad (\text{III.11})$$

On définit le couple de perte:

$$P_p = P_c / \Omega_s \quad (\text{III.12})$$

Le couple de perte est une grandeur constante quelle que soit la vitesse et la charge de la machine.

• **Puissance utile :** $P_u = P_M - P_{pm} \quad (\text{III.13})$

• **Couple utile:** $T_u = P_u / \Omega \quad (\text{III.14})$

• **Rendement:** $\eta = P_u / P_a \quad (\text{III.15})$

II.3. Modélisation de la machine asynchrone :

II.3.1 Hypothèses simplificatrices :

Pour pouvoir modéliser plus facilement le fonctionnement d'une machine asynchrone, on fait quelques suppositions simplificatrices. Ces hypothèses permettent d'éviter des calculs trop complexes tout en gardant une bonne précision. Voici les principales :

- Le circuit magnétiques sont symétriques.
- Le champ magnétique dans l'entrefer varie de façon **sinusoïdale**.
- La distance entre le stator et le rotor (**entrefer**) est considérée constante.
- On ne prend pas en compte la **saturation magnétique**, ce qui veut dire que le flux magnétique dépend de manière linéaire du courant.
- On **néglige l'effet de l'encoche**, c'est-à-dire l'influence des rainures dans le stator et le rotor.
- Les effets liés à la **température** ou à la **fréquence élevée** comme l'effet de peau ne sont pas pris en compte.

Grâce à ces hypothèses, on peut déduire certaines conséquences importantes :

- Le **flux magnétique total** est simplement la somme des flux partiels.
- Les **inductances** (propre et mutuelle) sont constantes.
- Les inductances mutuelles entre les enroulements du stator et du rotor varient de façon **sinusoïdale** selon l'angle entre leurs axes magnétiques.

III.3.2 Modélisation dans le plan triphasé (abc)

Dans cette section, on s'intéresse à la modélisation d'une **machine asynchrone triphasée** en utilisant les trois phases du stator (notées SA, SB, SC) et celles du rotor. On représente cette machine de manière schématique dans la figure I.6 (non jointe ici).

L'angle électrique θ , qui varie avec le temps, représente la **position relative** entre les axes magnétiques de la phase SA (du stator) et de la phase Ra (du rotor). Cet angle joue un rôle essentiel dans le calcul des flux et des tensions induites dans la machine.

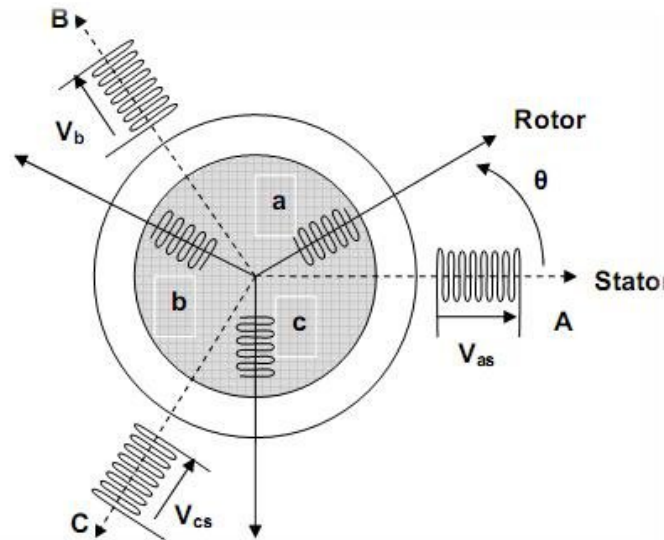


Figure III.6 : Représentation schématique d'une MAS Triphasée.

III.3.3 Équations générales de la machine asynchrone triphasée:

Dans ces conditions, si on considère que le moteur à induction est triphasé au stator et au rotor. Les trois types d'équations traduisant le comportement du moteur sont

• **Équations électriques:**

Les équations de tension des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques Sont .

Au stator:

$$[V_s] = [R_s] [I_s] + d/dt [\Phi_s]$$

Avec

$$[V_s] = [V_{sa} \ V_{sb} \ V_{sc}]^T \tag{III.16}$$

$$[i_s] = [i_{sA} \ i_{sB} \ i_{sC}]^T \tag{III.17}$$

$$[\varphi_s] = [\varphi_{sA} \ \varphi_{sB} \ \varphi_{sC}]^T \tag{III.18}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \tag{III.19}$$

Au rotor:

$$[V_r] = [R_r] [I_r] + d/dt [\Phi_r] \tag{III.20}$$

Avec

$$[V_r] = [V_{ra} \ V_{rb} \ V_{rc}]^T \tag{III.21}$$

$$[i_r] = [i_{rA} \ i_{rB} \ i_{rC}]^T \tag{III.22}$$

$$[\varphi_r] = [\varphi_{rA} \ \varphi_{rB} \ \varphi_{rC}]^T \tag{III.23}$$

$$[Rr] = \begin{bmatrix} Rr & 0 & 0 \\ 0 & Rr & 0 \\ 0 & 0 & Rr \end{bmatrix} \quad \text{(III.24)}$$

• **Équations magnétiques :**

Les hypothèses simplificatrices citées antérieurement conduisent à des relations linéaires entre les flux et les courants de la machine asynchrone, ces relations s'écrivent matriciellement

comme suit : Au stator : $[\Phi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r]$ (III.25)

Au rotor: $[\Phi_r] = [L_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_s]$ (III.26)

Avec

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad \text{(III.27)}$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad \text{(III.28)}$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \theta + \frac{2\pi}{3} & \cos \theta - \frac{2\pi}{3} \\ \cos \theta - \frac{2\pi}{3} & \cos \theta & \cos \theta + \frac{2\pi}{3} \\ \cos \theta + \frac{2\pi}{3} & \cos \theta - \frac{2\pi}{3} & \cos \theta \end{bmatrix} \quad \text{(III.29)}$$

• **Équations mécaniques :**

Le couple électromagnétique est donné par l'expression :

$$C_{em} - C_r = j d\Omega/dt + f\Omega$$

II.4 Démarrage de la machine asynchrone :

II.4.1 Démarrage direct semi-automatique 1 sens de marche :

Pour réaliser un départ-moteur de façon correcte, il faut assurer les fonctions suivantes :

- **Isoler** c'est le rôle du sectionneur.
- **Protéger** la puissance contre les courts-circuits, pour cela on utilise des cartouches fusibles de type aM.
- **Commander** l'arrivée de l'énergie au moteur, c'est le rôle du contacteur.
- **Protéger** le moteur contre les surcharges, fonction assurée par le relais thermique.

• Schémas :

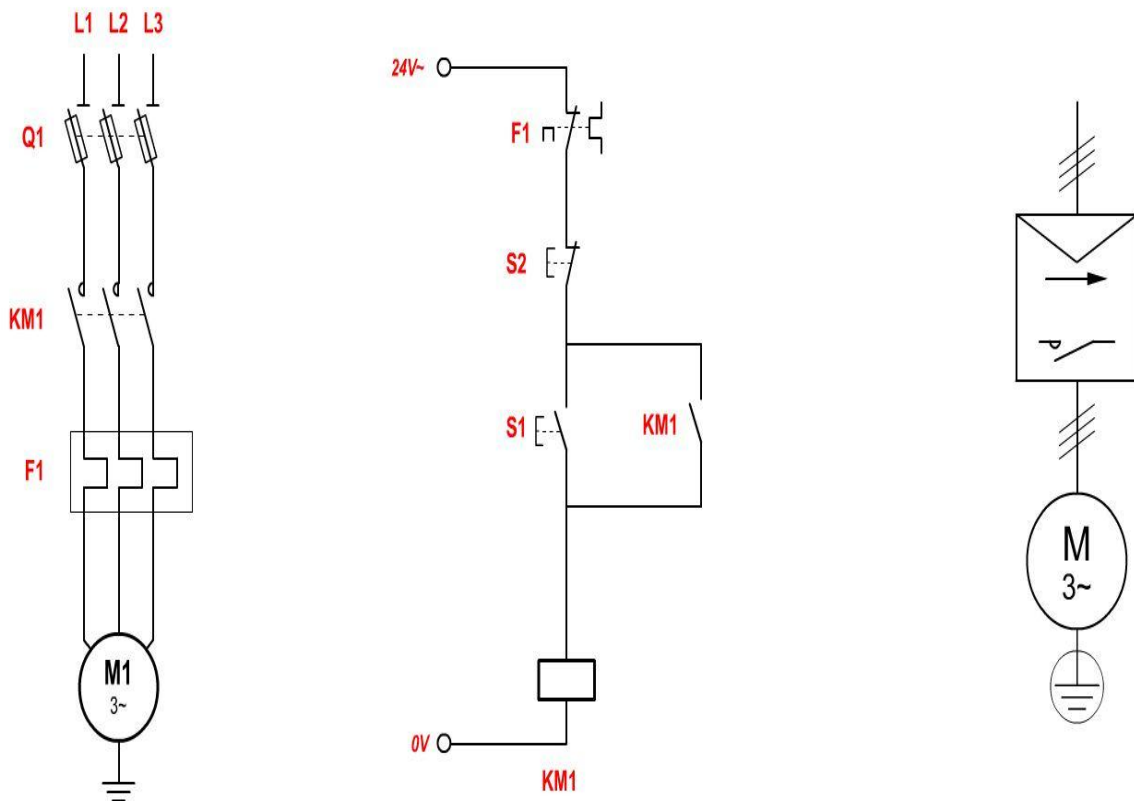


Schéma de puissance

Schéma de commande

Schéma fonctionnel

Figure III.7 : Démarrage direct semi-automatique 1 sens de marche

Principe de fonctionnement :

1. Fermeture manuelle de sectionneur porte fusible Q1
 2. Impulsion sur bouton poussoir (Marche) S1.
 3. Excitation de la bobine KM1.
 4. Fermeture de l'auto-maintien KM1 (13.14).
 5. Fermeture des contacts principaux KM1.
 6. Démarrage de moteur M1.
- Pour arrêter le moteur :
 1. Impulsion sur bouton poussoir (Arrêt) S2.
 2. Désexcitation de la bobine KM1
 3. Ouverture de l'auto-maintien KM1 (13.14).
 4. Ouverture des contacts principaux KM1.
 5. Arrêt de moteur
 - Pour réaliser le démarrage manuel en débrancher l'auto-maintien KM1 (13.14).

III.4.2 Démarrage direct semi-automatique deux sens de marche

Pour changer le sens de rotation d'un moteur asynchrone triphasé, il faut inverser deux des trois phases du circuit d'alimentation.

- Schéma :

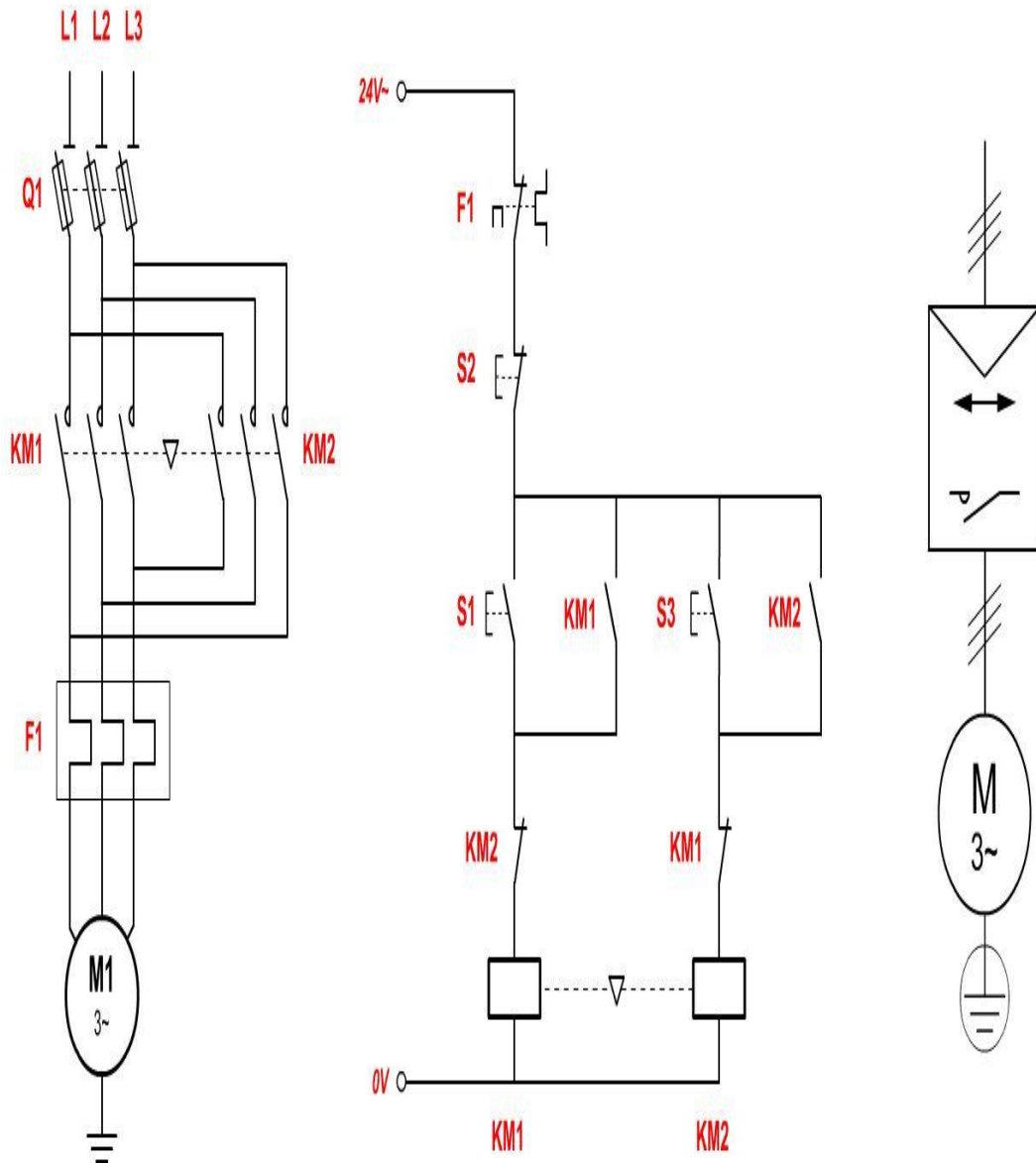


Schéma de puissance

Schéma de commande

Schéma fonctionnel

Figure III .8 :Démarrage direct semi-automatique deux sens de marche

Principe de fonctionnement :

1. Fermeture manuelle de sectionneur porte fusible Q1
 2. Impulsion sur bouton poussoir (Marche) S1.
 3. Excitation de la bobine KM1.
 4. Fermeture de l'auto-maintien KM1 (13.14).
 5. Ouverture de verrouillage KM1 (21.22)
 6. Fermeture des contacts principaux KM1.
 7. Démarrage de moteur M1 (1er sens de marche).
- Pour arrêter le moteur :
 1. Impulsion sur bouton poussoir (Arrêt) S2.
 2. Désexcitation de la bobine KM1.
 3. Ouverture de l'auto-maintien KM1 (13.14).
 4. Fermeture de verrouillage KM1 (21.22).
 5. Ouverture des contacts principaux KM1.
 6. Arrêt de moteur.
 - Pour 2^{ème} sens de marche
 1. Impulsion sur bouton poussoir (Marche) S3.
 2. Excitation de la bobine KM2.
 3. Fermeture de l'auto-maintien KM2 (13.14).
 4. Ouverture de verrouillage KM2 (21.22)
 5. Fermeture des contacts principaux KM2.
 6. Démarrage de moteur M1 (2^{ème} sens de marche).
 - Pour arrêter le moteur.
 1. Impulsion sur bouton poussoir (Arrêt) S2.
 2. Désexcitation de la bobine KM2.
 3. Ouverture de l'auto-maintien KM2 (13.14).
 4. Fermeture de verrouillage KM2 (21.22).
 5. Ouverture des contacts principaux KM2.
 6. Arrêt de moteur.

III.4.3 Démarrage étoile-triangle 1 sens de marche

Le principe du démarrage étoile triangle consiste à **sous-alimenter** le moteur durant presque toute la durée du démarrage en le couplant **en étoile**.

Il faut donc utiliser un moteur **normalement couplé en triangle** et dont toutes les extrémités d'enroulement sont sorties sur la plaque à bornes.

Exemple : Sur un réseau 230/400 V il faut donc utiliser un moteur 400/660 V.

Schéma :

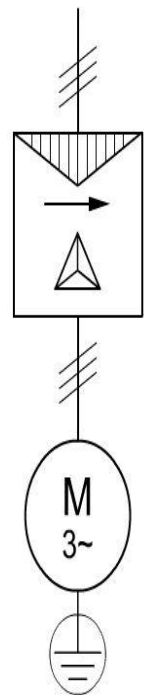
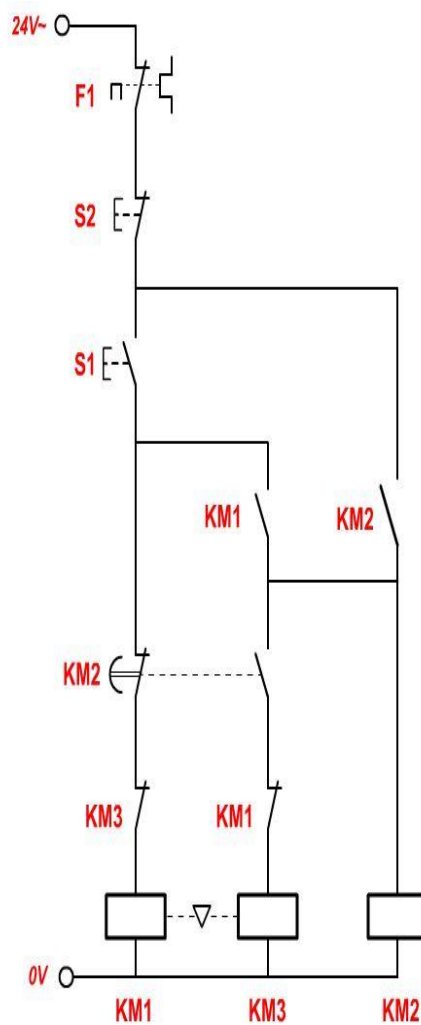
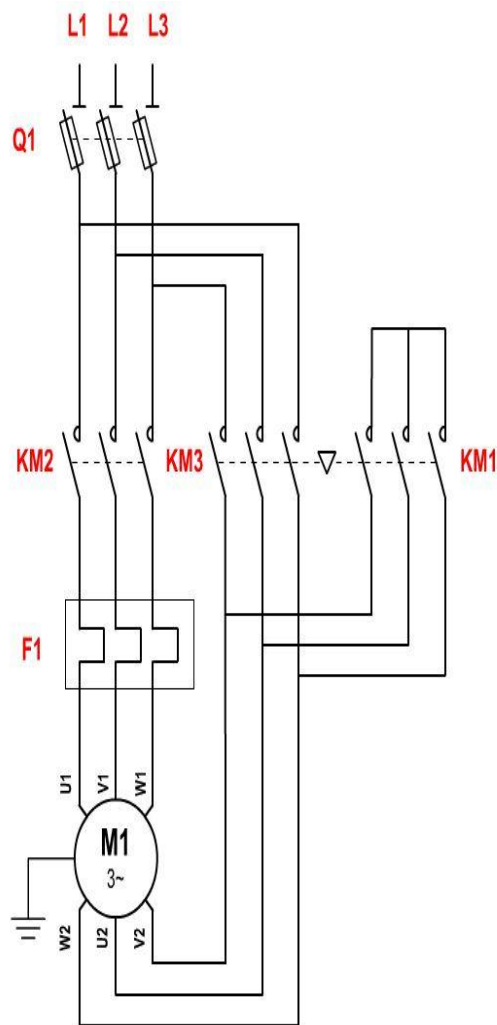


Schéma de puissance

Schéma de commande

Schéma fonctionnel

Figure III.9 : Démarrage étoile-triangle 1 sens de marche

Principe de fonctionnement :

1. Fermeture manuelle de sectionneur porte fusible Q1
2. Impulsion sur bouton poussoir (Marche) S1.
3. Excitation de la bobine KM1.
4. Fermeture de l'auto-maintien KM1 (13.14).
5. Ouverture de verrouillage KM1 (21.22)
6. Fermeture des contacts principaux KM1.
7. Excitation de la bobine KM2.
8. Fermeture de l'auto-maintien KM2 (13.14).
9. Fermeture des contacts principaux KM2.
10. Démarrage de moteur M1 en étoile.
11. Après certain temps.
12. Ouverture de contact temporisé KM2 (55.56).
13. Fermeture de contacte temporisé KM2 (67.68).
14. Désexcitation de la bobine KM1.
15. Ouverture de l'auto-maintien KM1 (13.14).
16. Fermeture de verrouillage KM1 (21.22).
17. Ouverture des contacts principaux KM1.
18. Excitation de la bobine KM3.
19. Ouverture de verrouillage KM3 (21.22)
20. Fermeture des contacts principaux KM3.
21. Démarrage de moteur M1 en Triangle.
 - Pour arrêter le moteur.
 1. Impulsion sur bouton poussoir (Arrêt) S2.
 2. Désexcitation de la bobine KM2.
 3. Désexcitation de la bobine KM3.
 4. Ouverture de l'auto-maintien KM2 (13.14).
 5. Fermeture de verrouillage KM3 (21.22).
 6. Fermeture de contact temporisé KM2 (55.56).
 7. Ouverture de contacte temporisé KM2 (67.68).
 8. Ouverture des contacts principaux KM2.
 9. Ouverture des contacts principaux KM3.
 10. Arrêt de moteur.

III.4.4 Démarrage par élimination des résistances statorique

Démarrage de 2 temps

On dispose donc de deux contacteurs KM1 et KM2 et de trois résistances RU, RV et RW. KM1 est le contacteur de ligne, KM2 a pour fonction de court-circuiter les résistances une fois le moteur démarré.

- Schéma :

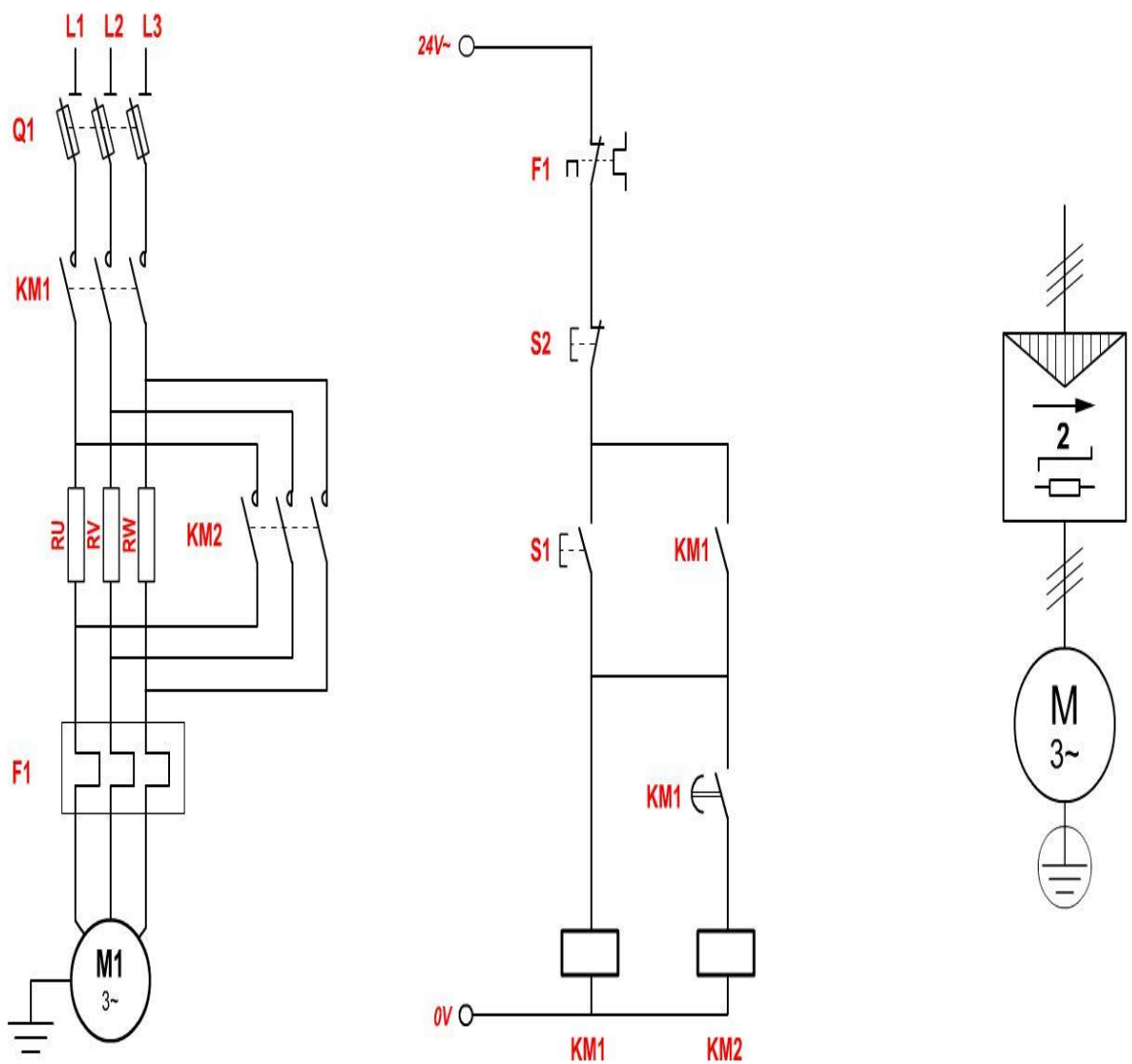


Schéma de puissance

Schéma de commande

Schéma fonctionnel

Figure III.10 : Démarrage par élimination des résistances statorique

Démarrage de 2 temps

Principe de fonctionnement :

1. Fermeture manuelle de sectionneur porte fusible Q1
 2. Impulsion sur bouton poussoir (Marche) S1.
 3. Excitation de la bobine KM1.
 4. Fermeture de l'auto-maintien KM1 (13.14).
 5. Fermeture des contacts principaux KM1.
 6. Démarrage de moteur M1 en petit vitesse.
 7. Après certain temps.
 8. Fermeture de contacte temporisé KM1 (67.68).
 9. Excitation de la bobine KM2.
 10. Fermeture des contacts principaux KM2.
 11. Démarrage de moteur M1 en grande vitesse.
- Pour arrêter le moteur.
1. Impulsion sur bouton poussoir (Arrêt) S2.
 2. Désexcitation de la bobine KM1.
 3. Désexcitation de la bobine KM2.
 4. Ouverture de l'auto-maintien KM1 (13.14).
 5. Ouverture de contacte temporisé KM1 (67.68).
 6. Ouverture des contacts principaux KM1.
 7. Ouverture des contacts principaux KM2.
 8. Arrêt de moteur.

III.5. Programmation d'un variateur avec SoMove

III.5.1. Introduction

Le logiciel **SoMove** est un outil développé par **Schneider Electric** permettant la **configuration, le paramétrage, le diagnostic et la maintenance** des variateurs de vitesse de la gamme Altivar (ATV). Il offre une interface graphique conviviale pour travailler en local via câble USB ou en réseau.

III.5.2. Configuration hors ligne d'un variateur :

III.5.2.1. Création du projet hors ligne :

Voici les étapes à suivre pour créer un projet hors ligne dans SoMove :

Étape 1 : Lancer SoMove

Ouvrez le logiciel SoMove installé sur votre ordinateur. Vous accédez à l'écran d'accueil.

Étape 2 : Créer un nouveau projet

Cliquez sur « Nouveau projet » puis sélectionnez « Projet hors ligne ». Une fenêtre s'ouvre pour choisir le modèle de variateur.

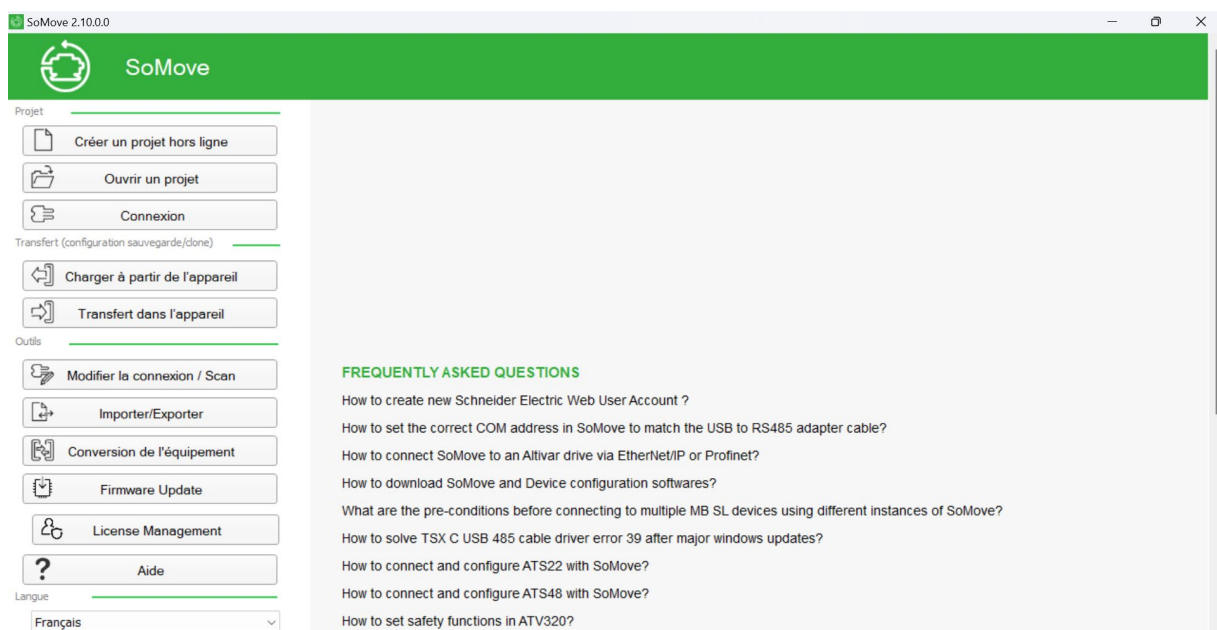


Figure III.11: Créer un nouveau projet

Étape 3 : Sélectionner un variateur

On a choisi le variateur ATV650U07N4 pour cette application.

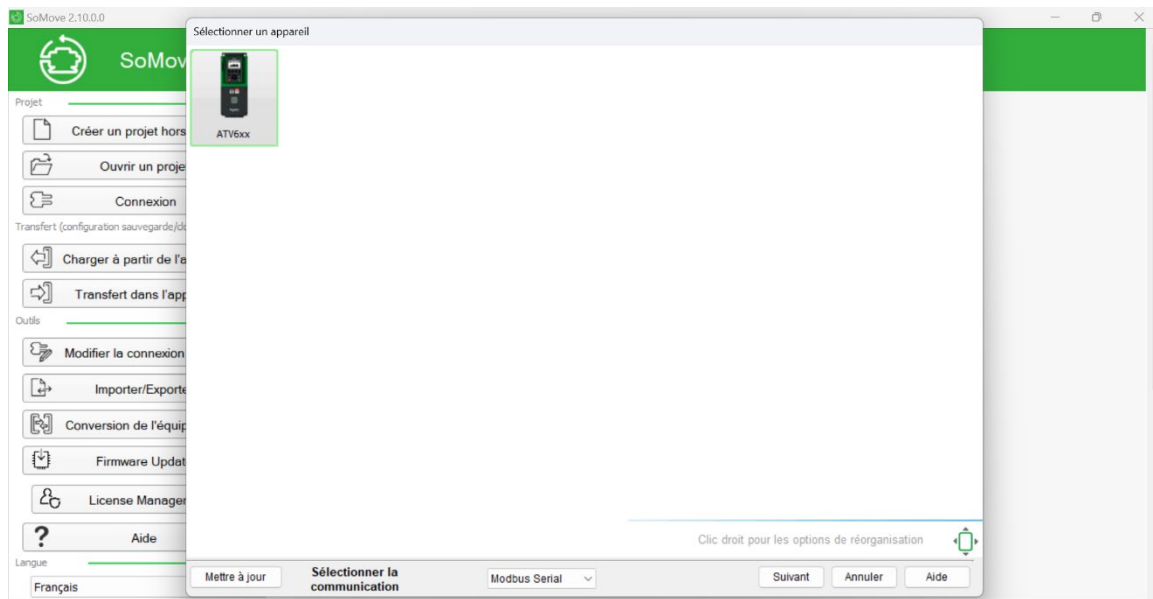


Figure III.12 : Sélectionner un variateur la famille Altivar Process ATV600.

Étape 4 : Accéder aux paramètres de configuration

ne fois le projet créé, vous accédez à l’interface de configuration du variateur.

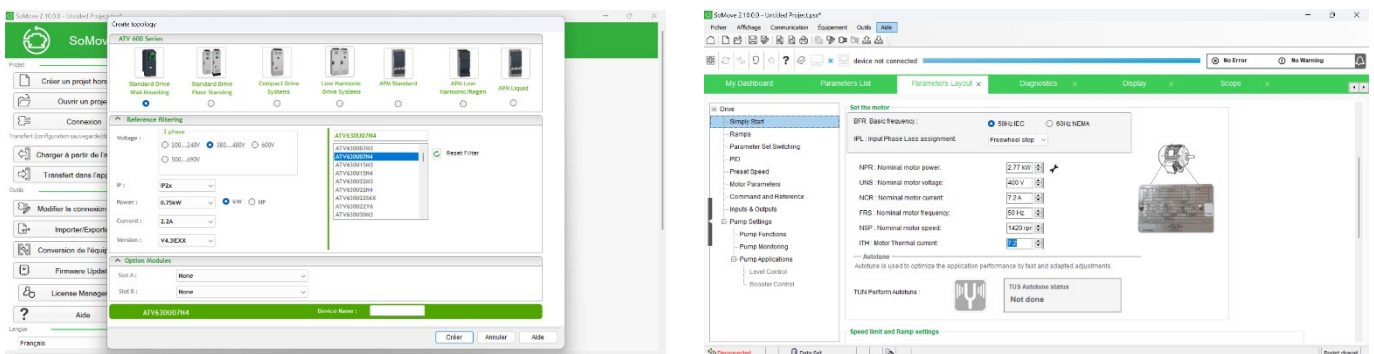


Figure III.13 : Sélection du variateur ATV650U07N4 et accès aux paramètres de configuration.

quelques paramètres essentiels à configurer :

- Type de commande (ex : logique 2 fils, potentiomètre...)
- Références de fréquence
- Paramètres moteur (tension, courant, fréquence nominale...)
- Entrées/sorties logiques

Qu'est-ce qu'un potentiomètre ?

Un **potentiomètre** est un **composant électrique** (une sorte de résistance variable) qu'on utilise souvent pour **contrôler manuellement la vitesse du moteur** en agissant sur la **fréquence de sortie** du variateur.

Logique 2 fils : marche/arrêt via des contacts (boutons poussoirs ou interrupteurs)

- **Logique 3 fils** : marche avant/arrière/arrêt
- **Potentiomètre** : contrôle de la vitesse via une molette tournante

Fonctionnement du potentiomètre :

- Il est **connecté à une entrée analogique** du variateur (généralement AI1).
- Quand tu tournes le potentiomètre, il **fait varier la tension d'entrée** (ex : 0 à 10V).
- Le variateur **traduit cette tension en fréquence de sortie**, ce qui **contrôle la vitesse du moteur**.

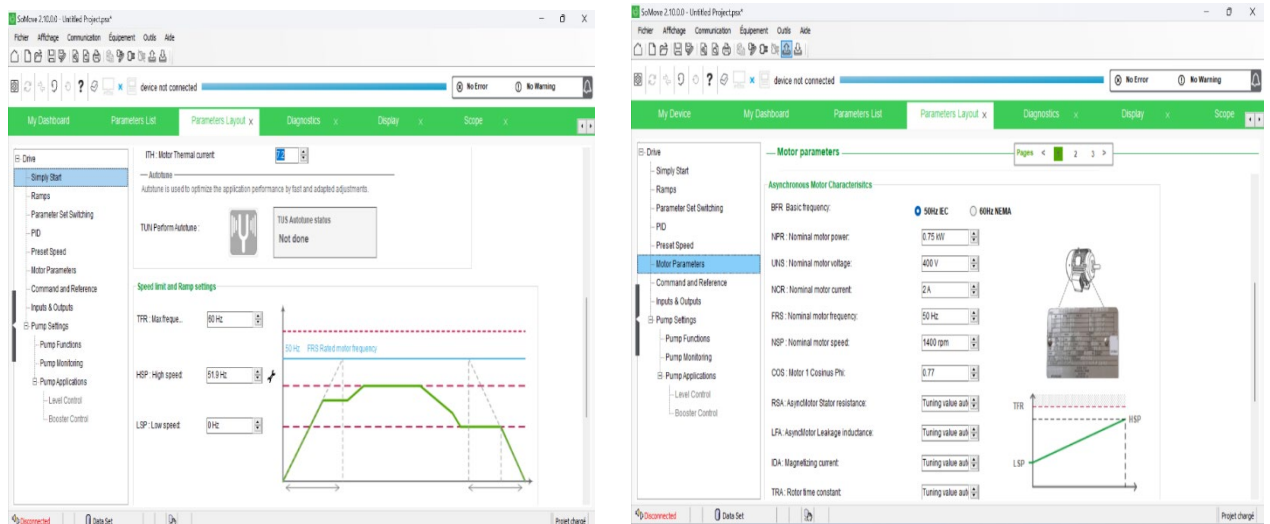


Figure III.14 : Courbes de démarrage et de freinage du moteur

Étape 6 : Sauvegarde du projet

Une fois la configuration terminée, cliquez sur « Fichier > Enregistrer sous » pour sauvegarder le projet. Vous pourrez plus tard le transférer vers le variateur connecté en ligne.

III.5.3. Mise en service pas à pas du variateur avec SoMove :

. Matériel utilisé

- Variateur de vitesse **ATV650U07N4**
- Logiciel **SoMove** installé sur PC
- Câble de communication **USB-TTM2**
- Moteur asynchrone triphasé

- Boutons poussoirs Marche (NO) et Arrêt (NC)
- Alimentation triphasée 400V

III.5.3. 1. Connexion du PC au variateur

- Brancher le câble USB au port du variateur.
- Lancer **SoMove**.
- Cliquer sur "**Connexion automatique**" ou sélectionner le port COM manuel.
- Le logiciel détecte automatiquement le modèle de variateur.

III.5.3. 2. Création d'un nouveau projet

- Aller dans "**Nouveau projet**" > **Sélectionner le modèle ATV320**.
- Entrer le **type de moteur** : 230/400V, courant nominal, fréquence.
- Définir la **logique de commande** :
 - Mode 2 fils (DI1 pour marche, DI2 pour arrêt)
 - Mode 3 fils si bouton de maintien utilisé

III.5.3. 3. Paramétrage moteur

- Onglet [**Moteur**]
 - Tension nominale : 400V
 - Courant nominal : 1.5 A
 - Fréquence : 50 Hz
 - Vitesse : 1450 tr/min
- Effectuer l'**auto-apprentissage (Auto-tuning)** si nécessaire.

III.5.3. 4. Paramètres de fonctionnement

- Fréquence min : 5 Hz
- Fréquence max : 50 Hz
- Rampe d'accélération : 3 s
- Rampe de décélération : 3 s
- Mode de commande : V/F ou Sensorless Vector selon application

III.5.3. 5. Configuration des entrées/sorties

- DI1 = MARCHE
- DI2 = ARRÊT
- AO1 = vitesse analogique si potentiomètre
- DO1 = signal de défaut

III.5.3. 6. Téléchargement dans le variateur

- Cliquer sur "**Transférer au variateur**"

- Enregistrer le projet pour maintenance future

III.5.4. Avantages de l'utilisation de SoMove

Fonction	Avantage
Interface graphique	Programmation intuitive
Sauvegarde de projet	Réutilisable sur d'autres machines
Diagnostic temps réel	Lecture d'alarmes et surveillance

Tableau (III.1) : Avantages de l'utilisation de SoMove

III.5.5. Conclusion

Le logiciel **SoMove** permet une **mise en service rapide, fiable et précise** des variateurs Schneider. En combinant des fonctions de **paramétrage intelligent**, de **diagnostic avancé** et de **communication claire**, il est devenu un outil incontournable pour les techniciens et ingénieurs en automatisme.

Chapitre 4 Variateur de vitesse à source divisée

IV.1 Introduction

Dans cette partie, nous avons présenter un type particulier de variateur de vitesse : le variateur à source divisée (Split Source Inverter)

Ce convertisseur est une alternative aux onduleurs classiques à pont de tension. Il présente plusieurs avantages, notamment une meilleure utilisation de la tension d'entrée, ne commande plus souple, et la possibilité d'augmenter la tension de sortie sans utiliser de transformateur ou de convertisseur DC-DC séparé.

Ce type d'onduleur utilise une topologie spéciale, avec des inductances et des condensateurs qui permettent de booster la tension AC à la sortie.

Dans ce chapitre, je vais expliquer son fonctionnement, les modes de charge et de décharge de l'inductance, la commande par modulation PWM triangulaire-sinusoïdale, et les résultats obtenus par simulation.

IV.2 Onduleur triphasé à source divisée

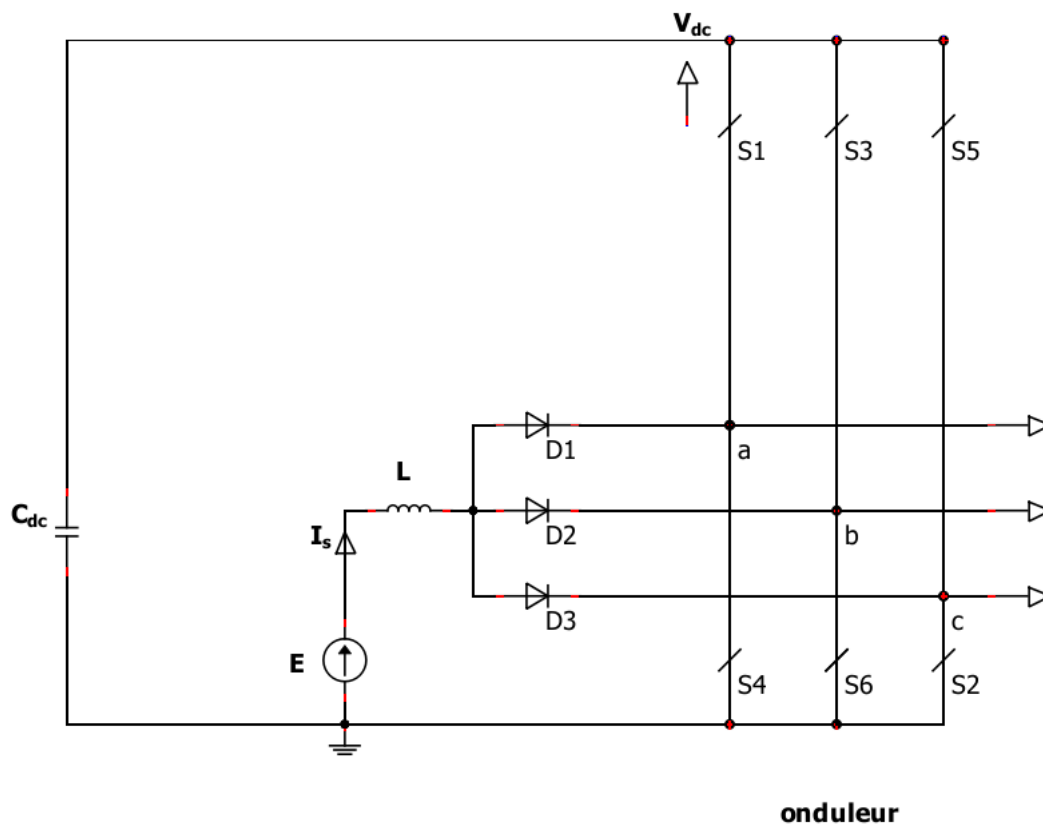


Figure (IV.1) : la topologie de l'onduleur triphasé a source divisée

Dans cette topologie, le principe consiste à intégrer un convertisseur boost DC-DC directement dans le pont onduleur.

Pour cela, une inductance de suralimentation (notée L) est placée au centre de chaque branche de l'ondeur triphasé (phases a, b et c).

Cette inductance est reliée à travers des diodes de conduction directe ($D1$, $D2$ et $D3$), qui permettent le transfert d'énergie et empêchent les retours de courant indésirables. Ce montage permet ainsi d'augmenter la tension de sortie au-delà de la tension d'entrée continue tout en assurant la conversion triphasée nécessaire à l'alimentation d'un moteur.

IV.2.1 Fonctionnement :

Le variateur de vitesse à source divisée triphasé (SSI) repose sur un pont onduleur classique utilisant les vecteurs de commutation (notés V_0 à V_7), représentés dans la Figure (IV.2), pour modéliser les états de fonctionnement de l'ondeur .

Dans cette architecture, les inductances (L) et les diodes visibles dans la Figure (IV.1) jouent un rôle essentiel : elles assurent l'élévation de la tension d'alimentation jusqu'à atteindre une tension continue plus élevée au niveau du condensateur de liaison (C_{dc}).

Ce principe permet de combiner les avantages du convertisseur boost et de l'ondeur triphasé, pour obtenir une commande efficace du moteur tout en optimisant l'utilisation de la source d'énergie continue.

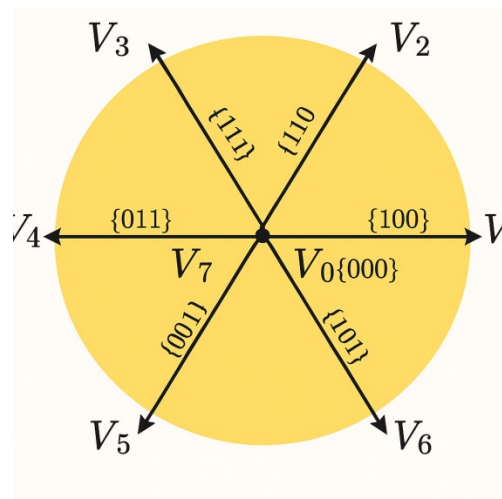


Figure (IV.2) : Vecteurs de tensions délivrés par l'ondeur SSI.

Dans le fonctionnement du SSI triphasé, les **vecteurs de commutation** V_0 à V_6 sont utilisés pour **charger** l'inductance d'entrée. À l'inverse, le **vecteur zéro** V_7 est employé pour **décharger l'énergie stockée** dans l'inductance vers le **condensateur** du circuit intermédiaire.

Les circuits équivalents correspondant aux modes de charge et de décharge de l'inductance sont présentés dans les figures (IV.3) et (IV.4)

Mode de charge de l'inductance :

Le mode de charge de l'inductance est activé en conduisant au moins un des interrupteurs inférieurs du pont de l'onduleur.

Dans cette configuration, la tension de sortie du côté continu devient nulle ($v_{inv} = 0$) en raison de la création d'un court-circuit, comme illustré dans la figure (III.3).

Par conséquent, le courant traverse l'inductance L , permettant ainsi l'accumulation d'énergie sous forme magnétique dans cette dernière.

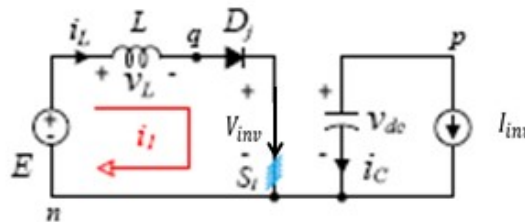


Figure (IV.3) : Charge de l'inductance via le états (V0-V6)

Mode de décharge de l'inductance :

Le mode de décharge intervient lorsque l'ensemble des interrupteurs supérieurs du pont de l'onduleur sont activés simultanément.

Dans cette situation, l'énergie stockée dans l'inductance L est transférée vers le condensateur du circuit continu (C_{dc}) via les diodes antiparallèles associées aux interrupteurs supérieurs.

Ainsi, la tension côté continu devient égale à la tension du condensateur ($v_{inv} = v_{dc}$), comme représenté dans la figure (III.4).

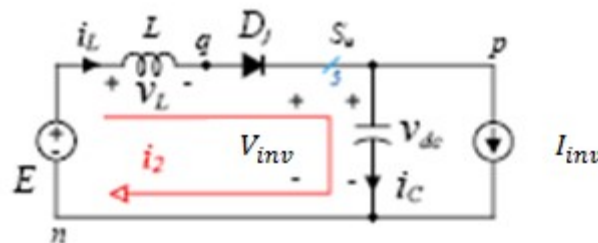


Figure (IV.4) : Décharge de l'inductance via l'état V7

L'alternance entre les **modes de charge et de décharge** de l'inductance L constitue le principe fondamental du fonctionnement du SSI triphasé.

En ajustant finement les temps de conduction des interrupteurs, il est possible de **contrôler la quantité d'énergie transférée** vers le condensateur C_{dc} , assurant ainsi une régulation efficace de la tension continue.

Ce mécanisme permet au SSI de combiner les avantages du **convertisseur boost** et de l'**onduleur triphasé**, garantissant une conversion énergétique dynamique et stable.

IV.2.2 Facteur de suralimentation et gain de tension alternative :

Le **facteur de suralimentation** représente le rapport entre la **tension du circuit intermédiaire** (v_{dc}), c'est-à-dire la tension aux bornes du condensateur, et la **tension d'alimentation** E fournie par une source comme une batterie.

Ce facteur, noté β , est donné par l'expression suivante :

$$\beta = \frac{1}{1-D_{av}} \quad (\text{IV.1})$$

où D_{av} correspond au rapport cyclique moyen pendant la phase de charge inductive sur une période complète de commutation T_{sw} .

Le gain de tension alternative de sortie, noté G , est alors exprimé par la relation :

$$G = \frac{V}{E} = \frac{\beta M}{2 \sin(\frac{\pi}{3}) \sin(\frac{\pi}{3})(1-D_{av})} \quad (\text{IV.2})$$

où :

- V_1 est l'amplitude de la composante fondamentale de la tension de phase de sortie,
- M est l'indice de modulation.

Ainsi, en contrôlant le rapport cyclique D_{av} et l'indice de modulation M , on peut ajuster efficacement la tension alternative délivrée à la charge.

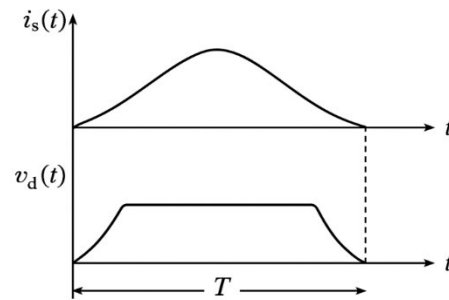
Symbole	Nom	Définition
E	Tension d'alimentation	Tension fournie par la source (batterie, etc.)
v_{dc}	Tension du circuit intermédiaire	Tension aux bornes du condensateur C_{dc}
D_{av}	Rapport cyclique moyen	Proportion du temps de charge inductive durant une période de commutation T_{sw}
β	Facteur de suralimentation	Rapport entre v_{dc} et E : $\beta = \frac{1}{1-D_{av}}$
M	Indice de modulation	Rapport entre la tension de commande et la tension de référence
V_1	Tension fondamentale de phase	Valeur maximale de la composante fondamentale de la tension alternative
G	Gain de tension alternative	Gain entre la tension de sortie et la tension d'alimentation

Tableau IV.1 : Résumé des paramètres principaux du variateur à source divisée

IV.2.3 Analyse des courants et tensions

Dans le variateur de vitesse à source divisée (SSI), les comportements des courants et des tensions dépendent fortement des états de commutation appliqués au pont onduleur.

- **Courant de la source (i_s)** : Il adopte une forme approximativement triangulaire. Pendant le **mode de charge inductive**, le courant augmente de façon linéaire, signe que l'énergie est absorbée par l'inductance d'entrée. En **mode de décharge**, ce courant diminue, traduisant le transfert d'énergie vers le condensateur du circuit intermédiaire.
- **Tension aux bornes de l'inductance (L)** : Lorsque l'on applique les vecteurs actifs de commutation (V_0 à V_6), une tension positive est générée à travers l'inductance, favorisant sa charge. Lorsque le vecteur nul V_7 est utilisé, la tension devient nulle ou négative, entraînant ainsi la décharge de l'inductance vers le condensateur C_{dc} .



Représentation temporelle de $i_s(t)$ et $v_{dc}(t)$ pendant un cycle de commutation

Figure (IV.5) : Graphe Représentation temporelle de $i_s(t)$ et $V_{dc}(t)$ pendant un cycle de commutation.

ce graphe est **cohérent avec le comportement attendu** dans un variateur de vitesse à source divisée (SSI) pendant un cycle de commutation :

- **$I_s(t)$** (courant de la source) suit une **forme triangulaire**, augmentant lors de la charge inductive et diminuant pendant la décharge.
- **$V_{dc}(t)$** (tension au condensateur) reste relativement **stable**, avec de légères ondulations dues aux phases de charge/décharge.

Ce type de graphe illustre bien les deux modes :

- **Phase ascendante de $I_s(t)$** correspond à l'application d'un vecteur actif V_0 à V_6 (mode de charge).
- **Phase descendante** : correspond à l'application du vecteur nul V_7 (décharge vers C_{dc}).

IV.2.4 Rendement et pertes :

Le rendement du SSI est conditionné par diverses pertes, qui peuvent être classées comme suit:

- **Pertes dans l'inductance** : Résistives (effet Joule) et magnétiques (pertes par hystérésis et courants de Foucault).
- **Pertes dans les interrupteurs** : Conduction et commutation dans les transistors IGBT ou MOSFET.
- **Pertes dans les diodes** : Chute de tension directe et recouvrement inverse.

Le rendement global est donné par :

$$\eta = \frac{P_{sortie}}{P_{entrée}} = \frac{V_1 \cdot I_{charge}}{E \cdot i_s} \quad (IV.3)$$

IV.2.5 Avantages et limitations du SSI

Avantages :

- Fonction boost intégrée, sans convertisseur séparé.
- Réduction des composants passifs.
- Idéal pour les applications à alimentation continue (batteries, panneaux solaires).

Limitations :

- Complexité accrue de la commande.
- Sensibilité aux caractéristiques de l'inductance et du condensateur.
- Rendement plus faible à faible charge.

Avantages	Limitations
Surélévation de tension intégrée	Algorithme de commande plus complexe
Réduction des composants	Rendement variable selon la charge
Compatible avec sources DC	Forte dépendance aux composants passifs

Tableau (IV.2) : Avantages et limitations du SSI

IV.2.6 Facteur de suralimentation et gain de tension alternative :

Le **facteur d'amplification** β est défini comme le rapport entre la tension du condensateur intermédiaire V_{dc} et la tension d'alimentation continue E :

$$\beta = \frac{1}{1-D_{av}} \quad (IV.4)$$

avec :

- D_{av} : rapport cyclique moyen pendant la phase de charge inductive
- T_{sw} : période de commutation

Le **gain de tension alternative** G s'écrit :

$$G = \frac{V_1}{E} = \frac{\beta M}{2 \sin\left(\frac{\pi}{3}\right)(1-D_{av})} \quad (IV.5)$$

où :

- V_1 : valeur maximale de la composante fondamentale de la tension de phase
- M : indice de modulation
- Graphe : variation de V_{dc} en fonction de D_{av}

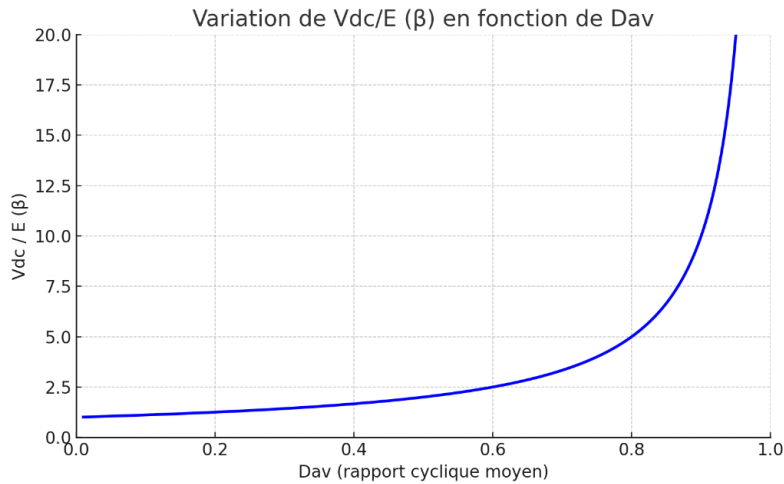


Figure (IV.6) : graphe représentant la variation de $V_{dc}/E=\beta$ en fonction de D_{av}

Ce graphe illustre bien comment la tension intermédiaire V_{dc} augmente de manière non linéaire lorsque D_{av} approche de 1, conformément à la formule $\beta = \frac{1}{1-D_{av}}$ (IV.6)

IV.2.7 Conclusion

Ce chapitre a exploré en profondeur les caractéristiques du variateur à source divisée (SSI). L'étude des régimes de charge et de décharge, des courants et tensions, des performances énergétiques, ainsi que des stratégies de modulation permet de mieux comprendre son comportement dynamique. Cette analyse théorique prépare le terrain aux simulations numériques et à l'évaluation expérimentale présentées dans le chapitre suivant.

IV.3 Commande d'un variateur de vitesse par IA

Introduction

Un variateur de vitesse par IA est un système qui ajuste la vitesse d'un moteur en fonction des besoins d'une application spécifique, en utilisant des techniques d'intelligence artificielle pour améliorer l'efficacité et la réactivité.

IV.3.1 Architecture du Système

Le système se compose des éléments suivants :

- **Moteur électrique** (ex. : Moteur asynchrone, moteur à courant continu).
- **Variateur de vitesse** (onduleur MLI pour les moteurs AC/DC).
- **Capteurs** (courant, tension, vitesse, température).
- **Unité de traitement (CPU/GPU)** pour l'IA.
- **Algorithme d'IA** (Réseaux de neurones, logique floue, renforcement learning).

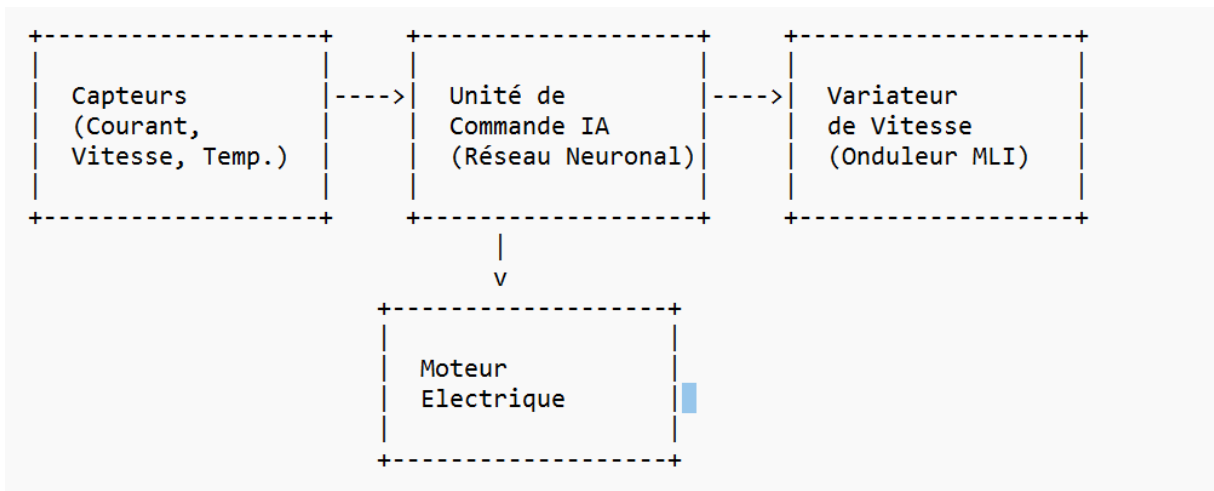


Figure (IV.7) : Architecture globale

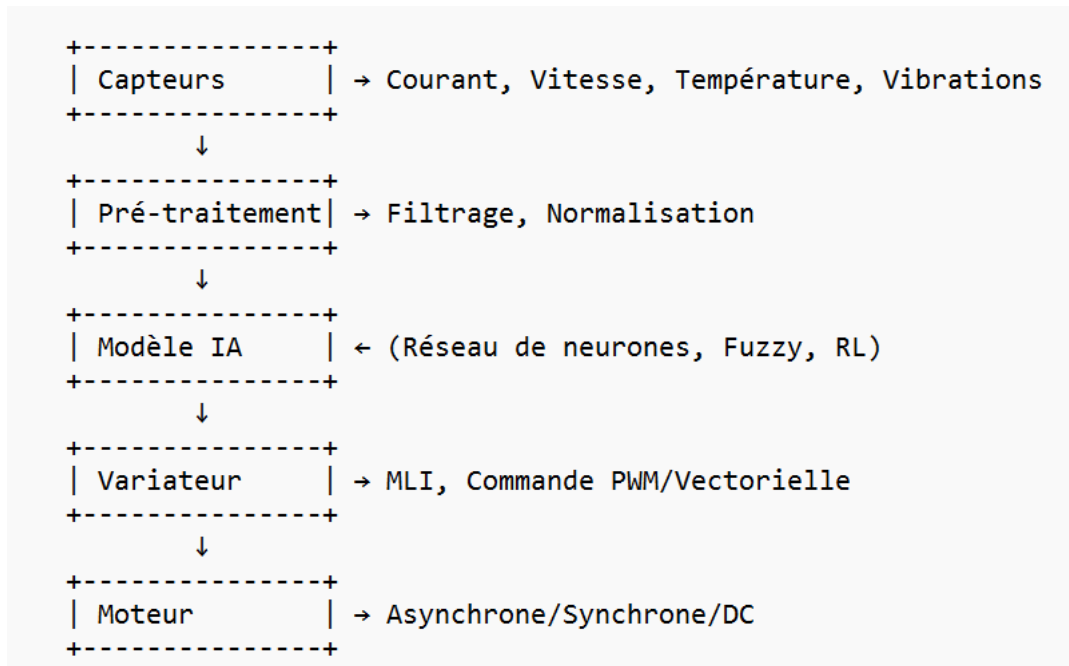


Figure (IV.7) : Boucle de Commande Intelligente

IV.3.2. Techniques d'IA Appliquées aux Variateurs

IV.3.2.1 Réseaux de Neurones Profonds (Deep Learning)

- **Application** : Prédiction du couple et régulation de vitesse.
- **Structure** :
 - **Entrées** : Tension, courant, vitesse mesurée.
 - **Couches cachées** : LSTM (pour séries temporelles) ou CNN.
 - **Sortie** : Fréquence PWM optimale.

IV.3.2.2 Logique Floue (Fuzzy Logic)

- **Avantage** : Tolérance aux imprécisions des capteurs.
- **Règles typiques** :
 - **SI** vitesse trop basse **ET** courant élevé → **ALORS** augmenter fréquence.
 - **SI** température haute → **ALORS** réduire coup

IV.3.2.3 Reinforcement Learning (RL)

- **Algorithme** : DDPG (Deep Deterministic Policy Gradient) pour contrôle continu.
- **Récompense** :

$$R_t = \sum_{K=0}^{\infty} \gamma^K \cdot r_{t+K} + K + 1 \quad (\text{IV.7})$$

IV.3.3 Implémentation Pratique

IV.3.3.1 Matériel Requis

Composant	Exemple
Microcontrôleur	STM32H7 , NVIDIA Jetson
Capteurs	Encodeur , CT , PT100
Variateur	Siemens SINAMICS, ABB ACS880

Tableau (IV.3) : Matériel Requis

IV.3.3.2 Flux de Déploiement

1. **Collecte de données** : Enregistrer vitesse/courant sous différentes charges.
2. **Entraînement hors-ligne** : Sur PC/Cloud avec TensorFlow/PyTorch.
3. **Déploiement embarqué** : Conversion en TensorFlow Lite/CUBE.AI.

IV.3.3.3 Comparaison IA vs PID Classique

Critère	PID	IA(Neuro-Floue)
Précision	Moyenne	Élevée
Robustesse	Faible	Forte
Temps de calcul	Rapide	Modéré

Tableau (IV.4) : Comparaison IA vs PID Classique

IV.3.4 Conclusion

L'intégration de l'IA représente une avancée majeure pour les variateurs modernes, à condition d'en maîtriser les exigences techniques. Cette technologie ouvre la voie à une nouvelle génération de systèmes électriques plus performants et durables.

Conclusion Générale

Dans ce mémoire, nous avons mené une étude approfondie sur le **variateur de vitesse à source divisée**, en tant que solution efficace pour le contrôle des moteurs asynchrones triphasés dans les systèmes industriels modernes. Ce type de variateur, basé sur une architecture d'onduleur innovante, permet de générer des tensions alternatives modulées tout en garantissant une meilleure stabilité, un rendement énergétique élevé et une réduction des pertes.

Nous avons commencé par une présentation des principes de base des variateurs de vitesse, suivie d'une classification détaillée des onduleurs, avec une attention particulière portée aux onduleurs autonomes de tension (VSI). La **modélisation mathématique** de l'onduleur monophasé, puis triphasé, nous a permis de mieux comprendre leur comportement dynamique et leur fonctionnement en temps réel.

Par la suite, nous avons mis en œuvre une **simulation sous MATLAB/Simulink**, validant ainsi la précision des modèles développés et leur efficacité en condition réelle. Les résultats ont démontré que la commande par signal MLI et la commande à 120° sont parfaitement adaptées pour piloter les moteurs de manière stable et performante.

Enfin, nous avons exploré les apports de l'**intelligence artificielle** dans la commande des variateurs, en soulignant les avantages des approches basées sur les réseaux de neurones, la logique floue et l'apprentissage par renforcement, qui permettent d'améliorer l'adaptabilité et la précision des systèmes de commande.

En conclusion, l'intégration des variateurs à source divisée, associée aux techniques avancées de commande, représente une **voie prometteuse pour le futur de l'automatisation industrielle**, en répondant aux exigences de performance, de fiabilité et d'efficacité énergétique.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **SEGUIER, G. et NOTELET, F.** (2004). *Électrotechnique industrielle*. 2ème édition, Dunod, Paris.
- [2] **LESENNE, J., NOTELET, F. et SEGUIER, G.** (2007). *Introduction à l'électrotechnique approfondie*. Technique et Documentation, Paris.
- [3] **LOUIS, J.P.** (2004). *Modèles pour la commande des actionneurs électriques*. Hermès Science Publications, Paris.
- [4] **CANUDAS DE WIT, C.** (2000). *Modélisation, commande vectorielle et DTC*. Hermès Science Publications, Paris.
- [5] **BOSE, B.K.** (2006). *Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends*. Academic Press, Burlington.
- [6] **MOHAN, N., UNDELAND, T.M. et ROBBINS, W.P.** (2003). *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. 3ème édition, John Wiley & Sons, New York.
- [7] **TRZYNADLOWSKI, A.M.** (2001). *Introduction to Modern Power Electronics*. 2ème édition, John Wiley & Sons, New York.
- [8] **KRAUSE, P.C., WASYNCZUK, O. et SUDHOFF, S.D.** (2002). *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*. 2ème édition, IEEE Press, New York.

Articles de Journaux et Revues

- [9] **RODRIGUEZ, J., LAI, J.S. et PENG, F.Z.** (2002). "Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 49, No. 4, pp. 724-738.
- [10] **KOURO, S., MALINOWSKI, M., GOPAKUMAR, K., POU, J., FRANQUELO, L.G., WU, B., RODRIGUEZ, J., PÉREZ, M.A. et LEON, J.I.** (2010). "Recent advances and industrial applications of multilevel converters". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 57, No. 8, pp. 2553-2580.
- [11] **BLASCHKE, F.** (1972). "The principle of field orientation as applied to the new transvector closed-loop control system for rotating-field machines". *Siemens Review*, Vol. 39, No. 5, pp. 217-220.
- [12] **TAKAHASHI, I. et NOGUCHI, T.** (1986). "A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor". *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. IA-22, No. 5, pp. 820-827.

Thèses et Mémoires

- [13] . **Falek.O , Ait Abderrahmane.B.** Etude et Réalisation d'un Variateur de Vitesse pour Moteurs Asynchrone [mémoire de Master Spécialité : Commandes Electriques]. khenchela 2024.

[13] **MERABET, H.** (2018). *Contribution à l'étude et à la commande des machines électriques alimentées par des convertisseurs multiniveaux*. Thèse de Doctorat, Université de Batna 2, Algérie.

[14] **BOUDJEMA, Z.** (2017). *Commande robuste d'un moteur asynchrone*. Thèse de Doctorat, Université de Djelfa, Algérie.

[15] **LARBI, K.** (2019). *Étude et simulation des variateurs de vitesse pour moteurs asynchrones*. Mémoire de Master, École Nationale Polytechnique, Alger.

Conférences et Communications

[16] **PENG, F.Z.** (2001). "Z-source inverter". *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 39, No. 2, pp. 504-510.

[17] **ANDERSON, J. et PENG, F.Z.** (2008). "Four quasi-Z-Source inverters". *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Rhodes, Greece, pp. 2743-2749.

[18] **GAJANAYAKE, C.J., VILATHGAMUWA, D.M. et LOH, P.C.** (2007). "Development of a comprehensive model and a multiloop controller for Z-source inverter DG systems". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 54, No. 4, pp. 2352-2359.

Documentation Technique

[19] **SCHNEIDER ELECTRIC** (2020). *Guide de mise en œuvre - Variateurs de vitesse Altivar Process ATV600*. Documentation technique, Schneider Electric.

[20] **SCHNEIDER ELECTRIC** (2021). *Manuel utilisateur SoMove - Logiciel de configuration et maintenance*. Version 2.8, Schneider Electric.

[21] **ABB** (2019). *Technical Guide No. 1 - Direct Torque Control - The world's most advanced AC drive technology*. ABB Automation Products.

[22] **SIEMENS** (2020). *SINAMICS - Convertisseurs pour applications d'entraînement*. Catalogue technique, Siemens AG.

Standards et Normes

[23] **IEC 60034-1** (2017). *Machines électriques tournantes - Partie 1: Caractéristiques assignées et caractéristiques de fonctionnement*. Commission Électrotechnique Internationale.

[24] **IEC 61800-2** (2015). *Entraînements électriques de puissance à vitesse variable - Partie 2: Exigences générales - Spécifications des interfaces c.a. de puissance d'entrée basse tension*. Commission Électrotechnique Internationale.

[25] **IEEE 519** (2014). *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. Institute of Electrical and Electronics Engineers.

Sites Web et Ressources En Ligne

[26] **MACHINEPOINT** (2021). "Variateurs de fréquence : Principe de fonctionnement et applications". [En ligne]. Disponible sur : <https://www.machinepoint.com/fr/variateurs-de-frequence/>

[27] **ELECTRICAL4U** (2022). "Induction Motor Speed Control Methods". [En ligne]. Disponible sur : <https://www.electrical4u.com/speed-control-of-induction-motor/>

Références Spécifiques aux Onduleurs à Source Divisée

[28] **PENG, F.Z., YUAN, X., FANG, X. et QIAN, Z.** (2003). "Z-source inverter for adjustable speed drives". *IEEE Power Electronics Letters*, Vol. 1, No. 2, pp. 33-35.

[29] **QIAN, Z., PENG, F.Z., CHA, H. et TOLBERT, L.M.** (2005). "55-kW variable speed drive system based on Z-source inverter". *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 41, No. 4, pp. 1090-1097.

[30] **SHEN, M., WANG, J., JOSEPH, A., PENG, F.Z., TOLBERT, L.M. et ADAMS, D.J.** (2006). "Constant boost control of the Z-source inverter to minimize current ripple and voltage stress". *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 42, No. 3, pp. 770-778.