

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté de Technologie
Département Génie Mécanique

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en :

Filière : Electromécanique
Spécialité : Mécatronique

THEME

**Etude de la variation de vitesse d'un alternateur commandé à
base d'une MLI**

Présenté par :

Djamel

Kardache Anfel

Saigh Samy

Promoteur : Mr. Benazzouz

Promotion 2020- 2021

Remerciements

Nous remercions avant tout Dieu de nous avoir donné la volonté et le courage pour réaliser ce modeste travail mené à la centrale de RasDjinet 2 de Boumèrdes.

Monsieur Djamel Benazzouz, professeur à la faculté de technologie de Boumèrdes, pour avoir encadré notre travail.

Nous le remercions d' avoir accepté notre projet et de nous avoir prodigué tous les conseils indispensables. Nous le remercions aussi d'avoir suivi, guidé soutenu notre travail.

Nous tenons à remercier Monsieur KARAALI Abdlghani, de nous avoir accueilli au sein de l'entreprise.

Ses conseils précieux, son intérêt envers notre sujet, pour le temps qu'il nous a consacré et son inestimable soutien, sans oublier l'ensemble du personnel et opérateur de la société.

Nous le remercions le Jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de juger notre travail. Les remerciements ne seraient rien sans une mention particulière pour mes collègues de la promotion " Mécatronique". Pour mes amis de longues dates, merci pour tous les moments qu'on a passés ensemble.

Nous remercions toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail, avec une mention très spéciale pour nos parents , frères et sœurs et Hicham.

Résumé

Ce mémoire porte sur l'étude de la variation de vitesse, de la machine synchrone à pôles lisses alimenté par un onduleur triphasé commande par modulation de largeur d'impulsions MLI.

Pour se faire on a suivi les étapes suivantes :

- Présentation de la machine synchrone.
- Rappels sur les onduleurs de tensions.
- Présentation de la commande de modulation de largeur d'impulsion et ses composants.
- Modélisation de la machine synchrone à pôles lisses en utilisant la transformée de Park.
- Simulation sur Simulink de l'onduleur à commande MLI et de la machine synchrone.
- Interprétations des graphes obtenus et des résultats.

SOMMAIRE

SOMMAIRE

Remercimen	
Résume	
SOMMAIRE	
Liste des figures	
Nomenclature	
Introduction Generale	1
Chapitre I : Présentation et principe de fonctionnement de la centrale	
Introduction.....	3
I-1 Présentation de la centrale thermique à cycle combiné de Ras djinet.....	3
I-2 Principe de fonctionnement d'une centrale à cycle combiné	4
I-3 Organigramme des auxiliaires	5
I-4 Organigramme des modules	6
Conclusion	6
Chapitre II : Généralités	
Introduction.....	7
II-1 Générateur	7
II-1-1 Introduction et fonctionnement	7
II-1-2 Types de rotor.....	10
II-1-3 Excitation de la machine synchrone	12
II-1-4 Refroidissement de la machine.....	12
II-2 Rappel sur les semi-conducteurs de puissance	12
II-2-1 Diodes	13
II-2-2 Thyristors	14
II-2-3 Thyristors GTO.....	16
II-2-4 Transistors	17
II-2-5 Transistor bipolaire	17
II-2-6 Transistor NPN polarisé.....	19
II-2-7 Transistor à effet de champs (FET)	20
II-2-8 Transistor Mosfet :.....	20
II-2-9 Transistor IGBT.....	22
II-2-10 Choix des composants.....	22
II-3 Différents type d'alimentation.....	23
II-3-1 Alimentation par commutateur de courant.....	23
II-3-2 Alimentation par onduleur de tension.....	24
II-4 Onduleurs de tension.....	25
II-4-1 Principe de fonctionnement.....	25
II-4-2 Structure	27

II-4-3 Différents types de commande des onduleurs.....	28
II-5 Commande MLI.....	28
II-5-1 Modulations sinus-triangle.....	29
II-5-2 Modulation vectorielle.....	29
II-5-3 Modulations précalculées.....	30
Conclusion.....	30
Chapitre III : Modélisation de la machine synchrone	
Introduction.....	31
III-1 Modélisation de la machine synchrone à pôles lisses.....	31
III-1-2 Hypothèses simplificatrices.....	31
III-1-3 Définition des axes.....	31
III-2 Equation électrique et magnétique de la machine dans les axes ABC.....	32
III-2-1 Equations électriques.....	32
III-2-2 Equations magnétiques.....	33
III-2-3 Equation mécanique.....	34
III-3 Equations dans les deux axes d et q.....	35
III-3-1 Transformation de Park.....	35
III-3-2 Etablissement des équations électriques dans les axes dq.....	36
III-3-3 Etablissement des équations magnétique dans les axes dq.....	37
III-3-4 Etablissement des équations mécanique dans les axes dq :.....	37
Conclusion.....	37
Chapitre VI : Simulation	
Introduction.....	39
IV-1 Onduleur.....	39
IV-1-1 Description du schéma.....	39
IV-2 Commande MLI.....	40
IV-2-1 Description du schéma.....	40
IV-2-2 Description du schéma.....	41
IV-2 Association Onduleur / MLI.....	41
IV-3 Résultats de la simulation.....	43
IV-4 Machine Synchrone.....	46
IV-4-1 Description du schéma.....	47
IV-4-2 Résultats des graphes.....	49
IV-4-3 Interprétation des résultats.....	51
Conclusion.....	51
CONCLUSION GENERALE	
52	
Bibliographie	
Annexes	

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: centrale de cap djinet vu satellite.....	3
Figure 1.2 : composition d'un module	4
Figure 2.1 : rotor machine asynchrone a poles lisses	8
Figure 2.2 : coupe stator	8
Figure 2.3: vue globale stator	9
Figure 2.4: rotor a poles saillants	10
Figure 2.5: rotor a poles lisses.	11
Figure 2.6: rotor a aimants permanents.	11
Figure 2.7: representation d'une diode	13
Figure 2.8: l'anode et la cathode	13
Figure 2.9: caracteristiques statiques de la diode	14
Figure 2.10: thyristor modelise pas deux transistor pnp npn	14
Figure 2.11: representation d'un thyristor	15
Figure 2.12: caracteristique d'un thyristor	16
Figure 2.13: fonctionnement d'un thyristor gto	17
Figure 2.14: representation symbolique des deux types de transistor bipolaire pnp et npn.	18
Figure 2.15: symboles tensions et courants	18
Figure 2.16: transistor npn polarise	19
Figure 2.17: transistor a effet de champs	20
Figure 2.18: representation d'un transistor mosfet a canal p et a canal n.	21
Figure 2.19: mosfet canal n et p	21
Figure 2.20: symbol transistor igbt	22
Figure 2.21: choix des composants selon la puissance et la frequence	23
Figure 2.22: schema d'alimentation par commutateur de courant.	24
Figure 2.23: alimentation par onduleur de tension	24
Figure 2.24: schema fonctionnel d'un onduleur monophasé.	25
Figure 2.25: tension et courant a la sortie de l'onduleur (cas d'une charge resistive)	27
Figure 2.26: onduleur de tension triphase.	28
Figure 2.27: mli en utilisant la modulation sinus triangle.	29
Figure 4 1 schema bloc onduleur triphase.	39
Figure 4.2: schema blocs de la commande mli.	40
Figure 4.3: schema blocs de la comparaison des signaux.	41
Figure 4.4: schema blocs onduleur a commande mli.	42
Figure 4.5: (a) signal porteuse + modulatrice / (b) signal mli.	43
Figure 4.6: signal sortie de l'onduleur v_{abc}	43
Figure 4.7: courants a la sortie de l'onduleur i_{abc} .	44
Figure 4.8: schema bloc de la machine synchrone	46
Figure 4.9: schema bloc de la transformation de park	48
Figure 4.10: vitesse sans charge	49
Figure 4.11: vitesse avec charge de 20 n.m	49
Figure 4.12: courant sans charge	50
Figure 4.13: courants avec charge	50

Nomenclature

MLI :	Modulation de largeur d'impulsion
Ω :	La vitesse de rotation de la machine
P :	Nombre de paires de pole
ω :	La pulsation des courants statorique
f :	Fréquence
GTO:	Gate turn-off
BJT:	Transistor bipolaire
Mosfet :	Transistor à effet de champ à semi-conducteur
IGBT:	Transistor bipolaire a grille isolée
U_A:	Tension anode
U_B:	Tension cathode
U_{seuil} :	Tension seuil
V_{ak} :	Tension entre l'anode et la cathode du thyristor
V_{gk} :	Tension entre la gâchette et la cathode
I_{gk}:	Courant considéré comme positif lorsque traversant le thyristor de l'anode vers la cathode
I_H :	Courant de maintien
I_E :	Courant dans l'émetteur
I_B :	Courant de base
I_c :	Courant dans le collecteur
M_{ss} :	Mutuelle statorique
M_{sf} :	Mutuelle stator-rotor
R_f :	Résistance rotorique
R_s :	Résistance statorique
J :	Moment d'inertie
C_{em} :	Couple électromagnétique
C_r :	Couple résistant
θ_{mec} :	Angle mécanique
θ_{elec} :	Angle électrique
f_p :	La fréquence commutation
f :	La fréquence de grandeur de sortie
m :	L'indice de modulation
r :	Le coefficient de réglage en tension
F :	Le coefficient de fréquence
ω_r :	La pulsation mécanique
ω :	La pulsation électrique

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale

On définit le progrès comme le passage à un état supérieur, importe le domaine, l'être humain est en perpétuel évolution, en recherche de développement. Une course sans fin vers l'amélioration, notamment dans le domaine de l'industrie, pilier majeur de l'avancement d'un pays.

Désormais la machine électrique occupe une place prépondérante, et équipe la majeure partie des systèmes d'entraînements à vitesse variable. Tant dans la vie professionnelle et industrielle, que dans la vie de tous les jours. On a par ailleurs vu une apparition massive de ces machines dans les transports guidés tels que les trains, métro et autre TGV. Un intérêt notamment justifié par la pleine expansion de leurs performances : Des matériaux plus performant et plus en adéquation avec leurs utilisations, ou encore des composants plus efficient tel que les semi-conducteurs, circuits intégrés et les convertisseurs. Convertisseurs oh combien important car associé aux machines électriques, ils jouent un rôle majeur dans la conversion électromécanique de l'énergie.

Bien que la plus ancienne, et Jusqu'à un passé récent, les machines à courant continue (MCC) ont été principalement utilisées dans les entraînements à vitesses variables, Grace à sa simplicité de fonctionnement et de modélisation. Néanmoins, en plus de sa fragilité due à une construction délicate, la machine à courant continue présente un inconvénient majeur : le système balai collecteur qui nécessite une maintenance fréquente, limite la puissance et la vitesse maximale de la M.C.C.

C'est pourquoi, pour le bien de la recherche et le développement dans le domaine de l'ingénierie, on a eu intérêt à utiliser la machine électrique à courant alternatif, écartant ainsi les inconvénients de la M.C.C.

L'apparition des machines synchrones à courant alternatif a joué un rôle crucial dans l'évolution des systèmes électriques, en leur ouvrant de nouvelles opportunités grâce à leurs caractéristiques de fonctionnement. Considérée comme étant de construction très simple et robuste, les machines synchrones ne nécessitent pas un entretien fréquent, sont opérationnelle même dans des conditions difficiles et à des puissances élevées en garantissant un bon rendement.

Problématique :

Cependant, la machine synchrone utilisée pour cette conversion pose certains problèmes lors de son fonctionnement en mode moteur tel que :

- Risque de décrochage.
- La machine ne démarre pas sans artifice.
- Le moment du couple n'a de valeur moyenne non nulle que si le rotor tourne parfaitement à la vitesse du champ tournant.

Solution envisagée :

Dans le domaine de la propulsion électrique, la machine synchrone associée à des convertisseurs statiques occupe une place importante. En effet, le premier variateur de vitesse fut réalisé par une machine synchrone alimentée par des cyclo-convertisseurs. Ces convertisseurs ont peu à peu laissés place à une nouvelle structure composée par l'ensemble redresseur-commutateur de courant quel que soit le convertisseur employé. La gamme de la puissance pouvant dépassée la dizaine de mégawatts, les composantes semi-conductrices sont de type thyristors. L'alimentation de la machine par des commutateurs de courant engendre des courants harmoniques qui rendent le couple électromagnétique généré par l'actionneur non nul. D'autre part, il a également, été envisagé d'associer un filtre actif à l'ensemble commutateurs de courant-machine synchrone afin de minimiser les courants harmoniques vus par la machine.

Aujourd'hui, grâce à la fulgurante évolution des composants électroniques, de nouvelles structures peuvent être étudiées. Cette évolution s'étend à la fois dans le domaine de l'électronique de puissance, avec le développement de composants semi-conducteurs de grande puissance commutant à des fréquences élevées, et donc le domaine de l'informatique industriel avec l'apparition des nouvelles générations de processeurs autorisant l'implantation d'algorithmes complexes. Ainsi il est maintenant envisagé d'alimenter une machine synchrone à inducteur bobiné par un onduleur de tension commandée par modulation de largeur d'impulsions (MLI) par la stratégie triangulo-sinusoidal. Cette nouvelle association de convertisseurs machines synchrones obtient des performances dynamiques comparables à celles d'une machine à courant continu les inconvénients de la MCC en moins.

Désormais l'utilité des actionneurs électroniques en tant que variateur de vitesse est incontestable dans le secteur industriel et de transport, que ce soit pour de faible ou de forte puissance.

Plan de travail :

Ce travail est reparti en (04) quatre chapitres :

1. Le premier chapitre traite de la présentation de la société nationale d'électricité et de gaz SONELGAZ, plus précisément du lieu de notre stage à savoir la centrale à cycle combiné Ras Djinet II.
2. Le deuxième chapitre traite des généralités et du fonctionnement de la machine synchrone à bobine lisse (semblable à celle présente au sein de la centrale), ainsi que, l'onduleur commandé grâce au système MLI.
3. Le troisième chapitre est consacré à la modélisation des systèmes utilisés onduleur triphasé et de la machine synchrone.
4. Le quatrième chapitre est réservé à la simulation. On a utilisé SIMULINK de façon indépendante (onduleur seul et machine seule), pour ensuite procéder au couplage des deux systèmes, ainsi que, les explications et conclusions relatifs à chaque résultat..

Chapitre I : Présentation et principe de fonctionnement de la centrale

Introduction

La société nationale Sonelgaz est l'opérateur historique dans le domaine des fournitures des énergies électriques et gazières en Algérie.

Créer en 1969, à partir de l'ancienne société Public d'Electricité et du gaz d'Algérie (EGA), la Sonelgaz veille depuis plus un demi-siècle à répondre à être au service des besoins du citoyen algérien lui apportant cette source énergétique essentielle à la vie quotidienne (taux de couverture en électricité en Algérie et à **98%** pour 10 494 000 clients et un taux de pénétration du gaz à **65%** pour 6 451 000 clients).

En 2004, Sonelgaz se hisse en tête de liste des investisseurs nationaux et s'impose comme un acteur majeur du développement national. En conséquence, elle adopte une organisation de Groupe industriel par la transformation en filiales de ses entités en charge des métiers de base : - Production d'Electricité (SPE), Transport d'Electricité (GRTE), Conduite du Système Electrique (OS), Transport du Gaz (GRTG), pour comptabiliser de nos jours près de **21** sociétés.

I-1 Présentation de la centrale thermique à cycle combiné de Ras djinet

La centrale de Cap-Djinet est située au bord de la mer près de la ville de Cap-Djinet dans la wilaya de Boumerdès à 75 km à l'est d'Alger. Elle occupe une superficie de 18 hectares.

La Centrale de Cap Djinet est formée de trois turbines fonctionnant en cycle combiné (30% vapeur et 70 % gaz), dotée chacune d'une capacité de production de 400 MW/h d'électricité/Heure, soit un total de 1113MW/h pour les trois.

La première turbine est entrée en production en mai 2018, la 2ème au mois d'octobre 2018 et la 3ème mi 2019.

L'infrastructure est, par ailleurs, équipée de nombreux systèmes "amis de l'environnement", dont particulièrement celui du dessalement de l'eau de mer exploitée dans la production de la vapeur, et la production d'hydrogène exploité dans le refroidissement des générateurs électriques.



Figure 1.1: Centrale de cap Djinet vu satellite

Chapitre I : Présentation et principe de fonctionnement de la centrale

I-2 Principe de fonctionnement d'une centrale à cycle combiné

Centrale à cycle combiné Généralement appelée CCGT (Combined Cycle Gas Turbine (en)), est une centrale thermique qui associe deux types de turbines, une turbine à combustion et une turbine à vapeur.

Chacune de ces turbines entraîne une génératrice qui produit de l'électricité (Configuration "multi-shaft") ou les deux types de turbines sont couplées à la même génératrice (configuration "single-shaft").

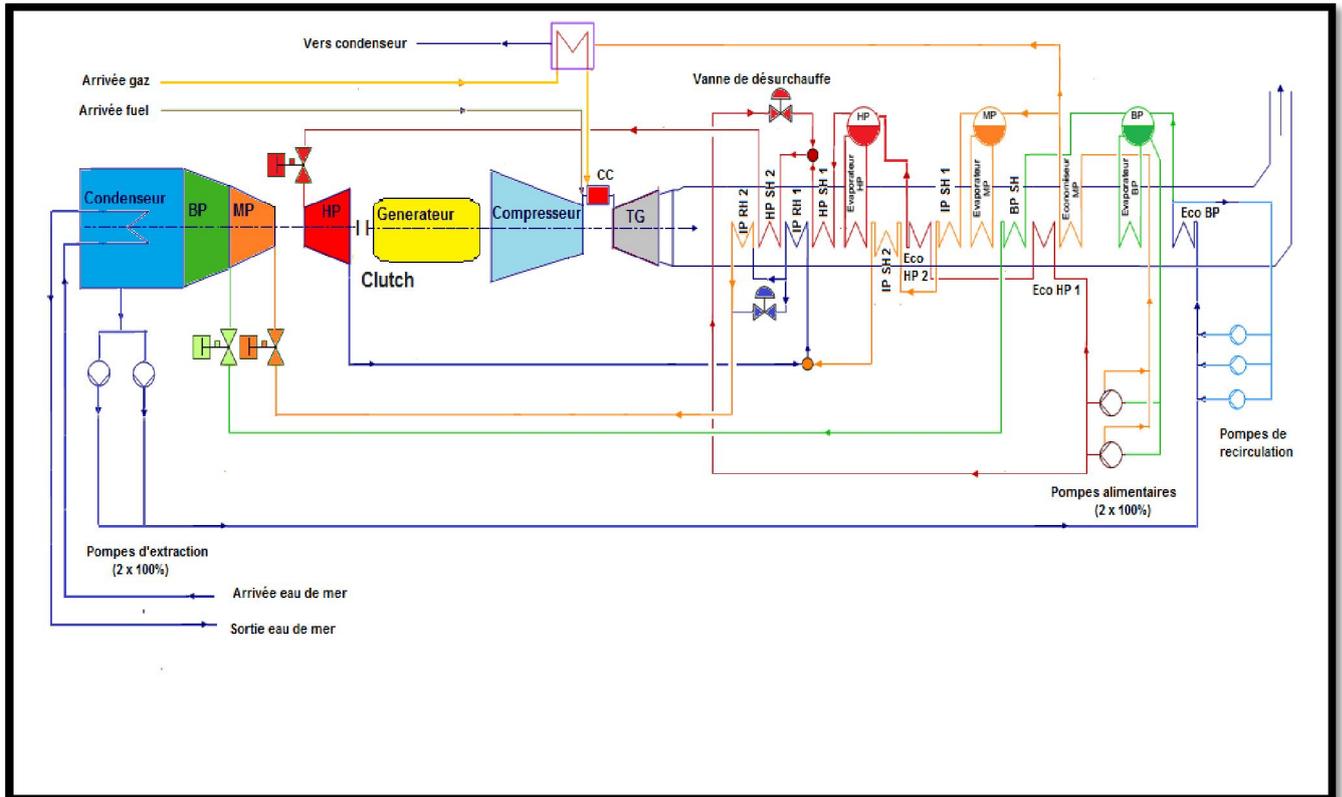
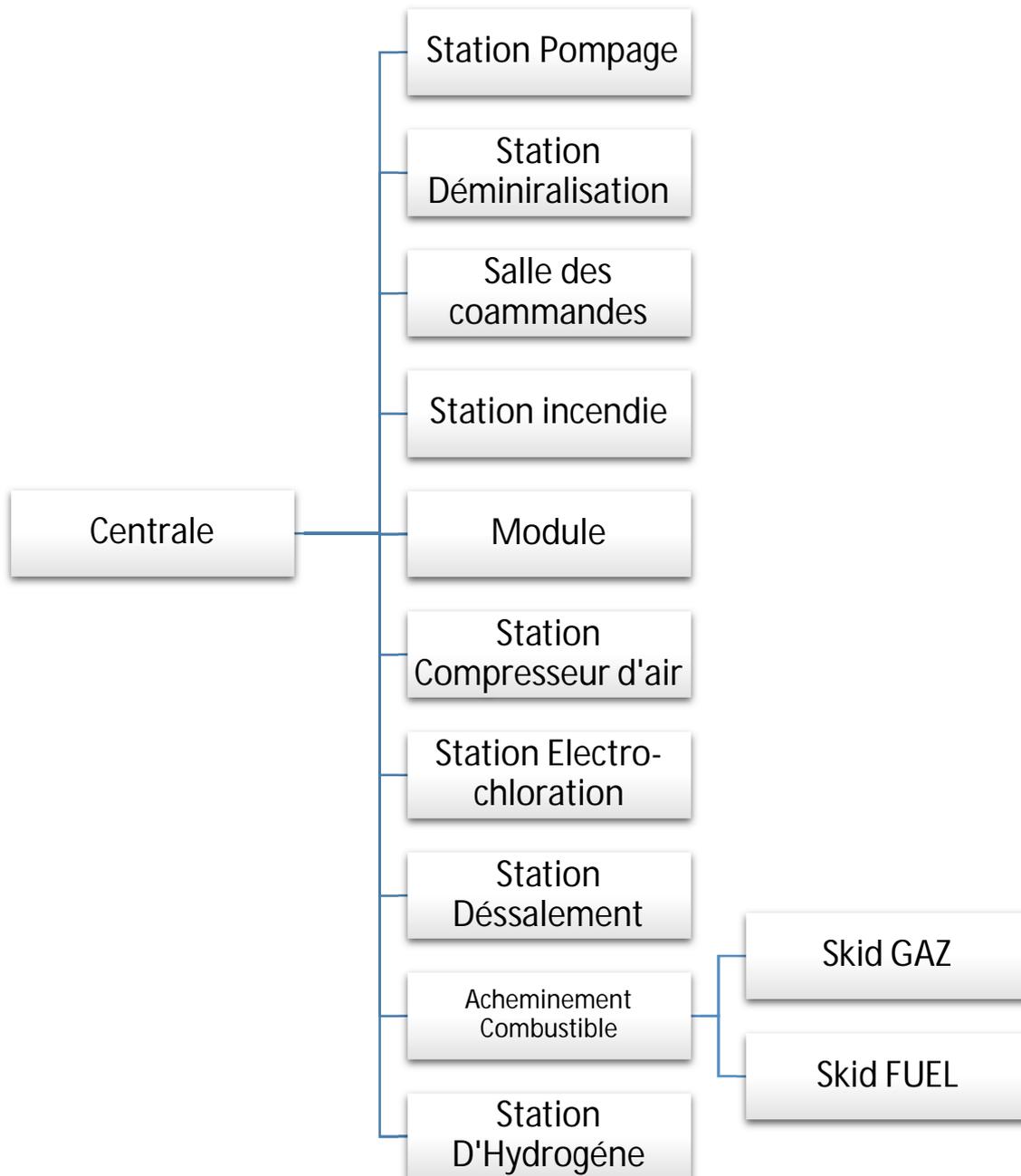


Figure 1.2 :Composition d'un module[1]

I-3 Organigramme des auxiliaires

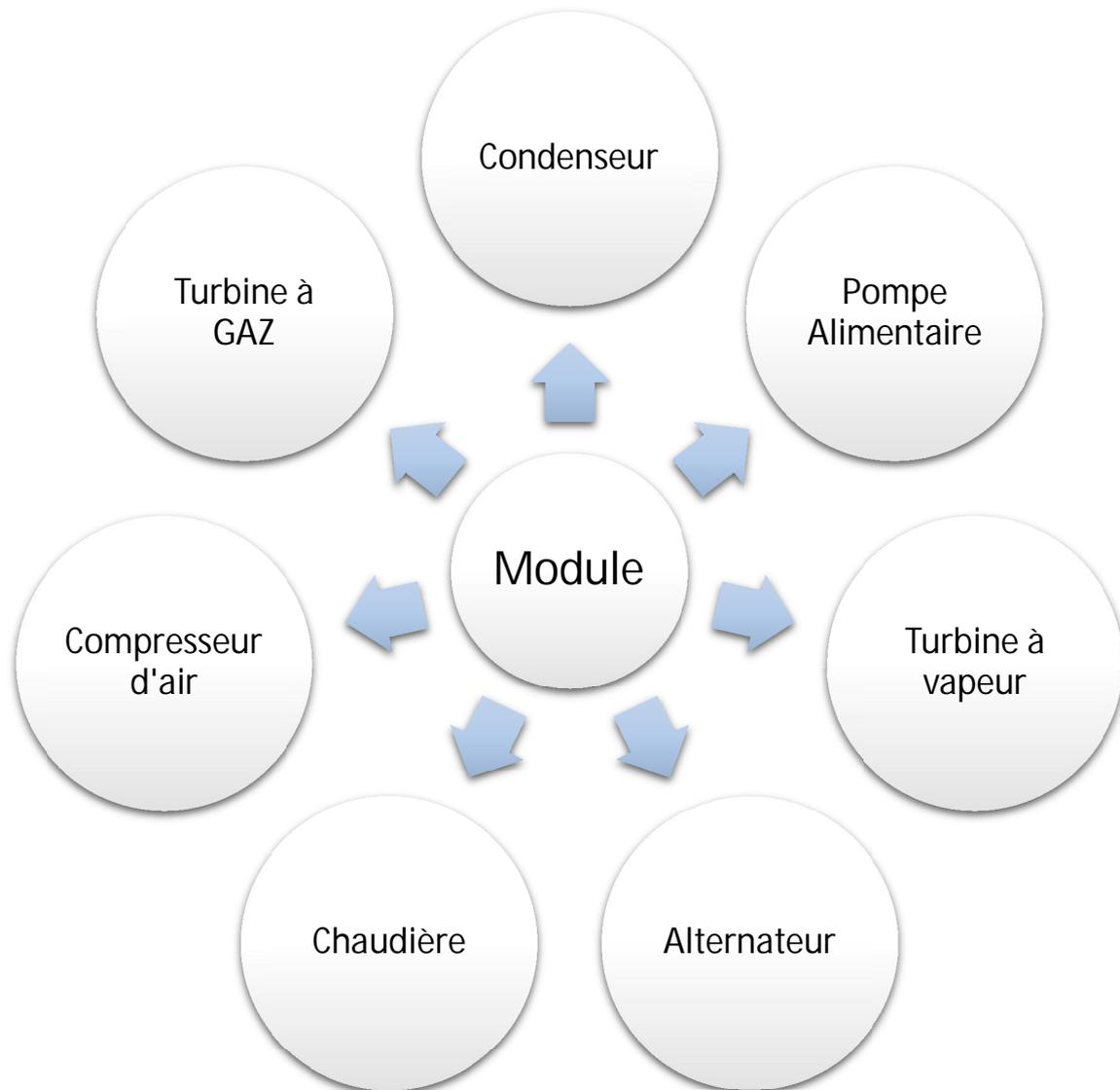
La centrale dispose de plusieurs auxiliaires nécessaire à son bon fonctionnement, directement présent sur le site, on retrouve :



Organigramme récapitulatif des différentes auxiliaires de la centrale.[1]

I-4 Organigramme des Modules

La centrale thermique est composée de trois modules identiques, chaque module comporte :



Composants d'un module.[1]

Conclusion

Au fil de chapitre, on est parti à la découverte de la société nationale de production d'électricité et du gaz Sonelgaz, à partir d'une de ses filiale « la centrale Thermique à cycle combiné RAS Djinet »

2 »

Chapitre II :Généralités sur la machine synchrone et la commande MLI

Introduction

Quand on veut faire varier la vitesse d'un moteur, la première idée qui vient à l'esprit est de faire varier la tension aux bornes du moteur mais on constate que pour des valeurs faibles de la tension, le moteur ne tourne pas. Le moteur demande une tension minimale pour démarrer.

Si cette dernière est trop basse, les forces électromagnétiques ne sont pas suffisantes pour vaincre le frottement. Il devient donc difficile d'ajuster la vitesse de façon précise.

La solution à ce problème est astucieuse. Il suffit de fournir au moteur une tension qui est toujours la même soit la tension maximale !

Par contre, cette tension ne sera appliquée que par de très courtes périodes de temps. En ajustant la longueur de ces périodes de temps, on arrive à faire tourner plus ou moins vite les moteurs.

Mieux, on remarque que la vitesse des moteurs devient proportionnelle à la longueur des périodes de temps. Contrôler la longueur des périodes passées à la tension maximale par rapport au temps passé sans application de tension (tension nulle) est donc le cœur de la solution.

En réalité, cette solution est très connue en contrôle des systèmes électronique et elle porte le nom de PWM (Pulse With Modulation) ou Modulation par Largeur d'Impulsions (MLI).

II-1 Générateur

II-1-1 Introduction et fonctionnement

Omni présent dans l'industrie, l'alternateur a pour but de transformer l'énergie **mécanique** en énergie **électrique** en mode **générateur** et inversement lors de fonctionnement en mode moteur.

Les alternateurs de la centrale sont des machines **synchrones à pôles lisses**.

Le développement fait en termes d'électronique de puissance permet aujourd'hui l'utilisation des machines synchrones en tant que moteur, là ou autrefois, l'utilisation était quasi majoritairement une utilisation en alternateur.

Les machines synchrones étant des machines à courant alternatif, elles viennent peu remplacer le moteur à courant continu car elles disposent d'une meilleure plage de puissance allant de quelque watt (W) à des mégawatts (MW).[1]

- **Machine synchrone**

Regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Le champ magnétique rotorique est généré soit par un circuit d'excitation soit par des aimants. Le positionnement du champ rotorique étant fixe par rapport au rotor, ce dernier impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statique.

On distingue deux modes de fonctionnement de la machine synchrone :

Chapitre II : Généralités

- **Mode génératrice** : elle produit un courant électrique dont la fréquence est déterminée par la fréquence de rotation du rotor.
- **Mode moteur** : elle consomme un courant électrique pour faire tourner le rotor à une vitesse déterminée pas la fréquence de ce dernier.

Pôles lisses : (Plus robuste, idéal pour les grandes puissances et grandes vitesses).

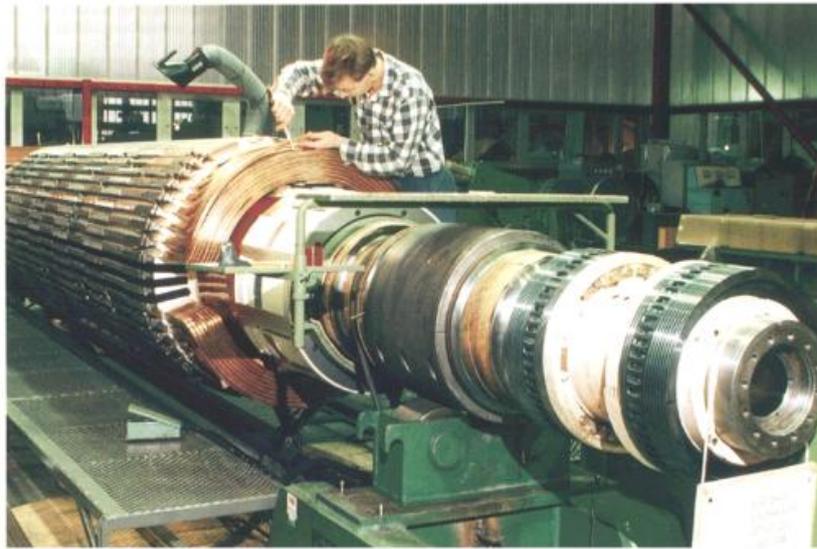


Figure 2.1 : Rotor machine asynchrone à pôles lisses[2]

Tous les alternateurs comportent deux parties principales avec chacune ses enroulements :

A. Stator (induit)

Le Stator représente l'induit, siège de la transformation de puissance, il est formé par un empilage sous forme cylindrique de tôles magnétiques isolées entre elles, d'un bobinage triphasé (trois enroulements strictement identiques) décalée de 120° dans l'espace, l'enroulement du bobinage est toujours raccordé en Etoile et le neutre est accessible pour lui permettre la mise en terre.



Figure 2.2 : Coupe stator[2]



Figure 2.3: Vue globale Stator[2]

Ces trois bobines produisent un champ magnétique variable dans l'entrefer, qui a la particularité de tourner autour de l'axe du stator suivant la fréquence de la tension d'alimentation, ce champ magnétique est appelé champ tournant.

Stator généralement couplé en étoile.

Ce champ magnétique tourne à la vitesse de $\frac{f}{P}$ tours / secondes, avec f fréquences d'alimentation des bobinages statiques, et (P) le nombre de paires de pôles. Le rotor va alors s'aligner avec le champ tournant, ainsi va tourner à la même vitesse que le champ tournant. La vitesse de rotation du rotor est donc :

$$\Omega = \frac{\omega}{P}$$

Ω : Vitesse de Rotation de la machine, exprimée en radians par seconde.

P : Le nombre de paires de pôles de la machine.

ω : La pulsation des courants statoriques, exprimée en radians par seconde.

B. Rotor

Il représente l'inducteur et la partie mobile de la machine et est également un circuit magnétique circulaire, il est à 2 paires de pôles, « Nord » « Sud ».

Le principe de fonctionnement de l'alternateur repose sur la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique grâce à un phénomène appelé induction magnétique.

Un flux magnétique est créé par un aimant permanent ou par un électro-aimant alimenté par un courant continu, appelé courant d'excitation.

Chapitre II : Généralités

Lorsque le rotor tourne, les lignes de flux produites par ses pôles balayent les enroulements du stator et induisent dans ce dernier une tension triphasée. La fréquence de cette tension induite est proportionnelle à la vitesse de rotation.

On notera alors :

$$f = \frac{p}{2} \times \frac{n}{60} = \frac{p \times n}{120}$$

f : Fréquence.

p : nombre de pôles.

n : vitesse de rotation.

Pour **50Hz** la vitesse de rotation est de :

- **3000 t/min** pour **2 pôles**.
- **1500 t/min** pour **4 pôles**.
- **1000 t/min** pour **6 pôles**.

II-1-2 Types de rotor

- Rotor à pôles saillants

Les pôles saillants sont idéals pour les alternateurs à vitesse relativement réduite (entre 50 et 300 tr/min). En dépit de la basse vitesse, ce type de rotor dispos d'un grand nombre de pôle, afin de répondre à une de fréquence imposée de 50Hz, et de ce fait un grand diamètre de rotor est requis.

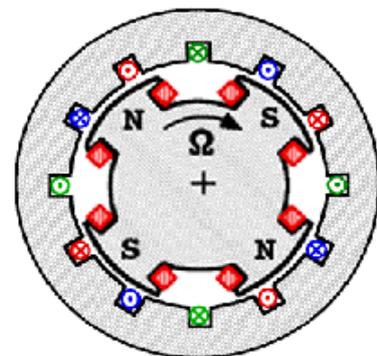
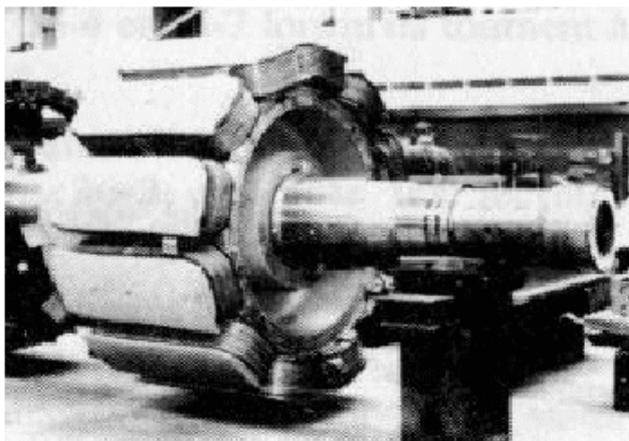


Figure 2.4: Rotor à pôles saillants[3]

- Rotor à pôles lisses

Contrairement au rotor à pôles saillants, le pôle lisse nécessite uniquement une ou deux paires de pôles.

Utilisé pour les grandes vitesses entre 1500 et 3000 tr/min sur 50 Hz, on les désigne sous le nom de turbo-alternateurs. Leur rotor a une forme cylindrique, car les pôles sont formés en plaçant des bobines dans les encoches taillées dans la masse même du rotor. Les forces centrifuges intenses dues à la grande vitesse de rotation imposent une limite au diamètre du rotor, comme, d'autre part, les grandes puissances (500 MW à 1500 MW) nécessitent un gros rotor, une forme allongée est obligatoire (Fig. 2.5).

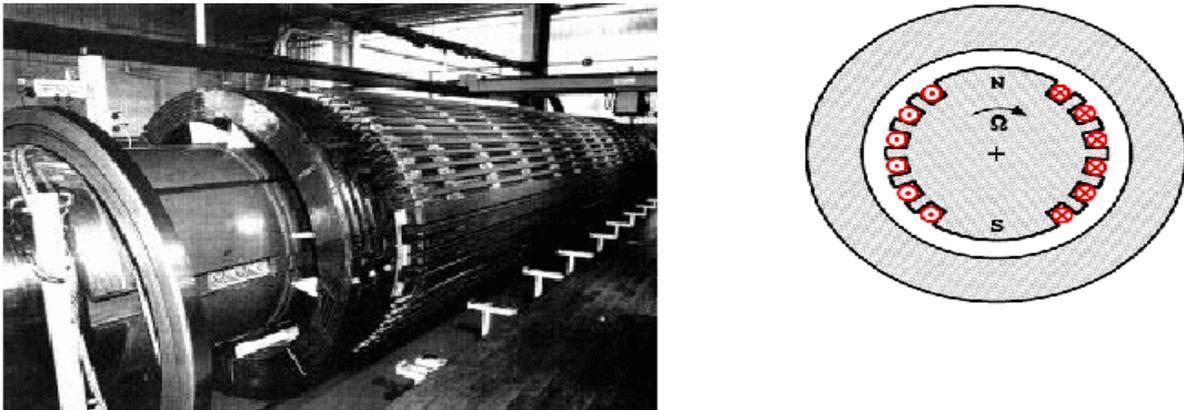


Figure 2.5: Rotor à pôles lisses.[3]

Il existe aussi, pour des machines plus petites, des inducteurs à aimants permanents.

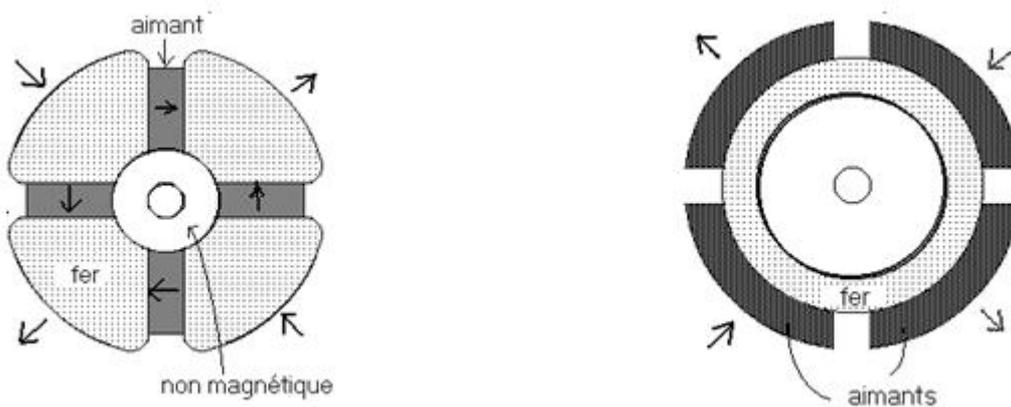


Figure 2.6: Rotor à aimants permanents.[4]

Pôles lisses

pôles saillants

Avantages : pas de liaison du rotor avec l'extérieur et pas de perte Joule.

Inconvénients: prix élevé, absence de possibilité de réglage, donc pertes magnétiques max., et difficultés constructives.

II-1-3 Excitation de la machine synchrone

Lorsqu'elle est de type à aimant permanent, elle n'a pas besoin d'être excitée.

Lorsque l'inducteur est composé d'électro-aimants, dans ce cas, elles doivent être alimentées par des courants continus fournis soit par :

- Une source extérieure reliée au rotor par un système de bagues et de balais.
- L'induit lui-même, on parlera alors d'auto excitation, une partie des courants triphasés fournis par l'induit sont redressés à l'aide d'un pont de diodes afin de procéder à l'alimentation de l'inducteur.[1]

II-1-4 Refroidissement de la machine

On imagine qu'en raison de l'énorme puissance de la machine, et malgré son rendement de 99%, les plus petites des puissances dissipées en pertes joules représentent elles aussi, un chiffre assez conséquent. [2]

Pour un alternateur de 1000MW : 1 MW de pertes joules.

L'utilisation de liquide de refroidissement sous forme gazeux est donc nécessaire.

L'hydrogène, est jugé comme étant le plus puissant des **fluides caloporteurs**, pour le transfert de chaleur, grâce à sa conductivité thermique comparé aux autres gaz, est considéré comme étant le mieux adapté aux machines rotatives.

Le refroidissement de l'hydrogène est donc assuré par l'intermédiaire de la circulation d'eau en circuit fermé (circuit préalablement refroidi par un autre circuit d'eau de mer).[2]

II-2 Rappel sur les semi-conducteurs de puissance

Pour modifier, avec un bon rendement, la présentation de l'énergie électrique, les convertisseurs statiques utilisent des semi-conducteurs de puissance fonctionnant en commutation, faire fonctionner des semi-conducteurs en commutation signifie qu'on leur demande d'opérer par tout ou rien, comme des interrupteurs mécaniques. On utilise d'ailleurs pour ces composants électroniques le vocabulaire des interrupteurs mécanique et dans les schémas de principe, on les représente par des interrupteurs c'est ainsi qu'on trouve :

- Un composant non commandable : la diode.
- Un composant commandable seulement à la fermeture : le thyristor.
- Des composants commandables à la fermeture et à l'ouverture :
- Le thyristor à ouverture commandée (GTO).
- Transistor bipolaire (BJT).
- Transistor MOSFET de puissance.
- Transistor bipolaire à grille isolée.

II-2-1 Diodes

La diode est un composant électronique non commandable. C'est un dipôle non-linéaire et polarisé (ou non-symétrique). Le sens de branchement d'une diode a donc une importance sur le fonctionnement du circuit électronique dans lequel elle est placée.

La diode est un dipôle à semi-conducteur dit jonction P-N celle de type P est reliée à l'anode A, celle du type N à la cathode K, elle possède deux régimes de fonctionnement : bloqué et passant. [3]

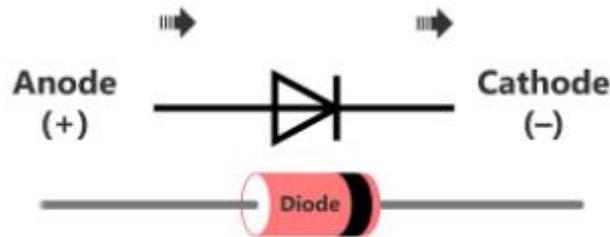


Figure 2.7: Représentation d'une diode [4]

L'intérêt principal de la diode, est de ne laisser passer le courant que dans un sens, et pas dans l'autre.

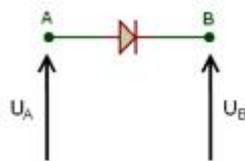


Figure 2.8: L'anode et la cathode [4]

Pour que la diode soit passante, il suffit que le potentiel U_A soit supérieur au potentiel U_B . Inversement, pour que la diode soit bloquée, le potentiel U_B doit être plus grand ou égal que le potentiel U_A .

Pour que la diode devienne passante il faut que le potentiel U_A soit supérieur au potentiel U_B d'une valeur correspondant au type de diode utilisé :

$$U_A > U_B + U_{\text{seuil}}$$

Pour les diodes au silicium, la tension de seuil est en moyenne de 0,6V ; pour les diodes au germanium, elle est de 0,25V.

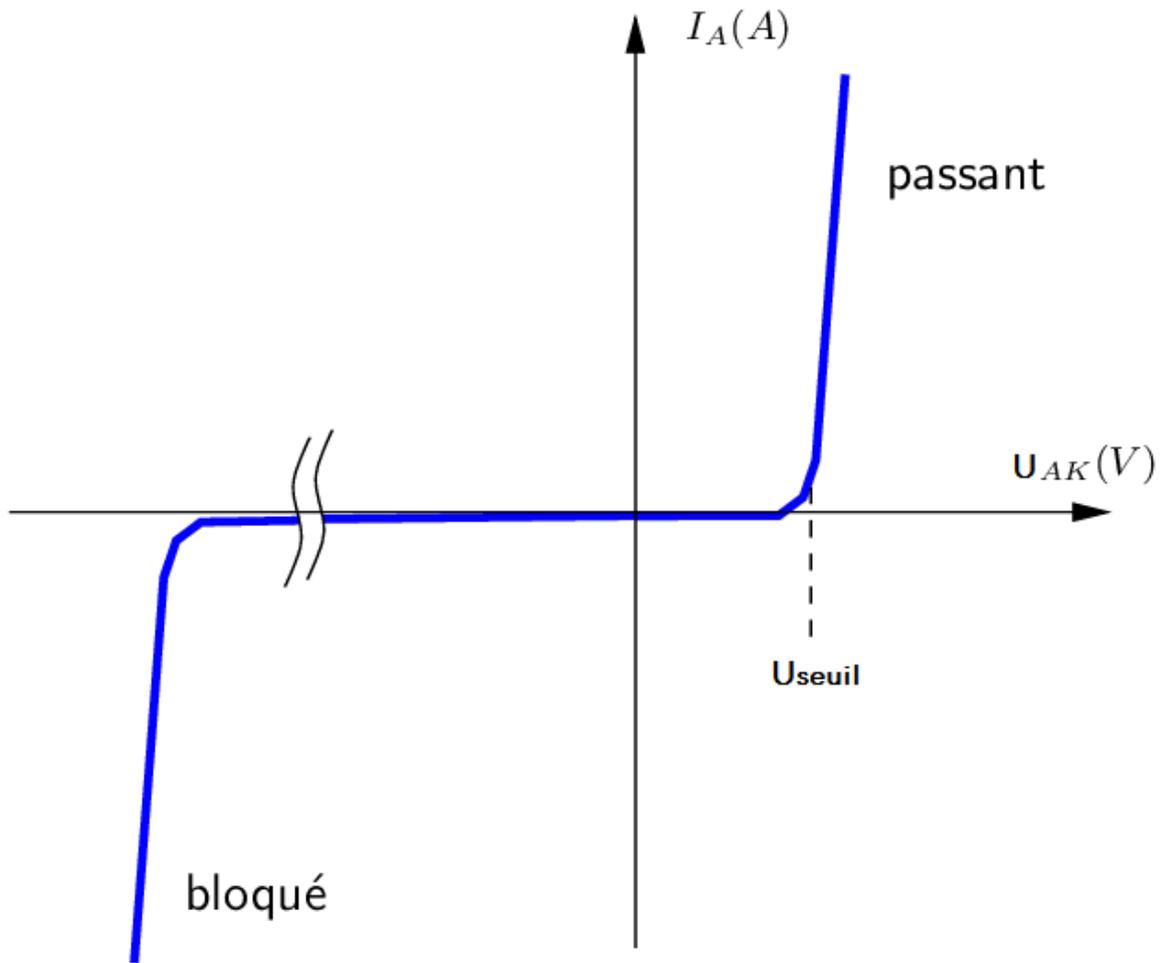


Figure 2.9:Caractéristiques statiques de la diode [4]

II-2-2 Thyristors

Le thyristor est un composant électronique semi-conducteur à fermeture commandée, à trois bornes composé de quatre couches de silicium dopées alternativement par des accepteurs (P) et des donneurs (N). La structure en couches P-N-P-N du thyristor peut être modélisée par deux transistors PNP et NPN connectés selon le schéma ci-dessous. [3]

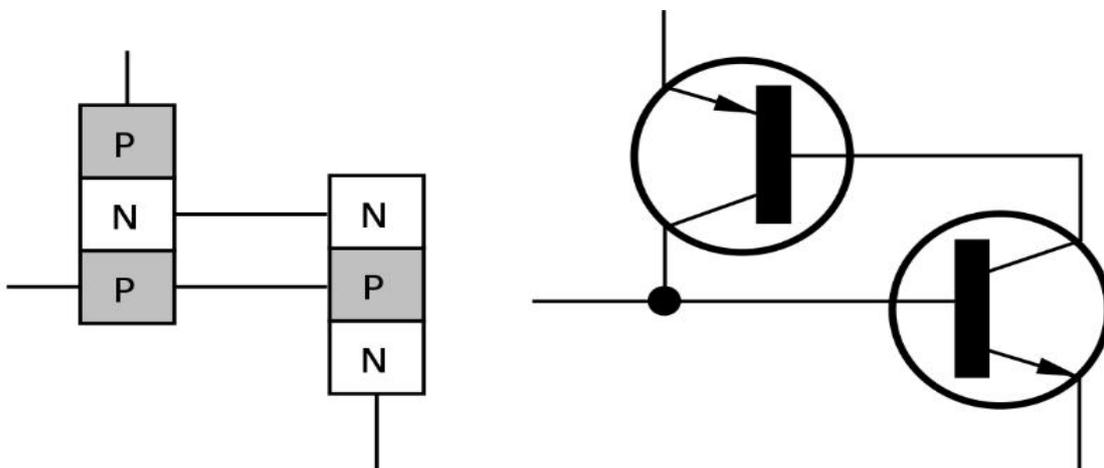


Figure 2.10:Thyristor modélisé pas deux transistor PNP NPN [3]

Chapitre II : Généralités

Les deux bornes principales : l'anode et la cathode, se situent de part et d'autre des quatre couches. La troisième borne, appelée gâchette, sert à commander le thyristor. Elle est reliée à la couche P près de la cathode.

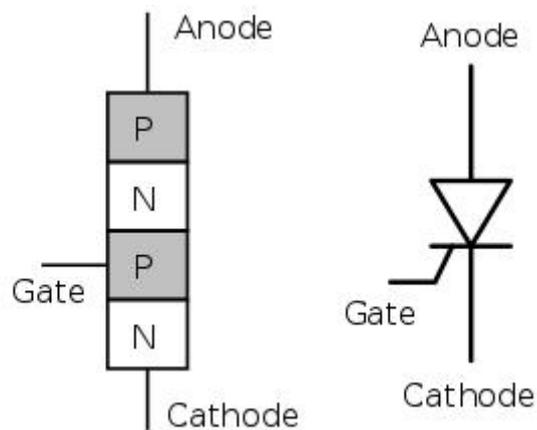


Figure 2.11: Représentation d'un thyristor [3]

En suivant la convention réceptrice on peut définir :

V_{ak} tension entre l'anode et la cathode du thyristor.

V_{gk} tension entre la gâchette et la cathode.

I_{ak} courant considéré comme positif lorsque traversant le thyristor de l'anode vers la cathode.

I_{gk} courant considéré comme positif lorsque rentrant sur la gâchette.

Un thyristor a trois états possibles :

- Tension négative, thyristor bloqué : V_{ak} est négatif, comme une diode dans ce cas, il est bloqué.
- Tension positive, thyristor bloqué : V_{ak} est positif, mais I_{gk} est nul. À la différence d'une diode, le thyristor est bloqué.
- Tension positive, thyristor passant : V_{ak} est positif (supérieure à la tension de seuil), une impulsion d'un courant I_{gk} positive a été donnée entre la gâchette et la cathode. Le thyristor est passant : il conduit, le courant I_{ak} traverse le thyristor de l'anode vers la cathode. Lorsque celui-ci dépasse initialement la valeur du courant de verrouillage, le thyristor reste conducteur tant que le courant ne descend pas en dessous d'une certaine valeur, appelée courant de maintien I_H (holding current). Il se comporte à nouveau comme une diode. Il y a une chute de tension aux bornes du thyristor, légèrement plus grande que la tension de seuil, de l'ordre de 1 ou 2 volts. [4]

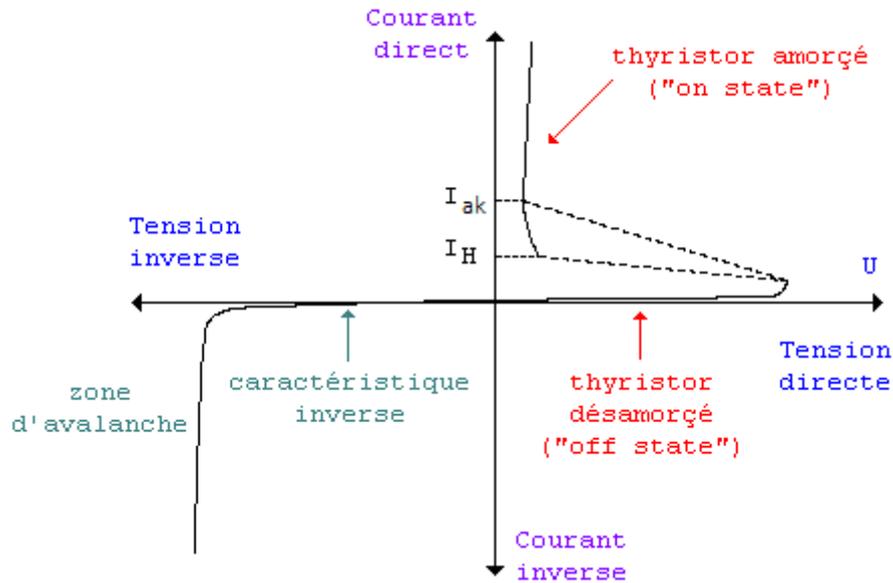


Figure 2.12:Caractéristique d'un thyristor[3]

Si l'on veut bloquer le thyristor alors qu'il est déjà à l'état conducteur, il faut utiliser un circuit extérieur. La première possibilité est d'appliquer une tension négative à ses bornes, on parle alors de commutation par la ligne (le réseau électrique alternatif, par exemple) ou de commutation naturelle. La seconde consiste à activer un second thyristor qui va alors permettre la décharge d'une capacité à travers la cathode du premier thyristor. On parle alors de commutation forcée.

II-2-3 Thyristors GTO

Le thyristor GTO (gâte turn-off) est, comme son nom l'indique, un thyristor qui peut être bloqué par action sur la gâchette. Celle-ci permet donc la commande de la fermeture et de l'ouverture.

Le GTO se bloque si le courant d'anode s'annule (comme le thyristor) Le mode de blocage spécifique du GTO consiste à détourner la quasi-totalité du courant d'anode dans la gâchette. Le courant "sort" donc de la gâchette. En pratique, on applique donc une tension négative sur la gâchette ($V_{gk} < 0$) pour détourner le courant. L'opération doit avoir une durée minimale pour assurer un blocage fiable et non dangereux pour le GTO. Ceci est une limitation en fréquence.

Sur le schéma équivalent à 2 transistors, on comprend que cette opération détourne le courant de base du transistor NPN, ce qui le bloque. Son courant collecteur n'alimente plus la base du PNP, ainsi, l'ensemble se bloque. [4]

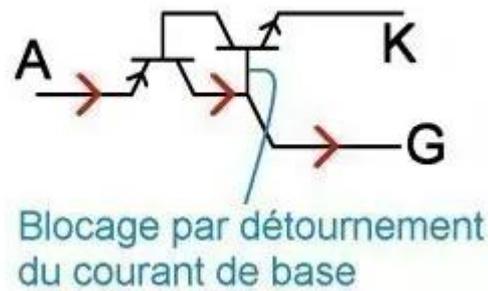


Figure 2.13: Fonctionnement d'un thyristor GTO [3]

II-2-4 Transistors

Les transistors sont composants électronique semi-conducteur unidirectionnelle, commandable à l'ouverture et à la fermeture.

Ces semi-conducteurs sont dopés de deux manières :

- Type P : dopé positivement, pauvre en électrons
- Type N : dopé négativement, riche en électron.

Pour assurer la conduction du transistor, une commande permanente est nécessaire.

Il existe deux types de transistors :

1. Transistor Bipolaire.
2. Transistor à effet de champs. [5]

II-2-5 Transistor bipolaire

A l'aide d'un signal d'entrée, le transistor bipolaire fournit un signal de sortie, il remplit deux fonctions essentielles

- Commutation.
- Amplification.

Il est constitué de trois (03) électrodes séparé par deux jonctions :

- B : Base.
- C : collecteur.
- E : émetteur.

On dénombre deux types de transistor bipolaire : transistor **NPN** (émetteur N , base P , collecteur N) et le transistor **PNP** (émetteur P , base P , collecteur P). [5]

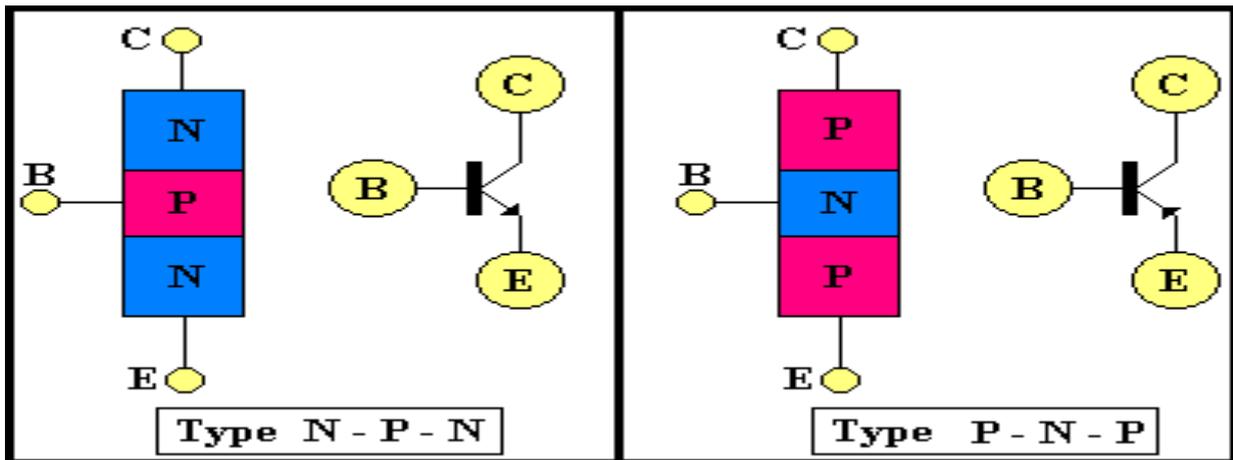


Figure 2.14: Représentation symbolique des deux types de transistor bipolaire PNP et NPN. [5]

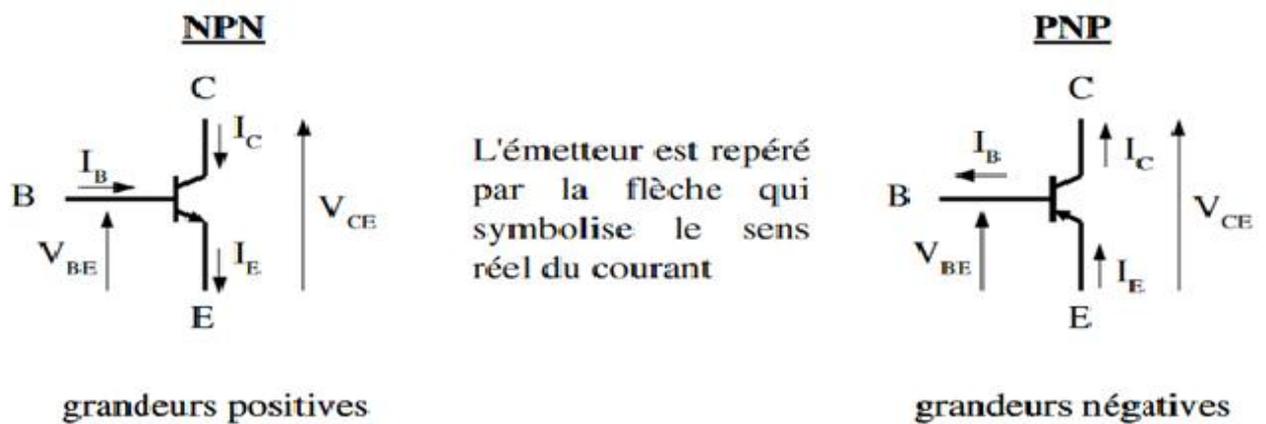


Figure 2.15: Symboles tensions et courants [5]

La loi de Kirchhoff est appliquée au transistor bipolaire :

$$I_E = I_C + I_B$$

Le transistor possède trois (03) types de fonctionnements :

- **Fonctionnement normal :**

La jonction émetteur base est polarisé en direct, la jonction collecteur base est polarisé en inverse.

- **Fonctionnement bloqué :**

Chapitre II : Généralités

Les deux jonctions sont polarisées en inverse.

- **Fonctionnement saturé :**

Les deux jonctions sont polarisées en direct.

II-2-6 Transistor NPN polarisé

- $V_1 > V_{\text{seuil}}$

La jonction BE est passante

- $I_B > 0$, et $V_{BE} \approx 0,6 \text{ V}$

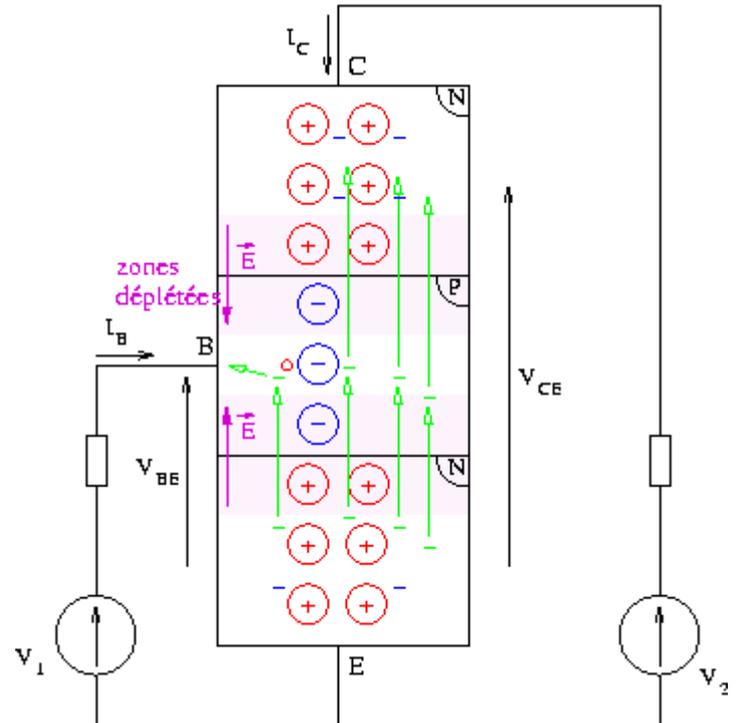


Figure 2.16: Transistor NPN polarisé [3]

Ce courant est constitué d'un flux d'électrons allant de l'émetteur vers la base (N vers P).

La base étant fine, ils arrivent à la 2ème jonction et passent dans le collecteur (P vers N).

La majorité des électrons injectés par l'émetteur traverse l'ase et se retrouvent dans le collecteur.

Il en résulte un Courant I_C bien plus supérieur à I_B .

$$I_C \gg I_B$$

Lorsque le transistor est polarisé de façon correcte, on peut définir plusieurs rapports de courant statique :

- Alpha statique :

$$\alpha_{DC} = I_C \div I_E = I_C \div (I_C + I_B) \approx 1 \text{ car } I_C \gg I_B$$

Si $\alpha > 0.99$ Transistor classique.

Si $\alpha > 0.95$ Transistor de puissance.

- Beta statique :

$$\beta_{DC} = I_C \div I_B$$

$100 < \beta_{DC} < 300$ Transistor Classique.

$20 < \beta_{DC} < 100$ transistor de puissance.

β_{DC} est appelée gain de courant du transistor.

II-2-7 Transistor à effet de champs (FET)

FET (Field Effect Transistor, Transistor à effet de champ).

Le transistor à effet de champ est un transistor unipolaire, il est particulièrement employé quand il est nécessaire d'avoir une très haute impédance d'entrée. Le transistor FET peut également être utilisé en résistance variable : usage dans des régulateurs de niveau. Un transistor FET possède trois électrodes nommées D (drain), S (source) et G (gate).

II-2-8 Transistor Mosfet :

Le transistor à effet de champ à semi-conducteur métal-oxyde (MOSFET) constitue la deuxième catégorie de transistors à effet de champ. Le MOSFET diffère d'un FET puisqu'il ne possède pas de structure de jonction PN, la grille du MOSFET est plutôt isolée du canal par une couche de bioxyde de silicium (SiO₂).[5]

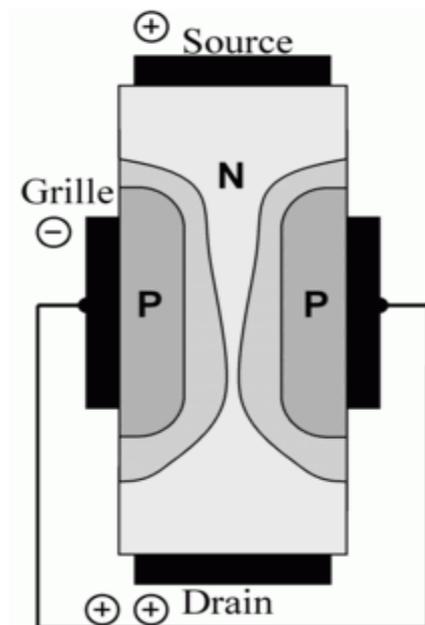


Figure 2.17: Transistor à effet de champs[10]

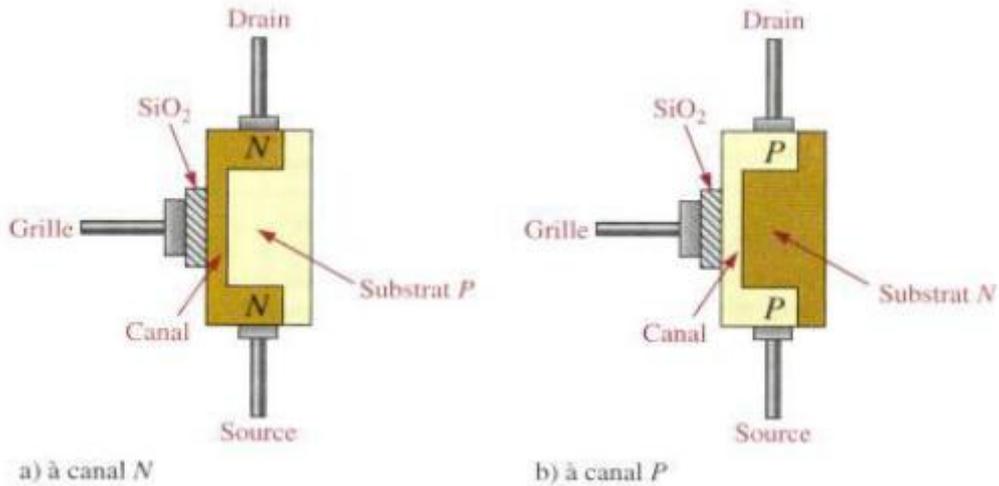


Figure 2.18: Représentation d'un transistor MOSFET à canal P et à canal N. [5]

Il existe des transistors *MOSFET* de **petite puissance** et de forte puissance. Ceux de forte puissance sont capables de supporter des courants de plusieurs ampères à plusieurs centaines d'ampères, ce qui bien entendu impose une résistance ohmique à l'état passant très faible. Par comparaison aux transistors bipolaires, on arrive à commuter des puissances importantes avec moins de pertes et moins d'échauffement. Ce type de transistor est souvent préféré pour la commande de charges importantes ou pour limiter la taille - ou même supprimer complètement - les encombrants dissipateurs thermiques. [5]

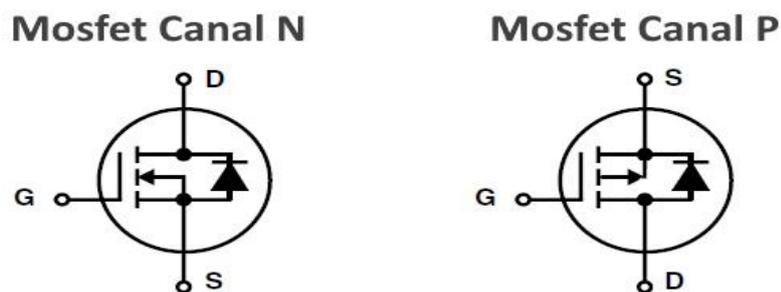


Figure 2.19: Mosfet canal N et P [4]

Le transistor MOS se commande en tension, de par sa conception, le MOS possède une diode symbolisée par la flèche entre DRAIN et SOURCE, ce qui interdit toute tension V_{DS} négative.

II-2-9 Transistor IGBT

L'IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) est un transistor bipolaire à porte isolée. Il associe les avantages des transistors bipolaires (tensions et courants élevés) et ceux des transistors MOSFET (rapidité des commutations, énergie de commande faible).

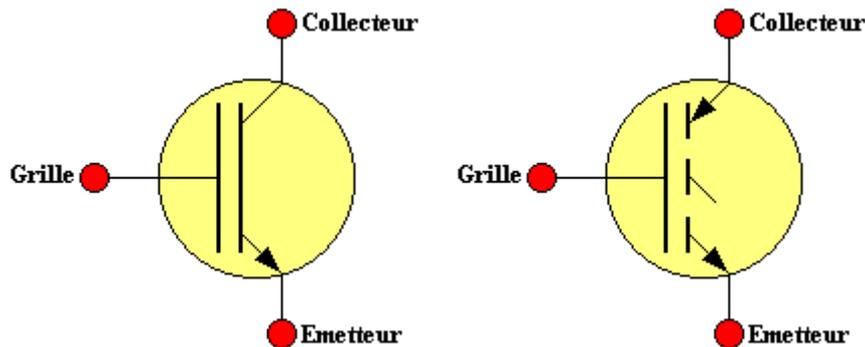


Figure 2.20: Symbol transistor IGBT [3]

II-2-10 Choix des composants

Les composants de l'électronique de puissances (interrupteurs) sont déterminés par les niveaux de la puissance et la fréquence de commutation. En règle générale, plus les composants ne sont rapides, plus la puissance commutée est faible et inversement. A titre indicatif, les transistors MOSFET, sont considérés comme des composants très rapides mais de puissance relativement faible. Les transistors bipolaires sont moins rapides que les transistors MOSFET mais d'avantage plus puissants (quelques kHz à une dizaine de kW). Les transistors IGBT sont des composants de gamme standard (jusqu'à 20 kHz à une des dizaines de kW). Les thyristors GTO commutent très lentement les grandes puissances. Ces composants sus indiqués sont du type commandables à l'ouverture et à la fermeture ; ce qui n'est pas le cas pour le thyristor classique. [5]

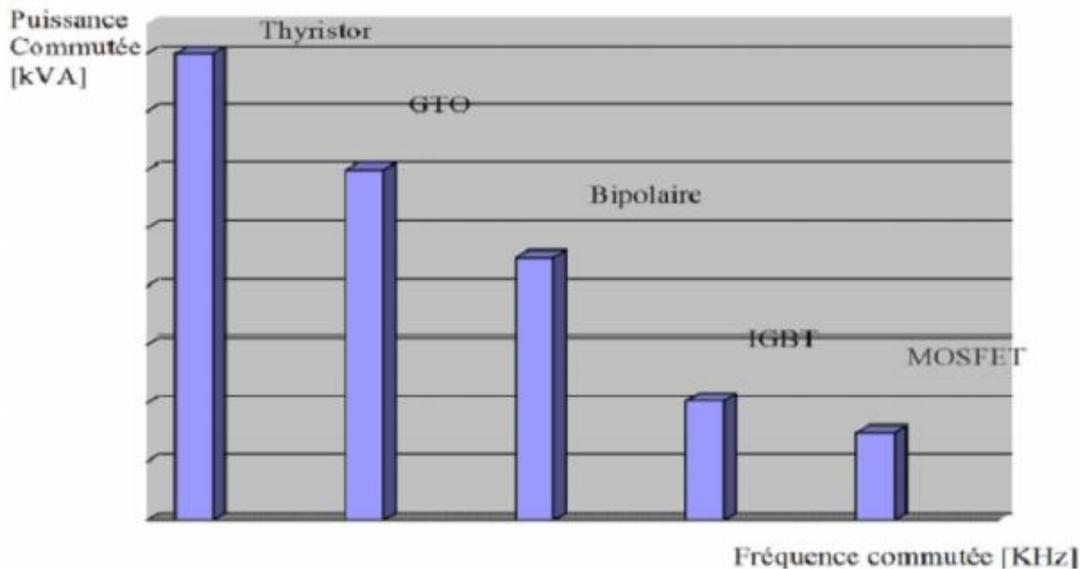


Figure 2.21: Choix des composants selon la puissance et la fréquence [5]

II-3 Différents type d'alimentation

Au fil des recherches effectuées lors des dernières années sur les machines synchrones à vitesse variable ont démontrées l'utilité de les associer à des convertisseurs statiques pour l'alimentation de ce type de machines.

On dénombre par ailleurs deux types de d'alimentations :

- le cycloconvertisseur directement relié au réseau alternatif, ce type d'alimentation présente cependant l'inconvénient d'avoir une fréquence des tensions de sortie relativement basse, ce qui limite la vitesse de rotation de la machine, et la nécessiter d'avoir un nombre élevé de composants et une commande relativement complexe.
- Le deuxième type de convertisseur alimente la machine à partir d'une source de tension ou de courant continu (onduleurs de tension ou commutateurs de courant).[6]

II-3-1 Alimentation par commutateur de courant

Dans ce type d'alimentation le convertisseur associé au moteur est alimenté par une source de courant continu. Le convertisseur statique peut, grâce à l'ouverture et à la fermeture des interrupteurs, aiguiller ce courant séquentiellement dans les enroulements statoriques de la machine, de telle sorte que son amplitude soit fixée par le courant d'alimentation et que sa fréquence soit proportionnelle à la vitesse de rotation de la machine.[6]

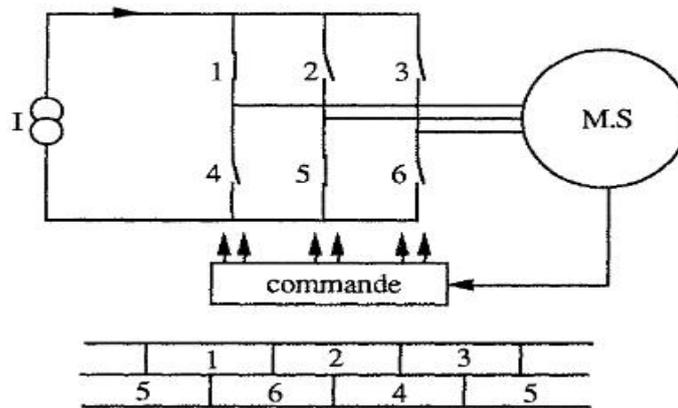


Figure 2.22: Schéma d'alimentation par commutateur de courant. [6]

Ce type de commande est généralement utilisé dans les entraînements à vitesse variable, néanmoins, le commutateur impose dans les phases du moteur des courants rectangulaires et discontinus, donc riche en harmonique.

Ces harmoniques produisent des oscillations du couple électromagnétique qui perturbent le bon fonctionnement du moteur à faible vitesse et induisent des pertes fer supplémentaires qui réduisent le rendement du moteur.

II-3-2 Alimentation par onduleur de tension

L'utilisation d'onduleurs de tension permet d'imposer au enroulement de l'induit de la machine des tensions d'amplitude et de fréquence réglable, et ce en agissant sur la commande des interrupteurs du convertisseur statique

Nous étudierons dans ce mémoire l'alimentation à onduleur de tension.[6]

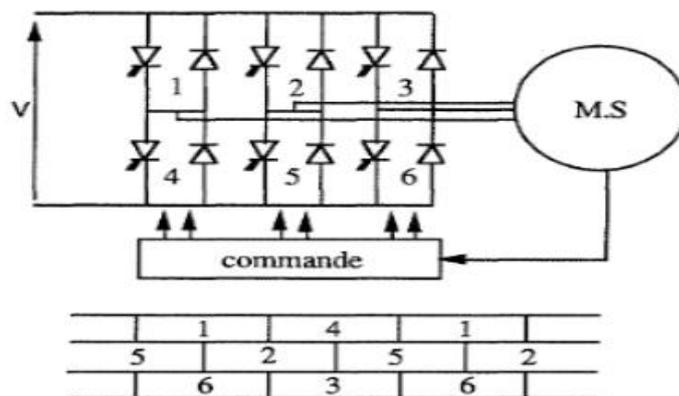


Figure 2.23: Alimentation par onduleur de tension [6]

- Il existe deux catégories d'onduleurs

Les onduleurs autonomes et les onduleurs non autonomes :

→ Onduleur assisté (non autonome) : Consiste à transformer une tension ou un courant continu en son équivalent alternatif avec une assistance de commutation par la source, c'est à dire il ne peut fonctionner seul il doit être relié au réseau électrique (redresseurs avec un retard à l'amorçage supérieur à $(\pi/2)$).

→ Onduleur autonome : Il délivre une tension de fréquence soit fixe soit ajustable par un circuit de commande. Il n'a pas besoin de réseau électrique pour fonctionner.[6]

II-4 Onduleurs de tension

On appelle onduleur de tension un onduleur qui est alimenté par une source de tension continue (U), c'est-à-dire par une source d'impédance interne négligeable, sa tension n'est pas affectée par les variations du courant (i) appelé charge. La source continue impose la tension à l'entrée de l'onduleur et donc à sa sortie.[7]

II-4-1 Principe de fonctionnement

Les onduleurs sont généralement monophasés ou triphasés, pour comprendre leurs principes de fonctionnement, on utilise une source continue et quatre interrupteurs (K1, K1', K2, K2') et une charge alternative.[7]

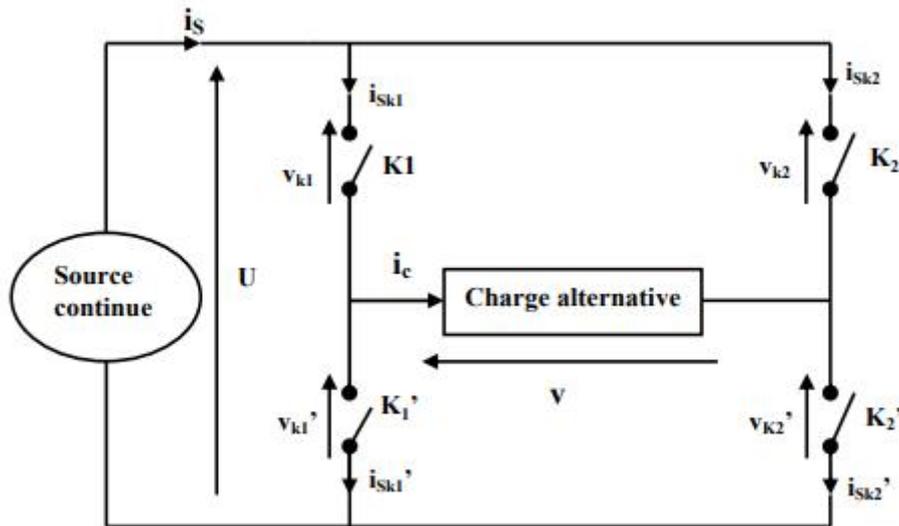


Figure 2.24:Schéma fonctionnel d'un onduleur monophasé. [7]

On suppose que la source et les interrupteurs sont parfaits (chute de tension nul, commutation instantanée). Si le récepteur est une charge purement résistive.

Chapitre II : Généralités

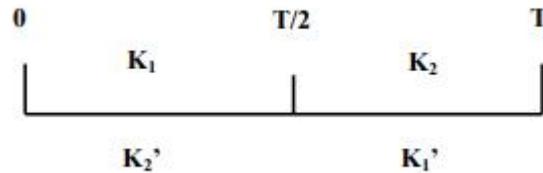
- Le courant dans la charge :

$$I_c = i_{SK1} - i_{SK2}' \quad (2.1)$$

- La tension aux bornes de la charge :

$$V = U - V_{K1} - V_{K2}' \quad (2.2)$$

On applique des séquences de commande des interrupteurs comme le montre le schéma suivant:



Avec :

T : c'est la période de fonctionnement de l'onduleur.

→ Dans l'intervalle [0, T/2]

K_1, K_2' fermés et K_2, K_1' ouverts

Tensions et courants dans la charge et les interrupteurs :

$$i_{SK1} = i_{SK2}' = I_c, V_{K1} = V_{K2}' = 0 \quad (2.3)$$

$$i_{SK2} = i_{SK1}' = 0, V_{K2} = V_{K1}' = U \quad (2.4)$$

$$(2.1) \implies I_c = I_s$$

$$(2.2) \implies V = U$$

Dans l'intervalle [(T/2), T] K_1', K_2 fermés et K_1, K_2' ouverts

Tensions et courants dans la charge et les interrupteurs :

$$i_{SK1} = i_{SK2}' = 0, V_{K1} = V_{K2}' = U \quad (2.5)$$

$$i_{SK2} = i_{SK1}' = I_c, V_{K2} = V_{K1}' = 0 \quad (2.6)$$

$$(2.1) \implies I_c = -I_s$$

$$(2.2) \implies V = -U$$

On représente sur Fig.2.9, la tension et le courant de sortie :

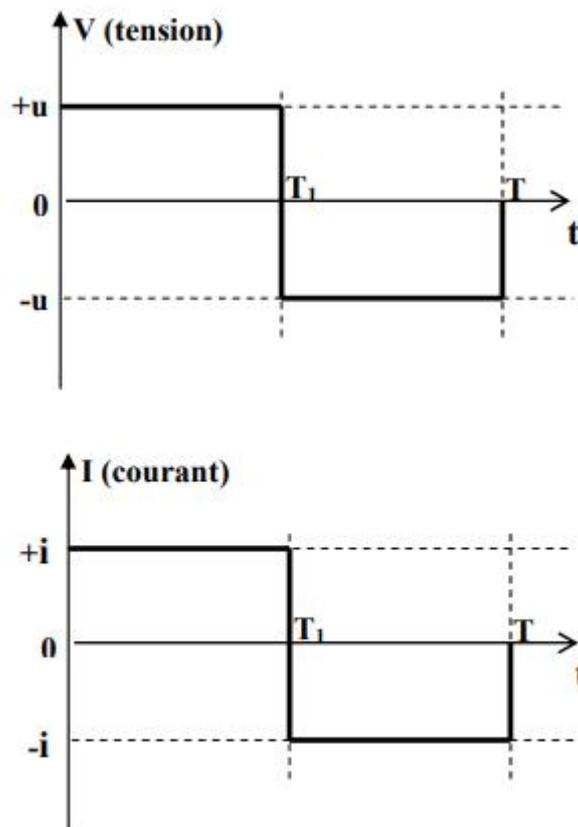


Figure 2.25: Tension et courant à la sortie de l'onduleur (cas d'une charge résistive) [7]

II-4-2 Structure

- Onduleur triphasé

Un onduleur de tension triphasé, dont les composants sont des semi-conducteurs contrôlables, qui sont des transistors ou des thyristors GTO, est le cœur de l'organe de commande des alimentations triphasées. Il peut être considéré comme un amplificateur de puissance, il est constitué de trois bras, de deux interrupteurs pour chacun. Chaque interrupteur est monté en antiparallèle avec une diode de récupération.[7]

Pour assurer la continuité des courants alternatifs, les interrupteurs K_1 , K_2 , K_3 et K_1' , K_2' et K_3' doivent être contrôlés respectivement de manière complémentaire.

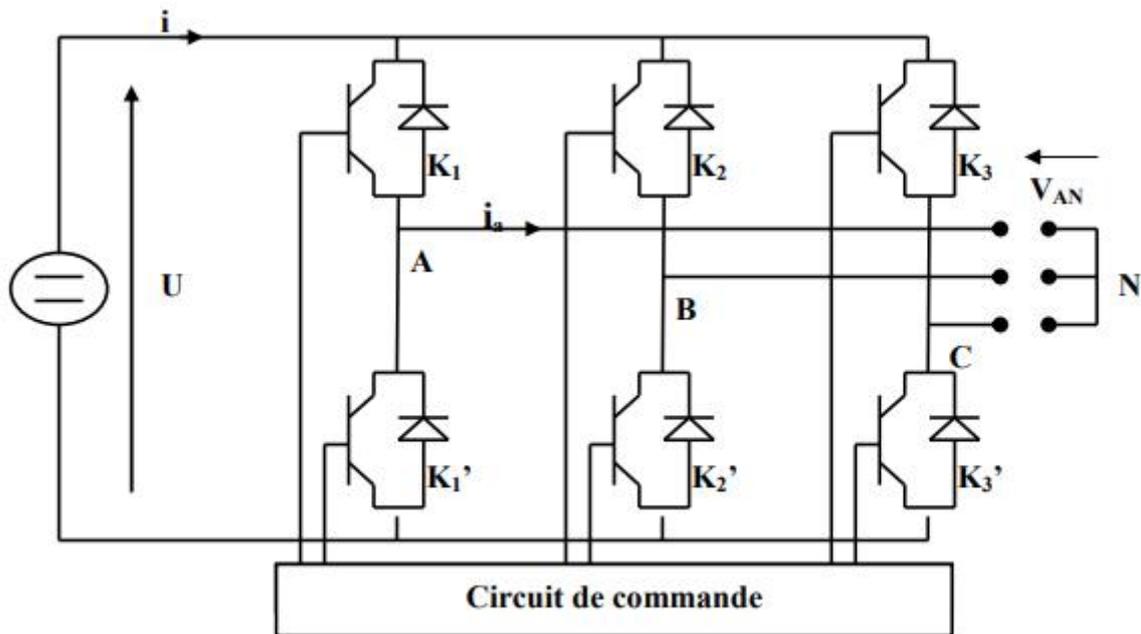


Figure 2.26: Onduleur de tension triphasé. [7]

Si la charge est équilibrée, la somme instantanée des courants est nulle :

- Le but est de connaître les tensions simples V_{AN} , V_{BN} , V_{CN} pour ensuite avoir (i_A, i_B, i_C) . [5]

II-4-3 Différents types de commande des onduleurs

Il existe plusieurs types de commandes, leur but est d'améliorer les formes des grandeurs de sortie des onduleurs tel que la tension et le courant, c'est-à-dire de les rendre le plus sinusoïdale possible. Parmi ces types de commandes on cite :

- La commande pleine onde.
- La commande MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion).

Nous étudierons dans ce mémoire la commande MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion). [8]

II-5 Commande MLI

La modulation de largeur d'impulsion (MLI), consiste à adapter une fréquence de commutation (f_p) supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie (f) et à former chaque alternance de la tension de sortie d'une succession des créneaux de largeur convenable.

La multiplication du nombre des impulsions formant chacune des alternances de la tension de sortie présente deux avantages importants :

- Elle repousse vers des fréquences plus élevées les harmoniques de la tension de sortie, ce qui facilite le filtrage.
- Elle permet de faire varier la valeur du fondamentale de la tension de sortie et sa fréquence.

Si la référence est sinusoïdale, cette commande est caractérisée par deux paramètres qui sont :

- L'indice de modulation « m », égale au rapport f_p/f .
- Le coefficient de réglage en tension « r », égale au rapport de l'amplitude de la tension de référence sur la valeur crête de l'onde modulante.[8]

Plusieurs types de MLI se présentent pratiquement, on peut citer :

II-5-1 Modulations sinus-triangle

La MLI sinus-triangle est réalisée par comparaison d'une onde de référence généralement sinusoïdale de basse fréquence (tension de référence ou modulante) avec un signal triangulaire de haute fréquence, appelé aussi porteuse. Les instants de commutation des interrupteurs sont déterminés par les points d'intersections entre la porteuse et la modulante.

Cette stratégie est caractérisée par deux paramètres : l'indice de modulation m (rapport entre la fréquence de porteuse f_p et celle du signal de référence), et le taux de modulation r (coefficient de réglage de tension ; égale au rapport des amplitudes des tensions des signaux de référence et de porteuse). Dans cette technique la fréquence de commutation est fixe, le réglage s'effectue par variation du rapport cyclique des signaux de commande.[8]

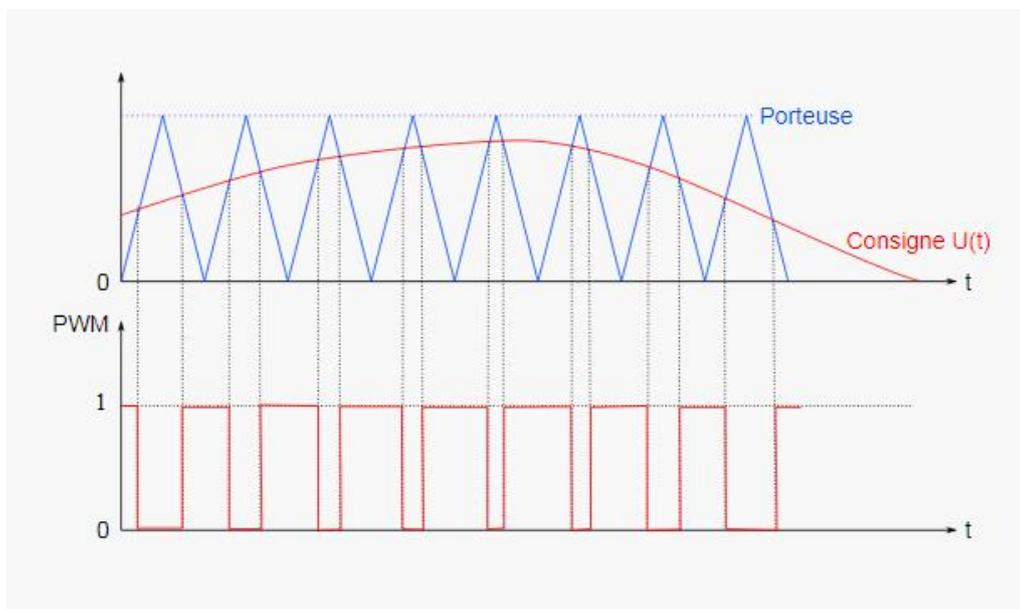


Figure 2.27: MLI en utilisant la modulation sinus triangle. [8]

II-5-2 Modulation vectorielle

Cette modulation est utilisée par les commandes modernes des machines à courant alternatif. Les tensions de référence sont les tensions simples désirées à la sortie de l'onduleur. Cette technique de MLI est basée sur les principes suivants :

- Le signal de référence est échantillonné sur des intervalles T_z (MLI régulière),
- Pour chaque phase, on envoie une impulsion de largeur T_z centrée sur la période (MLI symétrique) dont la valeur moyenne est égale à la valeur de la tension de référence à l'instant d'échantillonnage,
- Tous les interrupteurs d'un même demi-bas ont un état identique au centre et aux deux extrémités de la période. Cette MLI ne s'appuie pas sur des calculs séparés pour chaque bras de l'onduleur, mais sur la détermination d'un vecteur de contrôle global approximé sur une période de modulation(T_z).[8]

II-5-3 Modulations précalculées

Pour lesquelles les angles de commutation sont calculés hors ligne pour annuler certaines composantes du spectre de la tension, et donner une certaine onde fondamentale.[8]

Conclusion

Au court de ce chapitre on s'est intéressé essentiellement à la présentation ainsi qu'aux rappels fondamentaux nécessaire à la compréhension de la machine synchrone, de l'onduleur en commande MLI.

En premier lieu, on a présenté les deux modes de fonctionnement ainsi que les principaux composants de la machine synchrone.

Ensuite, on a mentionné les modes d'excitation, mais aussi et surtout les différents types d'alimentation de cettedernière, dont celle qui nous intéresse particulièrement : associée à un convertisseur statique.

Enfin, on a abordé les onduleurs et leurs fonctionnements, pour arriver au mode de commandement à savoir la modulation de largeur d'impulsion MLI.

Chapitre III : Modélisation de la machine synchrone

Introduction

La modélisation consiste à mettre au point un ensemble d'équations pour décrire un phénomène, d'une manière scientifique et quantitative en vue d'une simulation.

Le modèle issu de cette pratique sert à prédire le comportement du système en fonction des sollicitations et autres facteurs connus (valeurs de sortie en fonction de valeurs d'entrée).

Dans ce chapitre nous allons nous atteler à la modélisation de la machine synchrones à inducteur bobiné, via une modélisation classique : équation électrique, mécaniques et magnétiques, puis à sa simplification en utilisant le référentiel de Park (triphase vers biphasé).

III-1 Modélisation de la machine synchrone à pôles lisses

On peut modéliser les machines synchrones selon différentes méthodes, en fonction des objectifs recherchés. Dans ce chapitre on développe les modèles suivants :

- Les modèles en abc découlant des équations différentielles à coefficient périodiques régissant le fonctionnement de la machine. Ils sont utilisés essentiellement pour l'étude des régimes permanents.
- Les modèles issus de la transformation de Park, utilisé couramment pour l'étude des régimes transitoires et pour la commande vectorielle des moteurs. On présentera le modèle du moteur synchrone à inducteur bobiné à pôles lisses. En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices afin de faciliter la résolution des systèmes d'équations différentiels. On présentera aussi les résultats de simulation et leur commentaire.

III-1-2 Hypothèses simplificatrices

Pour la mise en équation du modèle de la machine synchrone permettant l'étude de son comportement en régime dynamique, nous avons retenu les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Entrefer constant.
- Effet d'encoche négligeable.
- Saturation négligeable ainsi que l'hystérésis et les courants de Foucault.
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température.
- Effet de peau négligeable. [5]

III-1-3 Définition des axes

L'axe « Od » est l'axe de bobinage inducteur et l'axe « Oq » est situé entre deux pôles, ces deux axes sont en quadrature on effectue les angles mécaniques et électriques sont liés par le

nombre de paires de pôles $\left(\omega_r = \frac{\omega}{P} \Rightarrow \omega_r = \frac{2\pi F}{P} \text{ soit } \theta_{mec} = \frac{\theta_{éle}}{P} \right)$

Chapitre III : Modélisation de la machine synchrone

Les axes Oa , Ob et Oc sont les axes respectifs des trois enroulements a , b et c du stator.[6]

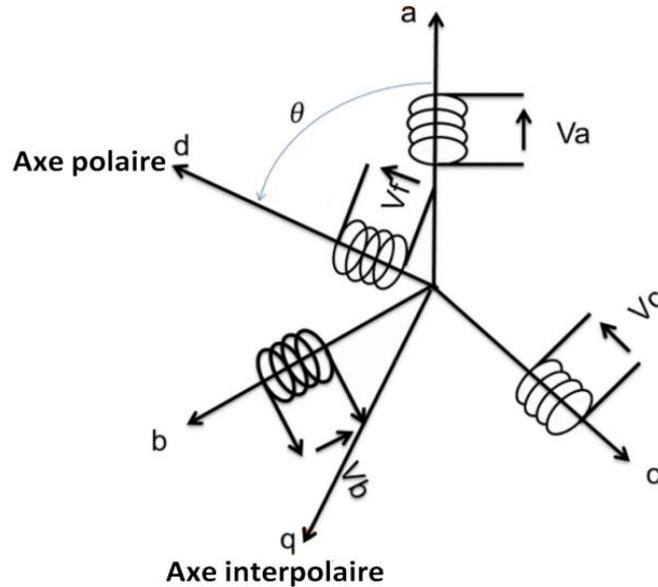


Figure 3.1 : Définition des axes ABC [9]

III-2 Equation électrique et magnétique de la machine dans les axes ABC

Le modèle en a , b , c découle directement des équations différentielles à coefficients périodique régissant le fonctionnement du moteur synchrone et par application de la loi de Faraday à chaque enroulement de la machine.

On écrit les équations de la machine en convention récepteur (en mode moteur synchrone).

III-2-1 Equations électriques

On appelle :

R_s : Résistance de l'induit

R_f : Résistance de l'inducteur

Les matrices suivantes désignent respectivement :

$$[V] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \\ V_f \end{bmatrix} \quad \text{matrices des tensions au stator et au rotor}$$

$$[I] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \\ I_f \end{bmatrix} \quad \text{matrices des courants au stator et au rotor}$$

$$[\varphi] = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \\ \varphi_f \end{bmatrix} \quad \text{matrices des flux au stator et au rotor}$$

$$[R] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_f \end{bmatrix} \quad \text{matrices des résistances statoriques et rotoriques}$$

Le système d'équations sous forme de matrice :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \\ V_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \\ I_f \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \\ \varphi_f \end{bmatrix}$$

Le système d'équations sous forme condensées :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\varphi_s]$$

$$[V_f] = [R_f][I_f] + \frac{d}{dt}[\varphi_f]$$

III-2-2 Equations magnétiques

$$\varphi_{sa} = L_s I_{sa} + M_{ss} I_{sb} + M_{ss} I_{sc} + M_{sf} I_f \cos \theta$$

$$\varphi_{sb} = L_s I_{sb} + M_{ss} I_{sc} + M_{ss} I_{sa} + M_{sf} I_f \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$\varphi_{sc} = L_s I_{sc} + M_{ss} I_{sb} + M_{ss} I_{sa} + M_{sf} I_f \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$\varphi_f = L_f I_f + M_{sf} I_{sa} \cos \theta + M_{sf} I_{sb} \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + M_{sf} I_{sc} \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right)$$

L'équation magnétique sous la forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} 0 & M_{ss} & M_{ss} & M_{sf} \cos \theta \\ M_{ss} & 0 & M_{ss} & M_{sf} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{ss} & M_{ss} & 0 & M_{sf} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{sf} \cos \theta & M_{sf} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M_{sf} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \\ I_f \end{bmatrix}$$

III-2-3 Equation mécanique

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\omega_m}{dt} + F \omega_m$$

$$\omega_m = P \frac{d\theta}{dt} = \frac{\omega}{P}$$

Avec :

C_{em} Couple électromagnétique

C_r Couple résistant

J Moment d'inertie

ω_m Pulsation mécanique

F Coefficient de frottement

P Nombre de paires de pôles

La résolution analytique dans ce repère est très difficile car le système d'équations est à coefficient variables en fonction de θ (angle de rotation de la machine). [9]

III-3 Equations dans les deux axes d et q

III-3-1 Transformation de Park

La transformation de Park est une transformation du repère triphasé fixe (abc) au un repère biphasé (dq). Cette transformation permet de réduire la complexité du système. [9]

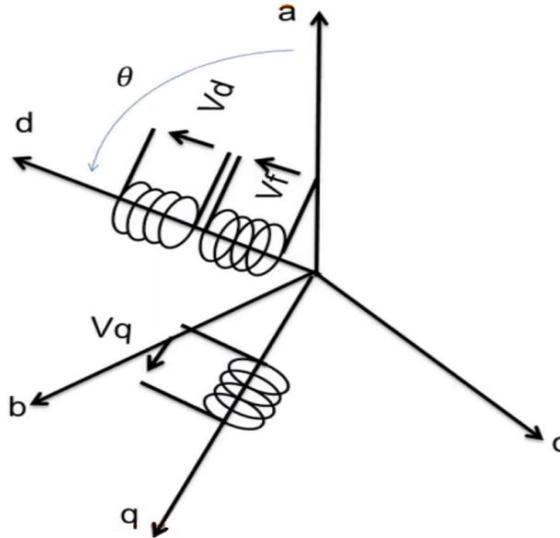


Figure 3.2: Définition des axes dq [9]

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

La matrice inverse est $[P]^{-1}$ donnée par :

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

Le passage du système triphasé au système diphasé est défini par le système d'équations suivant :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ 0 \end{bmatrix} = P(\theta) \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ 0 \end{bmatrix}$$

Avec :

X : Grandeur statorique ou rotorique (représente le vecteur de tension, courant ou flux).

X₀ : La composante homopolaire choisie nulle pour un système équilibré.

$$\begin{aligned} [I_{dq}] &= [P(\theta)][I_s] \Rightarrow [I_s] = [P(\theta)]^{-1}[I_{dq}] \\ [V_{dq}] &= [P(\theta)][V_s] \Rightarrow [V_s] = [P(\theta)]^{-1}[V_{dq}] \\ [\varphi_{dq}] &= [P(\theta)][\varphi_s] \Rightarrow [\varphi_s] = [P(\theta)]^{-1}[\varphi_{dq}] \end{aligned}$$

III-3-2 Etablissement des équations électriques dans les axes dq

Nous revenons aux premières équations et on tien :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\varphi_s]$$

$$[P]^{-1}[V_{qd0}] = [R][P]^{-1}[I_{qd0}] + \frac{d}{dt}[P]^{-1}[\varphi_{qd0}]$$

$$[V_{qd0}] = [R][I_{qd0}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{qd0}] + P \left(\frac{d}{dt}[P]^{-1} \right) [\varphi_{qd0}]$$

Sachant que :

$$[P] \frac{d}{dt} [P]^{-1} = \frac{d\varphi}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{Et} \quad \frac{d\theta}{dt} = \omega$$

Alors on obtient Les expressions des tensions suivant :

$$\begin{cases} V_d = RI_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \varphi_q \\ V_q = RI_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + \frac{d\theta}{dt} \varphi_d \\ V_f = R_f I_f + \frac{d\varphi_f}{dt} \end{cases}$$

III-3-3 Etablissement des équations magnétique dans les axes dq

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d I_d + M_f I_f \\ \varphi_q = L_q I_q \\ \varphi_f = L_f I_f + M_f I_d \end{cases}$$

On remplace les équations magnétiques dans les équations électriques on obtient :

$$\begin{cases} V_d = R I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} + M_f \frac{dI_f}{dt} - \omega L_q I_q \\ V_q = R I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + \omega (L_d I_d + M_f I_f) \\ V_f = R I_f + L_f \frac{dI_f}{dt} + M_f \frac{dI_d}{dt} \end{cases}$$

Forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 & M_f \\ 0 & L_q & 0 \\ M_f & 0 & L_f \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_f \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & -L_q & 0 \\ L_d & 0 & M_f \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_f \end{bmatrix}$$

$$[V] = [R][I] + [L] \frac{d}{dt} [I] + \omega [A][I]$$

III-3-4 Etablissement des équations mécanique dans les axes dq :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P (\varphi_d I_q - \varphi_q I_d)$$

$$C_{em} - C_r - f \omega_m = J \frac{d\omega_m}{dt}$$

Conclusion

Dans ce passage nous avons établis les équations de la machine synchrone et on a tiré les modelés nécessaires, qu'on va utiliser pour la simulation.

Chapitre III : Modélisation de la machine synchrone

Nous avons simplifié les équations mécaniques, électriques et magnétiques de la MS, grâce notamment à certaines hypothèses simplificatrices puis en utilisant la transformé de Park, pour passer d'un système triphasé vers un système biphasé.

Chapitre VI : Simulation de l'onduleur à commande MLI et du moteur synchrone

Introduction

Dans ce chapitre nous allons donc procéder à leur schématisation sur SIMULINK, et effectuer les simulations nécessaires, afin de représenter leurs comportements.

La simulation représente l'étape logique à suivre après la modélisation.

IV-1 Onduleur

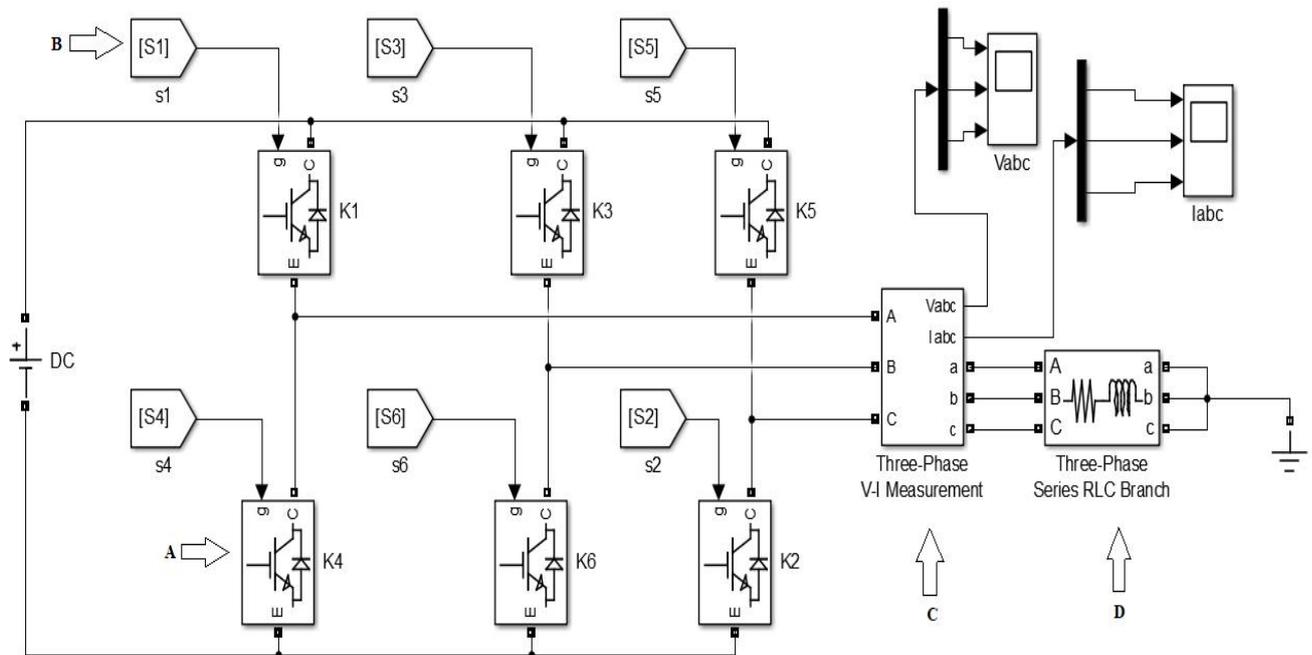


Figure 4 1 Schéma bloc onduleur triphasé.

IV-1-1 Description du schéma

- **(A) Transistor**
Lors de cette simulation on a utilisé des transistors IGBT (composant hybride qui combine le meilleur des transistors MOSFET et du BJT).
Le but étant d'avoir un signal aussi proche que possible du sinusoïdal, pour ce faire, les transistors jouent le rôle d'interrupteurs commandables via la Modulation de largeurs d'impulsions
- **(B) Bloc From**
Intermédiaire à l'utilisation de lignes physiques, il sert à raccorder la commande MLI à l'onduleur par des transmissions de signaux.
- **(C) Multimètre**
Pour avoir à la fois la tension V_{ABC} et les courants I_{ABC} , graphiquement représentés dans les Scopes.
- **(D) Charge RL.**

IV-2 Commande MLI

La commande MLI se fait par la comparaison de deux signaux :

- 1- Signal porteuse.
- 2- Signaux modulatrices.

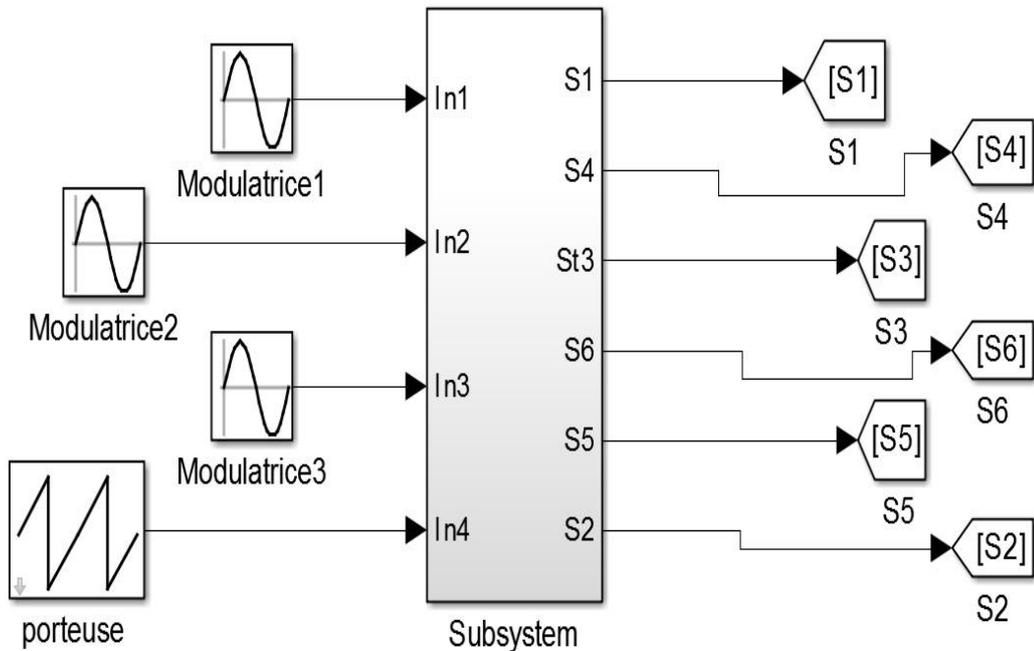


Figure 4.2:Schéma blocs de la commande MLI.

IV-2-1 Description du schéma

- La modulatrice

Représentel'image de la sinusoïdale qu'on désire à la sortie de l'onduleur, ce signal est modulable en amplitude et en fréquence.

- La porteuse

On a utilisé un signal dents de scie, il définit la cadence des interrupteurs de l'onduleur, contrairement au signal de référence, il est de haute fréquences.

- GoTo [S1 S2 S3 S4 S5 S6]

Sortie du signal de la commande MLI, il représente le départ du signale vers le **bloc FROM** de l'onduleur.

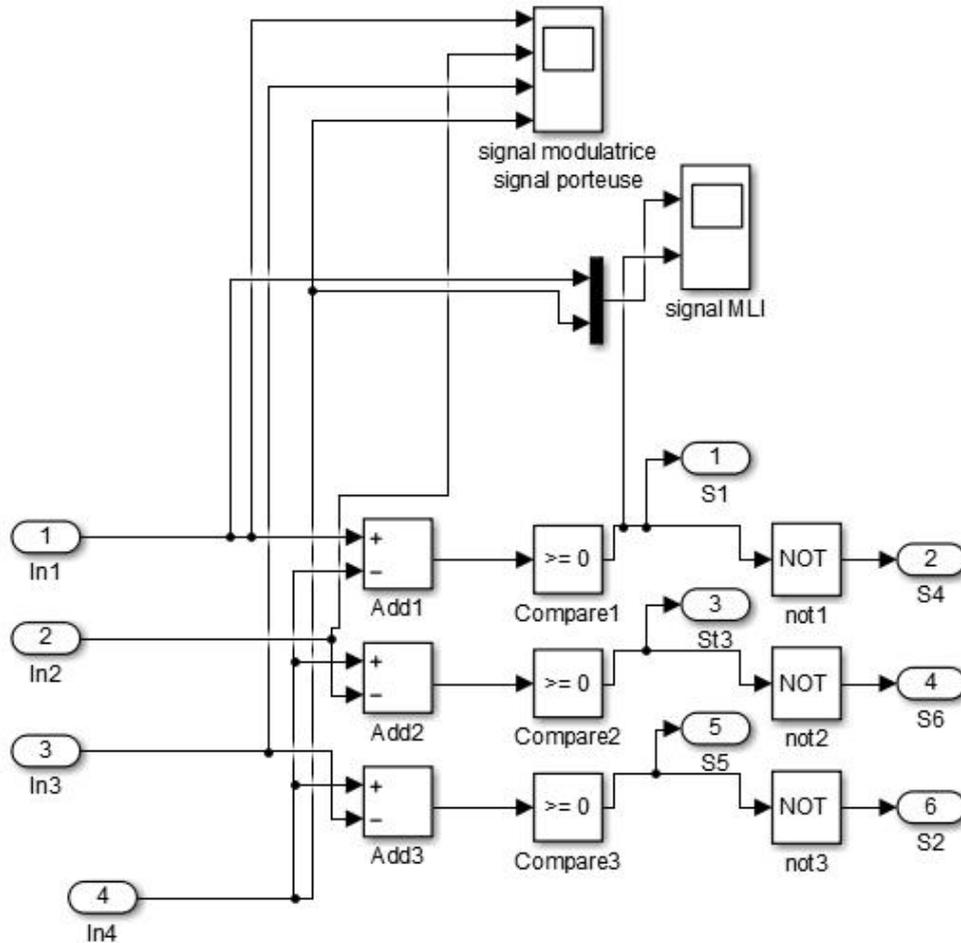


Figure 4.3: Schéma blocs de la comparaison des signaux.

IV-2-2 Description du schéma

- Add

Sert à la soustraction des deux signaux porteuse et modulation entre eux.

Si la tension arrivant dans le + est supérieure à celle arrivant dans le -, on aura un niveau haut à la sortie, et inversement, on aura un niveau bas.

- Compare to 0

Compare le signal d'entrée à 0, on a la sortie une fonction de modulation FM.

- YES /NOT

Porte logique utiliser afin d'obtenir des deux fonctions FM et \overline{FM} , pour contrôler l'ouverture et fermeture des transistors de l'onduleur.

IV-2 Association Onduleur / MLI

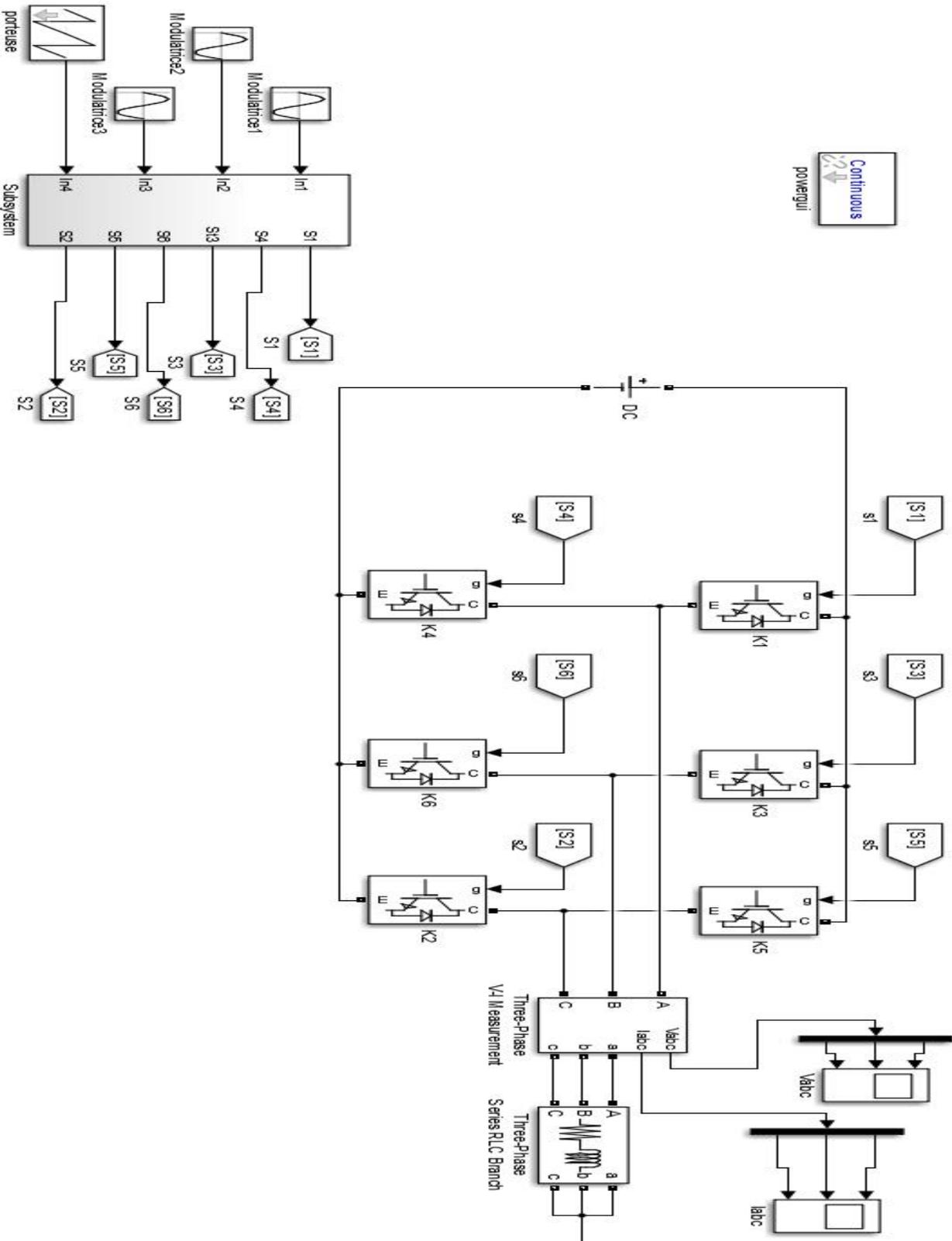


Figure 4.4: Schéma blocs onduleur à commande MLI.

IV-3 Résultats de la simulation

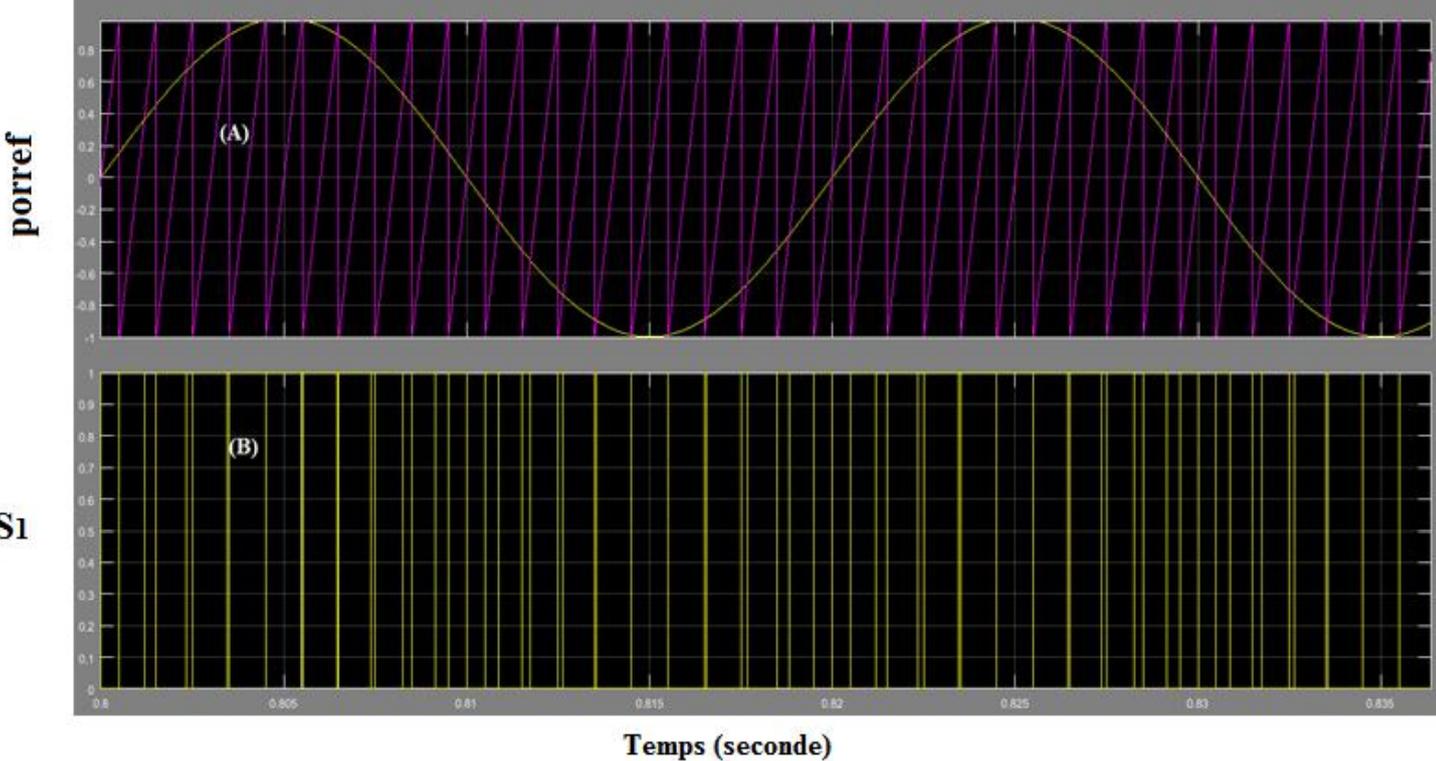


Figure 4.5: (A) Signal porteuse + modulatrice / (B) signal MLI.

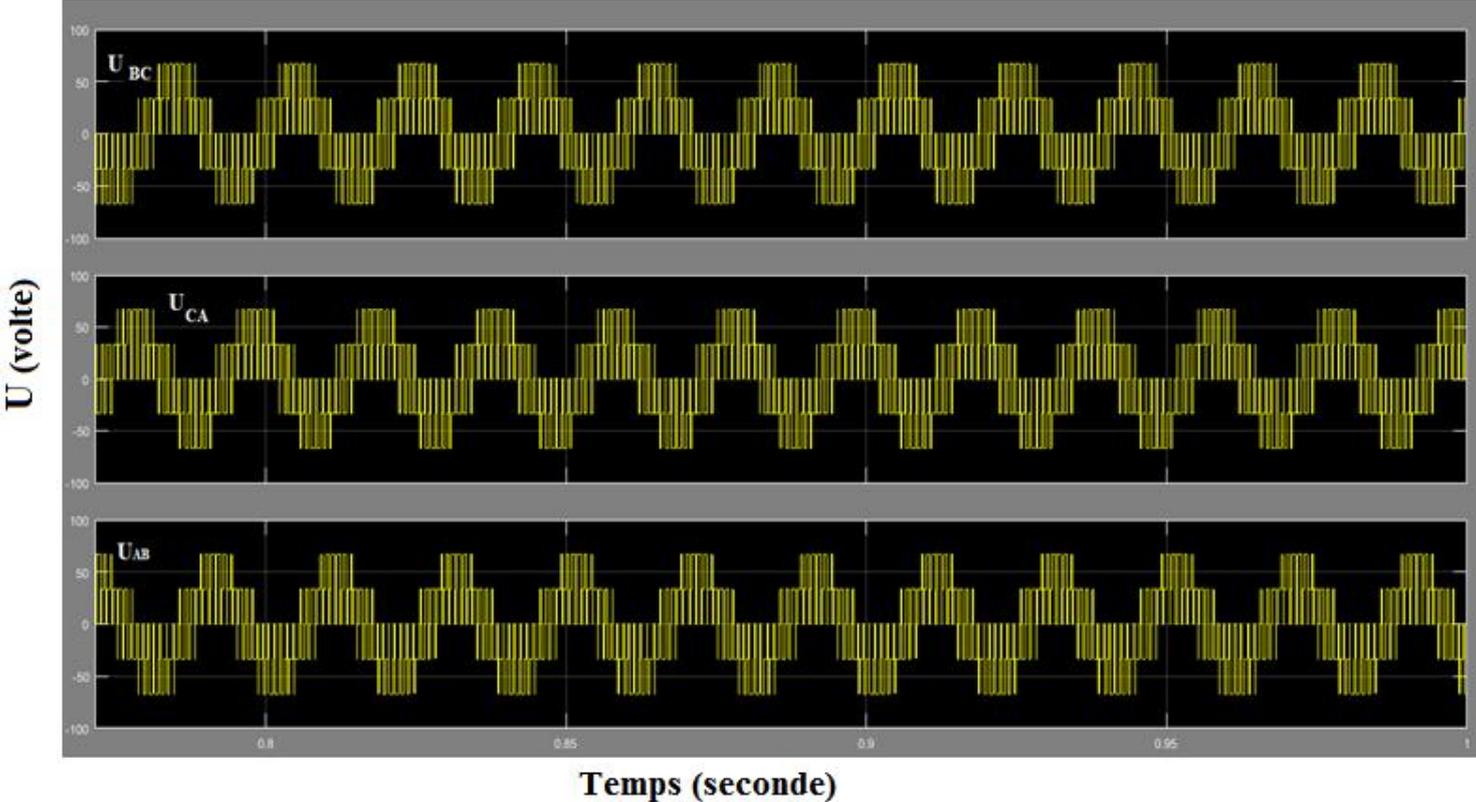


Figure 4.6: Signal sortie de l'onduleur V_{ABC}

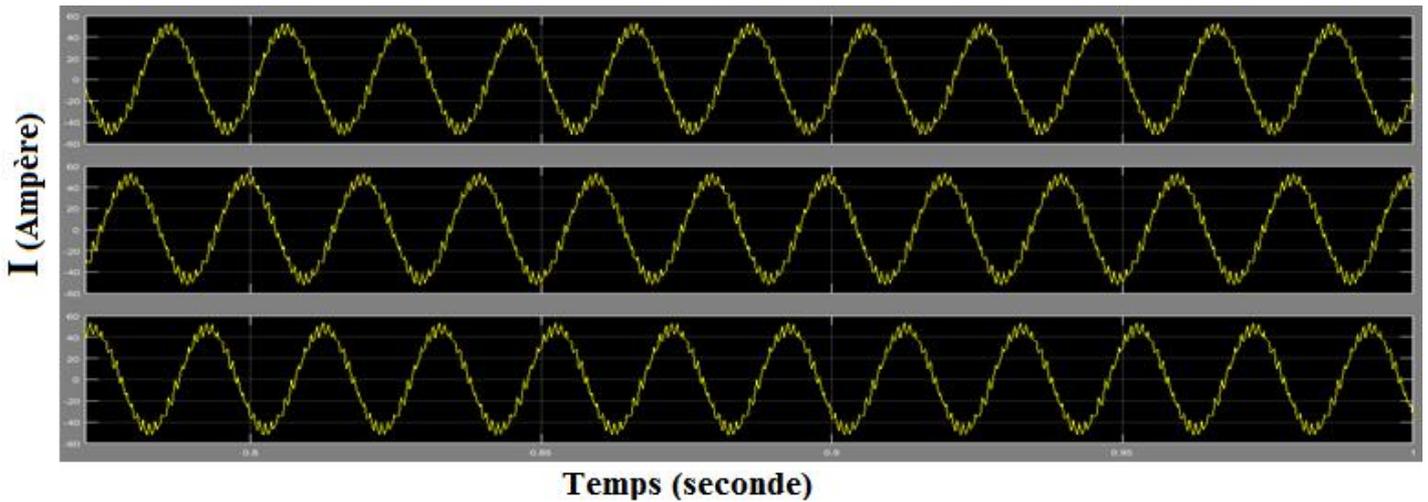


Figure 4.7: Courants à la sortie de l'onduleur I_{ABC} .

Interprétation des graphes

➤ Graphe 1(Signal MLI)

La forme de la fonction de modulation est déterminée par la **superposition** des deux signaux porteuse (dents de scie) et modulatrice (sinusoïdale).

Quand la porteuse a une tension supérieure à la modulante, la fonction de modulation est égale à 0. Ensuite, la porteuse devient inférieure à la modulante FM est égale à 1.

L'opération se répète jusqu'à l'obtention du signal MLI.

➤ Graphe 2 (Signal de tension à la sortie de l'onduleur)

L'obtention des trois phases est dû à la commutation des interrupteurs par paires, afin de diriger le courant vers les voies d'alimentations et de retour, de sorte que le moteur subisse un courant alternatif.

Ordre d'ouverture des Transistors

K₁		K₄	
K₆	K₃		K₆
K₅	K₂		K₅

- **K₁ et K₆ et K₅ fermés**

$$U_{AB} = E$$

$$U_{BC} = - E$$

$$U_{CA} = 0$$

- **K₁ et K₆ et K₂ fermés**

$$U_{AB} = E$$

$$U_{BC} = 0$$

$$U_{CA} = -E$$

- **K₁ et K₃ et K₂ fermés**

$$U_{AB} = 0$$

$$U_{BC} = E$$

$$U_{CA} = -E$$

- **K₄ et K₃ et K₂ fermés**

$$U_{AB} = -E$$

$$U_{BC} = E$$

$$U_{CA} = 0$$

- **K₄ et K₃ et K₅ fermés**

$$U_{AB} = -E$$

$$U_{BC} = 0$$

$$U_{CA} = E$$

- **K₄ et K₂ et K₆ fermés**

$$U_{AB} = 0$$

$$U_{BC} = -E$$

$$U_{CA} = E$$

➤ **Graphe 03 (Courants à la sortie de l'onduleur)**

On remarque que le courant est sinusoïdale et lisse, cela est dû à l'effet de la bobine (Filtre passe Bas).

IV-4 Machine Synchrone

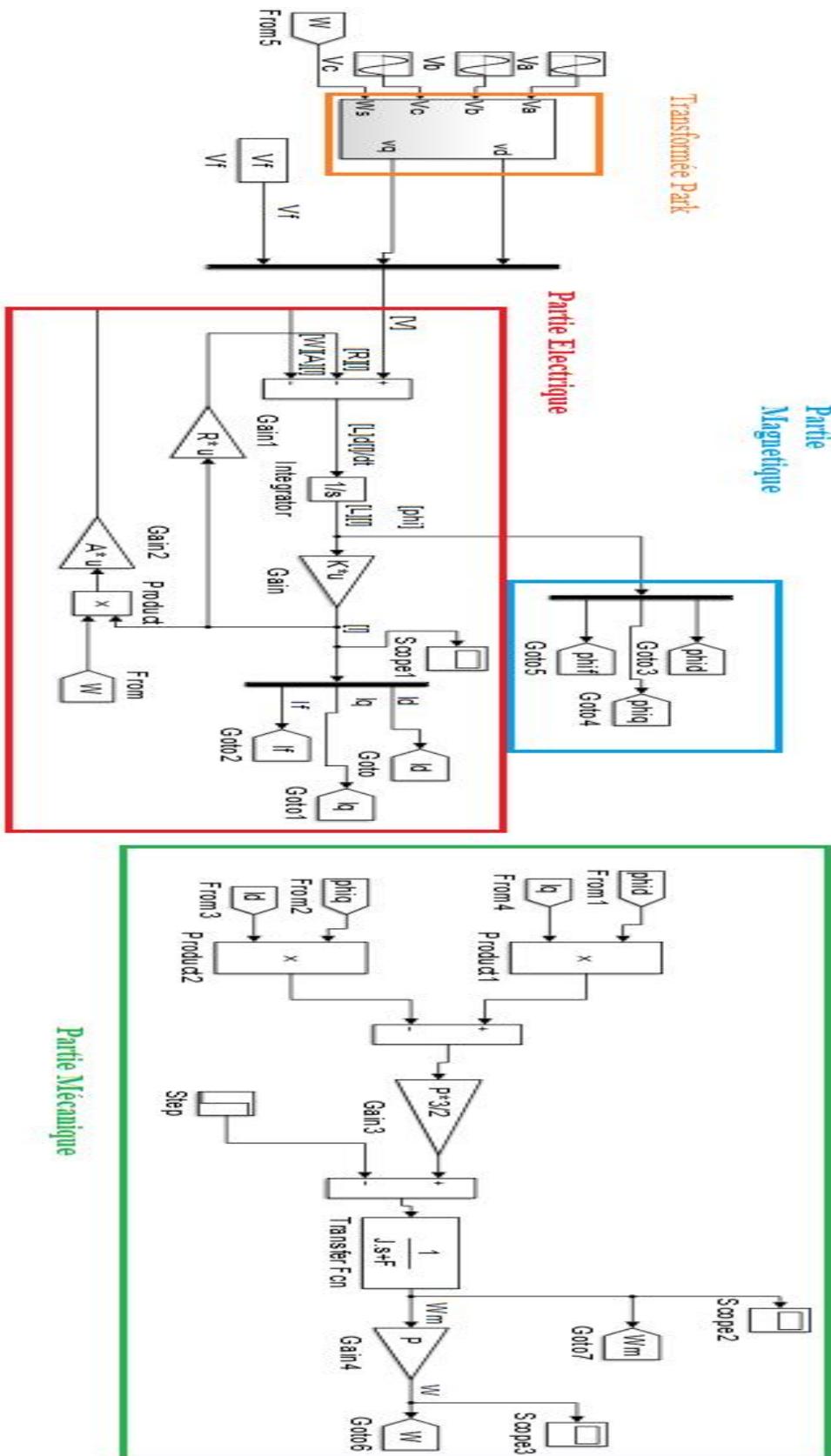


Figure 4.8: Schéma bloc de la machine synchrone

IV-4-1 Description du schéma

- **Partie Electrique**

Ici on a schématisé l'équation électrique suivante :

$$[V] - [R][I] - [w][A][I] = [L] \frac{d(I)}{dt}$$

Qu'on intègre ensuite pour avoir :

$$[L][I] (\text{Partie magnétique } [\Phi])$$

Multiplier par un gain :

$$\frac{1}{L}$$

Pour enfin obtenir le courant [I].

Pour revenir à la partie : $[V] - [R][I] - [w][A][I]$ à partir du [I] :

- On multiplie par un gain qui représente la résistance [R].

$$[R][I]$$

- On multiplie par un second gain qui représente ω électrique [W] x [A]

$$[R][I][A]$$

- **Partie Magnétique**

$$[L][I]$$

- **Partie Mécanique**

Ici on a schématisé l'équation suivante :

$$C_e - C_r - f Wm = d \frac{dWm}{dt}$$

Avec :

$$C_e = \frac{3}{2} P [Q_d I_Q - Q_d I_d]$$

De l'équation mécanique on Qd :

- Grace au **bloc Product** on multiplie par I_d et- I_d
- Puis grâce au **bloc sommateur** on va les additionner on aura donc :

$$Q_d I_Q - Q_d I_d$$

- On multiplie par un gain 3 de $\frac{3}{2} P$

$$\frac{3}{2} P [Q_d I_Q - Q_d I_d]$$

Maintenant qu'on a le C_e

- on soustrait C_r via le **bloc STEP** :

$$C_e - C_r$$

Chapitre IV :Simulation

- Le $C_e - C_r$ représentera par la suite l'entrée de notre fonction de transfert :

$$\frac{1}{js + F}$$

- La sortie = W_m (pulsation mécanique)

Pour enfin $W_m \times$ le nombre de pair de pôles nous donnera la vitesse de rotation du moteur W .

$$[W] = [W_m] \times [P]$$

- **Transformée de Park**

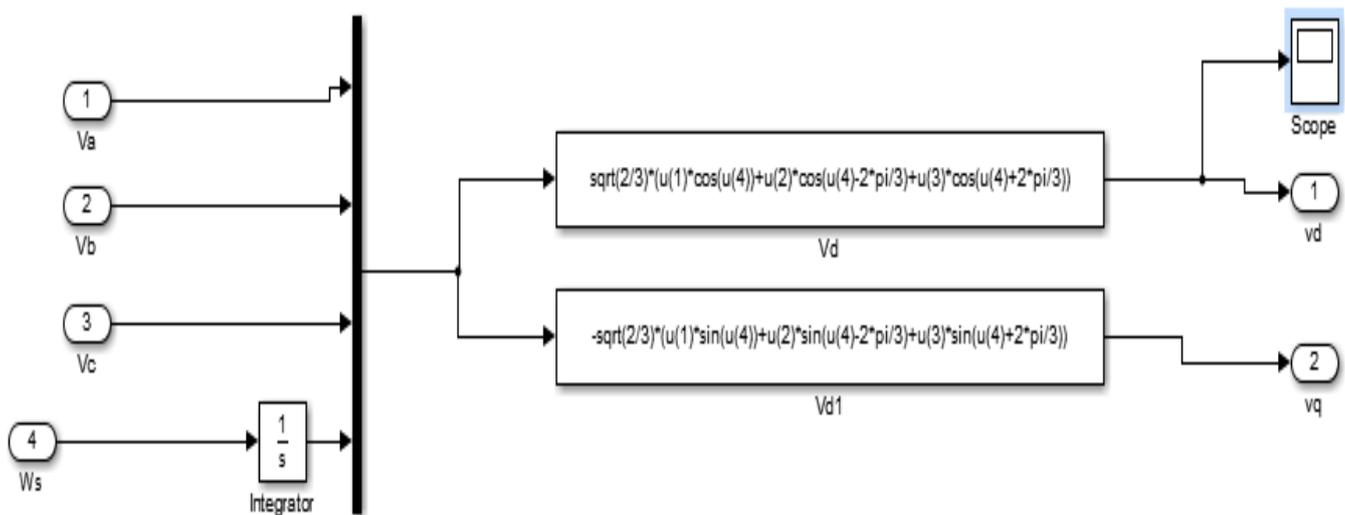


Figure 4.9: Schéma bloc de la transformation de Park

- Ici on a simplement utilisé **la transformée de PARK** dans les **bloc Fonction**.

IV-4-2 Résultats des graphes

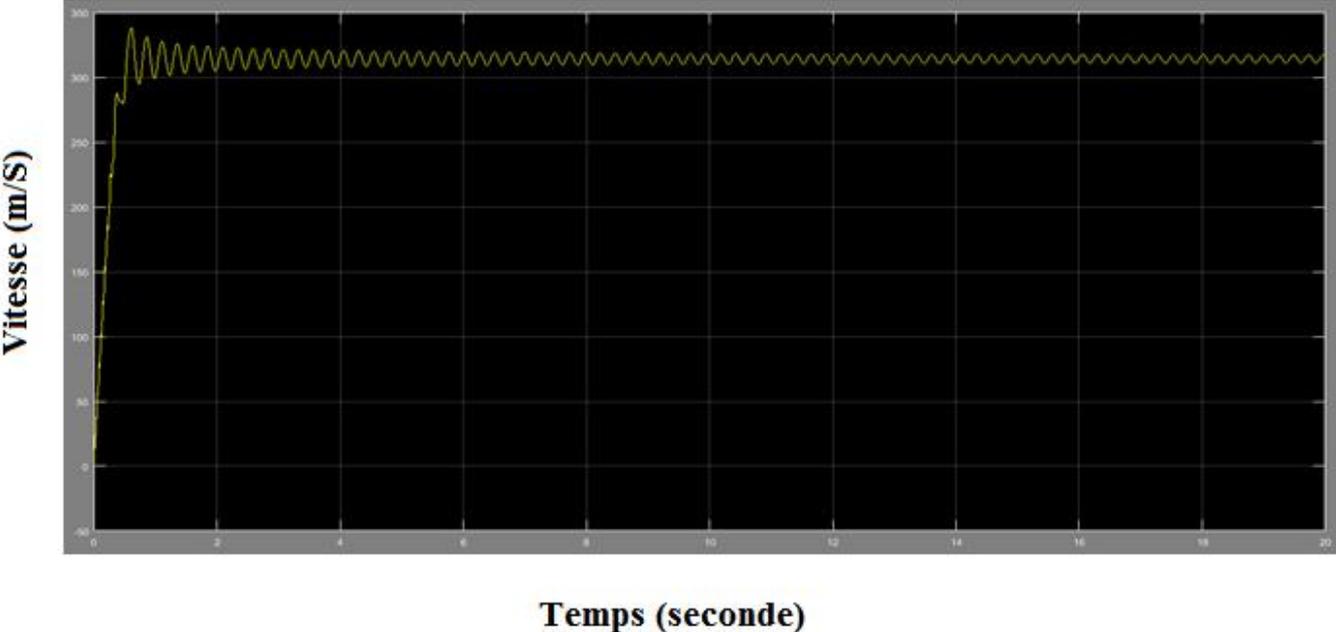


Figure 4.10: Vitesse sans charge

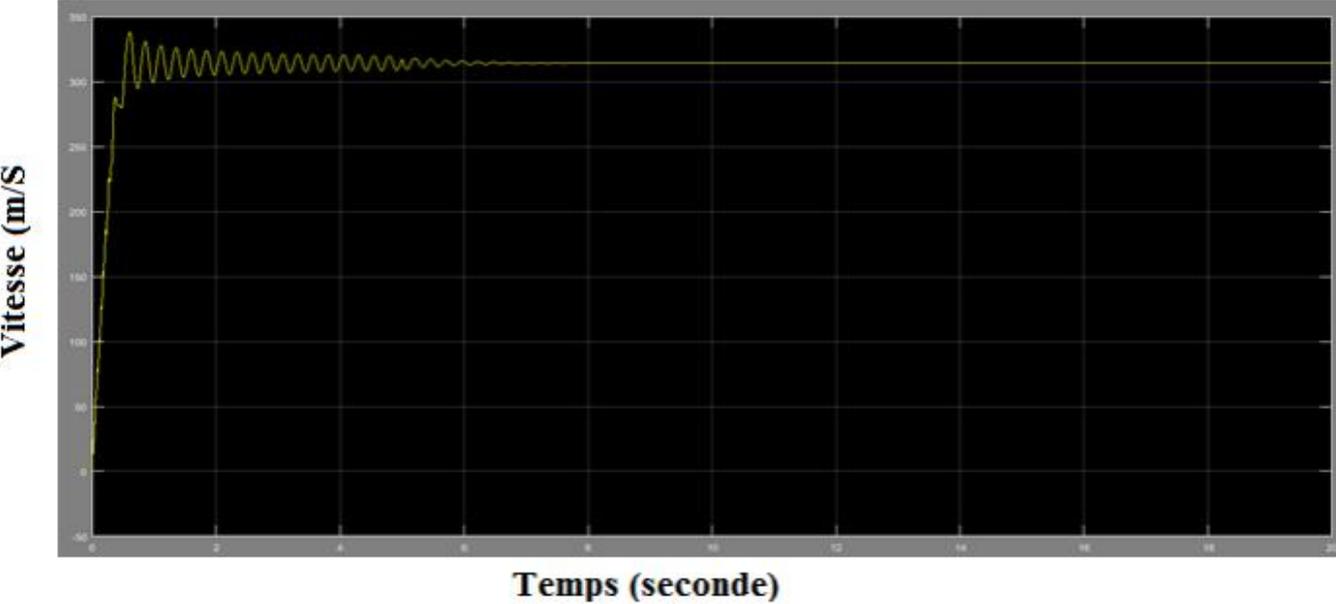


Figure 4.11: Vitesse avec charge de 20 N.M

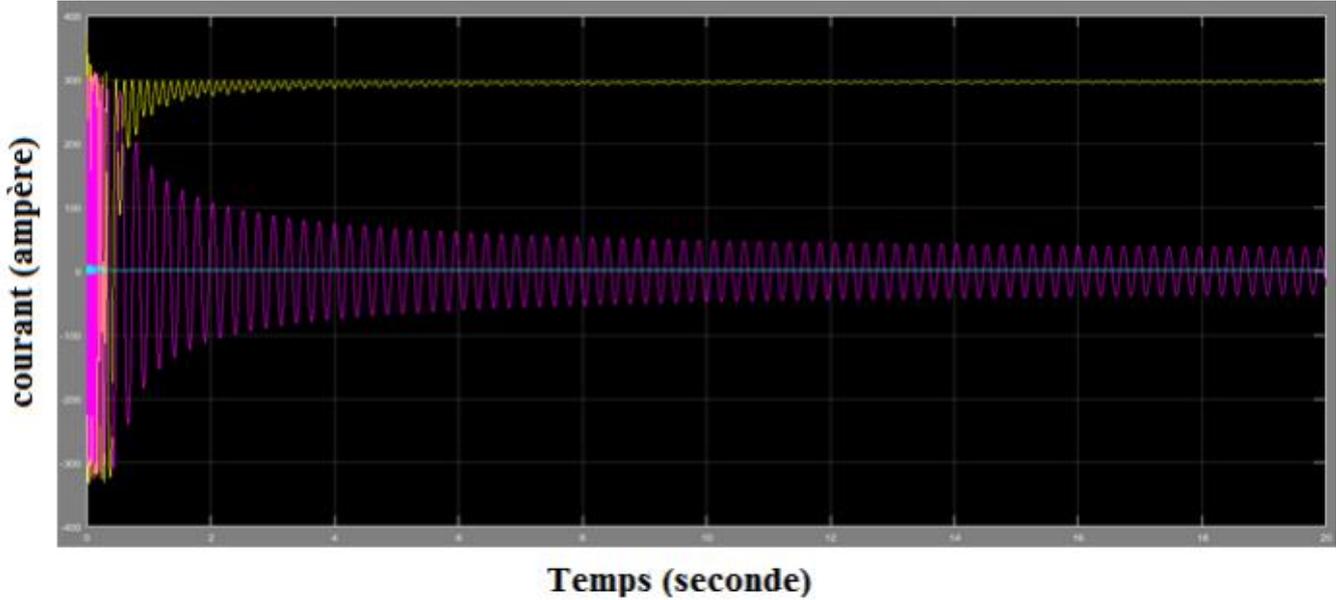


Figure 4.12: Courant sans charge

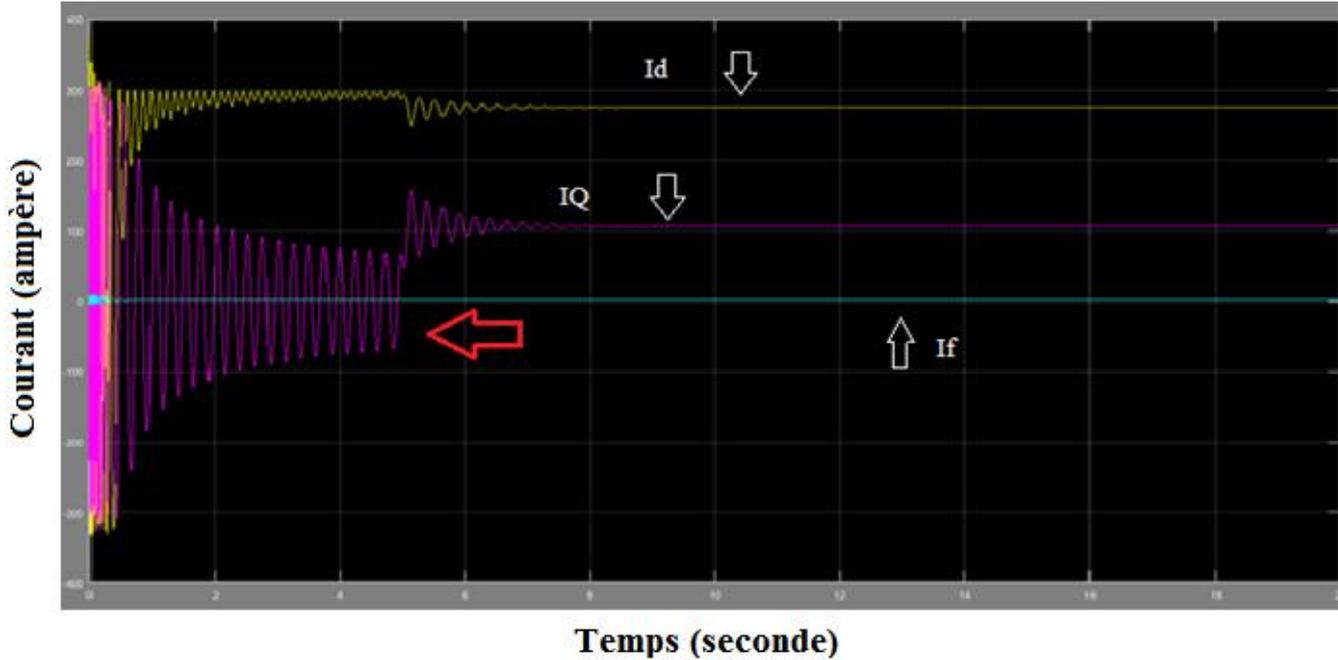


Figure 4.13: Courants avec charge

IV-4-3 Interprétation des résultats

Lors des phases de démarrage la machine a besoin d'une forte tension entre $t \in] 0 ; 1]$.
 $t \in [2 ; 20]$ la vitesse se stabilise (mais non constante) quand la machine atteint sa **vitesse de synchronisme**.

Lors de l'essai avec charge, on remarque que la stabilisation de la vitesse, se fait de manière plus concrète (moins d'ondulation) à $t = 5s$ (temps au quel on rajoute la charge).

$t \in [6 ; 20]$: **fonctionnement avec charge** : la vitesse se stabilise complètement et devient constante (régime permanent).

De même pour les courants

A vide :

- La phase de démarrage, nécessite une forte demande en courants à $t \in] 0; 1]$. pour ensuite se stabiliser pour les courants statoriques I_d et I_Q .
- Le courant I_f est constant (courant continu)

Avec charge :

- A $t = 5s$, on rajoute la charge, on remarque une variation des courants statoriques I_d et I_Q pour ensuite se stabiliser à $t \in [7 ; 20]$ en régime permanent .
- I_f est constant.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons procédé à la simulation de l'onduleur à commande MLI et de la machine synchrone sur SIMULINK à partir effectué de la modélisation du chapitre 03.

Cependant lors de l'association Machine + Onduleur à commande MLI, nous avons rencontré un bon nombre de problèmes.

Nous sommes donc dans l'incapacité de procédés à la simulation, pour confirmer les résultats théoriques obtenus ultérieurement.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Les travaux présentés lors de ce mémoire sont consacré à l'étude et à la modélisation de l'alternateur, à l'image du générateur présent au sein de la centrale RAS DJINET II.

En premier lieu la réalisation nous a permis une immersion en entreprise et d'apprendre un peu plus sur le processus de production de l'énergie électrique en cycle combiné, du simple pompage d'eau de mer, à l'obtention d'électricité qui sera par la suite reversée au réseau de distribution.

En outre, on s'est intéressé au générateur de la centrale, en sa qualité de machine synchrone. On a donc abordé les principaux composants de la machine ainsi que son fonctionnement, mais aussi à la problématique de la variation du couple et de la vitesse propre à la machine synchrone. Parmi les solutions, on a choisi l'association à un convertisseur de fréquence statique de type onduleur commandé par modulation de largeur d'impulsion MLI.

Pour bien comprendre l'utilité d'un tel système, on a procédé à des rappels concernant les onduleurs de tension et une présentation du système MLI.

Après s'être penché sur la partie théorique, et dans le but de procéder à une simulation du système, on a procédé à la modélisation de l'onduleur puis à celle de la machine synchrone, un moyen pour nous de mieux comprendre le fonctionnement en des termes mathématique.

Suite à la modélisation, et après avoir obtenu les équations mathématiques du système, on a procédé à la simulation sur SIMULINK. Premièrement, chaque système indépendamment de l'autre, ainsi que l'analyse des résultats, pour ensuite combiné les deux : onduleur MLI plus la machine synchrone.

Cependant nous avons rencontré des problèmes lors de l'association des deux ensembles, pour vérifier et venir assoir la partie théorique.

L'analyse des résultats de la simulation nous a permis de représenter le comportement de la machine synchrone, et celui de l'onduleur MLI.

Les résultats théoriques sont convainquant et répondent de manière positive à notre problématique.

Enfin, ce travail nous a permis de nous familiariser avec le monde de l'entreprise, la commandes des processus industriels complexes, tel que la variation de vitesse de la turbine à gaz de la centrale RAS DJINET et à parfaire nos connaissances théoriques, modélisation, simulation pour la machine synchrone et la commande par les variateurs de fréquences.

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] C. R. Djinat, *Documentation de la centrale*, Cap Djinat; Boumerdes.
- [2] r.bourgeois , «r.bourgeois automotive alternator stator,» [En ligne]. Available: <https://www.rbourgeois.com/products-services/automotive-alternator-stators/>. [Accès le 07 juin 2021].
- [3] Projet meteosat Lycée polyvalent regional Pape Clément de PESSAC (33), «PROJET METEOSAT,» 2005. [En ligne]. Available: <http://meteosat.pessac.free.fr/>. [Accès le 09 juin 2021].
- [4] u. d. Louvain, «ELECTROTECHNIQUE 2753,» Louvain, 2012.
- [5] B. Makhlof, *Etude, modélisation et simulation d'un variateur de vitesse en vue de commander un Moteur asynchrone triphasé à cage*, Boumerdes: Universié M'hamed Bouguerra; Boumerdes, 2007.
- [6] k. abdlghani, *Etude du système lancement des alternateur*, boumerdes : Université M'hamed Bougara - Faculté de Technologie, 2011.
- [7] H. Kaddour, *Etude de la machine synchrone autopilotée : Modélisation et simulation*, Oran: Université des sciences et de la technologies d'Oran, 2012.
- [8] T. Lubin, *Modélisation et commande de la machine synchrone à réductance variable : prise en compte de la saturation magnétique*, Nancy: Université Henri Poincaré; Nancy I, 2015.
- [9] F. Sophie, *Comparaison des performances électriques d'un onduleur triphasé deux niveaux à commandes directes et indirectes connecté au réseau*, Lille: PRES Université Lille Nord de France, 11 Octobre 2013.
- [10] B. Salamé, *Mesure de Charges dans les Matériaux Semi-conducteurs et les Métaux avec une Méthode Elasto-électrique*, Paris: Université PIERRE ET MARIE CURIE, 2015.
- [11] «GÉNIE ÉLECTRIQUE,» Srimi G, 2021. [En ligne]. Available: <http://forge.blogspot.com/2015/07/le-thyristor-scr.html>.
- [12] «Chouaib Labiod,» 2020 mai 5 mai 2020. [En ligne]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=t95VJ2hr_X0&t=1143s.

BIBLIOGRAPHIE

Annexes

Annexes

Les paramètres de la machine synchrone pour notre étude sont :

Tension rotorique $V_f=220$

Résistance statorique $R_s=0.48$;

Moment d'inertie $J=0.263$;

Coefficient de fréquence $F=0$;

Nombre de paires de pôles $P=3$;

Résistance rotorique $R_f=125$;

Mutuelle rotorique $M_f=0.0236$;

inductance directe $L_d=0.00231$;

inductance quadratique $L_q=0.00231$;

inductance rotorique $L_f=0.924$;

Matrice des résistances $R=[R_s \ 0 \ 0 ; 0 \ R_s \ 0 ; 0 \ 0 \ R_f]$;

Matrice des inductances $L=[L_d \ 0 \ M_f ; 0 \ L_q \ 0 ; M_f \ 0 \ L_f]$;

$A=[0 \ -L_q \ 0 ; L_d \ 0 \ M_f ; 0 \ 0 \ 0]$;