

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES
FILIERE : ELECTROTECHNIQUE
SPECIALITE : COMMANDE ELECTRIQUE



FACULTE : TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE
N° D'ORDRE :

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU
DIPLOME DE MASTER**

Présenté par :
ABDELKEBIR MOHAMMED CHAMES EDDINE
BOUCHELAGHEM SAMIR

THEME :

**Mise en Marche d'un Groupe Turboalternateur par un
Variateur de Vitesse à Trois Niveaux dans une Centrale
Thermique (SPE-SONALGAZ de M'sila)**

BENYETTOU Loutfi	UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA	Président
KHODJA Djalal Eddine	UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA	Encadreur
CHERIF Bilal Djameleddine	UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA	Examineur

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2021/ 2022

Remerciements

Avant tout, nous tenons à remercier notre Dieu de nous avoir donné la foi et le courage de mener à terminer notre travail.

*A notre encadreur Dr. **KHODJA Djalal Eddine** d'avoir accepté de nous encadrer et de nous suivre durant toute cette période par ses conseils et ses orientations.*

Nos remerciements aux membres de jury pour l'honneur qu'ils me font en participant au jugement de ce travail.

*Nos remerciements les plus sincères sont adressés à monsieur **ZAITER Ridha**, ingénieur à la centrale thermique de SPE M'sila pour nous encadrer dans l'entreprise, et par ses conseils et ses orientations.*

Nous remercions aussi tous les enseignants du département génie électrique qui a contribué à notre formation.

Enfin, nous adressons nos respectueux remerciements à tous nos amis et collègues pour tout le soutien moral.

Dédicace

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Au nom **d'ALLAH** tout puissant pour tous les bienfaits
qu'il ne cesse d'accomplir dans nos vies.

Je dédie ce travail :

*A mes parents qui m'ont soutenu durant toute mon
existence, que dieu leur procure bonne santé et longue vie.*

A mes frères et sœurs,

*A mon binôme Samir qui a partagée avec moi ce travail,
A tous ce qui ont enseigné moi au long de ma vie scolaire,*

A tous mes amis,

*A tous mes amis d'études, et surtout à tous mes amis du
Département de génie électrique Promotion 2022,*

A vous chers lecteurs.

Mohammed Chames Eddine

Dédicace

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents, que dieu les garde et les protéger pour leurs soutien moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés, A mes frères, A ma sœur.

*A ma chère épouse, pour sa patience, sa coopération et sa compréhension, A mes chers enfants **IMANE** et **MOUNCIF**.*

*A mon binôme : **Mohammed Chames Eddine**, et mes chers amis **Belkacem**, **Badreddine**.*

A tous les amis d'études surtout ceux commande électriques promotion 2022.

BOUCHÉLAGHÈM Samir

ملخص:

تركز هذه الرسالة على دراسة مبدل السرعات الساكن لمحطة الطاقة الكهربائية في ولاية المسيلة، الذي هو نظام قيادة بسرعة قابلة للتعديل مصمم خصيصا لبدء تشغيل الوحدة تربين-ضاغط.

يمون هذا المبدل الجزء الثابت للمنوب بجهد متغير التردد، الذي يعمل في هذه الحالة كمحرك تزامني، من أجل تسريع الجذع إلى غاية سرعة الاكتفاء الذاتي وفقاً لتسلسلات الإقلاع (المسح، الإشعال، التسخين)، بعد مستوى السرعة هذا، يتم إيقاف تشغيل مبدل السرعات وفصله، ويصبح التوربين مستقلاً ذاتياً ويضمن تطور السرعة إلى غاية الوصول إلى سرعة الخدمة.

نطبق تقنيتين للتحكم: تحكم شعاعي وتحكم سلمي على مبدل السرعات، ووفقاً لنتائج المحاكاة، فإن التقنيتين المدروستين هما تقنيتان متينتان، وتسمحان بالحصول على أداءات جيدة ديناميكية وثابتة.

Résumé :

Ce mémoire porte sur l'étude d'un variateur de vitesse statique de centrale électrique de la wilaya de M'sila, qui est un système d'entraînement à vitesse réglable spécialement conçu pour démarrer un groupe turbocompresseur.

Ce variateur fournit une tension à fréquence variable au stator de l'alternateur, qui fonctionne dans ce cas comme un moteur synchrone, pour accélérer la ligne d'arbre jusqu'à la vitesse d'auto-sustentation selon les séquences de démarrage (purge, allumage, préchauffage), après ce niveau de vitesse éteinte et le démarreur est déconnecté, la turbine devient autonome et assure l'évolution de la vitesse pour atteindre la vitesse de service.

On applique deux techniques de commande : vectorielle et scalaire sur ce variateur. D'après les résultats de simulation, les deux techniques étudiées sont robustes et permettent d'obtenir de bonnes performances dynamiques et statiques avec petit déférence.

Mots clés :

Variateur de vitesse ; Machine synchrone ; Commande vectorielle ; Commande scalaire ;

Abstract:

This dissertation studies a static speed inverter located in M'sila power station. This equipment is an adjustable speed drive system designed specially to start a turbo-compressor unit.

It supplies a variable frequency voltage to the alternator stator, which in this case operates as a synchronous motor for accelerating the line shaft to self-sustaining speed according to the start sequences (purging, ignition, preheating). After this speed level, the starter is off and disconnected, the turbine becomes autonomous and ensures the evolution of the speed to reach the service speed.

Vector and scalar control techniques applied on this variator. The simulation results showed the robustness of these two techniques by getting good dynamic and static performances.

Table des matières

Table des matières.....	i
Liste des Figures.....	iv
Liste des Tableaux.....	vi
Glossaire.....	vii
Nomenclature	viii
Introduction générale	1

Chapitre I: Etude descriptive de l'ensemble Groupe Turboalternateur

I.1	Introduction.....	3
I.2	Description de la centrale thermique de SPE-SONALGAZ MSILA	4
I.2.1	Situation de la centrale	4
I.2.2	Caractéristiques générales de la centrale	4
I.3	Groupe de production d'énergie électrique.....	5
I.3.1	Poste Gaz	5
I.3.2	Le turbo-compresseur	7
I.3.2.1	Le compresseur	8
I.3.2.2	La chambre de combustion	9
I.3.2.3	La turbine de type V94.3A.....	10
I.3.2.4	Le système d'échappement	11
I.3.3	L'alternateur de type WY23Z-109.....	11
I.3.3.1	La carcasse du stator	12
I.3.3.2	Noyau magnétique statorique.....	12
I.3.3.3	Enroulement stator	13
I.3.3.4	Corps rotor.....	13
I.3.3.5	Enroulement rotor	14
I.3.3.6	Ventilateurs	15
I.3.4	Excitatrice de type statique	15
I.3.5	Disjoncteur du groupe a commandé à ressorts de type FKG1N	16
I.3.6	Transformateur de puissance-TP-	17
I.3.7	Les auxiliaires	18
I.3.8	Séquences de démarrage de la turbine à gaz.....	19
I.4	Conclusion	20

Chapitre II : Description du variateur de vitesse utilisé pour le lancement du groupe turboalternateur

II.1	Introduction.....	21
II.2	Description général du variateur de vitesse SFC	21
II.2.1	Constitution du variateur de vitesse SFC	22

II.2.1.1	Transformateurs de démarrage isolé en résine	22
II.2.1.2	Sections de puissance et de contrôle	24
A)	Compartiment +11	24
B)	Compartiment +12	25
C)	Compartiment +13	26
D)	Compartiment +14	27
D.1)	Panneau de contrôle	27
D.2)	PLC et circuits au relais à lui réuni.....	31
II.3	Caractéristique de démarrage.....	31
II.4	Courant d'excitation en démarrage.....	32
II.5	Protection électriques dans la phase de démarrage.....	33
II.6	Interface avec le système de contrôle de la turbine	33
II.7	Conclusion	33

Chapitre III : Modélisation et commande de l'ensemble convertisseur-machine électrique

III.1	Introduction.....	34
III.2	Modélisation de la Machine Synchrone à rotor bobiné	34
A)	Modèle linéaire	35
B)	Modèle de Park	35
III.2.1	Les hypothèses simplificatrices	36
III.2.2	Equations électriques et magnétique.....	37
III.2.3	Equation mécanique.....	38
III.2.4	Transformation de Park.....	38
III.2.5	Equations de Park dans les axes d et q, liées au rotor.....	39
III.2.6	Equations des flux et courants	40
III.2.7	Schéma équivalent de la machine synchrone.....	40
III.3	Modélisation de l'onduleur à trois niveaux.....	41
III.3.1	Structure de l'onduleur à trois niveaux.....	41
III.3.2	Modélisation du fonctionnement d'un bras d'onduleur à trois niveaux	41
III.3.3	Différents configuration du bras d'onduleur à trois niveaux	42
III.3.4	Modèle de commande des onduleurs à trois niveaux	44
III.3.5	Fonction de commutation	44
III.3.6	Fonction de conversion	45
III.4	Stratégies de commande de l'onduleur triphasé à trois niveaux.....	47
III.4.1	Modulation de largeur d'impulsion (MLI)	47
III.4.2	Caractéristique de la MLI	48
III.4.3	Stratégie de triangulo-sinusoidale à échantillonnage naturel à deux porteuses.....	49
A)	Principe de stratégie.....	49
B)	Algorithme de la commande	50
III.5	Les applications des onduleurs	51
III.6	Généralité sur Commande Vectorielle.....	51
III.6.1	Principe de la Commande Vectorielle	52

III.6.2	Stratégies de Commande Vectorielle de la MSRB	53
III.6.2.1	Commande Vectorielle Simplifiée	53
III.6.2.2	Calcul des Régulateurs de Vitesse et de Position	55
III.6.2.3	Découplage des courants I_d et I_q	56
III.7	Généralité sur la commande scalaire	58
III.7.1	Principe de la Commande scalaire	58
III.8	Conclusion	61
Chapitre IV : Simulation et interprétations de l'ensemble convertisseur-machine électrique		
IV.1	Introduction	62
IV.2	Simulation de l'ensemble convertisseur-machine électrique par la commande vectorielle.....	62
IV.2.1	Schéma bloc de l'ensemble convertisseur-machine électrique et la commande vectorielle.....	62
IV.2.2	Schéma bloc de la machine synchrone à rotor bobiné.....	63
IV.2.3	Schéma bloc de l'onduleur à trois niveaux par MLI	64
IV.2.4	Schéma bloc de la commande vectorielle.....	64
IV.2.5	Résultats de simulation	64
IV.2.6	Interprétation des résultats de la commande vectorielle	69
A)	Vitesse de rotation.....	69
B)	Couple électromagnétique	69
C)	Courant statorique i_{qs}	69
D)	Tension d'onduleur	69
IV.3	Simulation de l'ensemble convertisseur-machine électrique par la commande scalaire..	69
IV.3.1	Résultats de simulation	70
IV.3.2	Interprétation des résultats de la commande scalaire.....	74
A)	Vitesse de rotation.....	74
B)	Tension d'onduleur	74
C)	Couple électromagnétique.....	74
D)	Tension d'onduleur	75
IV.4	Conclusion	75
Conclusion générale		76
Annexe A : Les paramètres de la machine synchrone à rotor bobiné		
Annexe B : La commande DTC		
Références bibliographiques		

Liste des Figures

Figure I.1 : Image Google Maps du lieu géographique de la centrale de M'sila.....	5
Figure I.2 : Photo réelle du poste gaz prise sur site.	7
Figure I.3 : Groupe turbocompresseur Ansaldo.....	8
Figure I.4 : Photo réelle de la chambre de combustion de type annulaire prise sur site.....	10
Figure I.5 : Les quatre étages de la turbine.	11
Figure I.6 : Vue générale de l'alternateur refroidi à l'air.....	12
Figure I.7 : Photo réelle de l'enroulement stator d'un alternateur Ansaldo prise sur site	13
Figure I.8 : Rotor à pole lisse d'un alternateur Ansaldo.	14
Figure I.9 : Systeme d'excitation statique diagramme de principe.....	16
Figure I.10 : Photo réelle du transformateur de puissance prise sur site	18
Figure I.11 : Séquence de démarrage de turbine à gaz.	20
Figure II.1 : Schéma général du système SFC.....	22
Figure II.2 : Transformateurs de démarrage MBJ.	23
Figure II.3 : Armoires du puissance et contrôle de l'SFC.	24
Figure II.4 : Photo réelle de la réactance de circuit intermédiaire prise sur site.....	24
Figure II.5 : Groupe RC et fiche de démarrage.	25
Figure II.6 : Circuits puissance redresseur et onduleur.....	26
Figure II.7 : Photo réelle du panneau de contrôle prise sur site.....	27
Figure II.8 : Photo réelle du box panier prise sur site.....	28
Figure II.9 : Schéma bloc du démarreur statique SFC.....	29
Figure II.10 : Photo réelle du PLC prise sur site.....	31
Figure II.11 : Tension du générateur contre courbe de vitesse	32
Figure II.12 : Courant d'excitation en mode SFC.....	32
Figure III.1 : Représentation de machine synchrone triphasé sans amortisseurs.	36
Figure III.2 : Représentation de la MSRB sans amortisseurs dans le repère de Park.....	39
Figure III.3 : Circuits équivalents du modèle simplifié de la machine synchrone (a) axe direct, (b) axe quadrature	40
Figure III.4 : Onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC.	41
Figure III.5 : Bras de l'onduleur triphasé à trois niveaux.	42
Figure III.6 : Différents configuration du bras d'onduleur à trois niveaux.	42
Figure III.7 : Principe de la commande MLI.	48
Figure III.8 : Principe de la technique triangulo-sinusoïdale.....	50
Figure III.9 : Signaux de références et triangulaires.....	51
Figure III.10 : Machine à Courant Continu	52
Figure III.11 : Machine Synchrone	52
Figure III.12 : Schéma Bloc de la Commande en Position (vitesse) de la MSRB avec Estimation du Courant i_q	54

Figure III.13 : Schéma Bloc de la Boucle de Régulation en Cascade Position/Vitesse	55
Figure III.14 : Schéma Fonctionnel de la Régulation de Vitesse basé sur le Modèle Simplifié	55
Figure III.15 : Diagramme de Fresnel de la machine synchrone convention récepteur	59
Figure III.16 : Allure de la tension simple pour une commande 180°	60
Figure III.17 : Schéma Bloc de la Commande scalaire d'un MSRB	60
Figure IV.1 : Schéma bloc globale de la commande vectorielle	63
Figure IV.2 : Schéma bloc de la MSRB	63
Figure IV.3 : Schéma bloc de l'onduleur à trois niveaux	64
Figure IV.4 : Schéma bloc de la commande vectorielle	64
Figure IV.5 : La vitesse de rotation et la vitesse de référence en fonction du temps	65
Figure IV.6 : Le couple électromagnétique en fonction du temps.....	65
Figure IV.7 : Le courant I_q en fonction du temps.....	66
Figure IV.8 : La tension statorique simple V_a en fonction du temps	66
Figure IV.9 : Zoom sur la tension statorique simple V_a	67
Figure IV.10 : La tension statorique composée U_{ab} en fonction du temps	67
Figure IV.11 : Zoom sur la tension statorique composée U_{ab}	68
Figure IV.12 : Le courant statorique I_a en fonction du temps	68
Figure IV.13 : Schéma bloc globale de la commande scalaire	70
Figure IV.14 : La vitesse de rotation et la vitesse de référence en fonction du temps	70
Figure IV.15 : Le couple électromagnétique en fonction du temps.....	71
Figure IV.16 : Le courant I_q en fonction du temps.....	71
Figure IV.17 : La tension statorique simple V_a en fonction du temps	72
Figure IV.18 : Zoom sur la tension statorique simple V_a	72
Figure IV.19 : La tension statorique composée U_{ab} en fonction du temps	73
Figure IV.20 : Zoom sur la tension statorique composée U_{ab}	73
Figure IV.21 : Le courant statorique I_a en fonction du temps	74

Liste des Tableaux

Tableau II.1 – Les données techniques du démarreur statique SFC	21
Tableau II.2 – description des fiches présentes dans le contrôle	30
Tableau III.1 – grandeurs électriques à chacune des configurations d'un bras d'onduleur à trois niveaux à structure NPC	43
Tableau III.2 – Table d'excitation des interrupteurs de l'onduleur à trois niveaux.....	44

Glossaire

AVR	Automatic Voltage Regulator
GTCMPS	Gas Turbine Control Monitoring and Protection System
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IGV	Inlet Guide Vane
IHM	Interface Homme Machine
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
MS	Machine synchrone
MSRB	Machine synchrone à rotor bobiné
NPC	Neutral Point Clamping
OFAF	Oil Forced Air Forced
PI	Proportionnel Intégral
PLC	Programmable Logic Controller
PRV	Polyester Renforcé de fibres de Verre
SFC	Starter Frequency Converter
TG	Turbines à Gaz
TP	Transformateur principale
UPS	Uninterruptible Power Supply
VAP	Vannes anti-pompage

Nomenclature

V_{abc}	Les tensions des phases statoriques	V
θ	Déphasage entre le référentielle statorique et l'axe quadrature	rad
V_d	Tension sur l'axe d	V
V_q	Tension sur l'axe q	V
φ_{abc}	Les flux totaux à travers les bobines statorique	W_b
φ_f	Flux de l'inducteur	W_b
R_s	Résistance d'une phase statorique	Ω
R_f	Résistances de l'inducteur	Ω
L_s	L'inductance propre statorique	H
M_s	la mutuelle entre phase statorique	H
M_{sf}	L'inductance mutuelle entre phases statoriques et l'enroulement du rotor.	H
M_{fs}	L'inductance mutuelle maximale stator-rotor	H
L_d	Inductance synchrone longitudinale	H
L_q	Inductance synchrone transversale	H
L_0	Inductance homopolaire	H
L_f	Inductance propre de l'inducteur	H
C_{em}	Couple électromagnétique	N.m
f	Coefficient de frottement	N.m.s/rad
ω	Vitesse électrique	rad/s
Ω	Vitesse mécanique de rotation du rotor	rad/s
V_{dc}	La tension d'alimentation continue de l'onduleur	V
V_{bat}	La tension d'alimentation continue du hacheur	V
P	Nombre de paires de pôles de la machine	

Introduction générale

Introduction générale

Le monde moderne a besoin de l'énergie en général et l'énergie électrique en particulier. Pour satisfaire la demande en énergie électrique, qui ne se trouve pas dans la nature sous une forme directement exploitable, il est nécessaire de partir d'une forme d'énergie de base que l'on appelle «énergie primaire», et de la transformer.

L'énergie électrique est produite donc par des alternateurs accouplés à des moteurs ou turbines dont le fonctionnement fait appel à une énergie thermique, hydraulique ou autre (éolienne, géothermique, solaire, ...). La turbine, par définition, est une machine rotative qui convertit l'énergie primaire (un courant d'eau, vapeur, ou de gaz), en énergie mécanique. Plus généralement, c'est un organe permettant la détente d'un fluide en recueillant son énergie sous forme mécanique. Cette énergie mécanique est ensuite transmise par un arbre qui fait tourner un alternateur, un moteur, un compresseur, une hélice, Sauf cas exceptionnels, l'énergie électrique est actuellement produite sous forme de courant triphasé.

Selon les technologies de conception des centrales électriques thermiques, on trouve plusieurs techniques de lancement des turbo-alternateurs à partir de la vitesse du virage (120 tr/min dans notre cas), avant d'atteindre la vitesse d'auto-sustentation (2100 tr/min), où la turbine devient capable de faire tourner indépendamment l'alternateur.

L'ancienne technologie utilise un moteur asynchrone de lancement en association avec un convertisseur de couple à base d'huile, qui représente une interface flexible entre le moteur de lancement et la turbine. Arrivant à la vitesse d'auto-sustentation, ce convertisseur est alors vidé, et le système de lancement est arrêté en attendant l'arrêt du turbo-alternateur pour reprendre la séquence de virage.

Etant donné que cette technique présente des contraintes mécaniques et nécessite un entretien rigoureux, les nouvelles technologies utilisent le démarreur statique qui, par sa nature électrique statique, peut remédier aux anomalies précédentes.

Au niveau de la centrale électrique de M'sila, ce démarreur statique est exploité en trois mode :

- Lorsque l'on active la séquence principale en mode de lavage hors ligne de compresseur (WASHING). L'opérateur peut ouvrir les vannes de drainage, des gicleurs à jet plat et peut commander la pompe d'injection de la solution mixte (eau déminéralisée + émulsion détergente).

Le SFC assure les différentes gammes de vitesse, lorsque la vitesse atteint le 300 tr/m, l'opérateur ouvre la vanne des gicleurs à jet conique, la vitesse de lavage varie entre les 700 et les 800 tr/m configurés dans le SFC. Après 10 minutes de permanence dans ces conditions un arrêt automatique est engendré.

L'opérateur continue l'injection, à la fin il arrête la pompe à injection et ferme la vanne des gicleurs à jet conique.

- Lorsque l'on active la séquence principale en mode de purge (PURGING), la vitesse de purge varie entre 700 et 800 tr/m, configurés dans l'SFC. Après 10 minutes de permanence dans ces conditions un arrêt automatique est engendré.

- Lorsque l'on active la séquence principale en mode normal (NORMAL), celle-ci procède normalement. Elle exécute la purge pendant le temps prévu, et ensuite procède avec l'allumage vrai et propre. La vitesse va prendre sa valeur de purge pendant six minutes, ensuite elle prend la valeur d'allumage, et enfin le SFC accélère la ligne d'arbre jusqu'à la vitesse d'auto-sustentation.

Le but de ce travail est d'étudier et d'analyser le principe de fonctionnement du démarreur statique affecté à la séquence principale en mode normal pour accélérer la TG, en essayant d'implémenter un modèle de simulation permettant de décrire fidèlement le mode normal de fonctionnement.

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à une représentation générale de la centrale turbine à gaz de M'sila.

Le deuxième chapitre offre une présentation générale et une explication détaillée du mode de lancement adopté par la société ANSALDO, ainsi que le principe de fonctionnement du démarreur statique SFC et une application des différentes séquences accompagnant une phase de démarrage du groupe de production.

Dans le troisième chapitre une modélisation simplifiée de l'ensemble convertisseur-machine électrique a été réalisée, ainsi que leurs commandes à savoir : la commande scalaire et vectorielle.

Le quatrième chapitre est pour la simulation du modèle de l'ensemble convertisseur-machine électrique sur l'environnement MATLAB/SIMULINK où les résultats seront présentés. Nous terminons notre travail par une conclusion générale et une étude bibliographique.

Chapitre I

**Etude descriptive de l'ensemble
Groupe Turboalternateur**

I.1 Introduction :

Dès que la ligne d'arbre est mise en mouvement par le système SFC, l'air atmosphérique est aspiré, filtré, et dirigé à travers les gaines d'admission vers l'entrée du compresseur axial. Pour prévenir le pompage du compresseur, des vannes d'extraction d'air V.A.P appelées vannes anti-pompage ou Blow off, sont en position « ouverte » pendant le démarrage, et les aubes à orientation variable (I.G.V) situées à l'entrée du compresseur sont en position dite « fermée ».

Lorsque la vitesse de rotation atteint 95 de sa valeur nominale, un relais de vitesse provoque la fermeture automatique des V.A.P et l'ouverture à une position prédéterminée des I.G.V situées à l'entrée du compresseur.

A la sortie du compresseur axial, l'air pénètre dans un espace annulaire entourant la chambre de combustion, puis dans l'espace situé entre l'enveloppe de chambre et les tubes de flamme.

Les injecteurs introduisent le combustible dans la chambre de combustion où il est mélangé à l'air de combustion venant du compresseur. La mise à feu est réalisée par deux bougies d'allumage.

Quand la turbine a presque atteint sa vitesse nominale, la pression des gaz à l'intérieur de la chambre est suffisante pour provoquer le retrait des électrodes rétractables équipant les bougies d'allumage. Ainsi, les électrodes sont protégées de l'action de la flamme.

Les gaz chauds venant de chambre de combustion traversent en suite les 4 étages turbine. Chaque étage est constitué par un ensemble d'aubes fixes suivi d'une rangée d'aubes mobiles. Dans chaque rangée d'aubes fixes, l'énergie cinétique du jet de gaz augmente, parallèlement à la diminution de la pression. Dans la rangée adjacente d'aubes mobiles, une partie de l'énergie cinétique du jet est convertie en travail utile transmis au rotor de la turbine.

Après leur passage dans les étages turbine, les gaz d'échappement traversent le cadre d'échappement et le diffuseur, constitué d'une série de déflecteurs transformant la direction axiale des gaz en direction radiale tout en minimisant les pertes par frottement. Les gaz parviennent ensuite au caisson d'échappement et sont évacués à l'atmosphère par le système d'échappement.

Le travail fourni au rotor de la turbine, en partie utilisé pour l'entraînement du compresseur axial, sert à faire tourner l'alternateur.

I.2 Description de la centrale thermique de SPE-SONALGAZ MSILA :

La centrale thermique de production d'électricité basée sur le principe de changement de la forme d'énergie, initialement la turbine transforme l'énergie chimique en énergie thermique, puis en énergie mécanique, et finalement l'alternateur transforme cette dernière en énergie électrique.

I.2.1 Situation de la centrale :

La centrale thermique de M'sila est une centrale de turbines à gaz à cycle simple ou bien ouvert (TG) basées sur la combustion du gaz naturel ou fuel en présence d'air sous pression, et sur la détente des gaz chauds brulés dans une turbine couplée à un alternateur, elle est située à 7 km à l'ouest de la ville de M'sila, sur l'axe routier M'sila Ouled Mansour (Draa el Hadja), d'une superficie de 63 hectare. Le site de M'sila caractérisé par une température ambiante 40 °C humidité relative 60 %, et altitude de +500 m environ.

I.2.2 Caractéristiques générales de la centrale :

Elle a été mise en exploitation en 1981 avec 22 groupes de puissance 25MW chacun (Général Electric- MS 5001p-) appelé M'sila1, ces groupes peuvent fonctionner soit au gaz soit au fuel. Maintenant il en reste que 02 groupes. Elle a subit une 1ere extension appelé M'sila2 de 03 groupes de puissance 110MW chacun (ALSTHOM Atlantic -9001E-), ces groupes fonctionnent seulement au gaz.

En suite une 2eme extension appelé M'sila3 de 02 groupes géants de puissance 215 MW chacun (ANSALDO EnergiaV94.3A), ces groupes peuvent fonctionner soit au gaz soit au fuel. Une 3ème Extension qui entre dans le cadre du programme d'urgence assurée par 12 Groupes TG mobiles appelé M'sila4 de Puissance unitaire de 20 MW, il ne reste aucun groupe. Ce qui totalise en moyenne une puissance de 810 MW.



Figure I.1 : Image Google Maps du lieu géographique de la centrale de M'sila

I.3 Groupe de production d'énergie électrique :

Un groupe de production d'énergie électrique regroupe l'ensemble des équipements principaux et auxiliaires qui assurent tous les conversions de l'énergie, d'une forme à une autre, et le conditionnement des grandeurs physiques pour les exploiter dans des bonnes conditions et pour obtenir un bon rendement.

Arrivant à la centrale de grande pression et faible température (environ 60bars et 20°C), le gaz naturel subit une chaudière de type bain mary et une détente pour l'injecter dans la turbine et transformer ainsi l'énergie chimique du gaz en énergie thermique.

Le flux des gaz chauds actionne ainsi la turbine qui produit une énergie mécanique et fait tourner l'alternateur. En sortant de l'alternateur avec une moyenne tension, l'évacuation de l'énergie se fera en haute tension à travers un transformateur de puissance placé en aval de l'alternateur. Dans cette partie, nous allons détailler l'ensemble de ces équipements qui assurent un cycle complet de transformation énergétique et conditionnement physique.

I.3.1 Poste gaz : [3]

Pour une bonne combustion du gaz naturel pour la turbine V94.3A, il doit être filtré et sous pression 30bar et à une température d'environ 30°C. Le combustible devant alimenter la centrale est le gaz naturel qui est délivré à la centrale au moyen d'un gazoduc. Le système combustible gaz porte sur

une station de détente avec un circuit gaz adéquat et fiable pour répondre aux exigences de fonctionnement des turbines à gaz pour tous les régimes de fonctionnement.

Ce système comporte :

- Une vanne d'isolement automatique de type à bille avec un actionneur pneumatique, la vanne de sectionnement de sécurité sera installée à l'extrémité d'entrée du gaz qui sera placée en aval du joint isolant (diélectrique).

- Un séparateur primaire (scrubber) devra être impérativement conçu pour débarrasser le gaz de toute particule liquide en suspension. Le ballon séparateur avec by-pass permettra d'éliminer les condensât et sera dimensionné pour les cas d'apport accidentel toujours possible.

- L'évacuation automatique du ballon sera assurée vers un réservoir de récupération afin d'éviter l'entraînement des condensât dans la turbine.

- Une sécurité de protection contre les condensât sera prévue pour assurer le déclenchement des groupes bien avant qu'il y ait risque d'entraînement de condensât vers les turbines. Le séparateur sera équipé de niveaux haut et très haut commandant l'électrovanne pneumatique principale et les soupapes de vidange.

- Deux (02) filtres de type à cartouche et dotés de dispositifs de séparation particules solides ,capables chacun de débit total de la ligne (2x100%) seront prévus. Ils seront reliés au réservoir de récupération des condensât avec leurs soupapes de vidange. Chaque filtre sera muni :

- D'une soupape de sûreté
- D'un transmetteur de pression différentiel.
- D'un manomètre
- D'un indicateur de niveau
- D'un contact de niveau pour l'alarme de trop plein.

Un système de réchauffage du combustible sera prévu à travers 2 (deux) réchauffeurs type Bain marie de 100% chacun, dont un en fonctionnement normal et l'autre en secours. Ils sont destinés à amener la température du gaz dans une zone telle qu'après la détente (dans les conditions les plus défavorable du site), la température du gaz soit supérieure de 15 °C à la phase la plus condensable du gaz.

Un skid détente gaz compose de 4 lignes, chacune de 50% du débit de la ligne principale c.à.d. 02 lignes assurant le fonctionnement normal 01 ligne en secours automatique 01 ligne en secours manuel. Deux skids finaux de filtrage, Chaque skid final comprend une (01) ligne pour l'alimentation de chaque TG. La ligne d'alimentation de chaque TG est composée d'un poste de comptage et deux (02) filtres/séparateurs, capables chacun de débit total de la ligne (2x100%) seront prévus.



Figure I.2 : Photo réelle du poste gaz prise sur site

I.3.2 Le turbo-compresseur :

Le turbocompresseur Ansaldo Power Génération est une machine à un arbre et à un corps commun. Celui-ci est supporté seulement dans deux coussinets qui sont positionnés en dehors de la région pressurisée afin d'assurer un bon alignement et un bon fonctionnement [10].

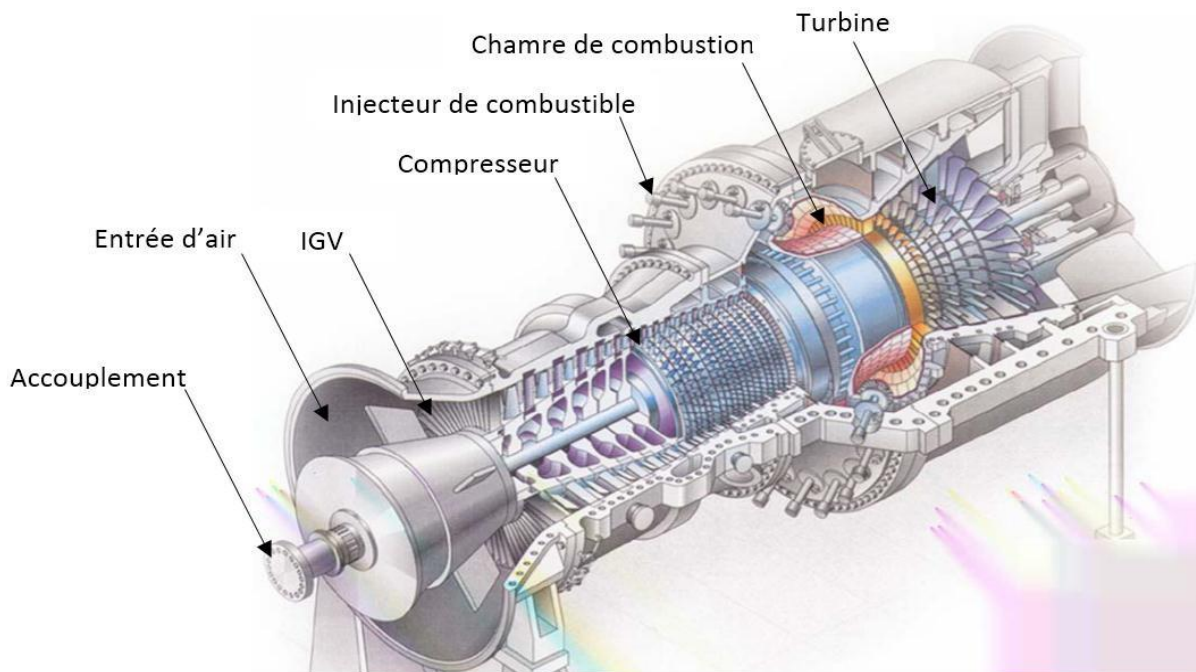


Figure I.3 : Groupe turbo-compresseur Ansaldo [10]

L'air froid aspiré de l'environnement extérieur au chantier est comprimé et réchauffé en traversant le compresseur. La réalisation de cette phase nécessite de consommer une certaine quantité d'énergie mécanique, en la soustrayant de l'énergie cinétique de la turbine à travers le rotor.

A l'intérieur de la chambre de combustion, la réaction chimique entre l'air et le carburant produit une augmentation de température et de pression. Alors, dans cette réaction la valeur calorifique du carburant est transformée en énergie thermique.

Enfin, en passant dans la turbine, les gaz chauds se répandent, leur pression et leur température diminue en conséquence. Cette phase produit une grande quantité d'énergie mécanique dont une partie est requise par le compresseur, et la partie la plus importante sera dirigée au réseau à travers le générateur et le transformateur principal [2].

La ligne d'arbre qui comporte le compresseur, la chambre de combustion et la turbine, les caractéristiques du groupe turboalternateurs de cette centrale sont :

I.3.2.1 Le compresseur :

Section compresseur englobe le rotor du compresseur et son stator constitué de plusieurs corps, ainsi que les aubes variable I.G.V à l'entrée du compresseur permettent de contrôler le flux d'air. Dans le compresseur, l'air provenant du système d'admission traverse une succession d'étages constitués

chacun par une rangée circulaire d'aubes mobiles (rotor), et une rangée circulaire d'aubes fixes (stator). Il y a 15 étages avec un taux de compression de 16 environ.

Les aubes rotor fournissent l'énergie nécessaire à la compression de l'air dans chaque étage, et les aubes stator guident l'air suivant une direction bien définie vers l'étage suivant. A la sortie du corps d'échappement du compresseur, l'air est dirigé vers la chambre de combustion. Une faible proportion de l'air du compresseur est utilisée pour le système anti-pompage qui comporte quatre extractions : deux au niveau de 5eme étage, un au niveau de 9eme étage, et autre au niveau de 13eme étage, pendant les régimes transitoires (séquences de démarrage et d'arrêt).

Autre proportion destiné au refroidissement de la turbine est soutiré de plusieurs étages de compresseur, Une partie du débit de l'air de refoulement du compresseur est utilisé comme air de refroidissement pour l'étage 1 de la turbine.

L'air de refroidissement est extrait aux deux points d'extraction désignés en aval de l'étage 13 du compresseur et fourni aux aubes fixes de l'étage 2 de la turbine,

L'air de refroidissement est extrait aux deux points d'extraction désignés en aval de l'étage 9 du compresseur et fourni aux aubes fixes de l'étage 3 de la turbine, l'air de refroidissement des aubes mobiles de l'étage 3 est extrait en aval de l'étage 10 du compresseur et circule vers les aubes à travers les canaux dans le rotor.

Afin d'obtenir le meilleur rendement et, par la même, de meilleures performances, les jeux entre rotor et corps, à l'extrémité des aubes, sont réduits au minimum, et les assemblages sont réalisés avec une très grande précision [2].

I.3.2.2 La chambre de combustion :

Elle est de type annulaire, et comporte des brulures et un cylindre de flamme qui est constitué d'une section moyeu et une chemise de pression dans laquelle sont installées les 24 brulures hybrides qui sont régulièrement réparties sur son périphérique, afin d'assurer une zone de température homogène dans La chambre de combustion et un écoulement concentrique de l'air entre le compresseur et La chambre de combustion d'une part et entre La chambre de combustion et la turbine d'une autre part [2].

Pendant la période de démarrage, il est indispensable de transmettre au système de contrôle l'indication de la présence ou de l'absence de flamme. C'est pour cette raison que la chambre de combustion équipée de quatre détecteurs de flamme. Ce système détecte tout spectre ultraviolet dont la longueur d'onde est comprise dans des limites déterminées et en quantité significative.



Figure I.4 : Photo réelle de la chambre de combustion de type annulaire prise sur site

Chaque détecteur est constitué d'une enveloppe spéciale contenant des électrodes métalliques et un gaz. Les électrodes sont alimentées en courant continu. Lorsque les photons ultraviolets de longueur d'onde appropriée et en quantité suffisante viennent ioniser le gaz, des décharges électriques de courte durée se succèdent entre ces électrodes, créant un courant mesuré par le circuit de détection. Si le signal détecté est suffisant, le détecteur émet des signaux logiques de présence flamme entrant dans la logique séquentielle. Chaque injecteur de combustible (gaz ou fuel) injecte une quantité déterminée de combustible dans le tube de flamme. Le gaz qui pénètre dans l'injecteur est dirigé vers la zone de réaction du tube de flamme [1].

I.3.2.3 La turbine de type V94.3A :

C'est une turbine axiale de pouvoir calorifique de 44821.9 kJ/kg, comporte 4 étages d'aubes qui sont réalisés à partir d'alliages résistant aux hautes températures pour résister aux contraintes thermiques et mécaniques. Les aubes des trois premiers étages sont dotées d'un revêtement de protection contre la corrosion à hautes températures. La turbine transforme l'énergie thermique en énergie mécanique [2].

Les 4 étages turbine transforment en énergie mécanique l'énergie contenue dans les gaz chauds à haute pression à leur sortie du système de combustion.

Chaque étage turbine comprend une directrice suivie d'une roue aube. La section turbine se compose du rotor turbine, du corps turbine, des directrices et des diaphragmes, des segments de protection, du cadre d'échappement suivi du diffuseur.



Figure I.5 : Les quatre étages de la turbine [2]

I.3.2.4 Le système d'échappement :

Le système d'échappement sert à évacuer les gaz brûlés vers l'atmosphère à la sortie de la turbine. Il est constitué de gaines et de silencieux et comporte des joints de dilatation. Ce système est formé de quatre ensembles principaux : le diffuseur, la partie inférieure de la cheminée, la partie supérieure de la cheminée qui abrite le silencieux et le cadre de sup-portage. Il est conçu en vue de mener les gaz chauds en excès à la cheminée d'évacuation [1].

I.3.3 L'alternateur de type WY23Z-109 :

Le générateur et le système d'excitation convertissent l'énergie mécanique fournie par la turbine à gaz en énergie électrique et la délivre dans le transformateur de l'unité à travers le disjoncteur groupe.

L'application d'un courant continu au rotor du générateur produit un champ magnétique rotatif puissant, et le champ magnétique du rotor traverse les enroulements du stator et induit un courant dans les enroulements du stator produisant ainsi la puissance à courant alternatif.

Le type wy23z-109, c'est une machine synchrone triphasée à deux pôles à rotor lisse, couplée en étoile avec un rendement de 98.85 % et puissance nominale de 300MVA, un poids de 215 tonnes et une fréquence de fonctionnement de 50HZ. et refroidies par l'air avec échangeurs air-eau installés dans la partie inférieure de la carcasse, et connectées au réseau 225 kV par des transformateurs élévateurs.

Il délivre une tension nominale de 19 kV et une puissance active nominale de 215 MW. Dans cette centrale, la machine synchrone est une machine réversible à 2 modes de fonctionnements : au démarrage, elle fonctionne en mode moteur jusqu'à ce que l'arbre de groupe soit atteint 70% de sa vitesse nominale ou vitesse de synchronisme (3000 tr/min). Après ce mode, le convertisseur de fréquence se désengage, la vitesse augmente jusqu'à atteindre la vitesse de synchronisme, dans ce moment la machine fonctionne en mode générateur [5].

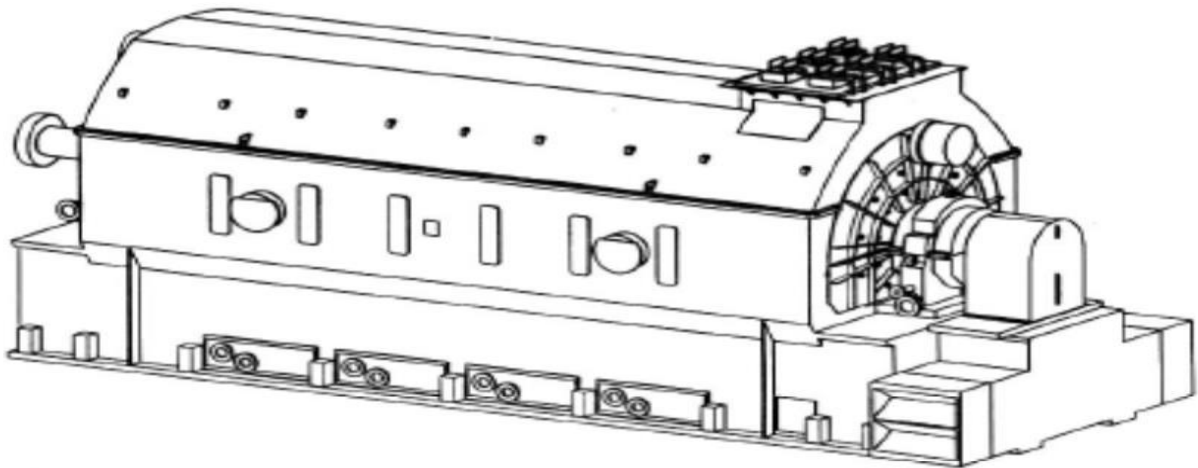


Figure I.6 : Vue générale de l'alternateur refroidi à l'air [5]

I.3.3.1 La carcasse du stator :

La carcasse est constituée d'une structure soudée, partagée horizontalement en deux moitiés, réalisée à raidissements et nervures longitudinales avec des ouvertures qui permettent la réalisation du circuit de ventilation.

I.3.3.2 Noyau magnétique statorique :

Le noyau magnétique est constitué d'un nombre élevé de paquets élémentaires séparés par des canaux radiaux de ventilation réalisés par des opportunes entretoises. Les tôles sont réalisées en matériels magnétiques à basse chiffre de perte, isolées entre elles avec des peintures spéciales résistant à la chaleur. Cela limite l'effet de chauffage dû aux pertes dans le fer à cause de courants parasites. Les flasques presse-noyau sont en alliage d'aluminium trempé, le noyau stator est ancré à la carcasse par un système d'ancrage élastique pour limiter la transmission des vibrations du noyau aux fondations et pour limiter les effets des dilatations thermiques.

I.3.3.3 Enroulement stator :

L'enroulement stator, à refroidissement indirect, est du type imbriqué, à double couche, triphasé, à pas raccourci, réalisé en barres Roebel transposées, logées dans des encoches disposées de façon uniforme sur la circonférence interne du tôle magnétique. Les têtes de l'enroulement, réalisées de façon à constituer une sorte de cône, appuient sur des consoles trapézoïdales en matériel isolant à leur fois ancrées aux flasques presse-noyau. Les barres sont fixées à la structure de soutien par des anneaux de raidissement interne et externe, des blocs d'entretoisement et d'un système de reprise des jeux. Cette solution évite que des endommagements arrivent à cause d'élévées sollicitations dynamiques en cas de court-circuit ou de vibrations pendant le normal fonctionnement. L'enroulement est constitué de barres Roebel isolées avec ruban verre mica imprégné sous vide de résine époxy sans dissolvants. Les matériaux isolants utilisés sont de classe F.



Figure I.7 : Photo réelle de l'enroulement stator d'un alternateur Ansaldo prise sur site

I.3.3.4 Corps rotor :

Le corps rotor est obtenu d'un bloc d'acier forgé, d'une seule pièce, ayant élevées caractéristiques mécaniques. Le forgé est soumis à des essais de différents types pour vérifier que les caractéristiques mécaniques, chimiques et magnétiques correspondent dans la partie centrale l'on a fraisé des encoches rectangulaires sur toute la longueur, à leur intérieur est logé l'enroulement d'excitation. Du côté accouplement est tirée la bride d'accouplement à la turbine.

L'extrémité opposée est percée de façon axiale pour permettre le logement des connexions axiales d'excitation connectant les bagues collectrices à l'enroulement proprement dit. Sur cette même

extrémité sont emboîtés, après préalable pose d'une couche isolante, les bagues collectrices et est monté le ventilateur de la chambre des bagues. Le rotor terminé est balancé et soumis à l'essai de survitesse.

I.3.3.5 Enroulement rotor :

L'enroulement rotor est réalisé avec des conducteurs tubulaires à section rectangulaire en cuivre à l'argent, les trous longitudinaux permettent le passage de l'air de refroidissement. L'isolement contre masse dans l'encoche est réalisé par un canal en forme de U en NOMEX, les conducteurs sont isolés l'un contre l'autre avec des bandes en tissu en verre imprégné de résine époxy et de NOMEX dans les têtes des bobines.

Comme pour le stator les matériels isolants sont de classe F. Des cales d'encoche en alliage Cu-Ni à queue d'aronde, ferment les encoches en maintenant l'enroulement surplace. Les têtes de l'enroulement rotor sont maintenues dans la position par des blocs d'entretoisement en fibre de verre renforcé, ces mêmes blocs réalisent les passages de l'air de refroidissement entre les têtes.



Figure I.8 : Rotor à pole lisse d'un alternateur Ansaldo [4]

I.3.3.6 Ventilateurs :

A chaque extrémité de l'arbre l'on emboîte l'anneau du ventilateur sur lequel l'on fixe les aubes. Puisque le circuit de ventilation est symétrique, chaque ventilateur pourvoit à la ventilation symétrique de moitié machine.

I.3.4 Excitatrice de type statique :

La génération d'une tension dans une machine synchrone est basée sur le principe d'induction. La variation du flux dans l'enroulement statorique de la machine synchrone provoque une tension induite.

Le flux est produit par le courant dans l'enroulement rotorique alimenté par le système d'excitation.

Le système d'excitation comprend un transformateur d'excitation MKC et deux redresseurs.

Chaque redresseur contient une partie de puissance qui comporte un groupe de thyristors sur pont triphasé entièrement commandé, les thyristors installés sur les branches des ponts sont protégés par des coupe-circuits à fusibles, et une partie de commande (AVR).

Le régulateur de tension automatique (AVR en anglais) travaille à travers un organe de puissance à semi-conducteurs qui est très souvent un convertisseur à thyristors ou à transistors bipolaires à grille intégrée(IGBT).

La régulation de tension est contrôlée par l'AVR varie le courant du rotor automatiquement pour maintenir la tension aux bornes de la machine synchrone en cas de changement de la charge.

Pendant le fonctionnement le démarreur gère de manière autonome l'excitatrice qui pourvoira à développer la caractéristique de démarrage en manière coordonnée avec le démarreur.

Après le détachement du démarreur et à la vitesse nominale, l'excitatrice sera gérée par GTCMPS [4].

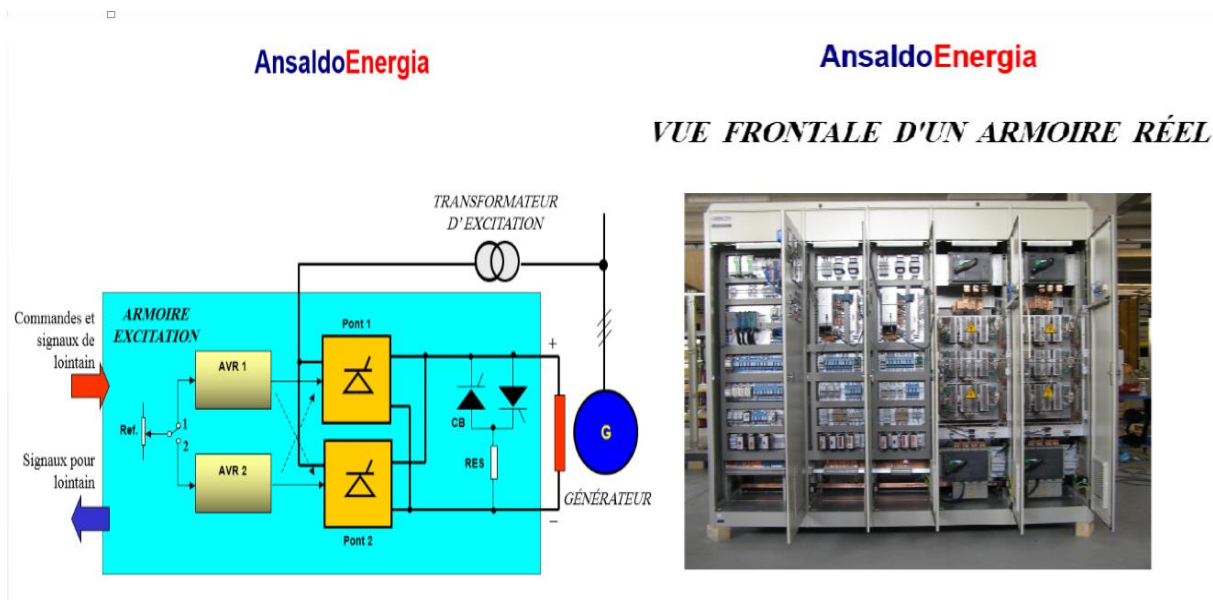


Figure I.9 : Systeme d'excitation statique diagramme de principe [4]

I.3.5 Disjoncteur du groupe a commandé à ressorts de type FKG1N :

Le disjoncteur de l'alternateur représente la connexion électrique entre les traversées de l'alternateur et le transformateur principale. Un organe d'interruption est composé de deux contacts substantiellement de qui un fixe et l'autre meuble, immergés dans un environnement à haute rigidité diélectrique (hexafluorure de soufre-SF₆-) pour l'extinction de l'arc électrique et comme moyen d'isolement. La coupure dans le gaz SF₆ s'effectue sans déchirure de l'arc et sans créer de surtensions. Ces caractéristiques garantissent au disjoncteur une vie électrique plus élevée, et à l'installation des contraintes dynamiques, diélectrique et thermiques limitées. Le tout renfermé dans une enveloppe de porcelaine.

La phase la plus délicate du fonctionnement de l'interrupteur est la relative à l'ouverture du circuit ; si celle-ci arrive en conséquence d'un court-circuit, les courants en jeu sont très élevés pour lequel les conditions de travail résultent extrêmement lourdes.

Pendant l'ouverture d'un circuit, au moment du détachement du contact mobile de ce fixe, il se forme entre les deux un arc électrique qui doit être éliminé dans le temps plus petit possible pour éviter l'endommagement de l'interrupteur [4].

Le couplage de l'alternateur sur le réseau soit automatique par ordre du synchro coupleur, soit volontaire par ordre de l'exploitation.

Le découplage de l'alternateur du réseau, étant la tranche à une puissance quelconque, soit par action volontaire de l'exploitation, soit par action automatique des protections lors d'un défaut mécanique ou électrique interne ou externe à la tranche. Le disjoncteur doit être équipé avec :

Un sectionneur de ligne pour le jeu des barres du générateur installé au côté du transformateur. Le sectionneur fonctionnera grâce à un mécanisme qui est actionné par un moteur préparé pour actionner les trois phases simultanément.

deux sectionneurs de terre positionnés sur les deux côtés du disjoncteur, pour permettre l'entretien du jeu des barres côté générateur ou du jeu des barres côté transformateur, il doit être possible l'observation directe de la position du sectionneur de l'extérieure du disjoncteur.

un sectionneur pour permettre le démarrage du générateur comme moteur par un démarreur statique (SFC). Le sectionneur fonctionnera grâce à un mécanisme qui est actionné par un moteur préparé pour actionner les trois phases simultanément.

I.3.6 Transformateur de puissance-TP- :

Le transformateur de puissance est utilisé pour adapter la tension de sortie de l'alternateur à la tension du réseau (19KV/225KV) pour minimiser l'intensité de courant dans les lignes de transport et minimiser les sections des câbles. Le TP C'est un convertisseur statique triphasé à refroidissement par circulation naturelle d'huile, forcée par l'air de type OFAF. Ce transformateur comporte deux enroulements dont un enroulement HT 225KV à un enroulement BT 19KV. La puissance du transformateur est de 300 MVA et le couplage YNd11, un commutateur de réglage hors tension permet de régler la tension du transformateur, ce commutateur à cinq positions permet un réglage de la tension HT $225000 \pm 2 * 2,5\%$.

Une batterie de 04 radiateurs est montée sur le transformateur. Ces radiateurs component 08 ventilateurs, ce groupe démarre automatiquement en fonction de la température d'huile. les pannes sont toujours associées à certains symptômes ou provoquées par des conditions de fonctionnement, Le relais Buchholz est un dispositif qui a la particularité d'être sensible aux symptômes de panne et d'anomalies internes, toutes ces anomalies pouvant provoquer une alarme ou envoyer un signal de déclenchement.

Quand un arc électrique ou une surchauffe se développe à l'intérieur des enroulements, il y a dégagement de gaz par vaporisation de l'huile. Ce système détecte aussi les fuites d'huile [4].



Figure I.10 : Photo réelle du transformateur de puissance prise sur site

I.3.7 Les auxiliaires :

La majorité des équipements auxiliaires mécaniques et électriques nécessaires au lancement et au fonctionnement de la turbine à gaz est rassemblé dans le compartiment des auxiliaires. Ce compartiment comporte :

- Le système d'alimentation d'huile lubrifiante fournit de l'huile aux quatre paliers du groupe turboalternateur. En formant d'une part, un film d'huile dans les paliers, en minimisant donc le frottement et d'autre part le flux d'huile lubrifiante enlève la chaleur des paliers.

- Le système d'huile hydraulique est de positionner les vannes de contrôle du combustible, ainsi d'ouvrir ou fermer les vannes d'arrêt d'urgence du combustible lors du démarrage ou de l'arrêt du système, ou bien lors du changement de combustible. Le système d'huile hydraulique approvisionne également l'actionneur des IGV.

- Le système d'optimisation du jeu hydraulique (HCO) qui possible d'obtenir une hausse de l'efficacité et une augmentation de la puissance fournie par les turbines à gaz lorsque les rotors sont

entraînés en sens opposé à la direction du débit. Ceci réduit les jeux entre les aubes de la turbine et son carter, tandis que dans le compresseur les jeux respectifs augmentent. Grâce à la conception mécanique de la turbine à gaz, les pertes dans le compresseur causées par l'entraînement sont inférieures aux améliorations dans la turbine.

La conception du palier de butée autorise le déplacement axial lorsqu'un système hydraulique fournit du fluide aux cylindres correspondants et que des butées axiales limitent le déplacement du rotor dans les directions primaire et secondaire.

- Il existe aussi plusieurs ventilations et extracteurs dans les différents compartiments de la centrale pour assurer le refroidissement et dégager les gaz indésirables.

- Le système air de régulation et air de travail qui fournit de l'air exempt d'huile, séché et filtré, pour la consommation des instruments et des actionneurs pneumatiques (soupapes de décharge), et de l'air exempt d'huile pour les services généraux. Un système d'air comprimé commun aux deux turbines à gaz est fourni pour la centrale. On pourvoit deux compresseurs pour fournir l'air nécessaire pour les utilisateurs des services et pour les exigences des instruments ; ils alimentent deux réservoirs.

En aval du réservoir principal sont pourvus deux systèmes séparés : l'un pour l'air de régulation et l'autre pour l'air de travail.

- Le système de réfrigération noria refroidit les réfrigérants de l'alternateur et les réfrigérants huile de graissage de la TG à l'aide d'une unité auro-réfrigérant. Le moyen intermédiaire de réfrigération est l'eau déminée traitée, pour empêcher la corrosion et contre la congélation, avec des glycols et un inhibiteur de corrosion injectés à l'aide d'une bêche d'injection chimique.

- Le système consiste principalement en pompes de circulation, unité auro-réfrigérant, réservoir, tuyauteries, soupapes ainsi que l'instrumentation nécessaire.

I.3.8 Séquences de démarrage de la turbine à gaz :

Les séquences de démarrage sont complètement gérées par l'automatisme de la turbine à gaz (GTCMPS) par le change de signaux logiques entre GTCMPS et démarreur.

Initialement, l'ensemble alternateur-turbine à gaz tourne à une vitesse de vireur de 120 (tr/m). Au démarrage, la commande SFC se connecte au stator de l'alternateur et prend le contrôle de la référence de tension d'excitation. La commande SFC accélère alors la turbine afin d'atteindre le point de consigne de la vitesse de purge (entre 700 et 800 tr/m). La turbine conserve la vitesse de purge pendant environ six minutes. Cette phase permet de balayer encas des gaz dans le corps turbine, le

cadre d'échappement, et la chaudière de récupération dans le cas de cycle combiné, ansais que les essais des pompes de secours en courant continu, les V.A.P, et la permutation des pompes (master-esclave).

Après la purge, l'entrée de commande SFC est éteinte et la turbine peut ralentir jusqu'à atteindre la vitesse de 240 tr/m. le démarreur statique accélère la turbine, et cette dernière est capable de s'amorcer environ 370 tr/m, la prochaine séquence est le préchauffage de la partie chaude pour éviter le choc thermique des métaux, la flamme augmente progressivement et proportionnellement avec la vitesse.

La vitesse augmente jusqu'à la vitesse d'auto-sustentation 2100tr/m, la commande SFC est éteinte et déconnectée de l'alternateur. La turbine est autonome, et la vitesse augmente jusqu'à la vitesse de service 3000tr/m [10].

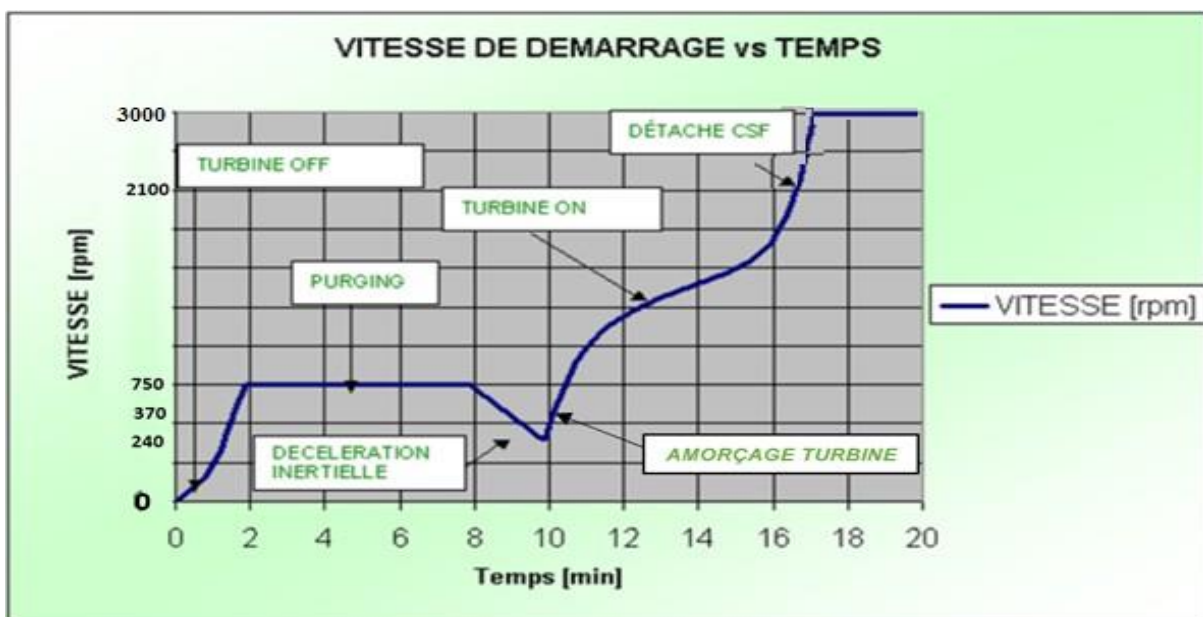


Figure I.11 : Séquence de démarrage de turbine à gaz [4]

I.4 Conclusion :

Nous avons tenté dans ce premier chapitre de présenter brièvement la centrale turbine à gaz de M'sila, et nous mettons une description d'une tranche de production, à partir de poste gaz jusqu'au le transformateur de puissance, et les défèrent transformation de la forme d'énergie en partant de la forme chimique et en terminant par la forme électrique. Et nous en avons discuté en détail les différentes séquences de démarrage du mode de purge.

Chapitre II

**Description du variateur de vitesse
utilisé pour le lancement du groupe
turboalternateur**

II.1 Introduction :

Le démarreur statique à fréquence variable (SFC) Ansaldo-Sistemi (6MVA environ) est un appareil qui accélère le groupe turboalternateur au moyen de l'alternateur utilisé comme moteur synchrone.

L' SFC alimente les enroulements statorique à tension et fréquence variables et, en étant le rotor excité, il réussit à accélérer toute la ligne d'arbre jusqu'à la vitesse d'auto-sustentation voulue (pour les TG elle est environ 70% de sa vitesse nominale). Les puissances de démarrage demandées sont incluses entre 1.5% et 2.5% de l'unité de puissance nominale. Pour cette application, comme pour le compensateur synchrone, la tension de démarreur est inférieure à la tension nominale de la machine synchrone qui permet d'étendre le champ de fonctionnement de puissance constant jusqu'à des basse vitesses.

Ce chapitre présente le démarreur statique et offre une présentation générale du produit. Et on décrit le fonctionnement du système de démarreur statique SFC.

II.2 Description général du variateur de vitesse SFC :

Le démarreur statique est doté d'un contrôleur numérique qui se connecte en toute simplicité à divers contrôleurs d'excitation et de turbine Ansaldo-Energia, y compris l'interface homme-machine (IHM) et les produits de l'historique. Ces dispositifs communiquent entre eux via un Ethernet de manière à former un système de contrôle entièrement intégré.

Le démarreur statique est alimenté du transformateur de démarrage MBJ (4MVA environ) qui est alimenté du système d'alimentation des services auxiliaires de centrale à 6 kV. La sortie du démarreur est connectée à l'alternateur par un ou plus sectionneurs [4].

Puissance électrique nominale	4500[KW]
Max puissance apparente	5917[KVA]
Tension d'entrée	2×1550[V]
Tension de sortie	0÷2850 [V]
Courant alternatif nominal	1102[A]
Courant nominal dans le circuit intermédiaire	DC- 1350[A]
Courant alternatif nominal	1102[A]
Fréquence	0÷35 [Hz]
Configuration coté réseau	12 impulsions
Configuration coté générateur	6 impulsions

Tableau II.1 : Les données techniques du démarreur statique SFC

II.2.1 Constitution du variateur de vitesse SFC :

Le système de démarrage statique d'un groupe est constitué principalement par le démarreur statique vrai et propre (tableau électrique avec des sections de puissance et de contrôle et son transformateur de démarrage MBJ), le système d'excitation (tableau excitation et son transformateur MKC), le système d'automatisation, et le système électrique et le système des protections.

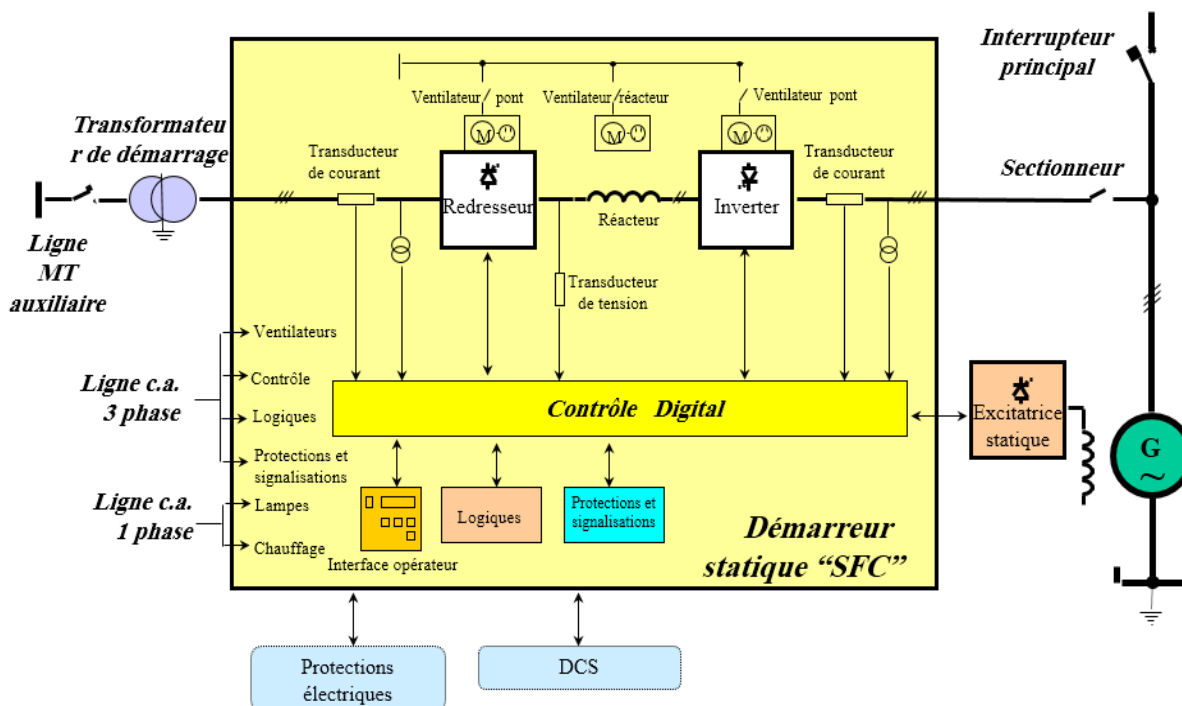


Figure II.1 : Schéma général du système SFC [4]

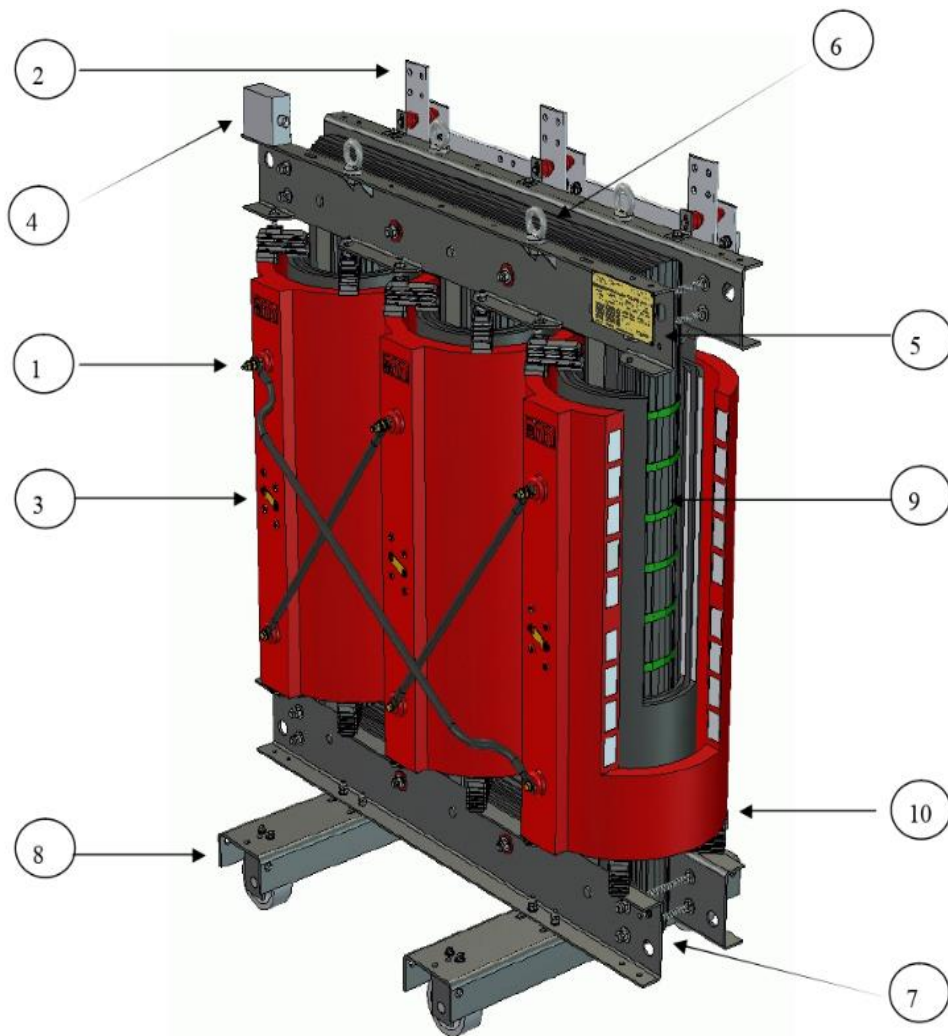
II.2.1.1 Transformateurs de démarrage isolé en résine :

Les transformateurs d'alimentation des systèmes de démarrage MBJ de puissance MVA, et tension secondaire 2×1550 , se différencient de ceux de distribution substantiellement parce qu'ils doivent être projetés exprès pour alimenter appareillages qu'ils contiennent convertisseurs de puissance [redresseurs à diodes contrôlées (thyristors)].

L'enroulement primaire en "haute tension", qui est englobé en résine, il est construit avec des bandes d'aluminium, pendant que le secondaire de "basse tension", qui par contre est imprégné en résine, il est réalisé par feuilles du même matériel.

Les connexions des enroulements sont selon le groupe Dd0-yn11. La V_{cc} des transformateurs de démarrage en général est $5\% \div 6\%$ environ, et le refroidissement de ces transformateurs est fait par convection naturelle.

En considération des tailles qui ont, en général, ces transformateurs, une consistante quantité d'air est nécessaire pour refroidir ses parties chaudes d'une manière adéquate et, quand une éventuelle couverture de protection est prévue, celle-ci devra être projetée avec un degré de protection mécanique qui permettra le suffisant proportionné passage d'air [4].



1 Bornes MT	6 Oeillets de levage
2 Bornes BT	7 Borne de terre
3 Barrettes de réglage MT	8 Support des galets de roulement
4 Boîtier de commande	9 Noyau magnétique
5 Plaque signalétique d'identification	10 Enroulement MT

Figure II.2 : Transformateurs de démarrage MBJ [4]

II.2.1.2 Sections de puissance et de contrôle :

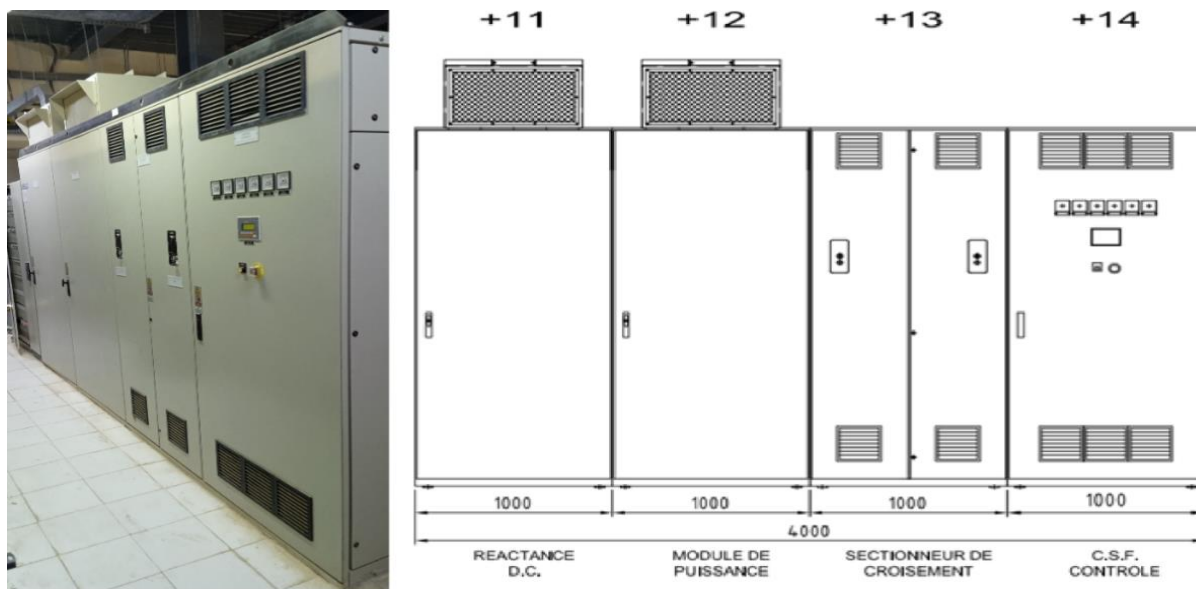


Figure II.3 : Armoires du puissance et contrôle de l'SFC

La section de puissance et de contrôle est un tableau convertisseur constitué par quatre compartiments si subdivisé :

A) Compartiment +11 : réactance d'aplanissement circuit intermédiaire

Un réacteur de nivelage (pour réduire le rappel du courant) a la fonction de limiter l'ondulation de courant dans le circuit intermédiaire en courant continu, il est réalisé normalement avec noyau en fer refroidie par l'air. Ce courant contribue à définir la taille du système SFC [4].

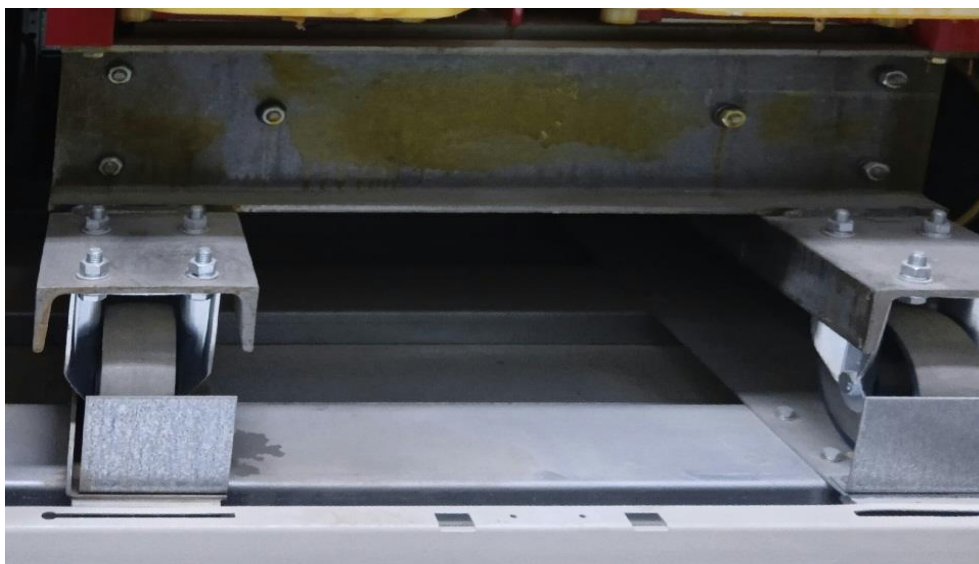


Figure II.4 : Photo réelle de la réactance de circuit intermédiaire prise sur site

B) Compartiment +12 : circuits puissance redresseur / onduleur

- Un convertisseur uni au secondaire du transformateur de démarrage (02 redresseur de 6 thyristors chacun) qui travaille à tension et fréquence fixe côté réseau pont de Graetz a thyristors.

- Un convertisseur uni au générateur (onduleur de 12 thyristors) qui travaille à tension et fréquence variable côté alternateur pont a thyristors.

Tous les thyristors sont identiques de modèle Snubber de 85mm et 5200V de PRV (Polyester Renforcé de fibres de Verre).

- Filtres RC qui protège les thyristors contre des brusques pics de tension provoqués par la commutation, sont des circuits qui tournent entre l'anode et la cathode de chaque thyristor [4].

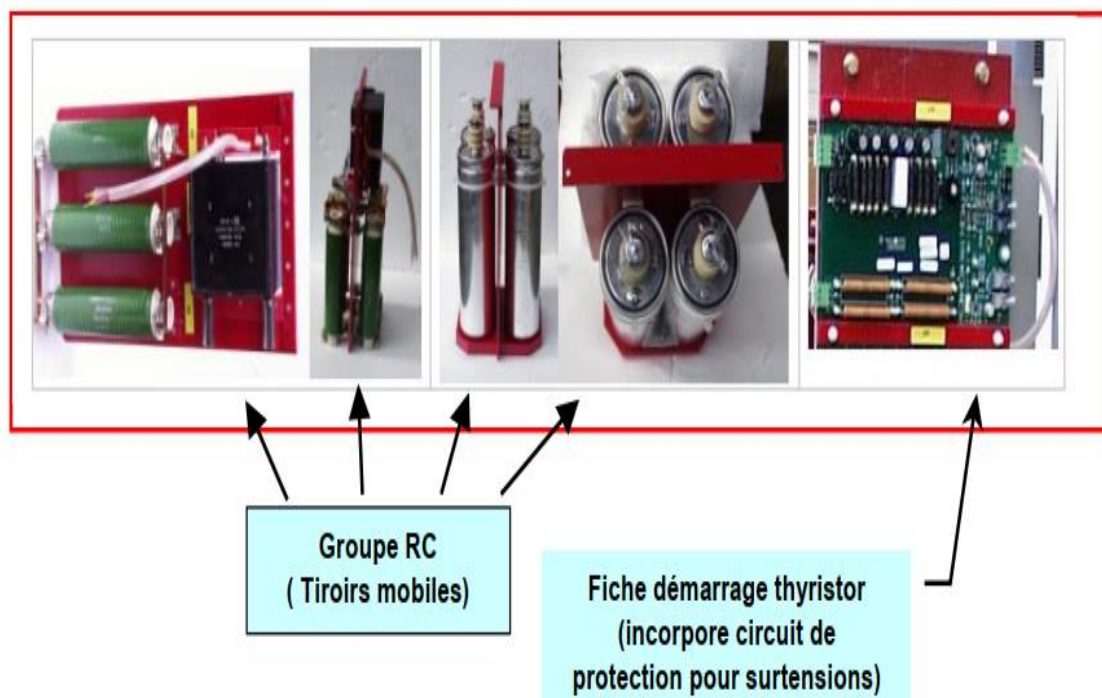


Figure II.5 : Groupe RC et fiche de démarrage

- Circuits d'amorçage des thyristors.

- Déphaseur pour l'amorçage des thyristors côté machine et côté réseau.

- Transducteur du courant insérés côté réseau, sur les phases d'alimentation en entré au redresseur, et côté machine, sur les phases de sortie de l'onduleur, pour mesurer le courant nécessaire à la régulation et à les protections.

- Transducteurs de tension insérés côté réseau et côté machine pour mesurer la tension alternative de synchronisme pour l'amorçage des thyristors et pour les protections de tension et de max vitesse.

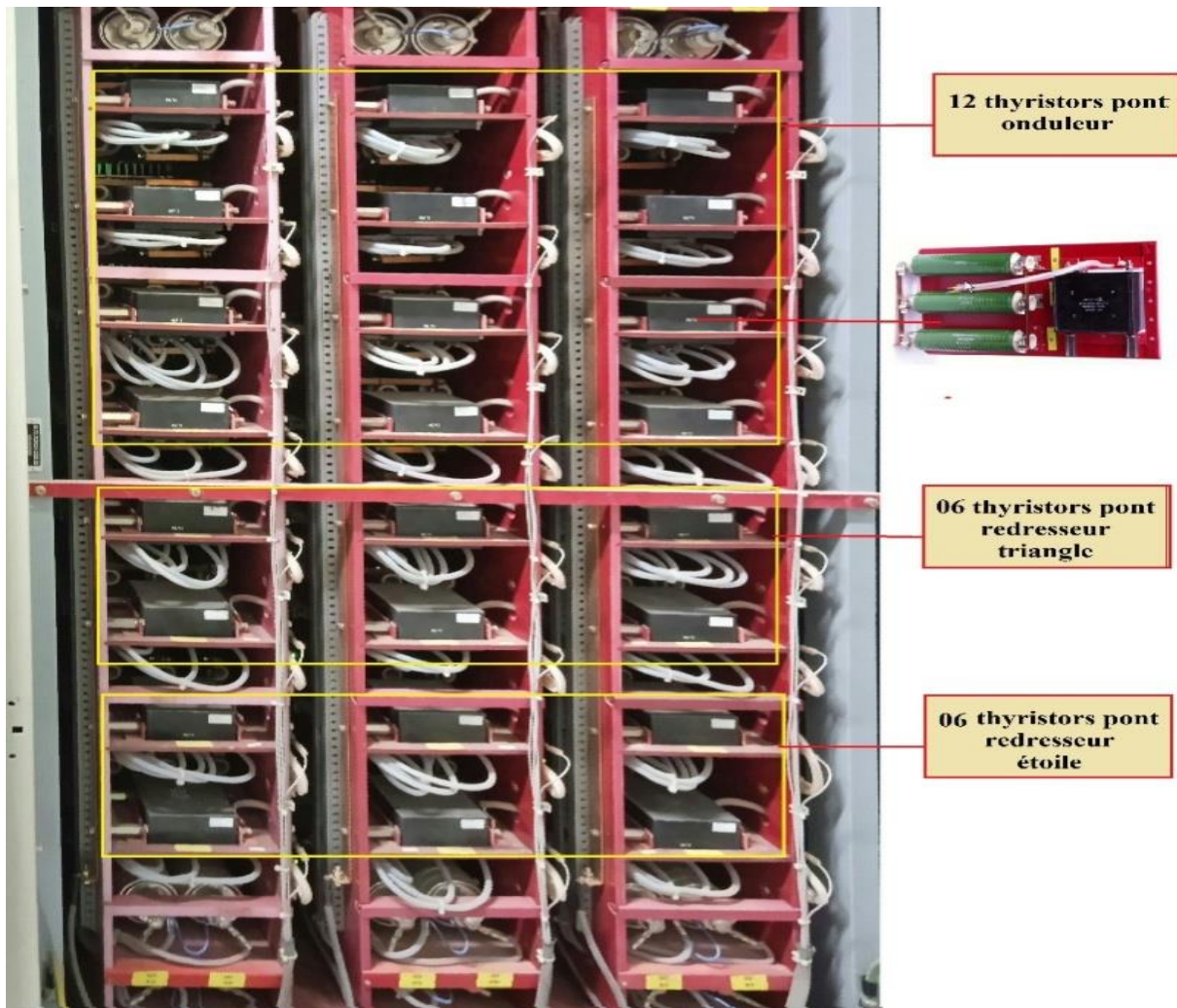


Figure II.6 : Circuits puissance redresseur et onduleur [4]

C) Compartiment +13 : sectionneur pour croisement démarreur

Deux sectionneurs de moyenne tension de motorisé/manuel type, avec bloc électromécanique, ils sont utilisés pour le démarrage direct ou croisé des deux TG, la logique de bloc est réalisée à relais alimentés par une tension de 220Vac provenant par l'UPS.

La tension de contrôle est toujours présente de manière telle à éviter manœuvres erronées sur la fermeture et/ou ouverture des sectionneurs [4].

D) Compartiment +14 : circuits de contrôle et auxiliaires

Un système de régulation et de contrôle digital composé par un panneau de contrôle, PLC pour les séquences de démarrage, arrêt et pour le contrôle des dispositifs auxiliaires du convertisseur,

mesure et élaboration des grandeurs électriques provenances des transducteurs, et des connections par fibres optiques entre contrôle et convertisseur de puissance [4].

D.1) Panneau de contrôle :

Plus communément nommée page de contrôle dans laquelle sont contenues toutes les fiches électroniques qui permettent le correct fonctionnement de l'actionnement.

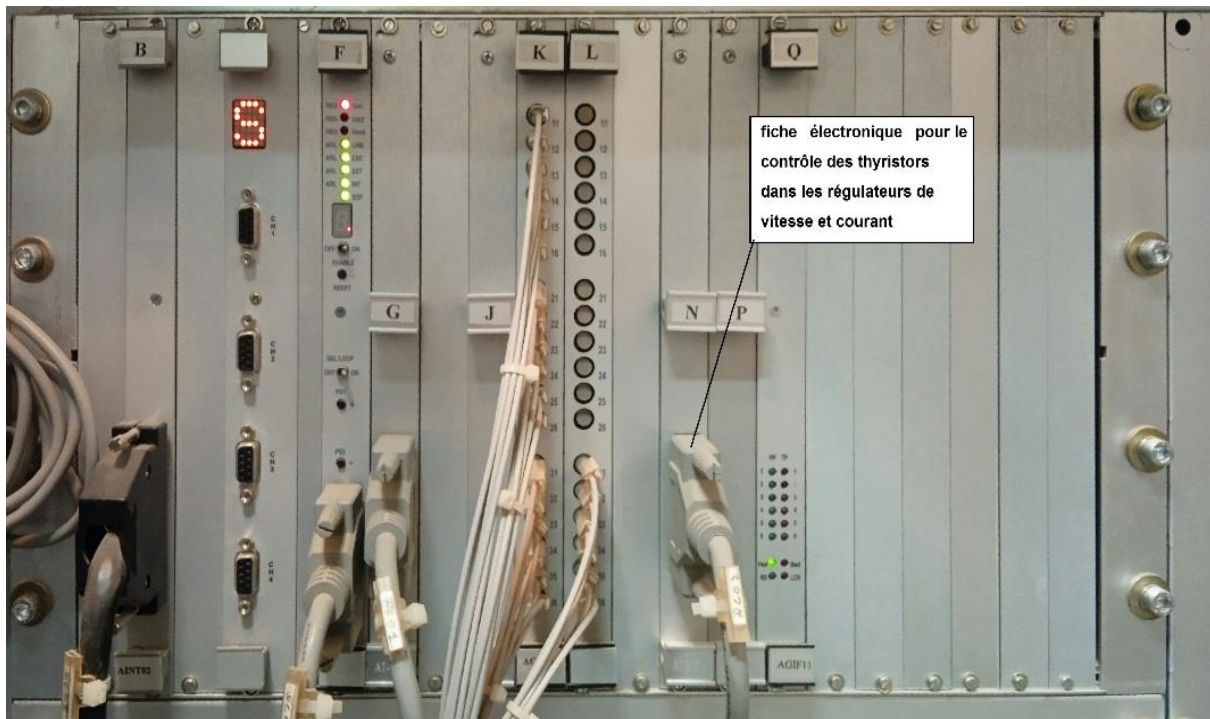


Figure II.7 : Photo réelle du panneau de contrôle prise sur site

La page de contrôle est ainsi subdivisée [4] :

Panier (Fiches de contrôle pour le pont redresseur, pour le pont inverseur et pour régulateur de vitesse).

Les fiches qui forment le contrôle sont logées dans ce panier et ils sont dans le format standard Europa 2. Les fiches peuvent avoir des composants personnalisés qu'ils changent d'installation à l'installation, donc les valeurs de tels réglages sont reportées dans les feuilles de personnalisation dans les schémas fonctionnels de commande.

Le contrôle réalise les fonctions suivantes :

- Régulateur de vitesse
- Régulateur de courant
- Régulateur pont redresseur

- Régulateur pont inverseur
- Interface vers le convertisseur (génération impulsions acquisition signal analogique)
- Interface vers le PLC.

Box panier (Bornes et démarreurs).

Ils sont montés tous les alimentations nécessaires pour engendrer les tensions différentes d'alimentation pour les stades différents des fiches électroniques. D'alimentation extérieure, par les alimentations identifiés en GA10, GA11, GA12 est récoltées les tensions $\pm 15Vdc$ et $+5Vdc$ pour les fiches du contrôle.



Figure II.8 : Photo réelle du box panier prise sur site

De suite sera illustrée une brève description des fiches présentes dans le contrôle :

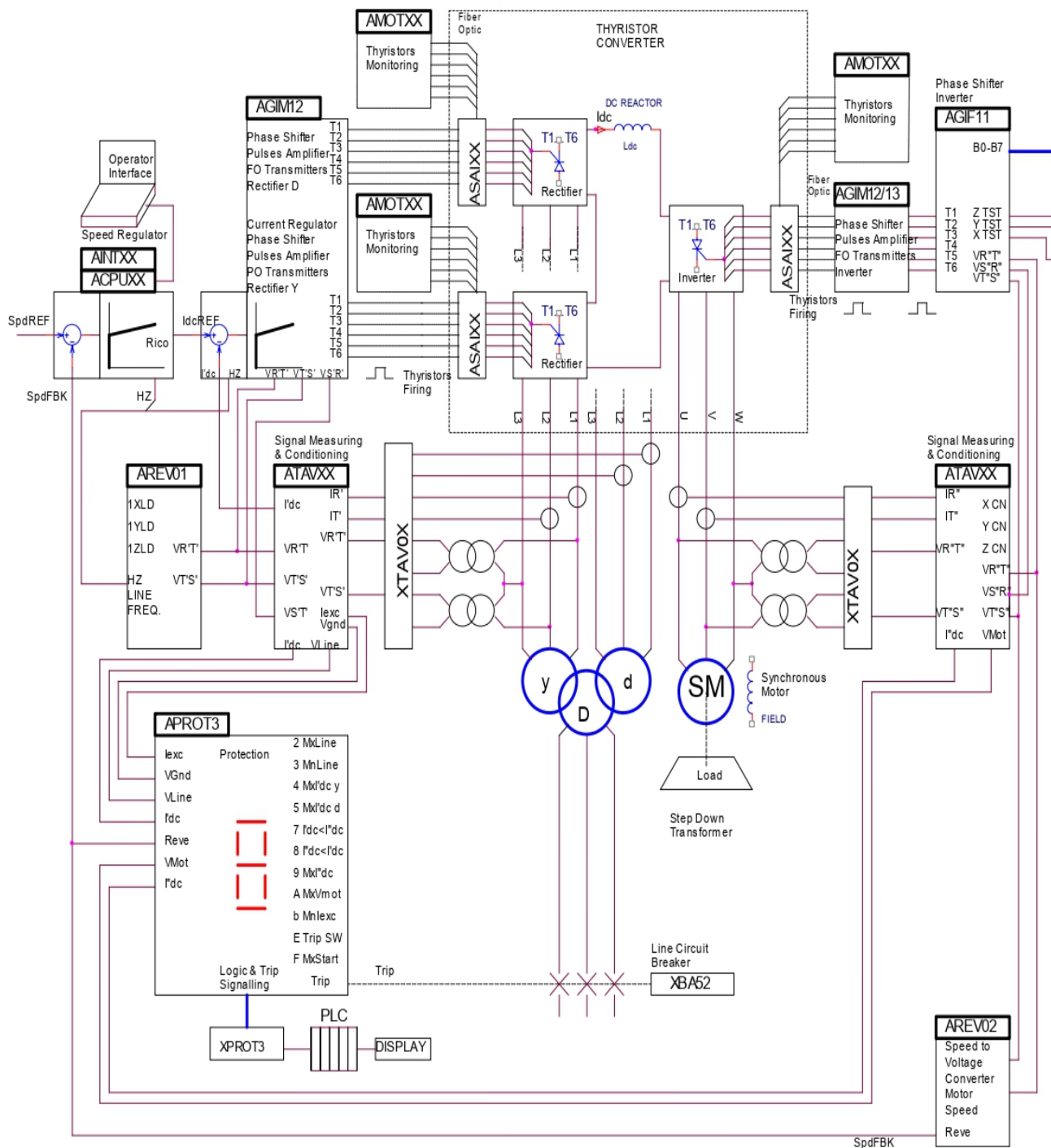


Figure II.9 : Schéma bloc du démarreur statique SFC

PANIER	NOM FICHE	DESCRIPTION
--------	-----------	-------------

Position B	AINT02	Gère l'interface entre la fiche CPU et les autres fiches insérées dans le panier et en outre l'interface digitale avec le PLC de tableau. La fiche monte un connecteur frontal pour se réunie avec la fiche bornes CPD37F.
Position D	ACPU02	Gère les fonctions suivantes : régulation d'angle pont inverseur ; gestion rampes et références ; interface utilisateur ; régulation de vitesse
Position F	APROT3	Surveille les grandeurs analogiques du convertisseur et il intervient aux valeurs de seuil préétablies en engendrant une protection hardware. La fiche gère tous les signaux qui servent pour qualifier les régulateurs, le certificat d'aptitude et les protections sont signalées avec du leds 7 segments pendant que les états avec du led vert, en outre en elle il est installé le régulateur de l'excitatrice de démarrage, (per le réglage des bagues de régulation vois description suivante)
Position G	ATAV22	Elabore les signaux provenant des TA et TV du pont redresseur uni au secondaire du transformateur à l'étoile, il engendre les synchronismes pour le pont redresseur. La fiche monte un connecteur frontal pour se relier avec la fiche borne XTAV02.
Position J	AREV01	Elabore les trois tensions de ligne et il tire la fréquence de réseau.
Position K	AGIM12	Régulateur de courant, régulateur douze impulsions ponts redresseur étoile et triangle, interface de la fiche AGIF11 pour recevoir les commandements aux thyristors du pont onduleur. La fiche engendre les signaux logiques d'allumage pour piloter les thyristors, d'elle ils partent 18 fibres optiques vers le convertisseur.
Position L	AGIM13	Expansion de la fiche AGIM12, en elle ils sont montés seulement les transmetteurs à la fibre optique.
Position N	ATAV22	Elabore les signaux provenant des TA et TV du pont inverseur, il engendre les synchronismes pour le pont inverseur. La fiche monte un connecteur frontal pour se relier avec la fiche borne XTAV02.
Position P	AREV02	Emule signale encoder pour reconnaissance vitesse. Des tensions de voiture, par des convertisseurs Hz/V, se récolte la réaction de vitesse.
Position Q	AGIF11	Régulateur convertisseur à la fréquence variable. En base à l'angle de commutation fondé il engendre les signaux logiques d'allumage pour piloter la fiche de génération impulsions du convertisseur à la fréquence variable. La fiche gère la fonctionnalité de reconnaissance de la position du rotor en cas de départ d'arrêt et en outre d'inverser les impulsions des thyristors pour avoir la possibilité de travailler sur 4 cadrans.

Tableau II.2 : description des fiches présentes dans le contrôle

D.2) PLC et circuits au relais à lui réuni [4] :

Tous les signaux en entrée et en sortie du tableau sont séparés de manière galvanique, par des fiches bornes aux 8 relais, comme montré dans l'illustration sous-jacent, exclu les commandements aux interrupteurs de moyenne tension, qu'ils utilisent des relais avec des contacts de puissance.

Les bobines des fiches d'entrée et des relais auxiliaires de puissance sont à 110Vdc, pendant que les fiches de sortie et les relais de la logique sont à 24Vdc. Le PLC utilisé dans cette application est du type GE FANUC série 90 -30, avec lui ils se développent toutes les logiques de tableau et de démarrage du TG.

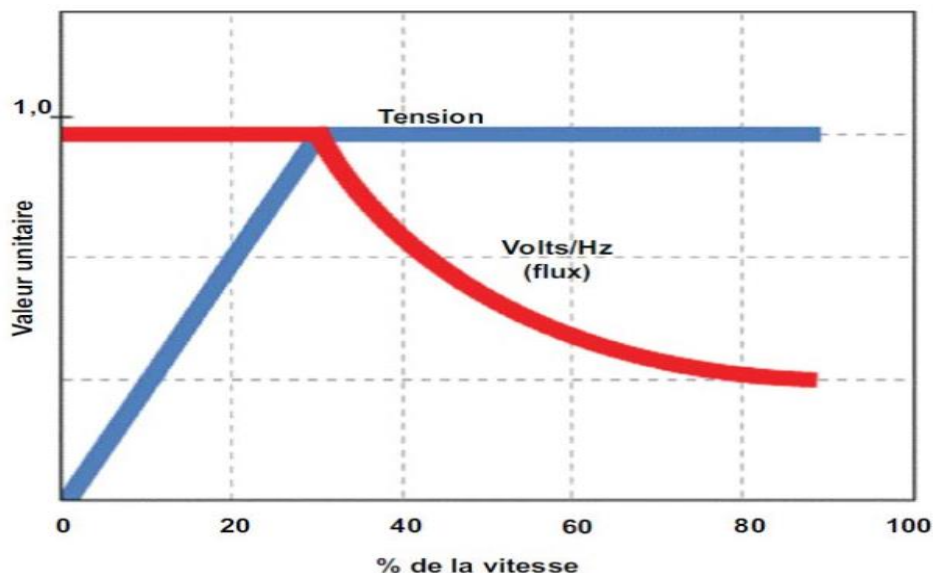


Figure II.10 : Photo réelle du PLC prise sur site

II.3 Caractéristique de démarrage :

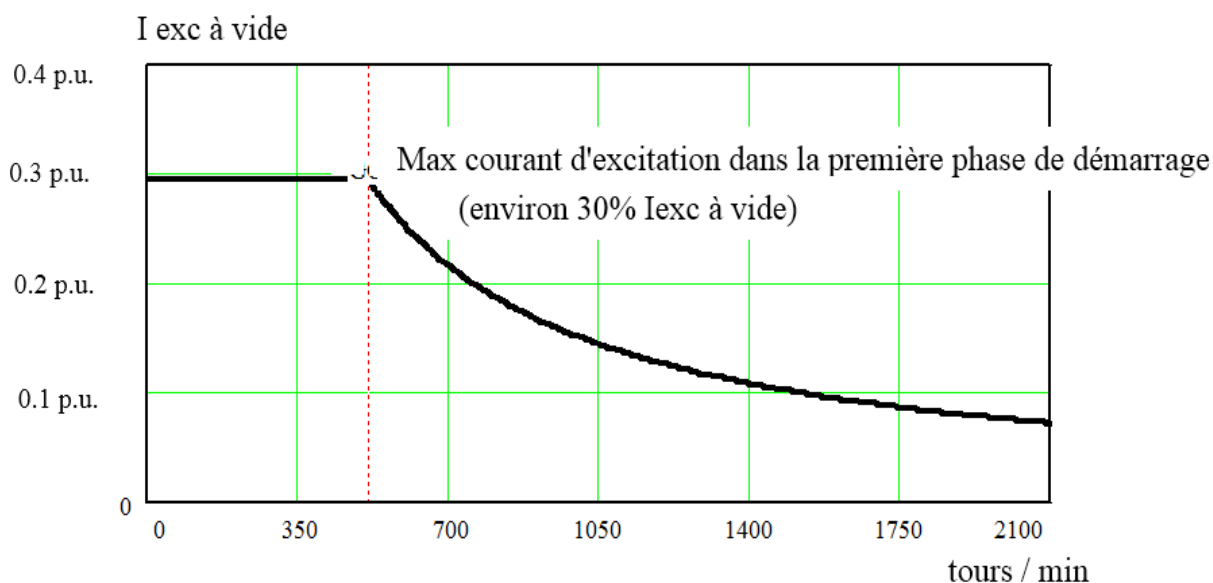
Pendant le démarrage il faut que le flux de l'alternateur ne devienne pas supérieur à une certaine valeur, la tension de sortie du démarreur augmente linéairement de 0 à la valeur nominale, en maintenant constant le rapport V/Hz. Quand la tension a atteint sa valeur nominale (≈ 2850 V), la tension est maintenue constante et, en conséquence, le rapport V/Hz diminue puisque la fréquence augmente.

La fréquence jusqu'à laquelle la tension est maintenue constante est nommée «fréquence base» (normalement est comprise entre 8 et 10 Hz). Cette caractéristique est obtenue par la coordination étroite entre le contrôle du démarreur et de l'excitatrice [4].



II.4 Courant d'excitation en démarrage :

Le courant d'excitation de l'alternateur (v. graphique) pendant un démarrage se maintient constant à la maximum valeur (qu'il est environ 30% du courant d'excitation à vide) jusqu'à environ 500 tours/min, et après il décroît avec régularité jusqu'à le moment du détachement du démarreur du TG [4].



II.5 Protection électriques dans la phase de démarrage :

Pendant la phase de démarrage le système de protections électriques de machine, si laissé actif, il se trouverait à opérer avec des valeurs de tension, courant et fréquence pas nominale en causant des interventions intempestives. Normalement donc toutes les protections du générateur sont désaffectées par un contact du sectionneur de démarrage.

Par contre, elles sont activées, du même contact, deux protections spéciales aptes à la fréquence variable ("51" max I c.a. - "59" max V c.a.) opportunément calibrées.

La protection de terre stator "64 S", normalement à injection, en fonctionnant déjà à machine arrêté, elle garantit l'intervention aussi en phase de démarrage.

Toutes les protections intérieures au démarreur sont actives évidemment calibrées sur les grandeurs de démarrage [4].

II.6 Interface avec le système de contrôle de la turbine :

La séquence de démarrage est complètement gérée par l'automatisme de la turbine à gaz(GTCMPS) par le change de signaux logiques entre GTCMPS et démarreur.

Pendant le fonctionnement le démarreur gère de manière autonome l'excitatrice qui pourvoira à développer la caractéristique de démarrage en manière coordonnée avec le démarreur. Après le détachement du démarreur et à la vitesse nominale, l'excitatrice sera gérée par GTCMPS.

II.7 Conclusion :

Dans ce chapitre on a fait une description en détail sur notre variateur de vitesse SFC, et les différents éléments de constitution (partie de puissance et partie de commande), et leurs circuits auxiliaires, ainsi que son principe et caractéristique de fonctionnement.

Chapitre III

**Modélisation et commande de
l'ensemble convertisseur-machine
électrique**

III.1 Introduction :

La modélisation est une étape imposante de l'étude des systèmes commandés pour contrôler un système donné il faut disposer de son modèle afin de l'étudier et de le simuler.

Dans ce chapitre nous montrons développons les modèles mathématiques de l'ensemble (convertisseur - machine électrique) par ses équations proportionnelles électrique, magnétique et mécanique ; nous allons présenter des stratégies de contrôle des vitesses que nous avons mises au point, Il existe deux types d'approches de la commande des machines synchrones alimentés en tension : les commandes classiques et les commandes modernes.

Il existe plusieurs techniques de commande de la machine synchrone à savoir :

La commande scalaire, la commande vectorielle, la commande directe du couple...etc.

Le contrôle des moteurs électriques nécessite non seulement une bonne compréhension de ses caractéristiques, mais également une compréhension approfondie de la théorie qui explique son fonctionnement.

En générale les machines réelles sont connues par leurs enroulements et leurs géométries propres trop complexes, pour se prêter à une analyse tenant compte de leurs configurations exactes, on doit donc développer pour chaque type un modèle dont le comportement soit le plus proche possible du modèle réel [14].

Ensuite de réaliser de nombreux tests basés sur des simulations après assemblage des deux modèles avec deux types de commande (vectorielle et scalaire) dans le chapitre suivant.

III.2 Modélisation de la Machine Synchrone à rotor bobiné :

L'étude des machines synchrones fonctionnant en régime transitoire nécessite un modèle mathématique ou système d'équations pouvant relier des valeurs propres dites sorties à des valeurs propres dites entrées, ce modèle devra tenir compte de la machine à étudier paramètres techniques, nombreux des modèles ont été développés afin d'étudier le comportement des machines électriques en général et des machines synchrones en particulier.

Chacun d'eux a son propre domaine de validité, correspondant à une situation ou une hypothèse imposée d'emblée.

On peut modéliser l'alternateur selon différentes méthodes :

A) Modèle linéaire :

Les équations différentielles, qui régissent le fonctionnement d'une machine synchrone triphasée, sont caractérisées par des coefficients qui dépendent du temps, d'où la difficulté de leurs résolutions. Pour la machine synchrone, la seule transformation qui peut éliminer le problème de dépendance du temps dans la matrice inductance, est celle représentée par le référentiel tournant avec le rotor.

Le modèle traditionnel de la décomposition vectorielle spatiale et temporelle tant des champs magnétiques que des courants dans les machines synchrones (machines électriques en général) est extrêmement utilisée. Ce modèle (connu sous le nom de modèle de Park) permet de simuler de façon simple le comportement en régime transitoire ou permanent de ces machines.

Les détails de l'élaboration du modèle de Park ont été traités dans de nombreux ouvrages d'électrotechnique [15].

B) Modèle de Park :

L'étude des machines électriques à partir de la transformée de Park a déjà été longuement traitée dans plusieurs ouvrages et publications spécialisées.

Ce modèle permet, par un changement de référentiel, de passer du système statorique au système rotorique avec élimination au passage de certaines variables. Le changement de référentiel permet de passer à une machine bipolaire équivalente, dont l'étude est certainement plus facile.

Ensuite par une transformation inverse on peut revenir au modèle triphasé afin d'obtenir les grandeurs caractéristiques « naturelles » de la machine.

Le modèle de base consiste à considérer une machine synchrone à pôles saillants ayant une paire de pôles au rotor et un enroulement statorique triphasé. L'enroulement inducteur se trouve sur le rotor de la machine selon l'axe de la saillance, appelé axe direct ou axe longitudinal de la machine (ou encore axe polaire).

La présence de grille ou de cage d'amortisseurs au rotor, ou encore l'éventuel effet d'amortisseur du fer, sont modélisés par deux circuits amortisseurs équivalents ; l'un sur l'axe polaire et l'autre sur l'axe inter polaire [15].

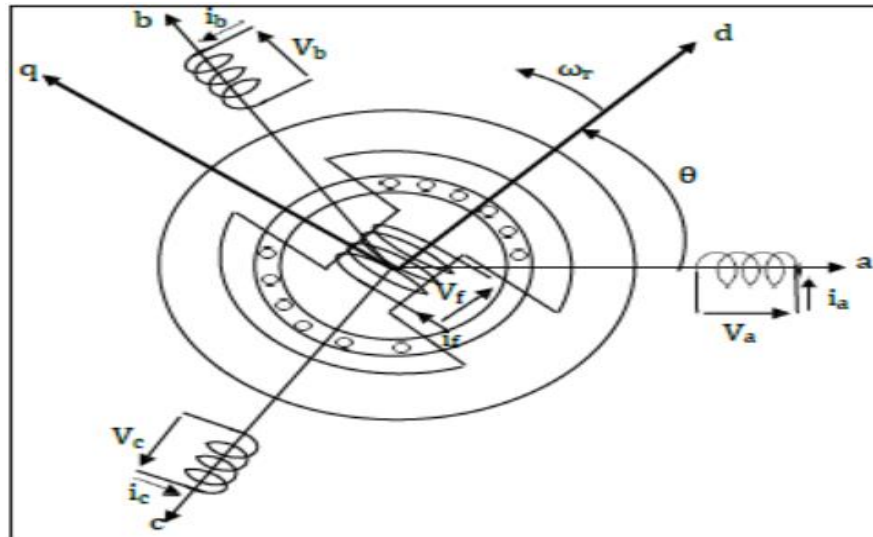


Figure III.1 : Représentation de machine synchrone triphasée sans amortisseurs

III.2.1 Les hypothèses simplificatrices :

Le modèle que nous considérons est basé sur les hypothèses de simplification suivantes [12]:

- L'effet de la saturation du circuit magnétique est négligé
- La répartition de l'induction le long de l'entrefer est supposée sinusoïdale
- Les pertes fer sont négligées (hystérésis et courant de Foucault)
- Les effets des encoches ne sont pas pris en compte
- Le couplage capacitif entre les enroulements est négligé
- L'effet de peau, qui augmente les résistances et diminue les inductances, est négligé
- L'effet de la température sur les résistances est négligé

Et d'autres parts se basent sur trois types d'équations [22] :

- ✓ Equations électriques : la relation entre les tensions et les courants est décrite par la loi d'Ohm généralisée avec la loi de Faraday.
- ✓ Equations magnétiques : il s'agit des équations qui décrivent les flux en fonction des courants qui parcourent les enroulements (théorème d'Ampère).

Equations mécaniques : la deuxième loi de Newton décrit la variation de la vitesse de l'arbre de la machine en fonction du couple.

III.2.2 Equations électriques et magnétique :

Les équations de tensions de la machine synchrone triphasée exprimées dans le repère (a,b,c) s'écrivent :

$$\text{induit (stator)} \begin{cases} V_a = R_a \cdot i_a + \frac{d\varphi_a}{dt} \\ V_b = R_b \cdot i_b + \frac{d\varphi_b}{dt} \\ V_c = R_c \cdot i_c + \frac{d\varphi_c}{dt} \end{cases} \quad \text{III.1}$$

$$\text{inducteur (rotor)} \quad \left\{ V_f = R_f \cdot i_f + \frac{d\varphi_f}{dt} \right. \quad \text{III.2}$$

Avec :

V_{abc} : Les tensions des phases statoriques.

$R_a = R_b = R_c = R_s$: Résistance d'une phase statorique.

R_f : Résistances de l'inducteur.

φ_{abc} : Les flux totaux à travers les bobines statorique.

L'équation du flux est exprimée sous forme matricielle :

$$\begin{cases} \varphi_{sa} = L_s I_{sa} + M_s I_{sb} + M_s I_{sc} + M_{sf} I_f \cos(\theta) \\ \varphi_{sb} = L_s I_{sb} + M_s I_{sc} + M_s I_{sa} + M_{sf} I_f \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \varphi_{sc} = L_s I_{sc} + M_s I_{sa} + M_s I_{sb} + M_{sf} I_f \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \varphi_f = L_f I_f + M_{sf} I_{sa} \cos(\theta) + M_{fs} I_{sb} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + M_{fs} I_{sc} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad \text{III.3}$$

Avec :

L_s : L'inductance d'une phase statorique.

M_s : L'inductance mutuelle entre deux phases statoriques.

L_f : L'inductance propre de l'enroulement du rotor f.

M_{sf} : L'inductance mutuelle entre phases statoriques et l'enroulement du rotor.

M_{fs} : L'inductance mutuelle maximale stator-rotor.

III.2.3 Equation mécanique :

L'équation mécanique est donnée par :

$$C_{em} - C_r = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \quad \text{III.4}$$

Avec : $\Omega = \frac{\dot{\theta}}{p}$ III.5

C_{em} : Couple électromagnétique de la machine (N.m).

C_r : Couple de charge (N.m).

f : Coefficient de frottement(N.m.s/rad).

Ω : Vitesse mécanique de rotation du rotor (rad.s).

J : Moment d'inertie totale des parties mobiles (kg.m²) .

P : Nombre de paires de pôles de la machine.

III.2.4 Transformation de Park :

La transformation de Park implique la transformation des enroulements des phases a, b, c, de la machine originelle en des enroulements équivalents du point de vue électrique et magnétique disposés selon les axes d et q. Cette transformation a pour effet de rendre, les inductances mutuelles du modèle de la machine, indépendantes de la rotation.

La transformation de Park on définit une matrice unique de transformation pour les tensions, les courants, et les flux :

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{III.6}$$

On a ainsi :

$$[V_{dqo}] = [T] [V_{abc}]$$

$$[i_{dqo}] = [T] [i_{abc}]$$

$$[\varphi_{dqo}] = [T][\varphi_{abc}]$$

Le coefficient $\sqrt{\frac{2}{3}}$ correspond à un changement naturel de bases dans des repères orthonormés.

Changement qui, lorsqu'il est appliqué au vecteur courant et à la vectrice tension, conserve la valeur de la puissance (le produit scalaire est indépendant de la base choisie).

Ce type de changement de base présente également l'avantage d'obtenir une matrice de transformation inverse qui est transposée de la matrice de transformation directe.

Avec la transformation de Park, la représentation schématique de la figure II.2 devient :

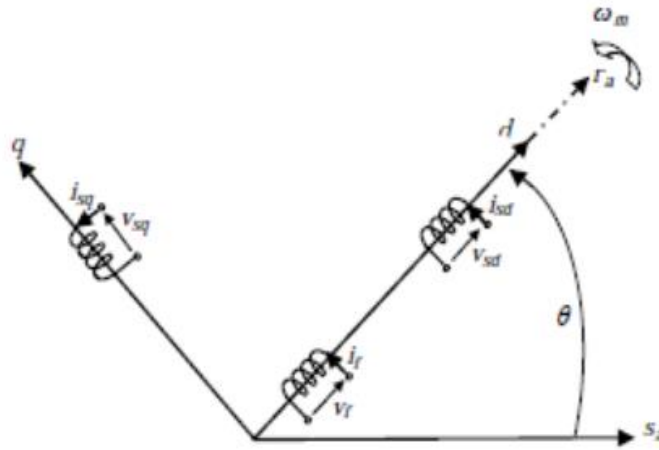


Figure III.2 : Représentation de la MSR sans amortisseurs dans le repère de Park [12]

III.2.5 Equations de Park dans les axes d et q, liées au rotor :

Nous appliquons les changements de variables définis par la matrice T (équation II.6) aux équations (II.1 et II.2), alors :

$$V_{dq0} = [T] \cdot V_{abc} = [T] \cdot [R_a] \cdot i_{abc} + [T] \cdot \frac{d\phi_{abc}}{dt} \quad \text{III.7}$$

$$V_{dq0} = [T][R_a][T]^{-1}i_{dq0} + [T][T]^{-1} \frac{d\phi_{dq0}}{dt} + [T] \frac{d[T]^{-1}}{dt} \phi_{dq0} \quad \text{III.8}$$

$$[T][T]^{-1} = 1, \text{ on trouve } [T] \frac{d[T]^{-1}}{dt} = \frac{d\theta}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{III.9}$$

En développant l'équation (II.8) on aura :

$$\text{stator} \begin{cases} V_d = R_s \cdot I_d + \frac{d\phi_d}{dt} - \omega \phi_q \\ V_q = R_s \cdot I_q + \frac{d\phi_q}{dt} + \omega \cdot \phi_d \\ V_0 = R_s \cdot I_0 + \frac{d\phi_0}{dt} \end{cases} \quad \text{III.10}$$

$$\text{rotor} \left\{ V_f = R_f \cdot i_f + \frac{d\varphi_f}{dt} \right. \quad \text{III.11}$$

Ces équations sont appelées les équations de Park : les équations de tensions pour d, q et 0 (la composante homopolaire), l'inducteur f.

Dans les expressions de V_d et V_q on voit apparaître les f.é.m. de rotation ($-\omega \cdot \varphi_q$ et $+\omega \cdot \varphi_d$)

III.2.6 Equations des flux et courants :

En appliquant la transformation de Park aux équations (II.3), la matrice d'inductances est obtenue en reliant le vecteur des flux au vecteur des courants. Après calculs, on obtient :

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d \cdot I_d + M_f I_f \\ \varphi_q = L_q \cdot I_q \\ \varphi_f = L_f \cdot I_f + M_f I_d \end{cases} \quad \text{III.12}$$

L_d : Inductance synchrone longitudinale, L_q Inductance synchrone transversale.

L_f : Inductance propre de l'inducteur.

M_f : Inductance mutuelle entre l'inducteur et l'induit.

III.2.7 Schéma équivalent de la machine synchrone :

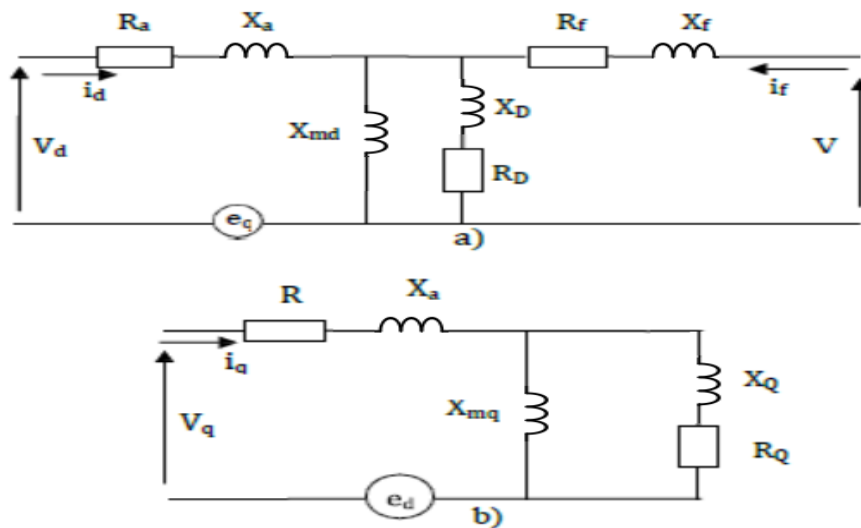


Figure III.3 : Circuits équivalents du modèle simplifié de la machine synchrone
(a)axe direct, (b) axe quadrature

III.3 Modélisation de l'onduleur à trois niveaux :

III.3.1 Structure de l'onduleur à trois niveaux :

L'onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC est une nouvelle structure de conversion utilisée pour alimenter, à tension et fréquence variables, des moteurs à courant alternatif de forte puissance [8], [13].

Plusieurs structures sont possibles pour l'onduleur à trois niveaux. Nous avons choisi d'étudier la structure NPC comme indique la figure (III.4). Le convertisseur triphasé trois niveaux est composé de douze interrupteurs bidirectionnels en courant et de six diodes reliées au point milieu de sources permettent ainsi l'accès au potentiels $+U_c$, $-U_c$ et 0.

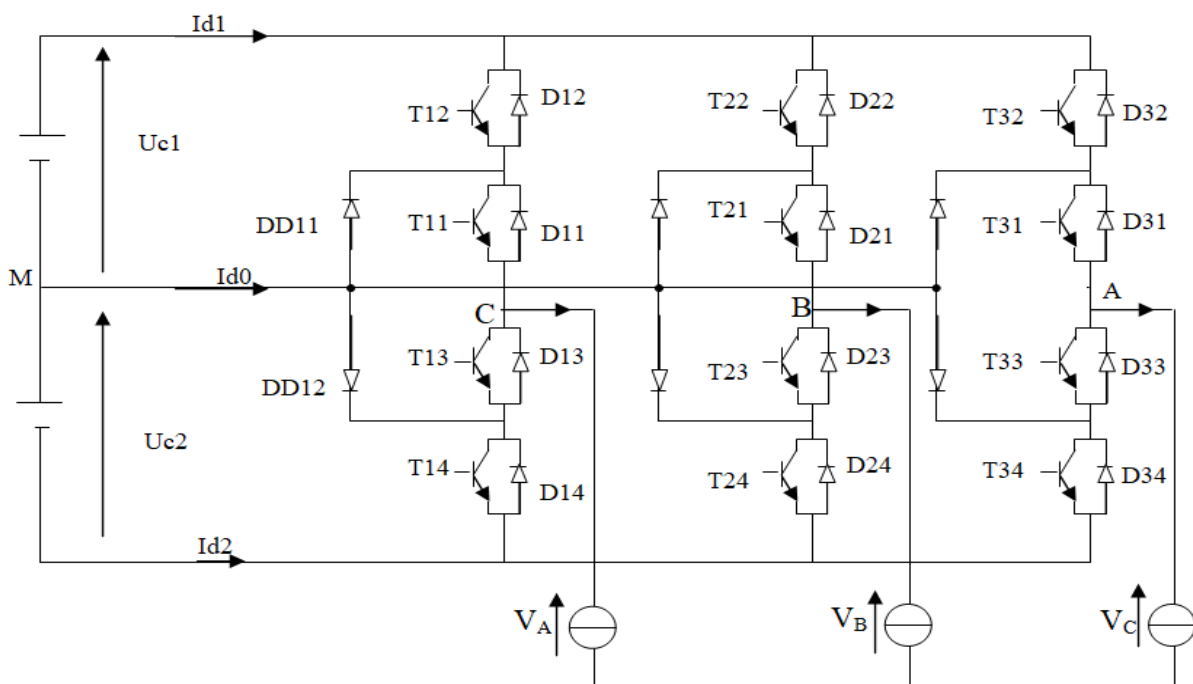


Figure III.4 : Onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC [20]

III.3.2 Modélisation du fonctionnement d'un bras d'onduleur à trois niveaux :

La symétrie des onduleurs triphasés à trois niveaux permet leur modélisation par bras. ainsi, on commencera par définir un modèle global d'un bras sans a priori sur la commande. On montrera ensuite comment déduire celui d'un bras complet.

Dans le but de réduire, en considérant toutes les configurations possibles d'un bras, on représente chaque paire thyristor (T_{kS}) – diodes (D_{kS}) par un seul interrupteur bidirectionnel (TD_{kS}) [8], [13].

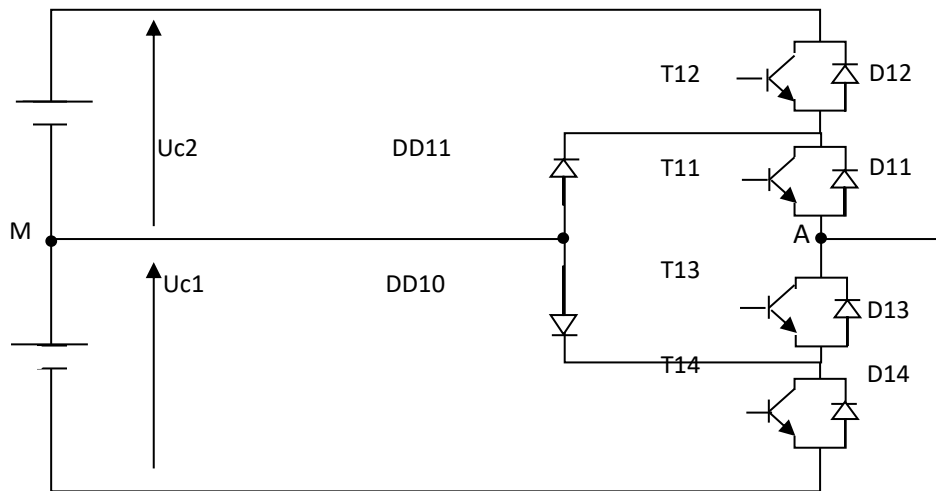


Figure III.5 : Bras de l'onduleur triphasé à trois niveaux [20]

On vut la symétrie de la structure de l'onduleur triphasée à trois niveaux. La modélisation de ce dernier ce fait par bras figure (III.5).

III.3.3 Différents configuration du bras d'onduleur à trois niveaux :

Une analyse topologique d'un bras montre cinq configurations possibles. Ces différentes configurations sont présentées par les figures (III.6). Les grandeurs électrique caractérisant chacune de ces configurations sont donnée dans le tableau (III.1) (avec M origine des potentiels et V_k le potentiel du nœud K du bras K) .pour la configuration E0, le potentiel V_k dépend de la charge de l'onduleur [20].

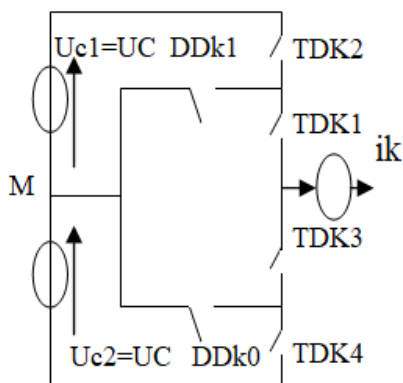


Figure III.6.a : La configuration de E0

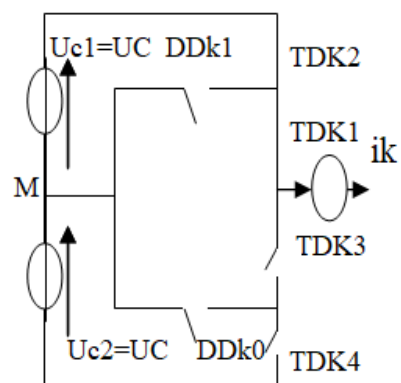


Figure III.6.b : La configuration de E1

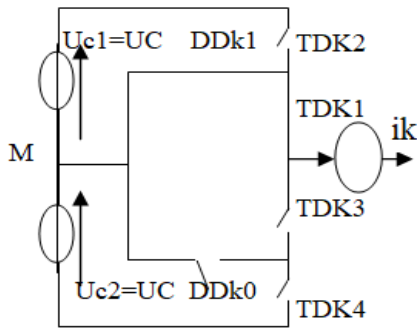


Figure III.6.c : La configuration de E2

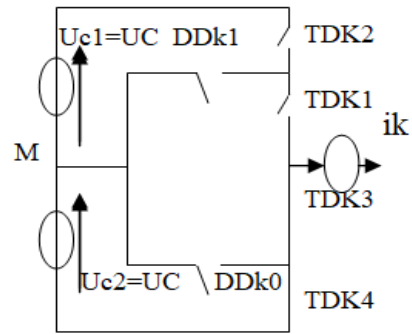


Figure III.6.d : La configuration de E3

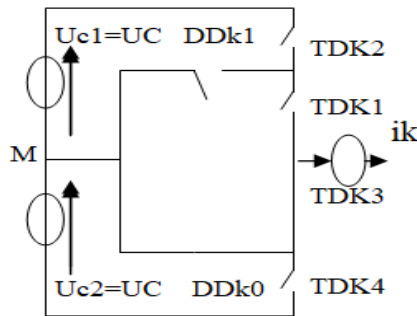


Figure III.6.e : La configuration de E4

Les grandeurs électriques caractérisant chacune de ces configurations sont représentées dans le tableau (III.1) :

Configuration	Grandeurs électriques
E0	$I_k = 0$, V_k dépend de la charge
E1	$V_k = U_{c1} = U_c$
E2	$V_k = 0$
E3	$V_k = - U_{c2} = - U_c$
E4	$V_k = 0$

Tableau III.1 : Grandeurs électriques à chacune des configurations d'un bras d'onduleur à trois niveaux à structure NPC [20]

III.3.4 Modèle de commande des onduleurs à trois niveaux :

Afin d'avoir un fonctionnement totalement commandable qui permet à onduleur de délivrer les trois niveaux de tensions désirées, on doit le faire fonctionner en son mode commandable. Trois commandes complémentaires peuvent être appliquées sur un bras.

$$\left\{ \begin{array}{l} B_{K1} = \overline{B_{K2}} \\ B_{K3} = \overline{B_{K4}} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} B_{K1} = \overline{B_{K3}} \\ B_{K2} = \overline{B_{K4}} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} B_{K1} = \overline{B_{K4}} \\ B_{K2} = \overline{B_{K3}} \end{array} \right. \quad \text{III.13}$$

La commande donnée par la relation (III.13).C'est celle qui donne les trois U_{c1} , 0 et U_{c2} de façon optimale [8].

Le tableau III.2 montre la table d'excitation associé à cette commande complémentaire :

B_{K1}	B_{K2}	B_{K3}	B_{K4}	v_K
0	0	1	1	$-U_{c2}$
1	0	1	0	0
1	1	0	0	U_{c1}
0	1	0	1	Inconnue

Tableau III.2 : Table d'excitation des interrupteurs de l'onduleur à trois niveaux [20]

B_{Ki} : commande de la base du transistor T_{Ki}

Ainsi avec cette commande complémentaire, les fonctions de connexion des interrupteurs du bras K sont liées par les relations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{k1} = 1 - F_{k4} \\ F_{k2} = 1 - F_{k3} \end{array} \right. \quad \text{III.14}$$

Avec cette commande complémentaire tout ce passe comme et pour chaque bras de l'onduleur triphasé à trois niveaux, on à seulement deux cellules de commutation à deux interrupteurs chacune. Ces deux cellules sont constituées respectivement des paires d'interrupteurs (T_{k1}, T_{k2}) et (T_{k2}, T_{k3}) .

III.3.5 Fonction de commutation :

On définit pour l'onduleur à trois niveaux une fonction de commutation F_{ki} associée à la cellule i du bras K ($i = 1, \text{ ou } 2$) [13].

On appellera cellule 1 du bras la paire d'interrupteur (T_{k1} , T_{k4}) et la cellule 2 la paire (T_{k2} , T_{k3})
Ainsi, on a :

F_{k1} : fonction de commutation associée à la cellule 1

F_{k2} : fonction de commutation associée à la cellule 2

Les fonctions des connexions des interrupteurs s'expriment à l'aide de ces fonctions de commutation comme suit :

$$\begin{cases} F_{K1}(t) = \frac{1}{2} [1 + F_k^1(t)] \\ F_{K2}(t) = \frac{1}{2} [1 + F_k^2(t)] \end{cases} \quad \text{III.15}$$

$$\begin{cases} F_{K4}(t) = \frac{1}{2} [1 + F_k^1(t - \frac{T}{2})] \\ F_{K3}(t) = \frac{1}{2} [1 + F_k^2(t - \frac{T}{2})] \end{cases} \quad \text{III.16}$$

On définira une fonction de connexion du demi-bras qu'on notera F_{km}^b

Avec :

K : numéro du bras, $m=1$ pour le demi-bras du haut, et $m=0$ pour le demi-bras du bas.

Pour un bras K , les fonctions de connexion des demi-bras s'expriment au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs comme suit :

$$\begin{cases} F_{k1}^b = F_{k1} \cdot F_{k2} \\ F_{k0}^b = F_{k3} \cdot F_{k4} \end{cases} \quad \text{III.17}$$

F_{k1}^b est associée au demi-bras du haut (la paire T_{k1} , T_{k2}) et F_{k0}^b au demi-bras du bas (la paire T_{k3} , T_{k4}).

Le système d'équation (III.11) montre que la fonction de connexion du demi-bras F_{km}^b vaut 1 dans le cas où les deux interrupteurs du demi-bras associés à F_{km}^b sont tous fermés, et nulle dans tous les autres cas [13].

III.3.6 Fonction de conversion :

Les potentiels des nœuds A, B et C de l'onduleur triphasé à trois niveaux, par rapport au point M de la source de tension d'entrée ; sont donnés par le système suivant : (on suppose $U_{c1}=U_{c2}=U_c$).

$$\begin{cases} V_{am} = F_{11}F_{12}U_{c1} - F_{13}F_{14}U_{c2} = (F_{11}F_{12} - F_{13}F_{14})U_c \\ V_{bm} = F_{21}F_{22}U_{c1} - F_{23}F_{24}U_{c2} = (F_{21}F_{22} - F_{23}F_{24})U_c \\ V_{cm} = F_{31}F_{32}U_{c1} - F_{33}F_{34}U_{c2} = (F_{31}F_{32} - F_{33}F_{34})U_c \end{cases} \quad \text{III.18}$$

On constate d'après le système (III.18), que l'onduleur de tension à trois niveaux est équivalent à deux onduleurs à deux niveaux en série.

$$\begin{cases} F_{11}^b = F_{11}F_{12} \\ F_{10}^b = F_{13}F_{14} \end{cases}, \quad \begin{cases} F_{21}^b = F_{21}F_{22} \\ F_{20}^b = F_{23}F_{24} \end{cases}, \quad \begin{cases} F_{31}^b = F_{31}F_{32} \\ F_{30}^b = F_{33}F_{34} \end{cases} \quad \text{III.19}$$

En introduisant l'expression de ces dernières dans les tensions d'entrées on aboutit à :

$$\begin{cases} V_{AM} = F_{11}^b U_{c1} - F_{10}^b U_{c2} = (F_{11}^b - F_{10}^b)U_c \\ V_{BM} = F_{21}^b U_{c1} - F_{20}^b U_{c2} = (F_{21}^b - F_{20}^b)U_c \\ V_{CM} = F_{31}^b U_{c1} - F_{30}^b U_{c2} = (F_{31}^b - F_{30}^b)U_c \end{cases} \quad \text{III.20}$$

Les tensions composées sont données par :

$$\begin{cases} U_{AB} = V_{AM} - V_{BM} = (F_{11}F_{12} - F_{21}F_{22})U_{c1} - (F_{13}F_{14} - F_{23}F_{24})U_{c2} \\ U_{BC} = V_{BM} - V_{CM} = (F_{21}F_{22} - F_{31}F_{32})U_{c1} - (F_{23}F_{24} - F_{33}F_{34})U_{c2} \\ U_{CA} = V_{CM} - V_{AM} = (F_{31}F_{32} - F_{11}F_{12})U_{c1} - (F_{33}F_{34} - F_{13}F_{14})U_{c2} \end{cases} \quad \text{III.21}$$

Si on admet que les tensions simples du récepteur forment un système triphasé équilibré on aura :

$$\begin{aligned} V_{AN} = V_A &= \frac{U_{AB} - U_{CA}}{3} \\ V_{BN} = V_B &= \frac{U_{BC} - U_{AB}}{3} \\ V_{CN} = V_C &= \frac{U_{CA} - U_{BC}}{3} \end{aligned} \quad \text{III.22}$$

En introduisant les fonctions de connexion des demi-bras on obtient :

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} U_{c1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} U_{c2} \right\} \quad \text{III.23}$$

Les tensions simples sont données comme suite (avec $U_{c1}=U_{c2}=U_c$) [10], [7], [15] :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_c \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11}^b - F_{10}^b \\ F_{21}^b - F_{20}^b \\ F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix} \quad \text{III.24}$$

Ainsi les courants d'entrée de l'onduleur triphasée s'exprime en fonction des courants de la charge i_1, i_2, i_3 et au moyenne des fonctions de connexion des demi-bras par les relations suivantes :

$$\begin{cases} i_{d1} = F_{11}^b F_{12}^b i_1 + F_{21}^b F_{22}^b i_2 + F_{31}^b F_{32}^b i_3 \\ i_{d2} = F_{13}^b F_{14}^b i_1 + F_{23}^b F_{24}^b i_2 + F_{33}^b F_{34}^b i_3 \end{cases} \quad \text{III.25}$$

En remplaçant les fonctions de connexion des interrupteurs par les fonctions de connexion des demi-bras, la relation (III.25) devient

$$\begin{cases} i_{d1} = F_{11}^b i_1 + F_{21}^b i_2 + F_{31}^b i_3 \\ i_{d2} = F_{10}^b i_1 + F_{20}^b i_2 + F_{30}^b i_3 \end{cases} \quad \text{III.26}$$

Le courant i_{d0} est lié aux courants d'entrée et aux courants de charge par la relation suivant :

$$i_{d0} = (i_1 + i_2 + i_3) - (i_{d1} + i_{d2}) \quad \text{III.27}$$

En introduisant la relation (III.25) dans l'équation (III.27) on obtient :

$$i_{d0} = [1 - (F_{11}^b + F_{10}^b)] i_1 + [1 - (F_{21}^b + F_{20}^b)] i_2 + [1 - (F_{31}^b + F_{30}^b)] i_3 \quad \text{III.28}$$

III.4 Stratégies de commande de l'onduleur triphasé à trois niveaux :

Comme l'onduleur à trois niveaux est la mise en série de deux onduleurs à deux niveaux, les techniques classiques de modulation sinusoïdale, développées à l'origine en deux niveaux, sont étendues à l'onduleur à trois niveaux ces technique ont été développées par plusieurs auteurs [20], [13].

III.4.1 Modulation de largeur d'impulsion (MLI) :

Cette technique permet de reconstituer des grandeurs telles que les tensions à partir d'une source à fréquence fixe et tension fixe par l'intermédiaire d'un convertisseur direct.

La MLI, permet alors de s'approcher du signal désiré (onde sinusoïdal). Le contenu harmonique généré par une onde MLI entraîne des pertes dans le réseau (pertes fer dans le transformateur, perte joule).

Elles génèrent dans les machines tournantes des oscillations de couple, des bruits acoustiques et résonance électromagnétique, elle injecte du bruit sur la commande et introduit des non linéarités qui peuvent déstabiliser le système [6].

Il y a plusieurs algorithmes utilisant la MLI vectorielle pour commander l'onduleur ou le redresseur. Le but de toutes les stratégies de modulation est de réduire les pertes de commutation et les harmoniques, et d'assurer une commande précise [7].

III.4.2 Caractéristique de la MLI :

Deux paramètres caractérisent cette commande :

1) $m = \frac{f_p}{f_r}$

2) $r = \frac{V_r}{V_p}$

Avec :

m : L'indice de modulation qui définit le rapport entre la fréquence f_p de la porteuse et la fréquence f_r de la référence.

r : Le taux de modulation (ou coefficient de réglage) qui donne le rapport de l'amplitude de la modulante V_r à la valeur crête V_p de la porteuse.

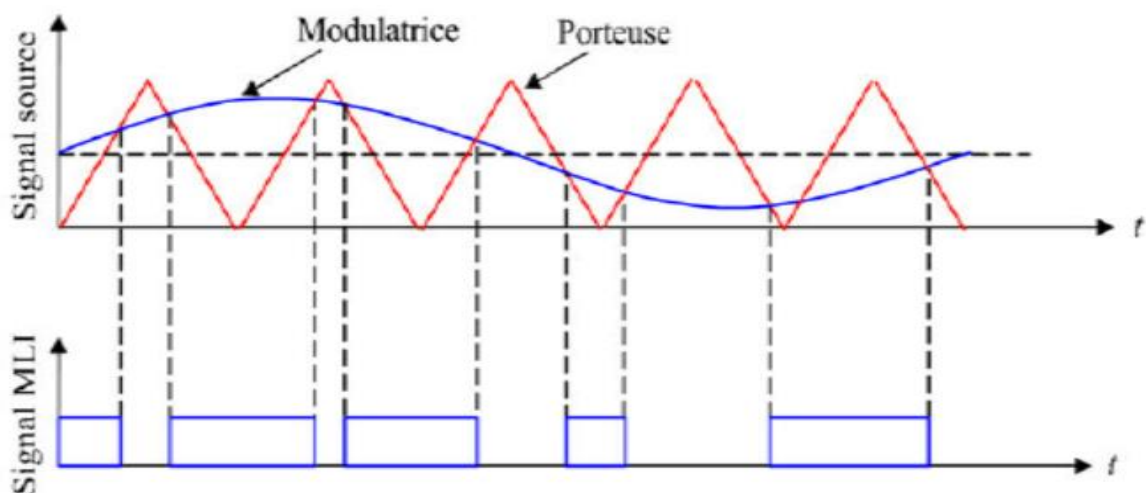


Figure III.7 : Principe de la commande MLI [6]

III.4.3 Stratégie de triangulo-sinusoidale à échantillonnage naturel à deux porteuses :

A) Principe de stratégie [13]:

Cette stratégie exploite le fait qu'un onduleur à trois niveaux est équivalent à deux onduleurs à deux niveaux en série, l'un alimenté par $E/2$ et forme des demi-bras du bas de l'onduleur à trois niveaux.

Dans cette stratégie, différentes formes de porteuses sont possible :

- La porteuse triangulaire unipolaire ou bipolaire qui permet d'obtenir des tensions de sortie ayant la symétrie par rapport au quart et la demi-période.
- La porteuse en dents de scie unipolaire ou bipolaire, qui permet une réduction du taux d'harmonique.

Nous présentons une stratégie utilisant une porteuse en dents de scie bipolaire. L'algorithme de commande se résume en deux étapes :

1) Dans la première étape, nous déterminons les signaux de commande intermédiaires de chaque onduleur à trois niveaux équivalent à un demi-bras de l'onduleur à trois niveaux. Le signal V_{k1} correspond au demis bras K du haut est obtenue en comparant un signal de référence V_{refk} à une porteuse en dents de scie bipolaire U_{p1} .

$$\begin{cases} (V_{refk} \geq U_{p1}) \Rightarrow V_{k1} = 1 \\ (V_{refk} < U_{p1}) \Rightarrow V_{k1} = 0 \end{cases}$$

Le signal V_{k0} correspondant u demi-bras K du bas est obtenus on compare le même signal de référence V_{refk} à une poreuse U_{p2} identique à U_{p1} et déphasée d'une période de hachage.

$$\begin{cases} (V_{refk} \geq U_{p2}) \Rightarrow V_{k0} = 0 \\ (V_{refk} < U_{p2}) \Rightarrow V_{k0} = -1 \end{cases}$$

2) Dans la deuxième étape, nous reconstituons l'image de la tension V_{km} de la phase K de l'onduleur à trois niveaux par rapport au point milieu appelé V_{k2} .

$$V_{k2} = V_{k1} + V_{k0}$$

Les ordres des commandes des interrupteurs sont déduit par :

$$\begin{cases} \text{si } V_{K2} = E/2 \Rightarrow B_{K1} = 1, B_{K2} = 1 \\ \text{si } V_{K2} = -E/2 \Rightarrow B_{K1} = 0, B_{K2} = 0 \\ \text{si } V_{K2} = 0 \Rightarrow B_{K1} = 1, B_{K2} = 0 \end{cases}$$

$$B_{K3} = \bar{B}_{K2} \quad ; \quad B_{K4} = \bar{B}_{K1}$$

B) Algorithme de la commande [8], [23] :

Cette stratégie est caractérisée par l'indice de modalisation m et le taux de modalisation r :

- L'indice de modalisation m défini comme le rapport de la fréquence de la porteuse et celle de la référence (f_p/f). La modulation est dite synchrone lorsque m est entier et asynchrone dans le cas contraire.

- Le taux de modulation r , qui est égale au rapport de l'amplitude V_m de la tension de référence à l'amplitude U_{pm} de la porteuse.

Cette stratégie présente deux avantages importants :

- ✓ Elle repousse vers des fréquences élevées les harmoniques de la tension de sortie, ce qui facilite leur filtrage.
- ✓ Elle permet de faire varier l'amplitude du fondamentale de la tension de sortie.

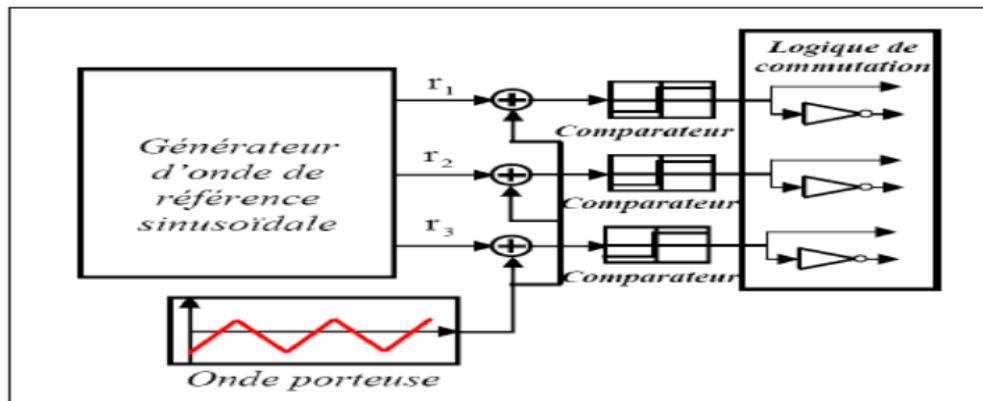


Figure III.8 : Principe de la technique triangulo-sinusoidale [23]

La figure (III.9) montre l'allure des signaux des deux porteuses et celles de référence pour $m=21$, $r=0.8$, U_{p1} , U_{p2} et les tensions de référence V_{sa1} , V_{sb1} et V_{sc1} .

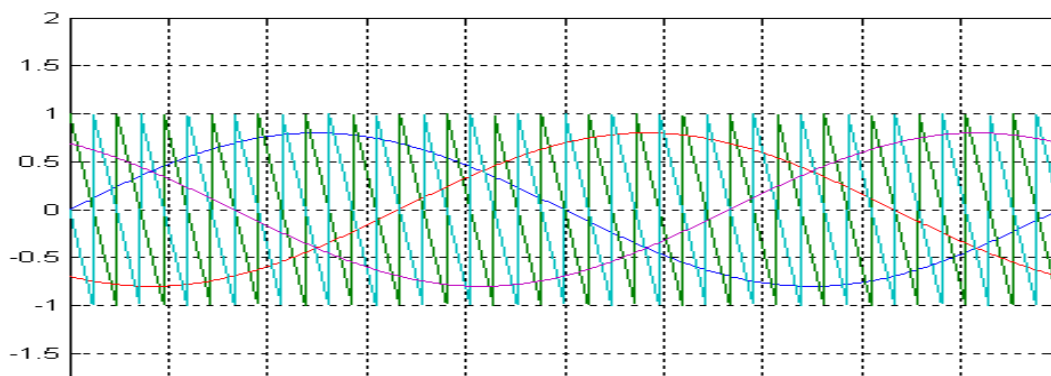


Figure III.9 : Signaux de références et triangulaires

III.5 Les applications des onduleurs :

Parmi les nombreux domaines d'emploi des onduleurs autonomes, on trouve principalement Les onduleurs à fréquence fixe à commutation forcée : Alimentés le plus souvent par une batterie d'accumulateur, ils jouent d'ordinaire le rôle d'alimentation de sécurité [24], [25].

La plupart des applications des onduleurs triphasés de tension à MLI se résument aux : Commande des moteurs alternatifs, filtre actif, systèmes d'alimentations sans interruption (ASI) utilisés, par exemple, pour réaliser des alimentations de sécurité, on s'efforce alors de maintenir la tension de sortie constante quelle que soit la charge.

Les onduleurs de tension à fréquence variable servent à réaliser des entraînements à vitesse variable avec moteur à courant alternatif.

Les onduleurs de courant sont utilisés dans les entraînements à vitesse variable des moteurs à courant alternatif [9].

III.6 Généralité sur Commande Vectorielle :

La commande vectorielle, aussi appelée commande à flux orienté (*field oriented control en anglais*), est une méthode de commande des variateurs de vitesse électrique dans laquelle les courants statoriques triphasés d'un moteur électrique à courants alternatifs sont transformés en deux composantes orthogonales qui peuvent être considérées comme étant des vecteurs. Ils sont alors découplés et le fonctionnement devient alors similaire à celui d'un moteur à courant continu.

La commande vectorielle est utilisée pour les machines synchrones et asynchrones, ainsi que pour les onduleurs en général. Elle a été conçue au départ pour des applications demandant de bonnes performances de la part du moteur : fonctionnement régulier sur toute la plage de vitesse, couple maximal à vitesse nulle, bonnes performances dynamiques combinés à des accélérations et décélérations rapide [16].

III.6.1 Principe de la Commande Vectorielle :

Le principe de la commande vectorielle est modéliser la machine synchrone comme une machine à courant continu, par application de cette nouvelle technique de commande. Ceci concilie les avantages des propriétés du moteur à courant continu et de l'absence du collecteur mécanique. Le contrôle du couple d'une machine alternative nécessite un contrôle en phase et en amplitude des courants d'alimentation d'où le nom de contrôle vectoriel. Pour réaliser un contrôle similaire à celui des machines à courant continu à excitation séparée, il est nécessaire de maintenir le courant I_d nul et de réguler la vitesse ou la position par le courant I_q via la tension V_q . Physiquement, cette stratégie revient à maintenir le flux de réaction d'induit en quadrature avec le flux rotorique [21].

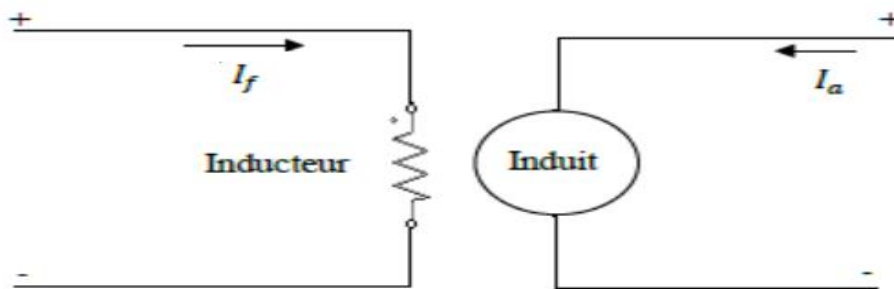


Figure III.10: Machine à Courant Continu

$$C_{em} = K_t \cdot I_a \cdot I_f \quad \text{III.29}$$

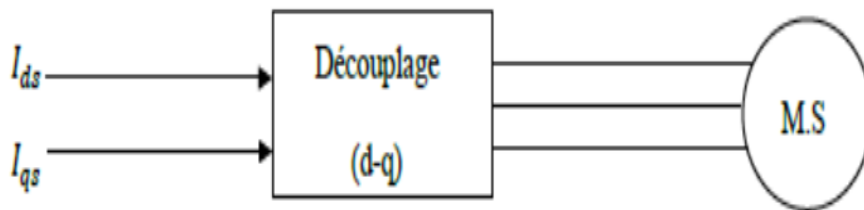


Figure III.11 : Machine Synchrone

$$C_{em} = K_t \cdot I_{qs} \cdot \varphi_f \quad \text{III.30}$$

Afin d'obtenir un modèle réduit et découplé de la machine, nous choisissons V_{ds} et V_{qs} de telle sorte que la composante I_{ds} soit nulle, dans ce cas l'expression du couple électromagnétique devient [11]:

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \varphi \cdot I_{qs} \quad \text{III.31}$$

Cette expression linéaire couple courant, nous rappelle celle de la machine à courant continu

$$C_{em} = K \cdot \varphi \cdot I_a \quad \text{III.32}$$

K : Coefficient dépend de la machine.

φ : Flux inducteur.

I_a : Courant induit.

III.6.2 Stratégies de Commande Vectorielle de la MSRB :

Les différentes stratégies de contrôle vectoriel qui permettent la réalisation du découplage du couple et du flux dans la machine et de lui conférer des performances dynamiques et statiques élevées. Le contrôle des courants dans le référentiel de Park se fait naturellement par des régulateurs numériques, il est en de même des commandes en vitesse et en position. La commande vectorielle peut être aussi utilisée afin de réduire la valeur du flux dans la machine à aimants permanents.

Dans ce cas, on impose au courant I_d une valeur négative qui permet de créer un flux contraire à celui des aimants de telle sorte que le flux résultant dans la machine soit inférieur au flux nominal. Cette technique permet de faire fonctionner la machine à des vitesses supérieures à sa vitesse nominale tout en maintenant la tension statorique à une valeur acceptable.

III.6.2.1 Commande Vectorielle Simplifiée :

L'intérêt d'une commande simplifiée est de réduire la complexité de l'algorithme de commande et par conséquent la réduction du coût de sa réalisation pratique mais tout en gardant des performances élevées.

La figure (III.12) donne une vue globale des opérations à réaliser pour commander la vitesse ou la position de la machine synchrone. Le courant I_d est donc maintenu nul, pour autant que le découplage soit parfaitement réalisé (aucune erreur sur le paramètre L_q et sur les valeurs de I_q et ω), en prenant :

$$V_d = -\omega \cdot L_q \cdot i_q \quad \text{III.33}$$

Le courant i_q peut être déterminé soit en appliquant la transformation de Park sur les courants triphasés, soit estimé à partir de la tension de commande (afin de réduire les bruits de mesure) et la mesure de vitesse.

L'estimation le courant i_q est obtenu à partir du modèle du moteur synchrone supposé parfaitement découplé (avec T période d'échantillonnage).

$$i_q(K + 1) = \frac{v_q(k).T}{L_q} - \frac{(1-R_s.T)}{L_q} . i_q(k) - \frac{\varphi_f.\omega(k).T}{L_q} \quad \text{III.34}$$

Donc la tension de commande V_d est calculée par l'équation (III.33), en utilisant l'estimation (III.34). Par contre, la tension V_q est fournie par un régulateur de vitesse de type PI. Elle permet de commander le couple développé par la MS de la même manière que la tension d'induit permet de commander le couple développé par la MCC à excitation séparée.

La vitesse de référence est déterminée par la sortie du régulateur de position de type proportionnel.

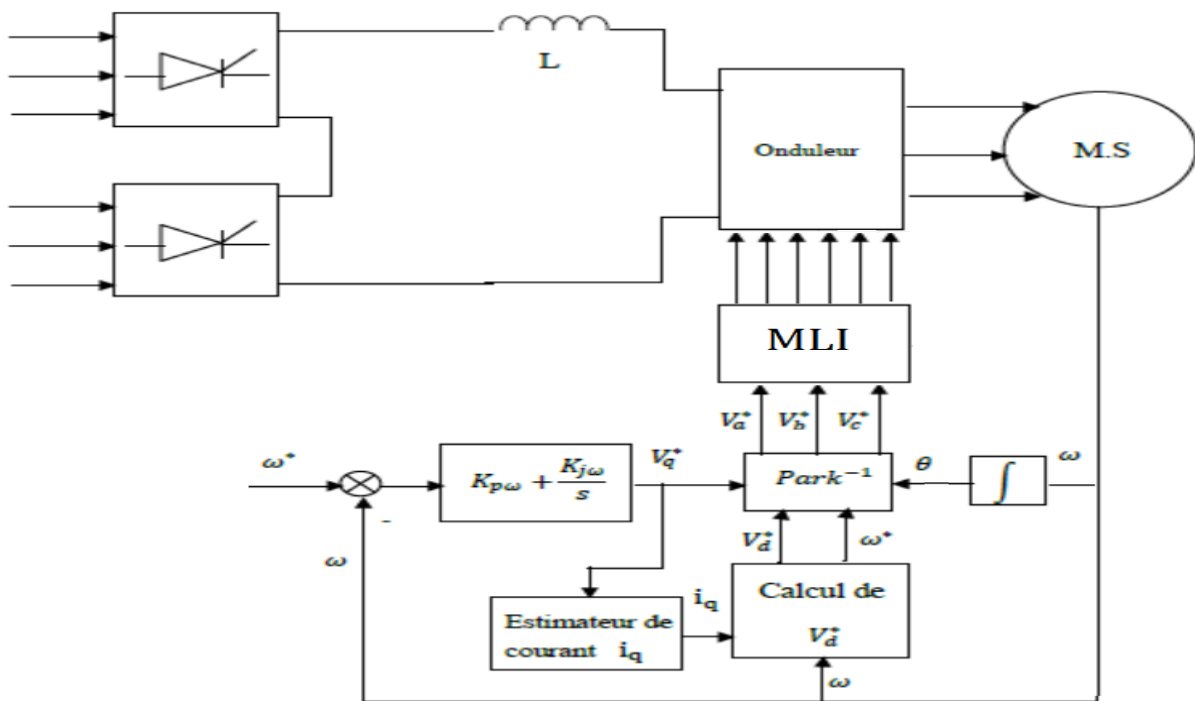


Figure III.12 : Schéma Bloc de la Commande en Position (vitesse) de la MSRB avec Estimation du Courant i_q

Le système des tensions triphasées de référence à appliquer sur l'onduleur sera obtenu par une transformation inverse de Park appliquée aux grandeurs V_d et V_q . La conception des régulateurs de vitesse et de position est basée sur le modèle linéaire mono variable établie précédemment, ce qui facilite considérablement leur calcul.

$$V_q = \left(k_{pw} + \frac{k_{iw}}{2}\right) \cdot (k_{p\theta}(\theta_{ref} - \theta) - \omega) \quad \text{III.37}$$

$$V_q = \left(k_{pw} + \frac{k_{iw}}{2}\right) \cdot (k_{p\theta} \cdot \theta_{ref} - k_{p\theta} \left(1 + \frac{s}{k_{p\theta}}\right) \theta) \quad \text{III.38}$$

Cette relation montre que le régulateur proportionnel de position en cascade avec le régulateur de vitesse PI, qui est évité l'apparition d'impulsions dans la commande lorsque la consigne est un échelon. Le calcul du gain de régulateur proportionnel est réalisé en choisissant pour l'amortissement la valeur 1 (pas de dépassement).

Nous obtenons : $k_{\theta} = \frac{3}{4t_{rv}}$

t_{rv} : est le temps d'établissement choisi pour la réponse en vitesse.

III.6.2.3 Découplage des courants I_d et I_q :

L'onduleur étant un onduleur de tension, Il nous faut donc définir les fonctions de transfert appliquées entre V_d , V_q et I_d , I_q [18].

On a :

$$V_d = R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega_r \varphi_q + M_f \frac{dI_f}{dt} \quad \text{III.39}$$

$$V_q = R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} - \omega_r \varphi_d \quad \text{III.40}$$

On obtient :

$$V_d = R_s I_d + \frac{dI_d}{dt} \left(L_d - \frac{M_f^2}{L_f}\right) - \omega_r \varphi_q + \frac{M_f}{L_f} \frac{d\varphi_f}{dt} \quad \text{III.41}$$

Afin de pouvoir mettre en œuvre des techniques de commande mono variables, il est nécessaire de s'affranchir du couplage reliant les courants I_d et I_q aux tensions V_d et V_q .

Nous avons :

$$V_d = V'_d + F_{emd}$$

$$V_q = V'_q + F_{emq}$$

Découplage 1 :

$$V'_d = R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} \quad \text{III.42}$$

Avec $F_{emd} = -\varphi_r \varphi_q + M_f \frac{dI_f}{dt}$

$$V'_q = R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} \quad \text{III.43}$$

Avec $F_{emq} = \varphi_r \varphi_d$

Dans ce cas les dynamiques des courants I_d et I_q seront [18]:

$$\frac{I_d(P)}{V'_d(P)} = \frac{1}{R_s} \frac{1}{1 + \frac{L_d}{R_s} \cdot P} \quad \text{III.44}$$

$$\frac{I_q(P)}{V'_q(P)} = \frac{1}{R_s} \frac{1}{1 + \frac{L_q}{R_s} \cdot P} \quad \text{III.45}$$

Découplage 2 :

$$V'_d = R_s I_d + \frac{dI_d}{dt} \left(L_d - \frac{M_f^2}{L_f} \right) \quad \text{III.46}$$

Avec : $F_{emd} = -\varphi_r \varphi_q + \frac{M_f}{L_f} \frac{d\varphi_f}{dt}$

$$V'_q = R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} \quad \text{III.47}$$

Avec : $F_{emq} = \varphi_r \varphi_d$

Dans ce cas les dynamiques des courants I_d et I_q seront [18]:

$$\frac{I_d(P)}{V'_d(P)} = \frac{1}{R_s} \frac{1}{1 + \left(\frac{L_d}{R_s} - \frac{M_f^2}{R_s L_f} \right) \cdot P} \quad \text{III.48}$$

$$\frac{I_q(P)}{V'_q(P)} = \frac{1}{R_s} \frac{1}{1 + \frac{L_q}{R_s} \cdot P} \quad \text{III.49}$$

L'élaboration de ces grandeurs impose l'utilisation d'un estimateur ou d'un observateur de flux. Ce découplage permet de simplifier considérablement la commande, en effet, par rapport aux " nouvelles tensions V'_d et V'_q " [18].

III.7 Généralité sur la commande scalaire :

La commande des machines synchrones est divisée essentiellement en deux modes de fonctionnement. Le premier mode utilisé pour une alimentation avec un onduleur de tension ou avec un cycloconvertisseur, correspond au contrôle en Volt/Hz = C^{st} en boucle ouverte où les signaux de commande des interrupteurs sont élaborés par un oscillateur afin d'obtenir la vitesse désirée. Les autres modes sont connus sous le nom de commande autopilotée, où les impulsions de commandes des interrupteurs de l'onduleur de courant appelé aussi commutateur de courant sont générées à partir du capteur de position du rotor de la machine. Dans ce cas l'ensemble machine synchrone avec le commutateur de courant est équivalent à une machine à courant continu où l'on a remplacé son commutateur mécanique (balais) par un commutateur électronique avec tous ses avantages.

Contrairement à la machine asynchrone, la machine synchrone à rotor bobiné est excitée par une source à courant continu pour générer le flux inducteur. En effet, la machine asynchrone doit fonctionner avec un facteur de puissance arrière, alors que la machine synchrone peut fonctionner avec un facteur de puissance arbitraire, avant, arrière ou unitaire. En conséquence le contrôle du courant d'excitation, à tension d'alimentation constante, permet d'imposer un courant statorique qui peut être soit en avance, en arrière ou en phase avec la tension statorique. Pour les machines synchrones à aimants permanents, le flux inducteur est constant. La machine synchrone à réluctance variable ne possède pas de source d'excitation au rotor, par conséquent elle fonctionne obligatoirement avec un facteur de puissance arrière [17].

III.7.1 Principe de la Commande scalaire :

La commande scalaire est commande en boucle ouverte constitue la méthode la plus simple pour contrôler les moteurs AC à induction ; étant donné que le régime du moteur dépend de la fréquence de l'alimentation, cette méthode de contrôle simple modifie la tension et la fréquence afin d'obtenir le régime moteur escompté. Cette méthode est appelée « contrôle V/Hz ». Les inconvénients majeurs qu'elle présente sont le manque de précision et un couple insatisfaisant à bas régime.

Le principe de commande reste le même que celui de la machine asynchrone. L'autopilotage permet d'avoir $\omega = \omega_s$. En négligeant la résistance statorique R_s , l'expression du couple électromagnétique de la machine synchrone à pôles lisses est [17] :

$$C_{em} = 3 \cdot P \cdot \varphi_f \cdot \frac{\varphi_s}{L_s} \sin \delta \quad \text{III.50}$$

Soit encore :

$$C_{em} = 3.P.\frac{V_s}{\omega_s}.\frac{E}{X_s}\sin\delta \quad \text{III.51}$$

Le diagramme de Fresnel de la machine synchrone en convention récepteur est :

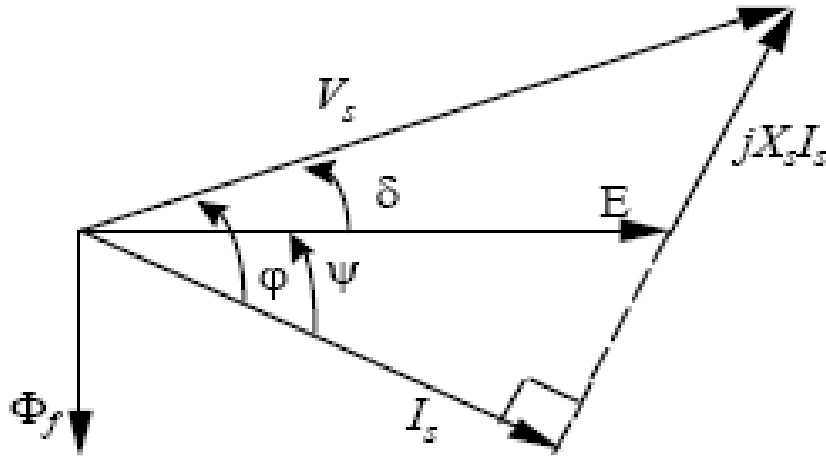


Figure III.15 : Diagramme de Fresnel de la machine synchrone convention récepteur [17]

La f.é.m. E et la réactance X_s varient en fonction de ω_s . En effet, pour l'angle interne δ donné, le couple est constant. Les f.é.m. E et V_s et la réactance X_s sont proportionnels à ω_s , pour que l'angle interne δ reste constant, le courant I_s doit l'être aussi.

Le réglage de l'amplitude au niveau du convertisseur d'entrée par une commande 180° , chaque interrupteur conduit respectivement pendant 180° .

L'allure de la tension simple aux bornes de la machine synchrone est représentée par la figure suivante [17] :

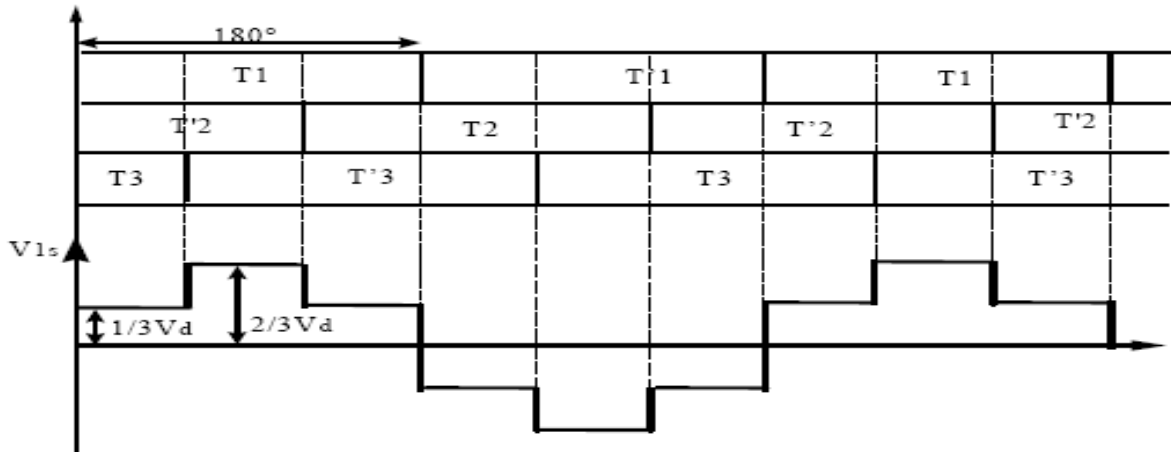


Figure III.16 : Allure de la tension simple pour une commande 180° [17]

Jusqu'à la vitesse nominale, on utilise la loi en $\frac{V_s}{\omega_s} = Cte$. Au delà, la tension ne peut plus évoluer, on passe alors en fonctionnement à puissance constante. On dit que la machine est défluxée. Cette commande est utilisée avec les machines synchrones à aimants ou à réluctances variable.

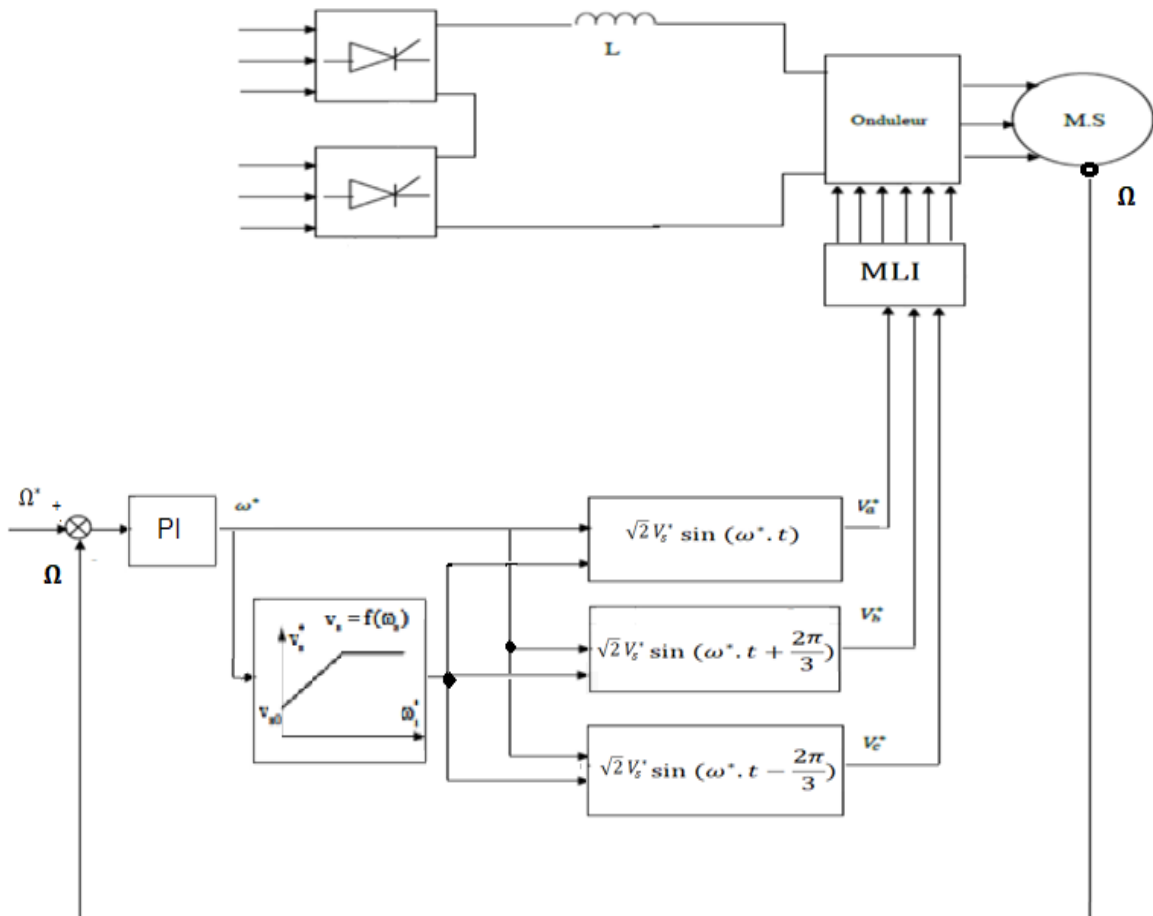


Figure III.17: Schéma Bloc de la Commande scalaire d'un MSRB

III.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous concevons la modélisation de la machine synchrone à rotor bobiné associée à un convertisseur de démarrage progressif.

Nous avons étudié la modélisation de la MSRB triphasé en élaborant les équations électriques et mécaniques régissant son fonctionnement. Par la suite nous avons procédé à la transformation de Park qui permet de simplifier la modélisation du système. Puis nous avons présenté aussi le principe de fonctionnement de l'onduleur à trois niveaux, ainsi on a entamé la modélisation en prenant en considération l'hypothèse de commandabilité.

Enfin, nous avons étudié la commande MLI, en montrant l'importance de MLI triangle-sinusoïdale. Puis nous avons présenté aussi les deux types de commande « vectorielle et scalaire ».

D'après l'étude qu'on a faite, on constate que les onduleurs à trois niveaux permettent de délivrer meilleure qualité de tension et plus élevée.

Le chapitre suivant fera l'objet de la simulation d'un convertisseur-machine électrique avec différent type de commande.

Chapitre IV

**Simulation et interprétations sur
l'ensemble convertisseur-machine
électrique**

IV.1 Introduction

Après l'étude théorique, en utilisant un logiciel bien approprié, à savoir le MATLAB 13/a, nous essayons maintenant de faire une simulation pour assurer les différents niveaux de vitesse de mode normal (c'est le mode de lancement de la TG de notre étude) allant de 0 tr/min à 2100 tr/m. Après la première étape de démarrage de machine synchrone, nous le laissons tourner à vitesse constante 750 tr/min entre les instants $t=2s$ à $t=8s$ pour assurer la séquence de balayage. Le deuxième étage ralentit la vitesse jusqu'à 240 tr/m. La dernière séquence est le préchauffage, qui comporte l'allumage dans la chambre de combustion environ 370 tr/m. Afin d'accélérer la vitesse jusqu'à la vitesse d'auto-sustentation 2100tr/m entre les instants $t=10s$ à $t=18s$.

Puisque la machine synchrone de notre étude à grande puissance et paramètres très élevés car le moment n'inertie de 8575 kg.m², pour cela nous utilisons un modèle réduit correspond à machine de petit puissance, mais avec la même stratégie de commande et avec les mêmes performances.

Enfin, des commandes scalaire et vectorielle vont être appliquées sur cette machine en suivant les séquences de lancement du mode normal. Ensuite afin de tester les performances des commandes, une étude comparative entre les deux commandes sera appliquée.

IV.2 Simulation de l'ensemble convertisseur-machine électrique par la commande vectorielle :

Après réalisation du découplage et la synthèse des régulateurs, et afin de tester les performances de la commande vectorielle appliquée à une MSRB, nous avons simulé le fonctionnement de l'ensemble Onduleur-Machine à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink.

IV.2.1 Schéma bloc de l'ensemble convertisseur-machine électrique et la commande vectorielle :

La figure représente le schéma bloc de la machine synchrone à rotor bobiné à pôles lisse et l'onduleur trois niveaux et la commande vectorielle :

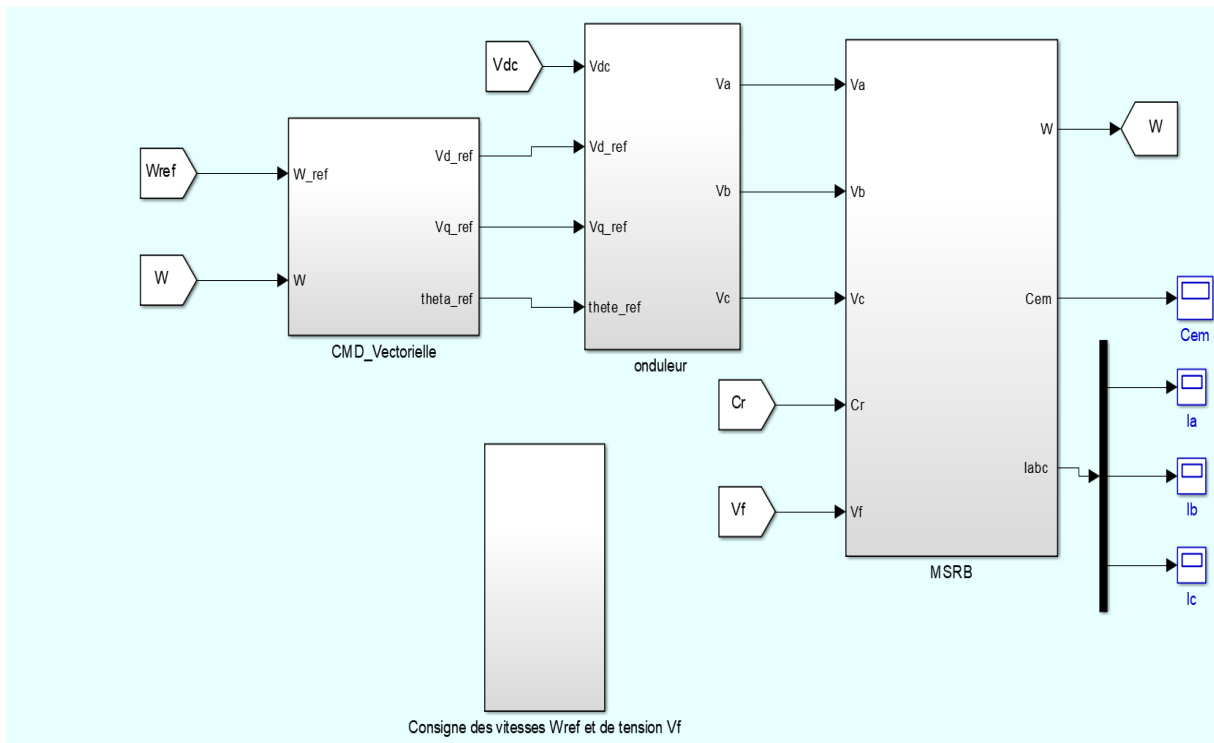


Figure IV.1 : Schéma bloc globale de la commande vectorielle

IV.2.2 Schéma bloc de la machine synchrone à rotor bobiné :

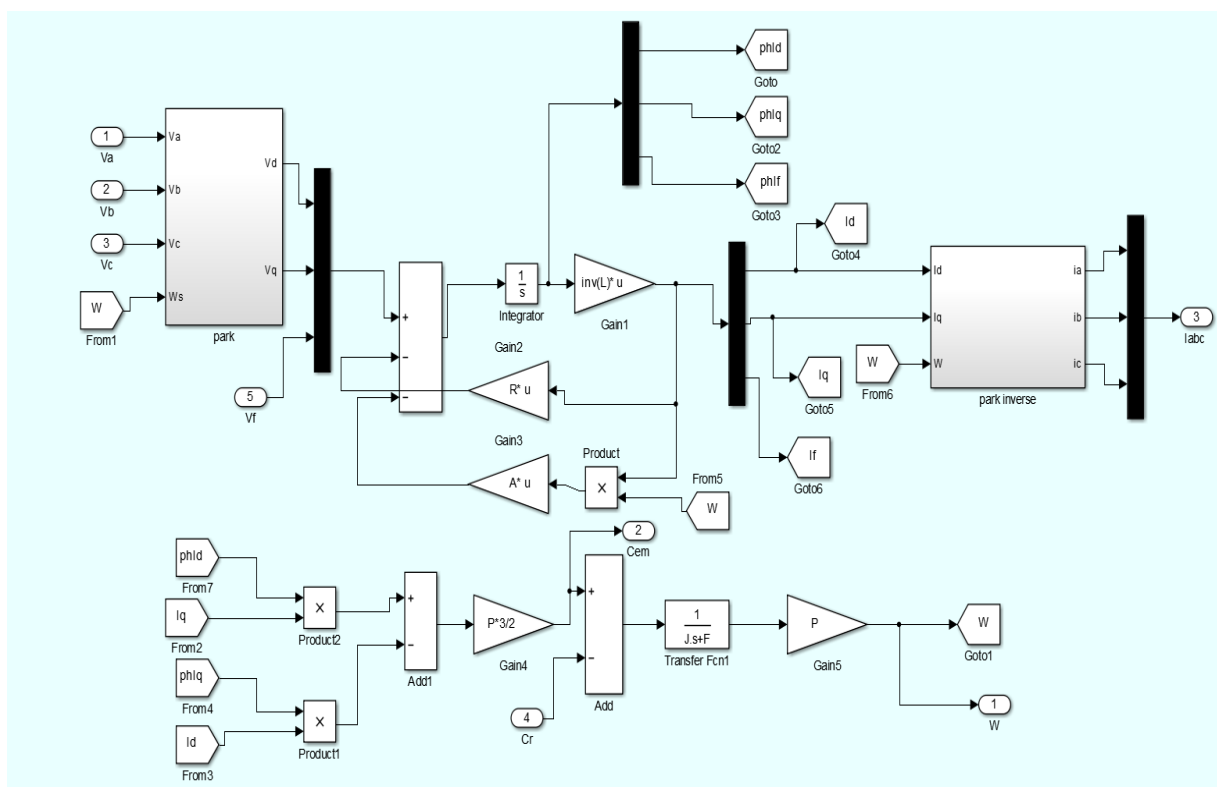


Figure IV.2 : Schéma bloc de la MSRB

IV.2.3 Schéma bloc de l'onduleur à trois niveaux par MLI :

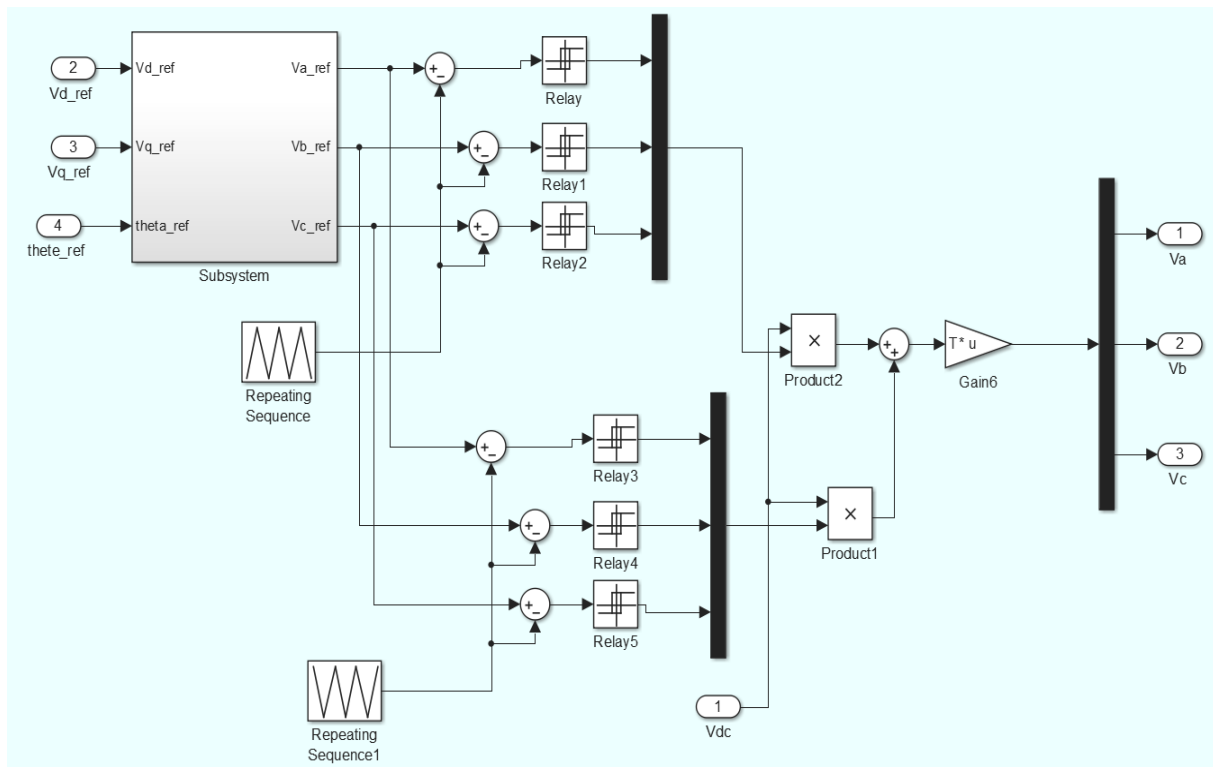


Figure IV.3 : Schéma bloc de l'onduleur à trois niveaux

IV.2.4 Schéma bloc de la commande vectorielle :

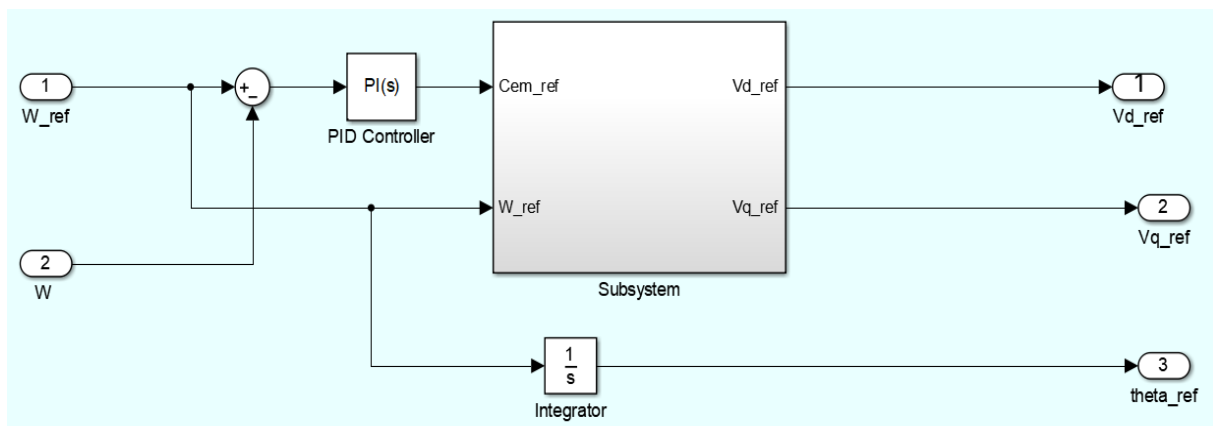


Figure IV.4 : Schéma bloc de la commande vectorielle

IV.2.5 Résultats de simulation :

Les instants de fermeture des thyristors sont toujours donnés par l'intersection de la porteuse triangulaire et Le nouveau vecteur de tension de référence. La vitesse de référence et vitesse de

rotation, le couple électromagnétique, le courant I_q , la tension statorique simple, la tension composée et le courant statorique I_a sont représentés respectivement sur les figures ci-dessous.

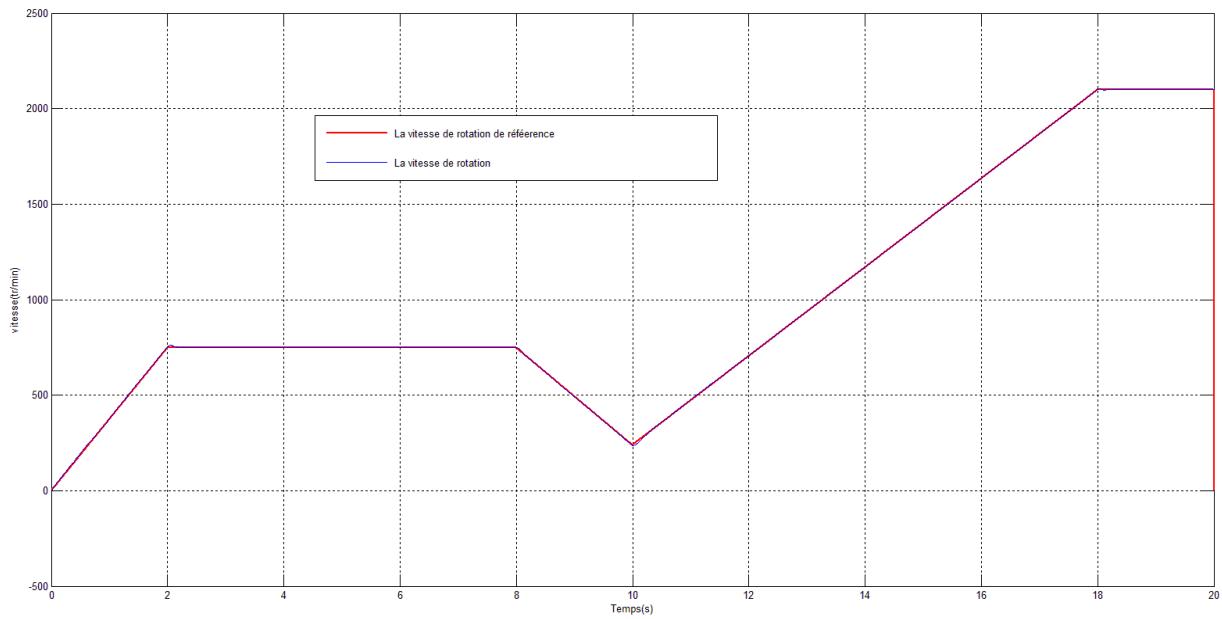


Figure IV.5 : La vitesse de rotation et la vitesse de référence en fonction du temps

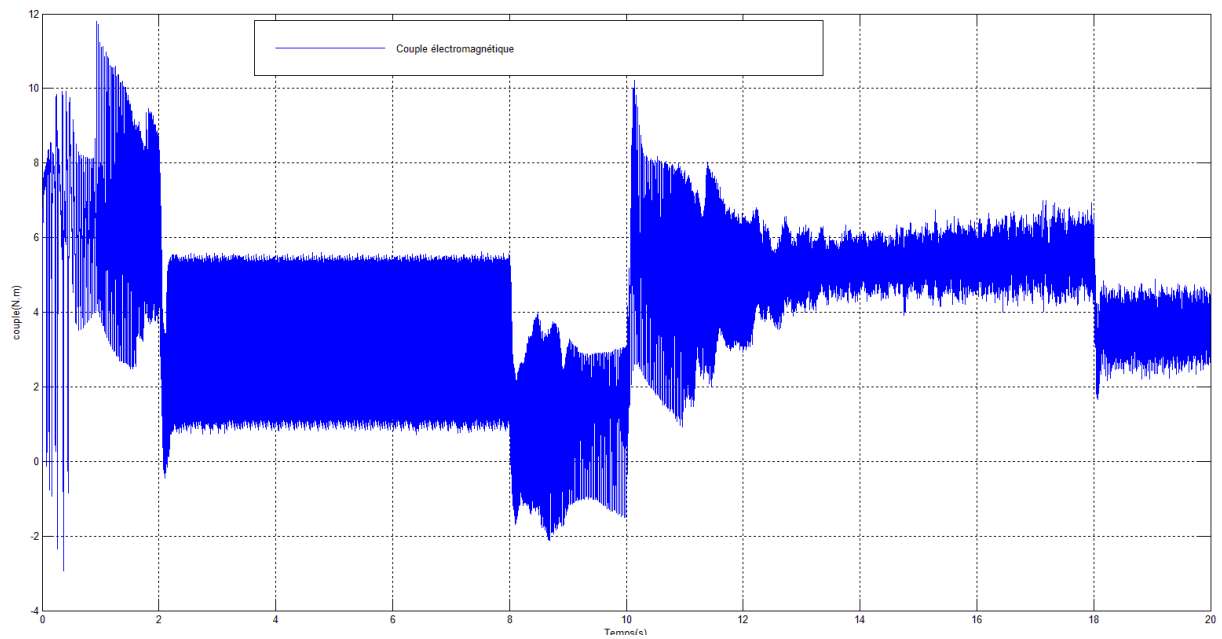


Figure IV.6 : Le couple électromagnétique en fonction du temps

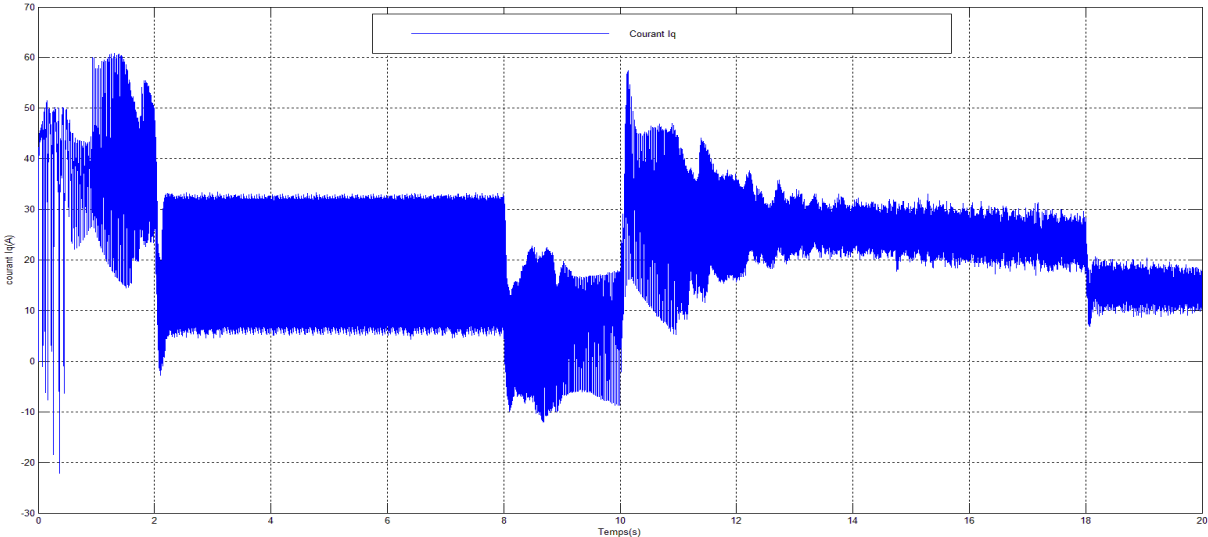


Figure IV.7 : Le courant I_q en fonction du temps



Figure IV.8 : La tension statorique simple V_a en fonction du temps

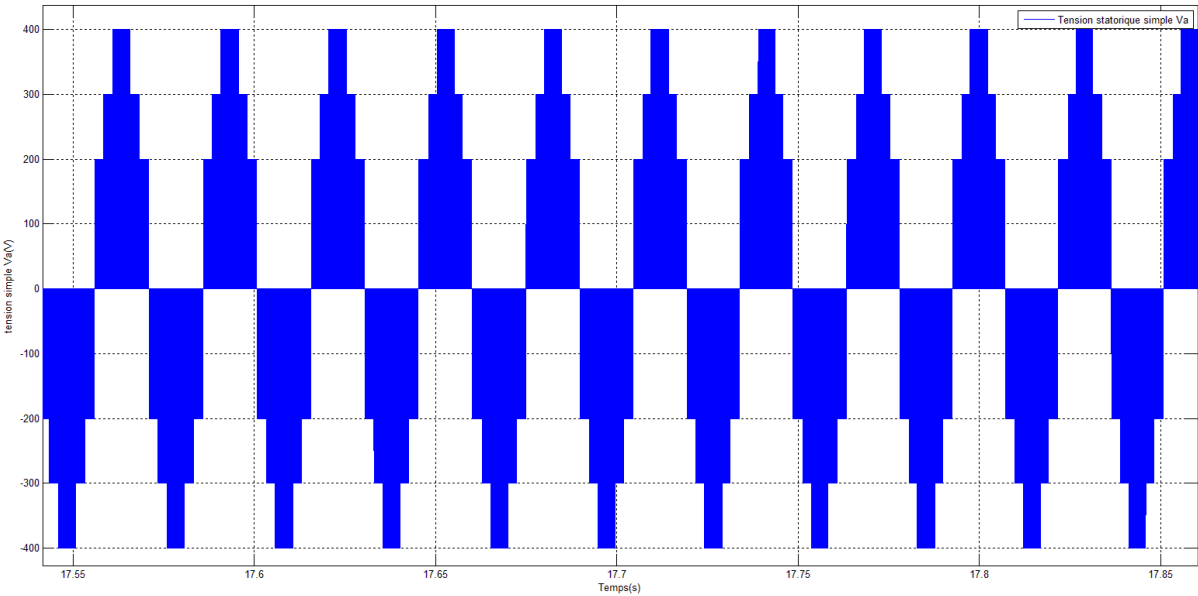


Figure IV.9 : Zoom sur la tension statorique simple V_a

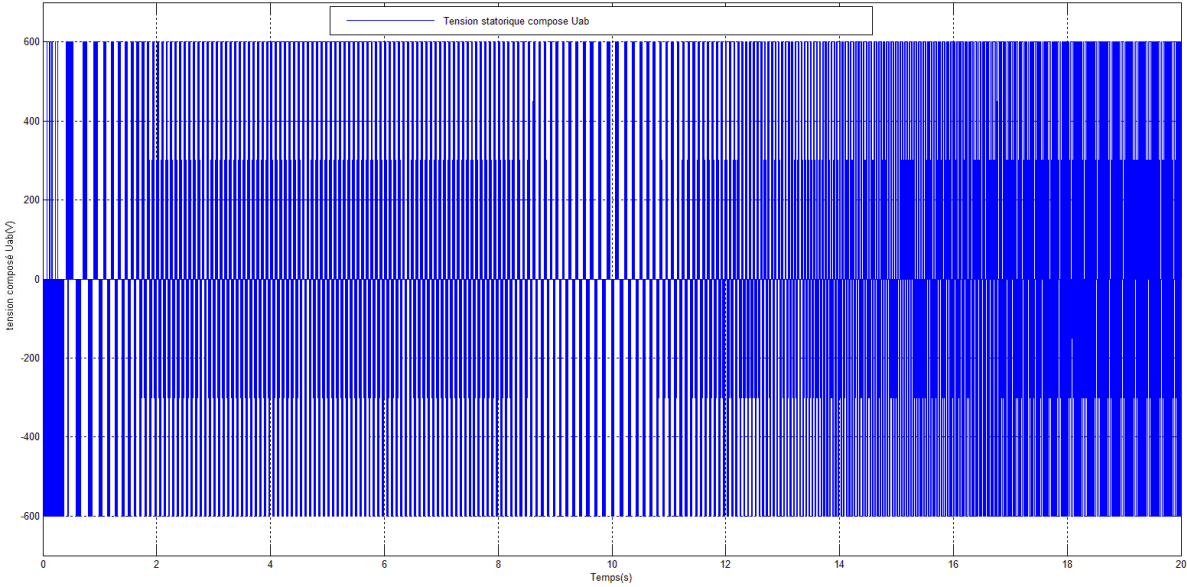


Figure IV.10 : La tension statorique composée U_{ab} en fonction du temps

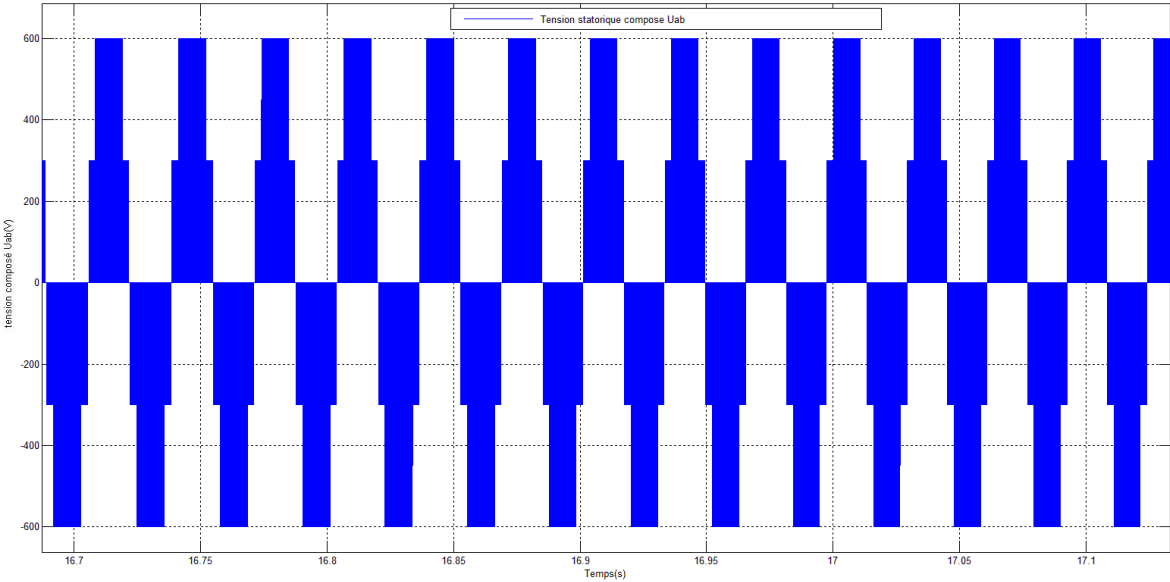


Figure IV.11 : Zoom sur la tension statorique composée U_{ab}

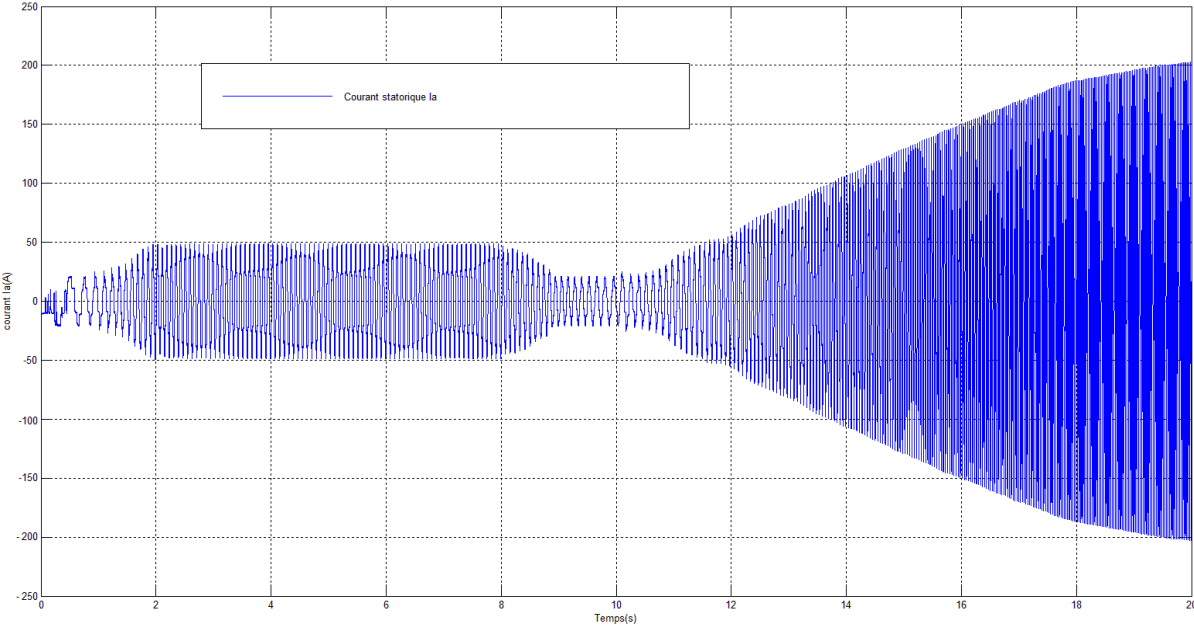


Figure IV.12 : Le courant statorique I_a en fonction du temps

IV.2.6 Interprétation des résultats de la commande vectorielle :

D'après les résultats de Simulation on remarque que pour :

A) Vitesse de rotation :

Les résultats de simulation confirment que la vitesse de rotation suit la consigne avec une grande précision dans le régime permanent (2s à 8s), et avec un léger dépassement et un temps de réponse satisfaisant dans le régime transitoire.

B) Couple électromagnétique :

Pendant les phases transitoires (accélération et décélération), le couple électromagnétique garde une valeur maximale pour satisfaire un couple de charge qu'on a besoin, puis diminue en se stabilisant à la valeur de couple résistant pendant le régime permanent.

C) Courant statorique i_{qs} :

Le courant i_{qs} est proportionnel au le couple électromagnétique. Ceci confirme la relation linéaire entre eux.

D) Tension d'onduleur :

La tension garde sa valeur efficace constante dans les différentes séquences et sa forme (3 niveaux), et sa pulsation change d'une façon proportionnelle avec la vitesse de rotation.

IV.3 Simulation de l'ensemble convertisseur-machine électrique par la commande scalaire :

A l'aide de logiciel de simulation MATLAB (Simulink), nous avons obtenu les courbes qui représentant le comportement du moteur synchrone triphasé avec la commande scalaire (Volt/Hz) associé à l'onduleur MLI classique avec une machine synchrone.

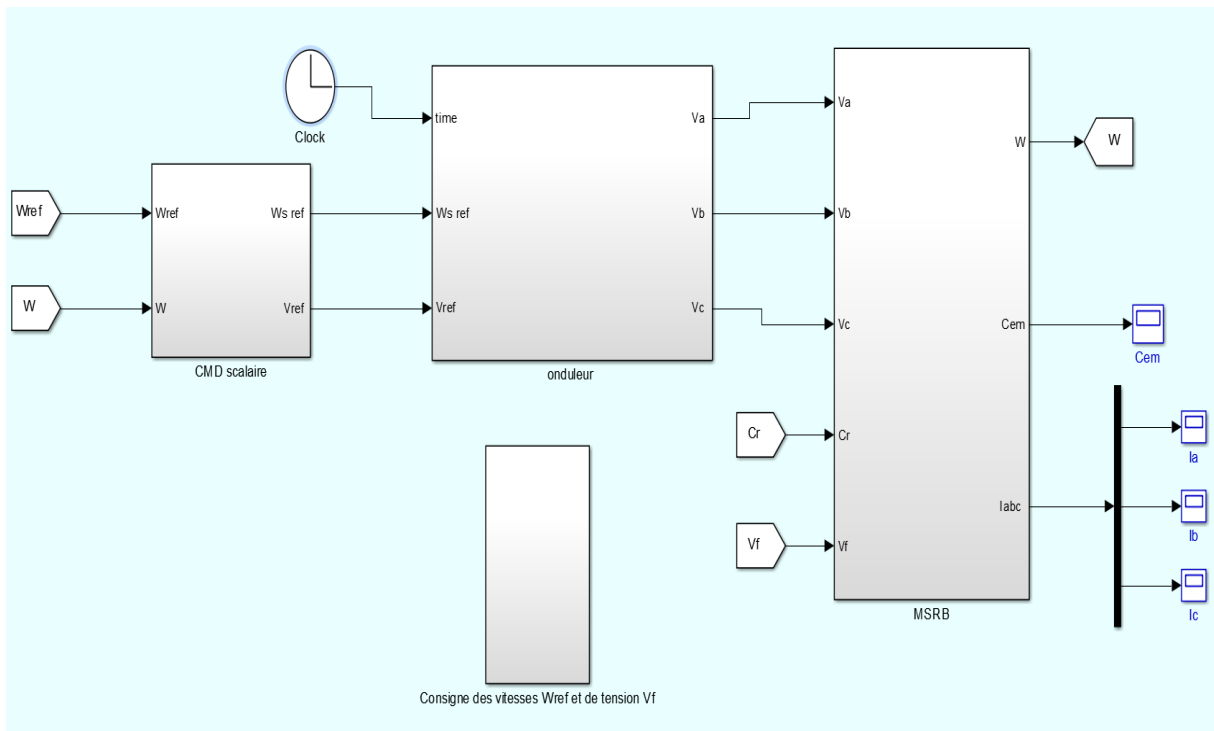


Figure IV.13 : Schéma bloc globale de la commande scalaire

IV.3.1 Résultats de simulation :

La vitesse de référence et la vitesse de rotation, le couple électromagnétique, le courant I_q , la tension statorique simple, la tension composée et le courant statorique I_a sont représentés respectivement sur les figures ci-dessous.

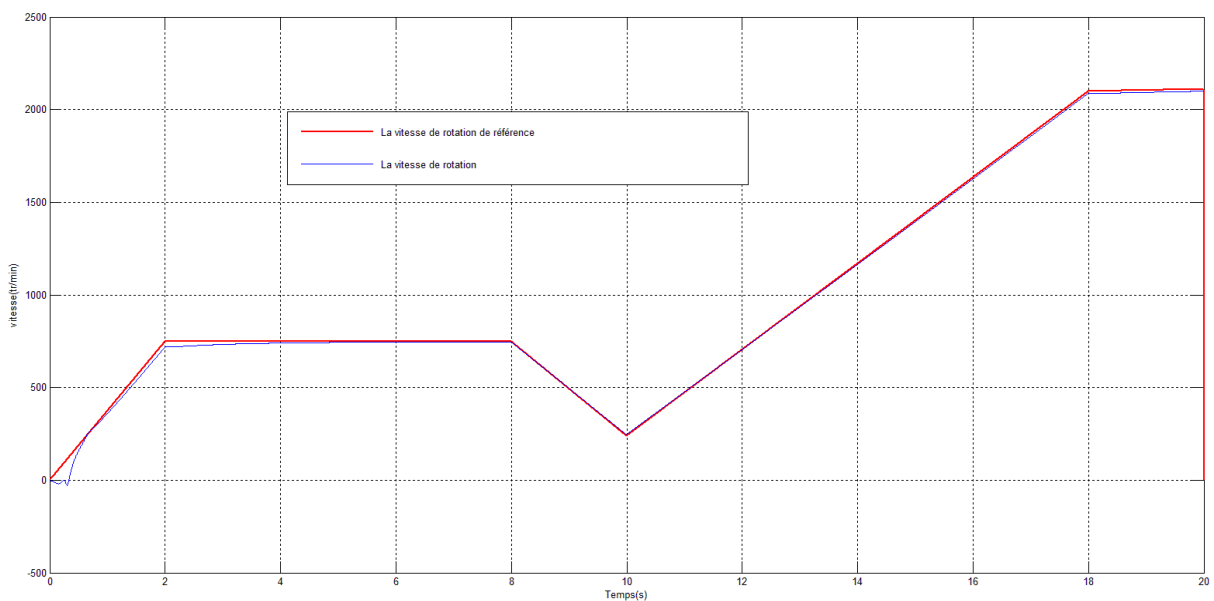


Figure IV.14 : La vitesse de rotation et la vitesse de référence en fonction du temps

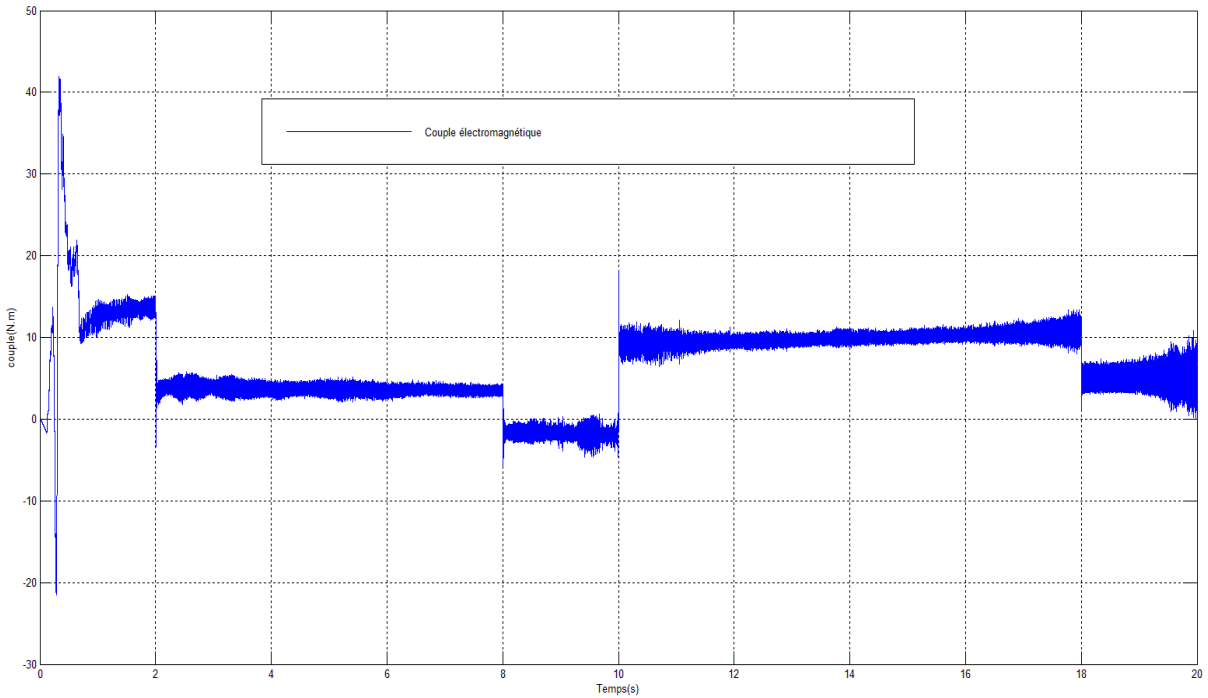


Figure IV.15 : Le couple électromagnétique en fonction du temps

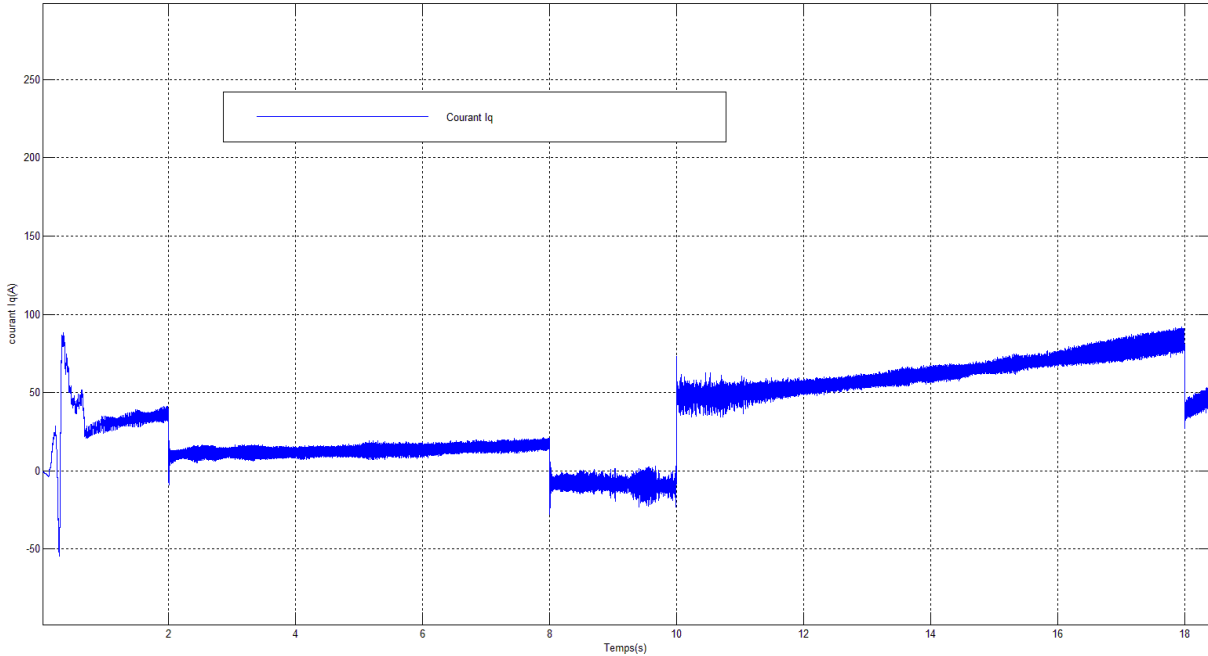


Figure IV.16 : Le courant Iq en fonction du temps

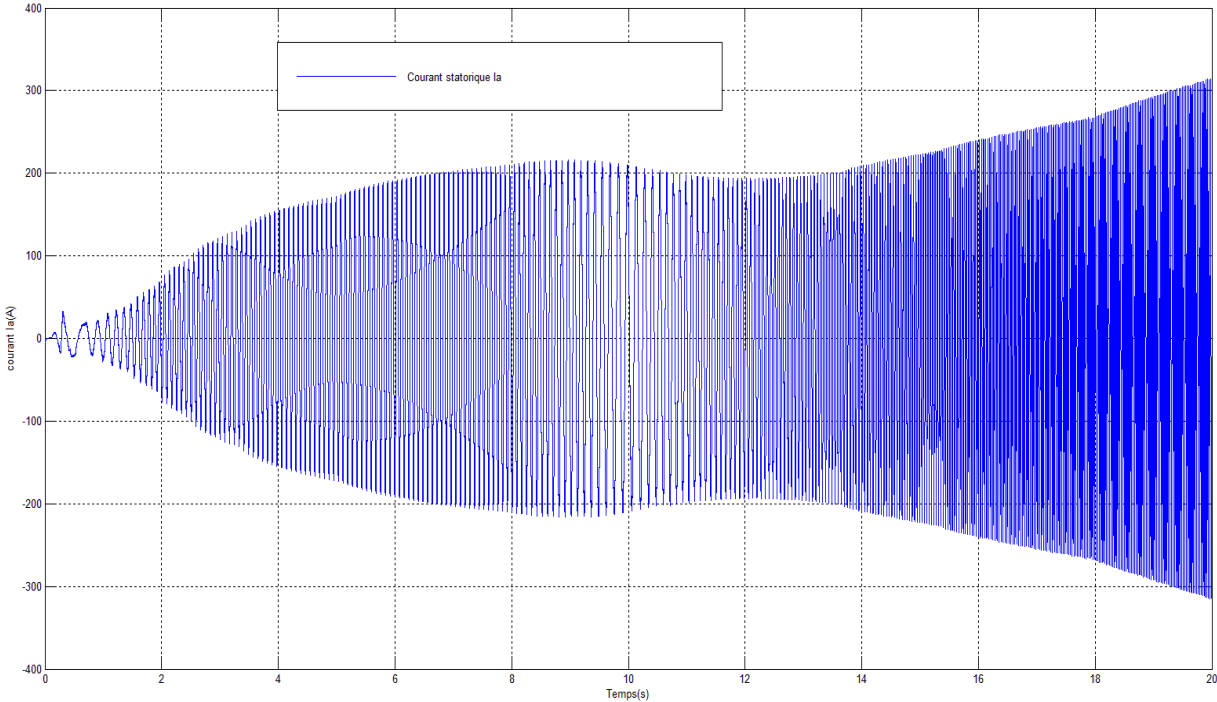


Figure IV.17 : La tension statorique simple V_a en fonction du temps

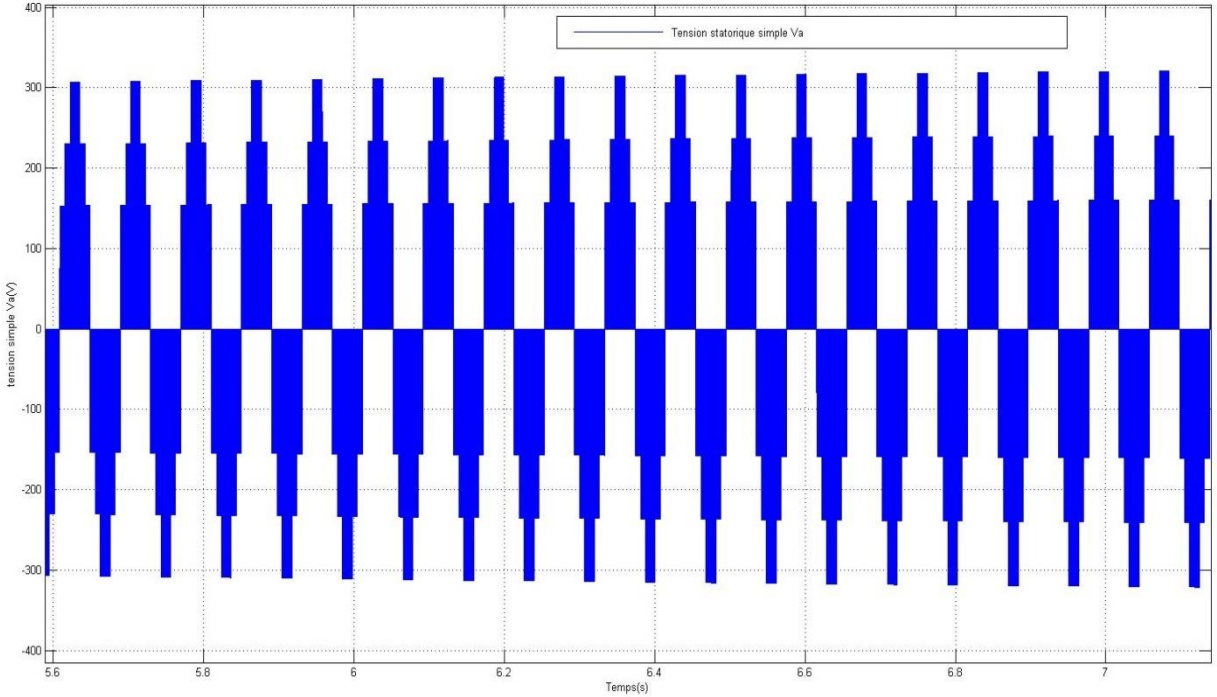


Figure IV.18 : Zoom sur la tension statorique simple V_a

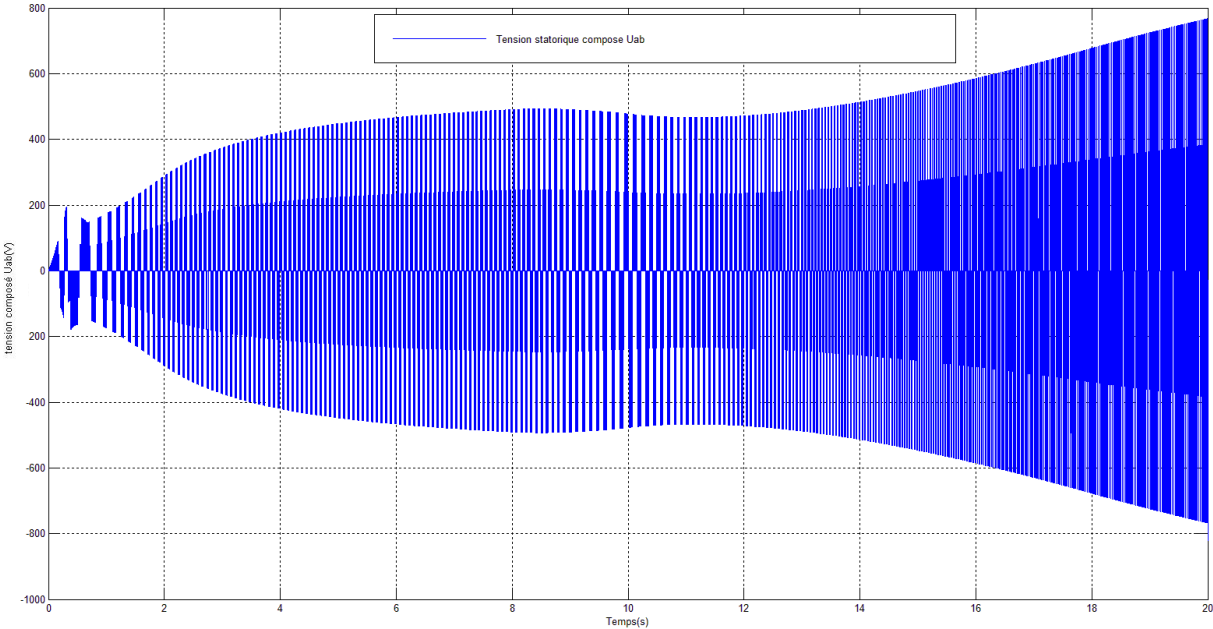


Figure IV.19 : La tension statorique composée U_{ab} en fonction du temps

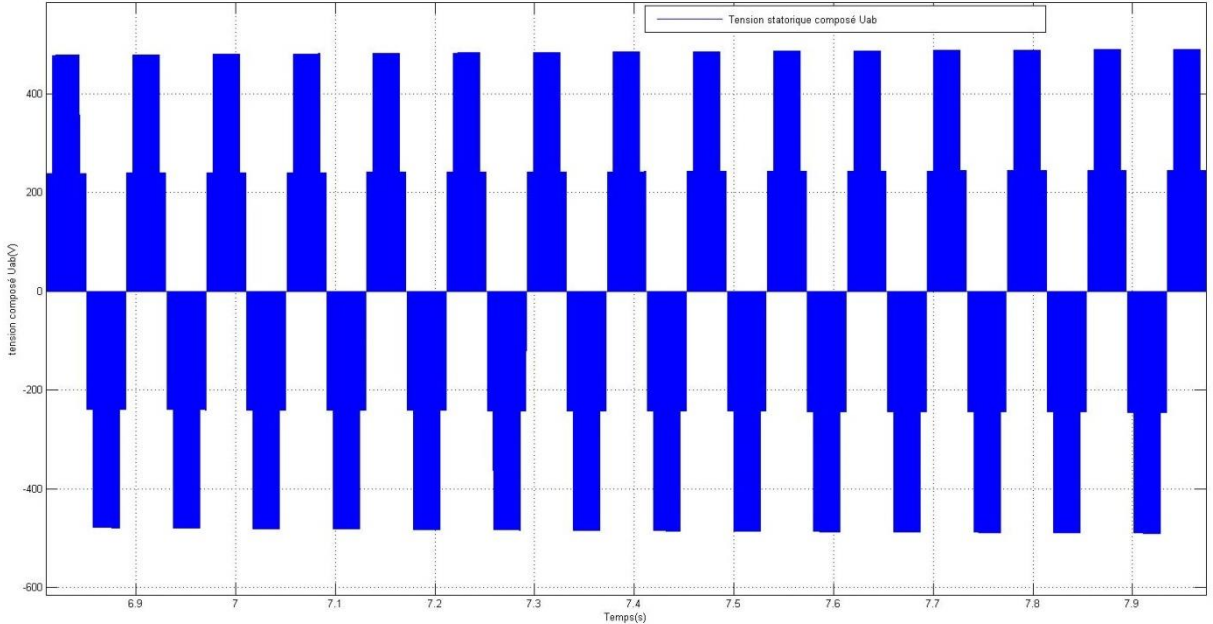


Figure IV.20 : Zoom sur la tension statorique composée U_{ab}

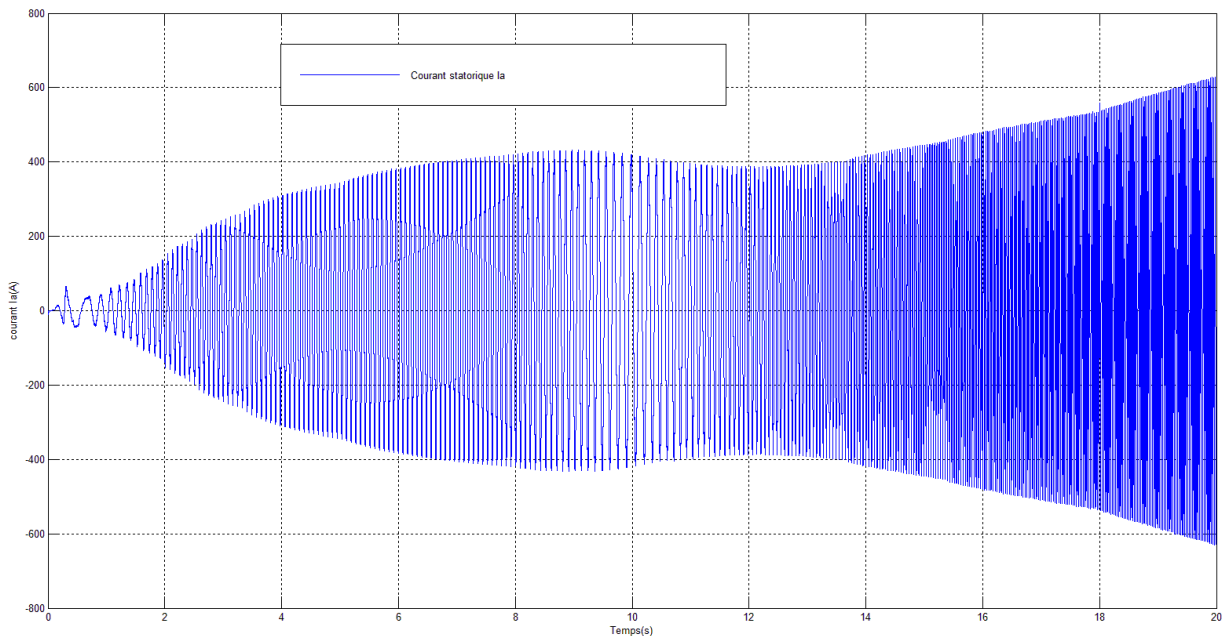


Figure IV.21 : Le courant statorique I_a en fonction du temps

IV.3.2 Interprétation des résultats de la commande scalaire :

D'après les résultats de Simulation on remarque que pour :

A) Vitesse de rotation :

Les résultats de simulation confirment que la vitesse de rotation suit la consigne dans le régime permanent (2s à 8s), mais avec un dépassement et un temps de réponse dans le régime transitoire.

B) Tension d'onduleur :

La tension est varié son amplitude en manière proportionnelle avec sa pulsation suivent la vitesse de rotation .et conserve la forme 3 niveaux dans tous les séquences. Ceci qui confirme que le rapport Volt/Hz est toujours constant.

C) Couple électromagnétique :

On constate au démarrage un dépassement du couple électromagnétique dû à l'accélération du champ aux premiers instants de démarrage à l'intérieur de la machine, la réponse du couple atteints avaleur maximale dans la séquence d'accélération et sa valeur minimale dans la séquence de décélération, le couple électromagnétique répond rapidement, se stabilisé et prend avec une valeur constante égale à la valeur de couple résistant dans le régime permanent.

D) Courant statorique I_{as} :

Une augmentation importante au démarrage sur le courant (appel de courant). Alors le courant se comporte de la même manière que la tension. Il varie en amplitude de manière proportionnelle avec sa pulsation suivant la vitesse de rotation de sorte que le rapport Volt/Hz reste constant.

IV.4 Conclusion :

Le travail présenté dans ce chapitre concerne l'étude des performances de la machine synchrone triphasée commandée par deux méthodes robustes : la première méthode est une commande par orientation du flux (vectorielle) et la deuxième est une commande scalaire. En fait, la commande vectorielle est très précise et rapide par rapport à la commande scalaire, et elle est le meilleur notamment en régime transitoire et dans le cas de faibles vitesses, mais n'est toujours réalisable puisque c'est une technologie très complexe et coûteuse par contre la commande scalaire est facile à réaliser.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail nous avons étudié, modéliser et simuler l'ensemble démarreur statique-machine synchrone installé dans la centrale thermique de Msila, pour commander et varier progressivement la vitesse de la machine synchrone. En fait, le générateur fonctionne comme moteur afin de lancer la turbine à gaz jusqu'à la vitesse d'auto-sustentation, elle continue sa montée en vitesse jusqu'à sa vitesse de synchronisme.

Nous avons essayé de simuler le système réel avec plusieurs types de commande : la commande vectorielle qui permet l'obtention d'un modèle dynamique découplé, équivalent à celui d'une machine à courant continu, la commande scalaire qui est basée sur le maintien du rapport Volt/Hz constant et la commande DTC en annexe.

Les résultats obtenus par simulation montrent que les techniques de commande réalisées assurent de bonnes performances statiques et dynamiques pendant le démarrage de la TG. Plusieurs avantages lui, sont reconnus : débarrasser d'utiliser un moteur asynchrone supplémentaire, est possible pour démarrer par un autre démarreur en cas de panne, ainsi que la durée de réparation et d'entretien mineure par rapport à une machine tournante. Cela ne signifie pas que ce démarreur n'a pas d'inconvénients. L'émission des harmoniques par ce dernier est l'un des plus grands problèmes du réseau électrique.

Annexes

Annexe A

Les paramètres de la machine synchrone à rotor bobiné :

Les paramètres	La valeur
Tension nominale par phase	$V = 400 \text{ V}$
Fréquence	$F = 50 \text{ Hz}$
Vitesse nominale	3000 tr/min
Résistance statorique par phase	$R_s = 0.48 \text{ } \Omega$
Résistance rotorique	$R_f = 12.5 \text{ } \Omega$
Moment d'inertie	$J = 0.263 \text{ Kg.m}^2$
Induction suivant l'axe « d »	$L_d = 2.31 \times 10^{-3} \text{ H}$
Induction suivant l'axe « q »	$L_q = 2.31 \times 10^{-3} \text{ H}$
Coefficient de frottement	$f = 8 \times 10^{-3} \text{ N.m.s/rad}$
Tension d'excitation V_f	$0 \div 200 \text{ V}$

Annexe B

B.1 Introduction :

Après avoir modélisé et simulé avec succès notre variateur de vitesse –SFC- avec deux techniques de contrôle vectorielle et scalaire. Nous avons également utilisé la commande robuste DTC dans le même but, en respectant les mêmes séquences de démarrage.

Nous devons considérer la maîtrise de deux variables d'état de la machine : le couple électromagnétique et le flux statorique. La régulation de ces deux variables est réalisée à partir de deux régulateurs à hystérésis.

B.2 Principe de la commande directe de couple :

La commande à vitesse variable des entraînements électriques a bénéficié, ces dernières années, d'avancées méthodologiques et technologiques significatives. La technique de commande directe du couple (Direct Torque Control ou « DTC ») est introduite en 1985 par TAKAHASHI [19].

La commande DTC à partir de références externes, tels le couple et le flux, ne recherche pas, comme dans les commandes classiques (vectorielles ou scalaires) les tensions à appliquer à la machine, mais recherche 'le meilleur' état de commutation de l'onduleur pour satisfaire les exigences de l'application. La commande DTC considère le convertisseur associé à la machine comme un ensemble où le vecteur de commande est constitué par les états de commutation, la recherche de l'état de commutation le plus adapté à un instant de calcul reposant sur une heuristique des comportements des évolutions du flux et du couple en fonction des états de commutation considérés [19].

Ce choix est basé sur l'utilisation des comparateurs hystérésis, à savoir l'amplitude du couple électromagnétique et du flux statorique. Un onduleur de tension permet d'atteindre sept positions distinctes dans le plan de phase, correspondant aux huit séquences du vecteur de tension à la sortie de l'onduleur à trois niveaux.

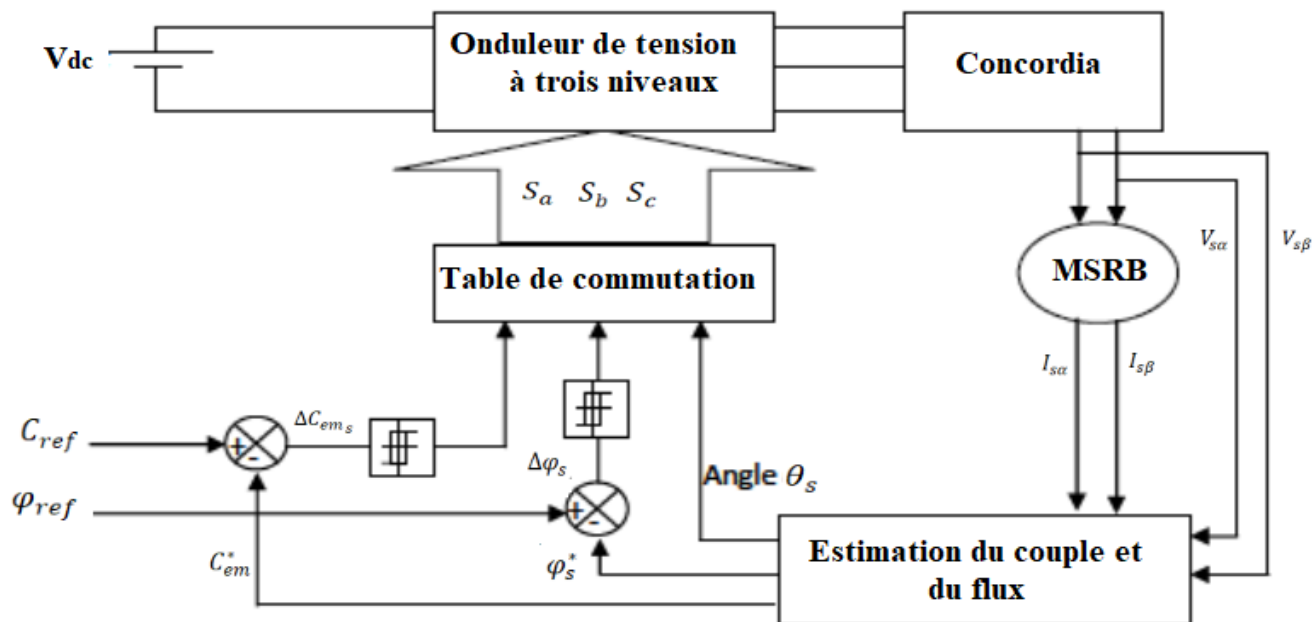


Figure B.1 : Structure générale de la commande DTC

B.3 Résultats de simulation:

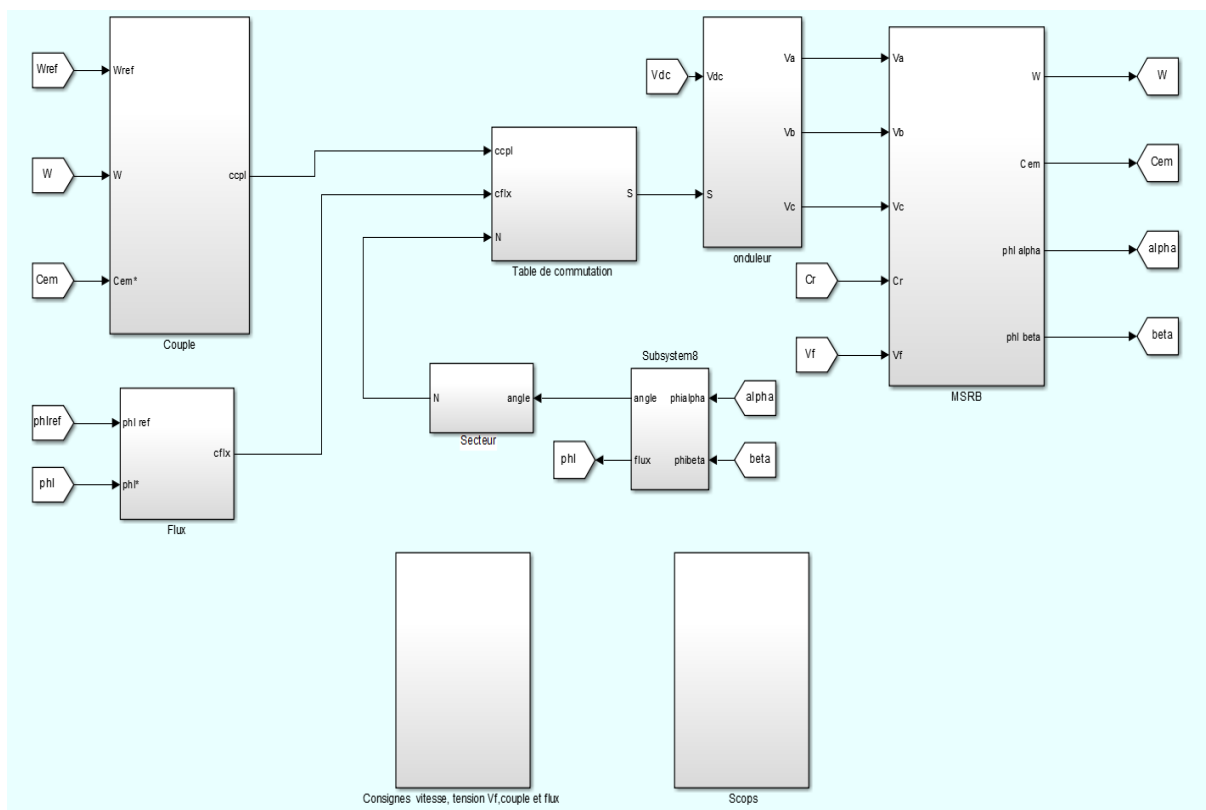


Figure B.2 : Schéma bloc globale de la commande DTC

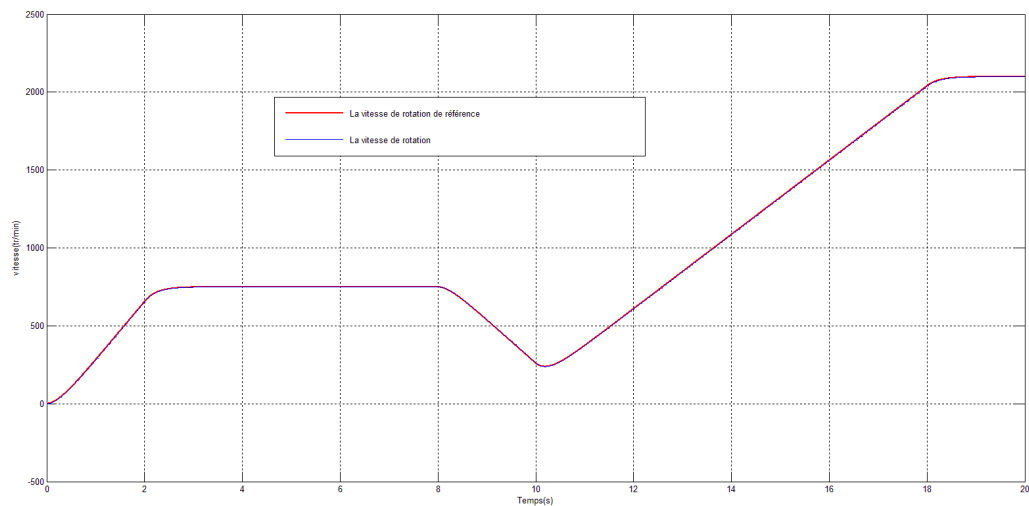


Figure B.3 : La vitesse de rotation et la vitesse de référence en fonction du temps

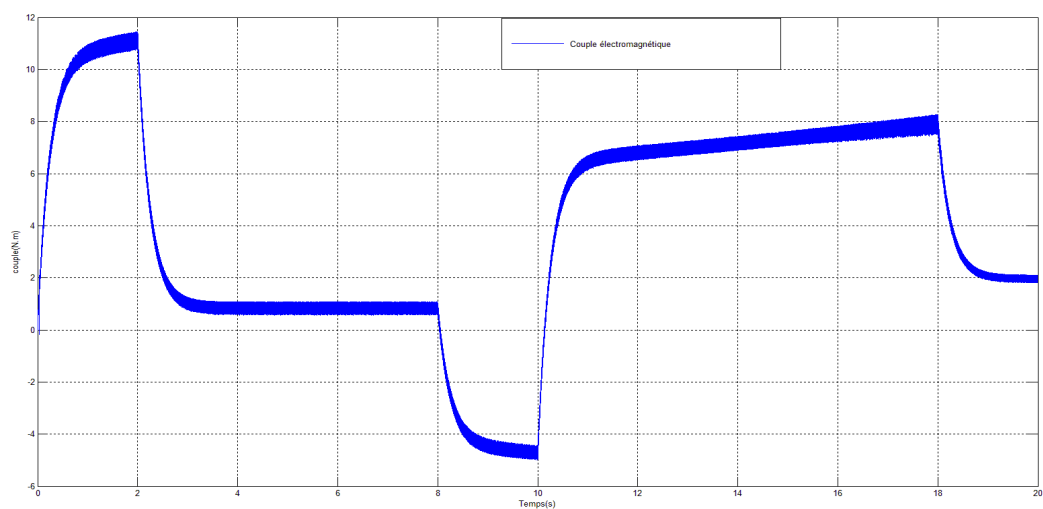


Figure B.4 : Le couple électromagnétique en fonction du temps

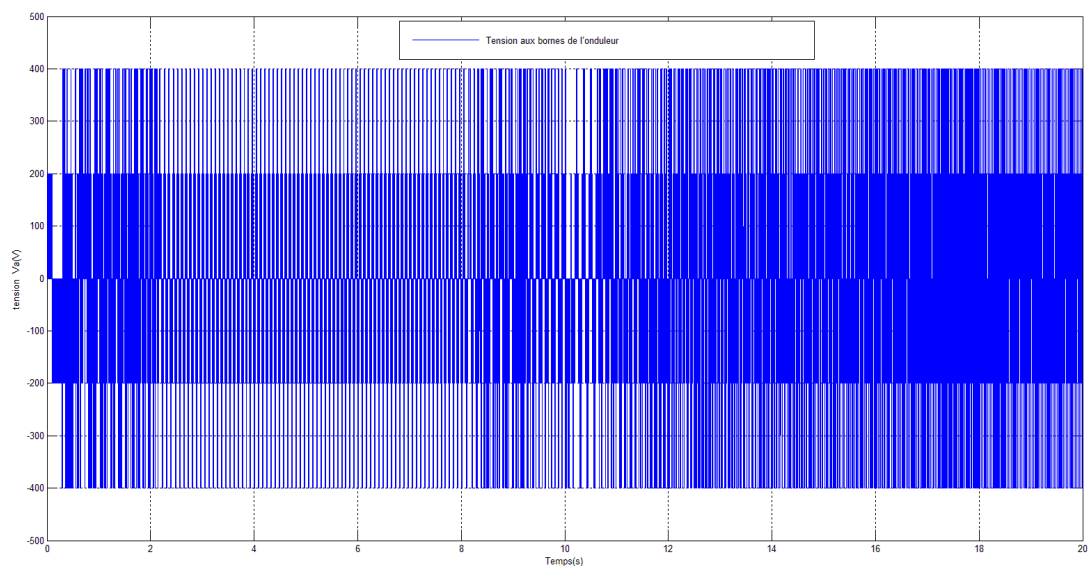


Figure B.5 : La tension aux bornes de l'onduleur V_a

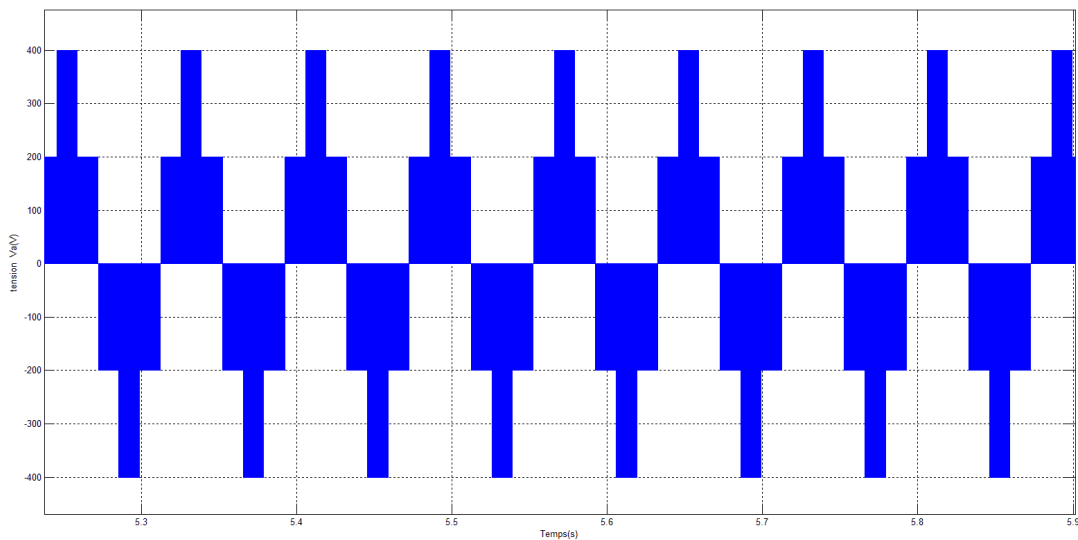


Figure B.6 : Zoom sur la tension aux bornes de l'onduleur Va

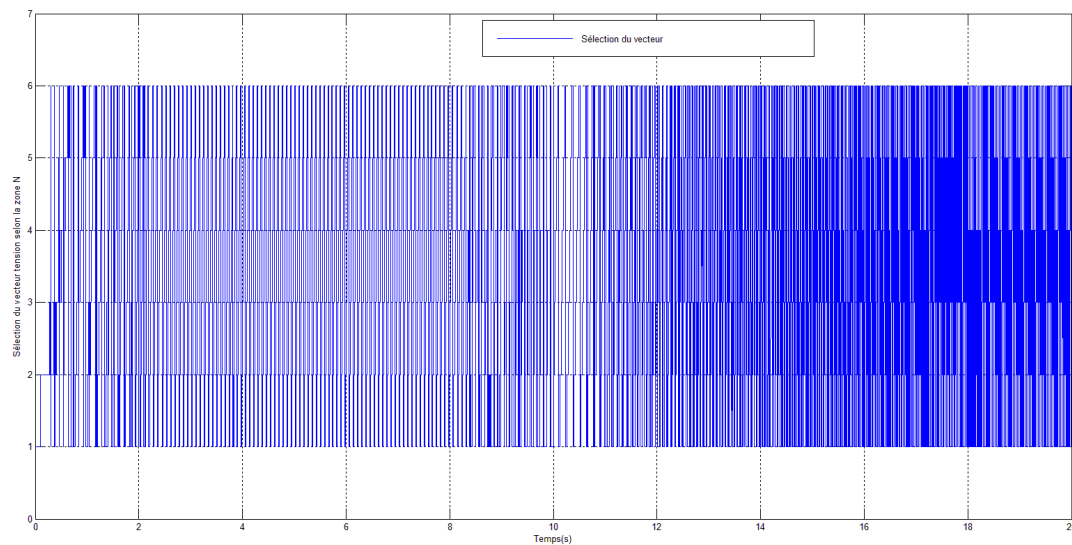


Figure B.7 : Sélection de la vectrice tension selon la zone N

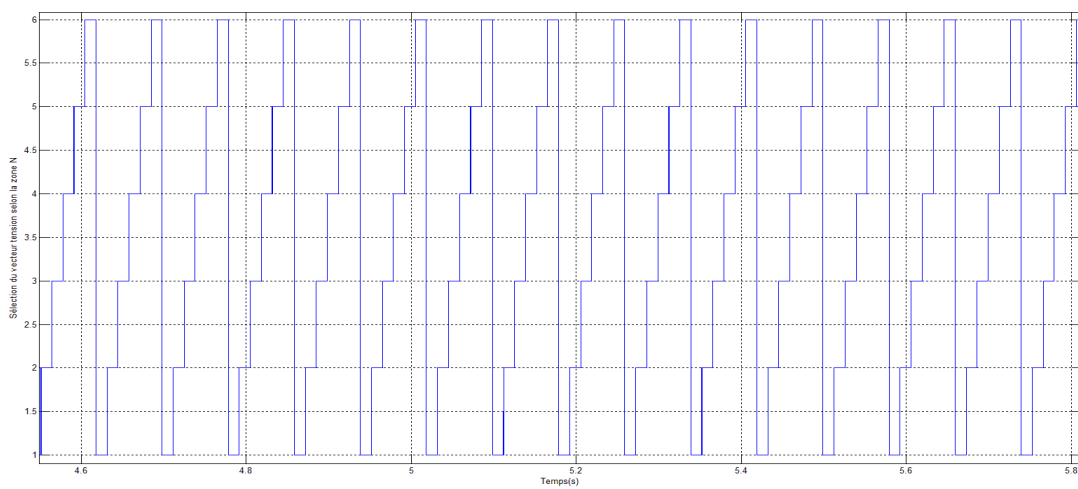


Figure B.8 : Zoom sur la sélection de la vectrice tension selon la zone N

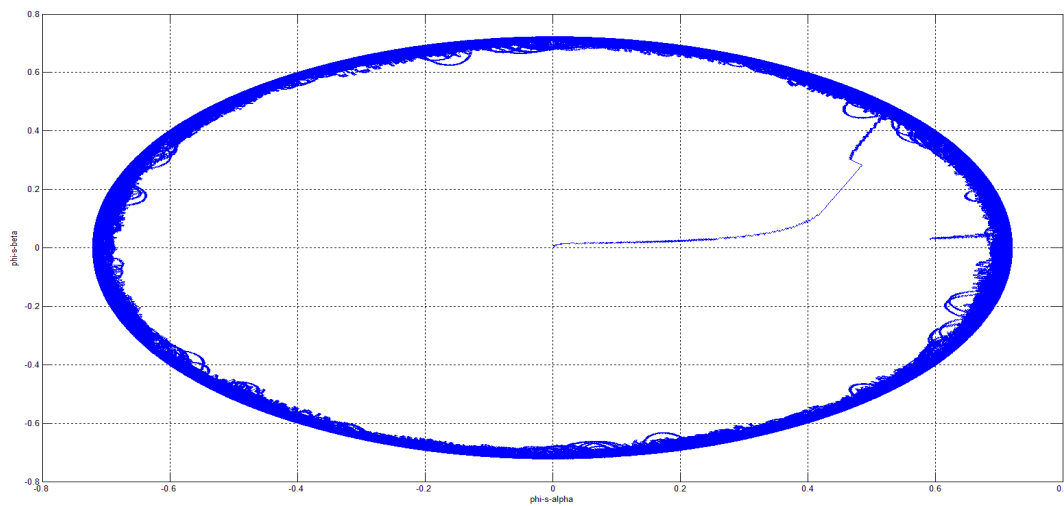


Figure B.9 : Trajectoire du flux statorique

Références bibliographiques

Référence Bibliographiques :

- [1] Alstom company, « guide d'exploitation et d'entretien : Section 1 guide descriptif», Document technique M'sila2 1985.
- [2] Ansaldo Energia Company, « document technique : Section 1 turbine à gaz», Document technique M'sila3 2009.
- [3] Ansaldo Energia Company, « document technique : Section 2 Systèmes mécaniques», Document technique M'sila32009.
- [4] Ansaldo Energia Company, « document technique : Section 3 système électrique», Document technique M'sila32009.
- [5] Ansaldo Energia Company, « document technique : Section 4 générateur électrique», Document technique M'sila 3,2009.
- [6] A. Ben Antar, R. Seba « Commande Vectorielle à flux rotorique orienté appliquée à une machine asynchrone d'un tour » Mémoire de fin d'études Master II, Mécatronique Boumerdes 2015.
- [7] B.Amel, M.Souad « Commande par MLI vectorielle d'un onduleur alimenté un moteur à cage (étude de comparative entre la modulation à séquence Alignée à droit et celle à séquence symétrique) », Mémoire de Fin d'études, Université de M'sila, 2009.
- [8] B. Dalila « Machine asynchrone à double stator alimentée par onduleur à trois niveaux à structure NPC » Thèse de Magistère, ENP. Alger 2004.
- [9] B.Mohamed el Amine, B.Azmi « Commande par mli vectorielle d'un onduleur alimentant un moteur a cage», Mémoire fin d'étude, Université de M'sila, 2008
- [10] B.Samir, A.Mohammed chames eddine et R.Ameur « Etude descriptif du démarreur statique d'un turboalternateur (centrale thermique -M'sila-)», Mini-projet de licence, Université de M'sila, 2020.
- [11] CH. Nouredine « Etude de la Robustesse des Contrôleurs Flous d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents avec Pilotage Vectoriel » Mémoire de Magister Commande Electrique Université de Batna 2011.
- [12] E. Bounadja « Modélisation des Machines électriques » synthèse du cours Master I département génie électrique, université de chlef, 2018.

- [13] E .M. Berkouk, « contribution à la conduite des machines asynchrones monophasée et triphasée alimentée par des convertisseur direct et indirects. Application au gradateur onduleur multiniveux » thèse de doctorat, CNAM, paris France 1995.
- [14] G.Bilal, M.Brahim « Commande vectorielle a flux orienté de la machine à induction» Mémoire de Fin d'études, Université de M'sila, 2009.
- [15] H. Mourad « Identification Paramétrique et Structurale des Machines Synchrones par Application de Divers Signaux d'excitation » Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, 2007.
- [16] [http:// fr. wikipedia.org/wiki/Commande_vectorielle](http://fr.wikipedia.org/wiki/Commande_vectorielle).
- [17] <https://www.scribd.com/document/408324953/Formation-electronique-de-puissance-cours-20-1-pdf>.
- [18] J. M RETIF « commande vectorielle des machines asynchrones et synchrones » institut Nationale des sciences appliquées de Lyon, 2008.
- [19] KH. Djalal eddine « Commande électrique des mécanismes industriels » synthèse du cours Master II département génie électrique, université de M'sila, 2019.
- [20] L.Toufik, « Développement et Implémentation par Logique Floue d'une Commande DTC d'un Moteur à Induction Alimenté par un Onduleur de Tension PWM, ». Thèse de magister, université de Sétif, 2003.
- [21] M.Fouad, I.Brahim « Commande de la machine synchrone à aimant permanent par les techniques IRFOC et DTC», Mémoire fin d'étude, Université de M'sila, 2018.
- [22] O. Anis « Observation de la Machine Synchrone à Rotor Bobiné Sans Capteurs(Sensorless) » Mémoire de fin d'études Master II, Génie électrique Tizi-Ouzou, 2016.
- [23] S. Belgacmi, N. Sami, « Etude et commande d'une machine asynchrone a doublé étoile alimenté par un onduleur multiniveux », mémoire d'ingénieur, ETSTHB 2003.
- [24] S. Guy, B. Robert, L. Francis, Les convertisseurs de l'électronique de puissance la Conversion alternatif (volume 4). Edition tec-doc, 1995.
- [25] T. Wildi: Electrotechnique, 3eme édition, éditions de Boeck université 1999.