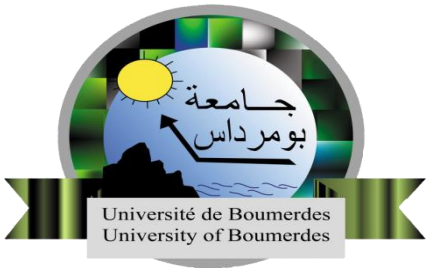
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté des **S**ciences de l'**I**ngénieur

Mémoire de Master

Présenté par :

- SIAR OUSSAMA
- KEBOUR MOHAMED

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en

Génie Electrique

Option : électrotechnique

Spécialité : machine électrique

Thème :

Alimentation d'une pompe alimentaire via un cycloconvertisseur

Président	: S. Grouni	Professeure	UMBB
Rapporteur	: S. Fellag	Professeure	UMBB
Examinateur	: I .Ahriche	Docteur	UMBB
Examinateur	: I .Boudouda	Docteur	UMBB

- Promotion Juin 2017-

Dédicaces

Chaleureusement,on dédie ce modeste travail :

A la lumière de nous vies, notre cher parent, en témoignage de leur amour et de leurs sacrifices sans limites ;nous leurs souhaitons une bonne santé, que Dieu me les garde.

A notre frères et sœurs

A toute nous famille et particulièrement

A tous nous amis

A tous mes collègues de la promotion 2017

A tous ceux qui m'aiment et qui me sont chers

Oussama et mohamed

Remerciements

En premier lieu, nous remercions DIEU tout puissant, qui m'a donné le courage, la force et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

Ce travail a été réalisé auniveau de la société de production de l'électricité, **SPE**, sous la Direction Scientifique de Monsieur **FellagSidali,** Professeur à l'UMBB et Monsieur **Ben-Tafati Idris**, ingénieur à la société. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma très sincère reconnaissance pour leurs précieuses directives, leur très grande disponibilité, leurs fructueux conseils, leur suivi constant, leur courtoisie si raffinée et leurs qualités humaines.

J'adresse mes chaleureux remerciements aux membres de jury qui ont bien voulu juger mon travail.

Nous remercions aussi Messieurs **I. Ahriche et S.Grouni et Boudouda**

Nous sincères remerciements vont également à tous les enseignants du Département de Génie Electrique à l'UMBB ayant contribué de près et/ou de loin à notre formation de Master.

Noustenons à remercier nous parents car ce travail représente un petit fruit de leur souffrance et qui sans eux je ne pouvais traverser ces longues années d'études et de travail.

Nousremercions d'une façon très particulière nous amis et sur tout « nas el-waha » pour leurs soutiens inconditionnels.

Nous ne saurions terminer sans remercier mes frères et sœurs ainsi que toute la famille pour leurs encouragements soutenus et pour leur soutien moral.

ملخص :

تعتبر الطاقة الكهربائية مصدر فعال و مهم في تطور جميع القطاعات توجد عدة مصادر لطاقة الكهربائية من بينها محطات توليد الطاقة الكهربائية حيث تمثل نسبة مساهمتها في توليد الطاقة ب 95%من الطاقة الكهربائية

تطرقنا في الدراسة التي قمنا بها إلى المنظومة العامة في تشغيل هده المحطات و بالأخص أنظمة الضخ التي تمثل جزءا أساسيا في تشغيل محطة توليد الكهرباء حيث يتكون نضام الضخ من عدة أجزاء مثل المحركات و مغيرات السرعة تم التفصيل في دراستها و تقديم نتائج المحاكاة و مناقشتها

الكلمات المفتاحية :الآلة الغير متزامنة , سيكلوكونفرتر ,مغير السرعة الهيدروليكي

RESUME :

L’énergie électrique présente une source indisponible pour le développement de tous les secteurs. Les centrales électriques sont ceux qui produisent 95 % de cette énergie. L’étude présentée dans l’actuel travail s’intéresse au fonctionnement de ces centrales ainsi qu’au fonctionnement des systèmes de pompage qui représentent une partie incontournable dans le fonctionnement de la centrale électrique.

Le système de pompage est constitué d’une Machine a induction S et d’un coupleur et un variateur de vitesse .si composé en été étudié en détail et les résultats de leur fonctionnement en été présentés et commentés.

Mots clé : machine asynchrone, cycloconvrtisseur, coupleur hydraulique

ABSTRACT :

Electric power has an unavailable source for the development of all sectors. Power plants are those that produce 95 % of this energy. The study presented in the current work is interested in the operation of these plants as well as the functioning of pumping systems that represent a necessary part in the operation of the power plant.

The pumping system consists of a S induction Machine and a coupler and speed if drive composed in summer studied in detail and the results of their operation in the summer present and commented.

Key words: Induction machine, cycloconverter , hydraulic coupler

Introduction générale 1

Chapitre Ⅰ : ***présentation de la centrale Ras-Djinet***

I.1. Introduction 2
I.2. Présentation de la centrale 2
I.2.1. Implantation de la centrale 2
I.2.2. Légende du plan de masse 2
I.2.3. La puissance installée de la centrale 4
I.2.4. Principe de fonctionnement de centrale 4
I.2.5. Commande et contrôle 4
I.2.6. Caractéristiques techniques se la centrale de Ras-Djinet 4
I.2.6.1. Combustible 4
I.2.6.2. Générateur de vapeur 4
I.2.6.3. Turbine à vapeur 6
I.2.6.4. Poste d'eau 6
I.2.6.5. Eau de réfrigération (eau de mer) 7
I.2.6.6. Déminéralisation d'eau de mer 7
I.2.6.7. Déminéralisation 7
I.2.6.8. Electro-chloration 8
I.2.6.9. Alternateur 8
I.2.6.10. Auxiliaires communs aux quatre tranches 8
I.2.6.11. Auxiliaires électriques 8
I.2.6.12. Evacuation de l'énergie 8
I.2.6.13. Salle de commande centralisée 9
I.3. Installations mécaniques et électriques d'une tranche 10
I.3.1. Installations mécaniques 10
I.3.2. Installations électriques 11
I.4. Fonctionnement du circuit eau-vapeur de la centrale thermique 13
I.5. Conclusion… 13

Chapitre Ⅱ : ***Système pompage***

II.1. Introduction 13
II.2. La pompe alimentaire 13
II.3. Principe de fonctionnement de la pompe alimentaire 13
II.4. Rôle d'une pompe 14
II.4.1. Caractéristique technique de la pompe alimentaire 14
II.4.2. Constitution de la pompe alimentaire 14
II.5. Partie électrique (moteur électrique) 15

II.5.1. Constitution 15
II.5.2. Principe de fonctionnement d'un moteur Asynchrone 16
II.5.3. Caractéristique technique de moteur 17
II.6. Modélisation de moteur asynchrone 17
II.6.1. Hypothèses simplificatrices 17
II.6.2. Mise en équation de la machine asynchrone 18
II.6.3. Equation électriques 19
II.6.4. Equations magnétiques 19
II.6.5. Equation mécanique 20
II.6.6. Modèle de la machine dans le système d'axe (d,q) 20
II.6.6.1. Transformation de Park 21
II.6.7. Choix du référentiel 22
II.6.8. Equation de puissance et de couple 23
II.6.9. Modèle de la machine asynchrone en régime permanent 24
II.7. Simulation du modèle 25
II.7.1. Interprétation des résultats 27
II.8. Conclusion 28

*Chapitre*III *:Etudedes cycloconvertisesur*

III.1. Introduction 29
III.2. Présentation de cycloconvertisseur 29
III.2.1. Définition 29
III.2.2. Avantages, limitation, inconvénients du cycloconvertisseur 29
III.3. Principe de fonctionnement cycloconvertisseur 30
III.3.1. Rappel sur les Semi-conducteur 30
III.3.2. Rappel sur les redresseurs 33
III.3.3. structure de base (cycloconvertiseur) 34
III.4. Montages utilisées 35
III.4.1. Cycloconvertisseurs monophasé 35
III.4.2. Cycloconvertisseurs d'indice de pulsation égal à 3 35
III.4.3. Cycloconvertisseurs d'indice de pulsation égal à 6 35
III.5. Fonctionnement en réglage de phase 36
III.5.1. Commande 38
III.6. Fonctionnement en ondes pleines 41
III.7. Limite de fréquence 42
III.8. Analyse harmonique des tensions de sortie 42
III.8.1. Expression des ‘‘fonction de commutation’’ des thyristors 42

III.8.2. Expression générale des tensions instantanées fournies par les deux groupes redresseurs 43
III.8.3. Fonction de commutation des deux groupes redresseurs 45
III.8.4. Expression générale de la tension de sortie de cycloconvertisseur 45
III.9.Filtrage de signale 46
III.9.1. Harmoniques 46
III.9.2. Effets des harmoniques 46
III.9.3. Solutions pour améliorer la qualité de l'énergie 46
III.10.Application des cycloconvertisseurs 49
III.11.Simulation 49
III.11.1. Cycloconvertisseur monophasé 49
III.11.2. Cycloconvertisseur d'indice de pulsation égal à 3 50
III.11.3. Cycloconvertisseur d'indice de pulsation égal à 6 51
III.11.4. interprétation des résultats 52
III.11.5. Filtrage signal de sorte 52
III.12.Conclusion 53
Chapitre* Ⅳ *: ensembles convertisseur machine asynchrone
IV.1. Introduction 54
IV.2. type des variateurs de vitesse 54
IV.2.1. Variateur de vitesse utilisant un redresseur et un onduleur à commutatif naturelle 54
IV.2.2. Variateur de vitesse utilisant un cycloconvertisseur 55
IV.2.3. Variateur de vitesse utilisant un gradateur 55
IV.2.4. Variateur de vitesse utilisant un redresseur et un onduleur autonome à MLI 56
IV.2.5. Variateur de vitesse utilisant un redresseur et un onduleur autonome à onde rectangulaire 57
IV.3. Les principes des variations de vitesse des moteurs asynchrones 57
IV.4. Critères de choix d'un variateur 60
IV.5. Alimentation par cycloconvertisseur 61
IV.6. Simulation de l'ensemble cycloconvertisseur machine asynchrone 62
IV.7. Interprétation des résultats 64
IV.8. Conclusion 64
Conclusion générale 65

Abréviations

ω_s vitesse angulaire électrique statorique.

ω vitesse angulaire électrique rotorique.

ω_{gl} vitesse angulaire électrique de glissement.

p Nombre de paire de pôles.

g Glissement.

R_s Résistance d'une phase statorique.

R_r Résistance d'une phase rotorique.

$[L_{ss}]$ Matrice d'inductance statorique.

$[L_{rr}]$ Matrice d'inductance rotorique.

$[M_{rs}]$ Matrice des inductances mutuelles stator-rotor.

L_s Inductance propres cyclique statorique.

L_r Inductance propres cyclique rotorique.

d,q axes correspondants au référentiel lie champ tournant.

V_{ds}, V_{qs} composantes du vecteur tension statorique dans le référentiel (d ,q).

V_{dr}, V_{qr} composantes du vecteur tension rotorique dans le référentiel (d ,q).

C_{em} Couple électromagnétique.

Ω vitesse mécanique du rotor.

θ_{obs} Angle de rotation lié au référentiel d'observation.

Ø Flux magnétique.

θ Angle de rotation de l'axe (d ,q) par rapport au rotor.

f Fréquence.

V_{AK} La tension anode/cathode.

$F_i(\theta - \psi)$ La fonction de commutation de thyristor.

ψ Retard du l'amorçage.

v_P , v_N Expression générale des tensions instantanées fournies par les deux groupes redresseurs.

$\boldsymbol{v_0}$ Expression générale de la tension de sortie du cycloconvertisseur.

R résistance.

L inductances.

C condensateur.

Liste des figures

Figure (Ⅰ.1) : plan de masse ……..3
Figure (Ⅰ.2) : Schéma de principe d'évacuation d'énergie électrique.……...…….8
Figure (Ⅰ.3) : schéma synoptique d'une tranche thermique……..……11
Figure (Ⅱ.1) : schéma du système……...14
Figure (Ⅱ.2) : Composition de la pompe alimentaire……15
Figure (Ⅱ.3) : moteur asynchrone……...15
Figure (Ⅱ.4) : le stator……16
Figure (Ⅱ.5) : le rotor……16
Figure (Ⅱ.6) : Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée (1) partie fixe: Stator. (2) Partie mobile : Rotor. (3) Entrefer constant……..18
Figure (Ⅱ.7) : Représentation du modèle de la machine asynchrone triphasée et biphasée équivalente……....21
Figure (Ⅱ.8) : Schéma par phase en régime permanent……..24
Figure (Ⅱ.9) : Schéma équivalent au stator avec les fuites magnétiques totalisées au rotor..25
Figure (Ⅱ.10) : simulation d'une machine asynchrone ……..26
Figure (Ⅱ.11) : Réponse de la machine en fonctionnement à vide C_r=0(N.m)……..26
Figure (Ⅱ.12): Réponse de la machine en fonctionnement à vide C_r=10*10^4(N.m)…… 27
Figure (Ⅲ.1) : diode……....30
Figure (Ⅲ.2) : transistor……...31
Figure (Ⅲ.3) : thyristor……....31
Figure (Ⅲ.4) : caractéristique et limitation de fonctionnement……...32
Figure (Ⅲ.5) : tête-bêche……33
Figure (Ⅲ.6) : Forme d'onde crée par un cycloconvertisseur……34
Figure (Ⅲ.7) : Schéma de base de fonctionnement d'un Cycloconvertisseur……34
Figure (Ⅲ.8) : Cycloconvertisseur monophasé……35
Figure (Ⅲ.9) : Cycloconvertisseurs d'indice de pulsation égal à 3……..35
Figure (Ⅲ.10) : Cycloconvertisseur d'indice de pulsation égal à 6……..……...36
Figure (Ⅲ.11) : cyclonvertisseur monophasé alimentant une résistance pure……..…37
Figure (Ⅲ.12) : Charge monophasée alimentée par un cycloconvertisseur d'indice de pulsation 3……37
Figure (Ⅲ.13) : Formes d'ondes avec tension maximale, sur une résistance pure……..38
Figure (Ⅲ.14) : Formes d'ondes avec tension maximale, sur une charge inductive……...39
Figure (Ⅲ.15) : Formes d'ondes à tension fondamentale réduite de moitié……...39
Figure (Ⅲ.16) : Cycloconvertisseur à sortie triphasée……40
Figure (Ⅲ.17) : Formes d'ondes de la tension de sortie d'un cycloconvertisseur sur charge inductive……40
Figure (Ⅲ.18) : Détermination de l'angle d'amorçage en réglage de phase……...41
Figure (Ⅲ.19) : Détermination de l'angle d'amorçage pour une tension de sortie réduite….41
Figure (Ⅲ.20) : Différentes formes d'ondes d'un cycloconvertisseur à ondes pleines……...42

Figure (Ⅲ.21) : sinusoïdes d'alimentation et fonction de commutation, pour un retard de 90°, d'un groupe redresseur positif……...43
Figure (Ⅲ.22) : Harmoniques……..46
Figure (Ⅲ.23): Filtre passif série……47
Figure (Ⅲ.24) : Filtre passif parallèle……..47
Figure (Ⅲ.25) : Filtre amorti……48
Figure (Ⅲ.26) : Filtres résonants agissant sur plusieurs rangs harmoniques……...48
Figure (Ⅲ.27) : Schéma de la simulation (Cycloconvertisseur monophasé)……...49
Figure (Ⅲ.28) : Tension de sorte (Cycloconvertisseur monophasé)……...49
Figure (Ⅲ.29) : Les impulsions de commande des gâchettes des thyristors……...50
Figure (Ⅲ.29) : Schéma de simulation (Cycloconvertisseur d'indice de pulsation égal à 3)..50
Figure (Ⅲ.30) : Tension de sorte (Cycloconvertisseur d'indice de pulsation égal à 3)……...50
Figure (Ⅲ.31) : Schéma de simulation (Cycloconvertisseur d'indice de pulsation égal à 6)..51
Figure (Ⅲ.32) : Tension de sorte (Cycloconvertisseur d'indice de pulsation égal à 6)……...51
Figure (Ⅲ.33) : Schéma de simulation (Cycloconvertisseur d'indice de pulsation égal à 6) filtré……...52
Figure (Ⅲ.34) : Tension de sorte (Cycloconvertisseur d'indice de pulsation égal à 6) filtré..52
Figure (Ⅲ.35) : les harmoniques de signal d'indice de pulsation égal à 6 avens filtrage……52
Figure (Ⅲ.36) : les harmoniques de signal d'indice de pulsation égal à 6 apprêts filtrage….53
Figure (Ⅳ.1) : redresseur et un onduleur à commutatif naturelle ……...55
Figure (Ⅳ.2) : Variateur cycloconvertisseur triphasé génère une tension alternative…….55
Figure (Ⅳ.3) : variateur de vitesse type gradateur …….55
Figure (Ⅳ.4) : redresseur et un onduleur autonome à MLI ……....56
Figure (Ⅳ.5) : Variateur de vitesse type redresseur et un onduleur autonome ……...56
Figure (Ⅳ.6) : Caractéristiques du couple et de courant en fonction de la vitesse ……57
Figure (Ⅳ.7) : Rapport GV/PV quelconque……..58
Figure (Ⅳ.8) : gradateur relié avec rotor ……....58
Figure (Ⅳ.9) : Cascade hypo synchrone……58
Figure (Ⅳ.10) : relation entre la fréquence et la vitesse synchronisme ……..59
Figure (Ⅳ.11) : Conversion directe par cycloconvertisseur……59
Figure (Ⅳ.12) : Déplacement de la caractéristique couple –vitesse en fonction de la fréquence d'alimentation……...60
Figure (Ⅳ.13) : Alimentation d'un moteur asynchrone par cycloconvertisseur……..62
Figure (Ⅳ.14) : Simulation de l'ensemble cycloconvertisseur machine asynchrone……62
Figure (Ⅳ.15) : résultat de simulation a 50 Hz……....63
Figure (Ⅳ.16) : résultat de simulation a 25 Hz ……64

Liste des tableaux

Tableau 1 : les paramètres techniques de la pompe alimentaire ……14
Tableau 2 : les caractéristiques techniques de moteur……17

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie électrique est l'une des formes d'énergie la plus consommée partout dans le monde (elle représente environ un tiers de l'énergie mondiale). C'est l'un des facteurs le plus important pour le développement d'un pays. Pour disposer de cette énergie qui est si importante, elle doit nécessairement être produite dans des centrales.

La production de l'énergie électrique à grande échèle est assurée par des centrales électriques thermiques, dont le principe de fonctionnement est soit à vapeur , à gaz ou a cycle combiné.

Le système de pompage occupe une place très importante dans les fonctionnements des centrales électriques, la machine asynchrone MAS présente l'actionneur principal de système de pompage. Pour commander la vitesse de la pompe, voire la varier on utilise généralement des coupleurs hydraulique dont le coût et la maintenance deviennent trop chers. Pour cette raison remplacer le coupleur par un variateur de vitesse électronique présente une solution judicieuse. Le but de notre travail et de faire une étude sur les centrales électriques en générale et le système de pompage en particulier. Une étude sur les variateurs de vitesse et comprendre leur fonctionnement. L'étude de la MAS aussi sera détaillée.

Le contenu de notre projet qui traitera les différents points clé que portera notre travail est reparti sur 04 chapitres :

Dans le 1er chapitre on présente le central électrique de Ras-djenet dans lequel nous décrivons l'emplacement du site, sa superficie ainsi que les différents équipements dont le site se dispose, la capacité de production, la technologie utilisée et les différents types de commandement, depuis les salles qui sont réservés à cet effet. Nous parlerons aussi de la capacité de production de la centrale notamment sa puissance, l'architecture et la composition de la centrale et les types et cycles des turbines utilisés.

Dans le 2^{éme} chapitre nous traiterons l'ensemble du système de pompage ainsi que ses déférents composants. Nous présenterons la théorie de la machine asynchrone, actionneur utilisé dans notre système de pompage. Nous allons faire la modélisation de ce dernier et nous présenterons des résultats de simulation des caractéristiques de base à savoir le couple, le courant et la fréquence.

Dans le 3^{éme} chapitre nous parlerons d'un convertisseur statique notamment le cycloconvertisseur. L'architecteur, le principe de fonctionnement de ce dernier seront présentés et à la fin on présente une modélisation et une simulation de son fonctionnement.

Dans le dernier chapitre nous parlerons des différentes méthodes et les types de montages avec lequel on peut varier la vitesse. Nous allons aussi associé le variateur de vitesse et la machine asynchrone. Le but de cette combinaison est de varier la vitesse de la MAS. Les résultats de simulation de l'ensemble seront montrés et commentés.

Le travail se termine par une conclusion générale qui englobe les résultats obtenues et perspectives.

Chapitre I

Présentation de la centrale de Ras-djenet

I.1. Introduction

La centrale thermique de Ras-Djenet a été construite en vue de renforcer le réseau national par l'alimentation en énergie électrique .Elle est composée de quatre groupes turbo-alternateurs d'une puissance unitaire de 176 MW, totalisant une capacité installée de 704 MW.

I.2. Présentation de la centrale

I.2.1. Implantation de la centrale

- **Superficie :** 35 hectares.
- **Choix de site :**

Le choix de site s'est fait sur la base des critères suivants :

- A proximité des consommateurs importants situés notamment dans la zone industrielle de Rouiba-Réghaia .
- Proximité de la mer.
- Possibilité d'extension.
- Conditions du sous-sol favorables, ne nécessitant pas de fondations profondes.

- **Historique de la centrale :**

La centrale a été construite par un constructeur Austo-allemand qui avait la responsabilité des études de la supervision du montage et du contrôle de l'ouvrage, ainsi que d'une entreprise Espagnole (DRAGADOS) à la quelle a été confiée la réalisation de la prise d'eau de mer.

- **Mise en service de la centrale :**

La mise en service des groupes s'effectuée comme suit :

- Groupe 1 : le 17 juin 1986.
- Groupe 2 : le 17 septembre 1986.
- Groupe 3 : le 29 Novembre 1986.
- Groupe 4 : le 21 février 1987.

I.2.2. Légende du plan de masse (figure. Ⅰ.1)

1. Salle des machines.
2. Chaudière.
3. Locaux des auxiliaires électriques.
4. Locaux des auxiliaires mécaniques.
5. Tour de prise d'eau de mer.
6. Station de détente de gaz
7. Réservoir stockage fuel.
8. Station pompage et dépotage fuel.
9. Station de production H_2
10. Poste d'incendié à mousse.
11. Rack à tuyauterie.

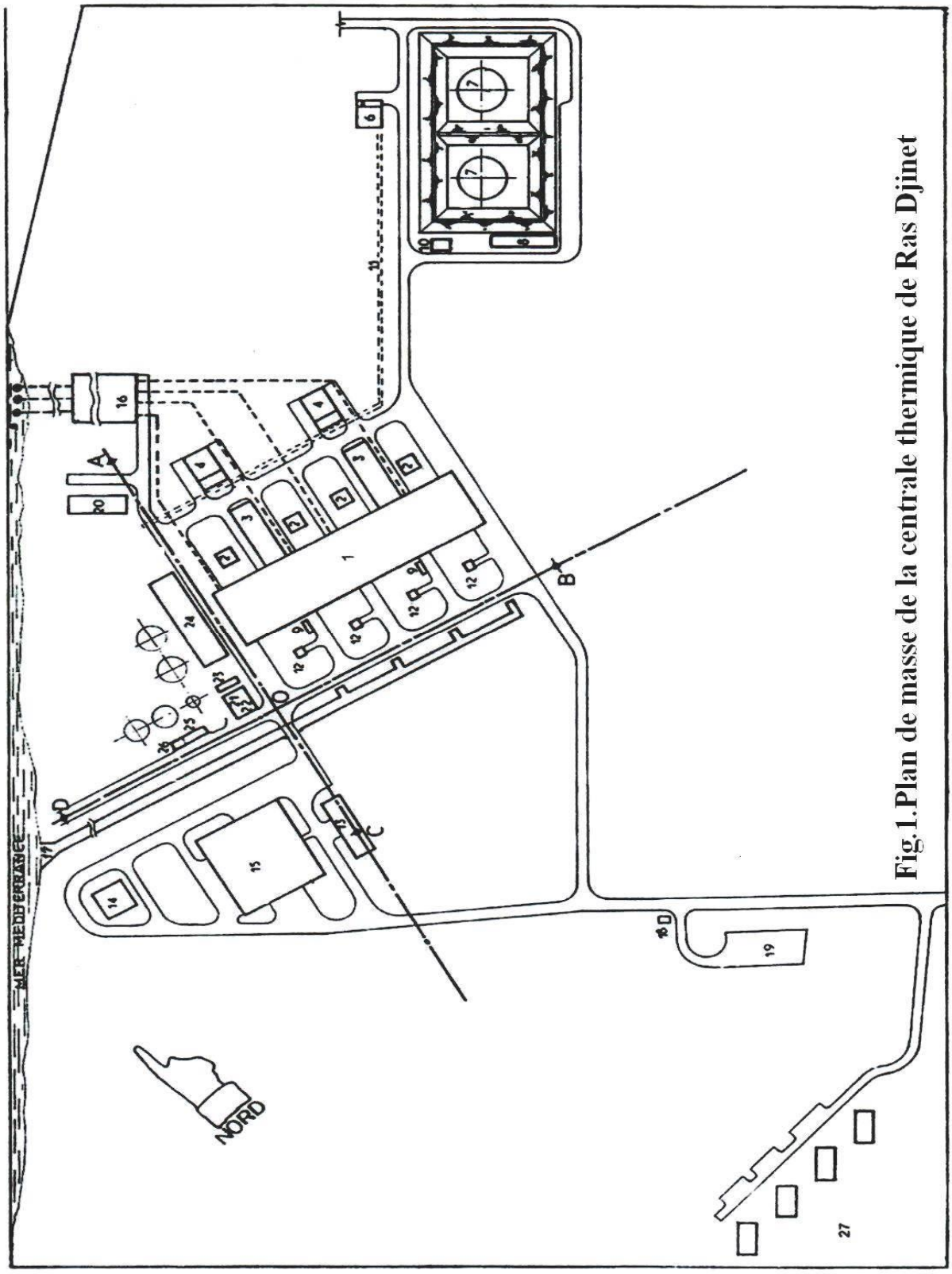


Figure : (I.1) plan de masse.

12. Air des transformateurs.
13. Bâtiment administratif.
14. Cantine.
15. Atelier magasin.
16. Station de pompage.
17. Canal de rejet d'eau de mer.
18. Potier (poste d'entrée).
19. Parc véhicules.
20. Station de chloration.
21. Préparation d'eau potable.
22. Déminéralisation.
23. Fosse de neutralisation.
24. Dessalement d'eau de mer.
25. Station des pompes d'incendie.
26. Pompe d'eau déminéralisée.
27. Logement d'exploitation.

I.2.3. La puissance installée de la centrale

La centrale de Ras-Djenet se compose de quatre tranches de type thermique vapeur d'une puissance unitaire de 176 MW borne alternateur (BA).La puissance installée est de 704 MW (BA).La puissance fournie au réseau est de 672 MW borne usine (BU).

La consommation totale des auxiliaires communs est d'environ 32 MW.

I.2.4. Principe de fonctionnement de centrale

Dans une centrale thermique à vapeur la production de l'énergie électrique comporte trois étapes :

1. La transformation de l'énergie du combustible en énergie calorifique vapeur dans la chaudière.
2. La transformation de l'énergie calorifique en énergie mécanique par la turbine.
3. La transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique par l'alternateur.

I.2.5. Commande et contrôle

La centrale de Ras-Djenet se caractérise par un degré élevé d'automatisme et centralisation des commandes. En effet les équipements sont pilotés par divers systèmes.

- **Poste d'eau turbine :** Piloté par des automates électroniques.
- **Chaudière :** Commandé par un système de régulation électrique.
- **Turbine :** Régulation électro-hydrolique.
- **Alternateur :** Soumis à une surveillance électrique.

I.2.6. Caractéristiques techniques se la centrale de Ras-Djenet

I.2.6.1. Combustible :

Le combustible principal utilisé dans les chaudières est le gaz naturel.

Le débit de gaz nécessaire pour assurer la pleine charge des quatre groupe est de 160 000 m^3/h .

En cas d'indisponibilité, le secours est assuré par le fuel stocké dans deux réservoirs de 10 000 m^3 chacun.

I.2.6.2. Générateur de vapeur

Le générateur de vapeur (chaudière) à pour objet de transformer l'eau en vapeur à haute pression pour alimenter le groupe turbo-alternateur.

- **Constitution :**
  - Chambre de combustion formée par les tubes écrans (faisceaux vaporisateurs).
  - Un ballon (réservoir) et un économiseur.
  - Trois surchauffeurs par injection d'eau pour la régulation de la température de vapeur.
  - Quatre colonnes de descente.
  - Huit bruleurs de combustion mixte gaz /fuel.
  - Deux ventilateurs de recyclage, assurant la régulation de la température a la sortie du resurchauffeur.
  - Deux préchauffeurs d'air à vapeur, servent à l'augmentation de la température de l'air de combustion avant le réchauffeur rotatif.
  - Un réchauffeur rotatif d'air de combustion, sert à réchauffer l'air de combustion par récupération de chaleur des fumées.
  - Deux ventilateurs de soufflage d'air.

Les générateurs de vapeur sont de type pressurisé à circulation naturelle :

I.2.6.3. Poste d'eau

Le poste d'eau comprend l'ensemble des appareils depuis l'échappement de la turbine (corps basse pression) jusqu'à l'économiseur (entrée du générateur de vapeur).

Le poste d'eau a deux fonctions principales :

- La première est énergétique : elle permet d'améliorer le rendement du cycle, en réchauffant l'eau d'alimentation par l'intermédiaire des soutirages.
- La deuxième est alimentaire : avec son système de régulation elle permet d'alimenter le générateur de vapeur (GV) à la demande de ce dernier en deux phases :

1. Pomper l'eau du condenseur et l'envoyer dans la bâche alimentaire, en passant par le réchauffage et le dégazage (circuit d'extraction).
2. Alimenter le générateur de vapeur (GV) par pompage de l'eau de la bâche alimentaire et l'envoyer au ballon de la chaudière (circuit alimentaire).
   - **Constitution :**

1. **Le condenseur :**

Assure la condensation de la vapeur évacuée du corps **BP** de la turbine par la circulation d'eau de mer refroidissement, dans les 14850 tubes en titane contenu dans le condenseur.

2. Deux pompes d'extraction (pompe verticale) :

Assurent le transfert de l'eau du puits du condenseur jusqu'à la bâche alimentaire en passant par les trois réchauffeurs **BP.**

3. Les pompes alimentaires :

Ces pompes refoulent l'eau à haute pression dans le ballon de chaudière de manière à vaincre les pertes de charges dans les conduites (les organes de réglage), les réchauffeurs **HP** (haute pression) et l'économiseur. Elles aspirant l'eau de la bâche alimentaire et la refoulent dans le ballon.

I.2.6.4. Eau de réfrigération (eau de mer)

Les prises d'eau se situent en mer, à 900 m de la station de pompage et de filtration.

L'eau arrive par trois conduites d'amenée d'eau de mer, en béton de trois mètres de diamètre, alimentant la station de pompage.

Elle comporte pour chaque tranche :

- Une grille filtrante à grosses mailles et dé-grilleurs.
- Un tambour filtrant, à maille fine, pour éliminer les petits déchets.
- Deux pompes de circulation de 12 500 m^3/h chacune, qui refoulent l'eau de mer jusqu'àu condenseur à travers deux tuyaux du type BONNA.
- Divers pompes d'alimentation en eau de mer de services auxiliaires (dessalement, électro-chloration, secours circuit incendie)

Après traversé du condenseur l'eau de réfrigération est rejetée vers le canal de rejet qui aboutit à la mer.

I.2.6.5. Dessalement d'eau de mer

Compte tenu du déficit en eau douce dans la région, quatre unités de dessalement de 500 $m^3/jour$ chacune assure la production d'eau pour les appoints au cycle thermique. Ces unités sont de type multi-flash d'eau dessalée est stockée dans deux réservoirs de 2700 m^3 chacun avant d'être déminéralisée.

I.2.6.6. Déminéralisation

Deux chaines de déminéralisation de 40 m^3/h chacune la parachèvent le traitement de l'eau avant son utilisation dans le cycle eau vapeur. Le stockage d'eau déminéralisée se fait dans deux réservoirs de 1500 m^3chacun.

I.2.6.7. Electro-chloration

La chloration d'eau de mer permet de préserver les équipements traversés par l'eau de mer contre la prolifération d'organismes marins.

Elle se fait par injection d'hypochlorite de sodium. La production est assurée par une station d'électro-chloration (par électrolyse d'eau de mer) d'une capacité de 150kg/h de chlora actif .

I.2.6.8. Alternateur

Les alternateurs sont refroidis par l'hydrogène sous pression de 3 bars en circuit fermé l'hydrogène étant lui-même refroidi à l'eau d'extraction du cycle.

- **Caractéristiques principales des alternateurs :**
  - Tension nominale : 15,5 kV .
  - Puissance nominale : 220 MWA.
  - Puissance active : 176 MW.
  - Cos ᵠ : 0,8.
  - Excitation à diodes tournantes.
  - Poids du stator complet : 198 tonnes.
  - Poids du rotor seul : 36,7 tonnes.

I.2.6.9. Auxiliaires communs aux quatre tranches

- **Une station de production d'hydrogène :**

Sert à produire l'hydrogène nécessaire au refroidissement des quatre alternateurs de la centrale.

- **Un poste de détente gaz :**

Composé de deux lignes de filtration gaz, et trois lignes de régulation pour la détente gaz de 60 à 6 bars.

- **Un poste de dépotage et transfert fuel :**

Deux bâches de stockage de capacité : 2*10 000m^3.

I.2.6.10. Auxiliaires électriques :

Les auxiliaires électriques sont situées à l'intérieur de deux bâtiments à 5 niveaux, situés chacun entre deux chaudières :

- Niveau 1 : salle des câbles.
- Niveau 2 : tableaux MT-BT.
- Niveau 3 : salle des câbles.
- Niveau 4 : batterie, redresseur et salle électronique.
- Niveau 5 : salle de commande-installation climatisation.

I.2.6.11. Evacuation de l'énergie

L'énergie électrique produite est évacuée par l'intermédiaire des lignes de 225 kV sur le poste Alger-Est (Boudouaou).

- **Description :**
  - 168 MW sont évacués à travers un transformateur élévateur principal (TP) : 15,5 kV/220 kV.
  - 8 MW servent à L'alimentation des auxiliaires du groupe.
    L'alimentation se fait à travers un transformateur abaisseur de soutirage (TS) : 15,5 Kv/ 6,3 Kv.

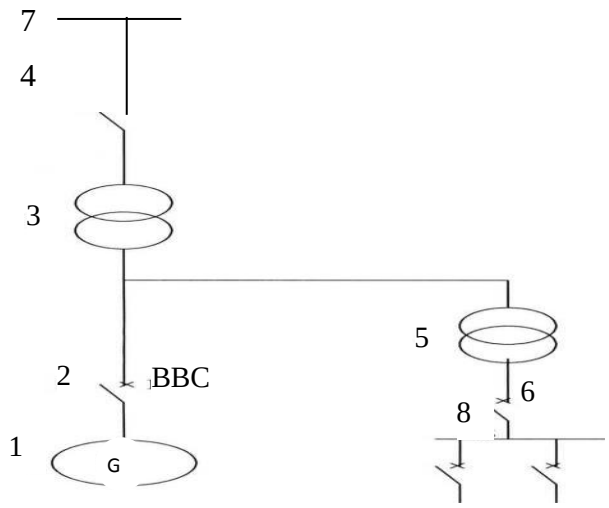


Figure (I.2) : Schéma de principe d'évacuation d'énergie électrique.

1. Alternateur.
2. Disjoncteur alternateur (BBC).
3. Transformateur principal.
4. Disjoncteur de ligne.
5. Transformateur de soutirage.
6. Disjoncteur 6,3 kV.
7. Evacuation ligne 220 kV.
8. Jeu de barre auxiliaire de tranche.

I.2.6.12. Salle de commande centralisée

La centrale thermique de Ras-Djenet se compose de deux salles de commandes centralisées, chacune comprend :

- Deux pupitres de conduites.
- Deux tableaux verticaux où sont rassemblés les organes de commande et les appareilles d'enregistrement de la plus grande partie des paramètres.
- Un tableau synoptique schématisant les auxiliaires électriques.

Chaque paire de tranches est contrôlée et réglée depuis une salle de commande.

I.3. Installations mécaniques et électriques d'une tranche

I.3.1. Installations mécaniques

a) **Chaudière :**

A sa partie inférieure se trouve le foyer ou à lieu la transformation d'énergie chimique en énergie calorifique. La combustion à lieu dans la chaudière à huit brûleurs utilisant comme combustible, du gaz ou du fuel (comme énergie de secours). Le comburant (air) est tiré de l'atmosphère par l'intermédiaire de ventilateurs. [l]

***b) Turbine* :**

Elles sont de type à réaction, elles comportent trois corps :

- Corps haute pression : HP.
- Corps moyen pression : MP.
- Corps basse pression : BP.

Ils sont séparés mais montés sur le même arbre.

- **Le corps HP :**

Il est à simple flux et sa construction en forme de tonneau, lui assure un fonctionnement souple, l'enveloppe interne à plan de joint axial est montée de façon à ne pas entraver les dilatations thermiques.

Sa pression de fonctionnement est de172bars.

- **Le corps MP :**

Il est à double flux, l'enveloppe externe qui porte l'enveloppe interne à un plan de joint horizontal.

Sa pression de fonctionnement est de 48 bars.

- ***Le corps BP* :**

Il est à double flux est composé de trois enveloppes à un plan de joint horizontal. L'enveloppe interne, suspendue dans l'intermédiaire, porte les premiers étages des aubes directrices.

La turbine est dotée d'une régulation électro hydraulique lui permettant d'être réglée à la vitesse nominale de 3000 tr/min.

I.3.2. Installations électriques

***a)* Alternateurs de puissance :**

Cet alternateur triphasé est un convertisseur électromécanique qui transforme l'énergie mécanique fournie par la turbine en énergie électrique.

Le rotor se présente sous forme d'un cylindre de diamètre limité à un mètre, (3000 tr/min, 50 Hz) il est à pôles lisses. Pour minimiser les pertes par effet Joule, l'alternateur est refroidi à l'aide d'un système de circulation d'hydrogène à basse pression (gaz choisi pour sa faible densité).

***b)* Excitatrice :**

L'énergie nécessaire à l'excitation est prélevée sous forme mécanique par l'arbre de groupe. La transformation de cette énergie mécanique en énergie électrique continu s'effectue en utilisant un alternateur et des diodes.

Sur l'arbre de l'alternateur principal est accouplé un alternateur d'excitation dont l'inducteur est fixe et l'induit tournant (alternateur inversé); ce dernier alimente, à travers des diodes également installées sur le rotor, (l'inducteur de l'alternateur principal).

L'énergie nécessaire à l'excitation de l'alternateur inversé est fournie par un alternateur pilote dont l'inducteur est constitué par un aimant permanant.

Les caractéristiques générales de l'excitatrice sont :

- Puissance de la machine : 588 KW.
- Courant d'excitation : 2450 A.
- Plafond de la tension d'excitation : 240 V.
- Vitesse de rotation : 3000 tr/min.
- Rendement du système d'excitation : 90%.

***c)* Disjoncteur d'alternateur (disjoncteur machine ou BBC) :**

C'est un disjoncteur à trois pôles pneumatique fonctionnant à une pression de 30bars. La commande (fermeture, ouverture) et le soufflage de l'arc électrique sont assurés par l'air comprimé produit par une station d'air comprimé commune aux deux groupes.

Ce disjoncteur assure les fonctions suivantes :

1. Séparer l'alternateur de l'alimentation de l'installation auxiliaire pendant les opérations de mise en marche ou d'arrêt.
2. Permettre la synchronisation du coté de 15,5kV.
3. Couper le circuit en cas de défaut sur le transformateur principal, alternateur, le transformateur des soutirages, et en cas de perturbation sur les lignes aériennes reliant la centrale au poste de distribution et de commutation (poste de Boudouaou).
4. Assure la parfaite sécurité de l'alimentation des auxiliaires de la centrale.

***d)* Disjoncteur ligne 235 kV :**

Le disjoncteur ligne est un disjoncteur triphasé, monté entre le transformateur principal et le sectionneur tête de ligne 235 kV, ce disjoncteur est unipolaire à commande hydraulique avec une pression de 340 bars, il assure les fonctions suivantes :

- Séparation de l'installation de production du réseau en cas de défaut électrique Externe.
- Permettre la synchronisation du groupe du coté 235 kV.
- Eliminer les défauts monophasés fugitifs survenus sur la ligne 235 kV sans Interruption d'énergie grâce à une ouverture et fermeture rapide du pôle en défaut.
- Utilisé le réseau 220 kV pour le démarrage du groupe.

***e)* Transformateur principal :** 15.5kV/235kV

Le Transformateur principal est un transformateur triphasé à bain d'huile et d'une puissance nominale 220 MVA, ce transformateur transforme la tension de l'alternateur de 15,5 kV à la tension de réseau de 235 kV.

Le Transformateur est équipé d'une commutation à plots à l'aide du quel il est possible de régler la transformation par degré de ±2^2,5%, la commutation se fait manuellement sur place hors tension.

- **Caractéristiques :**
  - 15,5 kV /235 kV ±2x 2,5 %.
  - U_{cc}= 14 %.
  - Un = 15,5 kV.
  - In = 8195 A.
  - Sn = 220 MVA.
  - Poids : 145 tonnes.
  - Couplage : YnDl

f) **Transformateur de réseau :** 63kV / 6,3kV

C'est un transformateur de soutirage destiné à alimenter l'ensemble des auxiliaires MT et auxiliaires BT. Les auxiliaires BT fonctionnent en courant contenu par l'intermédiaire de redresseurs et aussi les auxiliaires du site, généraux et optionnels.

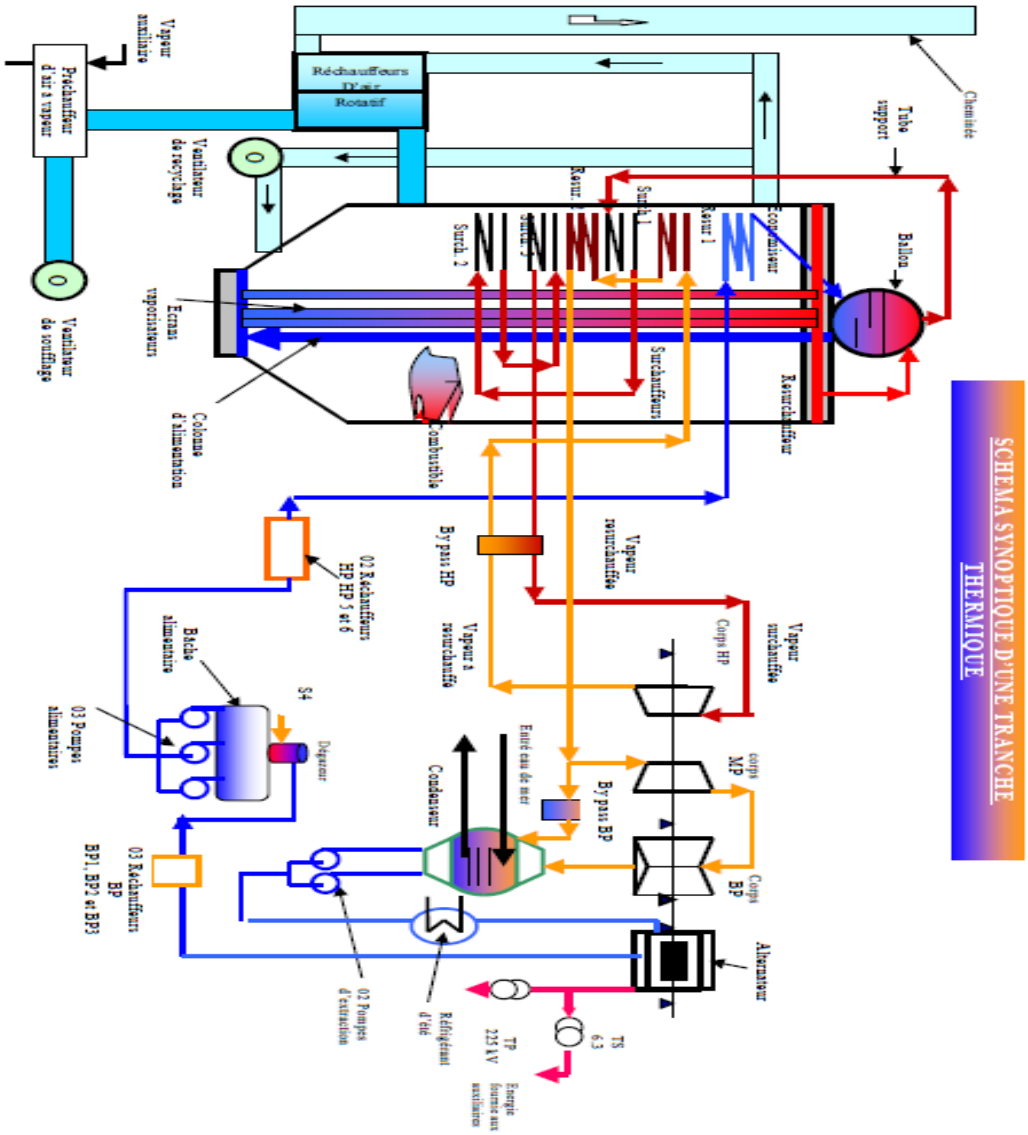


Figure (1.3) : schéma synoptique d'une tranche thermique.

I.4. Fonctionnement du circuit eau-vapeur de la centrale thermique

Le puits du condenseur étant rempli d'eau à certain niveau équivaut à 900mm. La pompe d'extraction aspire l'eau du puits du condenseur et la refoule vers les réfrigérants d'hydrogène à une pression de 18 bars en passant par trois réchauffeurs basse pression (BP) qui sera acheminée par la suite vers la bâche alimentaire.

L'eau est refoulée par les pompes alimentaires jusqu'au ballon chaudière en passant par les deux réchauffeurs haute pression (HP) et l'économiseur sous une température de 284°C et une pression de 175 bars.

Dans le ballon, l'eau descend vers les colonnes de descente en bas et se vaporisant dans le foyer de la chaudière, et retourne au ballon sous forme d'émulsion (eau-vapeur).

Celle-ci se sépare dans les séparateurs cyclones, l'eau sera réutilisée dans le circuit de la vaporisation, tandis que la vapeur traversera une série de trois surchauffeurs pour atteindre 540°C et 155 bars.

La vapeur surchauffée (vive) sera introduite dans le corps (HP) de la turbine à une température de 540°C et une pression de 155 bars, elle est proportionnée par les soupapes régulatrices et fait tourner la turbine à une vitesse de 3000 tr/min. En se trouvant à 535 °C et 138 bars, la transformation étant adiabatique et réversible.

A la sortie du corps (HP), la vapeur subit à une grande détente .Avant de passer dans le corps moyen pression (MP), elle doit traverser deux resurchauffeurs haut pression pour atteindre encore une fois les 540°C. En sortant du corps (MP), la vapeur passe directement dans le corps (BP) ou elle s'évacue au condenseur à une température de 33°C et une pression de 0,05 bars et le cycle recommence.

I.5. Conclusion :

Donne ce chapitre le principe de fonctionnement d'une station thermique à été présenté l'énergie mécanique produite par la rotation de l'arbre turbo-alternateur se transforme en énergie électrique par l'alternateur après qu'il soit excité. L'alternateur joue un rôle primordial et très important dans un groupe turbo-alternateur.

Chapitre II

Système de pompage

II.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter mathématiquement la modélisation de la machine asynchrone qui fait tourner la pompe, sous forme d'un modèle simulink. Ce dernier sera fonction du repère choisis. Les repères utilises pour la machine asynchrone permettent de simplifier la complexité du modèle, car ils donnent une représentation biphasée au lieu d'une représentation triphasée. Le passage vers ces repères s'effectue à l'aide d'une transformation mathématique adéquate (Park).

II.2. La pompe alimentaire

La pompe alimentaire est une pompe centrifuge multi cellulaire, sert a refoulée l'eau d'alimentation de la bâche alimentaire vers la chaudière. Il existe trois pompes alimentaires par tranche de production. Chacune de ces pompes assure une alimentation d'eau de « 50% » du débit maximale nécessaire.

Chaque pompe est équipée de deux filtres, dont l'un est installé dans la pompe nourricière et l'autre est installé entre la pompe nourricière et la pompe principale. Pour atteindre une vitesse très élevée de la circulation d'eau, on ajoute un multiplicateur, ce dernier est installé sur l'arbre de la pompe. Le multiplicateur est monté à coté de moteur. Le coupleur hydraulique assure la transmettions du couple à la pompe alimentaire (en introduisant une variation de vitesse en fonction du débit nécessaire au refoulement de la pompe) et le coupleur hydraulique est a grande vitesse.

- Les conditions de fonctionnements des pompes alimentaires :
  - Aspirent de l'eau chaude.
  - Refoulent l'eau à une pression élevée.
  - Assurent un débit d'eau important.
  - Doivent avoir une grande sécurité de marche pour éviter les très graves conséquences de manque d'eau dans le générateur de vapeur. [2]

II.3. Principe de fonctionnement de la pompe alimentaire

Les pompes alimentaires aspirent l'eau de la bâche alimentaire pour la refouler dans le réservoir de la chaudière en traversant les réchauffeurs H.P du poste d'eau et l'économiseur du générateur de vapeur.

Les pompes alimentaires doivent fournir la quantité d'eau nécessaire pour maintenir le niveau de l'eau dans le réservoir de la chaudière entre deux limites bien définies avec une pression de 176 bars.

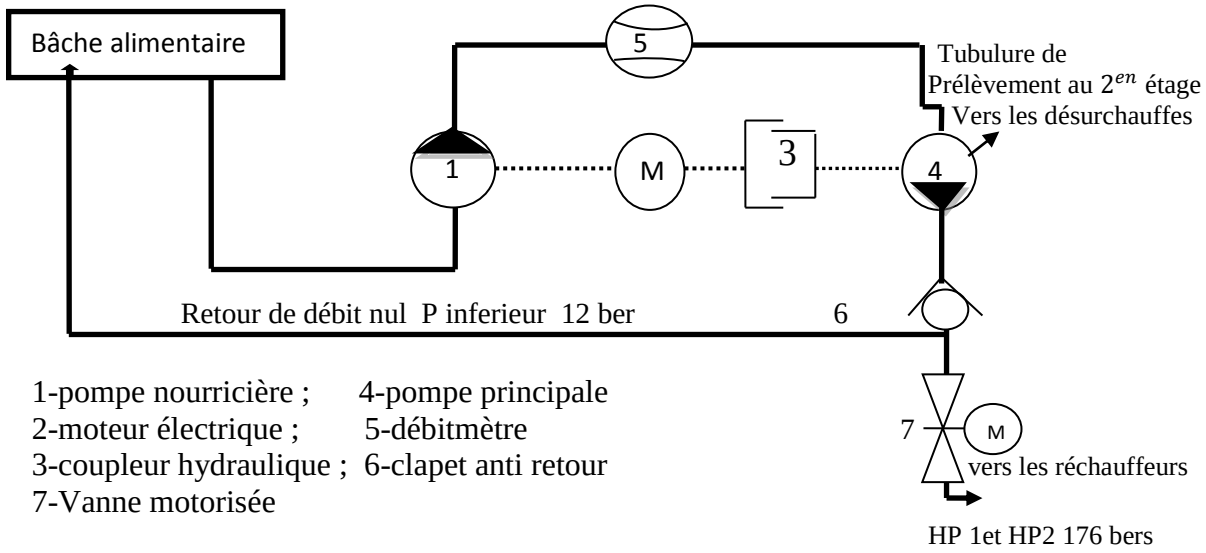


Figure (II.1) schéma du système.

II.4. Rôle d'une pompe

On peut utiliser pour :

- véhiculer un liquide d'un réservoir situe à un certain niveau à un autre situé au niveau plus haut.
- augmenter la quantité (le débit) de liquide qui traverse une conduite. D'une manière générale, et du point de vue physique, la pompe transforme l'énergie mécanique en énergie hydraulique.[2]

II.4.1.Caractéristique technique de la pompe alimentaire [2]

Débit	347 T/HP
Pression de l'aspiration	11 .01 bars
Pression de refoulement	187 bars
Vitesse de rotation	5140 Tr/min
puissance absorbée	2320 KW

Tableau 1 : les paramètres techniques de la pompe alimentaire.

II.4.2.Constitution de la pompe alimentaire

Les pompes alimentaires sont composées selon l'ordre de placement sur le site d'une pompe nourricière, moteur asynchrone triphasé, un coupleur hydraulique et une pompe principale. L'ensemble a une longueur de 8513mm, et un poids de 2 tonnes.

a. La pompe nourricière :

La pompe nourricière est une pompe centrifuge à un seul étage, elle sert à augmenter la pression de l'eau d'alimentation de 5 bars a11 bars.

b. Le moteur électrique :

Le moteur électrique est une machine asynchrone triphasée d'une partie fixe (stator) et d'une partie mobile (rotor). Il a pour but de transformer l'énergie électrique en énergie mécanique.

c. Le coupleur hydraulique :

C'est un organe utilise pour la transmission du mouvement entre deux machines. C'est un transformateur d'énergie mécanique en énergie hydraulique.

d. Pompe centrifuge multicellulaire (pompe principal) :

Ces machines sont conçues pour livrer des pressions de refoulement élevées, à cet effet elles sont constituées par la mise en série dans l'enveloppe unique de plusieurs étages monocellulaires, la hauteur d'élévation peut atteindre 80m avec un débit qui peut aller jusqu'à 600 kg/min. [2]

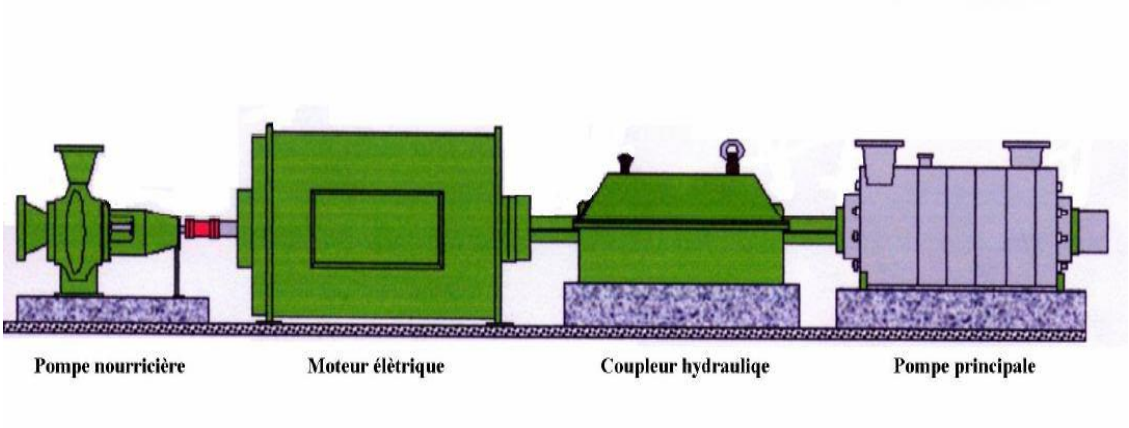


Figure (II.2) : Composition de la pompe alimentaire.

II.5. Partie électrique (moteur électrique)

Le moteur électrique est une machine asynchrone triphasée d'une partie fixe (stator) et d'une partie mobile (rotor). Il a pour but de transformer l'énergie électrique en énergie mécanique.

II.5.1.Constitution

Le moteur d'induction triphasé (souvent appelé moteur asynchrone triphasé) comprend deux parties principale : un inducteur fixe nommé stator et un induit mobile nommé rotor.

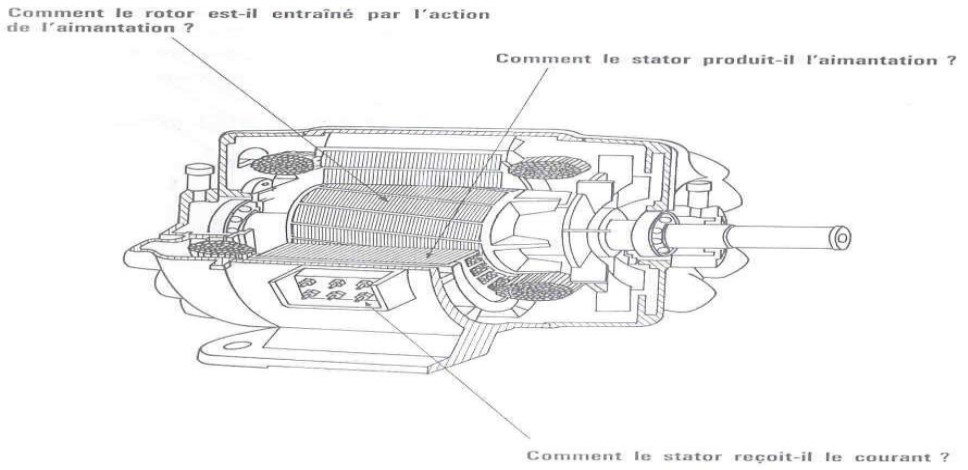
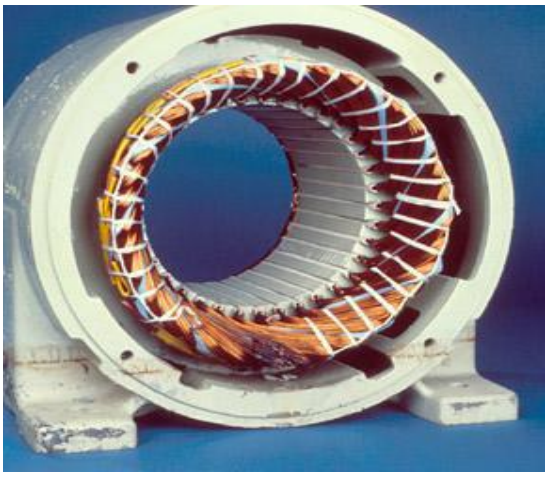


Figure (II.3) : *Moteur asynchrone.*

a. Stator :

Le stator comporte une carcasse en acier renfermant un empilage de tôles minces identiques en forme de couronne qui constituent un cylindre vide, ces tôles sont percées de trous à leur périphérie intérieure. L'alignement de ces trous forme des encoches dans lesquelles on loge un bobinage triphasé. Cette couronne est serrée dans une carcasse en fonte.



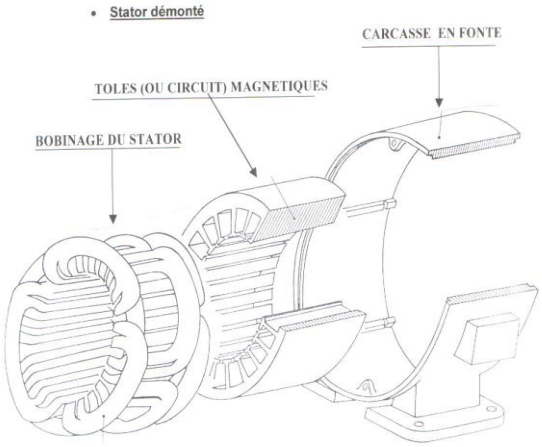


Figure (II.4) : le stator.

b. Le rotor :

Le rotor monté sur l'arbre moteur se compose d'un cylindre fait de tôles empilées. Des encoches sont percées à la périphérie extérieure destinées à recevoir des conducteurs. Il est séparé du stator par un entrefer très court de l'ordre de 0,4 à 2 mm seulement. Il existe deux types de rotor : *le rotor à cage d'écureuil et le rotor bobiné.*



Figure (II.5) : le rotor.

II.5.2.Principe de fonctionnement d'un moteur Asynchrone

Le moteur asynchrone triphasé est le plus utilisé pour assurer la variation de vitesse et du couple dans les mécanismes industriels. Il est constitué du stator et du rotor avec trois enroulements parcourus par des courants alternatifs triphasés qui représentent le stator, et un autre ensemble de trois enroulements qui sont court-circuités et qui forment le rotor. Dans une machine asynchrone à cage d'écureuil, les spires du rotor sont constituées par des barres de

fer entourant le rotor et formant une cage cylindrique appelée cage d'écureuil. Les courants alternatifs dans le stator créent un champ magnétique tournant à la pulsation de synchronisme

$$\Omega_s = \omega_s/p \qquad \text{(II.1)}$$

Le rotor tourne dans le même sens que le champ tournant à une vitesse inferieur à la vitesse de synchronisme (à celle du champ tournant) $\Omega < \Omega_s$, on dit que le rotor « glisse »par rapport au champ tournant et ce glissement dépend de la charge. [6]

Le rotor perçoit donc un champ glissant à la vitesse relative :

$$\Omega_s = \Omega_s - \Omega \;\Rightarrow\; \omega_{gl} = \omega_s - \omega \qquad \text{(II.2)}$$

Avec $\Omega_{gl} = \omega_{gl}/p$

Il en résulte donc la création d'une f.é.m. induite dans les bobinages rotoriques avec la Pulsationω_{gl}.

Le glissement g est défini par : $g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} = \frac{\omega_{gl}}{\omega_s}$

II.5.3.Caractéristique technique de moteur [2]

Type	KA 1000 SS/4
Degré de protection	IP 55
Puissance nominale	3 MW
Tension nominale	6.3 KV
Fréquence	50 Hz
Intensité nominale	330 A
Cos φ valeur nominale	0,86
Rendement à 4/4 charge	96,8%
Couplage	Etoile
Vitesse	1493 tr/m

Tableau 2 : les caractéristiques techniques de moteur.

II.6. Modélisation de moteur asynchrone

Modéliser consiste à mettre en équations les différents paramètres d'un système. A l'issue de cette opération on se trouve au problème suivant :

Plus le modèle se rapproche de la réalité, plus il devient complexe et demande des moyens de calcul très importants, par contre si le système est simplifié, les calculs deviennent faciles mais on s'éloigne de la réalité. Un choix judicieux consiste à idéaliser la machine et par conséquent garder les phénomènes les plus importants et négliger les phénomènes secondaires. Il est donc important que le modèle soit utilisable aussi bien en régime statique qu'en régime dynamique. Pour ce faire nous devons avoir recours à des hypothèses simplificatrices sur lesquelles se basera notre étude. [3]

II.6.1.Hypothèses simplificatrices

La machine asynchrone étant un système dynamique non linéaire, il est nécessaire de disposer d'un modèle représentant fidèlement son comportement au niveau de ses modes électrique, électromécanique et mécanique. Dans la littérature de la commande, le modèle de park est généralement choisi. En effet, c'est une solution qui tient compte des hypothèses simplificatrices intrinsèques au système. [4]

- Entrefer constant.
- Effet d'encochage négligeable.
- Le circuit magnétique non saturé et à une perméabilité constante ainsi que l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeable.
- Effet peau négligeable.
- Le bobinage triphasé et symétrique et la répartition de la force magnétomotrice dans l'entrefer est sinusoïdale.

II.6.2.Mise en équation de la machine asynchrone

La MAS triphasée, représentée schématiquement par la figure (II.6), est munie de six enroulements :

- Trois enroulements (A, B, C) fixes décalés de 120° dans l'espace et traversés par trois courants variables.
- Trois enroulements (a. b .c) fixes décalés de 120° ces enroulements sont en court-circuit avec une tension nulle à leurs bornes.

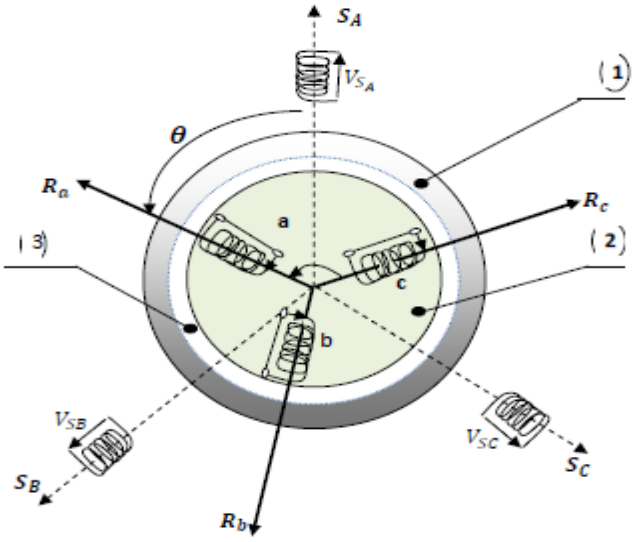


Figure (II.6) : Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée (1) partie fixe: Stator. (2) Partie mobile : Rotor. (3) Entrefer constant.

L'angle θ indique la position du rotor par rapport au stator.

Les équations des tensions des trois phases statoriques et rotoriques s'écrivent, en tenant compte des hypothèses simplificatrices cité précédemment :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \\ V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \emptyset_{sa} \\ \emptyset_{sb} \\ \emptyset_{sc} \\ \emptyset_{ra} \\ \emptyset_{rb} \\ \emptyset_{rc} \end{bmatrix} \quad \text{(II.3)}$$

II.6.3.Equation électriques

Par application de la loi de Faraday à chaque enroulement on a :

$$\begin{Bmatrix} V_s = R_s + \frac{d\emptyset_s}{dt} \\ V_r = R_r + \frac{d\emptyset_r}{dt} \end{Bmatrix} \quad \text{(II.4)}$$

Avec :

$$\begin{cases} V_s = [V_{sa}\ V_{sb}\ V_{sc}]^T, i_s = [i_{sa}\ i_{sb}\ i_{sc}]^T, \emptyset_s = [\emptyset_{sa}\ \emptyset_{sb}\ \emptyset_{sc}]^T \\ V_r = [V_{ra}\ V_{rb}\ V_{rc}]^T, i_r = [i_{ra}\ i_{rb}\ i_{rc}]^T, \emptyset_r = [\emptyset_{ra}\ \emptyset_{rb}\ \emptyset_{rc}]^T \end{cases} \quad \text{(II.5)}$$

Avec :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \emptyset_{sa} \\ \emptyset_{sb} \\ \emptyset_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{(II.6)}$$

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \emptyset_{ra} \\ \emptyset_{rb} \\ \emptyset_{rc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad \text{(II.7)}$$

Les matrices des résistances statoriques et rotoriques de la MAS sont données par :

$$R_s = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \qquad R_r = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad \text{(II.8)}$$

II.6.4.Equations magnétiques

Les équations des flux en fonction des courants s'obtiennent à partir de la matrice des inductances [L (θ)], celle-ci comporte 36 coefficients non nuls :

$$\begin{bmatrix} \emptyset_{sa} \\ \emptyset_{sb} \\ \emptyset_{sc} \\ \emptyset_{ra} \\ \emptyset_{rb} \\ \emptyset_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ps} & m_{ss} & m_{ss} & m_1 & m_3 & m_2 \\ m_{ss} & L_{ps} & m_{ss} & m_2 & m_1 & m_3 \\ m_{ss} & m_{ss} & L_{ps} & m_3 & m_2 & m_1 \\ m_1 & m_2 & m_3 & L_{pr} & m_{rr} & m_{rr} \\ m_3 & m_1 & m_2 & m_{rr} & L_{pr} & m_{rr} \\ m_2 & m_3 & m_1 & m_{rr} & m_{rr} & L_{pr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad \text{(II.9)}$$

Avec :

$$\begin{cases} m_1 = m_{sr}\cos(\theta) \\ m_2 = m_{sr}\cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ m_3 = m_{sr}\cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad \text{(II.10)}$$

Les hypothèses que nous avons présentées précédemment, conduisent à des relations linéaires entre le flux et les courants. Elles sont exprimées sous forme matricielles comme suit:

$$\begin{cases} \emptyset_s = L_{ss}I_s + M_{sr}I_r \\ \emptyset_r = M_{rs}I_s + L_{rr}I_r \end{cases} \quad \text{(II.11)}$$

En raison de la symétrie de la machine, on a :

$$M_{rs} = {M_{sr}}^T$$

$$M_{rs} = {M_{sr}}^T = M_0 \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad \text{(II.12)}$$

Les différentes matrices d'inductances s'écrivent :

$$L_{ss} = \begin{bmatrix} L_s & m_s & m_s \\ m_s & L_s & m_s \\ m_s & m_s & L_s \end{bmatrix} \quad L_{rr} = \begin{bmatrix} L_r & m_r & m_r \\ m_r & L_r & m_r \\ m_r & m_r & L_r \end{bmatrix} \quad \text{(II.13)}$$

Finalement on obtient le modèle de la machine asynchrone triphasée ci-dessous :

$$\begin{cases} V_s = R_s I_s + \frac{d(L_{ss}I_s + M_{sr}I_r)}{dt} \\ V_r = R_r I_r + \frac{d(M_{rs}I_s + L_{rr}I_r)}{dt} \end{cases} \quad \text{(II.14)}$$

II.6.5.Equation mécanique

La relation fondamentale de la dynamique permet d'écrire :

$$J\frac{d\Omega}{dt} + f_v\Omega = C_{em} + C_r \quad \text{(II.15)}$$

Avec :

C_r : Couple de charge.

C_{em} : Couple électromagnétique.

f_v : Coefficient de frottement.

J : Moment d'inertie.

II.6.6.Modèle de la machine dans le système d'axe (d,q)

L'équation (II.7) des inductances mutuelles étant à éléments non constants et les coefficients des équations (II.8) sont variables et la résolution analytique de ce système d'équations se heurte à des difficultés insurmontables particulièrement, lors de l'étude des phénomènes transitoires. On utilise alors des transformations mathématiques qui permettent de décrire le comportement de la machine à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants. Les transformations utilisées doivent conserver la puissance instantanée et la

réciprocité des inductances mutuelles. Ceci permet d'établir une expression du couple électromagnétique dans le repère correspondant au système transformé et qui reste variable pour la machine réelle. [3]

II.6.6.1. Transformation de Park

La transformée de Park, est un outil mathématique utilisé en électrotechnique afin de réaliser un changement de repère dans un système d'axe biphasé ou triphasé. Elle est généralement utilisée pour passer d'un repère «fixe» lié au stator d'une machine électrique à un repère tournant lié à son rotor ou au champ magnétique. Une matrice $P(\theta_{obs})$ dite de park, permet d'assurer ce passage :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ \mathrm{X_q} \\ X_0 \end{bmatrix} = P(\theta_{obs}) \begin{bmatrix} X_a \\ \mathrm{X_b} \\ X_c \end{bmatrix} \tag{II.16}$$

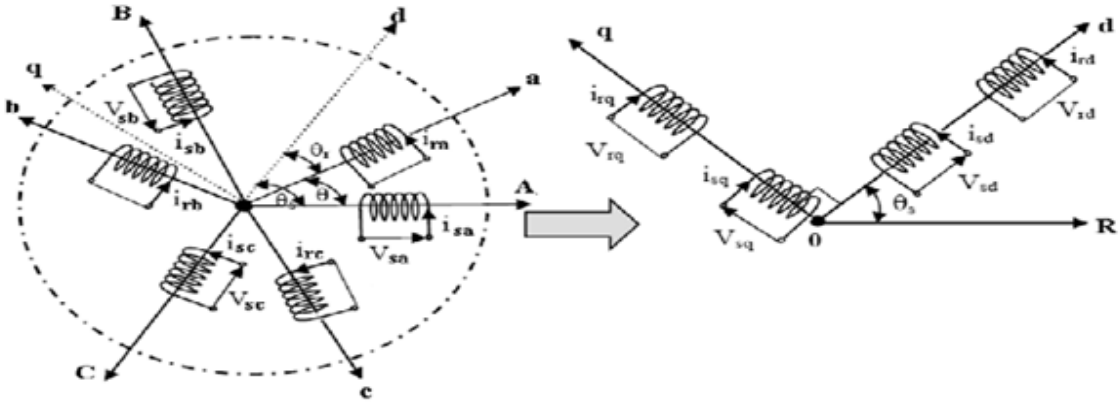
Avec

$$P(\theta_{obs}) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \tag{II.17}$$

La matrice inverse est donnée par :

$$[P(\theta_{obs})]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \tag{II.18}$$

La transformation de Park consiste donc à transformer les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalent (voir figure (II.7**)**).



a) modèle triphasé réel b) modèle triphasé équivalent

Figure (II.7) : Représentation du modèle de la machine asynchrone triphasée et biphasée équivalente.

La transformation des grandeurs statoriques et rotoriques est définie par :

$$\begin{cases} [i_{dqo}] = [P(\theta_{obs})][i_{abc}] \\ [v_{dqo}] = [P(\theta_{obs})][v_{abc}] \\ [\emptyset_{dqo}] = [P(\theta_{obs})][\emptyset_{abc}] \\ [i_{abc}] = [P(\theta_{obs})]^{-1}[i_{dqo}] \\ [v_{abc}] = [P(\theta_{obs})]^{-1}[v_{dqo}] \\ [\emptyset_{abc}] = [P(\theta_{obs})]^{-1}[\emptyset_{dqo}] \end{cases} \quad \text{(II.19)}$$

- **Equations électriques :**

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\emptyset_{ds}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt}\emptyset_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\emptyset_{qs}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt}\emptyset_{ds} \\ 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\emptyset_{dr}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt}\emptyset_{qr} \\ 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\emptyset_{qr}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt}\emptyset_{dr} \end{cases} \quad \text{(II.20)}$$

- **Equation magnétiques :**

$$\begin{cases} \emptyset_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{ds} \\ \emptyset_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qs} \\ \emptyset_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{dr} \\ \emptyset_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qr} \end{cases} \quad \text{(II.21)}$$

Avec :

L_s : Inductance propre cyclique d'une phase stator.
L_r : Inductance propre cyclique d'une phase rotor.
M : Inductance mutuelle cyclique d'une phase stator et d'une phase rotor. [3]

II.6.7.Choix du référentiel

L'utilisation de la transformation de Park nécessite le choix d'un référentiel qui permet de simplifier au maximum les expressions analytiques du modèle.

a. Référentiel lié au stator :

La position des axes (d, q) par rapport aux axes statoriques et rotoriques est la suivante :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \qquad \text{et} \qquad \frac{d\theta_r}{dt} = -\omega_r$$

Ce référentiel est choisi dans le cas de variations importantes de la vitesse de rotation associés ou non à des variations de la fréquence d'alimentation.

b. Référentiel lié au rotor :

Ce type de référentiel est caractérisé par les relations suivantes :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_r \qquad \text{et} \qquad \frac{d\theta_r}{dt} = 0$$

Ce choix est intéressant dans l'étude des régimes transitoires ou la vitesse de rotation est constante.

c. Référentiel lié au champ tournant :

La position des axes d, q par rapport aux axes statoriques est la suivante :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \qquad \text{et} \qquad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega_r = g\omega_s$$

On choisit ce référentiel lorsqu'on veut étudier les problèmes où la fréquence d'alimentation est constante.

Pour ce présent travail, nous avons choisi le référentiel lié au champ tournant parce qu'il est mieux adapté à notre étude.

Les équations électriques deviennent :

Stator
$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\emptyset_{ds}}{dt} - \omega_s \emptyset_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\emptyset_{qs}}{dt} + \omega_s \emptyset_{ds} \end{cases} \quad \text{(II.22)}$$

Rotor
$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\emptyset_{dr}}{dt} - \omega_r \emptyset_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\emptyset_{qr}}{dt} + \omega_r \emptyset_{dr} \end{cases} \quad \text{(II.23)}$$

II.6.8.Equation de puissance et de couple

Sachant que la transformation de Park, conserve la puissance instantanée, cette dernière sera donnée par :

$$P_i = V_s{}^t I_s = V_{ds} i_{sa} + V_{ds} i_{sb} + V_{ds} i_{sc} = V_s i_{qs} + V_{qs} i_{sb} + V_{qs} i_{sc}$$

$$\Longrightarrow P_i = \left[R_s i_{ds} + \frac{d\emptyset_{ds}}{dt} - \omega_s \emptyset_{qs}\right] I_{ds} + \left[V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\emptyset_{qs}}{dt} + \omega_s \emptyset_{ds}\right] I_{qs} \quad \text{(II.24)}$$

Après calcul, on trouve :

$$P_i = \left[R_s {I_{ds}}^2 + R_s {I_{qs}}^2\right] + \left[\frac{d\emptyset_{ds}}{dt} I_{ds} + \frac{d\emptyset_{qs}}{dt} I_{qs}\right] + \left[\omega_s \left(\emptyset_{ds} I_{qs} - \emptyset_{qs} I_{ds}\right)\right] \quad \text{(II.25)}$$

Le premier terme est facilement identifiable aux pertes joules, le second terme correspond à la puissance électromagnétique stockée. Le troisième terme représente donc la puissance électrique transformée en puissance mécanique.

$$P_{em} = C_{em}\Omega = \omega_s \left(\emptyset_{ds} I_{qs} - \emptyset_{qs} I_{ds}\right)$$

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{\omega_s}{\Omega} \left(\emptyset_{ds} I_{qs} - \emptyset_{qs} I_{ds}\right)$$

$$C_{em} = P\left(\emptyset_{ds} I_{qs} - \emptyset_{qs} I_{ds}\right)$$

En remplaçant par les expressions des flux : $\emptyset_{ds}, \emptyset_{qs}$

$$C_{em} = \frac{PM}{L_r} \left(\emptyset_{ds} I_{qs} - \emptyset_{qs} I_{ds}\right) \quad \text{(II.26)}$$

II.6.9.Modèle de la machine asynchrone en régime permanent

Si les tensions d'alimentation sont triphasées équilibrées, on peut écrire :

$$\begin{cases} V_{as} = V_s \cos(w_s t) \\ V_{bs} = V_s \cos(w_s t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_{cs} = V_s \cos(w_s t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad \text{(II.27)}$$

Choisissons de fixer le repère *(d.q)* au champ tournant.

Notons $w_s = \theta_s$ la pulsation statorique (on est bien en régime permanent sinusoïdale).De même, nous noterons $w_r = \theta_r$ la pulsation rotorique et $w = w_s - w_r = \theta = p\Omega$ la pulsation mécanique.

$$\begin{cases} V_{ds} = V_s \cos(w_s t - \theta_s) \\ V_{qs} = V_s \sin(w_s t - \theta_s) \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{ds} = V_s \\ V_{qs} = 0 \end{cases}$$

Système d'équation en introduisant la on peut réécrire tout la notation complexe :

$$\overline{X} = x_{ds} + j x_{qs}$$

$$\overline{V_s} = V_{ds} + jV_{qs} = -R_s\left(I_{ds} + jI_{qs}\right) - \frac{d}{dt}\left(\emptyset_{ds} + j\emptyset_{qs}\right) - w_s\left(\emptyset_{ds} + j\emptyset_{qs}\right)$$

$$\overline{V_s} = -R_s\left(I_{ds} + jI_{qs}\right) - \frac{d}{dt}\left(\emptyset_{ds} + j\emptyset_{qs}\right) - w_s\left(\emptyset_{ds} + j\emptyset_{qs}\right)$$

D'où :

$$\overline{V_s} = -R_s\overline{I_s} + \frac{d}{dt}\overline{\emptyset}_s + jw_s\overline{\emptyset}_s$$

$$\overline{V_s} = -R_s\overline{I_s} + jw_s\overline{\emptyset}_s$$

Mais comme on est en régime permanent :

$$\overline{V_r} = R_r\overline{I_r} + jw_r\overline{\emptyset}_r$$

Avec : $w_r = gw_s$

$$\begin{cases} \overline{V_s} = -R_s\overline{I_s} + jw_s\overline{\emptyset}_s \\ 0 = R_s\overline{I_s} + jgw_s\overline{\emptyset}_s \end{cases}$$

Et:

$$\begin{cases} \overline{\emptyset}_s = L_s\overline{I_s} + M\overline{I_r} \\ \overline{\emptyset}_r = L_r\overline{I_r} + M\overline{I_s} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \overline{V_s} = -R_s\overline{I_s} + jL_s w_s\overline{I_s} + jMw_s\overline{I_r} \\ 0 = \frac{R_r}{g}\overline{I_r} + jL_r w_s\overline{I_r} + jMw_s\overline{I_s} \end{cases} \quad \textbf{(II.28)}$$

On aboutit alors au schéma de la Figure (II.8).

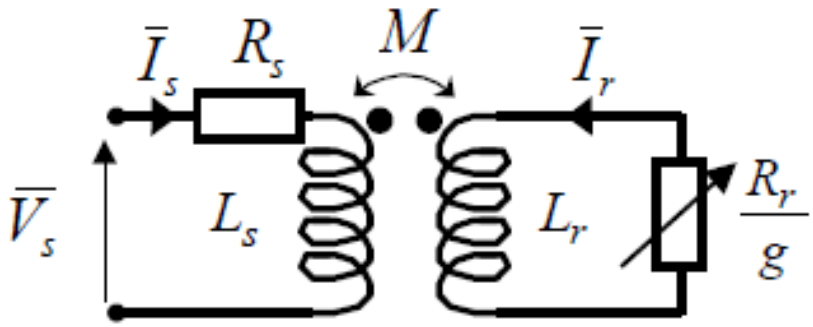


Figure (II.8) : *Schéma par phase en régime permanent.*

On peut ramener ce schéma au stator avec les fuites magnétiques totalisées au rotor $(w_s N_r)$ figure (II. 9).

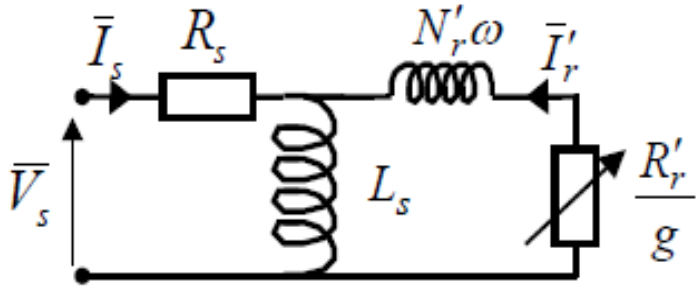


Figure (II.9) : *Schéma équivalent au stator avec les fuites magnétiques totalisées au rotor.*

$$N_r = L_r\sigma = L_r - \frac{M^2}{L_s}$$

$$\begin{cases} N'_r = N_r\left(\frac{L_s}{M}\right)^2 \\ R'_r = R_r\left(\frac{L_s}{M}\right)^2 \end{cases}$$

$$\overline{I'_r} = \overline{I_r}\left(\frac{M}{L_s}\right)$$

Alors, en partant des équations du schéma par phase de la Figure (II 7), on peut écrire :

$$\overline{V_s} = R_s\overline{I_s} + jL_s w_s\overline{I_s} + jL_s w_s\overline{I'_r} = R_s\overline{I_s} + jL_s w_s\left(\overline{I_s} + \overline{I'_r}\right)$$

$$0 = \left(\frac{R_r}{g}\overline{I'_r} + jL_s w_s\overline{I_r} + jMw_s\overline{I_s}\right)\frac{L_s}{M} = \frac{R_r}{g}\frac{L_s}{M}\overline{I_r} + jL_r w_s\frac{L_s}{M}\overline{I'_r} + jL_s w_s\left(\overline{I_s} + \overline{I'_r}\right)$$

$$0 = \frac{R_r}{g}\left(\frac{L_s}{M}\right)^2\frac{M}{L_s}\overline{I'_r} + jL_r w_s\left(\frac{L_s}{M}\right)^2\frac{M}{L_s}\overline{I'_r} - jL_s w_s\overline{I'_r} + jL_s w_s\left(\overline{I_s} + \overline{I'_r}\right)$$

$$0 = \frac{R'_r}{g}\overline{I'_r} + jN'_r w_s\overline{I'_r} + jL_s w_s\left(\overline{I_s} + \overline{I'_r}\right)$$

On obtient donc les équations du schéma de la Figure (II 6):

$$\begin{cases} \overline{V_s} = R_s\overline{I_s} + jL_s w_s\left(\overline{I_s} + \overline{I'_r}\right) \\ 0 = \frac{R'_r}{g}\overline{I'_r} + jN'_r w_s\overline{I'_r} + jL_s w_s\left(\overline{I_s} + \overline{I'_r}\right) \end{cases} \quad \textbf{(II.29)}$$

II.7. Simulation du modèle

A partir du modèle de simulation, on a effectué une simulation numérique, les grandeurs réelles sont déduits par application de la transformation de Park inverse, la machine est alimentée par un réseau triphasés équilibré de valeur efficace 6300 V, le repère (d, q) est lié au champ tournant, et les courants statoriques, les flux rotoriques sont présentés dans le repère (d,q). [2]

La figure **(**II.10) présente le schéma bloc de simulation de la machine asynchrone, montrant en détail le passage entre les grandeurs réelles et les grandeurs biphasées.

La machine est couplée directement au réseau, on a effectué deux essais typiques :

- Démarrage à vide de la machine asynchrone.
- Démarrage à vide puis application d'une charge.
- Les résultats de simulation sont donnés aux figures **(**II.11) et **(**II.12).

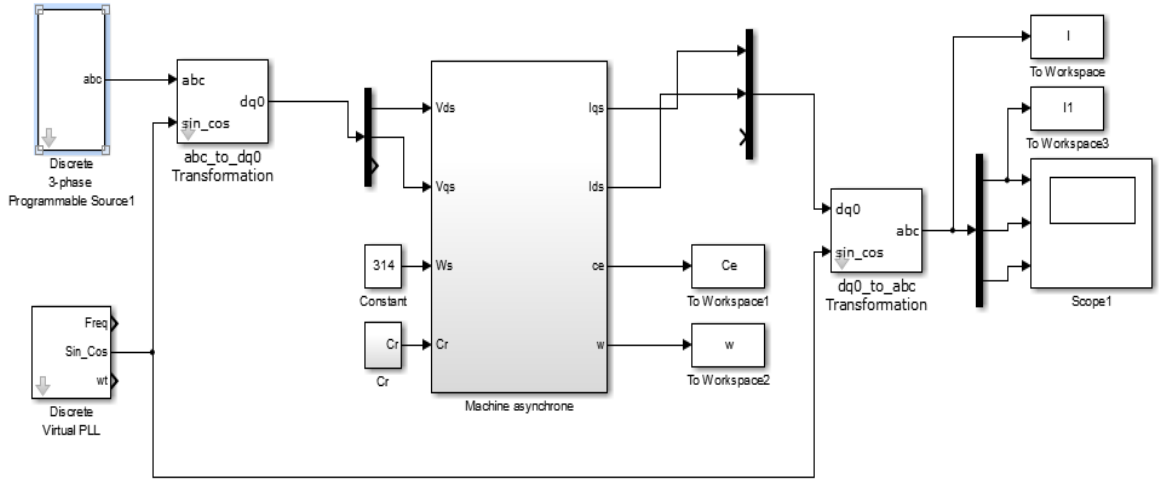
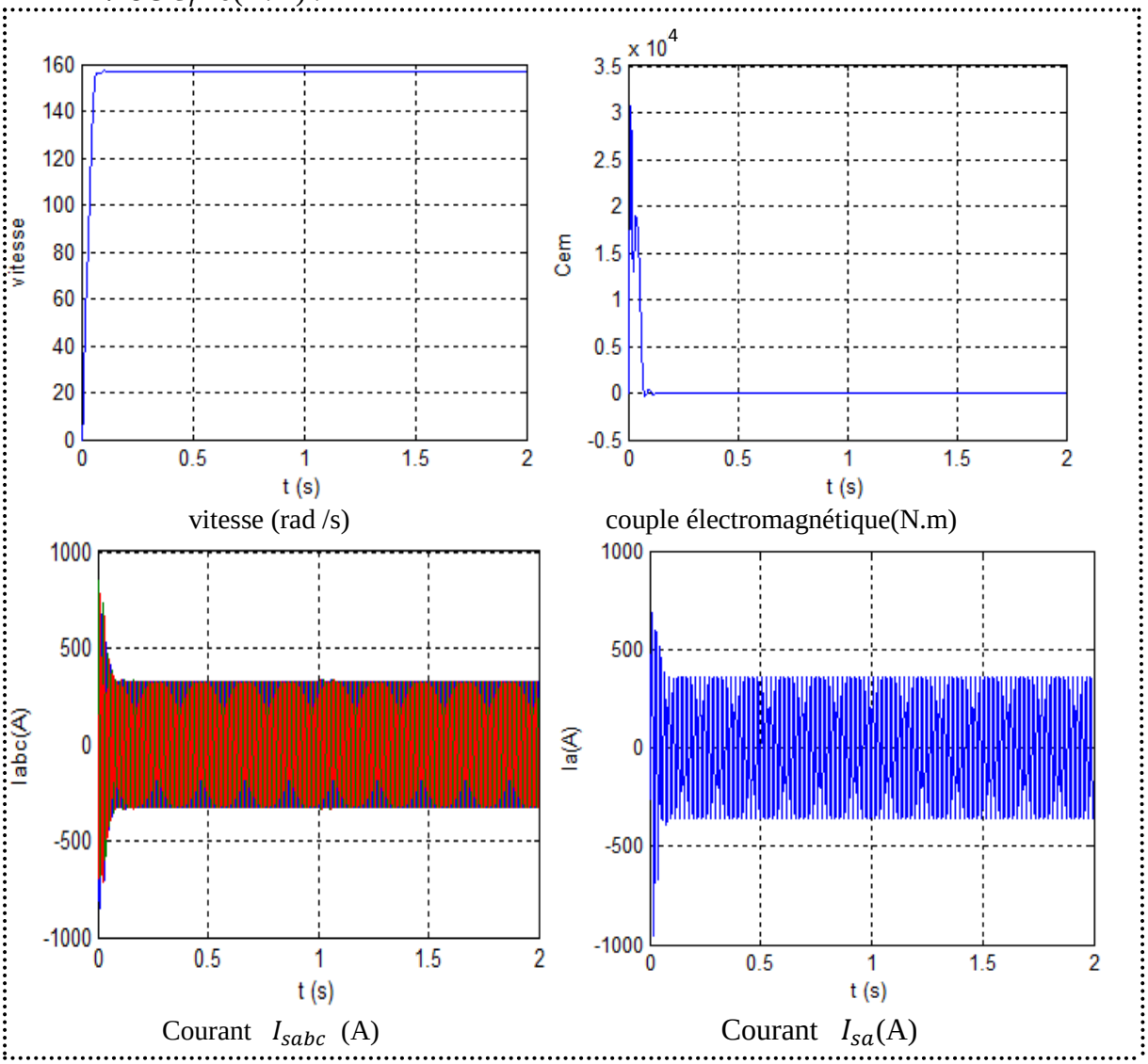


Figure (II.10) : simulation d'une machine asynchrone.

- **Avide** C_r=0(N.m) :

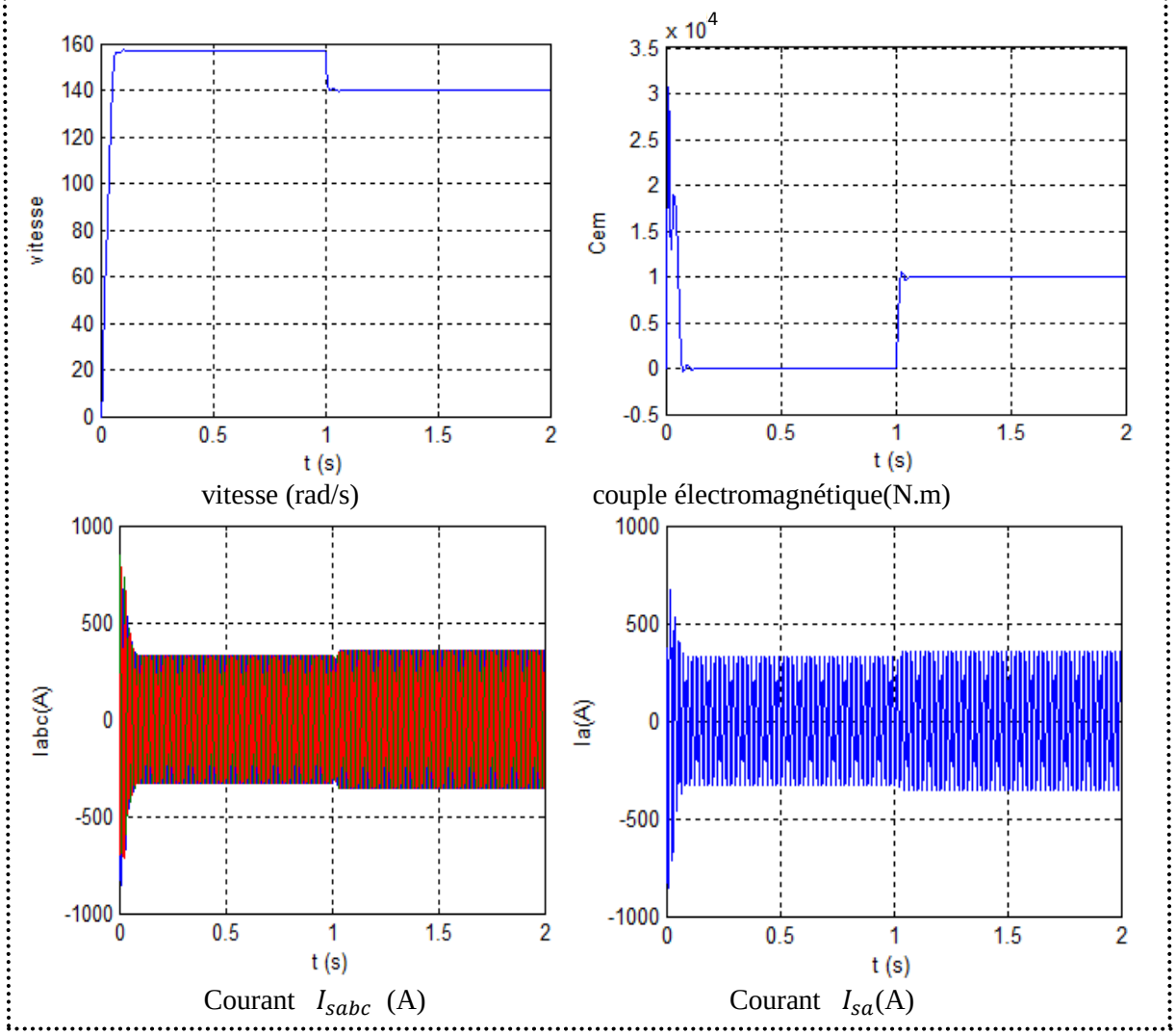


vitesse (rad /s) couple électromagnétique(N.m)

Courant I_{sabc} (A) Courant I_{sa}(A)

Figure (II.11) : Réponse de la machine en fonctionnement à vide C_r=0(N.m).

- **En charge** C_r=10*10^3 (N.m) :



vitesse (rad/s) couple électromagnétique(N.m)

Courant I_{sabc} (A) Courant I_{sa}(A)

Figure (II.12): Réponse de la machine en fonctionnement à vide C_r=10*10^3 (N.m).

II.7.1. Interprétation des résultats

- **Avide** C_r=0 (N.m) :
  - La courbe de la vitesse présente au démarrage un accroissement presque linéaire, après un temps d'environs 0.08 (sec) la vitesse de rotation stabilise à une valeur constante proche à la vitesse de synchronisme 1500 (tr/min) puisque le moteur possède 2 paires de pole.
  - La courbe de couple présente aux premiers instants du démarrage une pulsation très importante, après 0.08 (Sec) le couple tend vers zéro.
  - Le courant statorique est fortement impulsif au démarrage (pour créer un fort couple), puis se stabilise à une valeur deux fois inférieure à celle du démarrage.
- **En charge** C_r=10*10^3 (N.m) :
  - La vitesse diminuer lorsqu'en applique un couple résistive.
  - On a appliqué à l'arbre de la machine asynchrone un couple résistant C_r=10*10^3 (N.m) à l'instant t=1 (Sec) Nous constatons que.

- Le couple électromagnétique présente un pic important et des oscillations. Lors de L'application d'une charge de $10*10^3$ (N.m).à l'instant t=1(s) nous observons que le couple électromagnétique se stabilise à sa valeur de $10*10^3$ (N.m).
- Les courants statoriques changent selon la charge appliquée à l'arbre du moteur.

II.8. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter une formation des modèles pour la machine asynchrone triphasé associée à sa source d'alimentation.

Nous avons établi un modèle mathématique de la machine asynchrone triphasé par un réseau triphasé.

La modélisation de la machine asynchrone à montré que :

- L'application de la transformation de park a permis de réduire le système électrique de la machine de six à quatre équations.
- Il existe un fort couplage entre le couple électromagnétique et la vitesse de rotation et le courant.

Chapitre III

Etude des cycloconvertisseurs

III.1. Introduction

Les variateurs de type «convertisseurs de fréquence» sont utilisés pour alimenter les moteurs asynchrones. Ils permettent essentiellement de faire varier la vitesse de rotation de ces moteurs, mais aussi d'obtenir des caractéristiques de fonctionnement du moteur radicalement différentes de celles obtenues lors de l'utilisation normale à amplitude et fréquence constantes (moteurs alimentés en direct par la tension du réseau).

La vitesse de rotation du moteur varie en fonction de la fréquence de la tension d'alimentation. Les variateurs utilisent cette caractéristique pour obtenir une régulation en vitesse. L'évolution de l'électronique de puissance et de la vitesse des processeurs a permis de développer de très bons systèmes de contrôle des caractéristiques de fonctionnement.

Commençons par rappeler le fonctionnement et les caractéristiques des moteurs asynchrones. Le stator immobile, défiler un champ électrique tournant à la vitesse,n_0 ce qui donne naissance à un courant dans les barreaux court-circuités du rotor. L'action du champ magnétique sur ce courant induit une force qui en traîne le rotor dans le sens de ce champ tournant. La vitesse du rotor augmente alors jusqu'à une vitesse proche mais inférieure à la vitesse de synchronisme .En effet, le rotor ne peut atteindre la vitesse du champ tournant, vu qu'à vitesse égale aucun courant n'est induit dans les barre aux du rotor tous les développements des variateurs de vitesse se basent sur ce principe. On voit en effet que la vitesse du rotor, qui correspond à la vitesse de rotation de l'arbre du moteur, dépend directement de la fréquence de la tension d'alimentation.

III.2. Présentation de cycloconvertisseur

III.2.1. Définition

Un cycloconvertisseur est un changeur direct de fréquence ou l'on obtient chacune des tensions de sortie à l'aide du groupement en antiparallèle de deux redresseur chaque tension de sortie est constituée d'un échantillonnage convenable des tensions d'entrée.

III.2.2. Avantages, limitation, inconvénients du cycloconvertisseur

Un cycloconvertisseur alimenté par le réseau triphasé de fréquence, f nécessite deux redresseurs à thyristors pour générer chacune des tensions de sortie de fréquence f' Par la commande du retard au déblocage des thyristors, on approxime chacune des tensions de sortie par des portions des tensions d'entrée. Le courant d'une phase de sortie est fourni par un redresseur lorsqu'il est positif, par l'autre lorsqu'il est négatif.

Les **avantages** découlent du fait qu'il s'agit d'un convertisseur direct donc sans élément intermédiaire de stockage de l'énergie, du fait qu'il travaille en commutation naturelle donc qu'on peut utiliser des thyristors ordinaires, du fait qu'il s'agit d'un groupement de redresseurs donc qu'on bénéficie de l'expérience acquise sur le plus classique des convertisseurs.

De par son principe même, le cycloconvertisseur est réversible, il permet une variation continue de la fréquence et de la valeur des tensions de sortie.

La **limitation** de ses possibilités porte sur la fréquence.

Pour éviter la présence d'harmoniques particulièrement gênants, on doit limiter la fréquence de sortie à environ $0.25\,f$, $0.33\,f$ ou $0.60\,f$ suivant qu'on utilise des redresseurs d'indice de pulsation égal à 3, 6 ou 12.

Les **inconvénients** du cycloconvertisseur sont surtout :

- le grand nombre de thyristors nécessaires. d'ordinaire on utilise des redresseurs d'indice 6 il faut donc 12 thyristors pour une sortie monophasée, 36 pour une sortie triphasée.
- la consommation de puissance réactive. Comme dans tous les redresseurs fonctionnant avec un fort retard au déblocage des semi-conducteurs, la consommation de puissance réactive à la fréquence fondamentale est importante.
- les harmoniques des tensions de sortie et des courants d'entrée. La valeur et le nombre de ces harmoniques sont à première vue un peu ''effrayants''. [5]

III.3. Principe de fonctionnement cycloconvertisseur

III.3.1. Rappel sur les Semi-conducteur

Pour modifier, avec un bon rendement, la présentation de l'énergie électrique, les convertisseurs statiques utilisent des semi-conducteurs de puissance fonctionnant en commutation.

Faire fonctionner des semi-conducteur en commutation signifie qu'on leur demande l'opérer par tout ou rien, comme des interrupteurs mécaniques. On utilise d'ailleurs pour ces composants le vocabulaire des interrupteurs mécaniques et, dans les schémas de principe, on les représente par des interrupteurs c'est ainsi qu'on trouve :

- Un composant non commandé : la diode
- Un composant commandé seulement à la fermeture : le thyristor
- Des composants commandés à la fermeture et à l'ouverture :
  - ✓ Le thyristor à ouverture commandée(GTO).
  - ✓ Le transistor bipolaire (BJT).
  - ✓ Le transistor (MOS) de puissance.
  - ✓ Le transistor bipolaire à grille isolée(IGBT).

- **La diode :**

La diode est un semi-conducteur non contrôlé comportant deux régions P (anode) et N (cathode) et qui laisse passer le courant que dans un seul sens, de l'anode vers la cathode.

Elle conduit quand l'anode est à une tension plus positive que celle de la cathode : elle se comporte alors comme un interrupteur fermé.

Elle bloque le courant et se comporte comme un interrupteur ouvert, si la tension d'anode devient moins positive que celle de la cathode.

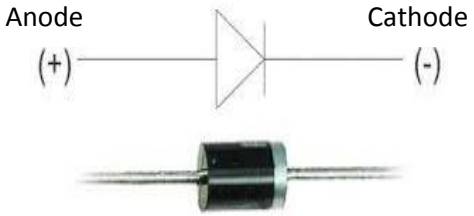


Figure (Ⅲ.1) : diode.

- **Le transistor :**

C'est un semi-conducteur bipolaire contrôlé constitué de trois régions alternées P-N-P ou N-P-N. IL ne laisse passer le courant que dans un seul sens : de l'émetteur vers le collecteur en technologie P-N-P, du collecteur vers l'émetteur en technologie N-P-N.

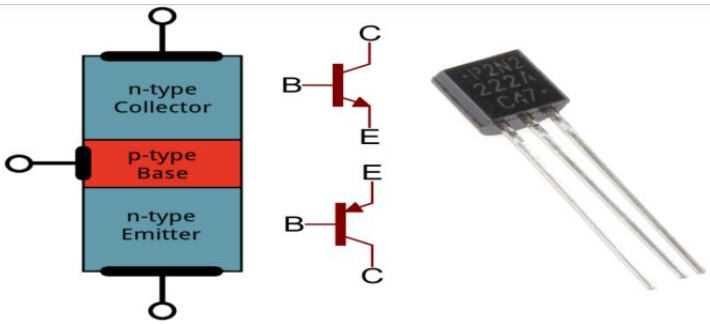


Figure (III.2) : transistor.

- **Le thyristor :**

Le thyristor est un interrupteur de puissance au silicium formé de plusieurs couches, Il est réversible en tension et supporte des tensions anode/cathode V_{AK} aussi bien positives que négatives. Il n'est pas réversible en courant (unidirectionnelle en courant) et ne permet que des courants i positifs, c'est à dire dans le sens anode cathode à l'état passant.

La figure (III.3) représente trois jonctions en série :

Jk : jonction cathode.
Jc : jonction de commande.
Ja : jonction anode.

Avec quatre couches de dopages alternés et possédant trois électrodes:

- La ***couche de cathode*** de type N est mince (autour de 20 µm) et fortement dopée. Elle est reliée par métallisation à l'électrode de cathode (K en abrégé).
- La ***couche de commande*** de type P est mince (autour de 50 µm) et moyennement dopée. Elle est reliée à l'électrode de gâchette (G en abrégé).
- La ***couche de blocage*** de type N est épaisse (autour de 250 µm) et faiblement dopée.
- La ***couche d'anode*** de type P est mince (autour de 70 µm) et moyennement dopée. Elle est reliée par métallisation à l'électrode d'anode (A en abrégé).

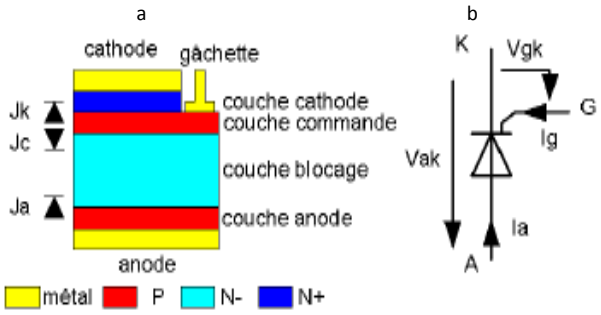


Figure (III.3) : thyristor.

- **Principe de fonctionnement :**

➢ ***Blocage de thyristor* :**

L'une au moins des jonctions PN du thyristor est bloquée :

Sous une tension inverse : la tension anode/cathode V_{AK} est négative et les deux jonctions ***Ja*** et ***Jk*** sont polarisées en inverse ce qui bloquent le courant de fuite à une intensité très faible en raison des différences de dopage entre les 4 couches PNPN. C'est la jonction d'anode qui supporte la plus grande partie de la tension inverse.

Sous une tension directe : la tension anode cathode est positive $V_{AK} > 0$ et le courant de gâchette i_g est nul ou très faible, le thyristor n'est pas amorcé au préalable.

➢ ***Amorçage du thyristor* :**

L'amorçage d'un thyristor est obtenu par différents phénomènes physiques, dans tous les cas l'amorçage rend le thyristor conducteur de l'anode vers la cathode ($i_{AK} > 0$). La tension V_{AK} est alors faible de l'ordre de quelques dixièmes de volts. Dans un amorçage par tension : le courant de gâchette à une intensité i_g nulle. Si la tension V_{AK} dépasse une certaine valeur V_{bo} toujours élevée, il y a amorçage et conduction du thyristor.

- **Caractéristique et limites de fonctionnement :**

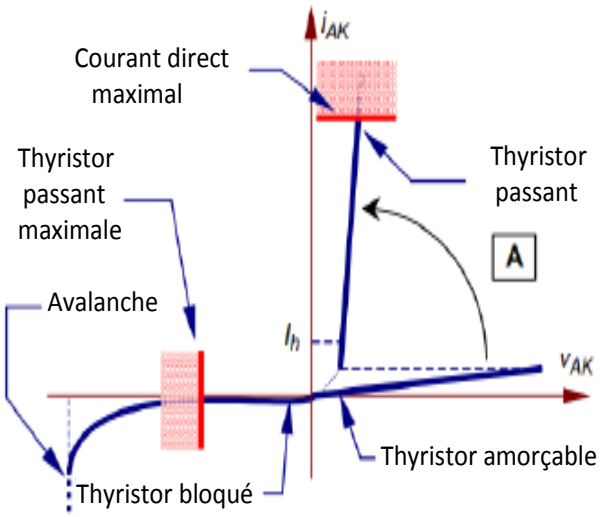


Figure (Ⅲ.4) : caractéristique et limitation de fonctionnement.

- **Circuit de commande du thyristor :**

Le circuit de commande d'un thyristor sert à fournir l'impulsion d'allumage à sa gâchette. Ce circuit doit avoir les caractéristiques suivantes :

- ➢ Fonctionner en source de courant.
- ➢ Fournir une impulsion de courant d'amplitude supérieure à la valeur minimale exigée par le constructeur.
- ➢ Le temps de montée de l'impulsion de courant doit être très court (inferieur à 1µs)
- ➢ La durée de l'impulsion de courant doit être suffisamment longue pour que le courant d'anode la minimal nécessaire eu maintien de thyristor à l'état passant. Dans les convertisseurs à commutation naturelle la durée de l'impulsion est généralement de l'ordre de 500µs.

- Obligation de permettre une isolation galvanique entre le circuit de puissance et la partie de commande.[8]

III.3.2. Rappel sur les redresseurs

Un redresseur tout thyristor, d'indice de pulsation égal à P délivre une tension redressée u_d formée de P portions identiques de sinusoïdes par période T des tensions d'alimentation.

La valeur moyenne U'_d de la tension u'_d est proportionnelle au cosinus de l'angle α de retard au déblocage des thyristors: $U'_d = U_{d0} \cos \alpha$

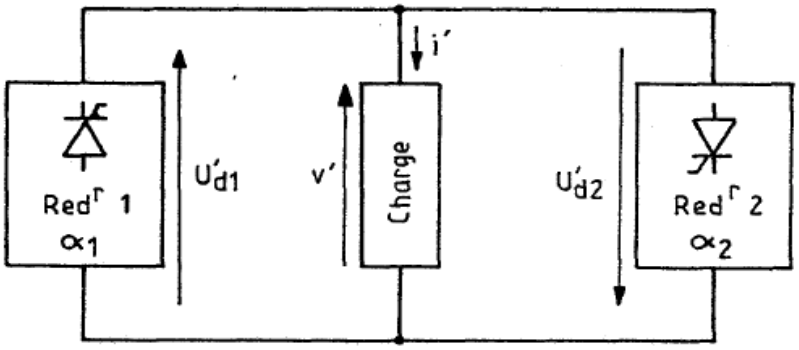


Figure (Ⅲ.5) : tête-bêche.

Si on fait varier α de zéro à $\pi - \beta$,β désignant l'angle de garde, U'_d varie de U'_{d0} à une valeur voisine de $-U'_d$. Mais le courant que peut débiter le redresseur est unidirectionnel.

Pour pouvoir inverser le courant de sortie, on monte en parallèle inverse deux redresseur figure (Ⅲ.5) le premier **Red'1**. Appelé redresseur direct ou « positif », fournit le courant i'au récepteur quand celui-ci demande un courant positif. Le second **Red'2**, appelé redresseur inverse ou « négatif » fournit le courant i' Lorsque celui-ci est négatif.

Pour que la tension v' aux bornes du récepteur ait la même valeur moyenne, quelque soit celui des redresseurs qui l'alimente, on donne aux angles de commande α_1 et $\alpha_2$des deux redresseurs des valeurs complémentaires.

$$\boldsymbol{\alpha_1 + \alpha_2 = \pi}$$

Alors :

$$\boldsymbol{|v'| = U_{d0} \cos \alpha = -U_{d0} \cos \alpha} \qquad (Ⅲ.1)$$

Si la somme des tensions $u'_{d1} + u'_{d2}$ dans le circuit formé par les redresseurs a une valeur moyenne nulle, cette somme présente une composante alternative. Dans les montages avec courant de circulation, on débloque en permanence les thyristors des deux redresseurs, Il en résulte un courant de circulation dont on limite la valeur par des inductances.

Dans les montages sans courant de circulation, on débloque seulement les thyristors du redresseur qui fournit le courant i' demandé par la charge, on inhibe la commande des autres. Une « logique d'inversion » applique ou supprime la commande de l'un ou l'autre des groupes des thyristors suivant le sens de i'. Il en résulte un petit « temps mort », durant lequel aucun redresseur ne débite, lors de chaque passage de i'.par zéro.

III.3.3. Structure de base (cycloconvertiseur)

Les tensions de sortie sont élaborées à partir de portions de sinusoïdes du réseau d'alimentation, un découpage adéquat permettant d'obtenir des signaux ayant une fréquence et une amplitude déterminées tout en présentant un taux d'harmoniques raisonnable. Ainsi, par exemple, à partir d'un réseau triphasé de fréquence, f_0 on peut créer un signal de fréquence $f_0/6$ comme le présente la figure (III.6).

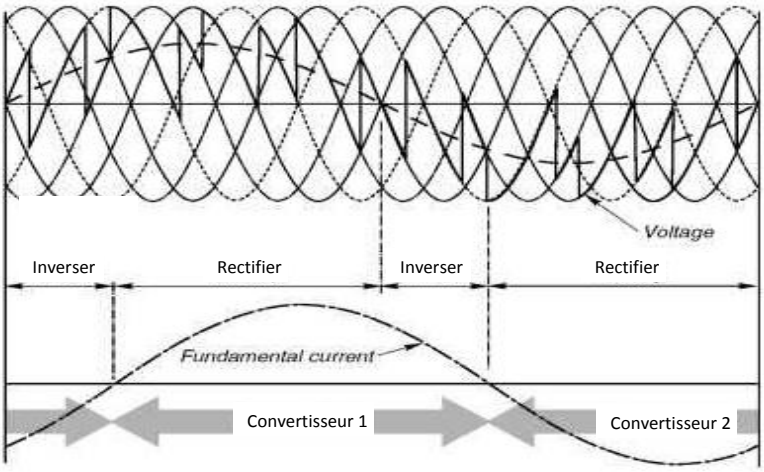


Figure (III.6) : *Forme d'onde crée par un cycloconvertisseur.*

La structure de base d'un cycloconvertisseur est basée sur des montages redresseurs (en effet, il suffit de moduler l'angle de retard à l'amorçage au rythme de la basse fréquence pour obtenir à la sortie des montages une forme de tension analogue à celle représentée ci-dessus).

Il est composé de deux phases, chaque phase est constituée par un groupement en parallèle inverse de deux redresseurs figure (III.7), débitant chacun une alternance de sortie donc on peut dire que les cycloconvertisseurs sont des montages forcement réversibles.

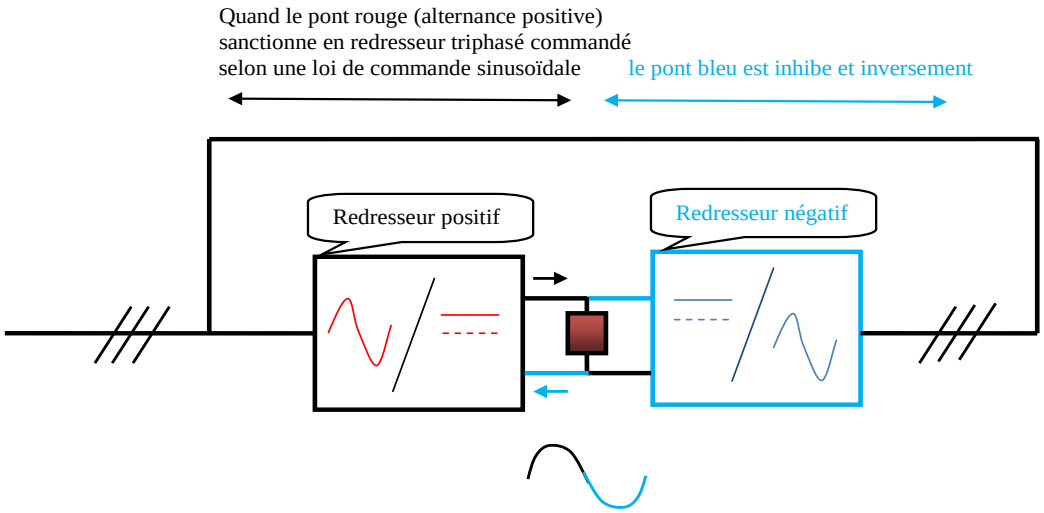


Figure (III.7) : Schéma de base de fonctionnement d'un Cycloconvertisseur.

III.4. Montages utilisées

Les cycloconvertisseurs se classent en fonction de leur indice de pulsation, qui correspond, comme pour les montages redresseurs au nombre de commutations produisant au cours d'une période du réseau d'alimentation. L'élaboration de signaux à faible taux d'harmoniques est d'autant plus facile que cet indice est plus élevé, mais comme le nombre de thyristors augmente également en proportion, les réalisations se rangent essentiellement dans l'une des deux catégories suivantes:[6]

III.4.1. Cycloconvertisseurs monophasé

Par une transformation à partie médiane .Les thyristors Th1 et Th3 forment le groupe convertisseur positif alors que Th2 et Th4 constituent le groupe négatif

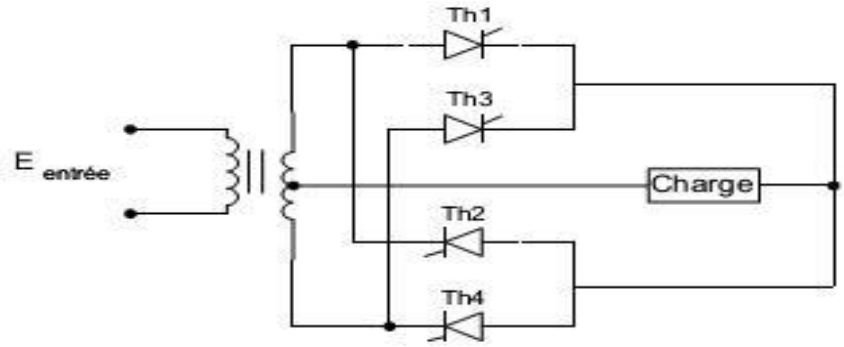


Figure (Ⅲ.8) : Cycloconvertisseurs monophasé.

III.4.2. Cycloconvertisseurs d'indice de pulsation égal à 3

Comme indiqué la figure (Ⅲ.9), ils sont constitués par des associations de redresseurs de type P3. Les inductances dont le rôle est de limiter l'amplitude des courants de circulation, peuvent évidemment être supprimées si on n'utilise pas ce mode de fonctionnement.[8]

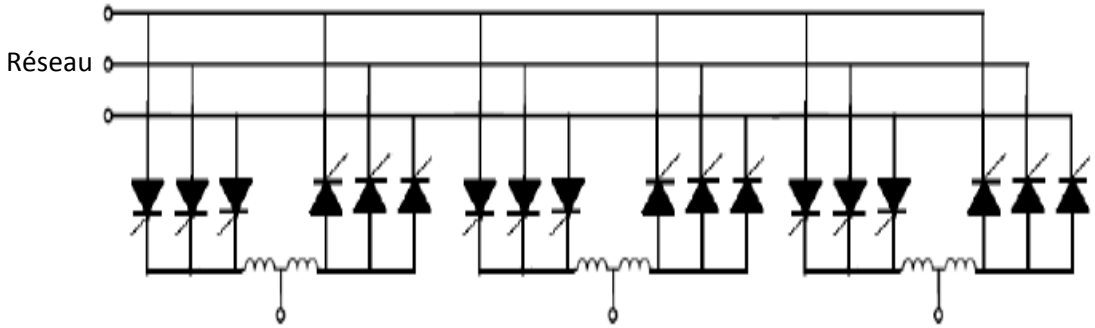


Figure (Ⅲ.9) : Cycloconvertisseurs d'indice de pulsation égal à 3.

III.4.3. Cycloconvertisseurs d'indice de pulsation égal à 6

Ce sont les dispositifs les plus couramment utilisés. Plusieurs schémas sont possibles. Nous ne citerons ici que le montage de base, constitué de redresseurs de type PD3 figure (Ⅲ.10). Nous signalant simplement qu'il n'est utilisable que lorsque la charge est effectivement constituée de trois éléments indépendants en triphasé.[8]

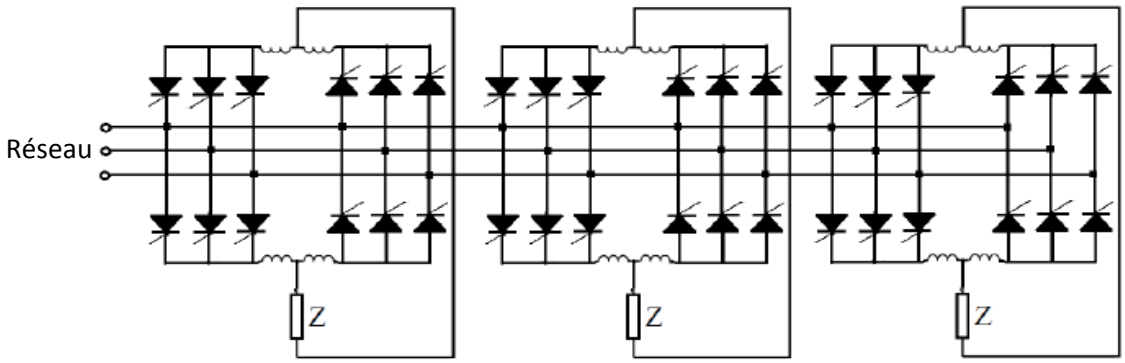


Figure (Ⅲ.10) : Cycloconvertisseur d'indice de pulsation égal à 6.

III.5. Fonctionnement en réglage de phase

Selon les figure (Ⅲ.10) et figure (Ⅲ.11) .a, si les thyristors des groupes positif et négatif conduisent simultanément, alors ils court-circuitent l'alimentation. Pour éliminer cette possibilité, on peut insérer une bobine d'absorption entre les groupes, pour limiter le courant de circulation ou encore aménager l'électronique de commande de manière à ce qu'un groupe ne soit pas amorcé alors que le courant circule dans l'autre. Le fonctionnement sans courant de circulation (ou encore en groupe bloqué) implique l'inhibition de l'amorçage d'un groupe jusqu'à la cessation du courant dans l'autre.

Le montage à indice de pulsation trois représenté à la figure (Ⅲ.12) et les formes d'ondes as souciées aux figure (Ⅲ.13), figure (Ⅲ.14) et figure (Ⅲ.15) permettent d'expliquer aisément le fonctionnement du cycloconvertisseur à groupe bloqué pour diverses charges. La figure (Ⅲ.13) représente les formes d'ondes lorsque le cycloconvertisseur, qui alimente une résistance pure, est réglé pour obtenir une tension (fondamentale) de sortie maximale. La tension sinusoïdale désirée en sortie est représentée à une fréquence telle qu'une période de sortie soit à peine inférieure à cinq périodes d'entrée. Les thyristors sont amorcés à des angles permettant de suivre d'aussi près que possible l'onde sinusoïdale fondamentale. La charge étant une résistance, les tensions obtenues sont nulles par intervalles. La forme d'onde de sortie du groupe négatif diffère de celle du groupe positif parce que, l'onde de sortie n'étant pas générée sur un nombre entier de périodes d'entrée, les alternances successives de sortie commencent à des instants différents relativement aux tensions d'entrée. Les formes d'ondes des courants montrent le grand déséquilibre imposé à l'alimentation.

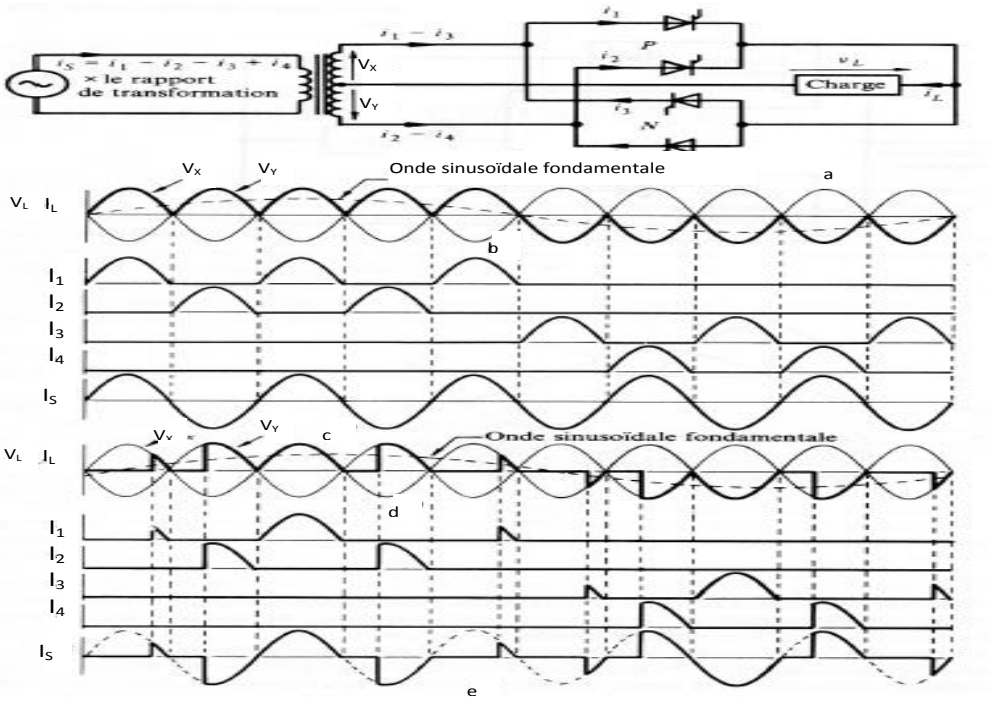


Figure (Ⅲ.11) : Cyclonvertisseur monophasé alimentant une résistance pure.

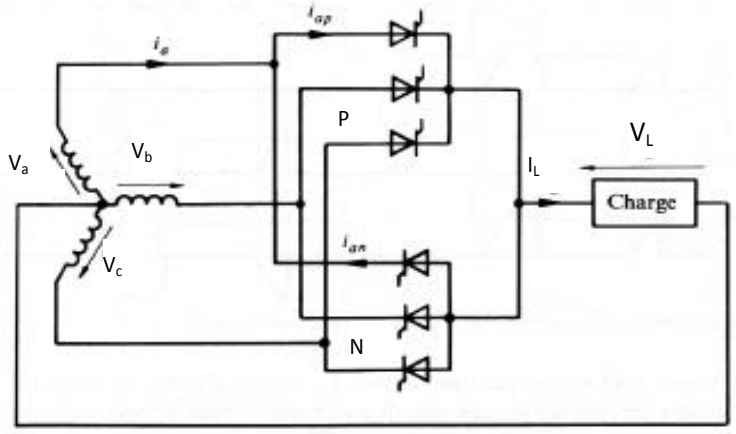


Figure (Ⅲ.12) : *Charge monophasée alimentée par un cycloconvertisseur d'indice de pulsation 3.*

La figure (Ⅲ.14) représente les formes d'ondes à tension (fondamentale) maximale sur charge inductive. Le courant dans cette charge est en retard sur la tension et, comme le sens du courant de charge détermine le groupe qui doit conduire, les intervalles de conduction du groupe sont en retard sur la tension de sortie désirée. Les thyristors sont amorcés à des angles qui donnent une tension aussi proche que possible d'une onde sinusoïdale, mais, en raison du retard du courant sur la tension, chaque groupe fonctionne aussi en onduleur.

Un groupe cesse de conduire lorsque le courant de charge s'inverse. Selon la Forme d'onde de la tension de charge, le transfert entre groupes est immédiat mais, dans la pratique, un bref temps mort est nécessaire pour assurer l'arrêt du courant et de recouvrement de l'état

bloqué d'un groupe avant l'amorçage de l'autre. L'allure de la forme d'onde du courant d'entrée varie d'une période à la suivante, mais lorsque la fréquence d'entrée est un multiple exact de la fréquence de sortie, cette forme d'onde se répète avec la période de la tension de sortie. On peut diminuer la tension fondamentale de sortie en retardant l'angle d'amorçage figure (Ⅲ.15). Ce retard à l'amorçage, en particulier pour la crête de la tension de sortie, permet de régler l'amplitude de la tension de sortie. La figure ((Ⅲ.16) a) représente un cycloconvertisseur à 18 thyristors, indice de pulsation trois alimentant une charge triphasée. Un cycloconvertisseur à 36 thyristors, indice de pulsation 6 est représenté à la figure ((Ⅲ.16) b). La figure (Ⅲ.17) représente des exemples de formes d'ondes de sortie d'un cycloconvertisseur à indice de pulsation supérieur. La fréquence de sortie vaut le tiers de la fréquence d'entrée. Visiblement, plus l'indice de pulsation est grand, plus la forme d'onde de sortie se rapproche de la forme sinusoïdale désirée. En général, la fréquence de sortie est limitée à la moitié ou au tiers environ de la fréquence d'entrée. Les montages à indice de pulsation supérieur ont une limite plus élevée.

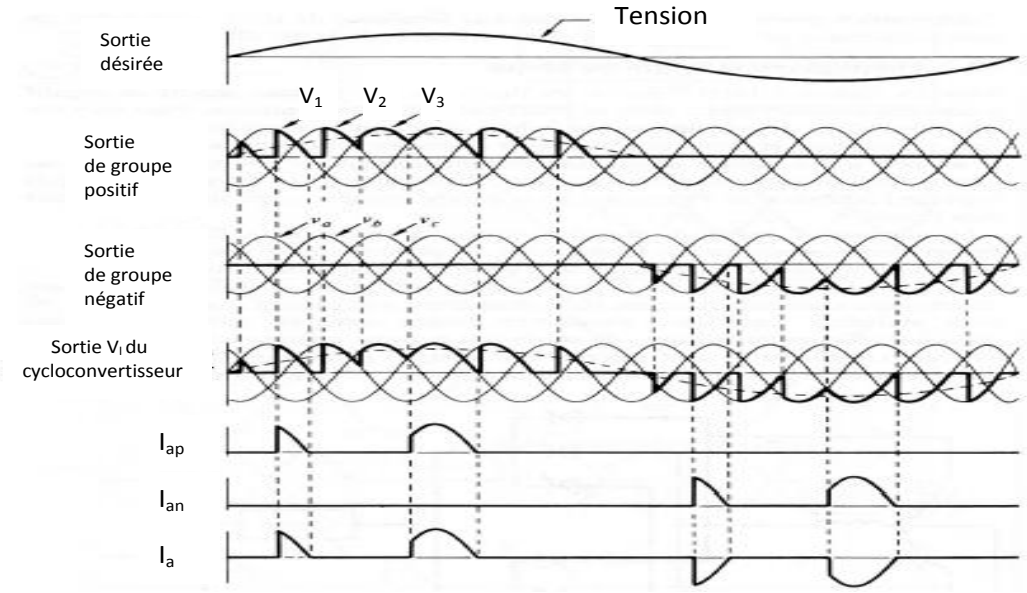


Figure (Ⅲ.13) : *Formes d'ondes avec tension maximale, sur une résistance pure*.

III.5.1. Commande des composants semi-conducteurs

Soit l'angle de retard à l'amorçage d'un groupe redresseur-onduleur. La commande fait varier cet angle de sortie que la valeur instantanée de la sortie désirée (onde fondamentale) suit la moyenne « locale » de la sortie des groupes. Plus précisément, la quantité $\cos(\alpha)$ suit une loi en sinus, avec la période de la tension de sortie du cycloconvertisseur. Les formes d'ondes représentées à la figure (Ⅲ.18) sont tracées pour donner l'amplitude maximale possible de la tension de sortie. En considérant le groupe positif vers l'instant de sa crête positive, la forme d'onde de sortie correspond à un retard à l'amorçage nul. La commutation suivante nécessite un retard à l'amorçage pour satisfaire à la chute de la tension de sortie désirée. Les points d'intersection d'une onde sinusoïdale de référence (la sortie désirée) avec les ondes sinusoïdale dessinée avec leur maxima aux instants de retard nul déterminent les instants d'amorçage de chaque thyristor.[6]

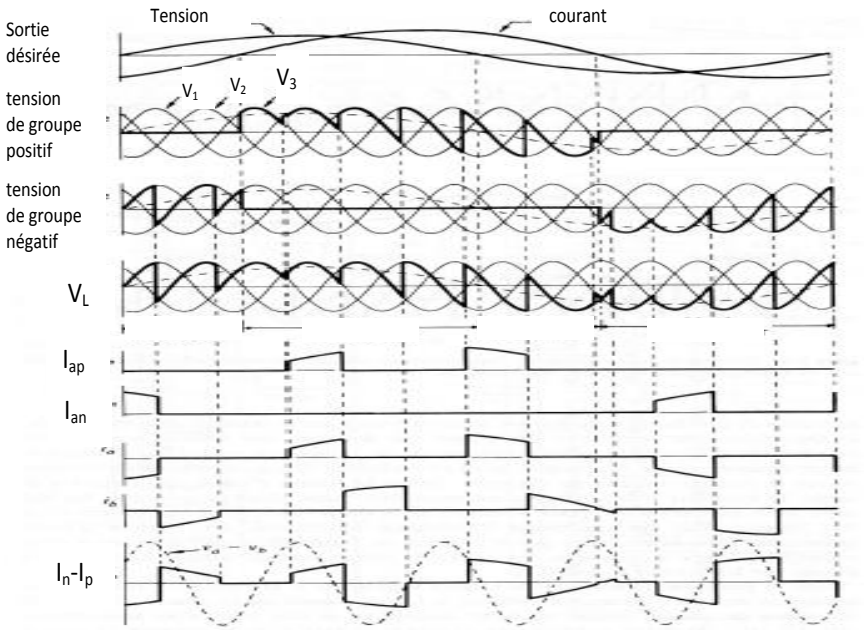


Figure (Ⅲ.14) :Formes d'ondes avec tension maximale, sur une charge inductive.

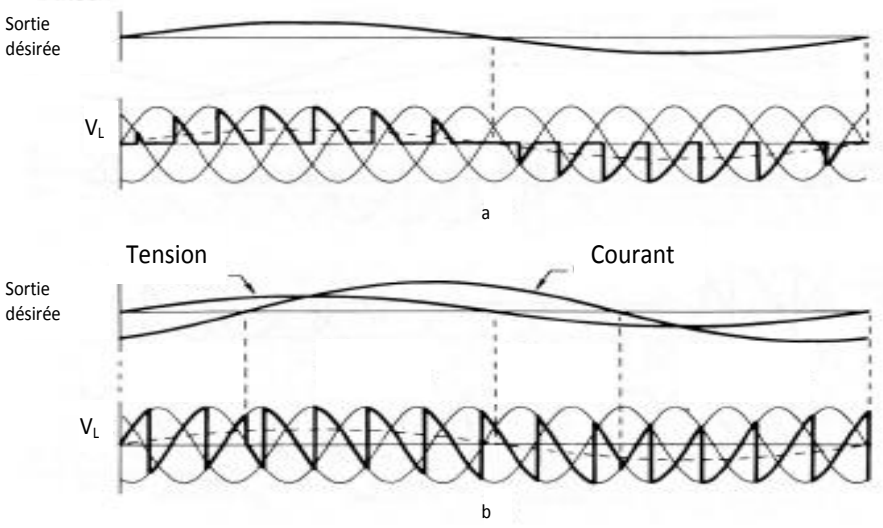


Figure (Ⅲ.15) : *Formes d'ondes à tension fondamentale réduite de moitié.*

a) Charge résistive pure.

b) Charge inductive, débit ininterrompue.

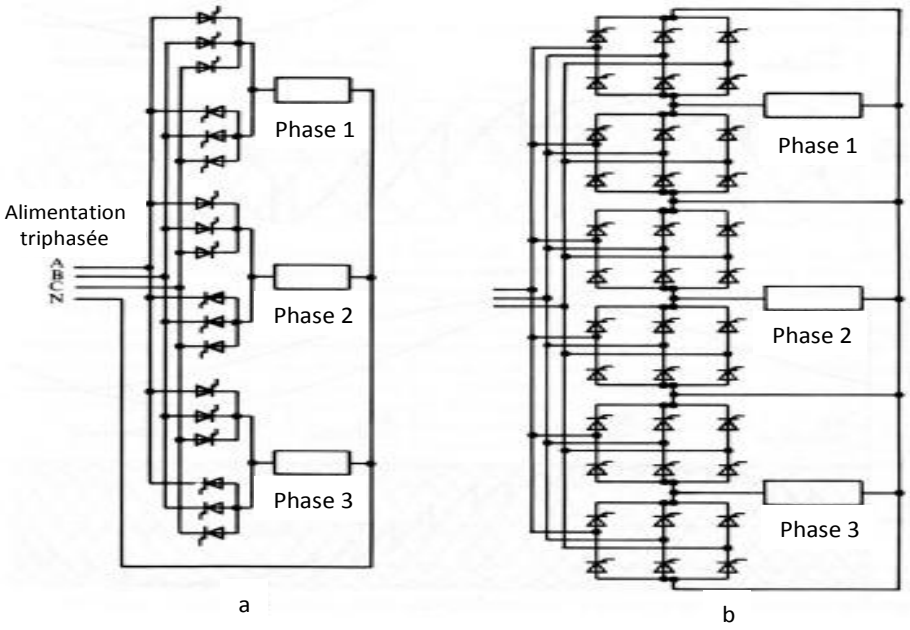


Figure (Ⅲ.16) : Cycloconvertisseur à sortie triphasée.

a) A indice de pulsation trois.
b) A indice de pulsation six.

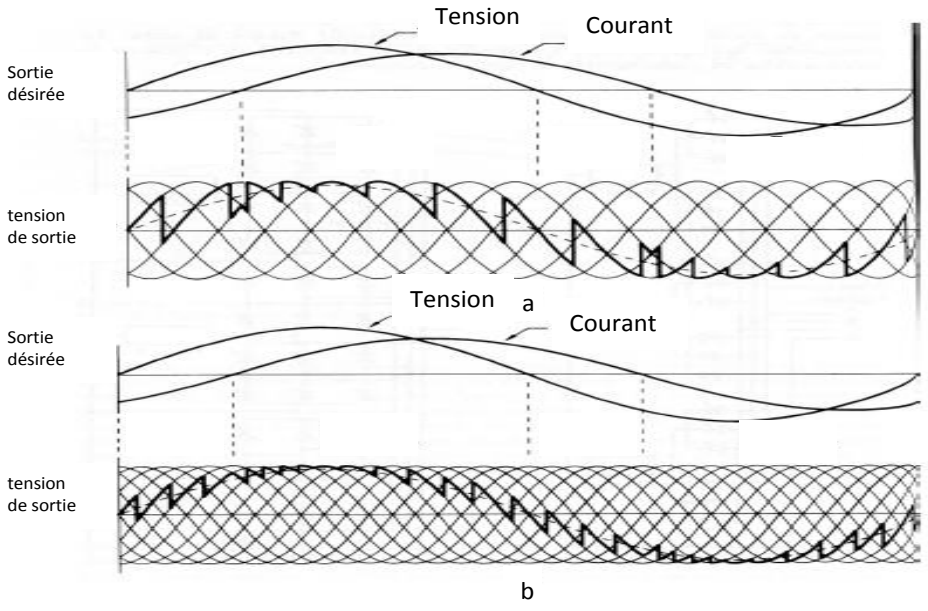


Figure (Ⅲ.17) : *Formes d'ondes de la tension de sortie d'un cycloconvertisseur sur charge inductive.*

a) montage à indice de pulsation six.

b) montage à indice de pulsation douze

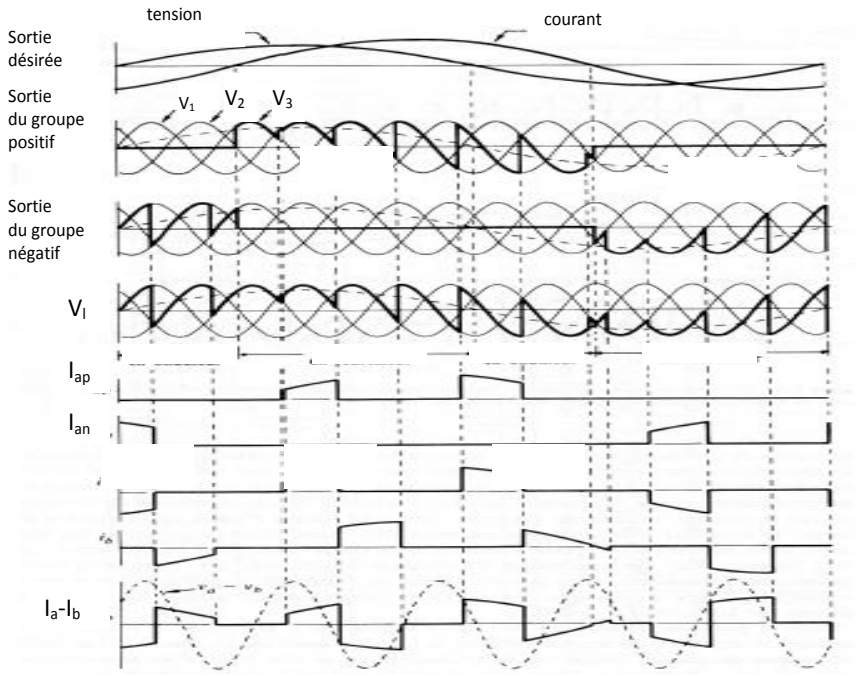


Figure (Ⅲ.18) : *Détermination de l'angle d'amorçage en réglage de phase.*

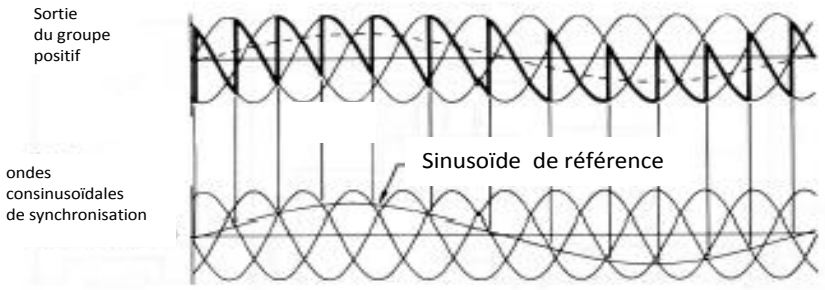


Figure (Ⅲ.19) : *Détermination de l'angle d'amorçage pour une tension de sortie réduite.*

La figure (Ⅲ.18) représente la construction de la sortie du groupe positif. Remarquer que, en redresseur, l'angle d'amorçage est inférieur à 90° (angle αp1), mais en onduleur, dans l'alternance négative, le retard à l'amorçage s'étend au-delà de 90° (angle αp2), βp2 est l'angle associé d'avance à l'amorçage. On détermine la sortie du groupe négatif de la même façon.

La figure commande-tension-réduite figure (Ⅲ.18) met en évidence un aspect de la détermination de l'angle d'amorçage du groupe négatif lorsqu'il est en mode onduleur, à l'instant où la tension de sortie est maximale. Pour diminuer la tension de sortie, réduire l'onde sinusoïdale de référence au niveau désiré figure (Ⅲ.19) .Mais diminuer l'amplitude de la sortie, augmente le taux d'ondulation de l'onde de sortie.

III.6. Fonctionnement en ondes pleines

On peut commander un cycloconvertisseur de manière à ce que chaque groupe fonctionne en pleine conduction, comme s'il comportait des diodes. Les formes d'ondes de la tension de sortie d'un tel cycloconvertisseur sont représentées à la figure (III.20). Ce cycloconvertisseur est aussi appelé cycloconvertisseur enveloppe. Le rapport de la fréquence de sortie à la fréquence d'entrée ne varie plus arbitrairement de manière continue entre 0 et la fréquence du réseau mais il est restreint à des nombres entiers ou à des fractions simples. Il est également à noter que l'on ne peut pas régler l'amplitude de la tension de sortie. De part ces limitations, le cycloconvertisseur à ondes pleines est beaucoup moins rependu que le cycloconvertisseur à réglage de phase, même si la commande en est infiniment plus complexe.

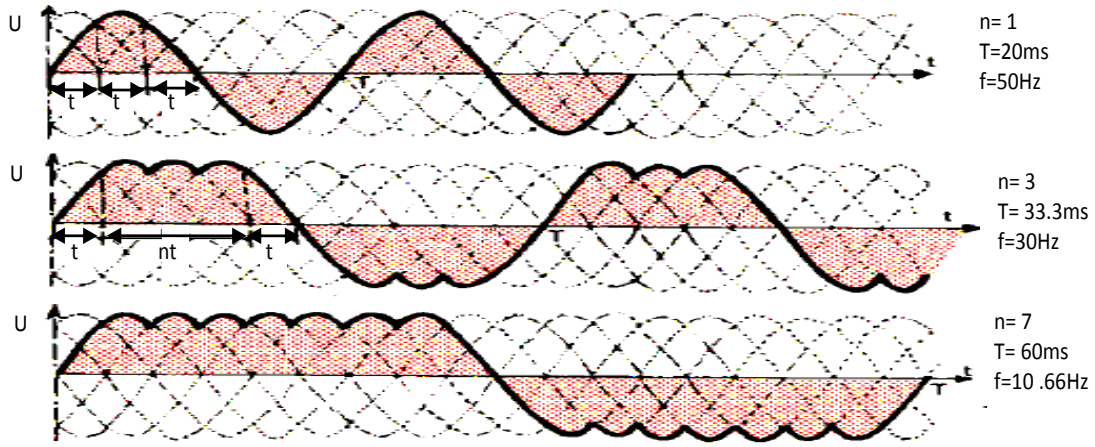


Figure (III.20) : Différentes formes d'ondes d'un cycloconvertisseur à ondes pleines.

III.7. Limite de fréquence

Sur le plan purement technique, un cycloconvertisseur peut fournir des tensions dont la fréquence est comprise entre zéro et la fréquence du réseau d'alimentation – la fréquence zéro signifie que le cycloconvertisseur est capable de délivrer une tension continue – mais sur le plan économique, il en est tout autrement. Jusqu'à une fréquence égale au 1/3 de la fréquence du réseau, tous les thyristors du cycloconvertisseur travaillent de la même façon : mêmes courants pendant les mêmes intervalles de temps avec les mêmes cycles de répétition. Au fur et à mesure que la fréquence de sortie dépasse le tiers de la fréquence du réseau, certaines branches des ponts ne conduisent plus, sont bloquées avant d'avoir pu conduire. Il existe, par exemple, des fréquences de sortie où la même branche de pont ne conduit jamais, et où les deux autres branches de pont conduisent seules cycliquement. On peut même dire, à la limite, que si, dans chaque pont, la même branche conduisait toujours cycliquement une de mi alternance du réseau, la charge – le moteur – serait alimentée à la fréquence du réseau et la totalité de la puissance de la machine transiterait par ce seul bras. Du fait de tels cycles de répétition, les thyristors qui débitent plus souvent que d'autres, sont plus chargés en courant, ils sont soumis à des valeurs moyennes et efficaces plus élevées. Ils doivent donc être surdimensionnés. Comme on ne sait pas à l'avance quelles seront les branches de pont qui travailleront cycliquement plus souvent, il faut sur dimensionner tous les thyristors. Cette considération économique fixe la limite supérieure de fréquence qu'un cycloconvertisseur

peut fournir. Cette limite se situe environ au tiers de la fréquence du réseau. Jusqu'à cette fréquence, tous les thyristors sont chargés de manière semblable. La puissance des ponts n'est alors déterminée que par la puissance de la machine à alimenter.

Au-delà du tiers de la fréquence du réseau, certains thyristors sont cycliquement plus chargés et, comme selon les régimes cela peut être n'importe lesquels, tous doivent être surdimensionnés. Ce surdimensionnement peut s'approcher du coefficient trois si on souhaite aller jusqu'à la fréquence du réseau. [6]

III.8. Analyse harmonique des tensions de sortie

III.8.1. Expression des ''fonction de commutation'' des thyristors

Il faut d'abord exprimer d'une façon générale l'onde fournie par chaque groupe redresseur, on peut ensuite,déduire l'expression générale de la tension d sortie. Pour chaque groupe redresseur du cycloconvertisseur fonctionnant dans deux quadrants, le retard à l'amorçage vaut 90° pour obtenir une tension de sortie nulle.

Pour obtenir une tension variable en sortie du cycloconvertisseur, il faut faire varier les retards à l'amorçage de chaque groupe redresseur positif et négatif en sens contraires.

Soit la tension de la phase d'alimentation

$$V_1 = V\sin(\theta)$$
$$V_2 = V\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)$$
$$V_3 = V\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)$$

On pourra noter F_i la fonction de commutation liée au thyristor :

$F_1\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)$ Fonction de commutation du thyristor 1.

$F_2\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)$ Fonction de commutation du thyristor 2.

$F_3\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)$ Fonction de commutation du thyristor 3.

La figure (Ⅲ.21) représente les tensions d'alimentation et les fonctions de commutation des thyristors du groupe redresseur positif pour un retard à l'amorçage de90°.

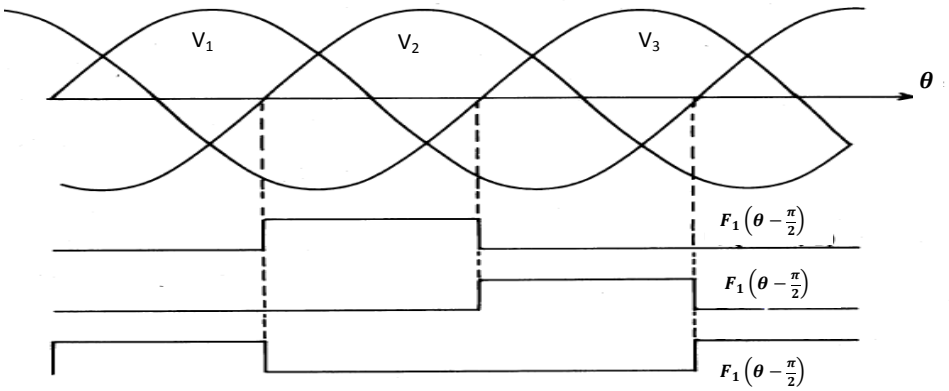


Figure (Ⅲ.21) : sinusoïdes d'alimentation et fonction de commutation, pour un retard de 90°*, d'un groupe redresseur positif.*

Dans l e cas général d'un retard ψ de l'amorçage du thyristor la fonction de commutation serait$F_i(\theta - \psi)$, le développement en série de Fourier de cette fonction est de la forme:

$$F_1(\theta-\psi)=\frac{1}{3}+\frac{\sqrt{3}}{\pi}\Big[\sin(\theta-\psi)-\frac{1}{2}\cos 2(\theta-\psi)-\frac{1}{4}\cos 4(\theta-\psi)-\frac{1}{5}\sin 5(\theta-\psi)-\frac{1}{5}\sin 5(\theta-\psi)-\frac{1}{7}\sin 7(\theta-\psi)+\frac{1}{8}\cos 8(\theta-\psi)+\frac{1}{10}\cos 10(\theta-\psi)+\frac{1}{11}\cos 11(\theta-\psi)+\frac{1}{13}\cos 13(\theta-\psi)\dots\dots\dots\Big] \quad \text{(III.2)}$$

De même

$$F_2(\theta-\psi)=\frac{1}{3}+\frac{\sqrt{3}}{\pi}\Big[\sin\big(\theta-\psi-\tfrac{2\pi}{3}\big)-\frac{1}{2}\cos 2\big(\theta-\psi-\tfrac{2\pi}{3}\big)-\frac{1}{4}\cos\big(\theta-\psi-\tfrac{2\pi}{3}\big)\dots.\Big] \quad \text{(III.3)}$$

Et

$$F_3(\theta-\psi)=\frac{1}{3}+\frac{\sqrt{3}}{\pi}\Big[\sin\big(\theta-\psi+\tfrac{2\pi}{3}\big)-\frac{1}{2}\cos 2\big(\theta-\psi+\tfrac{2\pi}{3}\big)-\frac{1}{4}\cos\big(\theta-\psi+\tfrac{2\pi}{3}\big)\dots.\Big] \quad \text{(III.4)}$$

III.8.2. Expression générale des tensions instantanées fournies par les deux groupes redresseurs

La tension nulle fournie par l e groupe redresseur positif est donc :

$$\boldsymbol{v_P}=V\sin(\theta)\,F_1\left(\theta-\frac{\pi}{2}\right)+V\sin\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right)F_2\left(\theta-\frac{\pi}{2}\right)+V\sin\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right)F_3\left(\theta-\frac{\pi}{2}\right) \quad \text{(III.5)}$$

La tension nulle fournie par l e groupe redresseur négatif est donnée par :

$$\boldsymbol{v_N}=V\sin(\theta)\,F_1\left(\theta+\frac{\pi}{2}\right)+V\sin\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right)F_2\left(\theta+\frac{\pi}{2}\right)+V\sin\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right)F_3\left(\theta+\frac{\pi}{2}\right) \quad \text{(III.6)}$$

Pour obtenir avec le groupe redresseur positif une tension de sortie variable au cours du temps et de fréquence f_0 l'angle d'amorçage doit être déplacé de part et d'autre de la valeur qui donne la tension nulle. La loi régissant la variation du retard à l'amorçage sera notée $\psi(\theta_0)$, cette fonction a donc pour fréquence f_0 et elle est nulle pour le retard de $\frac{\pi}{2}$ son amplitude maximale est $\frac{\pi}{2}$, en ce qui concerne le groupe redresseur négatif, la variation de son retard à l'amorçage doit toujours varier dans, le sens contraire à celui du redresseur positive, même s'ils ne conduisent pas simultanément comme c'est le cas dans le fonctionnement sans courant de circulation , la loi de variation de son retard est donc $\psi(\theta_0)$,Ainsi, pour une modulation de la phase du retard à l'amorçage de finie par $\psi(\theta_0)$,et retard à l'amorçage est $\psi=\frac{\pi}{2}-\psi(\theta_0)$. Les expressions générales des tensions fournies par les groupes redresseurs positifs ou négatifs deviennent : [7]

$$\boldsymbol{v_P}=V\sin(\theta)\,F_1\left(\theta-\frac{\pi}{2}+\psi(\theta_0)\right)+V\sin\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right)F_2\left(\theta-\frac{\pi}{2}+\psi(\theta_0),\right)+V\sin\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right)F_3\left(\theta-\frac{\pi}{2}+\psi(\theta_0),\right) \quad \text{(III.7)}$$

$$\boldsymbol{v_N}=V\sin(\theta)\,F_1\left(\theta+\frac{\pi}{2}+\psi(\theta_0)\right)+V\sin\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right)F_2\left(\theta+\frac{\pi}{2}+\psi(\theta_0),\right)+V\sin\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right)F_3\left(\theta+\frac{\pi}{2}+\psi(\theta_0)),\right) \quad \text{(III.8)}$$

Soit

$$\boldsymbol{v_P}=V\sin(\theta)\left\{\frac{1}{3}+\frac{\sqrt{3}}{\pi}\Big[\sin\left(\theta-\frac{\pi}{2}+\psi(\theta_0\right)-\tfrac{1}{2}\cos 2\left(\theta-\frac{\pi}{2}+\psi(\theta_0)\right)\dots\Big]\right\}$$

$$+V\sin\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right)\left\{\frac{1}{3}+\frac{\sqrt{3}}{\pi}\Big[\sin\left(\theta-\frac{\pi}{2}+\psi(\theta_0\right)-\tfrac{1}{2}\cos 2\left(\theta-\frac{\pi}{2}+\psi(\theta_0)\right)\dots\Big]\right\}$$

$$+V\sin\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right)\left\{\frac{1}{3}+\frac{\sqrt{3}}{\pi}\left[\sin\left(\theta-\frac{\pi}{2}+\psi(\theta_0\right)-\tfrac{1}{2}\cos2\left(\theta-\frac{\pi}{2}+\psi(\theta_0)\right)\ldots\right]\right\}$$

$$\boldsymbol{v_N}=V\sin(\theta)\left\{\frac{1}{3}+\frac{\sqrt{3}}{\pi}\left[\sin\left(\theta+\frac{\pi}{2}+\psi(\theta_0\right)-\tfrac{1}{2}\cos2\left(\theta+\frac{\pi}{2}+\psi(\theta_0)\right)\ldots\right]\right\}$$
$$+V\sin\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right)\left\{\frac{1}{3}+\frac{\sqrt{3}}{\pi}\left[\sin\left(\theta+\frac{\pi}{2}+\psi(\theta_0\right)-\tfrac{1}{2}\cos2\left(\theta+\frac{\pi}{2}+\psi(\theta_0)\right)\ldots\right]\right\}$$
$$+V\sin\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right)\left\{\frac{1}{3}+\frac{\sqrt{3}}{\pi}\left[\sin\left(\theta+\frac{\pi}{2}+\psi(\theta_0\right)-\tfrac{1}{2}\cos2\left(\theta+\frac{\pi}{2}+\psi(\theta_0)\right)\ldots\right]\right\}$$

Expressions qui se réduisent à :

$$\boldsymbol{v_P}=\frac{3\sqrt{3}V}{2\pi}\Big\{V\sin(\psi(\theta_0))+\frac{1}{2}\left[\sin(3\theta).\cos\left(2\psi(\theta_0)\right)+\cos(3\theta)+\sin\left(2\psi(\theta_0)\right)\right]$$
$$+\frac{1}{4}\left[\sin(3\theta).\cos\left(4\psi(\theta_0)\right)+\cos(3\theta)+\sin\left(4\psi(\theta_0)\right)\right]$$
$$+\tfrac{1}{5}\left[\sin(6\theta).\cos\left(5\psi(\theta_0)\right)+\cos(6\theta)+\sin\left(4\psi(\theta_0)\right)\right]\ldots\Big\}\qquad\text{(III.9)}$$

$$\boldsymbol{v_N}=\frac{3\sqrt{3}V}{2\pi}\Big\{V\sin(\psi(\theta_0))+\frac{1}{2}\left[\sin(3\theta).\cos\left(2\psi(\theta_0)\right)-\cos(3\theta)+\sin\left(2\psi(\theta_0)\right)\right]$$
$$+\frac{1}{4}\left[\sin(3\theta).\cos\left(4\psi(\theta_0)\right)-\cos(3\theta)+\sin\left(4\psi(\theta_0)\right)\right]$$
$$+\tfrac{1}{5}\left[-\sin(6\theta).\cos\left(5\psi(\theta_0)\right)-\cos(6\theta)+\sin\left(4\psi(\theta_0)\right)\right]\ldots\Big\}\qquad\text{(III.10)}$$

III.8.3. Fonction de commutation des deux groupes redresseurs

Dans le cas du fonctionnement avec courant de circulation, les deux redresseurs, positif et négatif, travail lent simultanément, et la tension de sortie est $v_0=\frac{\boldsymbol{v_P}+\boldsymbol{v_N}}{2}$ Ce pendant ce mode de fonctionnement ne sera pas étudié plus en détail car il n'est utilisé que lorsque 1'on désire le minimum de distorsion pour des charges dont le facteur de puissance est proche de l'unité. Comme ce n'est pas le but et l'utilisation qui nous préoccupe, nous ne verrons que le cas où 1'on na pas de courant de circulation. Dans ce cas chaque groupe redresseur conduit pendant une demi-période correspondant à l'alternance du courant. On va supposer que le retard du courant sur la tension aux bornes de la charge est φ_0, le groupe redresseur positif va conduire de φ_0 à $(\varphi_0+\pi)$et l e groupe négatif de $(\varphi_0+\pi)$ à$(\varphi_0+2\pi)$.

Pour donner l'expression générale de la tension de sortie du cycloconvertisseur, il faut maintenant introduire une" fonction de commutation du groupe redresseur" notée $F_P(\theta_0)$ Pour le groupe positif et $F_N(\theta_0)$ pour le groupe négatif $F_P(\theta_0)$ a une amplitude de 1 lorsque Le groupe redresseur positif conduit et vaut zéro lorsqu'il est bloqué $F_N(\theta_0)$, et $F_N(\theta_0)$ est nulle quand le redresseur négatif est bloqué décomposées en série de Fourier ces deux fonctions s'expriment en :

$$F_P(\theta_0)=\frac{1}{2}+\frac{2}{\pi}\left[\sin\left(\theta_0-\varphi_0\right)+\frac{1}{3}\sin3\left(\theta_0-\varphi_0\right)+\frac{1}{5}\sin5\left(\theta_0-\varphi_0\right)\ldots\right]\qquad\text{(III.12)}$$

$$F_N(\theta_0)=\frac{1}{2}-\frac{2}{\pi}\left[\sin\left(\theta_0-\varphi_0\right)+\frac{1}{3}\sin3\left(\theta_0-\varphi_0\right)+\frac{1}{5}\sin5\left(\theta_0-\varphi_0\right)\ldots\right]\qquad\text{(III.13)}$$

III.8.4. Expression générale de la tension de sortie de cycloconvertisseur

Soient $\boldsymbol{v'_P}$ et $\boldsymbol{v'_N}$ les tensions effectivement fournies par les groupes redresseurs positif et négatif respectivement :

$$\boldsymbol{v'_P} = \boldsymbol{v_P} * F_P(\theta_0) \text{ Et } \boldsymbol{v'_N} = \boldsymbol{v_N} * F_P(\theta_0) \quad \text{(III.14)}$$

Comme l'une est nulle quand l'autre ne l'est pas et réciproquement la tension de sortie du cycloconvertisseur est :

$$\boldsymbol{v_0} = \boldsymbol{v'_P} + \boldsymbol{v'_N} = \boldsymbol{v_P} * F_P(\theta_0) + \boldsymbol{v_N} * F_P(\theta_0)$$

En remplaçant dans les équations (III.14)$\boldsymbol{v_P}$ donnée par (III.7) et $\boldsymbol{v_N}$ donnée par (III.8) $F_P(\theta_0)$ donnée par (2.8) et $F_N(\theta_0)$ donnée par (2.9) l'égalité (2.11) donnant $\boldsymbol{v_0}$ s'écrit :

$$\begin{aligned}\boldsymbol{v_0} = \frac{3\sqrt{3}V}{2\pi}\Big\{&\sin\big(\psi(\theta_0)\big) + \frac{1}{2}\sin(3\theta)\cos\big(2\psi(\theta_0)\big)\frac{1}{4}\sin(3\theta)\cos\big(4\psi(\theta_0)\big) \\ &+\frac{1}{5}\cos(6\theta)\sin\big(5\psi(\theta_0)\big)\frac{1}{7}\cos(6\theta)\sin\big(7\psi(\theta_0)\big)\ldots\Big\} \\ +\frac{3\sqrt{3}V}{2\pi}\Big\{&\Big[\frac{1}{2}\cos(3\theta)\sin\big(2\psi(\theta_0)\big) + \frac{1}{4}\cos(3\theta)\sin\big(4\psi(\theta_0)\big) + \frac{1}{5}\sin(6\theta) \\ &*\cos\big(5\psi(\theta_0)\big) + \frac{1}{7}\sin(6\theta)\cos\big(7\psi(\theta_0)\big)\ldots\Big] * \frac{4}{\pi}[\sin(\theta_0 - \varphi_0) \\ &+\frac{1}{3}\sin 3(\theta_0 - \varphi_0)\frac{1}{5}\sin 5(\theta_0 - \varphi_0) + \frac{1}{5}\sin 5(\theta_0 - \varphi_0)\ldots]\Big\}\end{aligned} \quad \text{(III.15)}$$

III.9. Filtrage de signale

III.9.1. Harmoniques

Les principales sources d'harmoniques sont les dispositifs contenant des éléments qui commutent (les convertisseurs statiques), et les dispositifs à caractéristique tension-courant non linéaire (fours à arc inductances saturées, transformateurs, machines tournantes, etc…), ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques. Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions avec harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau.

- **Conséquences :** surcharges (du conducteur de neutre, des sources…), déclenchements intempestifs, vieillissement accéléré et dégradation du rendement. [18]

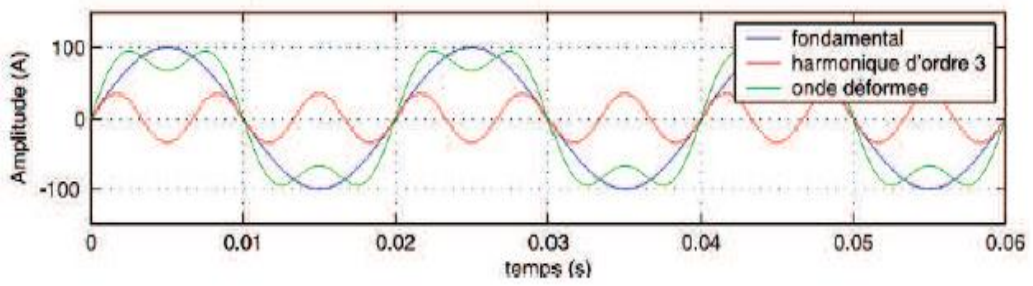


Figure (III.22) : Harmoniques.

III.9.2. Effets des harmoniques

Bien que les susceptibilités des différents appareils a l'égard des harmoniques soient très diversifiées, on distingue schématiquement deux sortes d'effets possibles :

- *Les effets quasi instantanés:* sur certains types d'appareillage, tels que l'électronique de puissance, calculateurs, relais, systèmes de contrôle et régulation, etc., la présence d'harmoniques sur les signaux provoque le déplacement du passage par zéro et des modifications de la valeur de crête de l'onde.

- *Les effets à terme :* Dans les machines tournantes, les transformateurs et les condensateurs, ils se manifestent par des échauffements supplémentaires ; ce qui entraine la destruction du matériel ou plus fréquemment une diminution de leur durée de vie par surcharge thermique.

III.9.3. Solutions pour améliorer la qualité de l'énergie

- **Les filtres passifs :**

  - **Classification des filtres passifs :**

Les solutions conventionnelles aux problèmes de distorsion harmonique existent depuis longtemps. Le filtrage passif est la plus simple solution conventionnelle pour atténuer la distorsion harmonique. Les filtres passifs sont des éléments a base d'inductance, capacité et résistance configures et réglés pour contrôler les harmoniques. On peut classifier les filtres passifs suivant leur fréquence de résonance, leur mode de connexion et leur emplacement sur le réseau. Ce la permet de définir deux grands modes de filtres passifs: les filtres séries utilisé pour génératrices de tensions harmoniques et les filtres parallèles utilisé dans le cas des charges génératrices de courants harmoniques et suivant le modèle choisi, les harmoniques peuvent être : précisément bloqués par une grande impédance série entre le convertisseur, déviés par une faible impédance en parallèle ou une combinaison des deux.

  - **Filtre passif série :**

Une façon d'atténuer les harmoniques générées par les charges non linéaires est d'introduire un filtre passif série Figure (Ⅲ.2 3), dans l'alimentation d'entrée ligne de sortie que le filtre offre une impédance élevée à la circulation des harmoniques à partir de la source à la charge non-linéaire. Depuis le filtre passif série est accordé sur une fréquence particulière, il offre une impédance élevée à sa seule fréquence d'accord. Selon la propriété physique de L et C choisie, il existe généralement une bande étroite autour de fréquence d'accord lorsque l'impédance reste élevée.

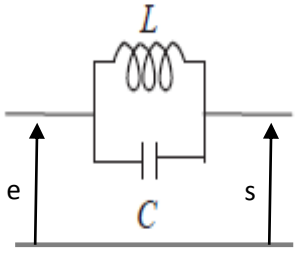


Figure (Ⅲ.23) : Filtre passif série.

- **Filtre passif parallèle :**

Le filtre passif parallèle est montré sur la Figure (Ⅲ.24). Il est constitué d'une inductance en parallèle avec un condensateur. Il présente une impédance faible pour tous les harmoniques et une impédance suffisamment importante par rapport au fondamental, ce qui empêche les courants harmoniques de se propager vers le réseau.

Le filtre passif parallèle à un comportement inductif pour les fréquences inférieures à la fréquence fondamentale et un comportement capacitif pour les fréquences supérieures à la fréquence fondamentale, ce qui est un avantage majeur pour le contrôle du courant dans l'inductance.

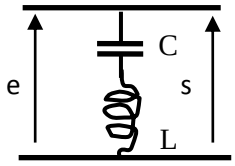
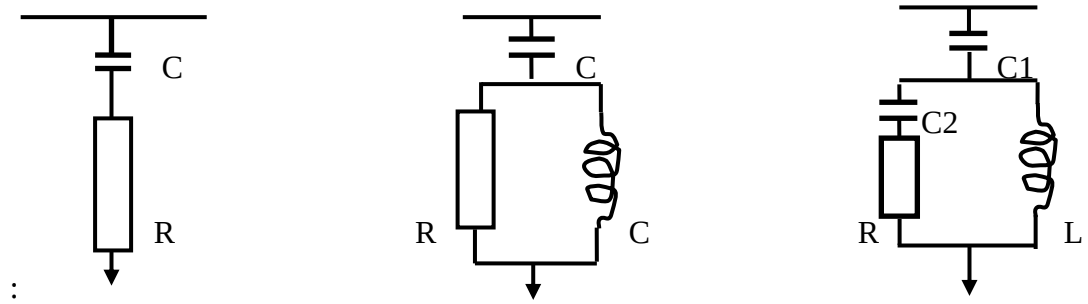


Figure (Ⅲ.24) : Filtre passif parallèle.

En général dans l'usage, on rencontre deux types de filtres passifs parallèles : le filtre passif amorti et le filtre passif résonant.

Filtre passif amorti : Le filtre amorti peut réduire le risque de résonance non souhaitée, et permet de réduire considérablement la taille du filtre passif, en fonctionnant sur une large gamme de fréquence. On distingue trois types de filtre amorti : le filtre de premier ordre est très peu utilisé car il exige une grande capacité et provoque des pertes de puissance élevées.

Les filtres de deuxième et troisième ordres sont plus performances :



a) Filtre amorti de 1er ordre. *b) Filtre amorti de 2ème ordre.* *c) Filtre amorti de 3ème ordre.*

Figure (Ⅲ.25) : Filtre amorti.

Filtre résonant : Le filtre passif résonnant est constitué d'un circuit résonnant composé d'un condensateur et d'une inductance en série accordés sur la fréquence de l'harmonique que l'on veut éliminer. Ce filtre possède une impédance faible pour l'harmonique concerné et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Lorsque l'on souhaite réaliser le filtrage d'un signal déformé entaché par plusieurs courants harmoniques, il est nécessaire de prévoir un ensemble de filtres ou chacun d'entre eux agit sur le rang harmonique à éliminer voir la figure (Ⅲ.26).

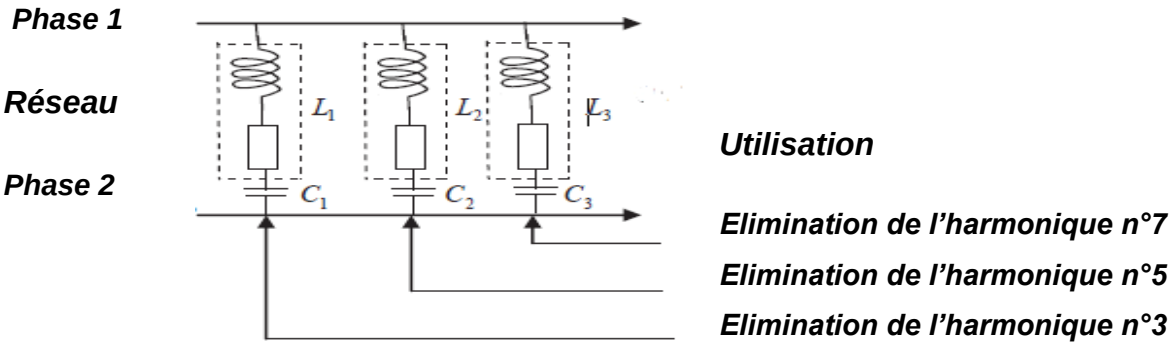


Figure (Ⅲ.26) : Filtres résonants agissant sur plusieurs rangs harmoniques.

- **Les avantages et les inconvénients des filtres passifs :**

Le filtrage passif a déjà largement fait ses preuves dans le milieu industriel grâce à son coût faible, son efficacité et son adaptation pour des réseaux de forte puissance. Cependant Il présente les inconvénients suivants:

- ✓ L'impédance du réseau en présence des filtres passif peu faire apparaître des résonances.
- ✓ Le filtrage passif peut absorber les courants harmoniques d'autres charges non linéaires et dans ce cas, le filtre passif peut être surchargé.
- ✓ Le filtrage passif est peu flexible et, en cas de modifications dans le réseau, il peut avoir du mal à s'adapter aux nouveaux besoins du filtrage.
- ✓ La conception des filtres passifs doit considérer la tolérance de fabrication et les dérives paramétriques qui apparaissent à l'usage. Ainsi, avant d'installer un filtre de ce type, une étude détaillée doit être menée afin d'analyser, cas par cas, les risques de résonance et de surcharge. [8]

III.10. Application des cycloconvertisseurs

On retrouve les cycloconvertisseurs comme des variateurs de vitesse pour les moteurs synchrones et asynchrone de forte puissance, les machines de 1.5MW et plus et tournant à des vitesses très lentes. A titre d'exemple les cycloconvertisseurs sont appliqués pour les moteurs des machines d'extraction minière, les moteurs d'entrainement des broyeurs à ciment, les moteurs à propulsion des navires.

Les bases fréquence générées par le cycloconvertisseur permettent de commander des moteurs synchrones tournant à très basses vitesses. Les cycloconvertisseurs possèdent une autre application, ils permettent d'alimenter une charge monophasée à partir d'un système triphasé sans déséquilibrer les courants dans les trois lignes. Les cycloconvertisseurs peuvent être employés aussi dans les domaines suivants:

- ➢ Transposition de la fréquence d'une source.
- ➢ Génération de puissance réactive.
- ➢ Connexion de deux réseaux de fréquence différente. [8]

III.11. Simulation

Pour notre simulation de différentes montages de cycloconvertisseur on utilise MATLAB/SIMULIK discret donne les figures (Ⅲ.27, Ⅲ.29, Ⅲ.31) avec source 6300 V :

III.11.1. Cycloconvertisseur monophasé

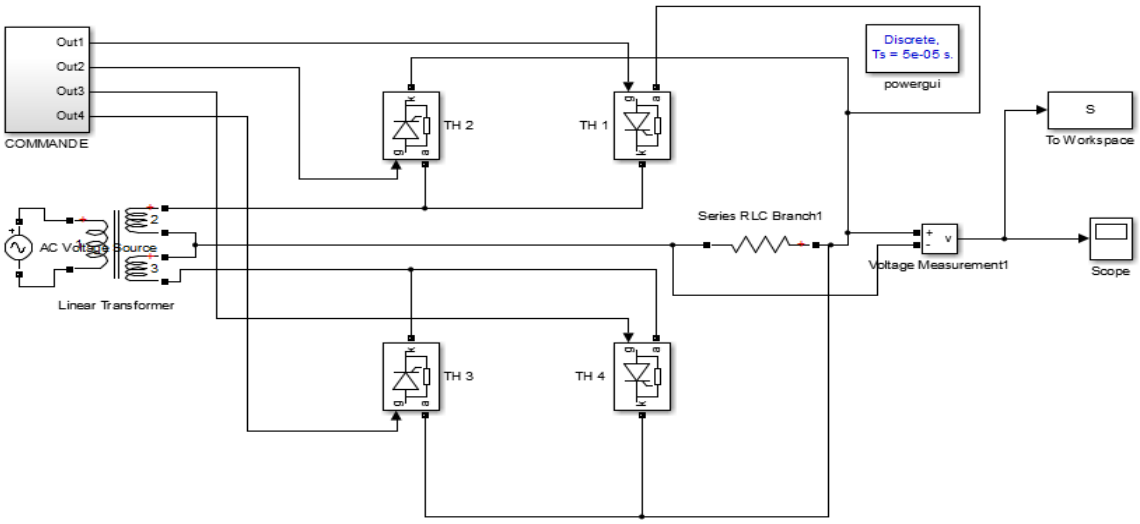


Figure (III.27) : Schéma de la simulation (Cycloconvertisseur monophasé).

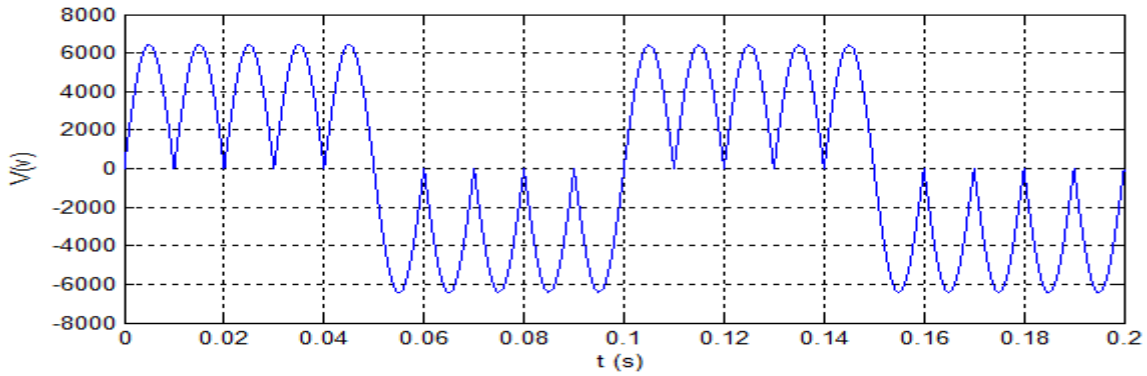


Figure (III.28) : Tension de sorte (Cycloconvertisseur monophasé).

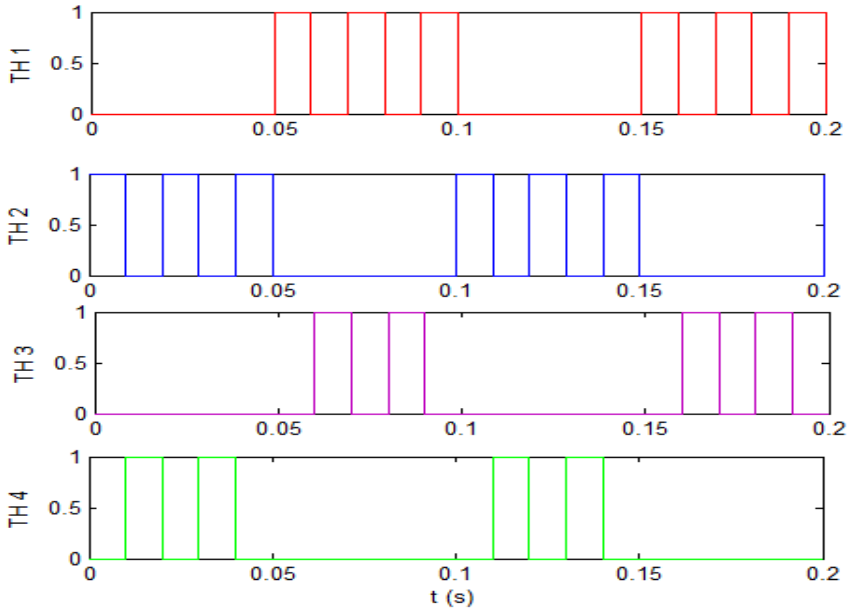


Figure (III.29) : Les impulsions de commande des gâchettes des thyristors.

III.11.2. Cycloconvertisseur d'indice de pulsation égal à 3

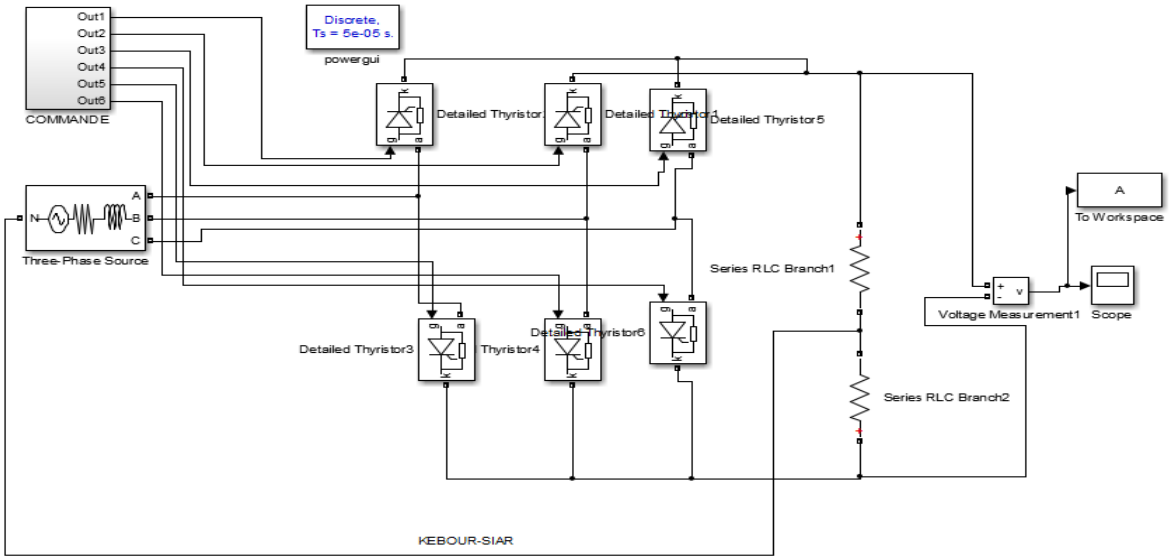


Figure (III.29) **:** *Schéma de simulation (Cycloconvertisseur d'indice de pulsation égal à 3).*

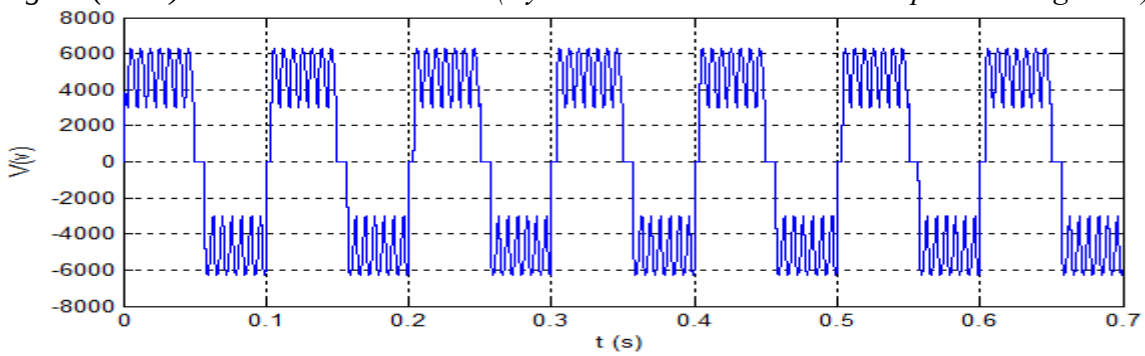


Figure (III.30) : Tension de sortie (Cycloconvertisseur d'indice de pulsation égal à 3).

III.11.3. Cycloconvertisseur d'indice de pulsation égal à 6

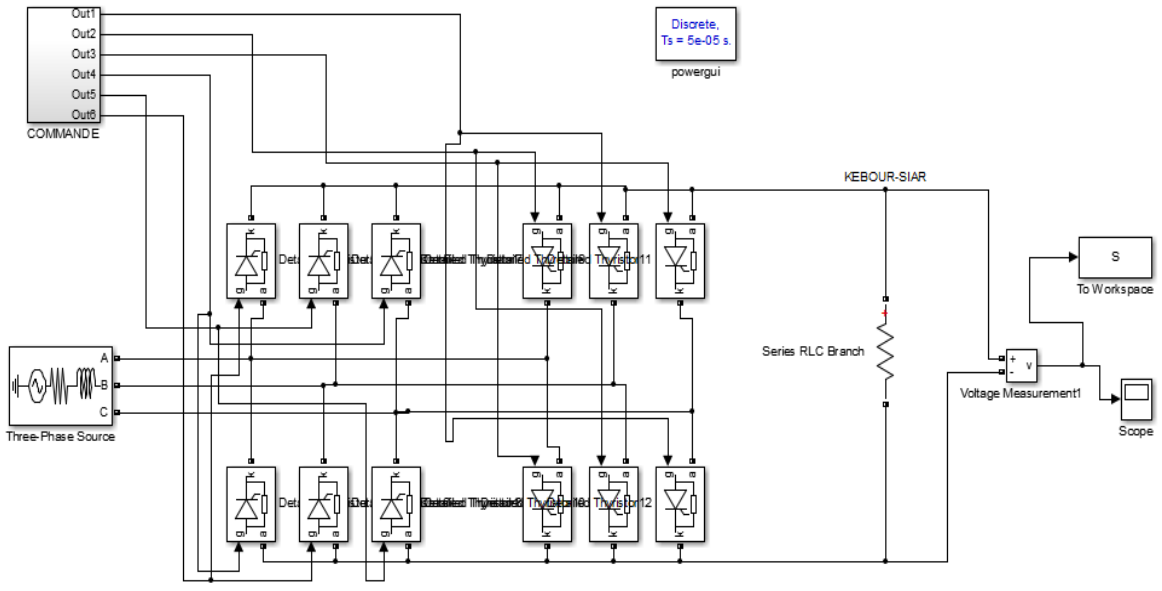


Figure (III.31) :Schéma de simulation (Cycloconvertisseur d'indice de pulsation égal à 6).

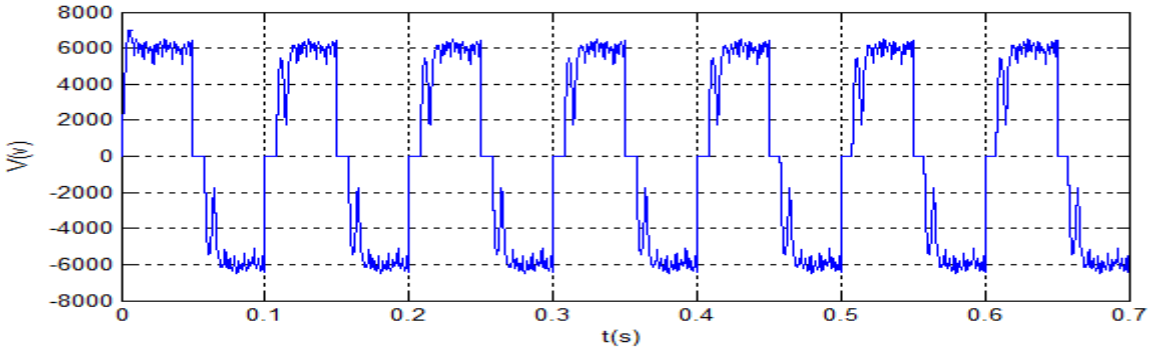


Figure (III.32) : Tension de sortie (Cycloconvertisseur d'indice de pulsation égal à 6).

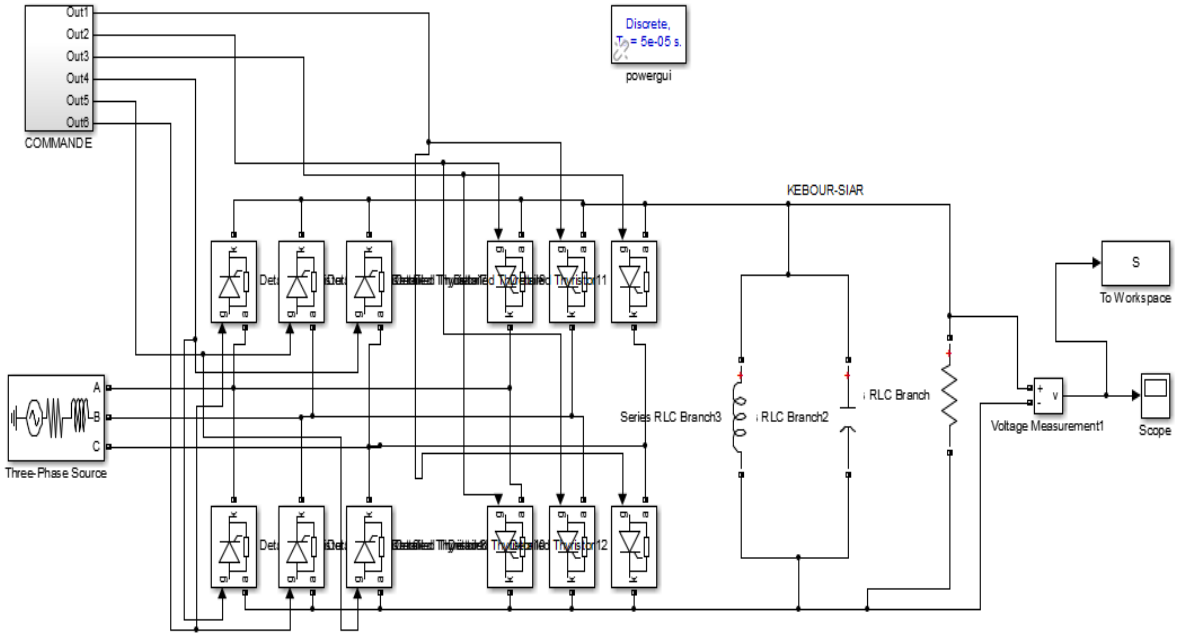
III.11.4. Interprétation des résultats

Dans cette simulation nous avons varié la fréquence de 50 Hz jusqu'à 10 Hz.

Les paramètres de simulation $v = 6300V$ et $R = 10\Omega$.

On à obtenir a partir de ce montage figures (III.27, III 30, III.32) à source sinusoïdale 6300 V, et de fréquence 50Hz un signal alternative a amplitude 6300V et fréquence 10Hz avec l'harmonique.

III.11.5. Filtrage de signal de sortie



Figure(III.33):Schéma de simulation(Cycloconvertisseur d'indice de pulsation égal à 6) filtré

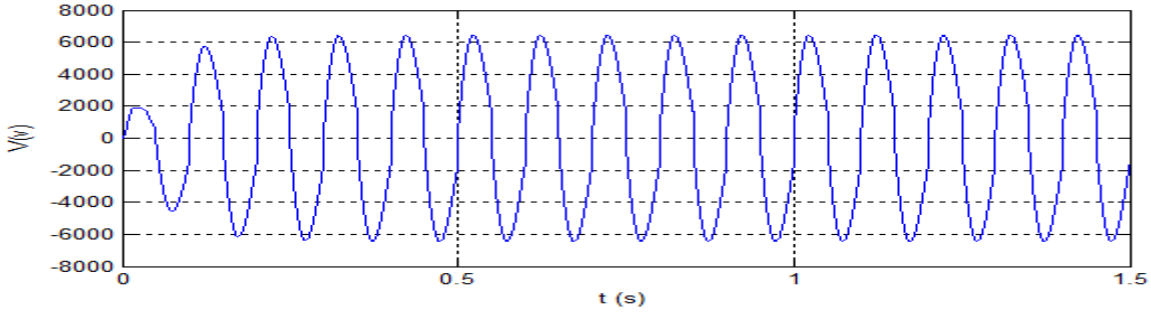


Figure (III.34) : Tension de sortie (Cycloconvertisseur d'indice de pulsation égal à 6) filtré.

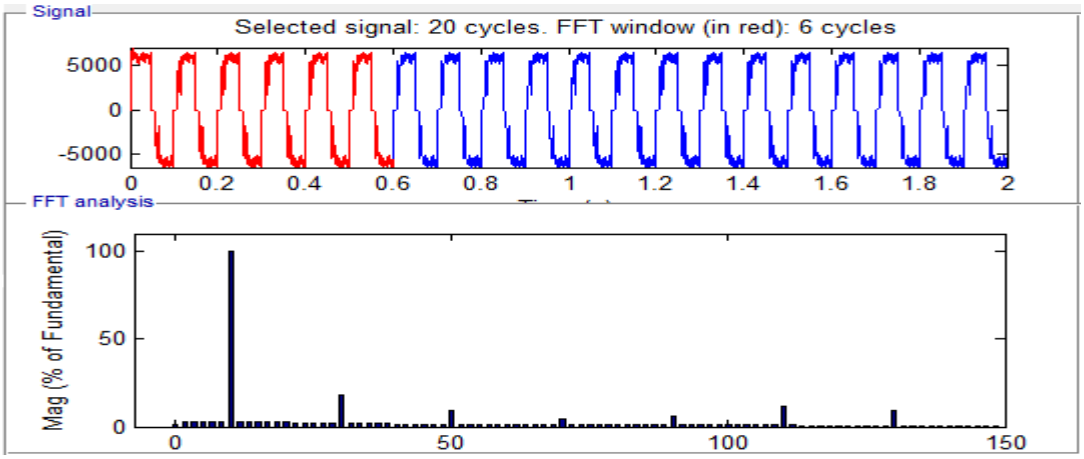


Figure (III.35): les harmoniques de signal d'indice de pulsation égal à 6 avant le filtrage.

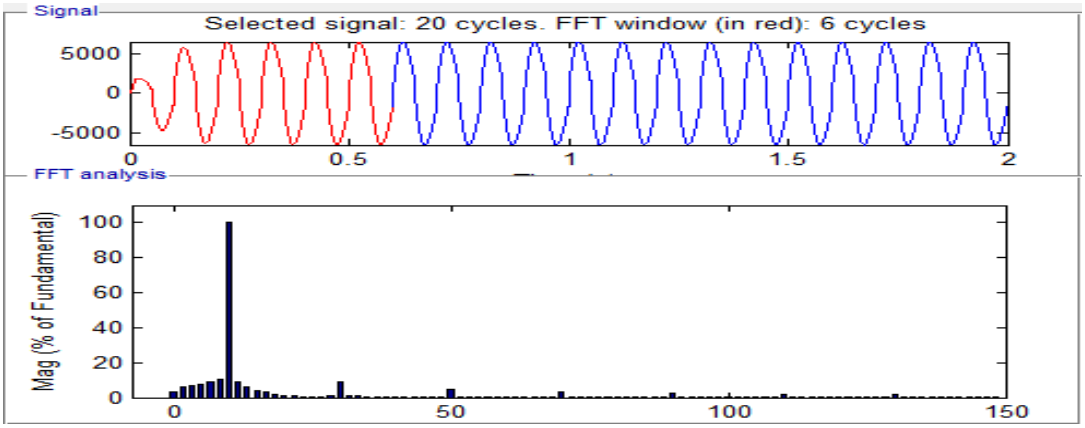


Figure (III.36) : les harmoniques de signal d'indice de pulsation égal à 6 après le filtrage.

- ***Remarque*** **:** d'après l'utilisation de filtres type passif parallèle on a obtenue un signal sinusoïdal avec moins harmoniques.

III.12. Conclusion

Dans ce chapitre on a étudie les différents caractéristiques d'un cycloconvertisseur et les domaines d'applications. Les composants constituant, sa structure avec les différents types des montages utilisés ont été montrés.

La nature de signal et les équations mathématiques avec la stratégie de traitement des harmoniques à l'aide d'un filtre passif ont été élaborées.

On a étudié différents montages des cycloconvertisseur dont on a réalisé la simulation dans MATLAB (SIMULINCK).

Cette simulation nous a permis d'obtenir des fréquences variables et réglables associées à leurs charges.

Chapitre IV

Association convertisseur machine asynchrone

IV.1. Introduction

Dans le domaine dit « de la vitesse variable des moteurs électriques », l'ensemble réseau d'alimentation, convertisseur, moteur et commande constituent un bloc indissociable, dont le but est de convertir en énergie mécanique de l'énergie électrique prélevée sur un réseau. Plus spécialement, il fournit sur l'arbre d'un moteur l'énergie mécanique exprimée en termes de couple et de vitesse réclamée par la charge.

Le développement des éléments semi-conducteurs a amené à concevoir de nombreuses structures de convertisseurs statiques permettant d'assurer divers types d'alimentation des machines à courant alternatif. Les circuits d'électronique de puissance ont permis une diversification importante des modes d'alimentation, offrant ainsi une gamme importante de fonctionnement possible. Multi travaux ont déjà portés sur le choix et le fonctionnement des divers montages.

IV.2. Type des variateurs de vitesse

Il existe plusieurs systèmes d'entraînement à vitesse variable, mais la plupart peuvent être regroupés dans une des cinq catégories suivantes :

IV.2.1. Variateur de vitesse utilisant un redresseur et un onduleur à commutatif naturelle

Ces systèmes d'entraînement redressent la tension alternative du réseau et, au moyen de l'onduleur, retransforment la tension continue en tension alternative à fréquence variable. La boucle intermédiaire à c .c. Reliant le redresseur et l'onduleur peut agir comme source de Courant ou source de tension. On l'utilise pour les moteurs synchrones autopilotés et pour les moteurs à bagues fonctionnant dans le mode cascade hypo-synchrone. Le redresseur et l'onduleur sont constitués de thyristors figure (Ⅳ.1). [19]

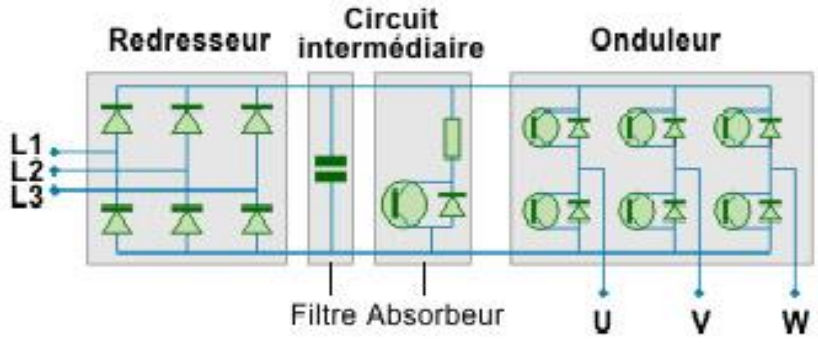


Figure (Ⅳ.1) : redresseur et un onduleur à commutatif naturelle.

IV.2.2. Variateur de vitesse utilisant un cycloconvertisseur

Ce système à commutation naturelle, convertit directement la fréquence réseau à la fréquence désirée. On l'utilise pour entraîner le moteur synchrone set asynchrones à cage d'écureuil figure (Ⅳ.2). Le cycloconvertisseur est constitué de thyristors.

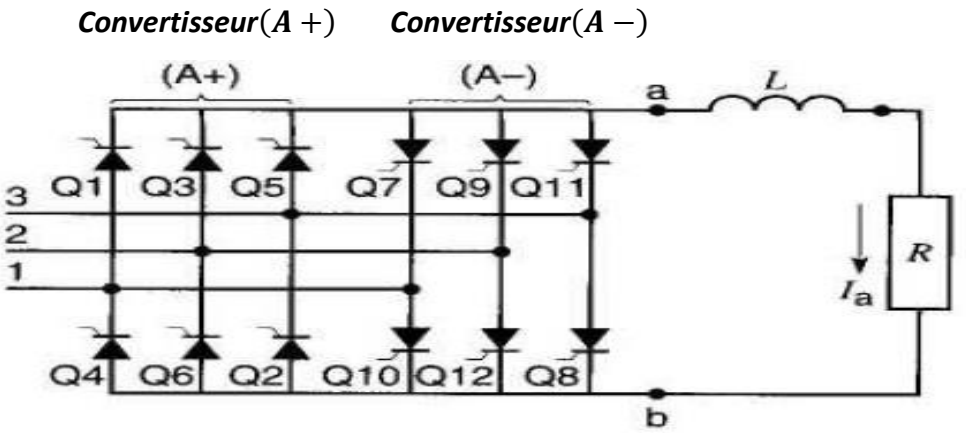


Figure (Ⅳ.2) : Variateur cycloconvertisseur triphasé génère une tension alternative.

IV.2.3. Variateur de vitesse utilisant un gradateur

Ce système à commutation naturelle permet de commander la vitesse des certaines charges de faible et de moyenne puissance figure (Ⅳ.3). Il sert aussi au démarrage des moteurs asynchrones allant de 1 KW jusqu'à 2000 KW. Le gradateur est constitué de thyristors. [19]

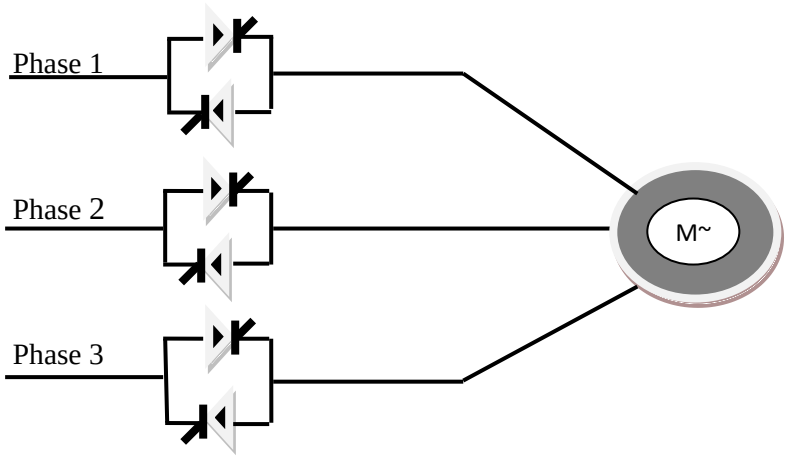


Figure (Ⅳ.3) : variateur de vitesse type gradateur.

IV.2.4. Variateur de vitesse utilisant un redresseur et un onduleur autonome à MLI

Ce système à commutation forcée utilise la modulation de largeur d'impulsions(MLI). L'onduleur génère une tension sinusoïdale ou de toute autre forme désirée. Le systèmes et surtout utilisé pour les moteurs asynchrones devant fonctionner dans une large gamme de vitesses ou dont le couple et la vitesse doivent changer très rapidement figure (Ⅳ.4) Il est constitué d'IGBT, de MOSFET, parfois de GTO.

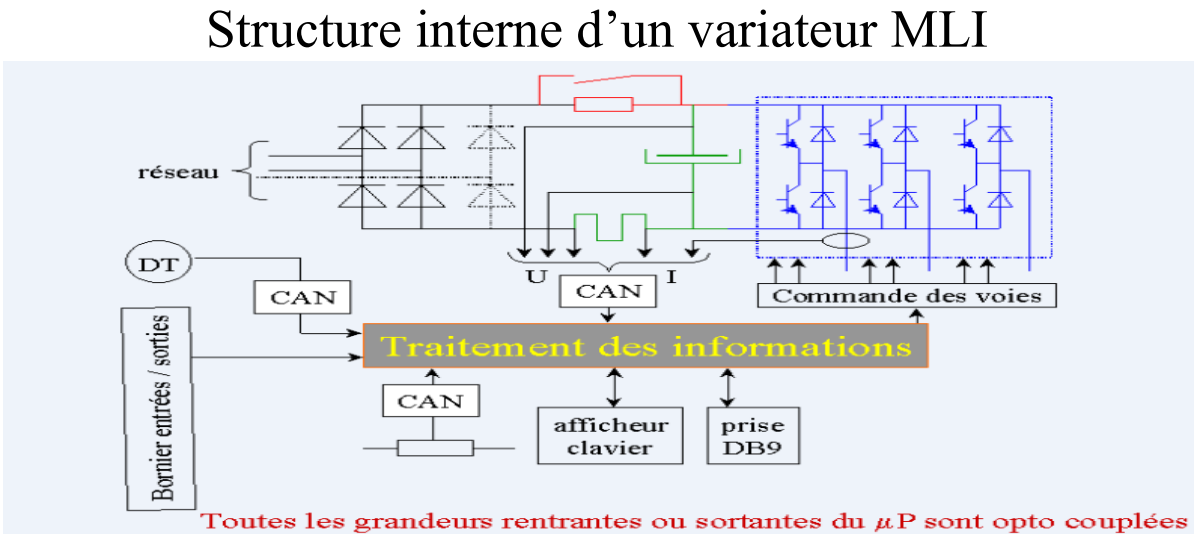


Figure (Ⅳ.4) : redresseur et un onduleur autonome à MLI.

IV.2.5. Variateur de vitesse utilisant un redresseur et un onduleur autonome à onde rectangulaire

Ce système à commutation forcée impose une onde rectangulaire de tension ou de courant sur un moteur synchrone ou asynchrone figure (Ⅳ.5). Il est Constitué d'IGBT, de MOSFET ou de GTO.

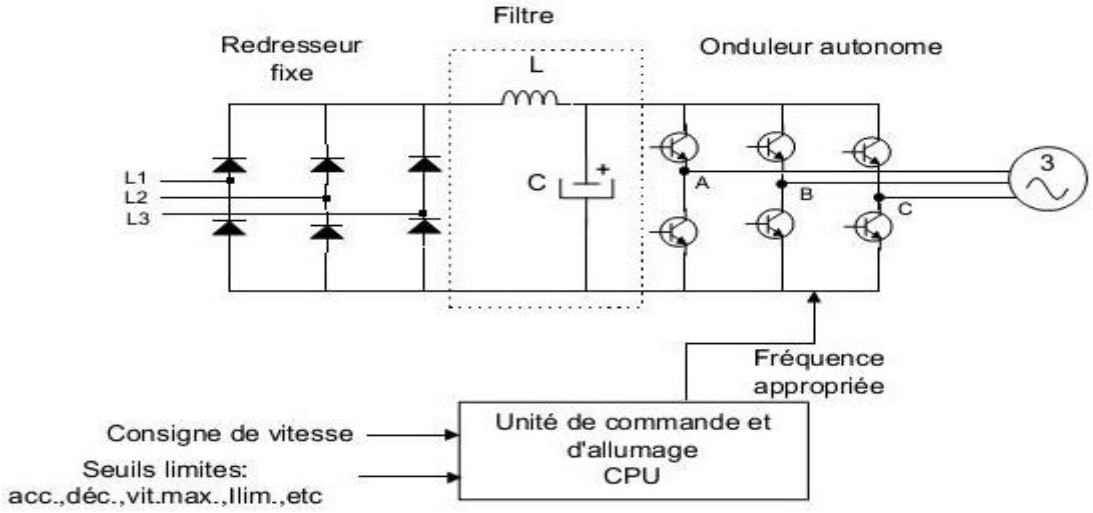
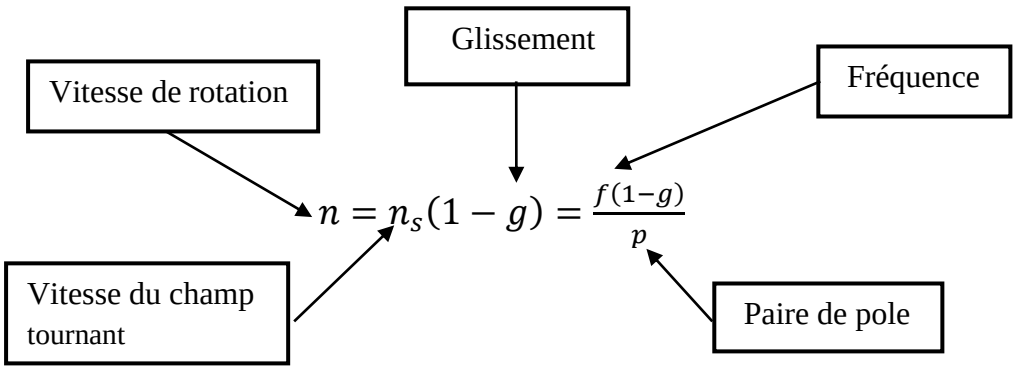


Figure (Ⅳ.5) :Variateur de vitesse type redresseur et un onduleur autonome.

IV.3. Les principes des variations de vitesse des moteurs asynchrones



Pour faire varie la vitesse il faut :

- Modifier le nombre de pole.
- Le glissement.
- La fréquence d'alimentation.
- Couplage de pôles.

- **Action sur les pôles :**

$$n = \frac{f(1-g)}{p}$$

- P est un nombre entier.
- Les différentes vitesses seront des multiples.
- Dans la pratique on limite la variation à deux vitesses (PV et GV).
- Le moteur est plus volumineux et plus cher.

On parle de variation par couplage de pôles 2 technologies sont utilisées suivant le rapport $\frac{GV}{PV}$. [20]

- Rapport quelque : Stator à enroulements séparés.
- Rapport=2 : Stator composé de 6 demi-bobines.

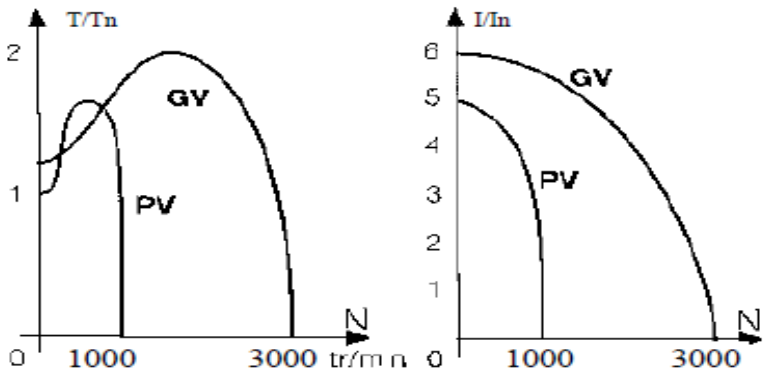


Figure (Ⅳ.6) : Caractéristiques du couple et de courant en fonction de la vitesse.

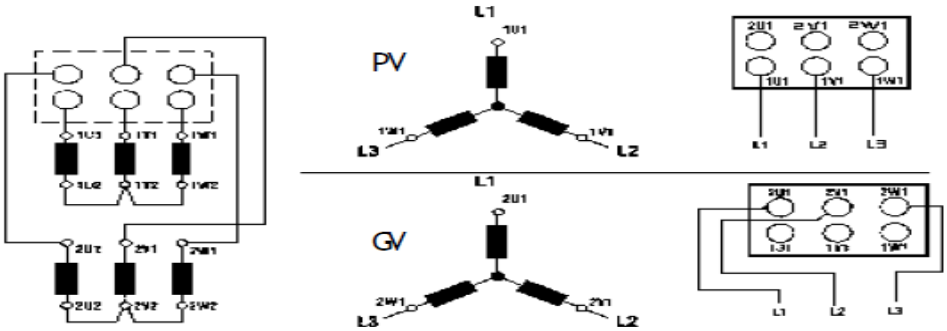


Figure (Ⅳ.7) : Rapport GV/PV quelconque.

En grande vitesse les enroulements PV supportent des contraintes mécaniques et électrique importantes qui sont prises en compte dans la conception de moteur Les puissances absorbées en GV et PV sont souvent très différent es ce qui nécessite un relais de protection thermique par vitesse.

- **Action sur le glissement :**
- Au moyen d'un gradateur qui modifie la valeur efficace de la tension statorique.

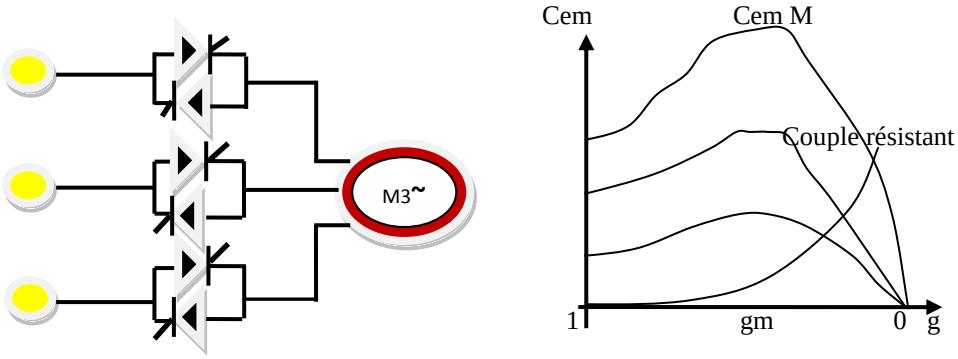


Figure (Ⅳ.8) : gradateur relié avec rotor.

Du fait sa faible de variation de vitesse sur moteur le gradateur statorique est surtout utilisé sur des machines dont le couple résistant est de type parabolique (ventilateur).

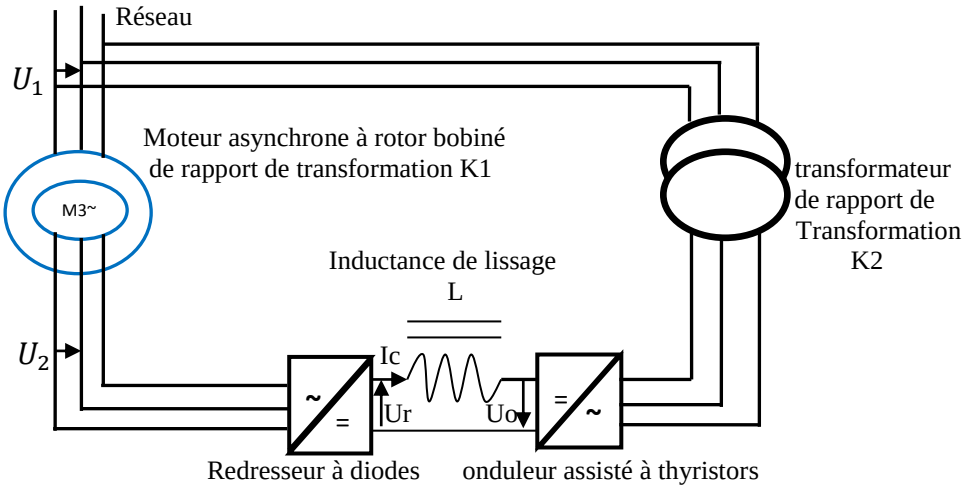


Figure (Ⅳ.9) **:** *Cascade hypo synchrone.*

La récupération de l'énergie rotorique assure une résistance rotorique à un excellent rendement voisin de celui du moteur seul. Le facteur de puissance de la cascade est plus faible que celui du moteur seul et il ya nécessitée de l'élever avec une batterie de condensateurs. La cascade ne peut démarrer seule : il est nécessaire de prévoir un dispositif annexe de démarrage par résistances rotoriques.[20]

- **Action sur la fréquence**

Agir sur la fréquence modifie la vitesse de synchronisme ainsi que le point de fonctionnement $n_s = \frac{f}{p}$.

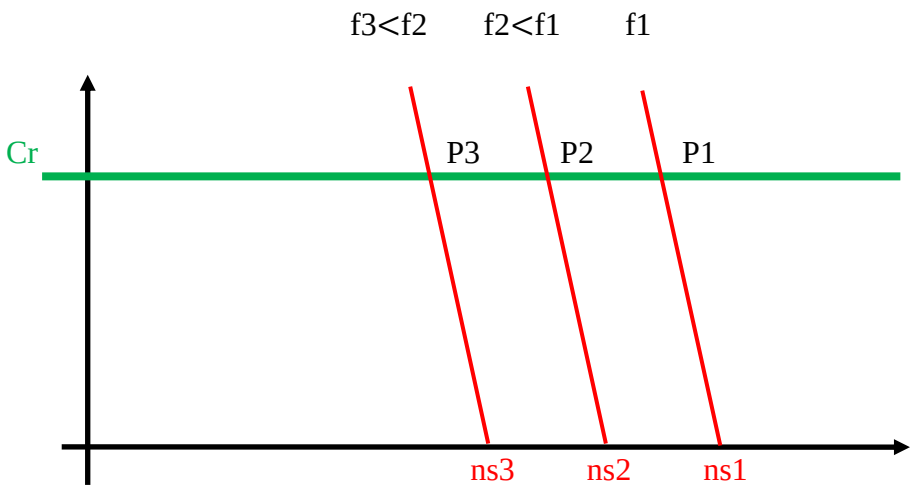


Figure (Ⅳ.10) : relation entre la fréquence et la vitesse synchronisme.

On distingue :

- La conversion directe par cycloconvertisseur .

.

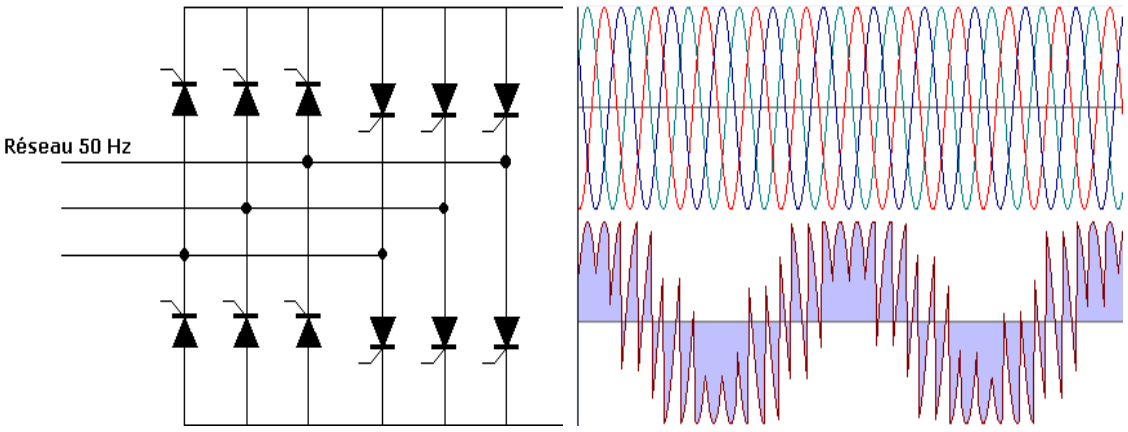


Figure (Ⅳ.11) : Conversion directe par cycloconvertisseur.

C'est un convertisseur de fréquence dont la fréquence de sortie est faible devant celle du réseau d'alimentation le montage complet nécessite 36 thyristors pour une machine triphasée.

- La conversion indirecte par variateur de vitesse à commande scalaire ou vectorielle.

- Commande scalaire :

Pour une bonne maitrise de l'équipement on cherche à conserver un couple moteur maximal constant a l 'aide du modèle équivalent, on a obtenu l'expression :

$\frac{v}{f}$. Est représentatif du flux magnétisant.

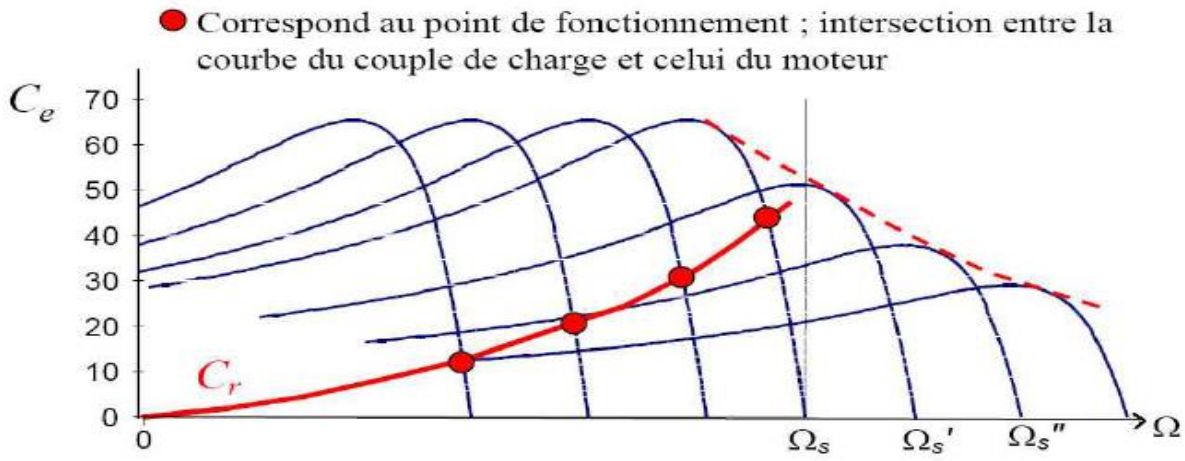


Figure (Ⅳ.12) **:** *Déplacement de la caractéristique couple –vitesse en fonction de la fréquence d'alimentation.*

IV.4. Critères de choix d'un variateur

L'ensemble moto-variateur doit être choisi pour:

- Vaincre le couple résistant de la machine entraînée dans toute la plage de vitesse utilisée.
- Fournir le couple accélérateur nécessaire.
- Fournir le couple de freinage éventuellement nécessaire pour décélérer rapidement,
- Respecter la gamme de vitesse imposée par le procédé.

Il faut prendre en compte, en plus, le fonctionnement permanent ou cyclique de l'application et des conditions d'environnement spécifiques à chaque procédé.

Les caractéristiques déterminantes intervenant dans le choix d'un moto-variateur électronique sont:

- **La précision :**

La précision s'exprimant en % de la vitesse affichée est l'écart maximal admissible par rapport à la vitesse de consigne. Cette précision s'étend donc sur toute la gamme de vitesse. La précision de vitesse dépend du type de lecture de la vitesse.

- **La gamme de vitesse :**

La gamme de vitesse est le rapport entre la vitesse maximale et la vitesse minimale de fonctionnement souhaité. Si on demande à un variateur une gamme de vitesse trop importante par rapport à son emploi normal, sa précision se dégrade. Le variateur doit posséder une gamme de vitesse supérieure à celle que réclame l'application.

- **Les quadrants de fonctionnement :**

L'emploi d'un variateur électronique n'exclut pas d'utiliser des moyens conventionnels, mais l'électronique de puissance permet de réaliser les freinages et les inversions de sens de rotation avec souplesse, rapidité, précision et aux moindre frais en consommation d'énergie.

Pour un bon fonctionnement de l'ensemble à mouvoir, il est indispensable de choisir un appareil fonctionnant dans les quadrants désirés.

- **La puissance :**

La puissance d'un variateur est définie par le besoin mécanique de l'application (en régime permanent comme en régime transitoire).

Le calcul de la puissance concerne aussi le moteur qui est le premier maillon à définir.

La puissance du moto-variateur est définie en fonction:

- De la puissance maximale nécessaire au fonctionnement de la machine en régime établi. Le couple délivré doit être supérieur au couple résistant demandé par la mécanique, ceci sur toute la plage de vitesse.
- Du couple de démarrage nécessaire pour la mise en vitesse de la machine dans le temps souhaité. Le couple maximal que peut délivrer l'ensemble moto-variateur doit être supérieur au couple de démarrage.
- Du diagramme de charge en cas de fonctionnement cyclique échauffement très variable dans le temps suivant les phases du mouvement (accélération, régime établi, décélération).

IV.5. Alimentation par cycloconvertisseur

Le schéma du cycloconvertisseur alimentant une machine asynchrone est représenté sur la figure (Ⅳ.13). C'est un convertisseur alternatif-alternatif dont la fréquence de sortie est limitée au tiers de la fréquence du réseau d'alimentation. Ce qui donne des possibilités de réglage meilleures que dans le cas du montage précédent .Il est intéressant de mettre en évidence les limitations apportées par la réaction de ce, dispositif sur le réseau. Ce dernier a un facteur de puissance généralement admis égal à $\cos(\varphi) = 0.8K\cos(\varphi)$, où K : est le coefficient de réglage de l'amplitude de la tension de sortie $K \leq 1\cos(\psi)$: le facteur de puissance de la charge. On voit que le facteur de puissance est d'autant plus dégradé que l'amplitude de la tension de sortie est faible $(K < 1)$, et que le facteur de la charge aussi est mauvais .Pour cela il est préférable d'alimenter la machine à $\cos(\psi)$ = 1, et avec des amplitudes les plus élevées possibles, jusqu'à éventuellement abandonner la référence sinusoïdale au profit d'une onde trapézoïdale. [19]

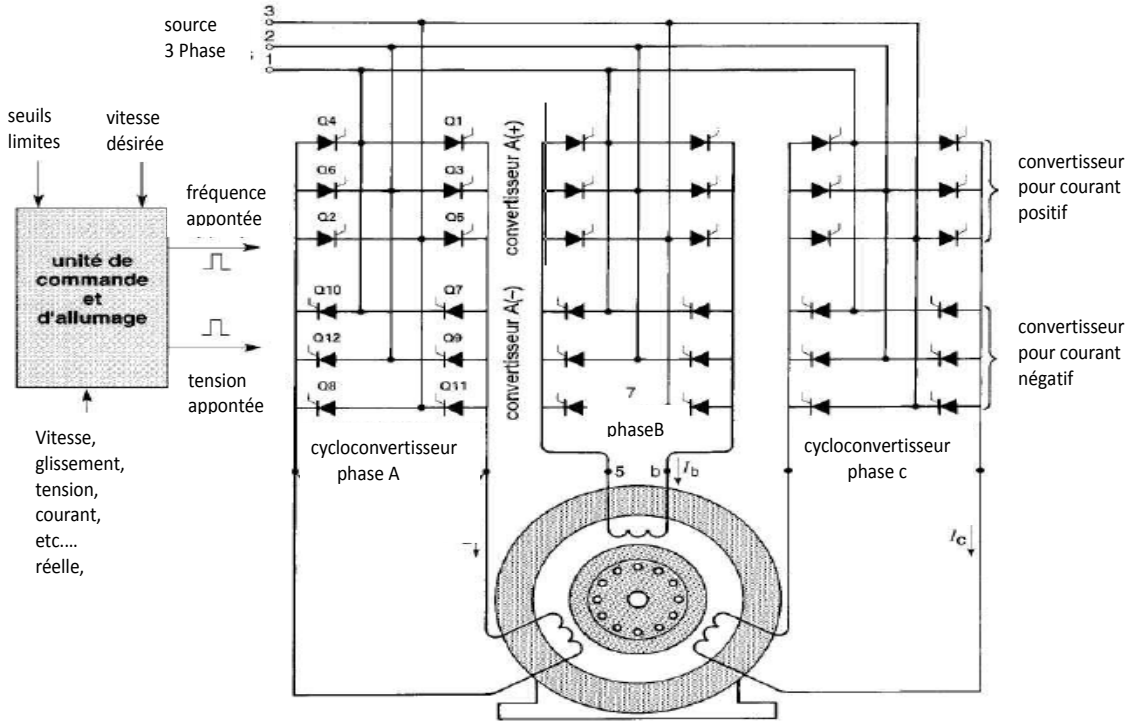


Figure (Ⅳ.13) : Alimentation d'un moteur asynchrone par cycloconvertisseur.

IV.6. Simulation de l'ensemble cycloconvertisseur machine asynchrone

Dans cette simulation la source constant 6.3KV et deux fréquences 50 Hz et 25 Hz :

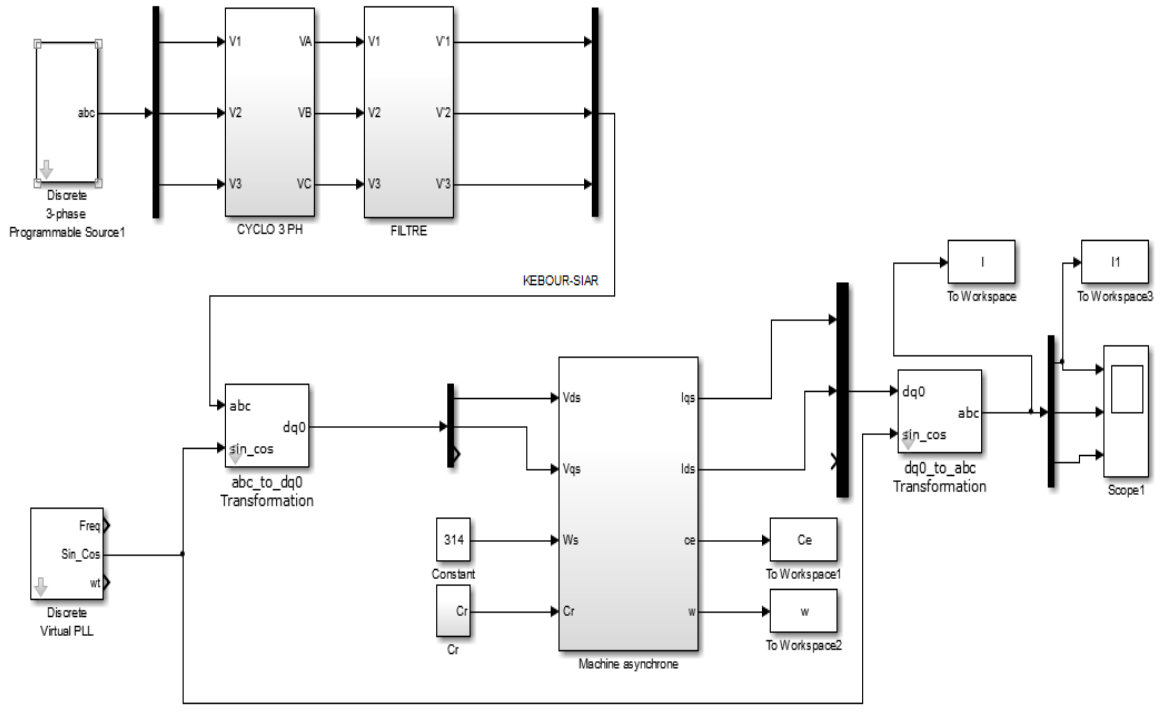
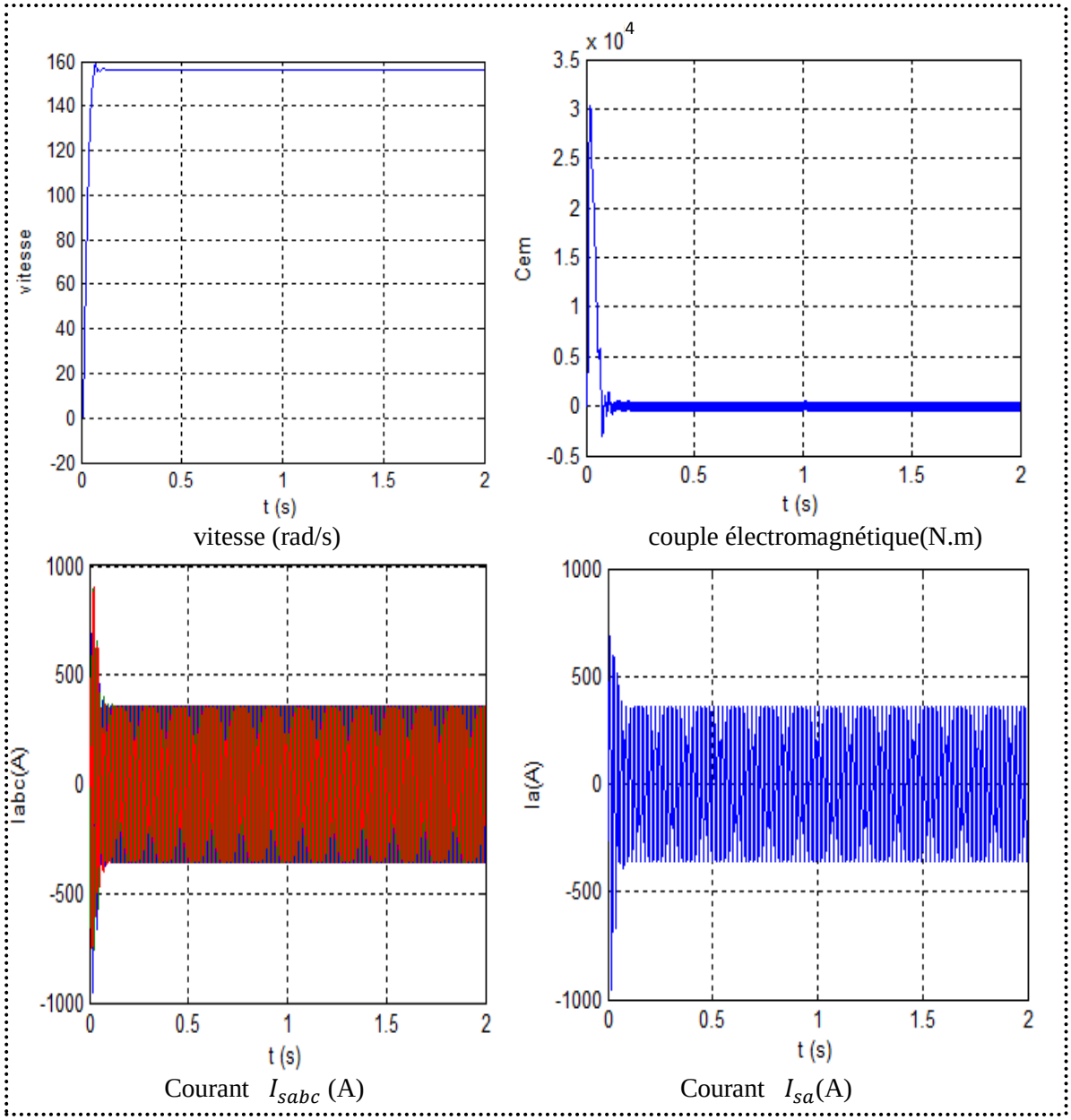


Figure (Ⅳ.14): Simulation de l'ensemble cycloconvertisseur machine asynchrone.



vitesse (rad/s) couple électromagnétique(N.m)

Courant I_{sabc} (A) Courant I_{sa}(A)

Figure (Ⅳ.15) : résultat de simulation a 50 Hz .

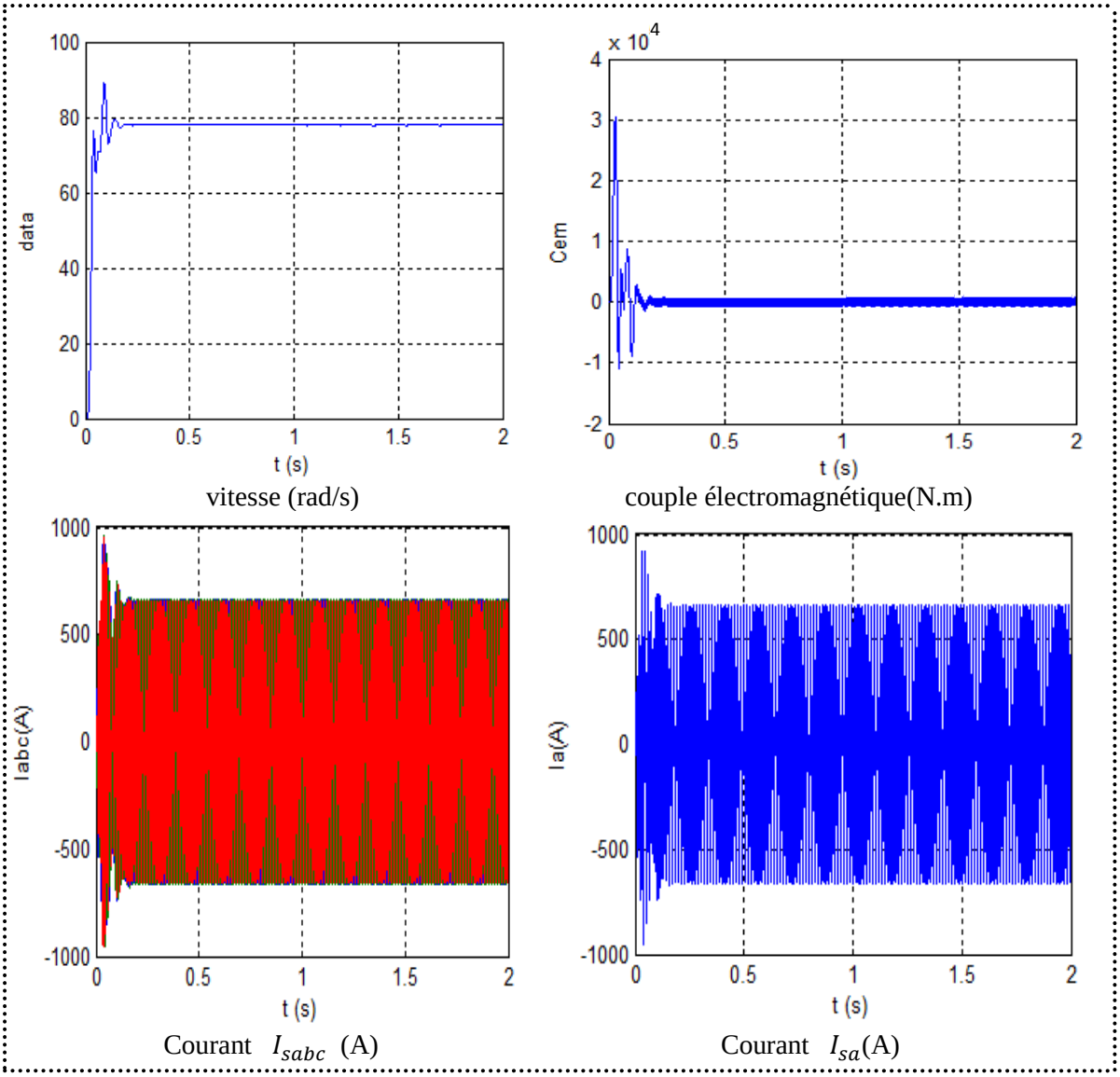


figure (Ⅳ.16) : résultat de simulation a 25 Hz .

IV.7. Interprétation des résultats

D'après les résultants de simulation obtenus, nous pouvons déduire que :

- La simulation que nous avons donnés est con cerne la commande de la association.
- Selon ces résultats, ont été constatés : La diminution de la vitesse de rotation et élévation de courant lorsqu'on varie la fréquence de 50Hz à 25Hz.
- Pour la vitesse et le couple constaté la présence des ondulations ou démarrage.

IV.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les types commandés de la machine asynchrone par un variateur de vitesse triphasé, et la simulation de l'ensemble cycloconvertisseur filtre et machine asynchrones.

La simulation a été réalisée avec succès dans l'environnement simulink. Les résultants de simulation montrent que le variateur de vitesse (cycloconvertisseur machine asynchrone) présente de bonnes performances dynamiques lors de contrôle de la variation de vitesse.

Conclusion générale

Conclusion Général

Durant la formation au niveau de la centrale thermique de Ras Djenat, on a fait une étude générale sur la centrale et sur toutes les parties qui concernent la production de l'énergie électrique. Une étude profonde a été consacre pour le système de pompage. La variation de fréquence dans le but d'obtenir une large plage de vitesse de la pompe a été proposée par l'utilisation des déférents montages des cycloconvertisseurs qui ont remplacé les coupleurs hydrauliques tout en mentionnant les avantages et les inconvénients des uns et des autres.

Ce modeste travail nous a permis de s'introduire au fonctionnement des équipements de pompage (pompes à eau), utilisé au niveau de la centrale thermique de Ras Djenat.

Notre étude est basée sur la variation de vitesse des moteurs par utilisation d un cyclo-convertisseur. On a étudié et simulé, par élaboration d'un modèle de PARK , la machine asynchrone et. Puis on à modélisé et simulé le cycloconvertisseur. Et en fin une simulation globale de comportement de tout le système cycloconvertisseur machine a été réalisé.

L'utilisation de simulink nous a permis d'évaluer le fonctionnement et les performances des ces équipement. On a rencontré beaucoup des difficultés lors de la modélisation de tous ces systèmes notamment le manque de la documentation spécialisé.

Enfin nous avons pu conclure que le cycloconvertisseur peut remplacer le coupleur mais avec des meilleurs performances.

Ce travail nous a donné une valeur ajoutée à notre cursus universitaire et nous à intégré dans le domaine de la recherche et développement au niveau industriel afin d'augmenter la productivité et diminuer les prix de reviens, par la mise en place des nouveau techniques et équipements fiables et robustes pour assurer le bon fonctionnement de la centrale.

Bibliographie

- Documents de formation à la centrale de Ras-Djinet :

[1] : « équipement principale générateur de vapeur »réalise par :***Ghersallah.A et Saada.D***

[2] : ***K.Yassine,A.Lyas*** etude RAS-DJINET.2005.

[3] :***R.Abdessamed ,M .khdjoujdj*** , « modélisation des machine électrique » ,presses de l'Université de Batna 1997.

[4] :***Khemis ,Abd errahmane*** « application de la logique floue type-2 intervalle à la commande adaptative de la machine asynchrone »,thèse de magister, Université de Biskra (livre).

[5] :*B , Pelly ,* ,R(1971)-interscience,NewYork''The theory and design of cycloconverters''(liver).

[6]: électronique de puissance Principes « ***claude Chevassu*** » ENSM.

[7] : ***G.Maizieres*** thèse Docteur « paramètres et régimes optimaux du moteur asynchrone alimente par cycloconvertisseur.

[8] :***Sarra Gamache*** Mémoire« Conception et réalisation d'un cycloconvertisseur monophasé commande par une carie arduino » .

[9] :***C.Ten perng*** « A single-phase hybrid active filers with photovoltaic application » thése de master en genie electrique ,Université de technolgie Malaysie 2006.

[10] :***M .M Swamy*** « passive techniques for reducing input current harmonis»WP.AFD.01 copyight by yaskawa Eletric Amerise,Inc 2005.

[11] : ***A Hamadi*** « contirbution à l'etude des filtres hybrides de poussance utilises pour améliorer la qualité de l'énergie dans le résau électrique de ditribution» ,Thése doctorat.Univerite du Québec 2010.

[12] ***F .Hamoudié*** «contribution aux stratégies de commende avancées d'un filtre actif shunt à quatre fils », thèse Doctorat .Université de batna 2012.

[**13]** :***M.Magraoul*** « validation de techniques de commande d'un filtre actif parallèle », Mémoire comme exigence partielle à l'obtention de la maitrise en génie électrique, Université du Québec 2007.

[**14]** :***S.A.Tadjer*** « Étude d'un système de compensation d'harmonique en utilisant un générateur photovoltaïque GPV », mémoire de magister .université de Boumerdes 2008.

[15] :***S.Rechka*** « Etude de méthodes de filtrage des harmoniques dans les réseaus électriques de distribution » ; Mémoire comme exigence partielle l'obtention d'un diplôme de maitre en sciences appliquées en génie électrique. Université du Québec à trois-Riviéres2002.

[16] :***V.Gheorghe*** « perturbations dans les réseaux électriques » , revue polywpert tehnique N°53 2008.

[17] :***C.Fathe*** « Analyse et amélioration de l'indice de la non-symétrie de tension dans la qualite de l'énergie électrique », Thèse Doctorat .Université de Batne 2006

[18] :***Nekkar Djamel*** « contribution à l'etude des stratigies de commande des filtres actifs triphasés » Université de souk-ahras-2013 /2014.

[19] : Copie de ***Wildi Bypille*** « électrotechnique »(livre).

[20] : ***polytech'nice-sophia*** « la variation de vitesse des moteurs asynchrones ».

Annexe

Pour toute simulation dans ce mémoire, nous avons adoptés une machine asynchrone de puissance 3 Mw dont les caractéristiques suivantes [2] :

- La tension nominale par phase : 6300V.
- Fréquence du réseau : 50 Hz.
- Vitesse nominale : Nn= 1493 tr/mn.
- Nombre de paires de pôles : p = 2.
- Résistance statorique : Rs = 3.985 Ohm.
- Inductance cyclique statorique : Ls = 0.05948 H.
- Résistance rotorique : Rr = 3.105 Ohm.
- Inductance cyclique rotorique : Lr = 0.05948 H
- Inductance mutuelle cyclique: 0.0516 H.
- Moment d’inertie : 63.3kg.m2.
- Coefficient de frottement négligé.