

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

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Département Ingénierie des Systèmes Electriques

Mémoire de Master

Présenté par

IFRAH Karim

En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique en Machines
Electriques

Analyse et diagnostic des défauts convertisseurs dans les systèmes d'excitation des alternateurs

Soutenu le 25 Juin 2018 devant le jury :

Tadger Sid Ahmed	MCB	UMB Boumerdes	Président
Ahriche Aimad	MCA	UMB Boumerdes	Examineur
Boudouda Aimad	MCB	UMB Boumerdes	Examineur
Aibeche Abderrezak	MCB	UMB Boumerdes	Promoteur

Année Universitaire : 2017/2018

CITATION

Puisqu'on ne peut être universel et savoir tout ce qu'on peut savoir sur tout, il faut savoir un peu de tout. Car il est bien plus beau de savoir quelque chose de tout que de savoir tout d'une chose.

PASCAL

Remerciements

Je remercié Allah, le tout puissant, pour m'avoir donné le courage, la patience, la volonté et la force nécessaires, pour affronter toutes les difficultés et obstacles qui se sont hissés au travers de mon chemin, durant toutes mes années d'études.

Mes profonds remerciements vont à l'encontre de mon promoteur Mr. AIBECHE Abderrazak, Maitre de Conférences et enseignant chercheur à l'université de M'Hamed BOUGARA (FSI) pour m'avoir encadré et aidé à élaborer ce travail.

Je tiens aussi à remercier vivement les membres du Jury qui me font l'honneur de juger mon travail et de siéger à ma soutenance.

C'est avec un grand plaisir que j'exprime ma gratitude à tous les enseignants du département Génie Électrique de l'université M'Hamed BOUGARA qui m'ont appris beaucoup de choses durant mon cycle de formation.

Mes sincères remerciements à mes collègues de travail de SONELGAZ et en particulier le District Electrique de Dellys, pour m'avoir encouragé à continuer mes études.

Je remercie enfin toutes les personnes ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Pour toutes ces personnes, soyez-en remerciés du fond du cœur.

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

- ✓ *Mes chers parents qui m'ont toujours soutenu tout le long de ma vie et à qui je souhaite une longue vie,*
- ✓ *Mes frères et ma sœur qui m'ont encouragé à terminer mes études et qui je ne cesserai de remercier,*
- ✓ *A la mémoire de mes grands parents pour lesquels je prie Allah qu'il leur ouvre les portes de son Paradis,*
- ✓ *A la mémoire de GUELLAL Hossame Eddine pour lequel je prie aussi Allah qu'il lui ouvre les portes de son Paradis,*
- ✓ *Quant aux amis, que puis je dire ici pour les remercier ? Ils ont tous été des soutiens d'exception.*

Table des matières

Table des matières		
Liste des figures		
Liste des tableaux		
Notations, symboles, abréviations et acronymes		
Introduction générale		1
Chapitre I		
Généralités sur les systèmes de production d'énergie électrique		
I.1	Introduction	3
I.2	Les sources d'énergie électrique	3
1)	Les énergies renouvelables	3
2)	Les énergies non renouvelables (fossile et nucléaire)	3
I.3	Principe de production d'électricité	3
I.4	Différents procédés de génération de l'électricité	4
I.4.1	Centrales thermique à flamme	4
I.4.1	Centrales nucléaires à fission	4
I.4.3	Centrales hydroélectriques	4
I.4.4	Turbines à combustion	5
I.4.5	Centrales à cycles combinés	5
I.4.6	Centrales électriques à combustion biomasse solide	6
I.4.7	Unités d'incinération des ordures ménagères	7
I.4.8	Fermes éoliennes terrestres et marines	7
I.4.9	Systèmes solaires photovoltaïques	8
I.5	La production d'électricité en Algérie	9
I.5.1	Préambule	9
I.5.2	Parc de production nationale	9
I.5.3	Puissance installée de production d'électricité	10
I.5.4	Perspectives de développement des infrastructures électriques entre 2015-2018	12
I.6	Conclusion	12
Chapitre II		
Systèmes d'excitation des alternateur		
II.1	Introduction	13
II.2	Définition des alternateurs	13
II.2.1	Principe de fonctionnement des alternateurs	13
II.2.2	Nombre de pôles	15
II.2.3	Stator	15
II.2.4	Rotor	16
a)	Rotor à pôles saillants	16
b)	Rotor à pôles lisses	17
II.2.5	Excitatrice	17
II.3	Systèmes d'excitations des alternateurs	17
II.3.1	Excitation des alternateurs	17
II.3.2	Exigences d'un système d'excitation	18
II.3.3	Éléments d'un système d'excitation	19
II.3.4	Différents types de système d'excitation	20
a)	Système d'excitation à courant continu	20
b)	Systèmes d'excitation à courant alternatif	21
c)	Systèmes d'excitation statique	22

II.3.5	Commande et circuits de protection des systèmes d'excitation	23
II.3.6	Régulateurs de tension	23
II.3.7	Circuits de stabilisation d'un système d'excitation	24
II.3.8	Stabilisateur de puissance	25
II.3.9	Compensateur de charge	25
II.4	Conclusion	26

Chapitre III

Impact des défauts du système d'excitation dans un alternateur

III.1	Introduction	27
III.2	Modèle de référence	27
III.3	Impact du système d'excitation sur l'alternateur :	28
III.3.1	Schéma électrique simplifié de l'alternateur et son diagramme vectoriel	28
III.3.2	L'alternateur couplé à un réseau	29
III.3.3	Les impacts de la sur excitation et la sous excitation dans les alternateurs	29
III.4	Les redresseurs	30
III.4.1	Les trois types de montages redresseurs	30
III.4.2	Commutation des redresseurs	31
III.4.3	Redressement non commandé (diodes)	32
III.4.	Fonctionnement des redresseurs simple alternance montage P3	32
III.4.	Redressement parallèle double ou en pont : montage PD3	35
III.4.4	Redressement commandé (Thyristors)	37
III.4.	Allure de la tension redressée (Exemple montage P3 tout thyristors)	37
III.4.	Valeur moyenne de la tension redressée	38
III.4.	Fonctionnement en redresseur ou redresseur inversé (onduleur)	39
III.5	Modélisation de l'alternateur triphasé à pôles lisses	39
III.5.1	Convention de signe et définition des variables	40
III.5.2	Équations électriques	40
III.5.3	Equations magnétiques	41
III.5.4	Définitions des matrices inductance	41
III.5.5	La transformation de Park	42
III.5.6	Equations électriques dans les axes d et q	43
III.5.7	Equations magnétique dans les axes d et q	43
III.5.8	Schéma équivalent de l'alternateur dans le repère de Park	44
III.5.9	L'expression de la puissance	44
III.5.10	L'expression de couple	45
III.6	Impact des défauts système redresseur sur l'excitatrice	45
III.6.1	Nature des défauts redresseur	45
III.6.2	Simulation des défauts au niveau des redresseurs :	46
III.6.3	Comportement d'un redresseur PD3 (diodes) : étude des tensions	46
III.6.	Sans défaut	46
III.6.	Défaut circuit ouvert	47
III.6.	Défaut court-circuit	48
III.6.4	Comportement d'un redresseur PD3 (thyristors) : étude des tensions	49
III.6.5	Comportement d'un redresseur PD3 (thyristors) : étude des courants	49
III.6.	Sans défaut	50
III.6.	Défaut circuit ouvert	52
III.6.	Défaut court-circuit	54
III.7	Conclusion	57

Chapitre IV

Méthode proposée pour le diagnostic de défauts convertisseurs

IV.1	Introduction	58
IV.2	Méthode de diagnostique pour la localisation et la détection des défauts	58
IV.2.1	Mesure des trois courants de phase	59
IV.2.2	Calcul de la valeur moyenne des trois courants	60
IV.2.3	Détermination des indicateurs de défauts	60
IV.2.4	Interprétation de l'évolutions des indicateurs	64
IV.2.5	Signalisation et décision	65
IV.3	Conclusion :	66
	Conclusion générale et perspectives	67
	Bibliographie	68
	Annexes	i

Liste des figures

Chapitre I

Généralités sur les systèmes de production d'énergie électrique

Figure I.1 : Schéma de principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire	4
Figure I.2 : Schéma de principe de fonctionnement d'une centrale thermique	4
Figure I.3 : Schéma de principe de fonctionnement d'une centrale hydroélectrique	5
Figure I.4 : Schéma de principe de fonctionnement d'une TAC	6
Figure I.5 : Schéma de principe de fonctionnement d'une centrale à cycles combinés	6
Figure I.6 : Schéma de principe de fonctionnement d'une centrale à combustion biomasse solide.....	7
Figure I.7 : Schéma de principe de fonctionnement d'une UIO	7
Figure I.8 : Schéma de principe de fonctionnement d'une ferme à éoliennes terrestres	8
Figure I.9 : Schéma de principe de fonctionnement d'une ferme à éoliennes marines	8
Figure I.10 : Schéma de principe de fonctionnement PV	9
Figure I.11 : Graphe de puissance installée par producteur.	10
Figure I.12 : Graphe de puissance installée par type d'équipement.....	11

Chapitre II

Systèmes d'excitation des alternateurs

Figure II.1 : Vue en coupe d'un alternateur couplée à son excitation principale	14
Figure II.2 : Vue d'intérieur d'un stator	15
Figure II.3 : Rotor à pôles saillants	16
Figure II.4 : Rotor à pôles lisses	17
Figure II.5 : Schéma fonctionnel du système d'excitation d'une génératrice synchrone	19
Figure II.6 : Système d'excitation de type DC.....	20
Figure II.7 : Excitation de type AC avec redresseur non commandé	21
Figure II.8 : Excitation de type AC avec redresseur commandé.	21
Figure II.9 : Système d'excitation de type Brushless.....	22
Figure II.10 : Excitatrice statique par redresseur commandé à source de tension.	22
Figure II.11 : Système d'excitation muni de circuits de protection.....	23
Figure II.12 : Modèle simplifié du système d'excitation IEEE-type ST1A.....	24
Figure II.13 : Schéma de stabilisation et régulation de l'excitation	25
Figure II.14 : Schéma du compensateur de charge.....	25

Chapitre III

Impact des défauts du système d'excitation dans un alternateur

Figure III.1 : Alternateur à pôles lisses avec système d'excitation « Brushless »	27
Figure III.2 : Schéma électrique équivalent d'une phase statorique.....	28
Figure III.3 : Représentation vectorielle.	28
Figure III.4 : I en retard par rapport à V	29
Figure III.5 : I en avance par rapport à V.....	30
Figure III.6 : Le décrochage	30
Figure III.7 : Redresseurs triphasés : (a) P3, (b) PD3 et (c) S3	31

Figure III.8 : Commutation instantanée des interrupteurs redresseurs	31
Figure III.9 : Redresseur simple alternance. Montage parallèle P3.....	33
Figure III.10 : Tension redressée du montage P3.....	34
Figure III.11 : Redresseur double alternance. Montage PD3	35
Figure III.12 : Montage PD3 - tension redressée	36
Figure III.13 : Montage P3 tout thyristor	37
Figure III.14 : Montage P3 (tout thyristor) tension redressée	38
Figure III.15 : Montage P3 tout thyristor. Tension moyenne redressée	39
Figure III.16 : Machine synchrone triphasé représentée dans les deux repères (a, b, c) et (d, q)	39
Figure III.17 : Représentation des circuits statorique et rotorique dans le repère (d,q)	42
Figure III.18 : Circuits électriques équivalents de l'alternateur triphasé dans le repère de Park	44
Figure III.19 : (a) Etat normal. (b) ; Etat Circuit-Ouvert. (c) ; Etat Court-Circuit.....	46
Figure III.20 : Tensions composées et tension redressée sur une période ($T = 2\pi$).....	46
Figure III.21 : Tension moyenne redressée.....	46
Figure III.22 : Tensions composées et tension redressée sur une période ($T = 2\pi$).....	47
Figure III.23 : Tension moyenne redressée.....	47
Figure III.24 : Tensions composées et tension redressée sur une période ($T = 2\pi$).....	48
Figure III.25 : Tension moyenne redressée.....	48
Figure III.26 : Tensions redressée et moyenne pour $\alpha = \frac{\pi}{3}$ (C-C) & (C-O).....	49
Figure III.27 : PD3 à thyristors.....	50
Figure III.28 : Courants d'entrée I_a, I_b et I_c	50
Figure III.29 : Courant I_a et courants I_{th1} et I_{th2} sur une période ($T=2\pi$)	50
Figure III.30 : Evolution des courants $I_{abc}(t)$ sans défaut pour $\alpha = 0$ et $\frac{\pi}{12}$	51
Figure III.31 : Evolution des courant $I_{abc}(t)$ avec défaut circuit-ouvert pour $\alpha = 0$ et $\frac{\pi}{12}$	53
Figure III.32 : Evolution des courant $I_{abc}(t)$ avec défaut court-circuit pour $\alpha = 0$ et $\frac{\pi}{12}$	55
Figure III.33 : Allures des courants $i_b(t)$, $I_b(t)$ et $i_c(t)$, $I_c(t)$	56

Chapitre IV

Méthode proposée pour le diagnostic de défauts convertisseurs

Figure IV.1 : Diagramme de la méthode proposée.....	59
Figure IV.2 : Valeurs moyennes des courants d'entrée et les indicateurs avec défauts (C-O) &(C-C) dans un redresseur	63
Figure IV.3 : Organigramme de la méthode proposée.....	65

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Evolution de la puissance (MW) installée 1980-2015 par producteur	10
Tableau I.2 : Evolution de l'énergie électrique (MW) produite 1980-2015	11

Chapitre III

Tableau III.1 : Valeurs moyenne des trois courants pour différentes valeurs α (défaut circuit-ouvert)	54
Tableau III.2 : Valeurs moyenne des trois courants pour différentes valeurs α (défaut court-circuit)	57

Chapitre IV

Tableau IV.1 : Signatures des défauts C-C & C-O dans le redresseur	64
---	----

Notations, symboles, abréviations et acronymes

Abréviations et Acronymes

AC :	Alternating Current (Courant Alternatif)
DC :	Direct Current (Courant Continu)
TAC :	turbine à combustion
CCG :	Cycle Combiné Gaz
UIOM :	Unités Incinération des Ordures Ménagères
PV :	Photovoltaïque
AVR :	Automatic Voltage Regulator :
IEEE :	Institute of Electrical and Electronics Engineers
PSS :	Power System Stabiliser
PD3 :	Pont double triphasé
<i>eff</i> :	Efficace
<i>o</i> :	Moyenne

Notations et Symboles

B :	Induction magnétique
H :	Champ magnétique
W :	Watt
ϕ :	Flux magnétique
ω_r :	Vitesse électrique rotorique
ω_e :	Vitesse de synchronisme
I :	Courant
L :	Inductance
R :	Resistance
K :	coefficient de Kapp de la machine synchrone
N :	nombre de conducteurs
C :	Couple
V :	Tension simple
U :	Tension composés
F :	Facteur de forme
f :	Fréquence.

Introduction générale

Dès son indépendance en 1962, l'Algérie avait opté pour le développement du secteur de l'énergie, dans le cadre d'une politique nationale visant le développement des infrastructures électriques et gazières. Ces dernières années, la demande en électricité a connu une grande évolution et particulièrement en périodes estivale, atteignant des pics de consommation importants. Beaucoup d'efforts ont été fournis par le groupe *Sonelgaz* pour le renforcement de ses capacités de production.

Le système d'énergie électrique est soumis à des perturbations pouvant occasionner des conséquences lourdes sur le réseau électrique tel que l'interruption partielle ou totale de l'alimentation qui peut avoir des impacts négatifs sur la qualité de l'énergie. Les causes de ces perturbations peuvent être de natures diverses, tels que : les fluctuations de consommation, les défauts au niveau des systèmes de production de l'énergie électrique (système d'excitation de l'alternateur), les erreurs humaines dans l'exploitation, ...etc.

Notre projet de fin d'étude est consacré à « l'analyse et le diagnostic des défauts convertisseurs statiques AC/DC appliqués dans les systèmes d'excitation des alternateurs ».

Comme il est impossible d'envisager d'une manière concrète tous les types de défauts, nous avons axé notre contribution sur l'analyse des défaillances des composants électroniques (diodes et thyristors) des redresseurs utilisés dans les systèmes d'excitation. Pour cela, deux types de défauts y seront étudiés : « circuit-ouvert » et « court-circuit » des interrupteurs.

Ce mémoire de fin d'étude comporte quatre chapitres :

Dans le **premier chapitre** nous présentons les différentes sources d'énergie électrique, leur principe de production, certains types des centrales électriques ainsi que la production de l'électricité en Algérie.

Dans le **deuxième chapitre**, nous étudierons les différents systèmes d'excitation et régulation installés dans l'alternateur.

Dans le **troisième chapitre**, nous étudierons l'impact des systèmes d'excitation sur l'alternateur. Après une présentation de fonctionnement des redresseurs et une description physique et mathématique de l'alternateur à pôles lisses, nous terminerons par l'étude des grandeurs perturbations électriques causés par ces défauts.

Dans le **dernier chapitre**, nous développerons une méthode de détection et de localisation des défauts dans les convertisseurs AC/DC du système d'excitation.

Enfin, ce travail sera clôturé par une conclusion générale sur l'ensemble de cette étude et des perspectives à envisager pour l'amélioration de notre méthode.

Chapitre I

Généralités sur les systèmes de production d'énergie électrique

I.1 Introduction

Pour répondre à la consommation croissante d'électricité, il a fallu inventer et construire des usines capables de la produire en grande quantité. Dans ce chapitre nous allons présenter les différentes sources d'énergie électrique, le principe de production de l'électricité, certains types des centrales électriques ainsi que la production de l'électricité en Algérie.

I.2 Les sources d'énergie électrique

Il existe deux types :

1) Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables constituent historiquement les premières sources d'énergies utilisées par les hommes. Fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la terre et les chutes d'eau, ces énergies, par définition, se renouvellent naturellement après avoir été consommées et sont donc inépuisables (au moins sur une grande échelle de temps).

2) Les énergies non renouvelables (fossile et nucléaire)

Les énergies fossiles sont issues de matières vivantes, végétale ou animale, telles que le charbon, le pétrole, le gaz naturel et l'uranium.

I.3 Principe de production d'électricité

Dans le monde, les trois principaux modes de production sont les centrales nucléaires, les centrales à combustibles fossiles et les centrales hydroélectriques. La turbine et l'alternateur sont les deux pièces maîtresses de ces générateurs d'électricité. Dans le cas des usines thermiques, la turbine est entraînée par la vapeur produite dans les chaudières où l'on brûle les combustibles ; alors que dans le cas des usines hydroélectriques, la turbine est animée par la force de l'eau. La turbine est couplée à un alternateur (un grand aimant entouré d'une bobine) qui, en tournant vont produire un courant alternatif [3]. Il existe d'autres méthodes efficaces de production de l'électricité : les panneaux solaires transforment la lumière du soleil en énergie électrique et les éoliennes qui utilisent la force du vent. Il faut savoir qu'il existe également des usines marémotrices qui utilisent la force des marées, la géothermie qui exploite les gisements

d'eau chaude stockés dans le sous-sol terrestre, tandis que les usines à biomasse utilisent les déchets comme source d'énergie.

I.4 Différents procédés de génération de l'électricité

Dans ce qui suit, nous citerons certains procédés d'obtention de l'électricité avec leur principe de fonctionnement [2].

I.4.1 Centrales nucléaires à fission

Une centrale nucléaire génère de l'électricité grâce à l'énergie dégagée par une réaction contrôlée de fission nucléaire, principalement des isotopes de l'Uranium et du Plutonium. Les principales technologies en service utilisent le réacteur de fission comme une chaudière alimentant en chaleur un circuit vapeur qui génère de l'électricité. L'eau fait à la fois office de caloporteur et de modérateur (réacteurs à eau légère).

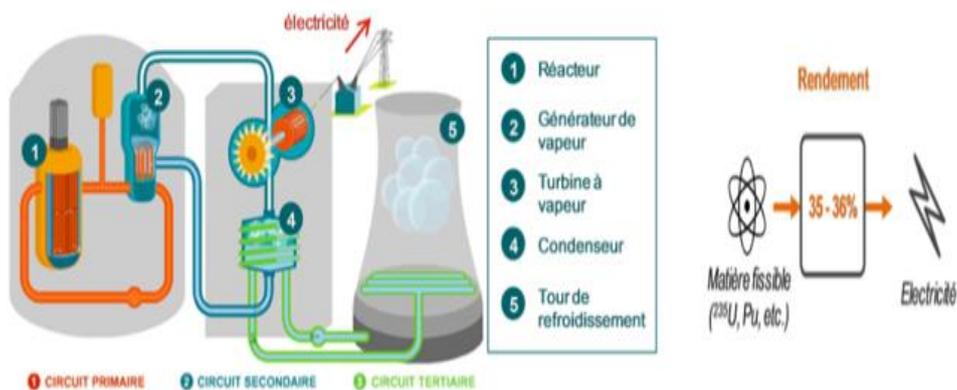


Figure I.1 : Schéma de principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire

I.4.2 Centrales thermiques à flamme

Dans une centrale thermique dite "à flamme", la chaleur de combustion dégagée dans une chaudière permet de générer de la vapeur qui, en circulant dans une turbine reliée à un alternateur, produit de l'électricité. Diverses technologies existent, en fonction du combustible (charbon, fioul, gaz) ou du type de chaudière. Le fonctionnement en cogénération est possible, accroissant ainsi l'efficacité énergétique globale.

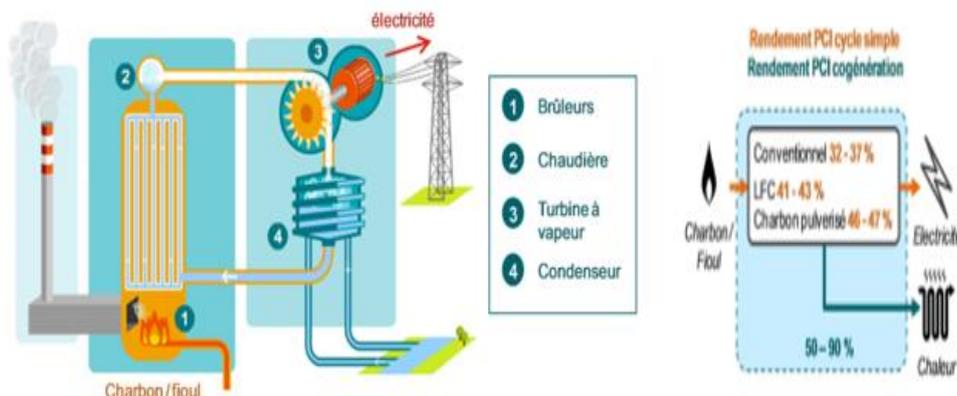


Figure I.2 : Schéma de principe de fonctionnement d'une centrale thermique

I.4.3 Centrales hydroélectriques

Les centrales hydroélectriques exploitent l'énergie potentielle gravitaire de l'eau pour produire de l'électricité. La chute de l'eau, guidée par un réseau de conduites, entraîne des turbines reliées à un alternateur. On distingue les ouvrages hydroélectriques disposant d'un stock d'énergie (barrages ou lacs de retenue d'eau) et ceux produisant au "fil de l'eau". La taille des ouvrages est extrêmement variable, de l'ordre du kW généré pour la "pico-hydro" jusqu'à plusieurs dizaines de MW pour des hauteurs de chutes de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres.

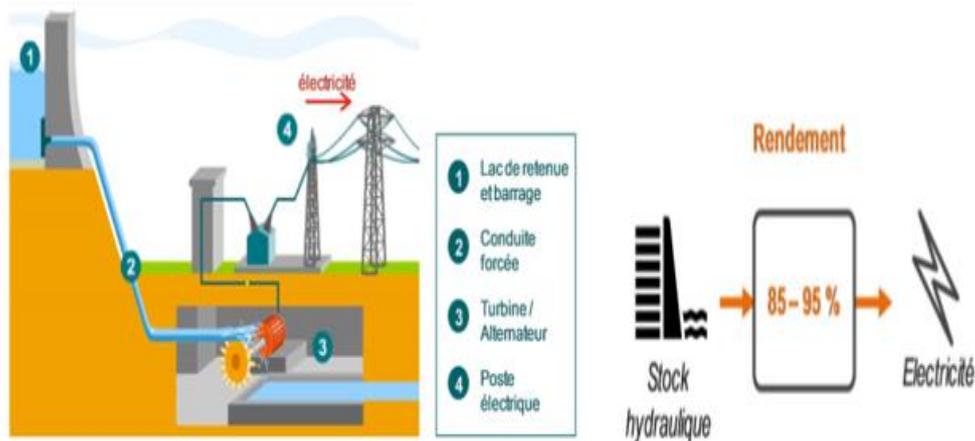


Figure I.3 : Schéma de principe de fonctionnement d'une centrale hydroélectrique

I.4.4 Turbines à combustion

Dans une turbine à combustion (TAC), l'électricité est générée grâce à la circulation de gaz d'échappement issus d'une chambre de combustion et traversant directement la turbine. La chambre de combustion est le plus souvent interne à la turbine : elle génère de la chaleur à partir d'un combustible (gaz ou fioul) et d'air initialement comprimé, alors que le fioul apporte une sécurité de fourniture. Le développement des TAC à gaz est aujourd'hui privilégié, notamment pour des raisons environnementales (émissions de gaz à effet de serre et d'autres éléments polluants). Sur le réseau électrique, la réactivité des TAC est souvent mise à profit pour fournir la pointe électrique. Les TAC sont également répandues pour la production décentralisée dans l'industrie, notamment pour un fonctionnement en cogénération. L'intérêt de la cogénération sur les TAC réside dans la haute température des fumées de combustion, dont la chaleur peut être récupérée et valorisée sans affecter la production électrique.



Figure I.4 : Schéma de principe de fonctionnement d'une TAC

I.4.5 Centrales à cycles combinés

Un cycle combiné consiste à produire de l'électricité sur 2 cycles successifs. Le premier cycle est semblable à celui d'une TAC : le gaz brûlé en présence d'air comprimé actionne la rotation de la turbine reliée à l'alternateur. Dans le second cycle, la chaleur récupérée en sortie de la TAC alimente un circuit vapeur qui produit également de l'électricité avec sa propre turbine. Les centrales à Cycle Combiné Gaz (CCG) présentent l'avantage d'atteindre des rendements élevés, par rapport aux TAC en cycle simple, et de fournir une alternative aux centrales thermiques à flamme avec un moindre impact environnemental.

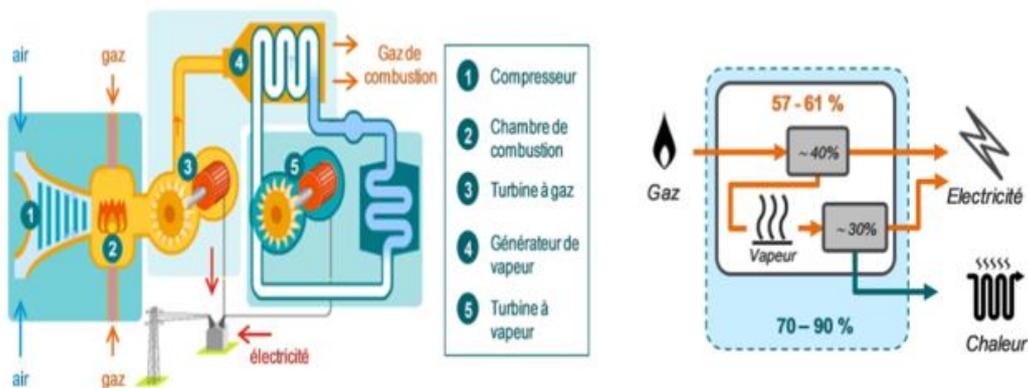


Figure I.5 : Schéma de principe de fonctionnement d'une centrale à cycles combinés

I.4.6 Centrales électriques à combustion biomasse solide

Les centrales à biomasse solide mettent en œuvre une combustion directe de biomasse au sein d'une chaudière, afin de produire de la vapeur à haute température et à haute pression. Cette vapeur entraîne une turbine qui génère de l'électricité via un alternateur. La biomasse solide regroupe le bois, les déchets de bois, les granulés et autres déchets végétaux et animaux (graisses).

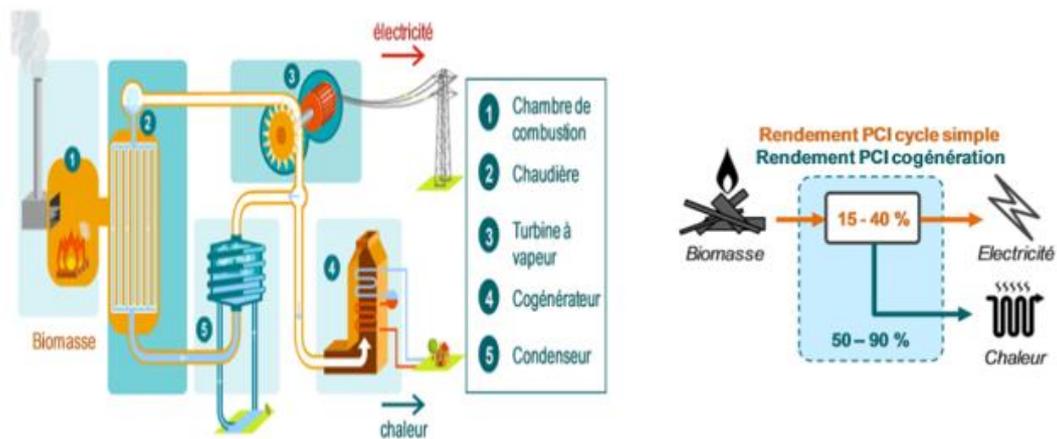


Figure I.6 : Schéma de principe de fonctionnement d'une centrale à combustion biomasse solide

I.4.7 Unités d'incinération des ordures ménagères

L'unités d'incinération des ordures ménagères (UIOM) détruit par combustion des déchets municipaux après leur collecte. L'énergie de combustion dégagée lors de l'incinération peut être valorisée sous forme thermique et/ou électrique. Pour cela, une chaudière récupère la chaleur de combustion du four, et la vapeur produite est soit directement valorisée sous forme de chaleur soit convertie en électricité par un turbo-alternateur. La combustion de déchets produit d'importantes quantités de polluants c'est pourquoi les UIOM sont obligatoirement munies d'importants équipements de dépollution des fumées et des déchets solides.

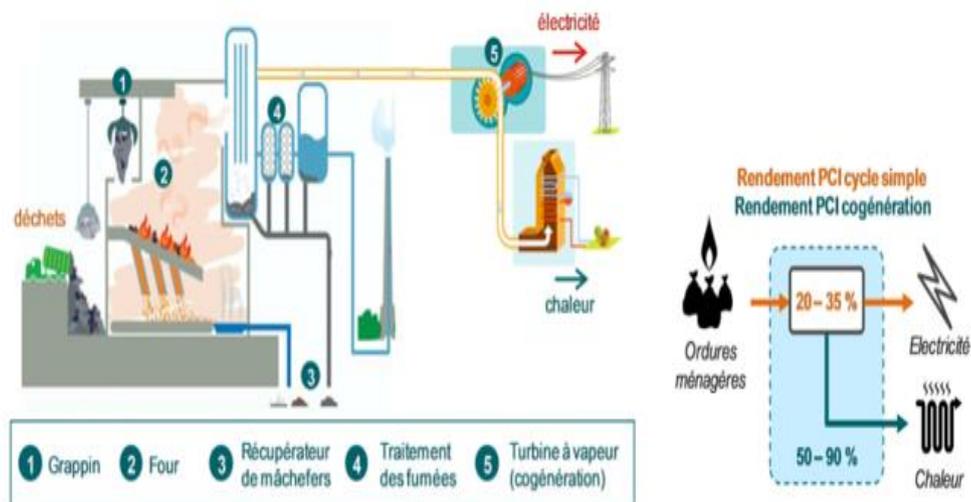


Figure I.7 : Schéma de principe de fonctionnement d'une UIO

I.4.8 Fermes éoliennes terrestres et marines

Une éolienne transforme l'énergie cinétique du vent en électricité via un rotor, lié aux pales, ainsi qu'un dispositif électromécanique. La puissance fournie étant proportionnelle au cube de la vitesse du vent, la performance de l'éolienne dépend de l'emplacement ainsi que de la présence éventuelle d'obstacles. L'énergie du vent peut être captée à partir d'une vitesse de 3

m/s, pour une performance maximale atteinte à partir de 12 à 15 m/s. Les éoliennes sont mises à l'arrêt au-delà d'une vitesse de vent seuil variable selon les modèles.

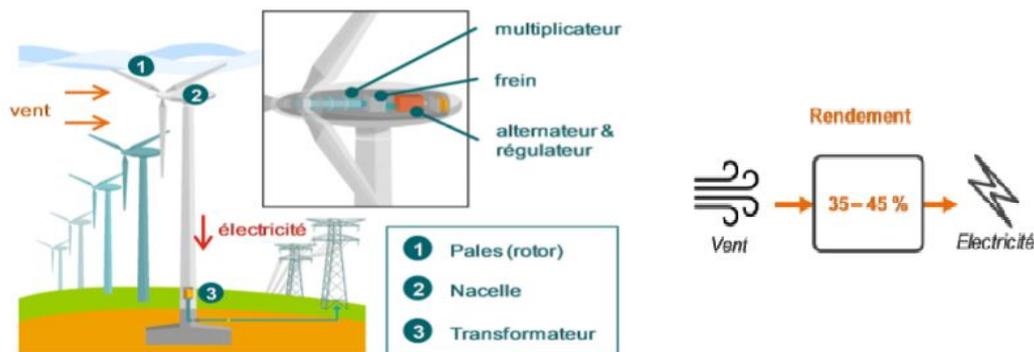


Figure I.8 : Schéma de principe de fonctionnement d'une ferme à éoliennes terrestres

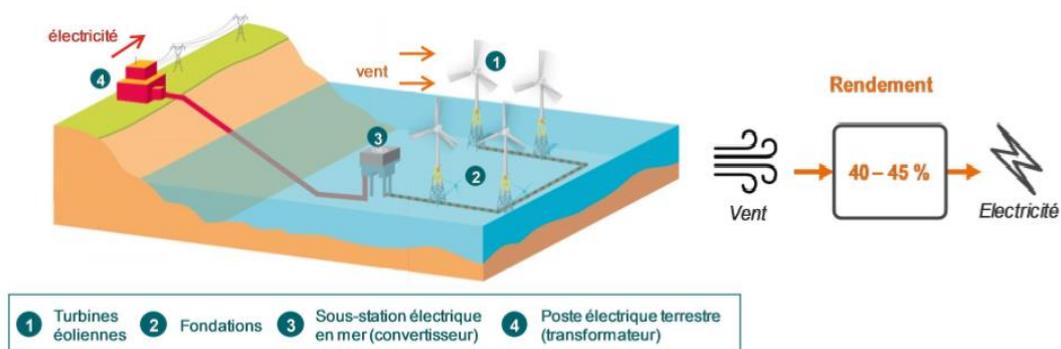


Figure I.9 : Schéma de principe de fonctionnement d'une ferme à éoliennes marines

I.4.9 Systèmes solaires photovoltaïques

Les systèmes solaires photovoltaïques (PV) convertissent l'énergie du rayonnement solaire en électricité grâce à un matériau semi-conducteur qui, sous l'excitation des photons de la lumière, crée un déplacement d'électrons. Les matériaux semi-conducteurs peuvent être cristallins (silicium monocristallin et polycristallin), sous forme de couche mince (silicium amorphe, tellure de cadmium), ou encore faits de matière organique. Les matériaux cristallins sont les plus répandus. Les couches minces ont toutefois des propriétés intéressantes, notamment pour une intégration aux bâtiments (meilleur captage du rayonnement diffus, bonne résistance à l'échauffement, etc...). Les systèmes se présentent sous forme de panneaux disposés au sol ou sur des toitures, avec un nombre variant d'un à plusieurs centaines de panneaux. Le courant délivré étant continu, l'installation d'un onduleur est nécessaire pour délivrer un courant alternatif, notamment dans le cas d'une injection de l'électricité sur le réseau.

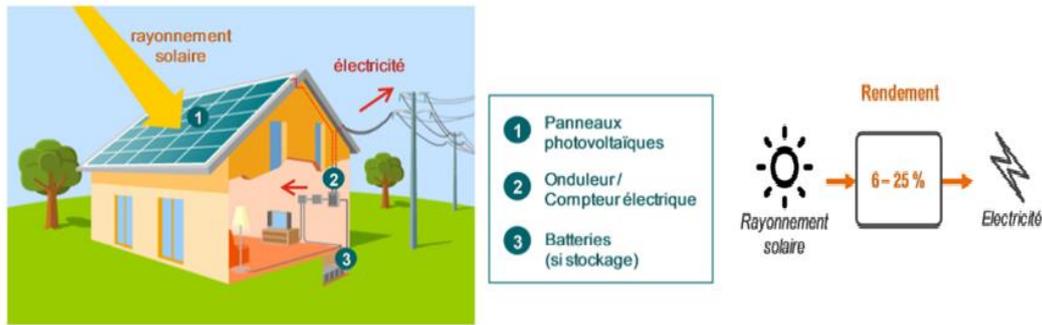


Figure I.10 : Schéma de principe de fonctionnement PV.

I.5 La production d'électricité en Algérie

I.5.1 Préambule

Dès son indépendance, en 1962, l'Algérie avait opté pour le développement du secteur de l'énergie, dans le cadre d'une politique nationale visant le développement des infrastructures électriques et gazières. Cette politique prévoit l'accès de la population à l'électricité et au gaz naturel comme une priorité absolue pour l'amélioration de la qualité de vie du citoyen et de la situation économique du pays. La charte nationale en 1976, annonça la volonté de généralisation de l'électrification des ménages à travers tout le territoire national.

Ces dernières années, la demande en électricité a connu une évolution importante et particulièrement en périodes estivale, atteignant des pics de consommation importants. Cette forte augmentation de la demande est une conséquence directe du changement des habitudes du consommateur et l'amélioration de sa qualité de vie, ainsi que la pulsion donnée au secteur économique et industriel [1].

Jusqu'à-là, l'entreprise *Sonelgaz* détenait le monopole sur la production, le transport, la distribution de l'électricité ainsi que le transport et la distribution du gaz. *Sonelgaz* en tant qu'entreprise publique au terme du monopole conféré par l'Etat, assumait seule la mission de service public dans le domaine de la distribution de l'électricité et du gaz. Sonelgaz est aujourd'hui érigé en Groupe industriel composé de 39 filiales et 5 sociétés en participation. Des filiales métiers sont chargées des activités de production de l'électricité, du transport et de la distribution de l'électricité et du gaz.

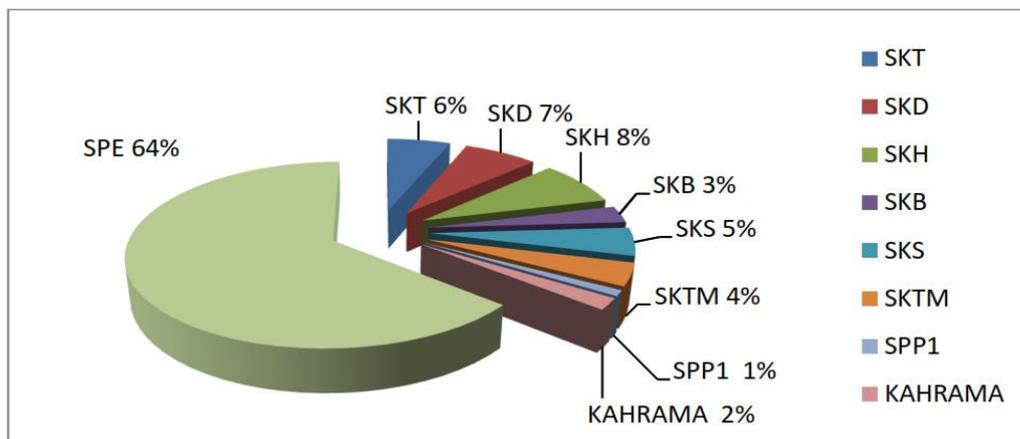
I.5.2 Parc de production nationale

Les impératifs de préservation de l'environnement imposent l'utilisation du gaz naturel à raison de 97% comme énergie primaire pour la production d'électricité par rapport aux autres énergies fossiles jugées polluantes, sachant que la ressource du gaz est largement disponible en Algérie.

Mais la préoccupation environnementale exige aussi de développer d'autres énergies dites propres et renouvelables comme l'énergie solaire et éolienne, dont les gisements sont disponibles et abondants au sud du pays [1].

I.5.3 Puissance installée de production d'électricité

Beaucoup d'efforts ont été fournis par *Sonelgaz* et ses sociétés filiales pour le renforcement des capacités de production, qui a connu ces dernières années une évolution conséquente de la puissance de production d'électricité installée. Celle-ci est passée de 7 492 MW en 2005 à 17 238,6 MW en 2015, soit près de 10 000 MW additionnelle mise en service en dix ans. La répartition de la puissance installée par filiale (par producteur) et par type d'équipement pour l'année 2015 est illustrée dans les graphiques et tableaux ci-après :

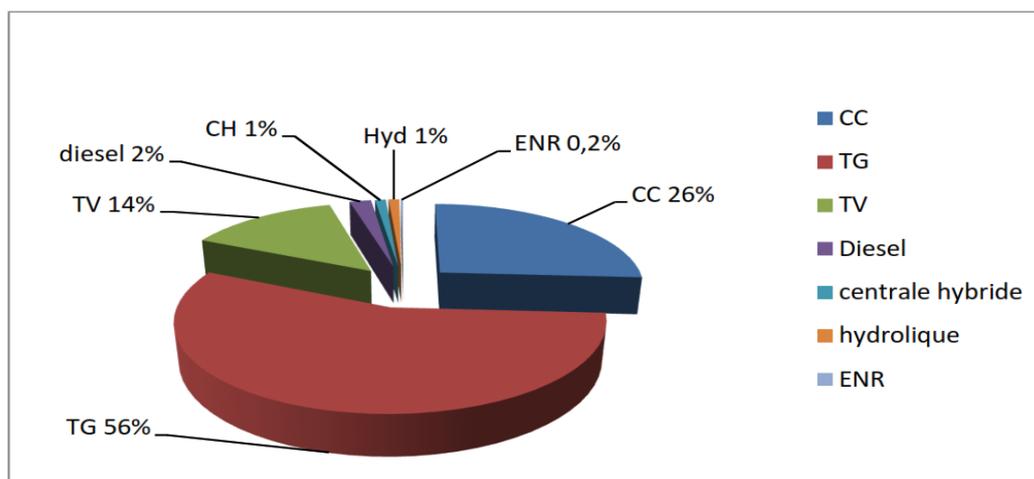


Source : chiffres clés de Sonelgaz pour l'année 2015

Figure I.11 : Graphe de puissance installée par producteur.

	1980	1990	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
SPE	1852	4567	6 762	6 736	6 752	6 844	8 439	8 446	8 506	8 845	9 351	10 131	11 258,7
SKTM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	448	528	681,8
Kahrama	-	-	230	345	345	345	345	345	345	345	345	345	345
SKS	-	-	500	825	825	825	825	825	825	825	825	825	825
SKB	-	-	-	-	489	489	489	489	489	489	489	489	489
SKH	-	-	-	-	-	-	1 227	1 227	1 227	1 227	1 227	1 227	1 227
SPP1	-	-	-	-	-	-	-	150	150	150	150	150	150
SKT	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1 122	1 122	1 122	1 122,1
SKD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1 140	1 140	1 140
Total	1852	4567	7 492	7 906	8 411	8 503	11 325	11 482	11 542	13 003	15 097	15 957	17 238,6

Tableau I.1 : Evolution de la puissance (MW) installée 1980-2015 par producteur



Source : chiffres clés de Sonelgaz pour l'année 2015

Figure I.12 : Graphe de puissance installée par type d'équipement

Type d'équipement	1980	1990	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Thermique vapeur	3 621	8 397	16 624	14 558	14 142	13 384	11 857	9 692	9 654	9 422	9 582	10 221	10 227
Thermique gaz	2 223	6 704	15 679	16 463	17 011	20 339	19 940	19 564	22 055	24 075	17 400	20 211	26 970
Cycle combiné	-	-	386	3 419	5 321	5 704	10 318	15 341	15 701	18 623	27 685	28 444	26 122
Hydraulique	251	135	555	218	226	277	342	173	378	389	98	193	145
Diesel	125	216	281	264	250	283	313	403	464	416	227	248	276
Hybride	-	-	-	-	-	-	-	1	619	1 159	1 155	1 181	889
Eolien	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	19
Photovoltaïque	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	14
Total	6 220	15 452	33 525	34 922	36 950	39 987	42 770	45 174	48 871	54 084	56 147	60 500	64 662

Tableau I.2 : Evolution de l'énergie électrique (MW) produite 1980-2015

Le parc de production national est constitué des centrales électriques de la Société Algérienne de Production de l'Électricité (SPE) et de Shariket Kahraba wa Taket Moutadjadida (SKTM), ainsi que des sociétés en partenariat, à savoir :

- Kahraba Arzew mise en service en 2005 ;
- Shariket Kahraba Skikda « SKS » mise en service en 2006 ;
- Shariket Kahraba Berrouaghia « SKB » (Médéa) mise en service en 2007 ;
- Shariket Kahraba Hadjret Ennouss « SKH » mise en service en 2009 ;
- SPP1 mise en service en 2010 ;
- Shariket Kahraba Terga « SKT » mise en service en 2012 ;
- Shariket Kahraba de Koudiet Edraouch « SKD » mise en service en 2013.

I.5.4 Perspectives de développement des infrastructures électriques entre 2015-2018

Les variations de la consommation d'électricité sont en général analysées sous l'angle de la sécurité d'approvisionnement, il s'agit de garantir la continuité de la fourniture même lors des pics les plus élevés de consommation. Ces variations recouvrent ainsi des enjeux importants en termes de dimensionnement du réseau électrique et du parc de production d'électricité.

Les consommations de l'électricité de pointe se traduisent par des besoins importants en puissance qui nécessitent à leur tour des investissements lourds et coûteux pour le développement des infrastructures de production d'énergie électrique et du réseau de transport et de distribution, qui doivent être dimensionnés de façon permanente pour supporter les besoins extrêmes.

C'est dans ce cadre que *Sonelgaz* et ses filiales prévoit la réalisation entre 2015 et 2018, une capacité de production électrique de 14 049 MW, soit 10 325 MW en cycle combiné et 3 724 MW en turbine à gaz [1].

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes sources d'énergie électrique, la production d'électricité ainsi que les moyens adéquats mis en œuvre. Nous avons constaté aussi les efforts fournis par le groupe *Sonelgaz* pour produire l'électricité suite à une demande toujours croissante ainsi que l'évolution de la puissance installée.

Chapitre II

Systèmes d'excitation des alternateurs

II.1 Introduction

À la suite de la découverte de la loi de l'induction par Faraday, les scientifiques et les techniciens du 19e siècle ne tardèrent pas à inventer et à construire toutes sortes de machines pouvant générer de l'électricité par des moyens mécaniques.

Les alternateurs sont la source primaire de toute l'énergie électrique que nous consommons. Ces machines constituent les plus gros convertisseurs d'énergie au monde. Elles transforment l'énergie mécanique en énergie électrique avec des puissances allant jusqu'à 1500 MW.

Historiquement, le rôle du système d'excitation dans l'amélioration des performances du système de production n'a pas cessé de se développer. Auparavant, les systèmes d'excitation intervenaient manuellement dans la régulation et le maintien constant de la tension et la puissance réactive en sortie des génératrices. Quand le contrôle de la tension génératrice a été automatisé la première fois, il était lent. Au début des années 1920, l'intégration des régulateurs continus dans les systèmes d'excitations a contribué dans le développement de ceux-ci, permis d'obtenir de meilleurs résultats, et suscité l'intérêt d'un grand nombre d'industriels. Depuis ce moment, le système d'excitation a connu une évolution continue [4].

II.2 Définition des alternateurs

II.2.1 Principe de fonctionnement des alternateurs

Le principe de fonctionnement de ces machines est toujours basé sur le mouvement relatif d'une bobine en forme de cadre par rapport à un champ magnétique. Pendant le déplacement de l'aimant, un courant prend naissance dans la bobine, ce courant est appelé : *courant induit*. Ce même résultat peut être obtenu si on remplace l'aimant par un électro aimant. Pour qu'un courant induit prenne naissance dans une bobine, il faut qu'elle soit soumise à une *variation de flux* ($\Delta\phi$).

- La bobine qui produit le flux est appelée : *inducteur*.
- La bobine dans laquelle prend naissance le courant induit est appelée : *induit*.

Les alternateurs commerciaux sont construits avec un inducteur fixe ou un inducteur rotatif. L'inducteur est composé de deux ou plusieurs pôles produisant un champ magnétique constant.

Un alternateur à inducteur fixe à la même apparence extérieure qu'une génératrice à courant continu. Les pôles saillants produisent le champ magnétique qui est coupé par les conducteurs situés sur l'induit. L'induit porte un enroulement triphasé dont les bornes sont connectées à trois bagues montées sur l'arbre. Un groupe de balais fixes recueille la tension triphasée qui est appliquée à la charge. L'induit est entraîné par un moteur ou toute autre source de force motrice. La valeur de la tension triphasée dépend de la vitesse de rotation et de l'intensité du champ magnétique. La fréquence dépend de la vitesse et du nombre de pôles de l'inducteur.

Les alternateurs à inducteur fixe sont utilisés pour des puissances inférieures à 5 kVA. Pour des puissances plus importantes, il est plus économique, plus sécuritaire et plus pratique d'employer un inducteur tournant.

Un alternateur à inducteur tournant possède un induit fixe, appelé *stator*. Cette construction est plus avantageuse car elle permet d'alimenter directement le circuit d'utilisation sans passer par les bagues de fortes dimensions qui seraient requises avec un induit tournant. De plus, l'isolement des bobinages du stator est grandement simplifié du fait qu'ils ne sont soumis à aucune force centrifuge [8].

Une génératrice à courant continu, appelée excitatrice, habituellement montée sur le même arbre que l'alternateur, fournit le courant d'excitation aux électroaimants inducteurs.

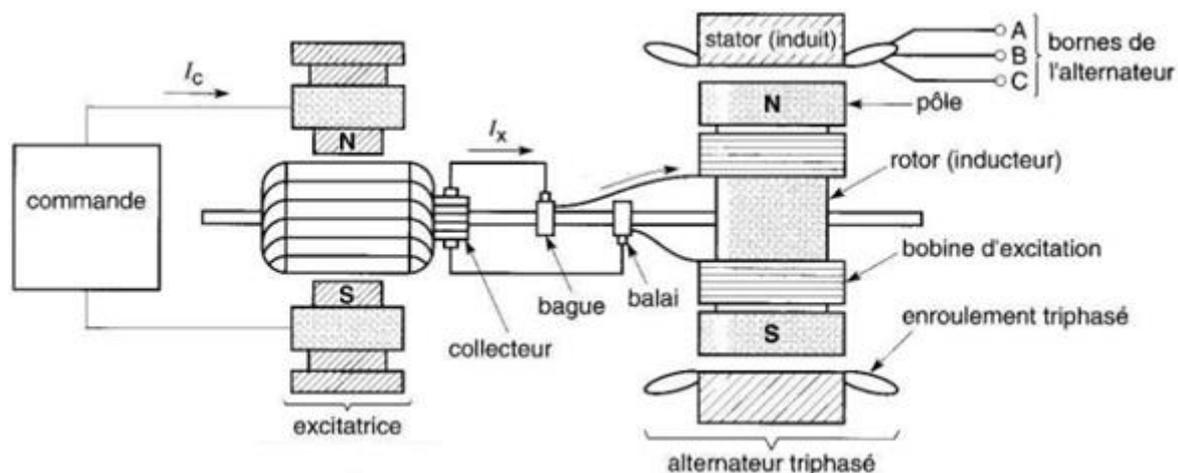


Figure II.1: Vue en coupe d'un alternateur couplée à son excitation principale

La figure II.1 montre les parties principales d'un alternateur à inducteur tournant. Pour alimenter le rotor par le courant I_x , les balais frottant sur le collecteur de l'excitatrice doivent être raccordés à un deuxième groupe de balais qui glissent sur deux bagues. Nous verrons plus loin que dans les systèmes modernes, on remplace l'excitatrice à courant-continu par un générateur à courant alternatif et un redresseur monté sur l'arbre.

II.2.2 Nombre de pôles

Le nombre de pôles d'un alternateur est imposé par la vitesse du rotor et par la fréquence. Ainsi, considérons un conducteur de l'induit devant lequel se déplacent les pôles nord et les pôles sud du rotor. Si la tension induite dans ce conducteur prend une série de valeurs positives pendant le passage d'un pôle nord, elle prendra une série de valeurs égales, mais négatives, pendant le passage d'un pôle sud. Chaque fois qu'une paire de pôles se déplace devant un conducteur, la tension induite décrit donc un cycle complet [8].

On en déduit que la fréquence est donnée par l'équation :

$$f = \frac{np}{120} \quad (\text{II.1})$$

Où :

f : fréquence de la tension induite [Hz]

p : nombre de pôles du rotor

n : vitesse du rotor [tr/min]

II.2.3 Stator

Il se compose d'un noyau feuilleté ayant la forme d'un cylindre vide et comportant des encoches dans lesquelles sont logés les conducteurs d'un enroulement triphasé (Fig.II.2). L'enroulement est toujours raccordé en étoile et le neutre est accessible pour permettre sa mise à la terre.



Figure II.2 : Vue d'intérieur d'un stator

On préfère la connexion en étoile :

a) La tension par phase étant seulement

$1/\sqrt{3}$, ou 58 % de celle entre les lignes, on peut réduire l'épaisseur de l'isolant dans les encoches. Cela permet de grossir la section des conducteurs et, par conséquent, la puissance de la machine.

b) Lorsque l'alternateur est en charge, la tension induite par phase se déforme de sorte que la forme d'onde n'est plus tout à fait sinusoïdale. Cette distorsion est due principalement à la présence des tensions de troisième harmonique qui se superposent à la tension fondamentale. Avec une connexion en étoile, les troisièmes harmoniques n'apparaissent pas entre les fils de ligne, car elles s'annulent. Par contre, si l'on utilise une connexion en triangle, ces tensions s'additionnent et provoquent la circulation d'un courant dans le triangle et, par conséquent, occasionnent des pertes Joule supplémentaires.

La tension nominale (ligne-ligne) d'un alternateur varie selon sa puissance. En général, plus la capacité de la machine est grande, plus sa tension est élevée. Cependant, la tension nominale

d'un alternateur dépasse rarement 25 kV, car autrement le volume de l'isolation des conducteurs dans les encoches deviendrait prohibitif.

II.2.4 Rotor

Si l'on fait tourner le rotor, les lignes de flux produites par les pôles inducteurs balaient les trois enroulements du stator et induisent dans ceux-ci des tensions triphasées. Les rotors sont à pôles saillants ou à pôles lisses selon qu'ils soient entraînés à basse vitesse par des turbines hydrauliques ou à haute vitesse par des turbines à vapeur ou à gaz [8].

a) Rotor à pôles saillants

Afin d'extraire la puissance maximale de la chute d'eau, les turbines hydrauliques des centrales à basse et à moyenne chutes d'eau tournent toujours à basse vitesse : entre 50 et 300 tr/min.

Comme les alternateurs sont raccordés directement aux turbines et puisqu'une fréquence de 50 Hz (ou 60 Hz) est imposée, on doit placer un grand nombre de pôles sur le rotor. Les alternateurs à basse vitesse ont donc toujours un grand diamètre, de façon à donner l'espace nécessaire pour loger le nombre de pôles requis.

Dans ces machines, le rotor est constitué d'une roue en acier montée sur un arbre vertical et sur laquelle sont fixées les pièces polaires (Fig.II.3). Les bobinages d'excitation placés sur les pièces polaires sont constitués de barres de cuivre ordinairement nues, mais isolées entre elles par des

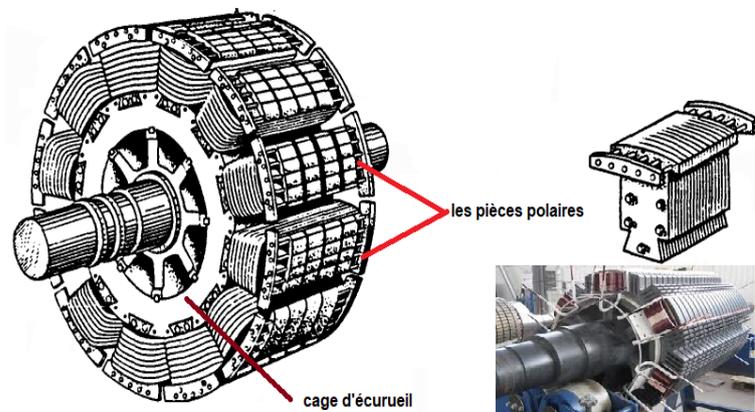


Figure II.3 : Rotor à pôles saillants

bandes de mica. L'emploi de conducteurs nus favorise leur refroidissement. Les bobines sont reliées en série de façon que deux pôles voisins soient de polarités contraires.

En plus de l'enroulement à courant continu, on installe une cage d'écurueil dans la face des pôles. En régime permanent, cet enroulement ne porte aucun courant, car le rotor tourne à la vitesse synchrone. Lorsque la charge de l'alternateur change brusquement, il en résulte une oscillation mécanique du rotor de part et d'autre de la vitesse synchrone et un courant induit se met à circuler transitoirement dans la cage. Ce courant réagit avec le champ et amortit les oscillations du rotor ; pour cette raison, cette cage d'écurueil est appelée enroulement amortisseur. Lorsque la charge triphasée n'est pas équilibrée, l'enroulement amortisseur tend également à combattre le déséquilibre des tensions induites dans le stator et à maintenir une forme d'onde sinusoïdale à ses bornes.

b) Rotor à pôles lisses

Les turbines à vapeur tournent toujours à haute vitesse : 3600 tr/min ou 1800 tr/min sur les réseaux à 60 Hz, et 3000 ou 1500 tr/min sur ceux à 50 Hz. Par conséquent, les alternateurs qu'elles entraînent comportent 2 ou 4 pôles seulement ; on les désigne sous le nom de turbo-alternateurs.

Leur rotor a une forme cylindrique, car les pôles sont formés en plaçant des bobines dans des encoches taillées dans la masse même du rotor (Fig.II.4). Les forces centrifuges intenses dues à la haute vitesse de rotation imposent une limite au diamètre du rotor ; comme, d'autre part, les grandes puissances (500 MW à 1500 MW) nécessitent un gros rotor, on est obligé de lui donner une forme très allongée.

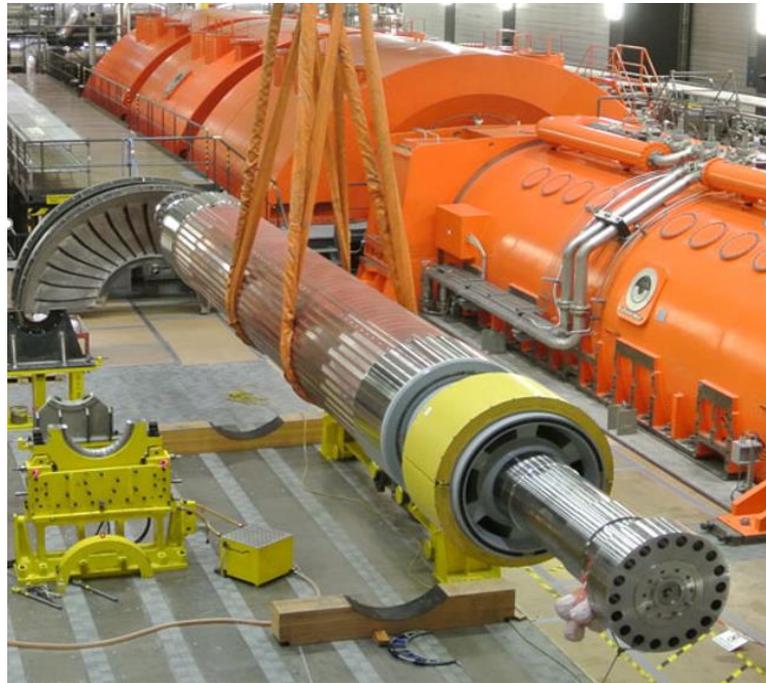


Figure II.4 : Rotor à pôles lisses

II.2.5 Excitatrice

L'excitatrice d'un alternateur puissant constitue un de ses éléments les plus importants. En effet, le champ doit non seulement induire une tension appropriée, mais il doit aussi pouvoir varier rapidement lorsque la charge varie brusquement. La vitesse de réponse est un facteur important pour le maintien de la stabilité du réseau auquel l'alternateur est branché.

Afin d'obtenir une réponse rapide on utilise deux excitatrices : une excitatrice principale et une excitatrice pilote. On peut la régler manuellement ou automatiquement en faisant varier l'intensité du champ inducteur, c'est-à-dire en agissant sur le courant d'excitation, provenant de l'excitatrice pilote.

Dans la section II.3, une étude approfondie sur les systèmes d'excitation des alternateurs est présentée [8].

II.3 Systèmes d'excitations des alternateurs

II.3.1 Excitation des alternateurs

D'après la formule générale de la f.é.m :

$$E = 2,22 K_f K_b f N \Phi \quad (\text{II.2})$$

où :

K_f : coefficient de forme (le champ n'est pas sinusoïdal K_f peut être >1)

K_b : coefficient de bobinage ($K_b < 1$)

f : fréquence en hertz (Hz)

P : nombre de paires de pôles du rotor

n : vitesse en tours seconde

N : nombre de conducteurs

ϕ : flux sous un pôle (weber)

$K = 2,22kfb$: coefficient de Kapp de la machine synchrone (1,6 à 2,9) [8].

$$E = KNf\phi = KNpn\phi$$

La valeur de la tension induite dans un enroulement d'alternateur dépend de trois facteurs principaux :

- La vitesse de rotation de l'alternateur n .
- L'intensité du champ magnétique B .
- La longueur du conducteur placé dans le champ magnétique L .

Etant donné que la vitesse de rotation de l'alternateur doit demeurer constante et que la longueur du conducteur est fixe, le facteur déterminant est l'intensité du champ magnétique. L'intensité du champ magnétique ou densité des lignes de force dépend du courant d'excitation, qui lui-même dépend de la tension d'excitation (loi d'Ohm). C'est donc dire qu'en faisant varier le courant d'excitation (ou la tension), on peut faire varier la tension aux bornes de l'alternateur. Le système d'excitation de l'alternateur est la source du courant continu créant le champ dans l'alternateur [5].

II.3.2 Exigences d'un système d'excitation

Les exigences de performances d'un système d'excitation sont principalement déterminées par la génératrice synchrone et aussi le circuit d'alimentation. La condition de base est que le système d'excitation doit ajuster le courant de champ afin d'exciter la génératrice synchrone et maintenir la tension de sortie selon la consigne.

La fonction de base de l'excitation est alors de fournir le courant continu aux bobines créant un champ au rotor de la machine synchrone ; de plus, l'excitation assure le contrôle de la tension et de la puissance réactive, ainsi que certaines fonctions protectrices du réseau (respect des limites des machines), le tout par le biais de la tension d'excitation.

D'un point de vue d'installation électrique, le système d'excitation devrait contribuer au contrôle efficace de la tension et à l'amélioration de la stabilité du système. Cela implique aussi le maintien de la stabilité transitoire en cas de perturbations. L'importance et le rôle du système d'excitation ont été élargis en utilisant des signaux de stabilisation auxiliaires. En plus de la régulation de tension de sortie, l'excitation permettait d'amortir les oscillations de puissance du système à l'aide de stabilisateur de puissance (*power system stabilizer*). Les systèmes

d'excitation modernes sont actuellement capables de fournir une réponse pratiquement instantanée même avec des tensions élevées (HT) [6], [11].

Pour remplir son rôle de manière satisfaisante, le système d'excitation doit répondre aux exigences suivantes :

- Respecter les critères souhaités du cahier de charge.
- Fournir les limitations nécessaires afin d'assurer la protection de l'excitatrice elle-même, de la génératrice et des autres équipements (turbine, réseau, ... etc).
- Respecter les exigences tout en assurant une flexibilité d'opération (régulation, stabilisation, ... etc)
- Assurer la fiabilité et la validité des équipements.

II.3.3 Éléments d'un système d'excitation

Le schéma ci-dessous (Fig.II.5) représente les différentes parties et les éléments d'un système d'excitation appliqué pour les génératrices synchrones [14].

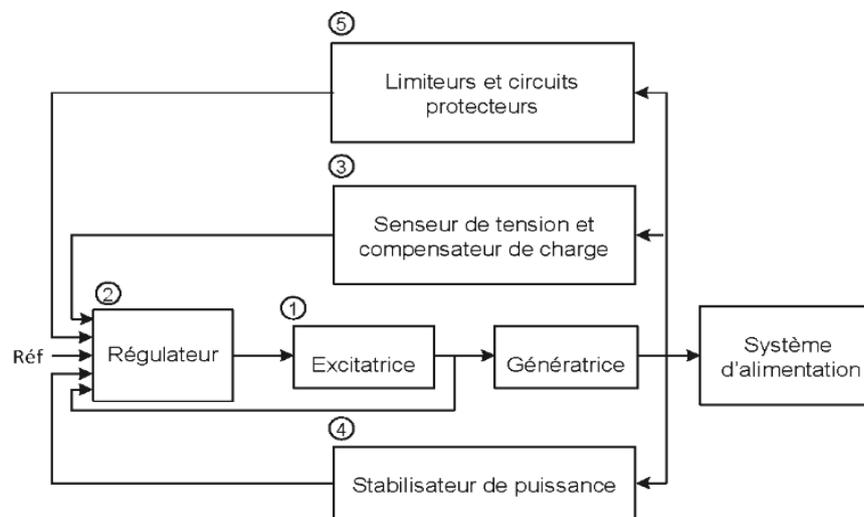


Figure II.5 : Schéma fonctionnel du système d'excitation d'une génératrice synchrone

- ❖ *L'excitatrice (1) :* fournit la puissance aux bobines qui créent le champ au rotor.

Typiquement, un générateur d'une puissance de 600MW nécessite une excitatrice d'environ 1MW.

- ❖ *Le régulateur (2) :* permet de contrôler et stabiliser la tension d'excitation.

- ❖ *Le transformateur de tension et le compensateur de charge (3) :* Le transformateur de tension mesure la tension aux bornes de la machine. Cette tension filtrée et redressée en une valeur continue. Ensuite, cette mesure est comparée à la référence (tension voulue aux bornes

de la machine). Le compensateur de charge est un élément additionnel et facultatif qui permet de conserver une tension constante en un point particulier distant des bornes de la machine.

❖ *Le stabilisateur de puissance (PSS) (4)* : il fournit un signal d'entrée additionnel au régulateur du système d'excitation afin d'amortir les oscillations de puissance à basse fréquence du réseau électrique.

❖ *Les limiteurs et les circuits protecteurs (5)* : sont toute une gamme de moyens qui s'assurent que les limites du circuit d'excitation et du générateur ne sont pas outre passées. Par exemple, limitation du courant d'excitation, limiteur de surexcitation, limiteur de tension et limiteur de sous-excitation.

II.3.4 Différents types de système d'excitation

Dépendamment de la source d'alimentation, les systèmes d'excitations pour les génératrices synchrones se distinguent selon trois types essentiels [10] :

- Systèmes d'excitation à courant continu (DC).
- Systèmes d'excitation à courant alternatif (AC).
- Systèmes d'excitation statiques.

Dans cette section, ces différents types d'excitation seront décrits suivant la forme et la structure générale de chacun.

a) Système d'excitation à courant continu

Cette catégorie d'excitation utilise une génératrice à courant continu comme source d'excitation, fournissant le courant au niveau du rotor de la génératrice synchrone à travers des bagues collectrices. La génératrice à courant continue est entraînée par un moteur de l'arbre de l'alternateur, et peut être soit auto-excitée, soit excitée séparément.

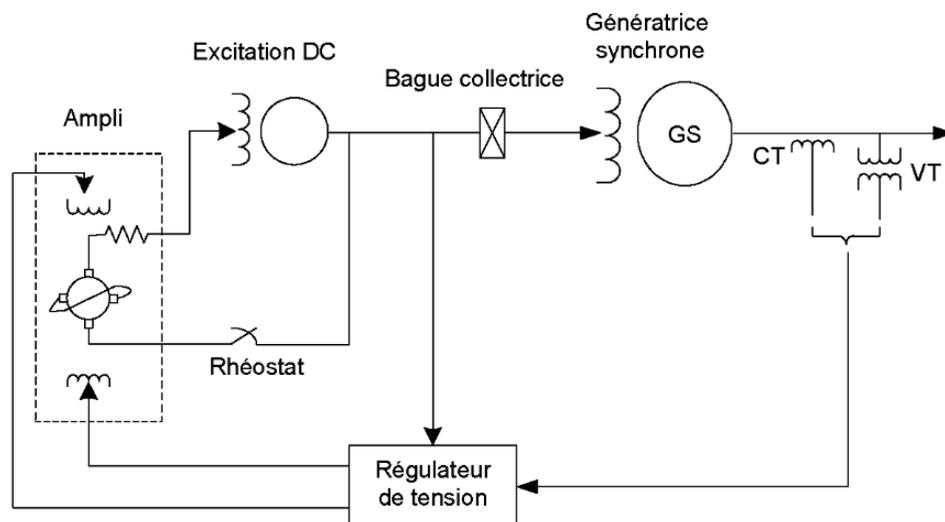


Figure II.6 : Système d'excitation de type DC

b) Systèmes d'excitation à courant alternatif

L'excitatrice à courant alternatif utilise un alternateur associé à un redresseur stationnaire ou tournant pour produire le courant de champ excitant la machine synchrone, le redresseur utilisé peut aussi être soit commandé ou non. Dans le cas d'un redresseur non commandé, le réglage s'effectue sur les enroulements de champs au niveau de l'excitatrice AC.

Les figures II.7-II.8 montrent l'excitatrice de type AC munie d'un redresseur stationnaire non commandé et commandé respectivement.

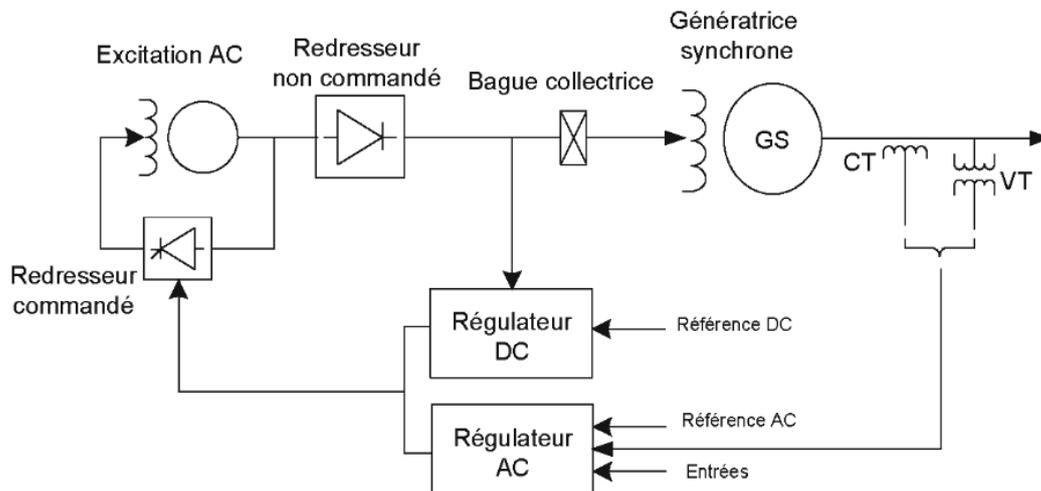


Figure II.7 : Excitation de type AC avec redresseur non commandé

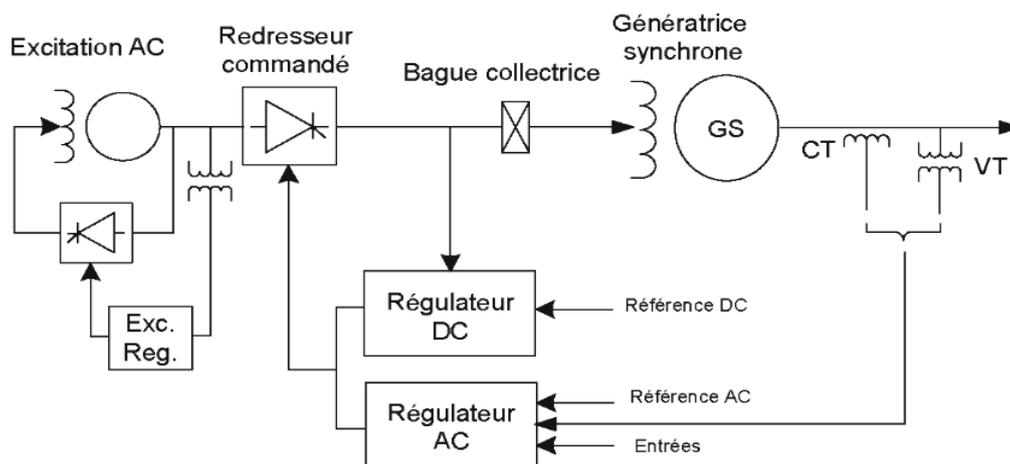


Figure II. 8 : Excitation de type AC avec redresseur commandé.

Dans le cas de l'excitation à courant alternatif avec redresseur tournant, les bagues collectrices sont éliminées et la sortie du redresseur à diodes est directement reliée au rotor alternateur.

La Figure II.9 illustre l'excitation AC de type *Brushless* où l'on observe la structure tournante composée de l'excitatrice principale AC et du redresseur à diodes, tel que la sortie du redresseur de l'excitatrice pilote active le champ à la structure tournante [10], [11].

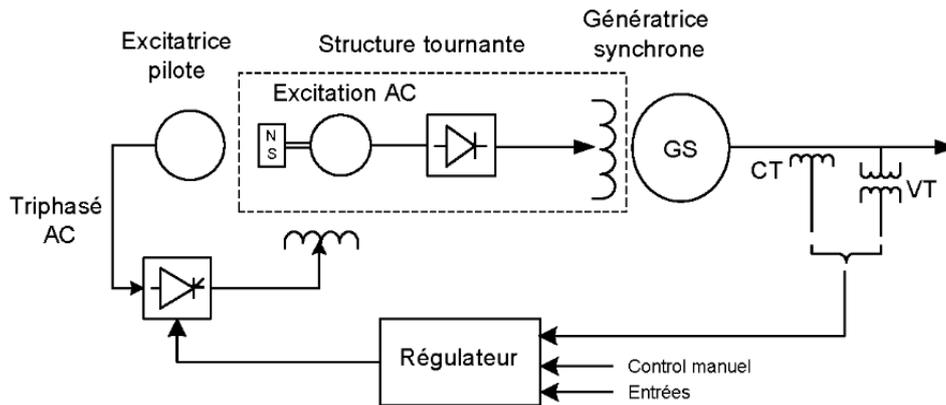


Figure II. 9 : Système d'excitation de type Brushless

c) Systèmes d'excitation statique

Dans ce type de système d'excitation, tous les composants sont statiques. Le redresseur statique fournit le courant d'excitation de la génératrice synchrone à travers des bagues collectrices, et celui-ci est alimenté par la génératrice synchrone à travers un transformateur d'excitation. Cependant il existe trois types d'excitation statique :

- 1) Avec redresseur commandé à source de tension
- 2) Avec redresseur non commandé à source combinée
- 3) Avec redresseur commandé à source combinée

L'excitatrice statique par redresseur commandé à source de tension (fig.II.10) est la plus utilisée des trois, voici énumérés quelques-unes de ses caractéristiques :

- Pas de partie tournante à part la machine.
- Utilisation d'un générateur de tension aux bornes d'un autotransformateur d'excitation et d'un pont de thyristor pour le redressement de la tension AC d'entrée.
- Possibilité d'utilisation de plusieurs types de correcteurs et régulateurs (PI, PID, Flous, ...).
- Moins coûteuse et facile à entretenir.

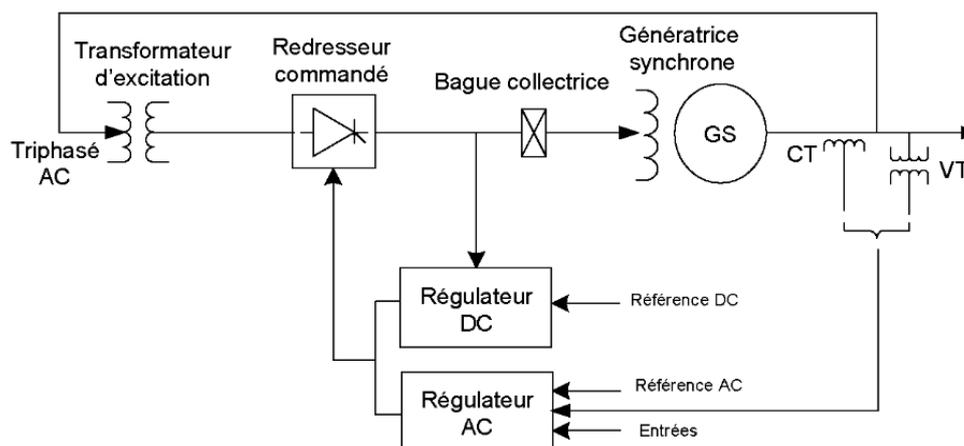
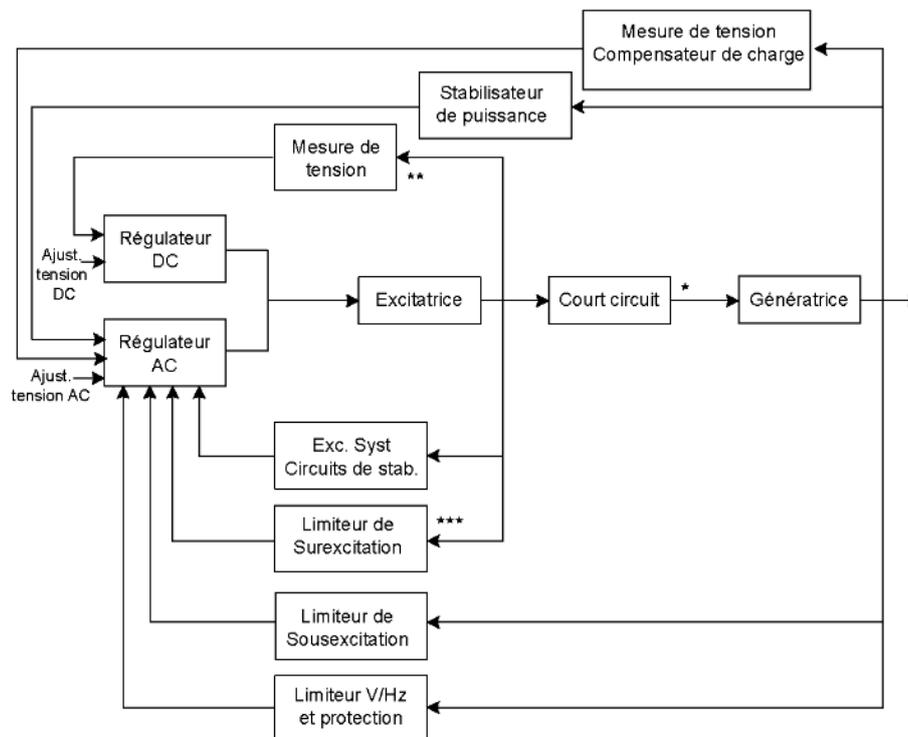


Figure II.10 : Excitatrice statique par redresseur commandé à source de tension.

II.3.5 Commande et circuits de protection des systèmes d'excitation

La commande d'un système d'excitation ne dépend pas simplement du régulateur de tension, mais aussi des fonctions de limitation et de protection qui permettent de bien répondre aux exigences de performance présentées en section II.3.2.

La Figure II.11 présente toutes les différentes fonctions et circuits de protection d'un système d'excitation. Cependant l'utilisation de ces fonctions n'est pas requise par les différents types de systèmes d'excitation, mais elles sont distinctes d'un système à l'autre [9], [11].



*Court- circuit : Applicable pour l'excitatrice type AC et statique seulement

** Quelques systèmes ont un régulateur DC en boucle ouverte

*** Limiteur surexcitation : peut être utilisé avec un régulateur de tension.

Figure II.11 : Système d'excitation muni de circuits de protection.

II.3.6 Régulateurs de tension

Le régulateur à courant alternatif contrôle la tension de sortie au niveau du stator de la génératrice synchrone, de plus il permet l'application d'autres contrôles et de fonctions protectrices, comme illustré dans la Figure II.11.

Le régulateur à courant continu contrôle à son tour la tension d'excitation. Souvent, il est défini par un régulateur automatique de tension (Automatic Voltage Regulator : AVR).

Ces derniers sont très importants pour l'équilibre de la puissance réactive qui sera fournie où absorbée selon les besoins de la charge. En outre ces contrôleurs représentent un moyen très

important pour assurer la stabilité transitoire du système de puissance. Le régulateur de tension agit sur le courant d'excitation de l'alternateur pour régler le flux magnétique dans la machine et "ramener" la tension de sortie de la machine aux valeurs souhaitées. Une caractéristique très importante d'un régulateur de tension est sa capacité à faire varier rapidement la tension d'excitation.

Par ailleurs, plusieurs types de régulateurs peuvent être utilisés dans le cas du courant alternatif, citant les correcteurs conventionnels (PI, PID, ...).

Le modèle du système IEEE-ST1A est le modèle le plus utilisé dans la littérature. Ce type de système d'excitation se caractérise par sa rapidité et sa sensibilité. La figure II.12 montre ce modèle du système d'excitation et de son régulateur de tension [16].

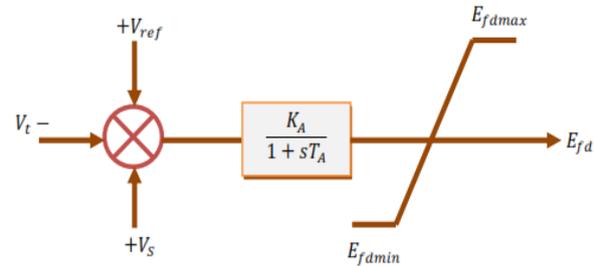


Figure II.12 : Modèle simplifié du système d'excitation IEEE-type ST1A

La grandeur V_{ref} , est la consigne de tension spécifiée pour satisfaire les conditions de l'état d'équilibre. Le régulateur de tension compare le signal V_t (la tension mesurée) à la tension de consigne. Un signal complémentaire V_s peut-être ajouté au nœud de sommation ; il s'agit d'un signal issu de certains dispositifs spécifiques de commande, comme les stabilisateurs de puissance (PSS). Ensuite, le signal d'erreur est amplifié pour donner la tension d'excitation demandée. La constante de temps et le gain de l'amplificateur sont respectivement T_A et K_A . Les valeurs extrémales de la tension d'excitation (E_{fdmax} , E_{fdmin}) sont fixées par un limiteur. La relation suivante décrit le fonctionnement dynamique du modèle :

$$E_{fd} = \frac{K_A}{T_A + 1} (V_{ref} - V_t + V_s) \quad (II.3)$$

II.3.7 Circuits de stabilisation d'un système d'excitation

Les systèmes d'excitation comportent des circuits de stabilisation qui interviennent souvent en cas d'instabilité du système causé par un important temps de réponse (le cas présent dans le système d'excitation de type DC ou AC), ou lorsque le gain du régulateur de tension au stator est très faible. Le circuit de stabilisation est caractérisé par une compensation additionnelle à la boucle de régulation pour améliorer la performance dynamique du système. La figure II.13 illustre la compensation la plus fréquente qui est définie par une fonction de transfert sous la forme $\frac{sK_F}{1+sT_F}$. Les paramètres de la fonction de stabilisation peuvent alors s'ajuster pour assurer le bon fonctionnement du système [4].

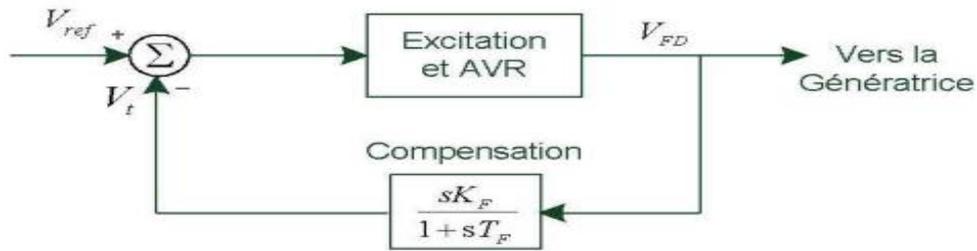


Figure II.13 : Schéma de stabilisation et régulation de l'excitation

II.3.8 Stabilisateur de puissance

Le stabilisateur de puissance (PSS) utilise des signaux de stabilisation additionnels qui agissent sur le système d'excitation dans le but d'améliorer les performances dynamiques du système électrique global. Généralement les grandeurs utilisées à l'entrée d'un stabilisateur de puissance sont générées par : la vitesse de rotation de l'arbre, la fréquence et la puissance.

L'utilisation d'un stabilisateur de puissance dans les systèmes d'excitation est souvent requise, car cet élément permet essentiellement l'amortissement des oscillations de puissance surtout dans le cas de faibles signaux, ce qui assure ainsi une meilleure stabilité [13].

II.3.9 Compensateur de charge

Normalement, c'est le régulateur automatique de tension (AVR) qui assure le contrôle de la tension de sortie de la génératrice. Mais parfois, un compensateur de charge est aussi ajouté pour réguler la tension. Comme montré dans la figure II.14, le compensateur de charge est composé d'une résistance R_C et d'une réactance X_C , en série et qui sont ajustables [12]. En utilisant cette impédance, le courant des armatures I_t mesuré et la tension E_t , le calcul de la tension de compensation V_c est donné par la formule suivante :

$$V_c = |\overline{E_t} + (R_C + jX_C)\overline{I_t}| \quad (\text{II.4})$$

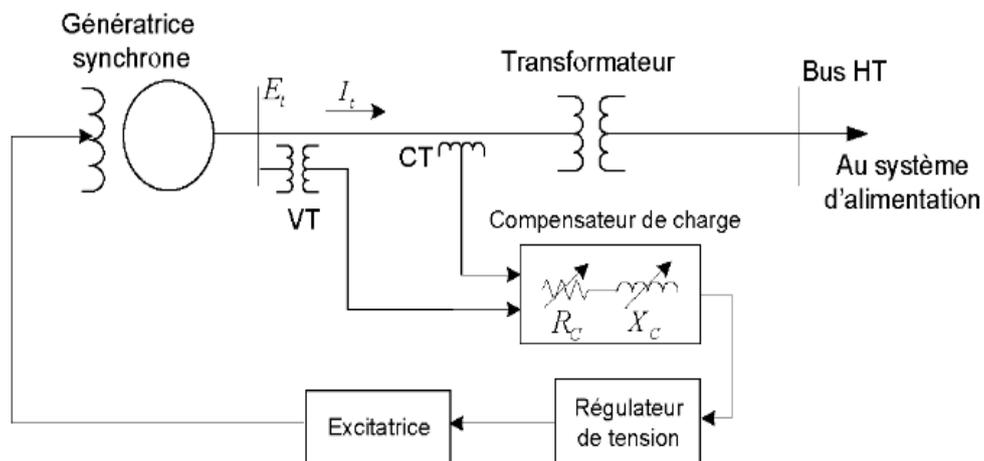


Figure II.14 : Schéma du compensateur de charge

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons défini l'alternateur en expliquant son principe de fonctionnement ainsi que les composantes principales qui le constituent. L'excitatrice fait partie des composantes les plus importantes, ce qui nous a amené à approfondir notre étude sur les systèmes d'excitation, en expliquant le principe de fonctionnement et la composition de chaque système.

Chapitre III

Impact des défauts du système d'excitation dans un alternateur

III.1 Introduction

Vu la complexité du fonctionnement de l'alternateur, ce dernier est exposé à plusieurs défauts. Il en existe deux types : mécaniques et électriques.

Défauts mécaniques : Ils touchent principalement les composants de l'alternateur qui sont en mouvement, à savoir l'arbre et ses roulements, soumis à une usure progressive au cours du fonctionnement.

Défauts électriques : Ils touchent soit les conducteurs des différents bobinages (enroulements) soit les composants électriques internes.

Dans ce qui suit, nous allons étudier l'impact des défauts du système d'excitation dans un alternateur, les principaux organes et leur impact dans un système d'excitation ainsi que la modélisation de l'alternateur.

III.2 Modèle de référence

Dans ce chapitre, nous allons prendre comme modèle de référence un alternateur à pôles lisses avec système d'excitation à diodes tournantes « Brushless » (Fig.III.1). Les inducts des machines sont représentés en « hachuré » et les inducteurs en « quadrillé ».

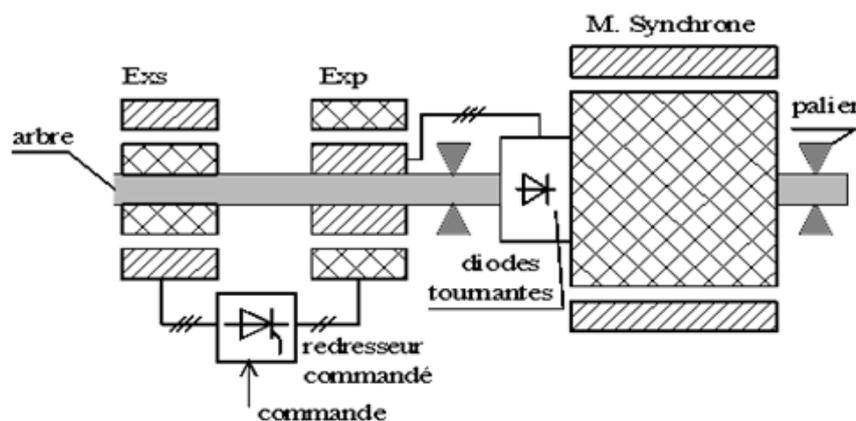


Figure III.1 : Alternateur à pôles lisses avec système d'excitation « Brushless »

L'excitatrice secondaire E_{xs} est un alternateur triphasé excité par des aimants permanents au rotor. L'excitatrice principale E_{xp} est un autre alternateur triphasé dont le stator est l'inducteur. Son excitation est réglée par le redresseur à thyristors placé entre E_{xs} et E_{xp} . L'induit de E_{xp} alimente un redresseur à diodes PD3 solidaire du rotor de la machine synchrone, d'où le nom de *diodes tournantes* donné à ce redresseur.

III.3 Impact du système d'excitation sur l'alternateur

Pour connaître ses impacts on doit tout d'abord connaître [16] :

- 1- Le schéma électrique simplifié de l'alternateur et son diagramme vectoriel.
- 2- L'alternateur couplé à un réseau.
- 3- Surexcitation et la sous-excitation dans l'alternateur.

III.3.1 Schéma électrique simplifié de l'alternateur et son diagramme vectoriel

1- Schéma électrique simplifié de l'alternateur

Pour étudier l'alternateur triphasé, on modélise l'une de ses phases par une f.é.m E_{PN} en série avec une résistance r et une réactance synchrone $X = L\omega$.

Avec :

- E_{PN} : f.é.m. induite à vide ;
- I : courant de ligne.
- V : tension entre phase et neutre.
- r : résistance d'un enroulement statorique (couplage Y).
- $X = L\omega$: réactance synchrone d'un enroulement statorique.

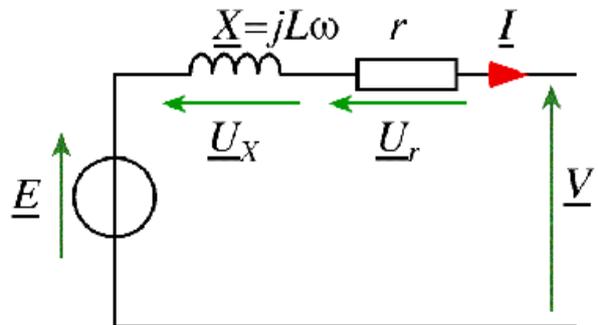
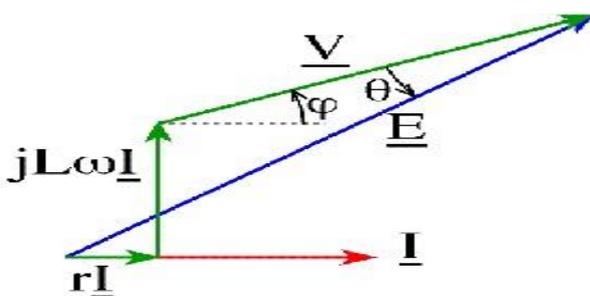


Figure III.2 : Schéma électrique équivalent d'une phase statorique

X est proportionnelle à la vitesse de rotation.

Elle tient compte de la réactance réelle de l'enroulement et de la réaction magnétique d'induit. En pratique $X \gg r$.

2- Représentation vectorielle (diagramme de Behn-Eschenburg)



C'est la représentation vectorielle des grandeurs électriques. Loi des mailles avec les grandeurs complexes :

$$\underline{E} = \underline{V} + jL\omega \underline{I} + r \underline{I} \tag{III.1}$$

Figure III.3 : Représentation vectorielle.

Il peut être utile de connaître deux angles :

- Le déphasage φ entre le courant et la tension (\underline{I} et \underline{V}). φ et I varient en fonction de la consommation. $\cos \varphi$ représente le facteur qui donne une image sur la puissance réactive consommée.
- Le décalage interne θ entre \underline{V} et \underline{E} représente l'angle interne de l'alternateur.

III.3.2 L'alternateur couplé à un réseau

En général un alternateur produira en même temps de la puissance active et de la puissance réactive.

$$P_{active} = 3.V.I.\cos\varphi = \frac{3.V.E}{X}\sin\theta \quad (III.2)$$

$$P_{réactive} = Q = 3.V.I.\sin\varphi \quad (III.3)$$

La puissance active et la puissance réactive de l'alternateur doivent être respectivement égales aux puissances active et réactive du réseau alimenté.

Si la puissance active fournie par l'alternateur est trop faible, sa vitesse baisse et la fréquence diminue. Pour maintenir la fréquence, on devra augmenter le débit (d'eau ou de combustible) dans la turbine qui entraîne l'alternateur.

Inversement, si la puissance active fournie par l'alternateur est trop élevée, sa vitesse croit et la fréquence augmente. On devra alors diminuer le débit (d'eau ou de combustible) dans la turbine.

Si la puissance réactive fournie par l'alternateur est trop faible la tension de l'alternateur baisse.

Il faudra augmenter l'excitation de l'alternateur pour ramener la tension à sa valeur normale.

Inversement, si la puissance réactive fournie par l'alternateur est trop élevée, la tension augmente. Il faudra diminuer le courant d'excitation de l'alternateur pour maintenir la tension.

III.3.3 Les impacts de la surexcitation et la sous-excitation dans les alternateurs

- **La surexcitation : alternateur surexcité ($E > V$)**

Si l'intensité d'excitation augmente, la puissance active reste inchangée et la puissance réactive augmente (l'alternateur fournit de l'énergie réactive). Donc on aura \underline{I} en retard par rapport à \underline{V} ce qui résulte que le $\cos \varphi$ est positif (Fig.III.4).

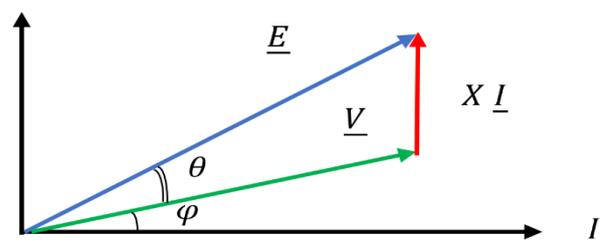


Figure III.4 : I en retard par rapport à V

➤ **La sous excitation : alternateur sous-excité ($E < V$)**

Si l'intensité d'excitation diminue, la puissance active reste inchangée et la puissance réactive diminue (l'alternateur absorbe de l'énergie réactive). Donc on aura \underline{I} en avance par rapport à \underline{V} ce qui résulte que le $\cos \varphi$ est négatif (Fig. III.5).

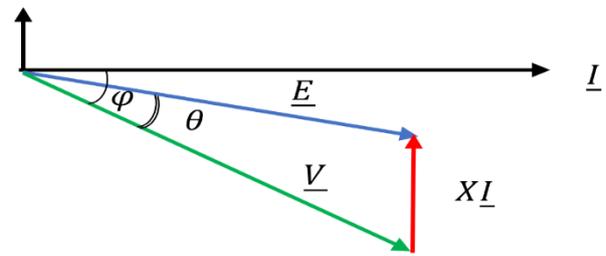


Figure III.5 : I en avance par rapport à V

Au-delà d'une certaine puissance active P max, l'alternateur ne se maintient plus au synchronisme avec le réseau, cela implique que l'angle ($\theta > \frac{\pi}{2}$) : on dit qu'il "décroche".

$$P_{active} = \frac{3.V.E}{X} \sin \theta, \quad \text{donc} \quad P_{max} = \frac{3.V.E}{X}$$

quand $\sin \theta = 1 \rightarrow \theta = \frac{\pi}{2}$ (Fig.III.6).

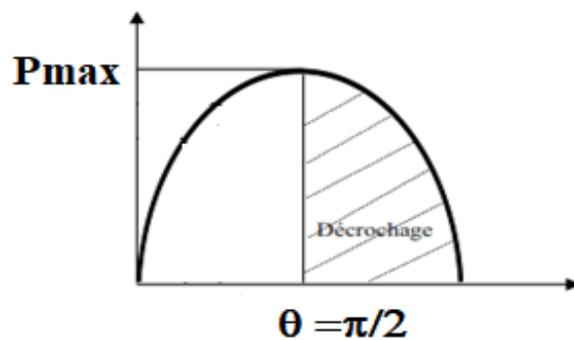


Figure III.6 : Le décrochage

III.4 Les redresseurs

Comme nous la montre la figure III.1, les principaux organes de l'excitatrice sont :

- Les diodes tournantes (redresseur non commandé)
- La commande (redresseur commandé avec un AVR)

On peut dire donc que les organes principaux sont bien les redresseurs.

Les montages redresseurs, souvent appelés « redresseurs », sont les convertisseurs de l'électronique de puissance qui assurent directement la conversion alternatif-continu, alimentés par une source de tension alternative monophasée ou polyphasée. Ils permettent d'alimenter en courant continu le récepteur branché à leur sortie.

III.4.1 Les trois types de montages redresseurs

Pour obtenir une tension continue, on redresse un ensemble de q tensions alternatives, d'ordinaire supposées sinusoïdales et formant un système polyphasé équilibré (nombre de phases q). Ces tensions peuvent être les tensions aux bornes d'un alternateur. Généralement, elles sont fournies par le réseau monophasé ou, plus souvent, par le réseau triphasé, d'ordinaire par l'intermédiaire d'un transformateur [15].

On distingue trois types de montages :

1. **Pq** : montages avec source en étoile et un seul commutateur ou redresseur "simple alternance".

2. **PDq** : montages avec source en étoile et deux commutateurs ou redresseurs "en pont" avec source en étoile.
3. **Sq** : montages avec source en polygone et deux commutateurs ou redresseurs "en pont" avec source polygonale.

Remarques :

- L'indication du type (P, PD ou S) suivie de celle du nombre q de phases suffit à caractériser un redresseur.

La figure III.7 donne le schéma électrique des montages P3, PD3 et S3. Ces trois montages sont le plus communément utilisés pour le redressement des tensions triphasées.

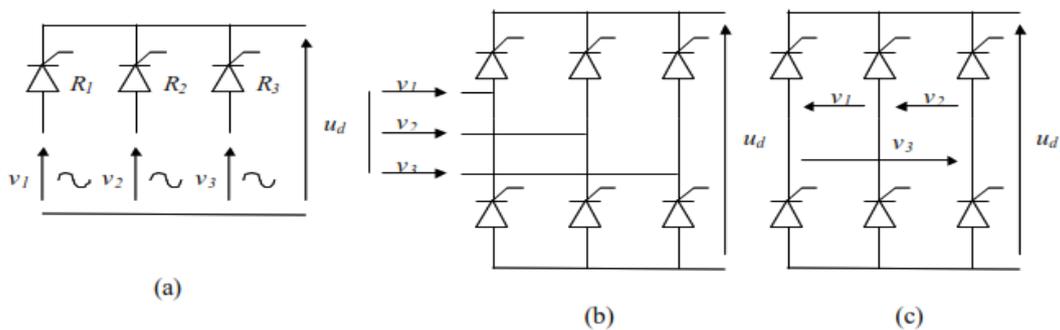


Figure III.7 : Redresseurs triphasés : (a) P3, (b) PD3 et (c) S3

III.4.2 Commutation des redresseurs

Lorsque plusieurs redresseurs ont une électrode commune, on verra que chacun n'est conducteur que pendant une durée limitée et qu'un seul conduit à chaque instant (si l'on considère les interrupteurs redresseurs comme parfaits).

Si le courant produit par le montage redresseur est ininterrompu, ce qui représente le cas général, cela impose que l'enclenchement d'un redresseur s'accompagne du blocage de celui qui conduisait auparavant.

La figure III.8 montre qu'à l'instant t_1 le redresseur R_2 devient conducteur tandis que R_1 se bloque.

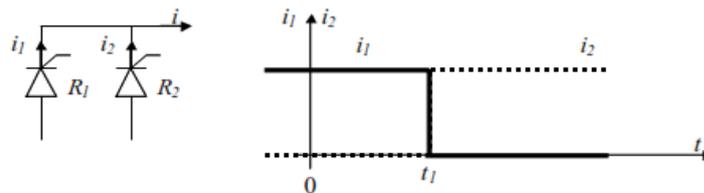


Figure III.8 : Commutation instantanée des interrupteurs redresseurs

On distinguera plusieurs types de commutation suivant le mode de blocage du redresseur à déclencher :

1- Commutation par la charge ou par la source (dite également **commutation naturelle**) lorsque ce sont des conditions extérieures (et donc naturelles) au convertisseur (tensions ou f.é.m. de la charge ou de la source) qui contraignent au blocage le redresseur conducteur quand un nouveau redresseur s'enclenche.

2- Auto-commutation (ou **commutation forcée**) lorsque le redresseur est commandé quelles que soient les conditions extérieures (charge ou source).

On donne par ailleurs les deux définitions suivantes :

✓ **Indice de commutation q du montage**

L'indice de commutation q est donné par la durée de conduction de chaque diode et correspond au nombre de phases du réseau de distribution. Par exemple, pour le montage PD3, l'indice de commutation est égal à 3 (chaque diode conduit pendant un tiers de la période ou T/q).

✓ **Indice de pulsation p de la tension redressée**

L'indice de pulsation p donne le nombre de portions de sinusoïde par période de la tension redressée. Par exemple, pour le montage PD3, nous verrons que l'indice de pulsation est égal à 6 (la tension redressée se compose de six portions par période).

✓ **Facteur de forme F**

La valeur du facteur de forme F caractérise la tension redressée. Plus cette valeur est proche de l'unité, plus la tension obtenue est voisine d'une grandeur continue.

Ce coefficient sert à comparer des montages redresseurs différents entre eux.

Par définition, on nomme le facteur de forme par le rapport :

$$F = \frac{U_{eff}}{U_0} \quad (III.4)$$

Avec :

U_{eff} : valeur efficace de la tension considérée ;

U_0 : valeur moyenne de la tension considérée.

III.4.3 Redressement non commandé (diodes)

C'est la conversion d'une tension alternative en une tension continue d'une valeur moyenne fixe.

III.4.3.1 Fonctionnement des redresseurs simple alternance montage P3

Dans le cas général, les q phases, sièges des q tensions alternatives à redresser, sont couplées en étoile.

Grâce à q diodes formant par exemple un commutateur "plus positif", à chaque instant, la borne M est reliée à la plus positive des bornes $1, 2, \dots, q$. La tension redressée u_d est recueillie entre M et le point neutre N .

Dans ce type de redresseur, les diodes effectuent un seul choix. Nous utilisons l'adjectif "parallèle" (P) pour ce type de montage car entre les deux bornes de sortie, on trouve en parallèle les q voies formées chacune par un enroulement et une diode.

La figure III.9 représente le montage P3, avec le commutateur à trois diodes. Seul le secondaire en étoile du transformateur est représenté [15].

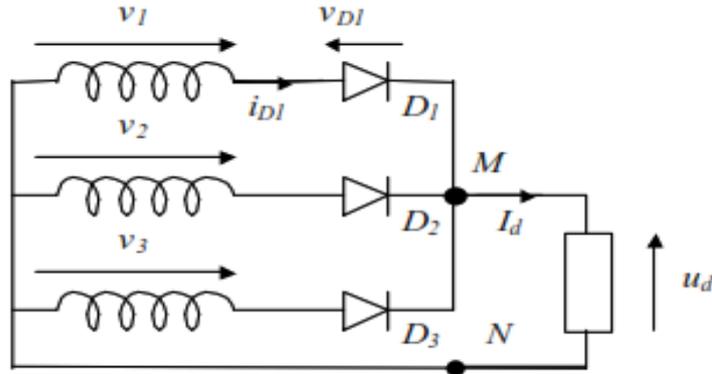


Figure III.9 : Redresseur simple alternance. Montage parallèle P3

Les tensions d'entrée sont :

$$\begin{cases} v_1 = u_{dM} \sin(\omega t) \\ v_2 = u_{dM} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ v_3 = u_{dM} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{4}) \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

Seule la diode dont l'anode est au plus haut potentiel peut conduire.

- Supposons qu'à un instant donné, v_1 est la tension la plus élevée. Si la diode D_2 conduit ($v_{D2} = 0$), $u_d = v_2$, D_1 se trouve sous la tension : $v_{D1} = v_1 - u_d = v_1 - v_2 > 0$ et devient passante.

On a alors : $v_{D1} = 0$ et $v_{D2} = v_2 - v_1 < 0$

- Donc la diode D_2 se bloque. On a donc :

$$u_d = v_1 \text{ quand } v_1 > v_2 \text{ et } v_3$$

$$u_d = v_2 \text{ quand } v_2 > v_1 \text{ et } v_3$$

$$u_d = v_3 \text{ quand } v_3 > v_1 \text{ et } v_2$$

- On obtient en définitive le graphe de la figure III.10.

La diode D_1 conduit lorsque la tension v_1 est la plus grande. Ainsi chaque diode conduit pendant un tiers de la période. On a représenté dans le graphe ci-dessous les intervalles de conduction des diodes (0 : diode bloquée ; 1 : diode passante), ainsi que les expressions des tensions u_d et v_{D1} .

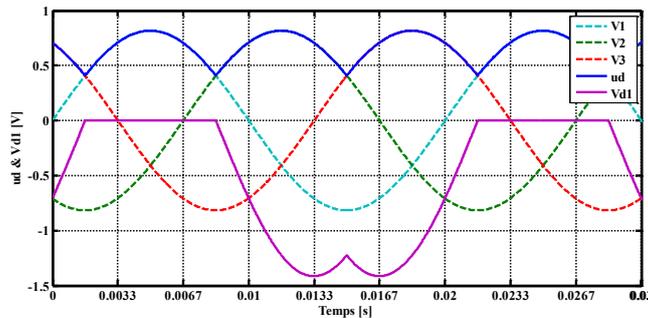


Figure III.10 : Tension redressée du montage P3

✓ Étude de la tension redressée

La tension redressée u_d est périodique de période $T/3$ (T/p).

Entre $-T/6$ ($-T/2p$) et $+T/6$ ($+T/2p$), cette tension s'exprime :

$$u_d(t) = u_{dM} \cos \omega t \quad (\text{III.6})$$

Avec :

$$u_{dM} = V\sqrt{2}, \quad V \text{ étant la valeur efficace des tensions simples.}$$

- Valeur moyenne :

On note U_{dio} la valeur moyenne de $u_d(t)$ dans le cas idéal envisagé (indices : i pour idéal ($I_d = Cte$) ; 0 pour moyenne ; d pour disponible).

On calcule :

$$U_{dio} = \frac{1}{T/3} \int_{-T/6}^{+T/6} u_d \cdot dt = u_{dM} \frac{\sin(\frac{\pi}{3})}{\pi/3} = 0.83 u_{dM} \quad (\text{III.7})$$

Dans le cas général :

$$U_{dio} = \frac{1}{T/p} \int_{-T/2p}^{+T/2p} u_d \cdot dt = u_{dM} \frac{\sin(\frac{\pi}{p})}{\pi/p} \quad (\text{III.8})$$

- Valeur efficace calculée par l'équation suivante :

$$U_{dieff} = \sqrt{\frac{1}{T/3} \int_{-T/6}^{+T/6} u_d^2 \cdot dt} = \frac{u_{dM}}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \frac{\sin(\frac{2\pi}{3})}{2\pi/3}} = 0.84 u_{dM} \quad (\text{III.9})$$

Dans le cas général :

$$U_{dieff} = \sqrt{\frac{1}{T/p} \int_{-T/2p}^{+T/2p} u_d^2 \cdot dt} = \frac{u_{dM}}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \frac{\sin(\frac{2\pi}{p})}{2\pi/p}} \quad (\text{III.10})$$

- Facteur de forme :

$$F = \frac{U_{dieff}}{U_{dio}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\sqrt{1 + \frac{\sin(\frac{2\pi}{3})}{2\pi/3}}}{\frac{\sin(\frac{\pi}{3})}{\pi/3}} = 1.02 \quad (\text{III.11})$$

Dans le cas général :

$$F = \frac{U_{dieff}}{U_{dio}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\sqrt{1 + \frac{\sin(\frac{2\pi}{p})}{2\pi/p}}}{\frac{\sin(\frac{\pi}{p})}{\pi/p}} \quad (\text{III.12})$$

III.4.3.2 Redressement parallèle double ou en pont : montage PD3

Dans le cas général, les q enroulements, sièges des q tensions alternatives v_1, v_2, \dots, v_q sont encore couplés en étoile, mais on utilise $2q$ diodes. Le premier groupe, D_1, D_2, \dots, D_q , forme un commutateur "plus positif" et réunit M à la plus positive des bornes 1, 2, ..., q . Le second groupe, D'_1, D'_2, \dots, D'_q , forme un commutateur "plus négatif" et relie N plus négative des bornes 1, 2, ..., q . Cet ensemble de $2q$ diodes est couramment appelé pont de diodes. La tension redressée u_d , recueillie entre M et N est égale, à chaque instant, à la plus grande différence entre les tensions d'entrée. Le montage effectue donc un double choix, d'où le sigle PD (parallèle double) utilisé [15].

La figure III.11 représente le redresseur PD3. Seul le secondaire du transformateur est représenté.

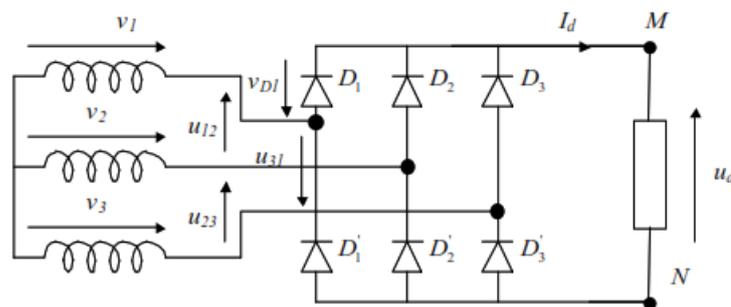


Figure III.11 : Redresseur double alternance. Montage PD3

Le secondaire du transformateur est couplé en étoile et connecté à deux groupes de diodes : un commutateur à cathode commune (D_1, D_2, D_3) et un commutateur à anode commune (D'_1, D'_2, D'_3)

L'existence d'un courant continu dans la charge exige la conduction de deux diodes à tout instant, une de chaque commutateur.

La règle pour déterminer les diodes passantes est la même que pour le montage P3 :

- Pour le commutateur à cathode commune, la diode dont l'anode est au potentiel le plus élevé conduit, d'où la dénomination « + positif ».
- Pour le commutateur à anode commune, la diode dont la cathode est au potentiel négatif le plus faible conduit, d'où la dénomination « + négatif ».

Donc :

- Lorsque $v_1 > v_3 > v_2$ et D_1 et D'_2 conduisent : $u_d = v_1 - v_2$.
- Lorsque $v_1 > v_2 > v_3$ et D_1 et D'_3 conduisent : $u_d = v_1 - v_3$.
- Lorsque $v_2 > v_1 > v_3$ et D_2 et D'_3 conduisent : $u_d = v_2 - v_3$.
- Etc...

Chaque diode conduit ainsi pendant un tiers de période (on dira que l'indice de commutation de ce montage est $q = 3$) tandis que la tension redressée se compose de six portions de sinusoides par période T (on dira que l'indice de pulsation est $p = 6$) ; ces deux indices ont des valeurs égales dans le cas des montages parallèles simples.

Sur la figure III.12 on a représenté l'allure de la tension redressée u_d ainsi que la tension aux bornes de la diode D_1 (v_{D1}).

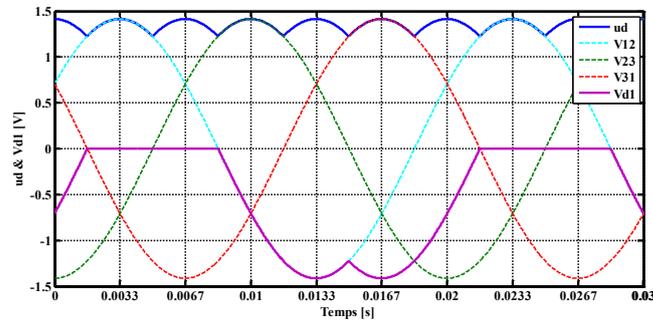


Figure III.12 : Montage PD3 - tension redressée

✓ Étude de la tension redressée

La tension redressée u_d est périodique de période $T/6$. Entre 0 et $T/6$, cette tension s'exprime :

(III.6)

Avec :

$$u_{dM} = U\sqrt{2}, U \text{ étant la valeur efficace des tensions composées.}$$

- Valeur moyenne :

On note U_{dio} la valeur moyenne de $u_d(t)$ dans le cas idéal envisagé (indices : i pour idéal ($I_d = Cte$) ; 0 pour moyenne ; d pour disponible).

On calcule :

$$U_{dio} = \frac{1}{T/6} \int_{-T/12}^{+T/12} u_d \cdot dt = u_{dM} \frac{\sin(\frac{\pi}{6})}{\pi/6} = 0.955 u_{dM} \quad (\text{III.13})$$

Dans le cas général :

$$U_{dio} = \frac{1}{T/2p} \int_{-T/4p}^{+T/4p} u_d \cdot dt = u_{dM} \frac{\sin(\frac{\pi}{2p})}{\pi/2p} \quad (\text{III.14})$$

- Valeur efficace calculée par l'équation suivante :

$$U_{dieff} = \sqrt{\frac{1}{T/6} \int_{-T/12}^{+T/12} u_d^2 \cdot dt} = \frac{u_{dM}}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \frac{\sin(\frac{2\pi}{6})}{2\pi/6}} = 0.94 u_{dM} \quad (\text{III.15})$$

Dans le cas général :

$$U_{dieff} = \sqrt{\frac{1}{T/2p} \int_{-T/4p}^{+T/4p} u_d^2 \cdot dt} = \frac{u_{dM}}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \frac{\sin(\frac{\pi}{p})}{\pi/p}} \quad (\text{III.16})$$

- Facteur de forme :

On calcule :

$$F = \frac{U_{dief}}{U_{dio}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\sqrt{1 + \frac{\sin(\frac{2\pi}{6})}{2\pi/6}}}{\frac{\sin(\frac{\pi}{6})}{\pi/6}} = 1.0009 \quad (\text{III.17})$$

Dans le cas général :

$$F = \frac{U_{dief}}{U_{dio}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\sqrt{1 + \frac{\sin(\frac{\pi}{p})}{\pi/p}}}{\frac{\sin(\frac{\pi}{2p})}{\pi/2p}} \quad (\text{III.18})$$

Ce résultat montre clairement que la forme de la tension redressée est plus proche du continu que pour le montage $P3$ ($F = 1,02$).

III.4.4 Redressement commandé (Thyristors)

C'est la conversion d'une tension alternative en une tension continue d'une valeur moyenne réglable.

III.4.4.1 Allure de la tension redressée (Exemple montage $P3$ tout thyristors)

Les hypothèses pour l'étude sont les suivantes :

Thyristors supposés idéaux \Rightarrow pas de chute de tension aux bornes lorsqu'ils sont fermés ; commutation instantanée.

Source supposée parfaite \Rightarrow impédance de source nulle.

Nous allons étudier le principe de fonctionnement d'un montage $P3$ dont les Thyristors sont commandés à la fermeture avec un retard angulaire α (temps de retard = $\frac{\alpha}{\omega} = \Delta t$) sur l'amorçage naturel (cas des diodes). Cette étude pourra être appliquée facilement à un montage $PD3$ ou autre. La figure III.13 décrit le montage $P3$ tout thyristors [18].

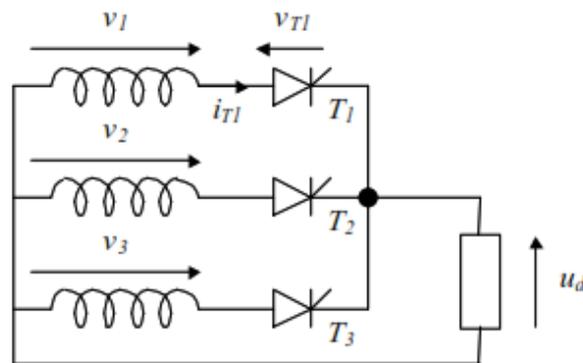


Figure III.13 : Montage P3 tout thyristor

La figure III.14 nous montre les allures des tensions $u_d(t)$ et $U_{th1}(t)$ ainsi que le courant dans le thyristor 1 $I_{th1}(t)$ et dont le fonctionnement :

- Avant l'instant t_0 on suppose que le thyristor T_3 conduit. On a donc : $u_d(t) = v_3(t)$
- Après t_0 , $v_1(t)$ devient supérieure à $v_2(t)$ et $v_3(t)$; T_1 est polarisé en direct.

Il est donc susceptible d'être enclenché par un signal de commande. Tant que T_1 ne reçoit pas d'impulsion de commande, T_3 reste conducteur et : $u_d(t) = v_3(t)$; $i_{T1}(t) = 0$; $v_{T1}(t) = u_{13}(t)$.

- La commande de la fermeture de T_1 arrive à l'instant $t_1 = t_0 + \Delta t$. Le thyristor T_1 est alors polarisé sous tension directe positive si $u_{13} > 0$. Cette condition impose $\Delta t = t_1 - t_0 < \frac{T}{2}$ ou $\alpha < \pi$. pour $\alpha > \pi$, il n'est plus possible d'amorcer les thyristors car la différence de potentiel à leur borne devient négative.
- Si $\alpha < \pi$: T_1 s'enclenche $u_d(t) = v_1(t)$; $v_{T1}(t) = 0$ et T_3 se trouve polarisé en inverse ($v_{T3} = u_{31} < 0$) et se bloque ; d'où $i_{T1}(t) = i_d$.
- T_1 reste enclenché tant que T_2 n'est pas commandé, soit jusqu'à l'instant $t_2 = t_1 + \frac{T}{q}$ ($q = 3$ dans le cas du montage $P3$) si l'on admet (cas pratique) que les signaux de commande des thyristors se succèdent avec le même décalage que les instants d'amorçage naturel (pour les diodes).
- Pour $t > t_2$, on a : $u_d(t) = v_2(t)$; $i_{T1}(t) = 0$; $v_{T1}(t) = u_{12}(t)$. D'où les courbes de $u_d(t)$, $v_{T1}(t)$ et $i_{T1}(t)$ établies à la figure III.14. On note que pour les montages parallèles simples (Pq), de même que pour les montages à diodes, la tension $u_d(t)$ est formée de $p=q$ portions de sinusoïdes.

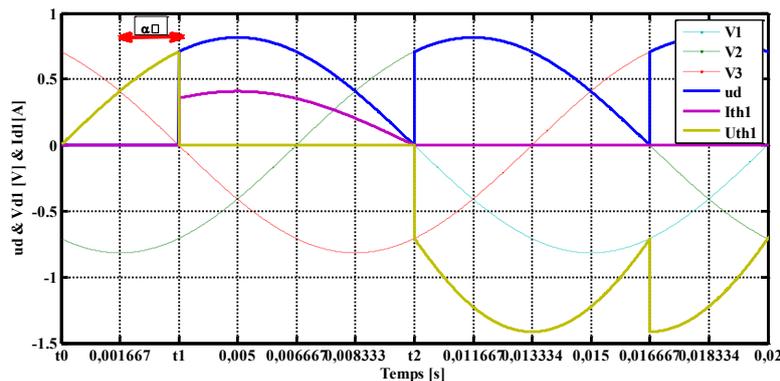


Figure III.14 : Montage P3 (tout thyristor) tension redressée

III.4.4.2 Valeur moyenne de la tension redressée

La tension redressée $u_d(t)$ est composée de p portions de sinusoïdes par périodes T des tensions alternatives de la source.

La valeur moyenne peut donc être calculée entre t_1 et t_2 :

$$U_{dio\alpha} = \frac{1}{t_1 - t_2} \int_{t_2}^{t_1} u_d \cdot dt = \frac{p}{\pi} u_{dM} \sin\left(\frac{\pi}{p}\right) \cdot \cos \alpha = U_{dio} \cdot \cos \alpha \quad (\text{III.19})$$

$$U_{dio} = \frac{p}{\pi} u_{dM} \sin\left(\frac{\pi}{p}\right) \quad (\text{redresseur } a \text{ diodes}) \quad (\text{III.20})$$

III.4.4.3 Fonctionnement en redresseur ou redresseur inversé (onduleur)

On a représenté graphiquement l'évolution de $U_{dio\alpha}(t)$ en fonction de l'angle α sur la figure III.15).

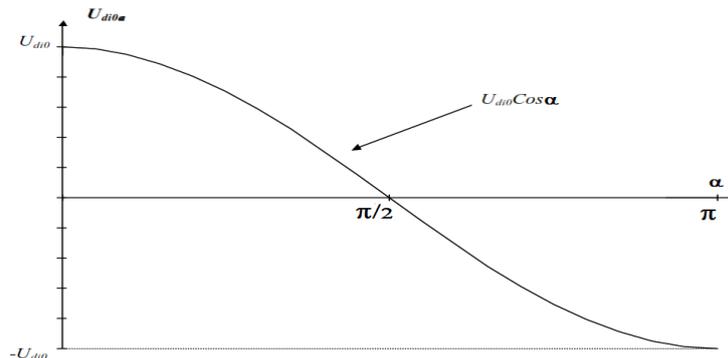


Figure III.15 : Montage P3 tout thyristor. Tension moyenne redressée

On en déduit les deux types de fonctionnement d'un tel montage :

- Pour $0 \leq \alpha \leq \pi/2$: $U_{dio\alpha}$ est positive et la puissance active fournie par le dispositif redresseur à la charge dans laquelle circule un courant continu i_d vaut : $P = U_{dio\alpha} \cdot i_d > 0$. La charge absorbe donc de l'énergie.

Le montage fonctionne alors en redresseur à tension de sortie $U_{dio\alpha}$ réglable grâce à l'angle de retard à l'amorçage α .

- Pour $\pi/2 \leq \alpha \leq \pi$: $U_{dio\alpha}$ est négative et la puissance active fournie par le dispositif redresseur à la charge dans laquelle circule un courant continu i_d vaut : $P = U_{dio\alpha} \cdot i_d < 0$. Le redresseur absorbe donc de l'énergie.

Le montage fonctionne alors en redresseur inversé (onduleur).

Dans ce qui suit nous utiliserons notre redresseur en fonctionnement redresseur.

III.5 Modélisation de l'alternateur triphasé à pôles lisses

D'un point de vue électromagnétique, le modèle de référence consiste à considérer une machine synchrone à pôles lisses ayant une paire de pôles au rotor et un enroulement triphasé au stator (enroulements a, b et c). L'enroulement inducteur se trouve sur le rotor de la machine selon l'axe direct ou axe longitudinal de la machine (enroulement f).

La présence de grilles ou de cages d'amortissement au rotor, ou encore

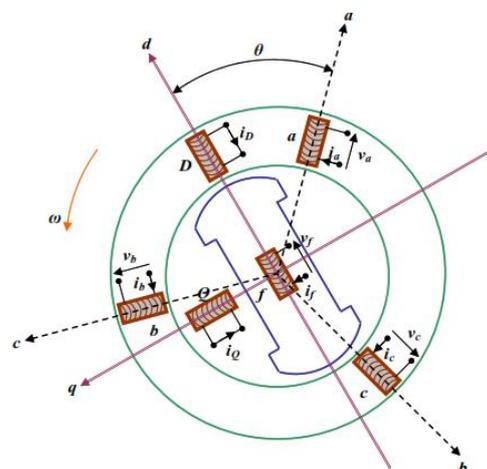


Figure III.16 : Machine synchrone triphasée représentée dans les deux repères (a, b, c) et (d, q)

l'éventuel effet amortisseur du fer, sont modélisés par deux circuits amortisseurs équivalents. L'un situé sur l'axe direct (enroulement D) et l'autre sur l'axe perpendiculaire appelé axe en quadrature ou axe transversal de la machine (enroulement Q). La figure III.16 présente schématiquement la machine synchrone considérée [4].

La modélisation de la machine est basée sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices qui peuvent être résumées de la façon suivante :

- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis, l'effet de la température, l'effet de Peau, les courants de Foucault ainsi que les couplages capacitifs entre les enroulements sont négligés.
- Les ampères tours sont supposés distribués sinusoïdalement le long de l'entrefer, les harmoniques d'espace sont négligés. On ne considère que le premier harmonique de la distribution de la f.é.m. créée par chaque phase de l'induit.

III.5.1 Convention de signe et définition des variables

- ✓ En adoptant la convention « récepteur » au rotor et la convention « générateur » au stator.
- ✓ Les angles et les vitesses sont comptés positivement dans le sens trigonométrique.

On définit les matrices suivantes :

Matrice statorique :

$$[v_s] = [v_a \ v_b \ v_c]^T ; [i_s] = [i_a \ i_b \ i_c]^T ; [\varphi_s] = [\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c]^T ; [R_s] = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.21})$$

Matrice rotorique :

$$[v_r] = [v_f \ v_D \ v_Q]^T ; [i_r] = [i_f \ i_D \ i_Q]^T ; [\varphi_r] = [\varphi_f \ \varphi_D \ \varphi_Q]^T ; [R_r] = \begin{bmatrix} R_f & 0 & 0 \\ 0 & R_D & 0 \\ 0 & 0 & R_Q \end{bmatrix} \quad (\text{III.22})$$

$[v_s], [v_r]$: matrice des tensions statoriques et rotoriques.

$[i_s], [i_r]$: matrice des courants statoriques et rotoriques.

$[\varphi_s], [\varphi_r]$: matrice des flux statoriques et rotoriques.

$[R_s], [R_r]$: matrice des résistances statoriques et rotoriques.

III.5.2 Équations électriques

La machine peut être décrite dans le repère abc par les équations suivantes :

$$\text{Statorique : } \begin{cases} v_a = -R_s i_a - \frac{d\varphi_a}{dt} \\ v_b = -R_s i_b - \frac{d\varphi_b}{dt} \\ v_c = -R_s i_c - \frac{d\varphi_c}{dt} \end{cases} ; v_s = -R_s i_s - \frac{d\varphi_s}{dt} \quad (\text{III.23})$$

$$\text{Rotorique : } \begin{cases} v_f = R_f i_f + \frac{d\varphi_f}{dt} \\ v_D = 0 = R_D i_D + \frac{d\varphi_D}{dt} \\ v_Q = 0 = -R_Q i_Q - \frac{d\varphi_Q}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.24})$$

Où :

$((\varphi_i)_{i=a,b,c})$ sont les flux totaux induits dans les phases a, b, et c du stator ;

φ_f est le flux total dans l'enroulement de l'inducteur ;

φ_D et φ_Q sont les flux totaux induits dans les enroulements amortisseurs ;

R_s, R_f, R_D, R_Q sont respectivement les résistances d'une phase de l'induit, de l'enroulement de l'inducteur, des amortisseurs de l'axe d et de l'axe q , les tensions appliquées aux circuits D et Q sont nulles puisqu'ils sont en court-circuit.

III.5.3 Equations magnétiques

L'équation de flux est montrée dans l'expression (III.25) ; les flux sont liés par les inductances mutuelles entre les bobines. Les inductances mutuelles entre les bobinages d'axe d et d'axe q au rotor sont nulles, compte tenu de l'orthogonalité de ces deux axes.

L'écriture sous forme condensée :

$$\begin{cases} (\varphi_s) = [L_{ss}](i_s) + [M_{sr}](i_r) \\ (\varphi_r) = [M_{rs}](i_s) + [L_{rr}](i_r) \end{cases} \quad (\text{III.25})$$

On peut écrire les équations magnétiques liant les flux aux courants sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \\ \varphi_f \\ \varphi_D \\ \varphi_Q \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} & M_{af} & M_{aD} & M_{aQ} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} & M_{bf} & M_{bD} & M_{bQ} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c & M_{cf} & M_{cD} & M_{cQ} \\ M_{af} & M_{bf} & M_{cf} & L_f & M_{fD} & M_{fQ} \\ M_{aD} & M_{bD} & M_{cD} & M_{Df} & L_D & M_{DQ} \\ M_{aQ} & M_{bQ} & M_{cQ} & M_{fQ} & M_{DQ} & L_Q \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{pmatrix} \quad (\text{III.26})$$

III.5.4 Définitions des matrices inductance

Quelle que soit la position du rotor, la perméance du circuit magnétique est constante. Par conséquent, les inductances relatives au stator et au rotor sont constantes, ainsi que les mutuelles inductances entre enroulements statoriques et rotoriques. Seules varient les mutuelles inductances entre enroulements statoriques et rotoriques. La variation est supposée sinusoïdale, avec une périodicité proportionnelle au nombre de paires de pôles.

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_b & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.27})$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_f & M_{fD} & 0 \\ M_{fD} & L_D & 0 \\ 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \quad (\text{III.28})$$

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} M_{af} & M_{aD} & M_{aQ} \\ M_{bf} & M_{bD} & M_{bQ} \\ M_{cf} & M_{cD} & M_{cQ} \end{bmatrix} \quad (\text{III.29})$$

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^T \quad (\text{III.30})$$

$$L_a = L_b = L_c \quad (\text{III.31})$$

$$M_{ab} = M_{bc} = M_{ca} \quad (\text{III.32})$$

Avec :

L_a, L_b et L_c : Les inductances propres des phases a, b , et c .

M_{ab} : L'inductance mutuelle entre les phases a et b .

M_{bc} : L'inductance mutuelle entre les phases b et c .

M_{ca} : L'inductance mutuelle entre les phases c et a .

$M_{af} = M_{fa} \cos(\theta)$: L'inductance mutuelle entre l'inducteur et la phase a .

$M_{bf} = M_{fa} \cos(\theta - 2\pi/3)$: L'inductance mutuelle entre l'inducteur et la phase b .

$M_{cf} = M_{fa} \cos(\theta - 4\pi/3)$: L'inductance mutuelle entre l'inducteur et la phase c .

$M_{aD} = M_{aD} \cos(\theta)$: L'inductance mutuelle entre l'amortisseur D et la phase a .

$M_{bD} = M_{aD} \cos(\theta - 2\pi/3)$: L'inductance mutuelle entre l'amortisseur D et la phase b .

$M_{cD} = M_{aD} \cos(\theta - 4\pi/3)$: L'inductance mutuelle entre l'amortisseur D et la phase c .

$M_{aQ} = M_{aQ} \cos(\theta)$: L'inductance mutuelle entre l'amortisseur Q et la phase a .

$M_{bQ} = M_{aQ} \cos(\theta - 2\pi/3)$: L'inductance mutuelle entre l'amortisseur Q et la phase b .

$M_{cQ} = M_{aQ} \cos(\theta - 4\pi/3)$: L'inductance mutuelle entre l'amortisseur Q et la phase c .

L_f : L'inductance propre de l'inducteur.

L_D : L'inductance propre de l'amortisseur D.

L_Q : L'inductance propre de l'amortisseur Q.

M_{fD} : L'inductance mutuelle entre l'inducteur et l'amortisseur D.

$M_{fQ} = 0$: L'inductance mutuelle entre l'inducteur et l'amortisseur Q.

$M_{QD} = 0$: L'inductance mutuelle entre les deux amortisseurs D et Q.

III.5.5 La transformation de Park

Les expressions d'inductance contiennent des termes avec un angle θ qui varie à son tour avec le temps ; cela introduit une complexité considérable dans la l'écriture du modèle dynamique de la machine ; engendrant aussi des problèmes dans les systèmes d'alimentation. En effet, la matrice d'inductance (III.26) doit être recalculée pour chaque position du rotor.

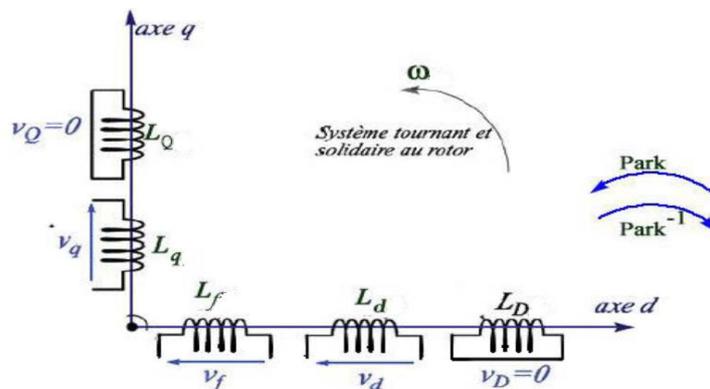


Figure III.17 : Représentation des circuits statorique et rotorique dans le repère (d,q)

La transformation de Park permet de contourner cette difficulté en écrivant la relation (III.26) dans un repère mobile lié au rotor ; la transformation de Park ne s'applique pas aux circuits rotoriques, ces circuits se trouvent déjà dans le référentiel de Park. Le circuit de champ se trouve dans l'axe longitudinal d .

La transformation de Park $P(\theta)$ ainsi que son inverse $P(\theta)^{-1}$ sont montrées dans les équations (III.33 et III.34)

$$P(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ \sin \theta & \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{III.33})$$

$$P(\theta)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \\ \cos \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III.34})$$

Ainsi on a :

$$[i_{dq0}] = [P(\theta)][i_s] = [i_d \ i_q \ i_0]^T; [v_{dq0}] = [P(\theta)][v_s] = [v_d \ v_q \ v_0]^T; [\varphi_{dq0}] = [P(\theta)][\varphi_s] = [\varphi_d \ \varphi_q \ \varphi_0]^T \quad (\text{III.35})$$

$$[i_s] = [P(\theta)^{-1}][i_{dq0}]; [v_s] = [P(\theta)^{-1}][v_{dq0}]; [\varphi_s] = [P(\theta)^{-1}][\varphi_{dq0}] \quad (\text{III.36})$$

III.5.6 Equations électriques dans les axes d et q

On applique la transformée de Park sur l'équation statorique (III.33) et (III.23) et on transforme toutes les grandeurs abc en grandeur $dq0$:

$$v_{dq0} = P(\theta) v_s = -R_s P(\theta)(i_s) - P(\theta) \frac{d(\varphi_s)}{dt} = -R_s P(\theta) P(\theta)^{-1} i_{dq0} - P(\theta) \frac{d(P(\theta)^{-1} \varphi_{dq0})}{dt}$$

Sachant que :

$$P(\theta) P(\theta)^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, P(\theta) \frac{d(P(\theta)^{-1})}{dt} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{d\theta}{dt}, \frac{d\theta}{dt} = \omega$$

On obtient :

$$\begin{cases} v_d = -R_s i_d - \frac{d\varphi_d}{dt} - \omega \varphi_q \\ v_q = -R_s i_q - \frac{d\varphi_q}{dt} + \omega \varphi_d \\ v_0 = -R_s i_0 - \frac{d\varphi_0}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.37})$$

III.5.7 Equations magnétique dans les axes d et q

On applique la transformée de Park sur l'équation magnétique (III.31) et (III.24) et on transforme toutes les grandeurs abc en grandeur $dq0$:

$$\begin{cases} (\varphi_s) = [L_{ss}](i_s) + [M_{sr}](i_r) \\ (\varphi_r) = [M_{rs}](i_s) + [L_{rr}](i_r) \\ P(\theta)(\varphi_s) = P(\theta) [L_{ss}](i_s) + P(\theta) [M_{sr}](i_r) \\ (\varphi_r) = [M_{rs}](i_s) + [L_{rr}](i_r) \end{cases}$$

$$\begin{cases} (\varphi_{dq0}) = P(\Theta) [L_{ss}]P(\Theta)^{-1}(i_{dq0}) + P(\Theta)[M_{sr}](i_r) \\ (\varphi_r) = [M_{rs}]P(\Theta)^{-1}(i_{dq0}) + [L_{rr}](i_r) \end{cases}$$

En sachant que :

$$P(\Theta) [L_{ss}]P(\Theta)^{-1} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 \\ 0 & L_q & 0 \\ 0 & 0 & L_0 \end{bmatrix} = [L_{ss}^{dq0}]$$

Avec :

$$\begin{cases} L_q = L_d = L_{a0} - M_{ab0} = \frac{3}{2} L_{a0} \\ L_0 = L_{a0} + 2M_{ab0} = 0 \end{cases}$$

$$P(\Theta)[M_{sr}] = \begin{bmatrix} M_{af} & M_{aD} & 0 \\ 0 & 0 & M_{aQ} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = [M_{sr}^{dq0}];$$

$$[M_{rs}]P(\Theta)^{-1} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} M_{af} & 0 & 0 \\ M_{aD} & 0 & 0 \\ 0 & M_{aQ} & 0 \end{bmatrix} = [M_{rs}^{dq0}]$$

$$\begin{cases} (\varphi_{dq0}) = [L_{ss}^{dq0}](i_{dq0}) + [M_{sr}^{dq0}](i_r) \\ (\varphi_r) = [M_{rs}^{dq0}](i_{dq0}) + [L_{rr}](i_r) \end{cases} \quad (III.38)$$

On peut écrire les équations magnétiques liant les flux aux courants sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \\ \varphi_0 \\ \varphi_f \\ \varphi_D \\ \varphi_Q \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 & M_{af} & M_{aD} & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 & 0 & M_{aQ} \\ 0 & 0 & L_0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{3}{2}M_{af} & 0 & 0 & L_f & M_{fD} & 0 \\ \frac{3}{2}M_{aD} & 0 & 0 & M_{Df} & L_D & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}M_{aQ} & 0 & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{pmatrix} \quad (III.39)$$

III.5.8 Schéma équivalent de l'alternateur dans le repère de Park

L'utilisation de la transformation de Park permet de considérer l'alternateur comme un système composé de deux réseaux électriques caractérisant l'axe longitudinal d et l'axe transversal q [19]. (Fig.III.18).

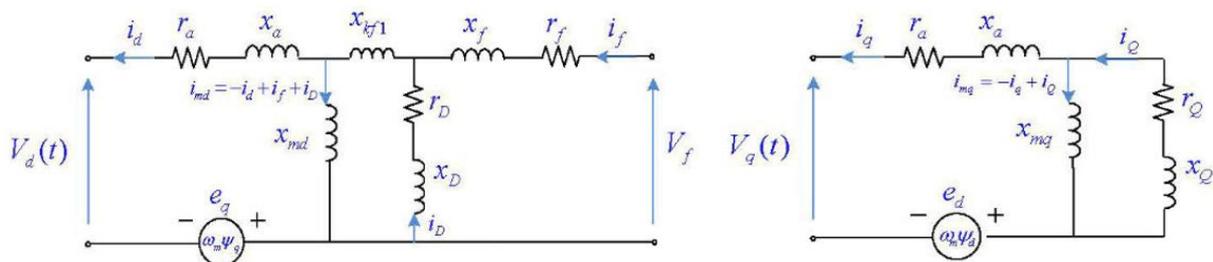


Figure III.18 : Circuits électriques équivalents de l'alternateur triphasée dans le repère de Park

III.5.9 L'expression de la puissance

$$P_e = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = (i_s)^T (v_s) = (P(\Theta)^{-1}(i_{dq0}))^T (P(\Theta)^{-1}(v_{dq0})) \quad (III.40)$$

$$P_e = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q + 2v_0 i_0)$$

$$P_e = \frac{3}{2} \left[-R_s (i_d^2 + i_q^2 + 2i_0^2) - \left(\frac{d\varphi_d}{dt} i_d + \frac{d\varphi_q}{dt} i_q + 2 \frac{d\varphi_0}{dt} i_0 \right) + \omega (\varphi_d i_q - \varphi_q i_d) \right] \quad (\text{III.41})$$

$$P_e = \text{therme 1} + \text{therme 2} + \text{therme 3}$$

Avec :

Therme 1 = $\frac{3}{2} R_s (i_d^2 + i_q^2 + 2i_0^2)$; perte joules.

Therme 2 = $\frac{3}{2} \left(\frac{d\varphi_d}{dt} i_d + \frac{d\varphi_q}{dt} i_q + 2 \frac{d\varphi_0}{dt} i_0 \right)$; la variation de l'énergie magnétique emmagasinée par unité de temps.

Therme 3 = $\frac{3}{2} \omega (\varphi_d i_q - \varphi_q i_d)$; représente la puissance électromagnétique (P_{em})

III.5.10 L'expression de couple

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\omega} \quad (\text{III.42})$$

$$C_{em} = \frac{3}{2} \frac{\omega (\varphi_d i_q - \varphi_q i_d)}{\omega} = \frac{3}{2} (\varphi_d i_q - \varphi_q i_d) \quad (\text{III.43})$$

On a aussi l'équation mécanique de l'alternateur :

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\omega}{dt} + f_v \omega \quad (\text{III.44})$$

Où :

C_r : couple résistant.

J : l'inertie des parties tournantes.

f_v : le coefficient de frottement visqueux.

III.6 Impact des défauts système redresseur sur l'excitatrice

Le défaut électrique inhérent aux alternateurs à diodes tournantes concerne précisément les diodes du redresseur. Les défauts de diodes sont en effet des anomalies relativement récurrentes qui sont la source de dysfonctionnements dans le système. Les ponts redresseurs à diodes installés dans les alternateurs sont les victimes d'attaques électriques extrêmement rapides et violentes. Lors de connexions défectueuses au réseau ou de manipulations de charges électriques inadéquates, des retours de puissances importantes vers le pont de diodes sont possibles. A la manière de la foudre frappant une ligne électrique, ils créent des surtensions importantes [19].

III.6.1 Nature des défauts redresseur

Les défauts de diodes se matérialisent par la mise en court-circuit ou en circuit-ouvert d'une ou de plusieurs diodes du pont redresseur triphasé. En fonction de l'importance de la surtension, une diode est susceptible soit de claquer quasiment instantanément et de demeurer des lors en circuit-ouvert, soit de passer par une phase plus ou moins longue de court-circuit finissant, après destruction des matériaux semi-conducteurs, dans un état de circuit ouvert.

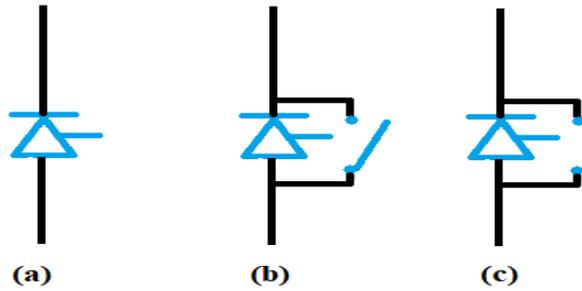


Figure III.19 : (a) Etat normal. (b) ; Etat Circuit-Ouvert. (c) ; Etat Court-Circuit

III.6.2 Simulation des défauts au niveau des redresseurs

Paramètres de simulation :

$$V = 230.94 \text{ V}, f = 50 \text{ Hz}, R = 2 \Omega$$

$$\text{Temps de simulation : } t_s = 0.2 \text{ s}$$

$$\text{Temps de provocation de défaut : } t_p = 0.1 \text{ s}$$

Les diodes et les thyristors sont considérés comme parfaits.

III.6.3 Comportement d'un redresseur PD3 à diodes (étude des tensions)

III.6.3.1 Sans défaut

a) Tension redressée

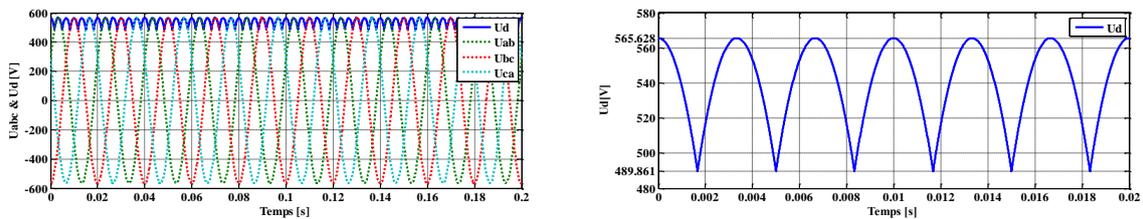


Figure III.20 : Tensions composées et tension redressée sur une période ($T = 2\pi$)

b) Tension moyenne redressée

Pour calculer la valeur moyenne de la tension redressée on fait appel à l'équation (III.13)

$$U_{d0} = 0.955 u_{dM}; \text{ Avec } u_{dM} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot V = \sqrt{6} \cdot V = 565.685 \text{ V.}$$

On obtient :

$$U_{d0} = 540.229 \text{ V}; \text{ ce qui correspond à la valeur trouvée dans la figure III.21.}$$

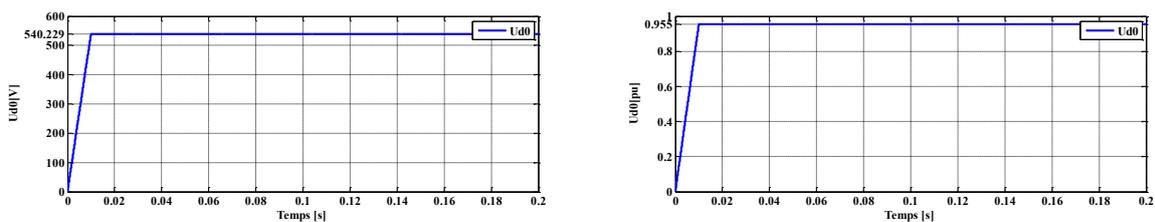


Figure III.21 : Tension moyenne redressée

III.6.3.2 Défaut circuit ouvert

a) Tension redressée

En provoquant l'ouverture de D_1 à t_p on obtient la figure suivante :

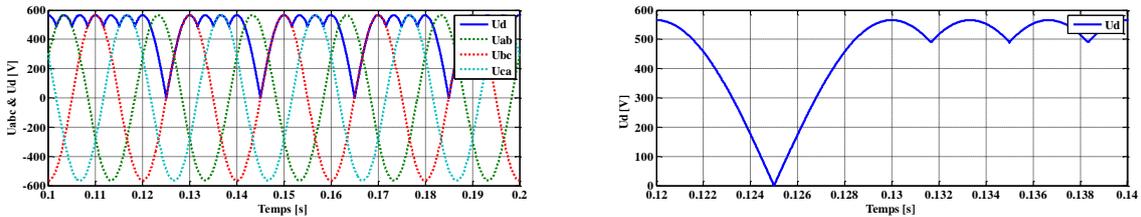


Figure III.22 : Tensions composées et tension redressée sur une période ($T = 2\pi$)

b) Tension moyenne redressée :

La tension redressée $u_d(t)$ présente une période de 2π . La fonction étant paire, nous pouvons intégrer sur une demi-période :

$$u_{d0co} = \frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi + \frac{\pi}{2}} u_d \cdot d\theta, \text{ avec } \theta = \omega t = 2\pi ft.$$

Soit, en décomposant l'intervalle d'intégration en deux parties correspondant à deux tronçons de courbes de tensions composées :

$$u_{d0co} = \frac{1}{\pi} \left[\int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{7\pi}{6}} u_{bc} \cdot d\theta + \int_{\frac{7\pi}{6}}^{\frac{3\pi}{2}} u_{ba} \cdot d\theta \right] = \frac{1}{\pi} \left[\int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{7\pi}{6}} u_{dm} \cdot \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) d\theta - \int_{\frac{7\pi}{6}}^{\frac{3\pi}{2}} u_{dm} \cdot \sin\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) d\theta \right]$$

L'intégration s'effectue immédiatement :

$$u_{d0co} = \frac{2.5 u_{dm}}{\pi} = 0.795 u_{dm} \tag{III.44}$$

On obtient :

$u_{d0co} = 449.72 \text{ V}$; ce qui correspond à la valeur trouvée dans la figure III.23.

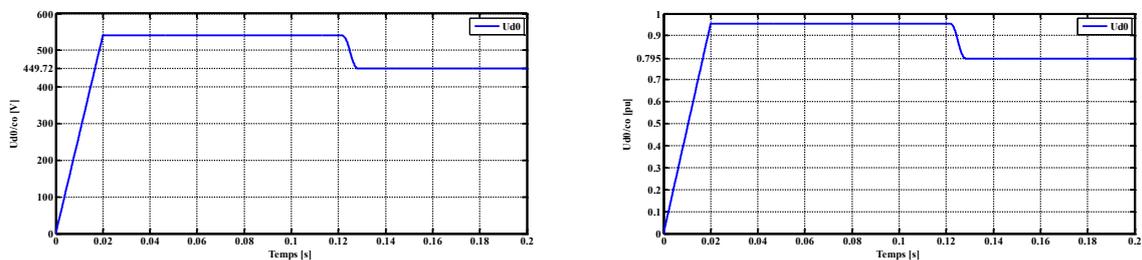


Figure III.23 : Tension moyenne redressée

Remarque :

Si on compare les deux tensions moyennes u_{d0} et u_{d0co} on remarquera une baisse de tension de 16.67 %.

III.6.3.3 Défaut court-circuit

a) Tension redressée

En provoquant le court-circuit de D_1 à t_p on obtient la figure suivante :

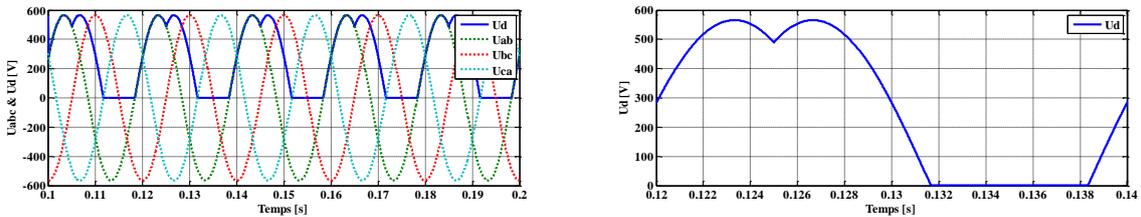


Figure III.24 : Tensions composées et tension redressée sur une période ($T = 2\pi$)

b) Tension moyenne redressée :

La tension redressée $u_d(t)$ présente une période de 2π . La fonction étant paire, nous pouvons intégrer sur une demi-période :

$$u_{d0co} = \frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi+\frac{\pi}{2}} u_d \cdot d\theta, \text{ avec } \theta = \omega t = 2\pi ft.$$

Soit, en décomposant l'intervalle d'intégration en deux parties correspondant à deux tronçons de courbes de tensions composées :

$$u_{d0cc} = \frac{1}{\pi} \left[\int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{7\pi}{6}} u_{bc} \cdot d\theta + 0 \right] = \frac{1}{\pi} \left[\int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{7\pi}{6}} u_{dm} \cdot \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) d\theta \right]$$

L'intégration s'effectue immédiatement :

$$u_{d0cc} = \frac{1.5}{\pi} u_{dm} = 0.477 u_{dm} \tag{III.45}$$

On obtient :

$u_{d0cc} = 270.114 \text{ V}$; ce qui correspond à la valeur trouvée dans la figure III.25.

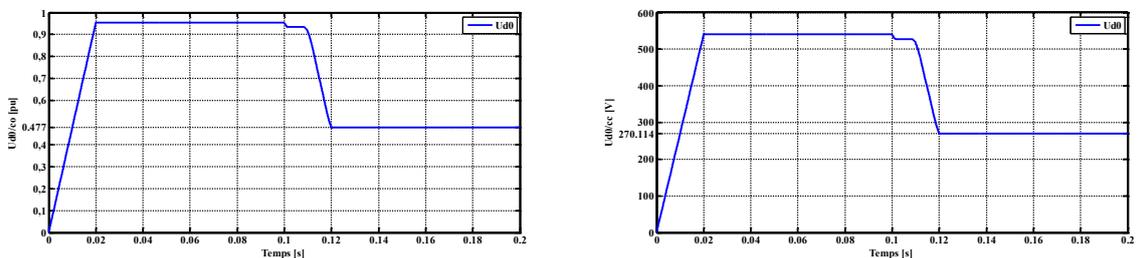


Figure III.25 : Tension moyenne redressée

Remarque :

Si on compare les deux tensions moyennes u_{d0} et u_{d0cc} on remarquera une baisse de tension de 50 %.

III.6.4 Comportement d'un redresseur PD3 à thyristors (étude des tensions)

Remarque : Valeur de la tension moyenne du thyristor.

Après avoir effectué plusieurs simulations pour les deux cas (circuit-ouvert et court-circuit) tout en faisant varier l'angle d'amorçage α de 0 à $\frac{\pi}{2}$, nous avons déduit que la valeur de la tension moyenne dans les deux cas ($u_{d0cc} = u_{d0co} = 180.063 \text{ v}$; pour $\alpha = \frac{\pi}{3}$) est identique malgré la différence des allures des tensions redressées (voir la figure III.26).

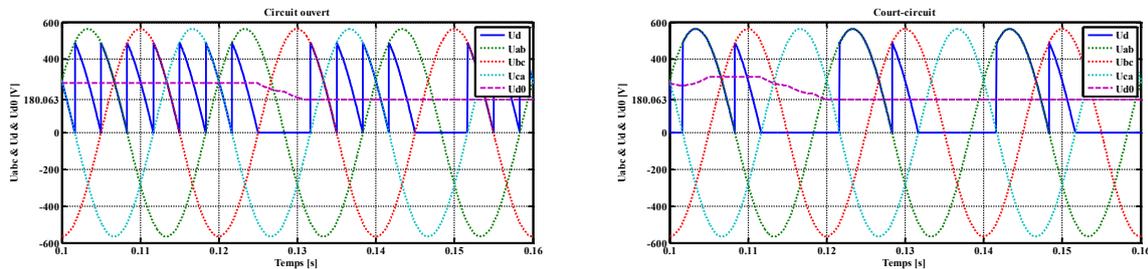


Figure III.26 : Tensions redressée et moyenne pour $\alpha = \frac{\pi}{3}$ (C-C) & (C-O)

A cet effet, il nous est impossible d'exploiter les tensions moyennes pour la détection des défauts ; pour cela nous allons tenter une autre approche, en étudiant les allures des courants d'entrée des redresseurs.

III.6.5 Comportement d'un redresseur PD3 à thyristors (étude des courants)

Pour simplifier notre démarche, on ne va pas étudier le cas de PD3 (diodes) car à $\alpha = 0$, le thyristor se comporte comme une diode.

On sait aussi que l'intensité du courant dans un thyristor est égale à I_0 lorsque ce dernier est passant et elle est nulle quand il est bloqué.

Chaque thyristor est traversé par un courant d'intensité I_0 pendant un tiers de la période donc on aura :

$$I_0 = 3 \cdot I_{th0} \quad (\text{III.46})$$

Étant donné que notre source est un système parfaitement équilibré et que la charge est purement résistive il en résulte les expressions suivantes :

$$I_a(t) + I_b(t) + I_c(t) = 0 \quad (\text{III.47})$$

D'après la loi d'Ohm : $U = RI$, on déduit la valeur moyenne du courant :

$$I_{d0}(t) = \frac{U_{d0}(t)}{R}, I_a(t) = \frac{U_a(t)}{R} \quad (\text{III.48})$$

L'intensité instantanée des courants dans les fils (a, b ou c) est la différence de l'intensité du haut et du bas d'un pont redresseur comme nous le montre la figure III.27. En appliquant la loi des nœuds, on obtient les expressions suivantes :

$$\begin{cases} I_a(t) = I_{th1}(t) - I_{th2}(t) \\ I_b(t) = I_{th3}(t) - I_{th4}(t) \\ I_c(t) = I_{th5}(t) - I_{th6}(t) \end{cases} \quad (\text{III.49})$$

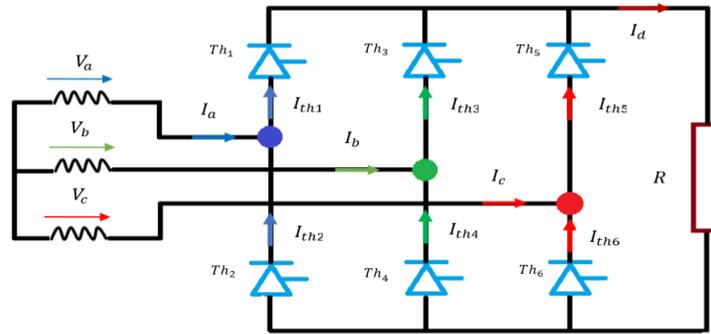


Figure III.27 : PD3 à thyristors

III.6.5.1 Sans défaut

a) Allures des courants $I_a(t), I_b(t)$ et $I_c(t)$.

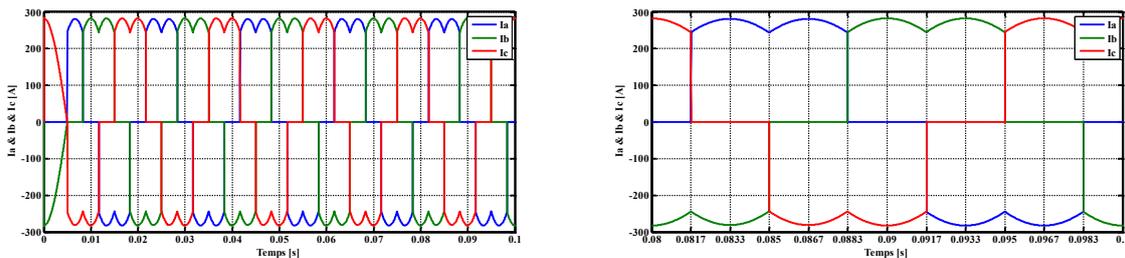


Figure III.28 : Courants d'entrée I_a, I_b et I_c

D'après la figure III.28, on constate que :

$I_a(t), I_b(t)$ ou $I_c(t)$: se compose de quatre portions de sinusoides par période T, deux sont positives et les deux autres négatives. Les portions positives correspondent à la partie haute d'un bras tandis que les autres représentent la partie basse d'un bras. On prendra le courant $I_a(t)$ et montrer les allures des courants $I_{th1}(t)$ et $I_{th2}(t)$ dans les figures suivantes :

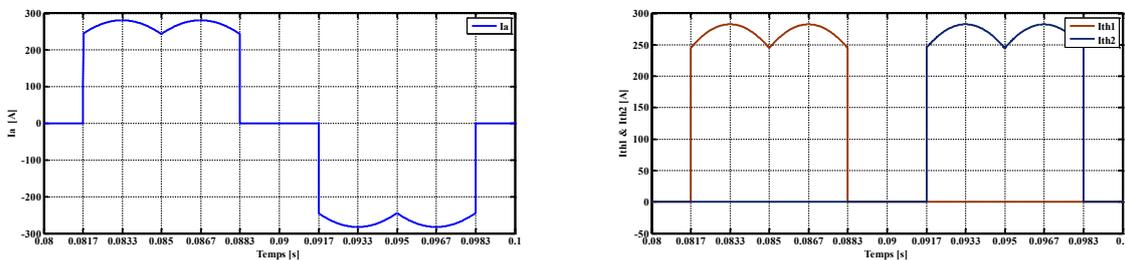


Figure III.29 : Courant I_a courants I_{th1} et I_{th2} sur une période ($T=2\pi$)

La figure III.29 nous confirment l'expression (III.49)

Pour faciliter l'écriture de ses portions nous allons illustrer trois courants dont l'expression suivante :

$$i_{abc}(t) = \frac{U_{abc}(t)}{R} = \begin{cases} i_{ab}(t) = \frac{u_{dM}}{R} \sin(\theta + \frac{\pi}{6}) \\ i_{bc}(t) = \frac{u_{dM}}{R} \sin(\theta - \frac{\pi}{2}) \\ i_{ca}(t) = \frac{u_{dM}}{R} \sin(\theta - \frac{7\pi}{6}) \end{cases} \quad (III.50)$$

La figure III.30 nous montre l'évolution des courant $I_{abc}(t)$ pour une valeur de $\alpha = 0$ et $\frac{\pi}{12}$.

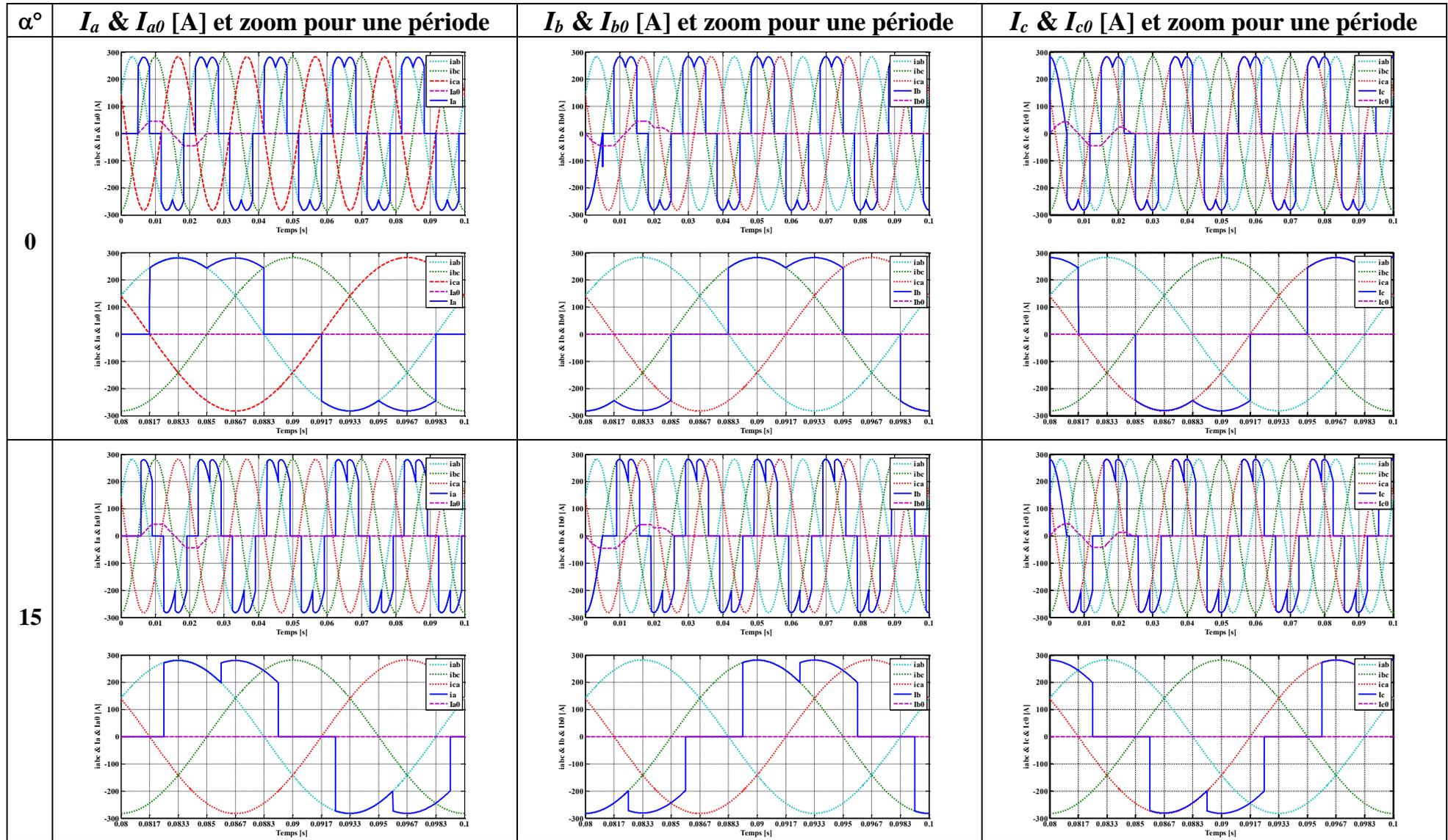


Figure III.30 : Evolution des courants $I_{abc}(t)$ sans défaut pour $\alpha = 0$ et $\frac{\pi}{12}$

Nous constatons que ses trois courants se décalent toujours de α . Donc on peut écrire l'expression (III.49) sous cette forme :

$$\begin{cases} I_a(\theta) = ((i_{ab}(\theta)|_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} + (-i_{ca}(\theta)|_{\frac{5\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{2}+\alpha})) - (i_{ab}(\theta)|_{\frac{7\pi}{6}+\alpha}^{\frac{3\pi}{2}+\alpha} + (-i_{ca}(\theta)|_{\frac{11\pi}{6}+\alpha}^{\frac{11\pi}{2}+\alpha})) \\ I_b(\theta) = (i_{bc}(\theta)|_{\frac{7\pi}{6}+\alpha}^{\frac{7\pi}{6}+\alpha} + (-i_{ab}(\theta)|_{\frac{3\pi}{6}+\alpha}^{\frac{3\pi}{2}+\alpha})) - \left(i_{bc}(\theta)|_{\frac{11\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{6}+\alpha} + \left(-I_{ab}(\theta)|_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} \right) \right) \\ I_c(\theta) = ((i_{ca}(\theta)|_{\frac{11\pi}{6}+\alpha}^{\frac{11\pi}{6}+\alpha} + (-i_{bc}(\theta)|_{\frac{5\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{6}+\alpha})) - (i_{ca}(\theta)|_{\frac{5\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{2}+\alpha} + \left(-I_{bc}(\theta)|_{\frac{7\pi}{6}+\alpha}^{\frac{7\pi}{6}+\alpha} \right)) \end{cases} \quad (\text{III.51})$$

L'**annexe 1** nous montre les différentes allures des courants d'entrée $I_a(t)$, $I_b(t)$ et $I_c(t)$ sans défaut ainsi que leur valeur moyenne pour α variable.

b) Valeurs moyennes des courants :

$$I_{a0} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_a(\theta) \cdot d\theta; \quad I_{b0} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_b(\theta) \cdot d\theta; \quad I_{c0} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_c(\theta) \cdot d\theta$$

$$I_{a0} = \frac{u_{dM}}{2\pi \cdot R} \left[\left(\left[-\cos\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) \right]_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} + \left[\cos\left(\theta - \frac{7\pi}{6}\right) \right]_{\frac{5\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{2}+\alpha} \right) - \left(\left[-\cos\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) \right]_{\frac{7\pi}{6}+\alpha}^{\frac{3\pi}{2}+\alpha} + \left[\cos\left(\theta - \frac{7\pi}{6}\right) \right]_{\frac{11\pi}{6}+\alpha}^{\frac{11\pi}{2}+\alpha} \right) \right] \quad (\text{III.52})$$

$$I_{b0} = \frac{u_{dM}}{2\pi \cdot R} \left[\left(\left[-\cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \right]_{\frac{5\pi}{6}+\alpha}^{\frac{7\pi}{6}+\alpha} + \left[\cos\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) \right]_{\frac{3\pi}{6}+\alpha}^{\frac{3\pi}{2}+\alpha} \right) - \left(\left[-\cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \right]_{\frac{11\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{6}+\alpha} + \left[\cos\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) \right]_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} \right) \right] \quad (\text{III.53})$$

$$I_{c0} = \frac{u_{dM}}{2\pi \cdot R} \left[\left(\left[-\cos\left(\theta - \frac{7\pi}{6}\right) \right]_{\frac{3\pi}{6}+\alpha}^{\frac{11\pi}{6}+\alpha} + \left[\cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \right]_{\frac{11\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{6}+\alpha} \right) - \left(\left[-\cos\left(\theta - \frac{7\pi}{6}\right) \right]_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}+\alpha} + \left[\cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \right]_{\frac{5\pi}{6}+\alpha}^{\frac{7\pi}{6}+\alpha} \right) \right] \quad (\text{III.54})$$

Nous avons utilisé Excel pour le calcul des valeurs moyennes après avoir introduit toutes ces formules et cela, juste en donnant l'angle d'amorçage α qui varie de 0 à $\frac{\pi}{2}$ ($0 \leq \alpha < \frac{\pi}{2}$).

Il en résulte que :

Ces courants sont nuls ($I_{a0} = I_{b0} = I_{c0} = 0$) quel que soit la valeur de l'angle d'amorçage α .

III.6.5.2 Défaut circuit ouvert

a) Allures des courants $I_a(t)$, $I_b(t)$ et $I_c(t)$.

En provoquant l'ouverture de Th_1 à t_p on obtient les résultats dans la figure III.31 nous montre l'évolution des courant $I_{abc}(t)$ pour une valeur de $\alpha = 0$ et $\frac{\pi}{12}$. Nous avons constaté que :

Les portions positives de courant $I_a(t)$ sont devenues nulles et que l'allure du courant se décale de α .

Sur les autres courants il y'a une seule portion négative qui est nulle.

Nous déduirons ainsi les expressions des courants d'entrée :

$$\begin{cases} I_a(\theta) = -I_{th2}(\theta) = -(i_{ab}(\theta)|_{\frac{7\pi}{6}+\alpha}^{\frac{3\pi}{6}+\alpha} + (-i_{ca}(\theta)|_{\frac{11\pi}{6}+\alpha}^{\frac{11\pi}{2}+\alpha})) \\ I_b(\theta) = I_{th3}(\theta) - I_{th4}(\theta) = (i_{bc}(\theta)|_{\frac{5\pi}{6}+\alpha}^{\frac{7\pi}{6}+\alpha} + (-i_{ab}(\theta)|_{\frac{3\pi}{6}+\alpha}^{\frac{3\pi}{2}+\alpha})) - (i_{bc}(\theta)|_{\frac{11\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{6}+\alpha}) \\ I_c(\theta) = I_{th5}(\theta) - I_{th6}(\theta) = ((i_{ca}(\theta)|_{\frac{11\pi}{6}+\alpha}^{\frac{11\pi}{6}+\alpha} + (-i_{bc}(\theta)|_{\frac{5\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{6}+\alpha})) - \left(-I_{bc}(\theta)|_{\frac{5\pi}{6}+\alpha}^{\frac{7\pi}{6}+\alpha} \right)) \end{cases} \quad (\text{III.55})$$

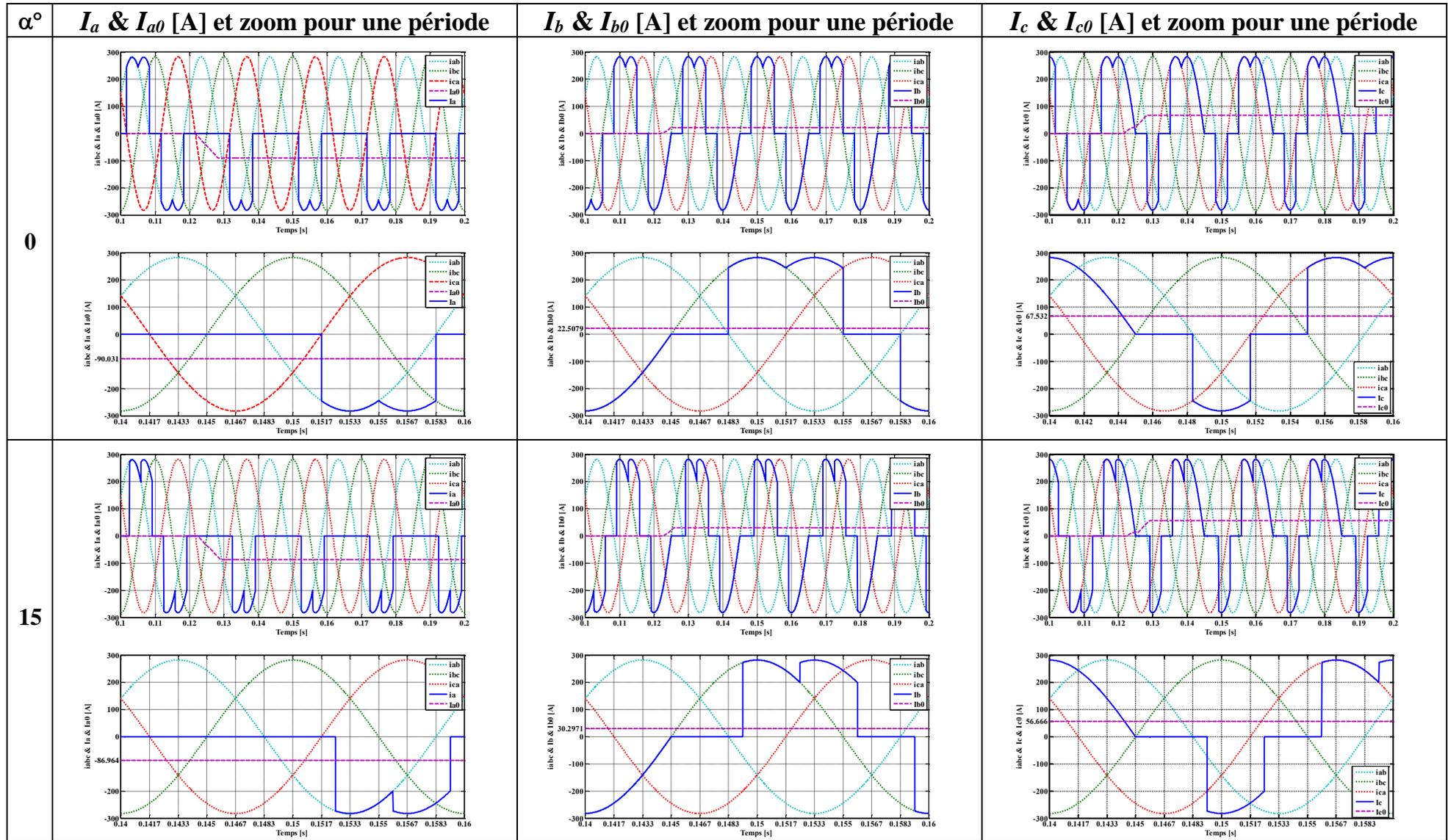


Figure III.31 : Evolution des courants $I_{abc}(t)$ avec défaut circuit-ouvert pour $\alpha = 0$ et $\frac{\pi}{12}$

b) Valeurs moyennes des courants

$$I_{a0} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_a(\theta) \cdot d\theta ; I_{b0} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_b(\theta) \cdot d\theta ; I_{c0} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_c(\theta) \cdot d\theta$$

$$I_{a0} = \frac{u_{dM}}{2\pi \cdot R} \left[- \left(\left[-\cos\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) \right]_{\frac{7\pi}{6}+\alpha}^{\frac{3\pi}{2}+\alpha} + \left[\cos\left(\theta - \frac{7\pi}{6}\right) \right]_{\frac{3\pi}{2}+\alpha}^{\frac{11\pi}{6}+\alpha} \right) \right] \quad (\text{III.56})$$

$$I_{b0} = \frac{u_{dM}}{2\pi \cdot R} \left[\left(\left[-\cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \right]_{\frac{5\pi}{6}+\alpha}^{\frac{7\pi}{6}+\alpha} + \left[\cos\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) \right]_{\frac{7\pi}{6}+\alpha}^{\frac{3\pi}{2}+\alpha} \right) - \left(\left[-\cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \right]_{\frac{11\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} \right) \right] \quad (\text{III.57})$$

$$I_{c0} = \frac{u_{dM}}{2\pi \cdot R} \left[\left(\left[-\cos\left(\theta - \frac{7\pi}{6}\right) \right]_{\frac{3\pi}{2}+\alpha}^{\frac{11\pi}{6}+\alpha} + \left[\cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \right]_{\frac{11\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} \right) - \left(\left[\cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \right]_{\frac{5\pi}{6}+\alpha}^{\frac{7\pi}{6}+\alpha} \right) \right] \quad (\text{III.58})$$

Nous avons utilisé Excel pour le calcul des valeurs moyennes après avoir introduit toutes ces formules et cela, juste en donnant l'angle d'amorçage α qui varie de 0 à $\frac{\pi}{2}$ ($0 \leq \alpha < \frac{\pi}{2}$). Voir tableau ci-dessous :

α	$I_{a0}[A]$	$I_{b0}[A]$	$I_{c0}[A]$
0	-90.0316	22.5079	67.5237
$\frac{\pi}{12}$	-86.9639	30.2971	56.6668
$\frac{\pi}{6}$	-77.9697	32.9539	45.0158
$\frac{\pi}{4}$	-63.6620	30.2971	33.3649
$\frac{\pi}{3}$	-45.0158	22.5079	22.5079
$\frac{5\pi}{12}$	-23.3019	10.1171	13.1848

Tableau III. 1 : Valeurs moyennes des trois courants pour différentes valeurs α (défaut circuit-ouvert)

D'après ces résultats, nous constatons que la somme des trois courants moyens est toujours nulle donc on peut écrire l'expression qui suit :

$$I_{a0} + I_{b0} + I_{c0} = 0 \quad (\text{III.59})$$

L'**annexe 2** nous montre les différentes allures des courants d'entrée $I_a(t)$, $I_b(t)$ et $I_c(t)$ avec défaut circuit-ouvert ainsi que leur valeur moyenne pour α variable.

III.6.5.3 Défaut court-circuit

a) Allures des courants $I_a(t)$, $I_b(t)$ et $I_c(t)$.

En provoquant un court-circuit de Th_1 à t_p on obtient les résultats de la figure III.32 qui nous montre l'évolution des courant $I_{abc}(t)$ pour une valeur de $\alpha = 0$ et $\frac{\pi}{12}$.

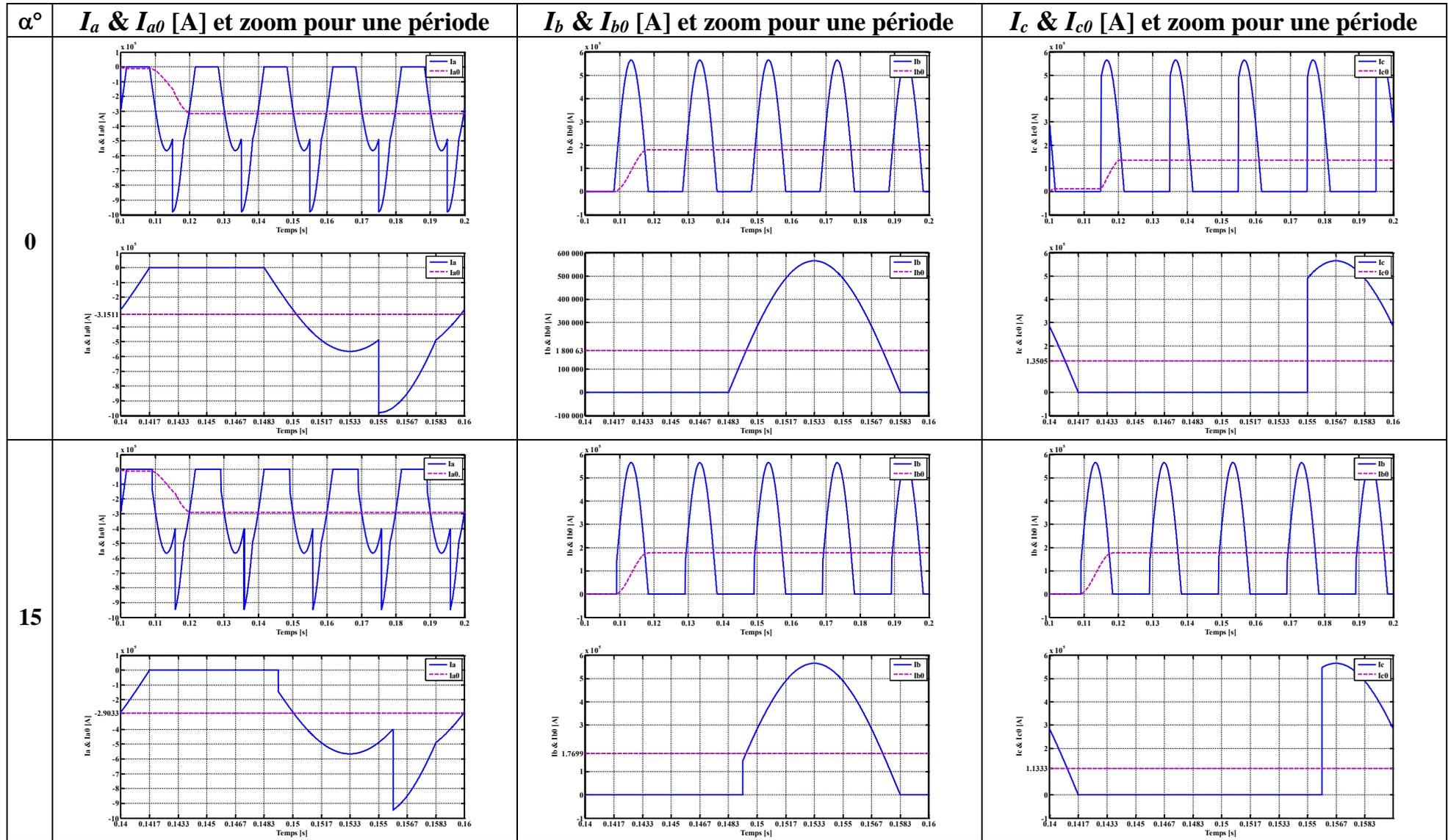


Figure III. 32 : Evolution des courants $I_{abc}(t)$ avec défaut court-circuit pour $\alpha = 0$ et $\frac{\pi}{12}$

Nous avons remarqué que $I_a(t)$ se compose de deux portions de sinusoides par période T et qui sont négatives. Il est très difficile de connaître ces portions de sinusoides car ces formes varient selon l'angle d'amorçage α . Par contre les deux courants $I_b(t)$ et $I_c(t)$ se composent chacune d'une portion de sinusoides par période T, donc il suffit d'illustrer deux allures $i_b(t)$ et $i_c(t)$ toutes en trouvant leurs angles d'origines (à $t = 0$ s) et leurs valeurs max. Les expressions de ces allures sont représentées par les relations suivantes :

$$i_b(t) = I_{max} \sin(\theta + \theta_{0b}) \quad (\text{III.60})$$

$$i_c(t) = I_{max} \sin(\theta + \theta_{0c}) \quad (\text{III.61})$$

Avec :

$$I_{max} = 565685.424 \text{ A}; \theta_{0b} = -\frac{5\pi}{6}; \theta_{0c} = -\frac{7\pi}{6}$$

Ces valeurs sont déterminées à partir de la figure III.33.

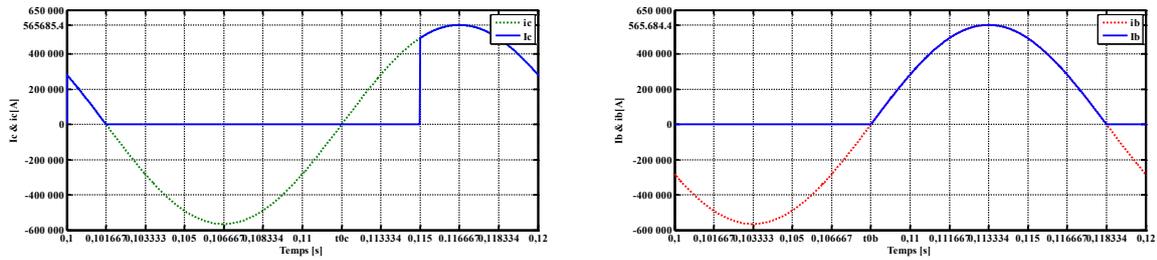


Figure III. 33 : Allures des courants $i_b(t)$, $I_b(t)$ et $i_c(t)$, $I_c(t)$

Nous avons déduit ainsi les expressions des courants d'entrée :

$$I_a(t) = -(I_b(t) + I_c(t)) \quad (\text{III.62})$$

$$I_b(t) = i_b(t) \Big|_{\frac{5\pi}{6} + \alpha}^{\frac{11\pi}{6}} = 565685.424 \sin\left(\theta - \frac{5\pi}{6}\right) \Big|_{\frac{5\pi}{6} + \alpha}^{\frac{11\pi}{6}} \quad (\text{III.63})$$

$$I_c(t) = i_c(t) \Big|_{\frac{3\pi}{2} + \alpha}^{\frac{5\pi}{6} + \alpha} = 565685.424 \sin\left(\theta - \frac{7\pi}{6}\right) \Big|_{\frac{3\pi}{2} + \alpha}^{\frac{5\pi}{6} + \alpha} \quad (\text{III.64})$$

L'**annexe 3** nous montre les différentes allures des courants d'entrée $I_a(t)$, $I_b(t)$ et $I_c(t)$ avec défaut court-circuit ainsi que leur valeur moyenne pour α variable.

b) Valeurs moyennes des courants

$$I_{a0} = -(I_{b0} + I_{c0}) \quad (\text{III.65})$$

$$I_{b0} = 565685.424 \left[\left(\left[-\cos\left(\theta - \frac{5\pi}{6}\right) \right]_{\frac{5\pi}{6} + \alpha}^{\frac{11\pi}{6}} \right) \right] \quad (\text{III.66})$$

$$I_{c0} = 565685.424 \left[\left(- \left[\cos\left(\theta - \frac{7\pi}{6}\right) \right]_{\frac{3\pi}{2} + \alpha}^{\frac{5\pi}{6}} \right) \right] \quad (\text{III.67})$$

De même que pour les cas précédents, on a introduit ces formules dans Excel et on a obtenu les résultats suivants pour différentes valeurs de l'angle d'amorçage α représentés dans le tableau ci-dessous :

α	$I_{a0}[KA]$	$I_{b0}[KA]$	$I_{c0}[KA]$
0	-315.1107	180.0633	135.0474
$\frac{\pi}{12}$	-290.329	176.9955	113.3335
$\frac{\pi}{6}$	-258.0329	168.0013	90.0316
$\frac{\pi}{4}$	-220.4233	153.6936	66.7297
$\frac{\pi}{3}$	-180.0633	135.0474	45.0158
$\frac{5\pi}{12}$	-139.7032	10.1171	26.3697

Tableau III. 2 : Valeurs moyennes des trois courants pour différentes valeurs α (défaut court-circuit)

Remarque : On déduit que si on provoque un court-circuit ou un circuit ouvert dans la partie haute du bras (A), la valeur moyenne du courant qui circule dans ce bras sera négative tandis que les deux autres tendent vers une valeur positive. Ces résultats sont logiques d'après la relation (III.59), $I_{a0} + I_{b0} + I_{c0} = 0 \rightarrow I_{a0} = -(I_{b0} + I_{c0})$.

III.7 Conclusion

Ayant pris comme modèle de référence un alternateur à pôles lisses avec un système d'excitation à diodes tournantes « Brushless ». Nous avons étudié l'impact des systèmes d'excitation, tout en donnant des généralités sur les redresseurs, ainsi que la modélisation de ce dernier.

Nous avons aussi étudié le comportement des tensions et des courants, ainsi que leurs valeurs moyennes dans un redresseur de type PD3 pour ces différents cas (sans défaut, avec défaut circuit-ouvert et défaut court-circuit).

Chapitre IV

Méthode proposée pour le diagnostic de défauts convertisseurs

IV.1 Introduction

Les contraintes en termes de fiabilité, de disponibilité et de sûreté de fonctionnement des systèmes d'excitation imposent aux industriels, qu'ils soient constructeurs ou utilisateurs, de mettre en place une stratégie de maintenance.

De nos jours, une maintenance efficace demande un système de surveillance sophistiqué permettant de prendre les décisions correctes au bon moment, en évitant les pannes et donc les arrêts de production non planifiés. C'est pour cette raison que l'industrie a besoin de méthodes et d'outils de plus en plus performants pour diagnostiquer et évaluer l'état de santé des systèmes d'excitation.

Dans ce chapitre, nous allons développer une méthode pour la détection et la localisation de défauts court-circuit ou circuit ouverts dans les systèmes d'excitation.

IV.2 Méthode de diagnostic pour la localisation et la détection des défauts

Généralement, les méthodes de diagnostic de défauts sur les systèmes d'énergie électrique sont nombreuses. Parmi ces méthodes on peut citer [20] :

- *La méthode de redondance matériel* : cette méthode est associée aux systèmes très critiques où la moindre panne est inenvisageable (centrales nucléaires, aérospatiale, transport aérien.). Il s'agit de multiplier les systèmes pour que, dans le cas d'une défaillance de l'un, un autre prend immédiatement le relais.

- *La méthode de redondance analytique* : elle repose sur un modèle mathématique du système. Ce modèle comporte souvent quelques paramètres. Lors du fonctionnement, les paramètres sont estimés et comparés aux grandeurs théoriques ; le différentiel étant la signature du défaut. Si ce différentiel dépasse un certain seuil, la présence du défaut est signalée à l'utilisateur.

Ces méthodes se basent sur la connaissance globale des informations nécessaires pour le diagnostic (mesures, historique sur l'état précédent de fonctionnement du système...). Pour notre projet de fin d'études, nous allons opter pour une méthode simple et efficace pour le diagnostic de défauts dans les systèmes d'excitations [21].

La méthode proposée pour le diagnostic de défauts est montrée dans le diagramme suivant :

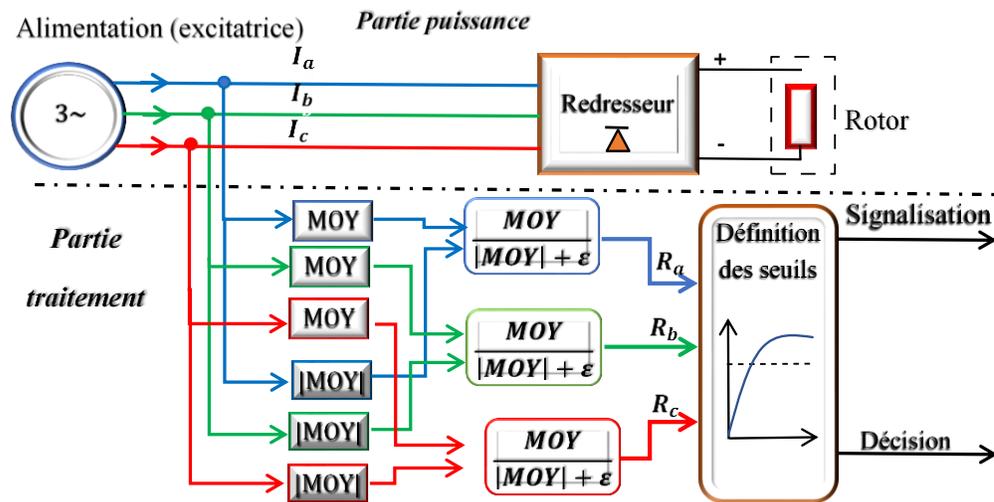


Figure IV.1: Diagramme de la méthode proposée

La méthode développée pour la détection et la localisation des deux types de défauts (court-circuit & circuit-ouvert) dans les redresseurs est basée sur :

- 1- La mesure des courants des trois phases dans la partie puissance ;
- 2- Le calcul de la valeur moyenne des trois courants ;
- 3- Le calcul de la valeur moyenne absolue des trois courants ;
- 4- La détermination des indicateurs de défauts ;
- 5- La détermination du type de défaut ;
- 6- La localisation du défaut ;
- 7- Signalisations et décision.

IV.2.1 Mesure des trois courants de phase

Les expressions instantanées des trois courants développés par l'excitatrice pour les défauts de type *circuit ouvert* sont démontrés dans l'expression précédente (III.55).

Les expressions instantanées des trois courants développés par l'excitatrice pour les défauts de type *court-circuit* sont démontrées dans les expressions précédentes (III.62), (III.63) et (III.65).

IV.2.2 Calcul de la valeur moyenne des trois courants

Les expressions de la valeur moyenne des trois courants développés par l'excitatrice pour les défauts de type *circuit ouvert* sont démontrés dans les expressions précédentes (III.56), (III.57) et (III.58).

Les expressions de la valeur moyenne des trois courants développés par l'excitatrice pour les défauts de type *court-circuit* sont démontrés dans l'expressions précédentes (III.65), (III.66) et (III.67)

IV.2.3 Détermination des indicateurs de défauts

Pour détecter le type de défaut et le localiser dans le système d'excitation, nous avons développé des indicateurs significatifs [21].

Les expressions des indicateurs de défauts s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} R_a = \frac{\langle I_a \rangle}{\langle |I_a| \rangle + \varepsilon} \\ R_b = \frac{\langle I_b \rangle}{\langle |I_b| \rangle + \varepsilon} \\ R_c = \frac{\langle I_c \rangle}{\langle |I_c| \rangle + \varepsilon} \end{cases} \quad (IV.1)$$

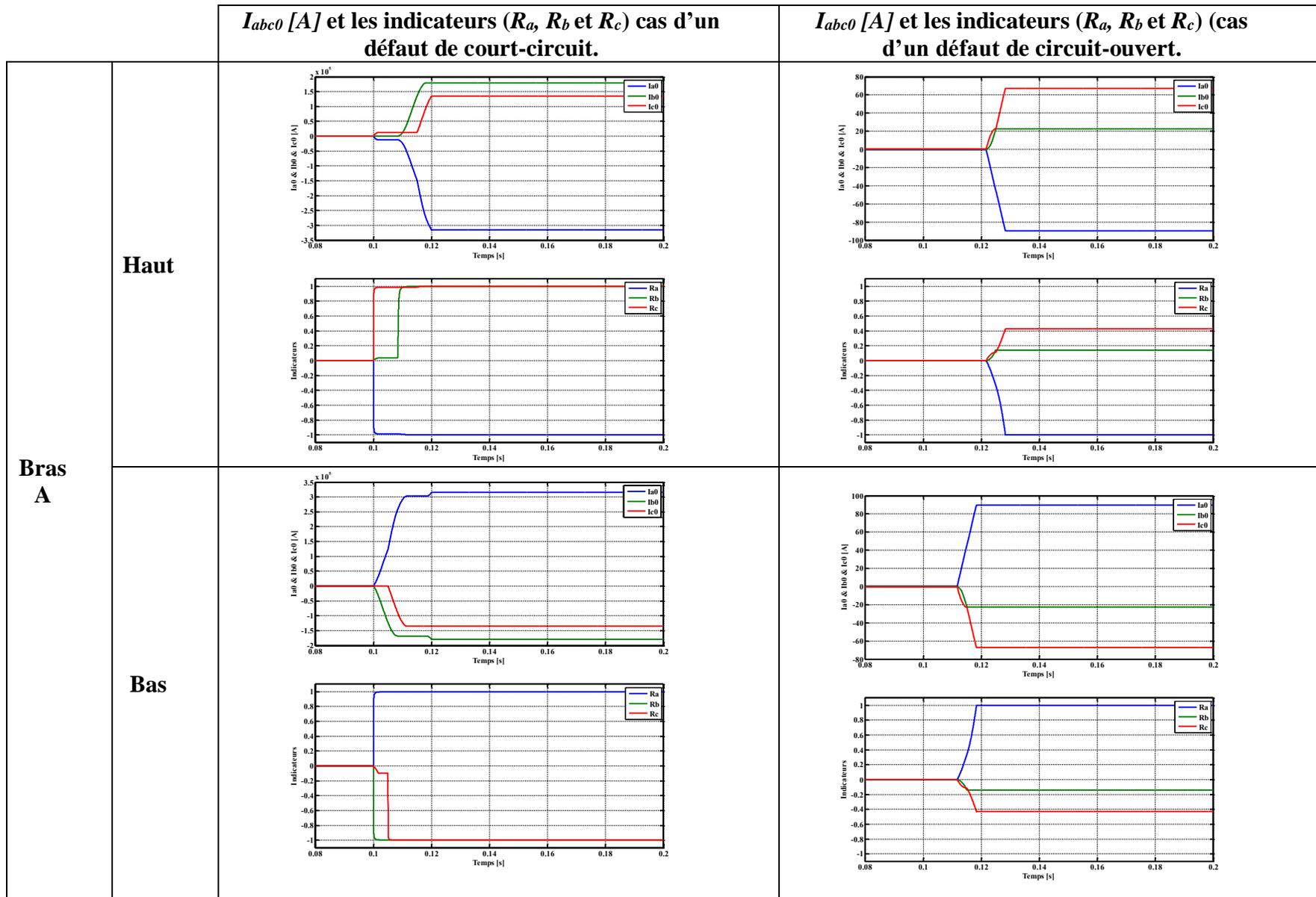
Où :

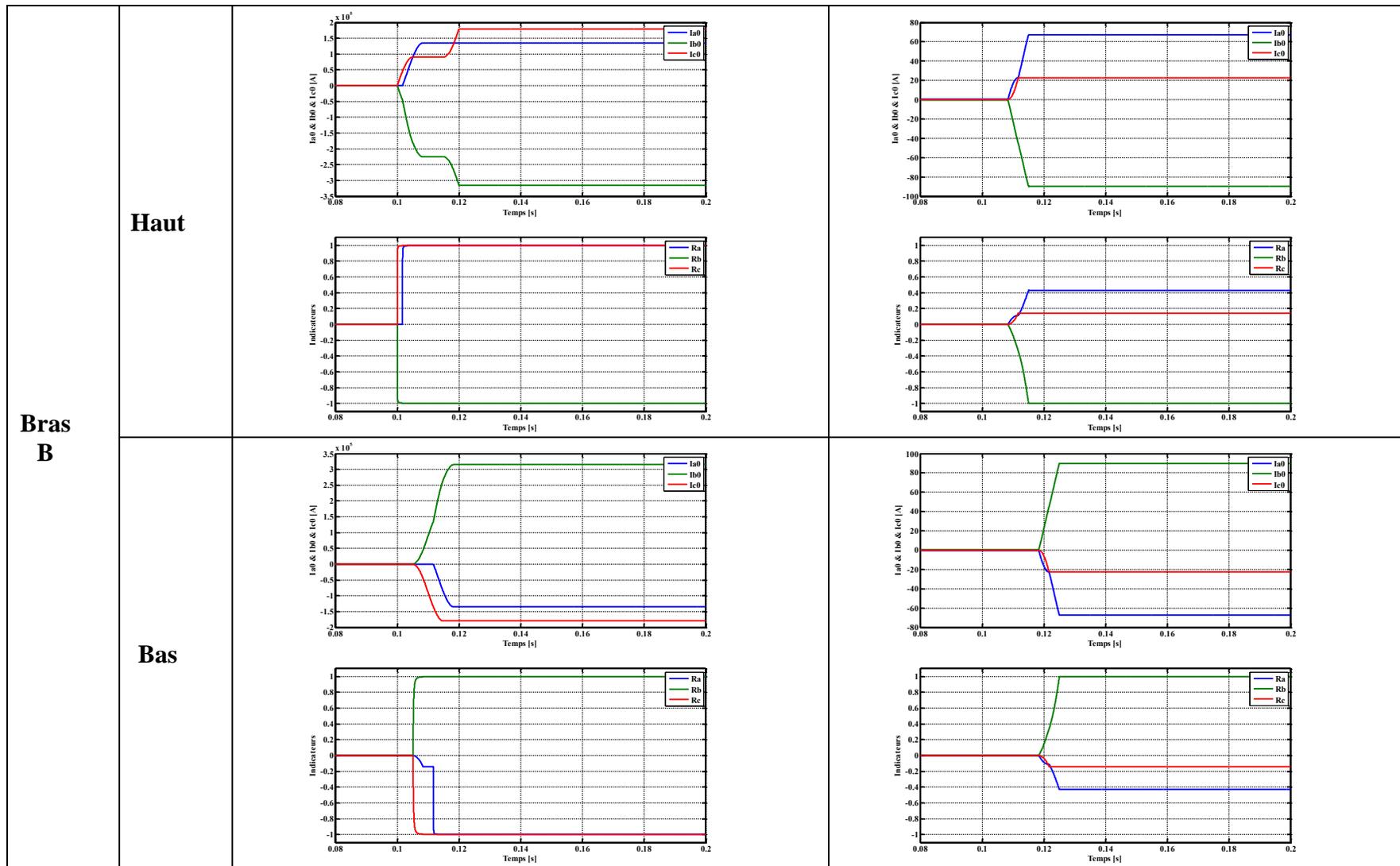
$\langle I_{abc} \rangle$: Valeurs moyennes des courants.

$\langle |I_{abc}| \rangle$: Valeurs moyennes absolues des courants.

ε : Coefficient de très petite valeur utile pour éviter la division par zéro.

La figure IV.2 nous montre l'évolution des indicateurs ainsi que la valeur moyenne des courants pour chaque défaut et pour chaque partie du redresseur.





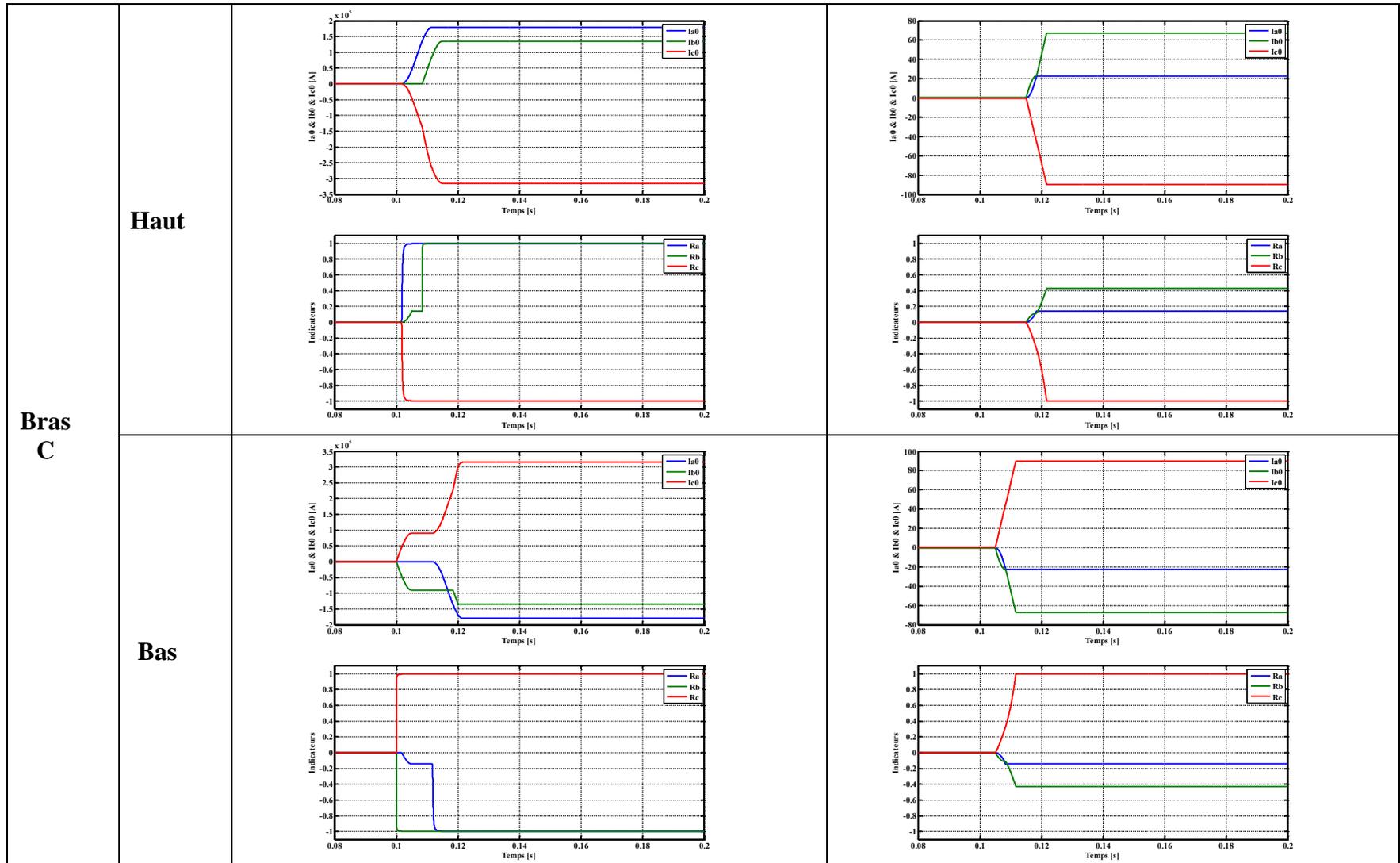


Figure IV.2 : Valeurs moyennes des courants d'entrée et les indicateurs avec défauts (C-O) &(C-C) dans un redresseur

A cet effet, nous ferons une analyse pour connaître le comportement des indicateurs pour chaque défaut et dans n'importe quelle position dans un bras du redresseur.

IV.2.4 Interprétation de l'évolutions des indicateurs

Selon les résultats obtenus par simulation numérique, nous relevons les points suivants :

- Les trois indicateurs R_a , R_b et R_c varient dans un intervalle de valeurs $[-1, +1]$.
 - Chaque indicateur reflète l'image d'un bras du redresseur : R_a : bras A, R_b : bras B, R_c : bras C.
 - Les valeurs des indicateurs R_a , R_b et R_c sont nulles quand il n'y a pas de défaut ($R_a = R_b = R_c = 0$) par contre elles sont différentes de (0) quand il y'a un défaut.
 - Si : $|R_a| = |R_b| = |R_c| = 1$, il y'a un défaut de court-circuit et si $|R_a| \neq |R_b| \neq |R_c| \neq 0 < 1$, le défaut est de circuit ouvert.
 - La localisation du défaut est basée sur le sens des valeurs des indicateurs (positive ou négative).
 - Pour localiser le bras en défaut il suffit de connaître la valeur de l'indicateur qui est de sens contraire que celles des deux autres.
- Exemple** : Si nous trouvons que $R_a: (\pm)$, R_b et $R_c: (\mp)$ c'est le bras (A) qui est en défaut.
- Pour connaître la position haute ou basse du composant en défaut (diode), il suffit de connaître le sens de l'indicateur en question.

Exemple précédent : si $R_a(+)$: défaut dans la partie basse du bras (A) et vice versa.

Le tableau ci-dessous nous résume tous les cas de défauts dans un redresseur

Bras	Position	Défauts (C-C)			Défauts (C-O)		
		R_a	R_b	R_c	R_a	R_b	R_c
(A)	HAUT	-1	+1	+1	-1	<1 et >0	<1 et >0
	BAS	+1	-1	-1	+1	<0 et >-1	<0 et >-1
(B)	HAUT	+1	-1	+1	<1 et >0	-1	<1 et >0
	BAS	-1	+1	-1	<0 et >-1	+1	<0 et >-1
(C)	HAUT	+1	+1	-1	<1 et >0	<1 et >0	-1
	BAS	-1	-1	+1	<0 et >-1	<0 et >-1	+1

Tableau IV.1 : Signatures des défauts C-C & C-O dans le redresseur

IV.2.5 Signalisation et décision

L'organigramme ci-dessous nous permettra de mieux comprendre cette étape ainsi que les étapes précédentes.

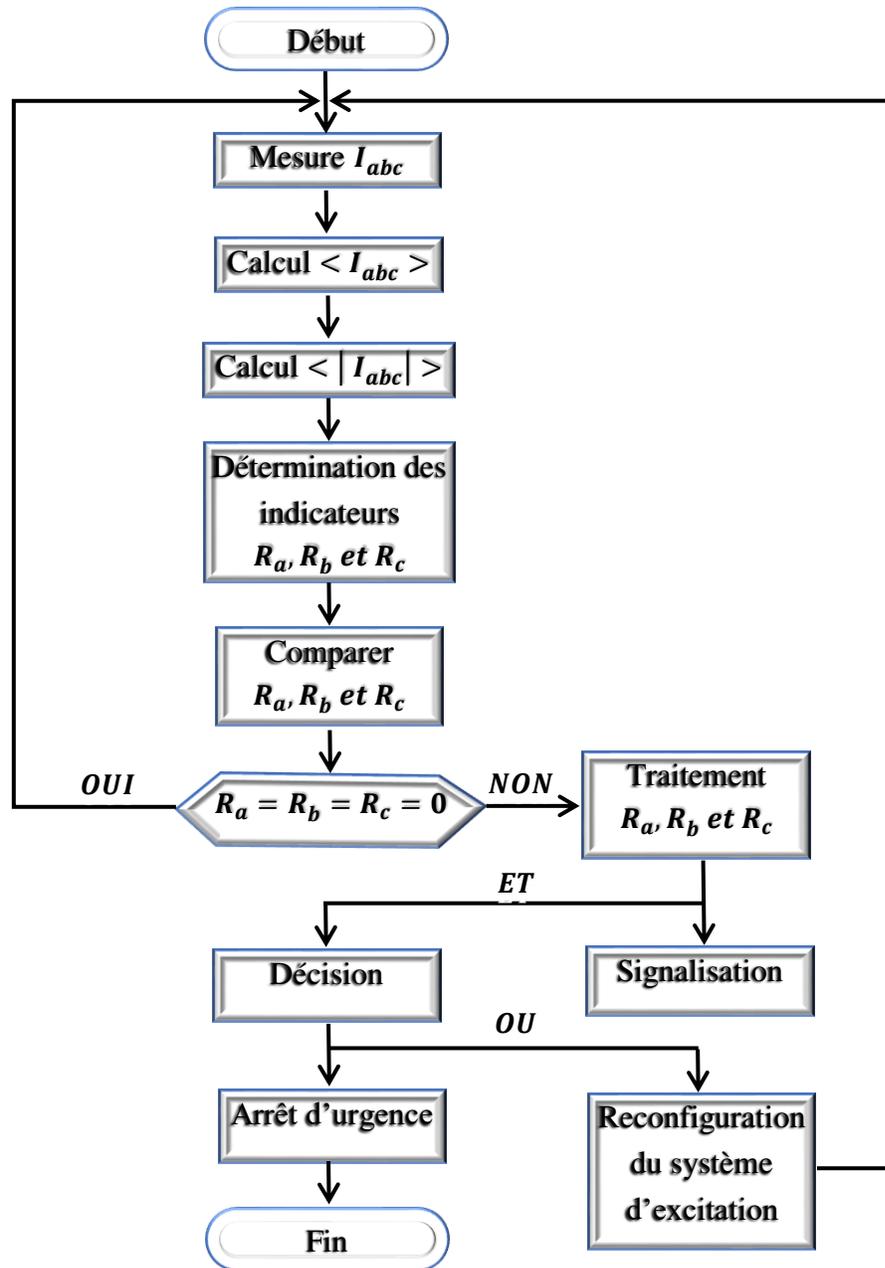


Figure IV.3: Organigramme de la méthode proposée

Nous avons vu précédemment que s'il y'a un défaut, la valeur des indicateurs n'est pas nulle, dans ce cas nous allons entrer dans une phase de traitement de ces indicateurs. Une signalisation

est transmise à la salle de commande pour que l'exploitant constate la nature du défaut et sa localisation ; ainsi il pourra prendre une décision qui sera traitée selon l'ampleur du dégât causé par le défaut. Nous pouvons aussi programmer notre système à prendre une décision qui sera liée à l'impact des dégâts causés dans notre système d'excitation et qui décidera soit à :

- 1- Un arrêt d'urgence : qui nécessite l'isolation totale de l'alternateur (ouverture disjoncteur).
- 2- Reconfiguration du système.

IV.3 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons développé une méthode de diagnostic en exploitant les valeurs moyennes des courants. À cet effet, nous avons créé des indicateurs pour nous faciliter la détection des défauts et leur localisation dans les systèmes d'excitation. En simulant chaque défaut, nous avons interprété l'évolution des indicateurs, qui nous a permis d'établir un organigramme simplifié qui traite ces derniers.

Conclusion générale et perspectives

Dans ce mémoire nous avons étudié la détection et la localisation des défauts dans les convertisseurs AC/DC des systèmes d'excitation en se basant sur les défauts qui peuvent intervenir dans les composants de puissance (diodes et thyristors) du système redresseur.

Nous avons commencé par présenter les différentes sources d'énergie électrique, la production d'électricité ainsi que les moyens adéquats mis en œuvre. Ensuite, nous avons défini l'alternateur en expliquant son principe de fonctionnement ainsi que les composantes principales qui le constituent. Ceci nous a amené à approfondir notre étude sur les systèmes d'excitation, en expliquant le principe de fonctionnement et la composition de chaque système.

Nous avons étudié l'impact des systèmes d'excitation sur un alternateur couplé à un réseau, tout en donnant des généralités sur les redresseurs, ainsi que la modélisation de l'alternateur à pôles lisses. Nous avons aussi abordé le comportement des courants et des tensions, ainsi que leur valeur moyenne dans un redresseur PD3 pour les cas suivants : sans défaut, avec défaut circuit ouvert et défaut court-circuit.

Enfin, nous avons terminé notre mémoire par développer une méthode de diagnostic en exploitant les valeurs moyennes des courants. À cet effet, nous avons créé des indicateurs pour nous faciliter la détection des défauts et leur localisation dans les systèmes d'excitation puis nous avons interprété l'évolution des indicateurs, qui nous a permis d'établir un organigramme simplifié qui traite ces derniers.

Il serait intéressant que ce travail pourrait être suivi par d'autres travaux portant sur :

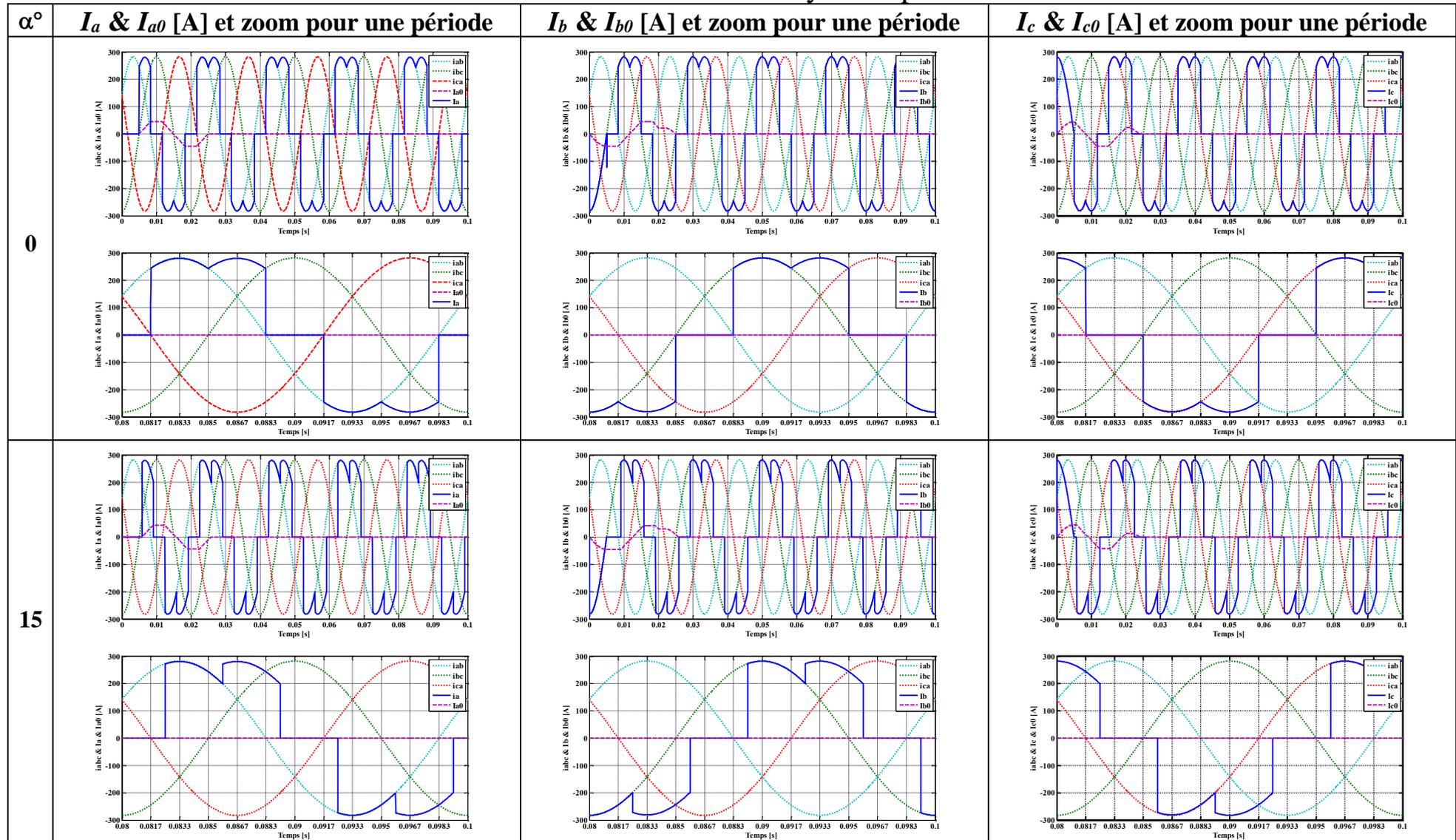
- ✓ le développement des décisions pouvant être prises par le biais d'un programme informatique.
- ✓ le développement des modèles mathématique représentés en tension, en courant et en puissance des systèmes d'excitations des alternateurs (générateurs). Cette modélisation multi-grandeurs permet de constater des multiples défauts électriques dans le système d'excitation.
- ✓ Le développement des méthodes de diagnostic en ligne des défauts des systèmes d'excitations tournants. Cette vision a pour objectif d'assurer un bon fonctionnement des systèmes de production d'énergie électrique.

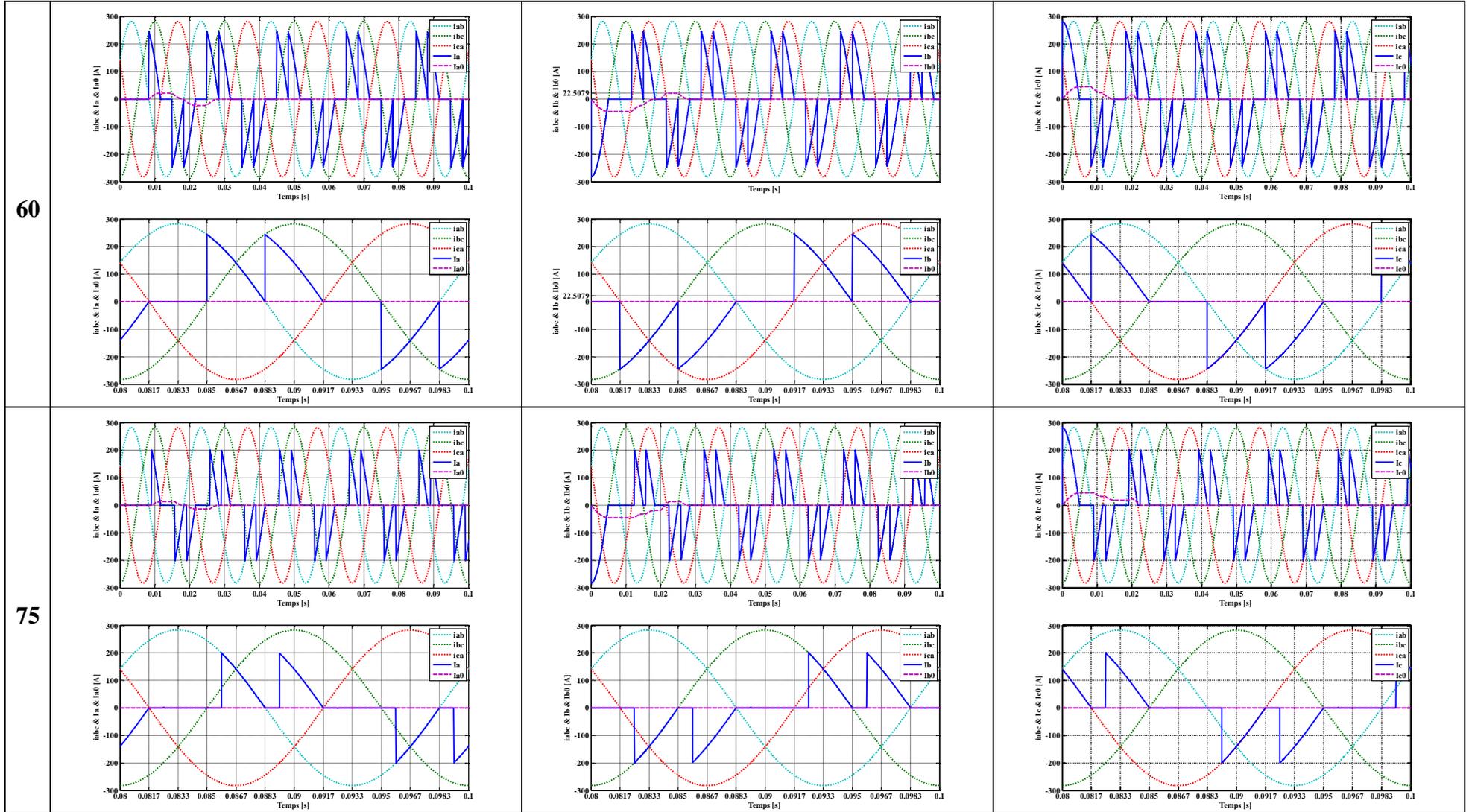
Bibliographie

- [1] www.energy.gov.dz/francais/uploads/2016/Energie/electricite-gaz-maj.pdf
- [2] www.plan-eco-energie-bretagne.fr/.../moyens-de-production-d-energie-electriques.pdf
- [3] documents algériens « aspect algériens de la production et du transport de l'énergie électrique en 1951 » série économique n° 80 du 1 juin 1951.
- [4] O. Khaled « modélisation et optimisation du système d'excitation du groupe turbine alternateur du simulateur analogique d'Hydro-Québec » maîtrise en ingénierie de l'université du Québec mai 2015.
- [5] Bapio BAYALA « LA MACHINE SYNCHRONE » formation continue – techniciens supérieurs – ingénieurs électrotechniciens cours préparé.pdf
- [6] Vladimir Chuvychin, Roman Petrichenko, Nikolay Gurov. “ Optimization of Excitation System Parameters for Kegums Hydra Power Plant of Latvia”.
- [7] M.S. Ghazizadeh, F. M. Hughs, “A Generator Transfer Function Regulator for Improved Excitation Control”, IEEE Trans on. Power Systems, Vol.13, N°2, May 1998, pp. 437- 441.
- [8] Theodore WILDI. Gilbert SYBILLE. « Elechtrotechnique ».4 eme edition.
- [9] Q. Zhao.J.Jiang, « Robust Controller Design for Generator Excitation Systems », IEEE Trans on Energy Conversion, Vol.Lo , N°2, June 1995, pp.201-207.
- [10] Technical Report IEC International Electro technical Commission, ref.34-16-2, « Excitation systems for synchronous machines ». First edition 1991-02.
- [11] P.Kundur. « Power System Stability and Control », New York: Mc-Graw-Hillinc, 1994.
- [12] C.H.Cheng, Y.Y.Hsu, "Damping of Generator Oscillation Using an Adaptative Static Var Compensateur", IEEE Trans on. PowerS ystems, Vol. 7, no.2, May 1992, pp.718-724.
- [13] Hajagos, L.M.; Basler, M.J. « Recommended practice for excitation system models for power system stability studies ». Changes to IEEE 421.5 Power Engineering Society General Meeting 2005 IEEE.
- [14] Bhumaiah Jula, M.Tech, MD.Asif Assoc. Prof, Krishna Enugala, M.Tech. "Simulation for protection of Huge Hydra Generator from Short Circuit Faults", Vol.4, November 2012.
- [15] Université de Savoie « Licence EEA Module U6, Energie et convertisseurs d'énergie ».
- [16] Abdallah Mouhammad BARAKAT : « contribution à l'amélioration de la régulation de tension des générateurs synchrones : nouvelles structures d'excitation associées à des lois de commande h » thèse doctorat l'université de Poitiers novembre 2011.
- [17] Les Cahiers Techniques de MICROENER :« protection des générateurs » cahier N° 10.
- [18] KAHIA Billel « Commande MLI Vectorielle d'un Redresseur Triphasé à Trois niveaux », mémoire master université Sétif 2013.
- [19] C. FILLEAU « Mise en place d'une méthodologie de modélisation en vue du diagnostic des défauts électriques des alternateurs » thèse doctorat INP Toulouse octobre 2017

- [20] BUI VIET Phuong « Diagnostic des machines électriques par analyse du champ magnétique de fuite application à l'identification de défauts rotoriques d'un alternateur à vide ». Thèse doctorat INP Grenoble Octobre 2007
- [21] A. AIBECHE, « Analyse et Diagnostic de Puissance Appliqués dans la Commande Sans Capteur de la Machine Synchrones à Aimants Permanents (MSAP), » Thèse de Doctorat Sciences, Université M'hamed Bougara-Boumerdes, 2016.

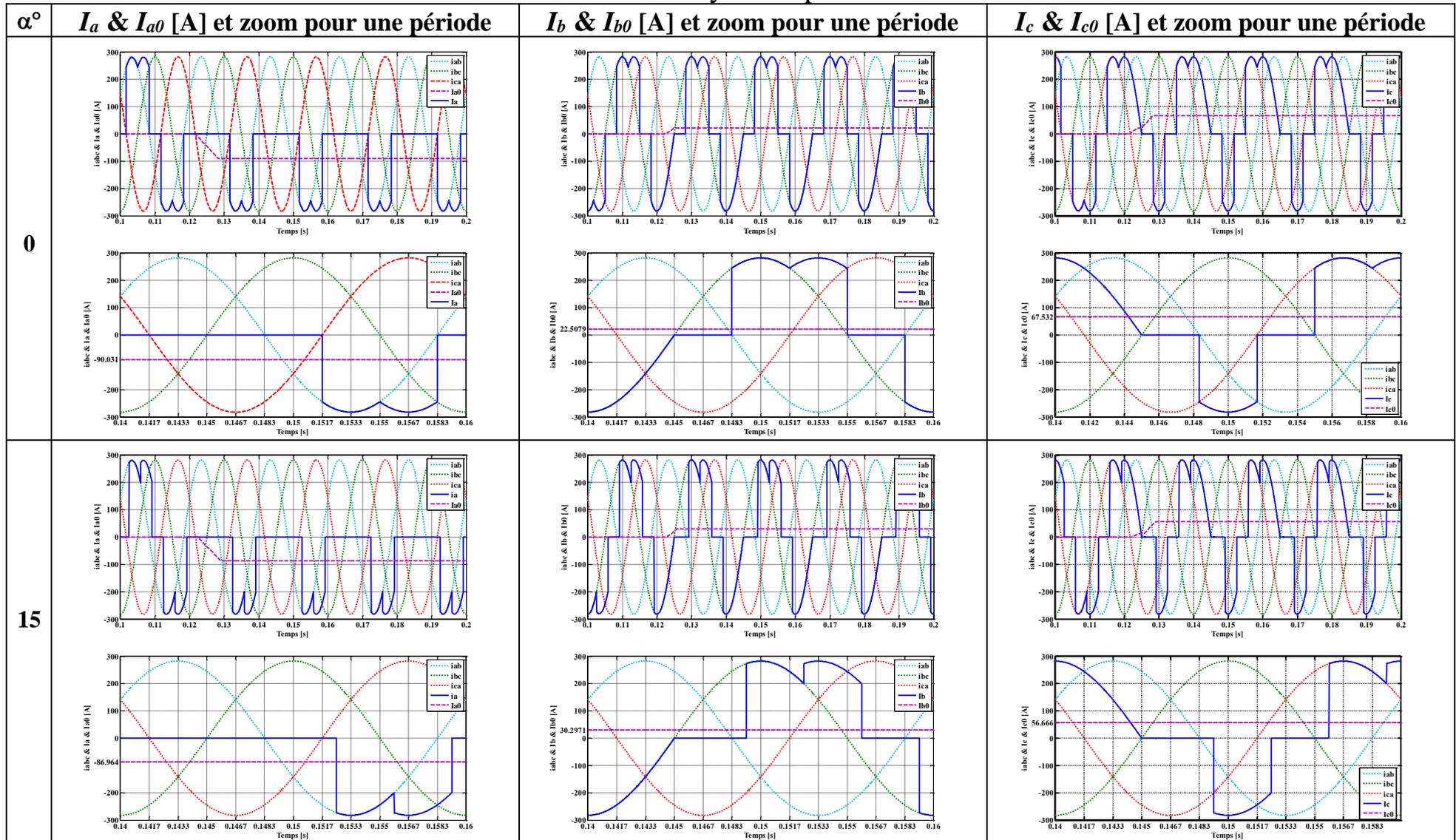
ANNEXE 1 :

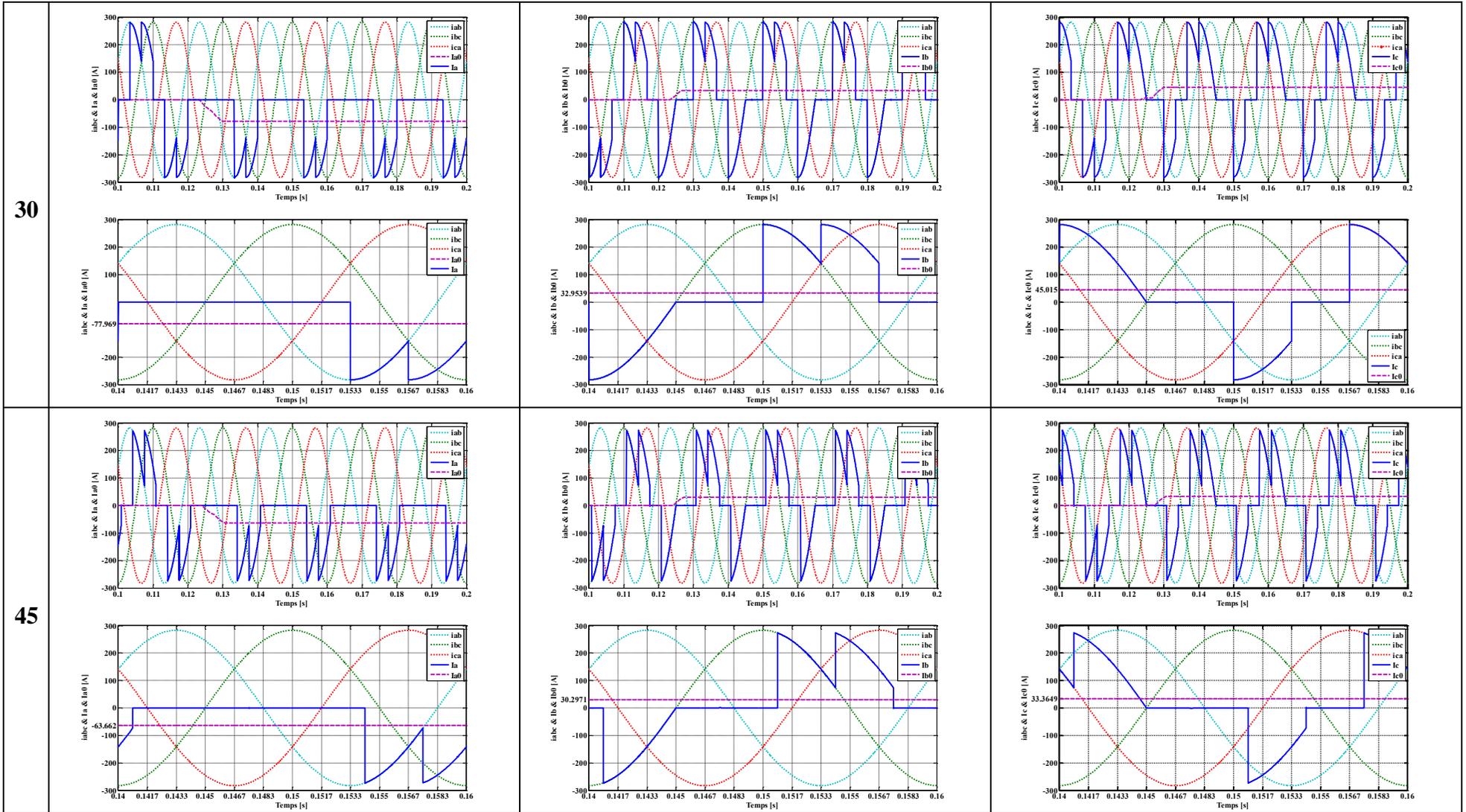
Allures des courants d'entrée et leurs valeurs moyennes pour α variable sans défauts.

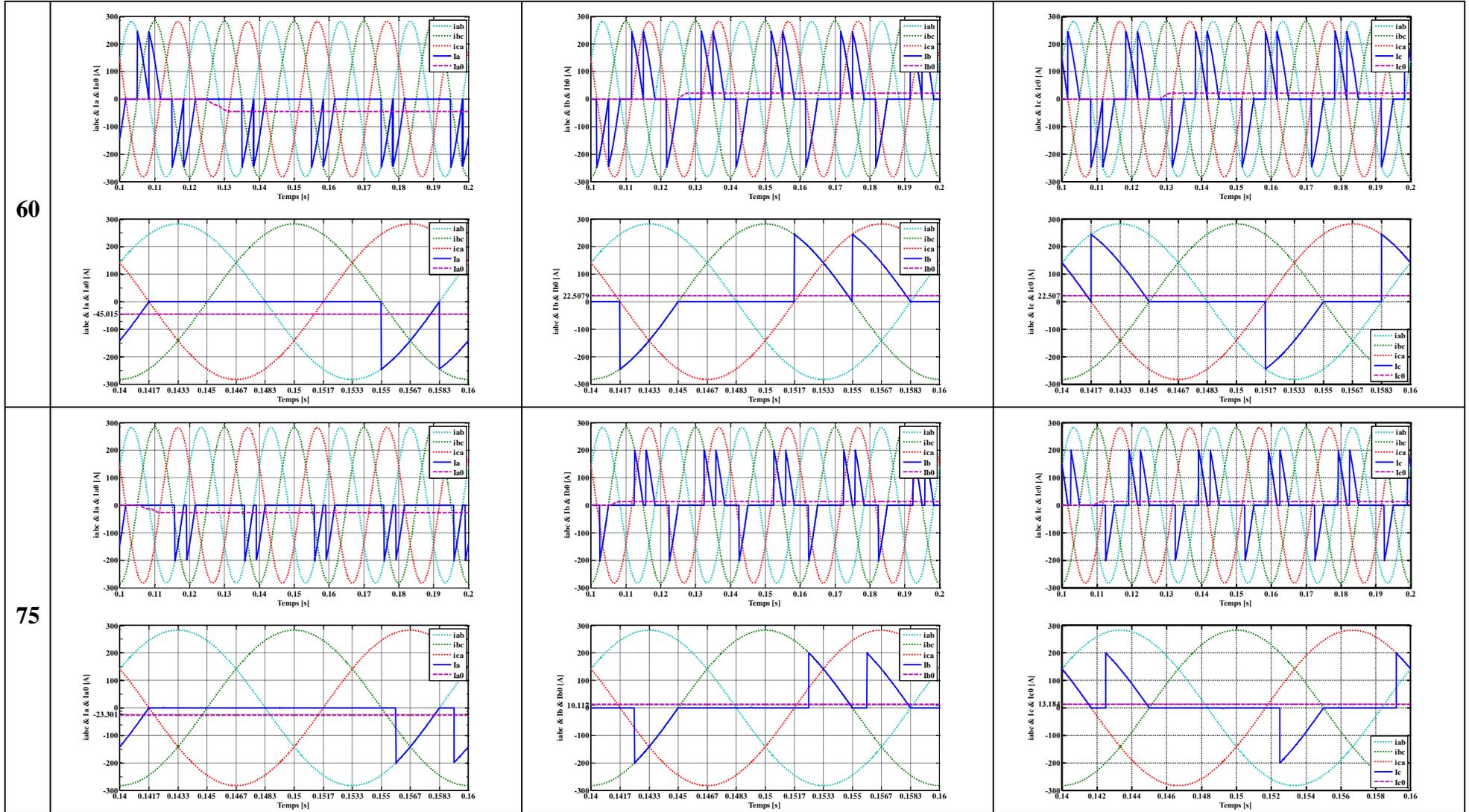


ANNEXE 2 :

Allures des courants d'entrée et leurs valeurs moyennes pour α variable avec défauts circuit-ouvert.

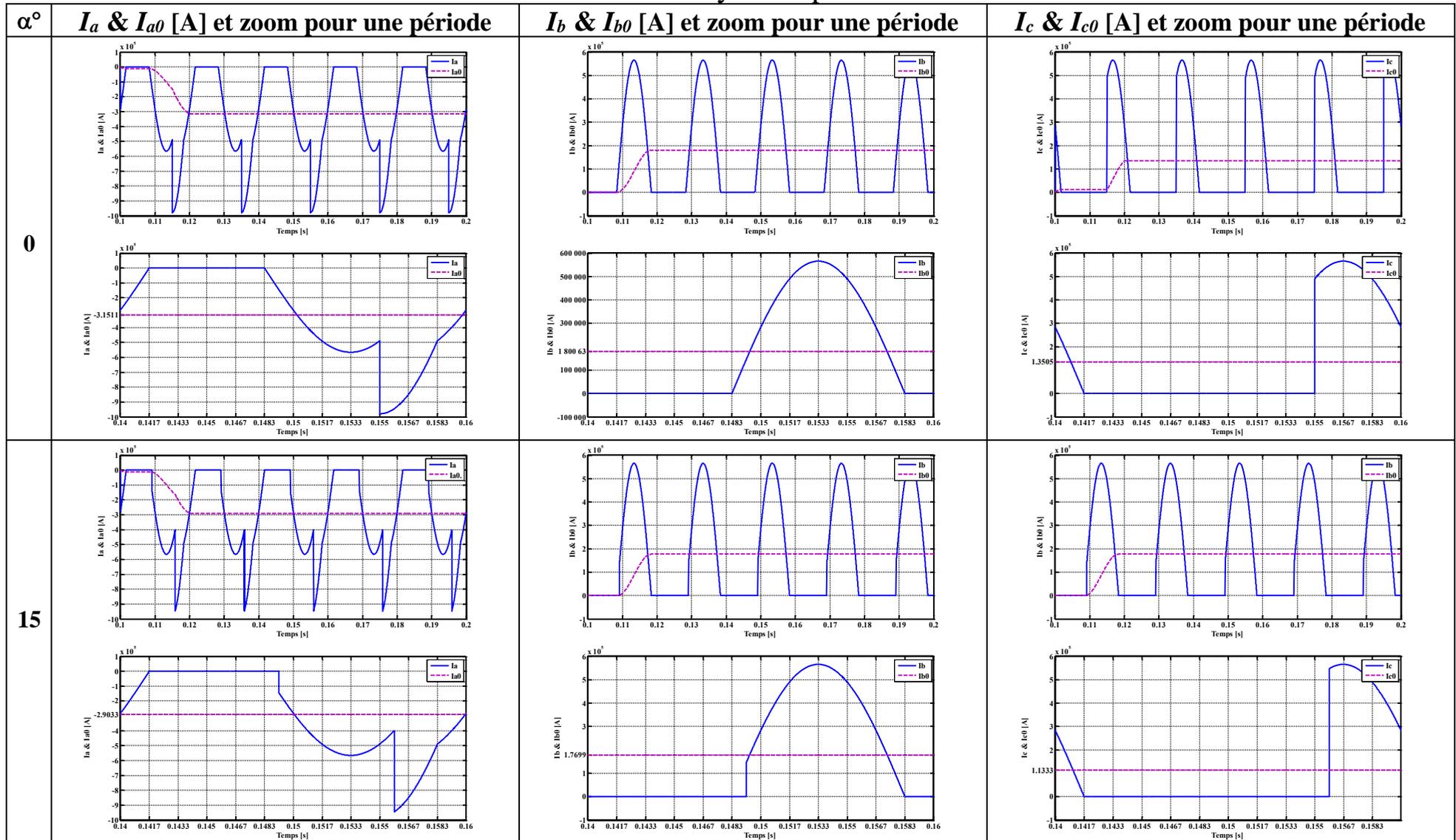




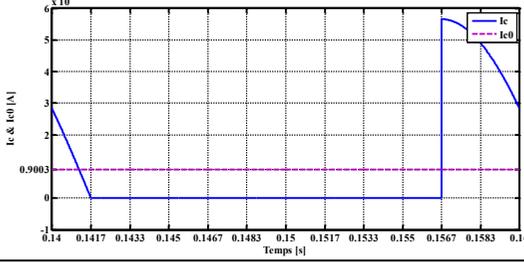
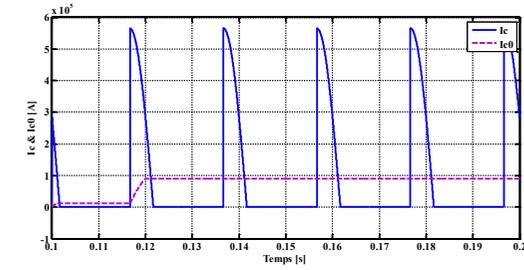
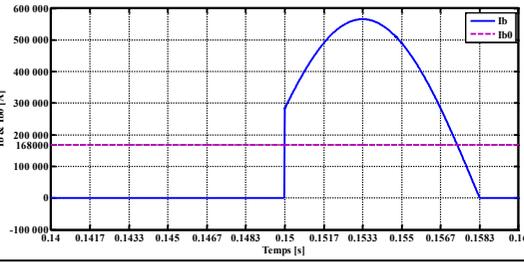
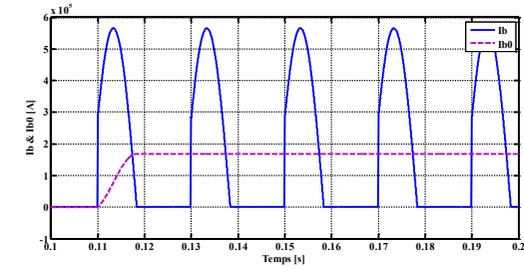
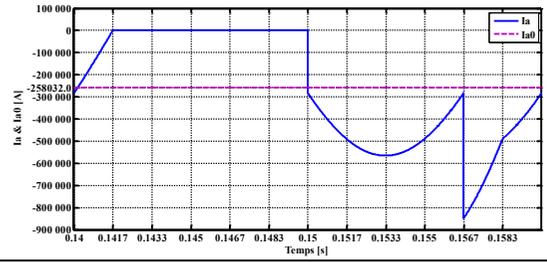
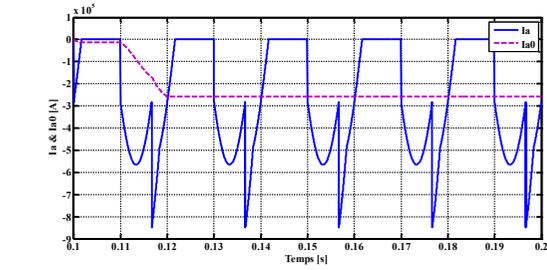


ANNEXE 3 :

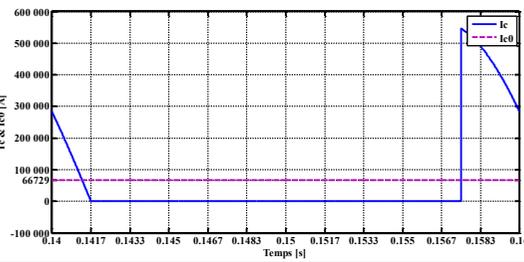
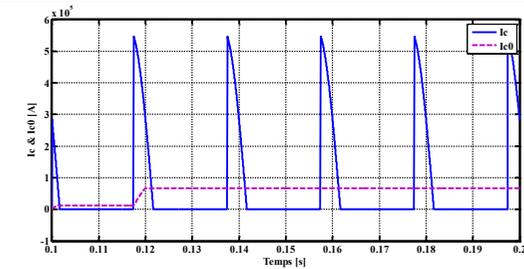
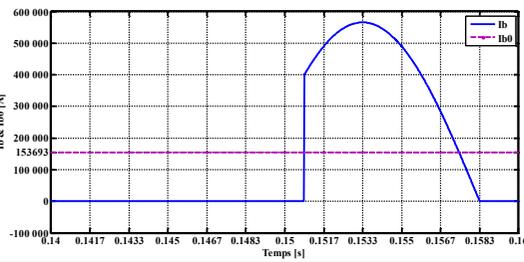
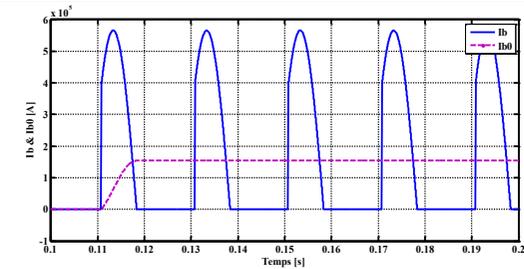
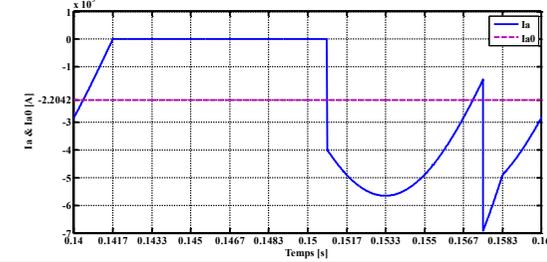
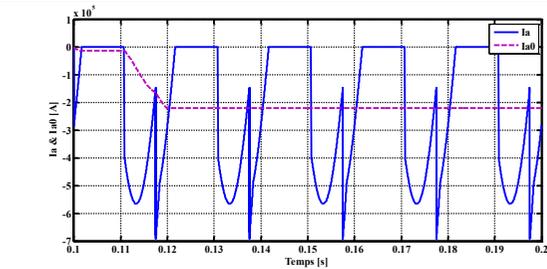
Allures des courants d'entrée et leurs valeurs moyennes pour α variable avec défauts court-circuit.



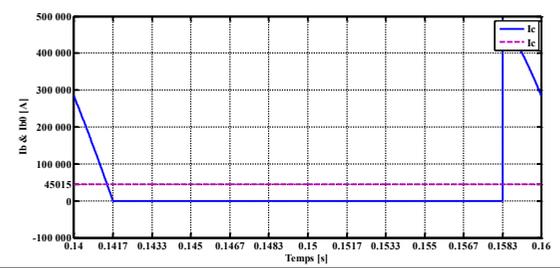
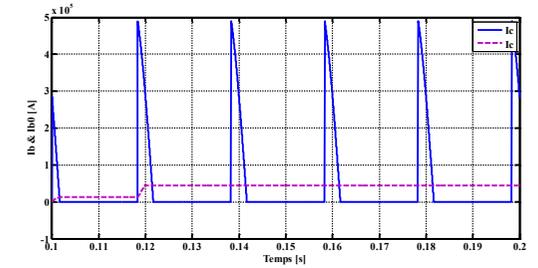
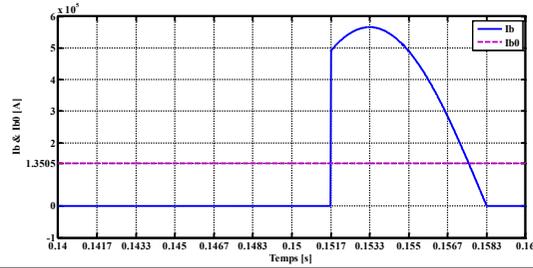
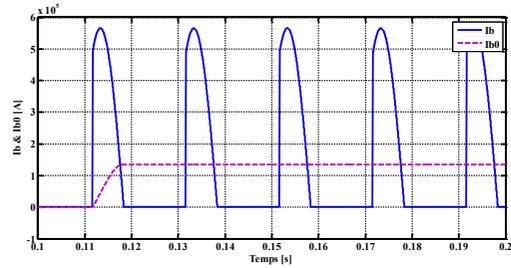
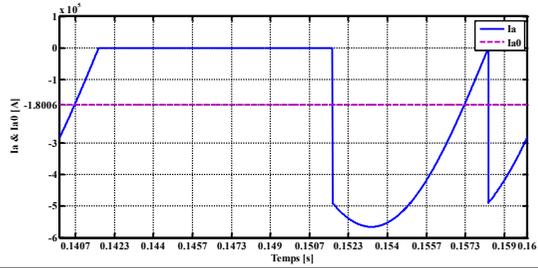
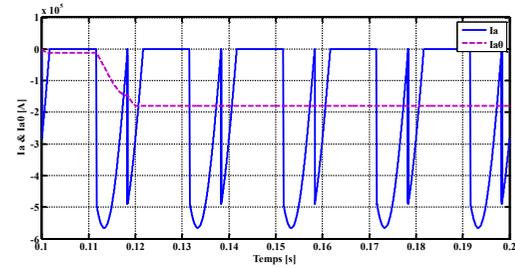
30



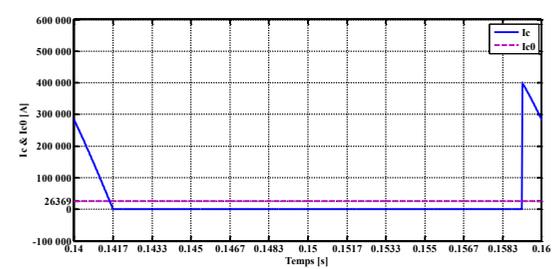
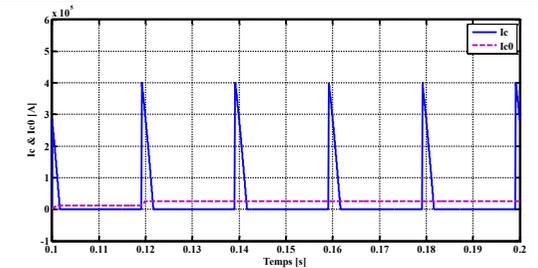
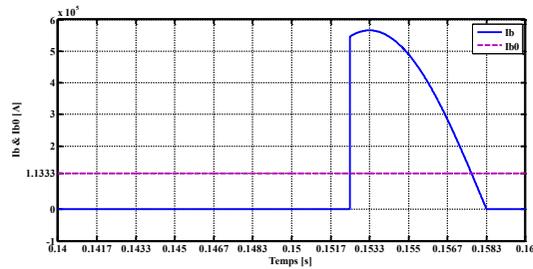
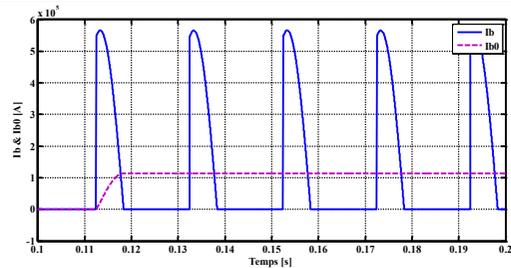
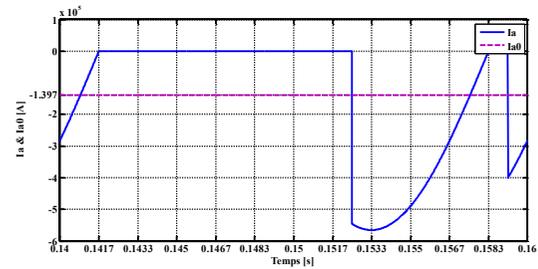
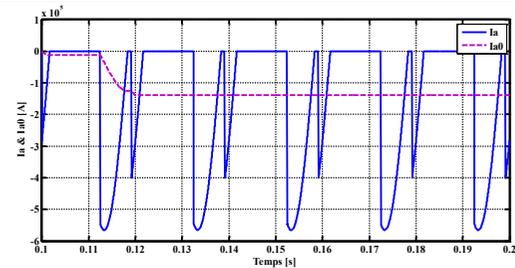
45



60



75



ملخص

في بحثنا درسنا تقنية كشف وموقع الأعطال في أنظمة المحولات AC/DC المستعملة في أنظمة الإثارة على أساس الأعطال التي قد تحدث في مكونات إلكترونيات الطاقة (الثنائيات والثايرستور) من النظام المعدل. بدأنا بتقديم مختلف مصادر الطاقة الكهربائية، وإنتاج الكهرباء والوسائل المناسبة المنفذة. ثم ، قمنا بتعريف المولد عن طريق شرح مبدأ التشغيل الخاص به وكذلك المكونات الرئيسية التي تشكله. هذا أدى بنا إلى مزيد من دراستنا لنظم الإثارة ، وشرح مبدأ التشغيل وتكوين كل نظام. ثم درسنا تأثير أنظمة الإثارة على مولد التيار المتردد إلى جانب الشبكة ، في حين أعطى تعميمات حول المعدلات ، وكذلك نمذجة المولد مع الأقطاب السلسلة. ناقشنا أيضا سلوك التيارات والتوتر الكهربائي ومعدل القيمة المتوسطة في PD3 في الحالات : بدون أعطال، مع أعطال الدارة المفتوحة وأعطال الدارة القصيرة. أخيرا انتهينا من عملنا من خلال تطوير طريقة تشخيص الأعطال من خلال استغلال متوسط قيم التيارات. ولهذه الغاية، قمنا بإنشاء مؤشرات لتسهيل لنا كشف الأعطال ومكانها في أنظمة الإثارة وبعد ذلك قمنا بتفسير تطور المؤشرات، التي مكنتنا من إنشاء هيكل تنظيمي بسيط لمعالجتها.

كلمات الدلالية : أنظمة الإثارة ، المحول الساكن AC/DC ، مقومات PD3 ، طريقة التشخيص ، أخطاء المقوم.

Abstract

In our research work, we have studied the technique of detection and localization of faults in AC/DC converters used in excitation systems based on the failure that can occur in the components of the power electronics (diodes and thyristors) of the rectifier system.

We began by presenting the various sources of electrical power, electricity generation and the appropriate tools. Then we define the generator by explaining its operating principle as well as the main components it forms. This led us to further our study of excitation systems, explaining the operating principle and the composition of each system.

We then studied the effect of the excitation systems on the AC generator with the network, while giving generalizations about the rectifiers, as well as modeling the generator with smooth electrodes. We also discussed the behavior of electrical currents and voltages and the average value of PD3 mounting in the following cases: without faults, with open-circuit and short-circuit faults.

Finally, we completed our work by developing a fault diagnosis method by exploiting the average values of currents. To this end, we have created indicators to facilitate the detection and localization of faults in excitation systems, and we have interpreted the evolution of the indicators, which has allowed us to establish a simplified flowchart that processes these.

Keywords : Excitation systems, static converter AC/DC, rectifiers PD3, method of diagnostic, rectifier faults.

Résumé

Dans notre travail de recherche, nous avons étudié la technique de détection et de localisation des défauts dans les convertisseurs AC/DC utilisés dans les systèmes d'excitation en se basant sur les défauts qui peuvent survenir dans les composants de l'électronique de puissance (diodes et thyristors) du système redresseur.

Nous avons commencé par fournir diverses sources d'énergie électrique, la production d'électricité et les outils appropriés. Ensuite, nous définissons le générateur en expliquant son principe de fonctionnement ainsi que les principaux composants qu'il forme. Ceci nous a conduits à approfondir notre étude des systèmes d'excitation, en expliquant le principe de fonctionnement et la composition de chaque système.

Nous avons ensuite étudié l'effet des systèmes d'excitation sur le générateur de courant alternatif avec le réseau, tout en donnant des généralisations sur les taux, ainsi que la modélisation du générateur avec des électrodes lisses. Nous avons également discuté le comportement des courants et des tensions électriques et de la valeur moyenne du montage PD3 dans les cas : sans défaut, avec des défauts de circuit-ouvert et des défauts de court-circuit.

Enfin, nous avons terminé notre travail en développant une méthode de diagnostic des défauts en exploitant les valeurs moyennes des courants. À cet effet, nous avons créé des indicateurs pour faciliter la détection et la localisation des défauts dans les systèmes d'excitation, puis nous avons interprété l'évolution des indicateurs, qui nous a permis d'établir un organigramme simplifié qui traite ces derniers.

Mots clés : Systèmes d'excitation, convertisseur statique AC/DC, redresseurs PD3, méthode de diagnostic, défauts dans les redresseurs.