

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de Master

En Electrotechnique

Option : Electrotechnique Industrielle

Thème :

**Etude et modélisation du système d'excitation
des groupes turbo-alternateurs de la centrale
électrique d'Amizour**

Présenté par :

MESBAH Mehdi

IZOUAOUENE Yacine

Encadré par :

Mr. K.GHEDAMSI

Mr. F.ABDOUNE

REMERCIEMENTS

Nos sincères remerciements à notre encadreur et professeur Mr. KACI GHEDAMSI pour avoir accepté de diriger ce travail ainsi que pour son suivi, son assistance inestimable, ses conseils, sa clairvoyance, sa rigueur et le temps qu'il nous a accordé malgré ses occupations.

Nous tenons à remercier vivement Mr. FATEH ABDOUNE, Dr. Ingénieur au niveau de l'unité production d'électricité de DARGUINA, pour avoir co-encadré ce travail ainsi que pour sa disponibilité, l'aide pratique qu'il nous a procuré pour arriver au terme de ce travail ainsi que pour sa gentillesse et sa modestie.

Nos remerciements et respects vont également à Mr. ZENATI ABDELHAKIM, responsable de la centrale AMIZOUR, pour l'accueil cordial qu'il nous a réservé durant le stage effectué au niveau de la centrale, et qui a mis à notre disposition toutes les explications et données nécessaires à l'élaboration de ce mémoire.

Nous remercions de même tous nos enseignants et toutes les personnes qui nous ont aidés et soutenus de près ou de loin durant nos études et la préparation de ce mémoire, particulièrement tous les travailleurs de la centrale AMIZOUR.

Enfin, nous souhaitons remercier sincèrement les membres du jury qui nous font le grand honneur d'évaluer ce travail.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail,

A mes chers parents avec tous mes sentiments de respect, d'amour, de gratitude et de reconnaissance pour tous leurs sacrifices déployés pour m' élever dignement et assurer mon éducation dans les meilleures conditions, leur amour, leur tendresse, leur soutien tout au long de mes études. Merci d'être toujours là pour moi.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infaillible,

A mes chères sœurs pour leurs encouragements permanents et leur soutien moral,

A mes défunts grands-parents paternels et ma défunte grand-mère maternelle pour sa douceur et gentillesse, que dieu ait leurs âmes

A toute ma famille, particulièrement mon grand-père maternel et mes oncles

A YACINE, mon binôme avec qui j'ai partagé les plus beaux moments durant ces deux dernières années.

A tous mes amis et toute la promotion EI 2017/2018.

MEHDI

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail particulièrement à mes chers parents, qui ont consacré leur existence à bâtir la mienne, pour leur soutien, patience et soucis de tendresse et d'affection pour tout ce qu'ils ont fait pour que je puisse arriver à ce stade.

A mes chers frères et sœurs pour leurs encouragements permanents et leur soutien moral.

A mon binôme Mehdi avec qui j'ai passé des moments inoubliables.

A tous mes copains de chambre : Lyes, Ahmed, Farid, Fares, Hakim qui ont été ma deuxième famille pendant mon parcours universitaire.

A tous ceux qui sont proches à moi, qui ont été à mes côtés pendant cette période.

Yacine

Sommaire

Liste des symboles

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction Générale..... 1

Chapitre 1 Présentation de la centrale AMIZOUR

1.1. Introduction 3

1.2. Présentation de la centrale TG d'Amizour 3

1.3. Caractéristiques de la centrale TG (Amizour) 4

1.4. Consistance des installations des groupes de production 4

1.5. Description de la Turbine à Gaz FT8 5

1.5.1. Caractéristiques de la turbine FT8..... 7

1.5.2. Principe de fonctionnement du groupe TG 7

1.6. Générateur Brush..... 8

1.6.1. Caractéristiques nominales 8

1.6.2. Composition du générateur..... 8

1.6.3. Système de lubrification du générateur 9

1.7. Transformateurs ABB 60MVA 10

1.8. Schéma unifilaire de la centrale 11

1.9. Conclusion..... 12

Chapitre 2 Généralités sur les systèmes d'excitation des alternateurs synchrones

2.1. Introduction 13

2.2. Production d'électricité 13

2.2.1. Production d'électricité par turbine hydraulique 14

2.2.2. Production d'électricité par turbine à gaz.....	16
2.3. Le réseau électrique et le réglage de tension.....	18
2.4. Machine synchrone	19
2.4.1. Définition d'une machine synchrone.....	19
2.4.2. Constitution d'une machine synchrone	20
2.4.3. Type de machine synchrone à rotor bobiné	21
2.5. Excitations des alternateurs synchrones à rotor bobinés.....	22
2.5.1. Système d'excitation à courant continu (DC)	23
2.5.2. Système d'excitation statique	23
2.5.3. Système d'excitation à courant alternatif (AC).....	24
2.5.4. Système d'excitation sans contact (Brushless).....	25
2.6. Exigences du système d'excitation	26
2.7. Commande et circuits de protection des systèmes d'excitation.....	27
2.8. Circuits de stabilisation d'un système d'excitation	28
2.9. Stabilisateur de puissance (PSS)	28
2.10. Compensateur de charge	29
2.11. Conclusion.....	29

Chapitre 3 Modélisation de la machine synchrone

3.1. Introduction	30
3.2. Modèle de la MS dans le référentiel fixe (modèle de base)	30
3.2.1. Représentation schématique de la MS.....	31
3.2.2. Equations de tensions et flux	32
3.2.3. Expression des inductances du modèle de base	34
3.3. Modèle de la MS dans le repère de Park.....	35
3.4. Expression du couple électromagnétique	38

3.5. Modèle de la MS dans le repère dq ramenée au stator	39
3.6. Identification des paramètres de la MS	44
3.7. Calcul des paramètres fondamentaux à partir des paramètres standards	46
3.8. Simulation sous MATLAB/Simulink.....	48
3.8.1. Résultats de simulation	49
3.8.1.1. Variation brusque de la puissance active injectée	49
3.8.1.2. Variation de la tension d'excitation V_f	52
3.9. Conclusion	55

Chapitre 4 : Etude du système d'excitation de l'alternateur Brush

4.1. Introduction	56
4.2. Présentation de l'AVR Prismic A32	56
4.2.1. Schéma global du contrôleur d'excitation	57
4.2.2. Aperçus de l'enceinte A32	59
4.2.3. Les fonctionnalités de l'AVR Prismic 32.....	60
4.3. Description et principe de fonctionnement du système d'excitation sans contact.....	63
4.3.1. Alternateur pilote.....	64
4.3.2. Commande du redresseur PD2	65
4.3.2.1. Montage du redresseur PD2.....	65
4.3.2.2. Valeur moyenne de la tension redressée.....	66
4.3.2.3. Boucle de régulation interne de courant	67
4.4. Excitatrice associés au pont de diodes tournantes.....	68
4.5. Développement des systèmes de régulation automatique de tension.....	69
4.6. Analyse de régulateur de tension d'un groupe turbine-alternateur	69
4.6.1. Régulation et stabilisation de la tension d'excitation.....	69

Sommaire

4.6.2. Régulation de la tension de sortie de la génératrice synchrone.....	70
4.6.3. Synthèse des paramètres des correcteurs.....	71
4.7. Simulation sous MATLAB/Simulink.....	74
4.7.1 Résultats de simulation	75
4.8. Conclusion.....	77
Conclusion générale	78
Bibliographie.....	80

Annexes

Annexe A : Paramètres du générateur BRUSH	
Annexe B : Courbes de fonctionnements du générateur Brush	
Annexe C : Programme de calcul des paramètres de la machine	
Annexe D : Modèle de simulation de la MS connectée au réseau	
Annexe E : Circuits du contrôleur d'excitation Prismic A32	
Annexe F : Modèle de simulation du redresseur PD2	
Annexe G : Modèle de simulation de la MS associé au régulateur de tension	
Annexe H : Détermination des paramètres du régulateur PID	
Annexe I : Caractéristiques de l'excitatrice brush et la PMG	

Liste des symboles et abréviations

Liste des symboles

v_a, v_b, v_c : Tension aux bornes des trois phases statoriques abc.

v_f : Tension du circuit d'excitation.

v_s : Tension statorique.

v_r : Tension rotorique.

v_d : Tension aux bornes de l'enroulement statorique suivant l'axe d.

v_q : Tension aux bornes de l'enroulement statorique suivant l'axe q.

\widetilde{v}_f : Tension de l'enroulement d'excitation f ramené au stator.

i_a, i_b, i_c : Courant des trois phases statoriques abc.

i_f : Courant du circuit d'excitation f.

i_s : Courant d'une phase statoriques.

i_r : Courant d'une phase rotorique.

i_D : Courant qui parcourt l'enroulement amortisseur D.

i_Q : Courant qui parcourt l'enroulement amortisseur Q.

i_d : Courant aux bornes de l'enroulement statorique suivant l'axe d.

i_q : Courant aux bornes de l'enroulement statorique suivant l'axe q.

\widetilde{i}_f : Courant aux bornes de l'enroulement d'excitation f ramené au stator.

\widetilde{i}_D : Courant aux bornes de l'enroulement amortisseur D ramené au stator.

\widetilde{i}_Q : Courant aux bornes de l'enroulement amortisseur Q ramené au stator.

ϕ_s : Flux induit dans les enroulements statoriques.

ϕ_r : Flux induit dans les enroulements rotoriques.

ϕ_a : Flux induit dans la phase a.

ϕ_b : Flux induit dans la phase b.

ϕ_c : Flux induit dans la phase c.

ϕ_f : Flux induit dans l'enroulement d'excitation f.

ϕ_D : Flux induit dans l'enroulement amortisseur D.

ϕ_Q : Flux induit dans l'enroulement amortisseur Q.

ϕ_d : Flux induit dans l'enroulement statorique suivant l'axe d.

ϕ_q : Flux induit dans l'enroulement statorique suivant l'axe q.

$\widetilde{\phi}_f$: Flux induit dans l'enroulement d'excitation f ramené au stator.

Liste des symboles

$\widetilde{\phi}_D$: Flux induit dans l'enroulement amortisseur D ramené au stator.

$\widetilde{\phi}_Q$: Flux induit dans l'enroulement amortisseur Q ramené au stator.

$\widetilde{\phi}_{\sigma D}$: Flux de fuite de l'enroulement amortisseur D ramené au stator.

$\widetilde{\phi}_{\sigma Q}$: Flux de fuite de l'enroulement amortisseur Q ramené au stator.

$\widetilde{\phi}_{\sigma f}$: Flux de fuite de l'enroulement d'excitation f ramené au stator.

$\phi_{\sigma sd}$: Flux de fuite statorique suivant l'axe d.

$\phi_{\sigma sq}$: Flux de fuite statorique suivant l'axe q.

ϕ_{ad} : Flux magnétisant commun dans l'axe d.

ϕ_{aq} : Flux magnétisant commun dans l'axe q.

L_a : Inductance propre de l'enroulement statorique a.

L_b : Inductance propre de l'enroulement statorique b.

L_c : Inductance propre de l'enroulement statorique c.

L_f : Inductance propre de l'enroulement d'excitation f.

L_D : Inductance propre de l'enroulement amortisseur D.

L_Q : Inductance propre de l'enroulement amortisseur Q.

L_d : Inductance propre des enroulements statoriques suivant l'axe d.

L_q : Inductance propre des enroulements statoriques suivant l'axe q.

L_{ad} : Inductance magnétisante de l'axe d.

L_{aq} : Inductance magnétisante de l'axe q.

$L_{\sigma sd}$: Inductance de fuite des enroulements statorique de l'axe d.

$L_{\sigma sq}$: Inductance de fuite des enroulements statorique de l'axe q.

$L_{\sigma D}$: Inductance de fuite des amortisseurs de l'axe D.

$L_{\sigma Q}$: Inductance de fuite des amortisseurs de l'axe Q.

$\widetilde{L}_{\sigma f}$: Inductance de fuite de l'enroulement d'excitation f ramené au stator.

$\widetilde{L}_{\sigma D}$: Inductance de fuite de l'enroulement amortisseur D ramené au stator.

$\widetilde{L}_{\sigma Q}$: Inductance de fuite de l'enroulement amortisseur Q ramené au stator.

M_{ab} : Inductance mutuelle entre l'enroulement statorique a et b.

M_{ac} : Inductance mutuelle entre l'enroulement statorique a et c.

M_{bc} : Inductance mutuelle entre l'enroulement statorique b et c.

Liste des symboles

M_{af} : Inductance mutuelle entre l'enroulement statorique a et l'enroulement d'excitation f.

M_{aD} : Inductance mutuelle entre l'enroulement statorique a et l'enroulement amortisseur D.

M_{aQ} : Inductance mutuelle entre l'enroulement statorique a et l'enroulement amortisseur Q.

M_{bf} : Inductance mutuelle entre l'enroulement statorique b et l'enroulement d'excitation f.

M_{bD} : Inductance mutuelle entre l'enroulement statorique b et l'enroulement amortisseur D.

M_{bQ} : Inductance mutuelle entre l'enroulement statorique b et l'enroulement amortisseur Q.

M_{cf} : Inductance mutuelle entre l'enroulement statorique c et l'enroulement d'excitation f.

M_{cD} : Inductance mutuelle entre l'enroulement statorique c et l'enroulement amortisseur D.

M_{cQ} : Inductance mutuelle entre l'enroulement statorique c et l'enroulement amortisseur Q.

M_{sf} : Inductance mutuelle entre les enroulements statoriques et l'enroulement d'excitation f.

M_{sD} : Inductance mutuelle entre les enroulements statoriques et l'enroulement amortisseur D.

M_{sQ} : Inductance mutuelle entre les enroulements statoriques et l'enroulement amortisseur Q.

M_{fD} : Inductance mutuelle entre l'enroulement d'excitation f et l'enroulement amortisseur D.

M_{fQ} : Inductance mutuelle entre l'enroulement d'excitation f et l'enroulement amortisseur Q.

X_d : Réactance synchrone de l'axe d.

X_q : Réactance synchrone de l'axe q.

X_{ad} : Réactance magnétisante de l'axe d.

X_{aq} : Réactance magnétisante de l'axe q.

\dot{X}_d : Réactance sub-transitoire de l'axe d.

\dot{X}_q : Réactance sub-transitoire de l'axe q.

\ddot{X}_d : Réactance transitoire de l'axe d.

\ddot{X}_q : Réactance transitoire de l'axe q.

\dot{T}_d : Constante de temps transitoire.

\ddot{T}_d : Constante sub-transitoire.

T_a : Constante de temps de l'induit.

R_s : Résistance d'une phase statorique.

R_r : Résistance d'une phase rotorique.

\widetilde{R}_f : Résistance de l'enroulement d'excitation f ramené au stator.

\widetilde{R}_D : Résistance de l'enroulement amortisseur D ramené au stator.

Liste des symboles

\widetilde{R}_Q : Résistance de l'enroulement amortisseur Q ramené au stator.

K_f : Coefficient de réduction de l'inducteur.

K_D : Coefficient de l'enroulement amortisseur D.

K_Q : Coefficient de l'enroulement amortisseur Q.

p_{in} : Puissance instantanée.

p_{ech} : Puissance échangée.

p_m : Puissance mécanique.

T_e : Couple électromagnétique.

T_r : Couple résistant imposé par la charge mécanique.

J : Moment d'inertie de la machine synchrone.

Ω : Vitesse de rotation.

f : Coefficient de frottement visqueux.

ω : Pulsation électrique.

$\omega\phi_q$: fem dynamique due à la rotation de la machine.

θ : Angle électrique.

v_m : Valeurs maximal de la tension d'induit avant le court-circuit.

Liste des abréviations

EGA : Electricité et Gaz d'Algérie

TV/TG : Turbine à gaz / Turbine à vapeur.

SPE : Société Algérienne de Production d'Electricité

GRTE : Société Algérienne de gestion du réseau et de transport de l'électricité

GCH : Grandes Centrales Hydrauliques

PCH : Petites Centrales Hydrauliques

MS : Machine Synchrone

IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers

DC : Direct Current

AC : Alternatif Current

HT : Haut tension

MT : Moyenne Tension

ST : Système Statique

PI : Proportionnelle Intégrale

PID : Proportionnelle Intégrale Dérivée

TC : Transformateur de courant

TV : Transformateur de tension

AVR : Automatic voltage regulator (régulateur automatique de tension)

PSS : Power system stabiliser (amortisseur d'oscillation de puissance)

QCC : Courant de compensation en quadrature

SEE : Systèmes Electro – Energétiques

PMG : Permanent Magnet Generator (Machine a aimant permanent)

Liste des figures et tableaux

	Page
Chapitre 1	
Figure 1.1 : Centrale d'Amizour	3
Figure 1.2 : Turbine à gaz FT8 d'Amizour	6
Figure 1.3 : Constitution principale de la turbine FT8	7
Figure 1.4 : Générateur brush.....	9
Figure 1.5 : Transformateur ABB d'AMIZOUR.....	10
Figure 1.6 : Schéma unifilaire de la centrale d'Amizour	11
Chapitre 2	
Figure 2.1 : Centrale hydraulique.....	15
Figure 2.2 : Schéma d'une tranche de production hydraulique	16
Figure 2.3 : Principe de fonctionnement de la turbine FT8	17
Figure 2.4 : Stator d'un alternateur de grande puissance.....	20
Figure 2.5 : Rotor a pôle lisse d'un alternateur de grande puissance	21
Figure 2.6 : Rotor a pôle saillant.....	21
Figure 2.7 : Rotor a aimant permanent.....	22
Figure 2.8 : Système d'excitation a courant continue DC.....	23
Figure 2.9 : Excitatrice statique par redresseur commandé à source de tension.....	24
Figure 2.10 : Excitation de type AC avec redresseur non commandé	24
Figure 2.11 : Système d'excitation AC avec redresseur commandé	25
Figure 2.12 : Système d'excitation brushless	25
Figure 2.13 : Système d'excitation muni de circuits de protection	27
Figure 2.14 : Schéma de stabilisation et régulation de l'excitation.....	28
Figure 2.15 : compensateur de charge.....	29
Chapitre 3	
Figure 3.1 : Modèle de la machine synchrone dans le repère abc.....	31
Figure 3.2 : Modèle de la machine synchrone dans le repère dq	38
Figure 3.3 : Différents flux représentés dans l'axe dq	43
Figure 3.4 : Circuit électrique équivalent ramené au stator	44
Figure 3.5 : Evolution du courant de court-circuit en fonction du temps	46
Figure 3.6 : schéma synoptique en mode réseau	48

Figure 3.7 : Puissance active injecté	49
Figure 3.8 : Vitesse de rotation du générateur	50
Figure 3.9 : Tension d'excitation du rotor.....	50
Figure 3.10 : Courant d'excitation du rotor	50
Figure 3.11 : Angle de charge	51
Figure 3.12 : Puissance réactive échangée avec le réseau.....	51
Figure 3.13 : Puissance active injectée	52
Figure 3.14 : Vitesse de rotation du générateur	53
Figure 3.15 : Angle de charge	53
Figure 3.16 : Tension d'excitation du rotor	53
Figure 3.17 : Courant d'excitation du rotor	54
Figure 3.18 : Puissance réactive échangée avec le réseau.....	54

Chapitre 4

Figure 4.1 : Contrôleur d'excitation Prismic A32.....	56
Figure 4.2 : Schéma du contrôleur d'excitation	57
Figure 4.3 : Panneau avant de l'A32.....	59
Figure 4.4 : Structure de l'AVR.....	61
Figure 4.5 : Courbe de capacité du générateur.....	61
Figure 4.6 : Schéma décrivant la constitution du système d'excitation sans contact	64
Figure 4.7 : (a) stator de la PMG	64
(b) rotor de la PMG	
Figure 4.8 : Principe de la conversion AC/DC	65
Figure 4.9 : Schéma de réalisation d'un redresseur à thyristor PD2.....	65
Figure 4.10 : Allures des tensions et courants du redresseur PD2	66
Figure 4.11 : Boucle de régulation de courant du redresseur.....	67
Figure 4.12 : Courbe de régulation de courant i_d	67
Figure 4.13 : Tension moyenne redressée U_{dmoy}	68
Figure 4.14 : (c) Pont à diodes	68
(d) Image réel d'un pont à diodes	
Figure 4.15 : Régulation et stabilisation de la tension	70
Figure 4.16 : Régulation de la tension de sortie de la génératrice	70

Liste des figures

Figure 4.17 : Schéma fonctionnel d'un correcteur PID classique	71
Figure 4.18 : Schéma de régulation de tension simplifié	71
Figure 4.19 : Vitesse de rotation de l'arbre	75
Figure 4.20 : Puissance active et réactive absorbées par la charge	75
Figure 4.21 : Couple électromagnétique de l'alternateur	76
Figure 4.22 : Tension efficace à la sortie de l'alternateur	76
Figure 4.23 Tension d'excitation du rotor	76
Figure 4.24 : Courant d'excitation du rotor	77

Annexe

Figure D.1 : Schéma Simulink de la MS connectée au réseau

Figure F.1 : Schéma Simulink du redresseur PD2

Figure G.1 : Schéma Simulink du modèle de la MS associé au régulateur

Chapitre 3

Tableau 3.1: Paramètres de la machine Brush	44
Tableau 3.2 : Equations des inductances des enroulements	49
Tableau 3.3 : Valeurs des inductances des enroulements	49
Tableau 3.4 : Equations des résistances rotoriques ramenées	49
Tableau 3.5 : Valeurs des résistances rotoriques ramenées	50
Tableau 3.6 : Valeurs de la puissance active lors de l'essai	51
Tableau 3.7 : Valeurs de tension d'excitation lors de l'essai	54

Chapitre 4

Tableau 4.1: Paramètres de l'AVR Prismic 32	60
--	----

Annexes

Tableau 1.1 : Caractéristiques de l'excitatrice Brush	
Tableau 1.2 : Caractéristique de la machine a aimant permanent	

Introduction générale

Introduction générale

La découverte de l'énergie électrique a bien changé le monde. Cependant notre vie sans électricité est difficilement envisageable, elle occupe une place prépondérante dans l'industrie et l'usage domestique. Cette énergie ne se trouve pas dans la nature sous forme exploitable, il est donc nécessaire de la produire à partir de la conversion d'autres formes d'énergies telles que l'énergie solaire, nucléaire, éolienne ...etc.

La centrale à gaz d'Amizour en service depuis 2014, utilise l'énergie fournie par la combustion d'un combustible (fuel, gaz naturel). Cette combustion fournit une grande poussée utilisée pour entrainer l'arbre de l'alternateur. On dispose alors d'une pression de chaleur qui fait tourner à grande vitesse une turbine à gaz pour produire de l'électricité.

Le rôle principal d'une centrale électrique est de produire de l'électricité pour satisfaire les besoins des consommateurs. L'électricité étant une énergie qui se stocke très difficilement, il est nécessaire d'équilibrer en permanence et en temps réel l'offre et la demande. De ce fait, les centrales doivent adapter la production à la puissance appelée par le consommateur. Ce fut d'ailleurs l'objectif de l'implantation de cette centrale, qui est d'assurer la sécurité de l'alimentation en énergie électrique de la région, particulièrement pendant la période estivale et assurer un appoint au réseau national interconnecté.

Toute perturbation dans le processus de production, de transport, de distribution et d'utilisation de cette énergie entraîne des désordres qui peuvent mettre en péril la sécurité des biens et des personnes.

L'importance de la stabilité dynamique d'un système de puissance exige des centrales de production de l'électricité d'intégrer des outils de surveillance et de régulation au niveau de l'alternateur pour avoir un bon fonctionnement et un bon rendement productif.

La centrale d'Amizour utilise un système de régulation moderne, dont l'efficacité est maximale. Ce système est nommé AVR Prismic A32, qui est un système de régulation conçu pour contrôler l'excitation d'un générateur brushless, avec une efficacité meilleure, un rendement optimal et garantissant un domaine de stabilité aperiodique plus large des systèmes énergétiques avec des structures très compliquées.

Le présent travail consiste en l'étude et la modélisation du système d'excitation du turbo-alternateur des turbines d'Amizour, pour pouvoir le simuler et analyser le fonctionnement de celui-ci.

Pour ce faire nous avons établi le plan d'étude réparti sur les chapitres suivants :

- Un premier chapitre est consacré à la présentation de la centrale à gaz d'Amizour et les différentes parties constructives.
- Le deuxième chapitre décrit les différents systèmes d'excitation et leur principe de fonctionnement.
- Le troisième chapitre est consacré à la modélisation de l'alternateur avec la présentation des résultats de simulation.
- Le quatrième et dernier chapitre est consacré à l'étude du système d'excitation brushless avec une simulation du régulateur face à divers types de charges.

Chapitre 1

Présentation de la centrale

AMIZOUR

1.1. Introduction

Aujourd'hui le monde est appelé au développement des secteurs industriels afin d'améliorer le rendement, et satisfaire les conditions de vie Humaines, mais tout cela est basé sur le développement de l'Energie Electrique de chaque pays. En Algérie la société SONELGAZ (ex EGA) créée en 1969 est chargée de la production, le transport, et de la distribution de cette énergie à partir des centrales électriques qui sont à usages thermique, gaz, diesel et hydraulique.

1.2. Présentation de la centrale TG d'Amizour

La centrale électrique d'Amizour est implantée à 04 Km de la ville d'Amizour et à environ 29 Km à l'ouest du chef-lieu de la wilaya de Bejaia [1]. Elle est rattachée à l'unité de production de Darguina, dépendant du pôle de production TV/TG est de la société Algérienne de production de l'électricité « SPE ». Elle a été Réalisée dans le cadre du programme d'urgence 2012.



Figure 1.1: Central d'Amizour

Cette centrale est destinée à :

- Faire face à la demande d'énergie résultant de l'implantation dans la région de divers sites industriels et foyers domestiques, notamment en période de pointe (été-hiver) ;
- Assurer la sécurité de l'alimentation en énergie électrique de la région, particulièrement pendant la période estivale ;
- Assurer un appoint au réseau national interconnecté.

La centrale d'Amizour s'étale sur une superficie de 15 ha. Elle est équipée de 08 turbines mobiles à Gaz totalisant une puissance installée de 160 MW, de 04 transformateurs 220 KV/11.5 KV 60 MVA et deux têtes blindées pour l'évacuation de l'énergie. Le montant de l'investissement s'élève à 16.6 milliards DZD (HT).

L'alimentation de chaque transformateur se fait par le biais de 2 turbines à gaz et la synchronisation est assurée par le synchroniseur automatique, l'ensemble de 02 turbines et du transformateur est protégé par un disjoncteur de ligne nommé 52L et deux sectionneurs, un en amont et l'autre en aval, nommés respectivement (89UT-1 et 89UT-2), alors que la protection de chaque turbine est assurée par un disjoncteur nommé 52G.

Les sorties des 04 transformateurs sont connectées à un jeu de barre 220KV qui alimente deux têtes blindées 220KV dépendantes de GRTE (Filiale gestionnaire du réseau de transport de l'électricité). Ces dernières débitent et protègent la ligne haute tension Darguina/El Kseur via des disjoncteurs QOHT [1].

1.3. Caractéristiques de la centrale TG (Amizour)

- Nombres de groupes : 08 ;
- Puissance unitaire : 20,135 MW ;
- Tension de sortie : 11,5 KV ;
- Tension d'évacuation : 220 KV ;
- Combustible utilisé : gaz naturel et fuel (secours) ;
- Evacuation de l'énergie : poste El Kseur et poste de Darguina.

1.4. Consistance des installations des groupes de production [1]

Les groupes sont du type outdoor (en plein air) sous package, chaque groupe est composé de :

- Un ensemble turbo-alternateur comprenant un compresseur, une chambre de combustion, une turbine, un alternateur, un disjoncteur, pompes d'huile de lubrification, un système de détection et protection incendie ;
- Un système de détente gaz ;
- Un système d'aspiration et filtration pour la combustion ;
- Un système d'échappement avec silencieux ;
- Une remorque des auxiliaires comprenant un système de réfrigération huile de lubrification, système combustible gaz naturel avec filtration de comptage, système combustible liquide gasoil avec filtration et comptage, système de lavage compresseur, système d'air comprimé, système de démarrage batterie/chargeur de batteries, comptage et mesures ;
- Un groupe diesel (pour démarrage en black start) ;
- Une remorque poste électrique incluant transformateur à deux enroulements 11,5 KV (un transformateur pour deux groupes), transformateurs auxiliaires, protections électriques, tableaux MT, tableaux courant continu, tableaux basse tension ;
- Les groupes sont commandés en automatique à partir d'une salle de commande commune, moyennant des ordinateurs où sont affichés les schémas synoptiques des installations. Les commandes sont obtenues par un double clic de la souris sur l'équipement considéré ;
- Chaque groupe possède sa propre salle de commande où sont rassemblés les différentes signalisations, commandes et protections ;

1.5. Description de la Turbine à Gaz FT8

La turbine à gaz FT8 est un dérivé du moteur d'avion de JT8D Pratt et Whitney, un des moteurs de vol les plus réussis dans l'histoire de l'aviation. La turbine à gaz 27MW FT8 tire partie de la vaste expérience du JT8D tout en incorporant des technologies mises à jour pour produire de l'énergie avec de faibles émissions, haute charge de base et de l'efficacité à charge partielle.

Les installations de production d'électricité utilisant des turbines à gaz FT8 sont en outre conçues avec des équipements de réduction du bruit qui assure un fonctionnement silencieux. Cette technologie a été en production depuis 1991 et est en service dans plus de 100 sites clients

dans le monde entier. Caractérisé par un design compact et modulaire, le moteur de FT8 possède actuellement des niveaux de fiabilité flotte de plus de 99 [2].

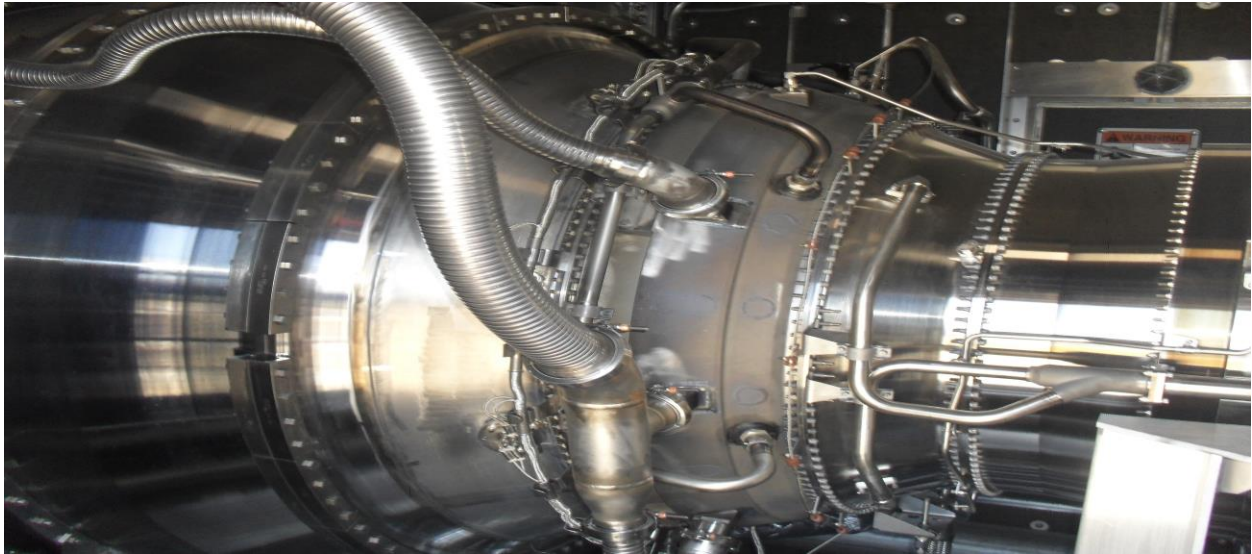


Figure 1.2 : Turbine à gaz FT8 d'Amizour

Le moteur FT8 est un moteur doté de deux compresseurs et de deux turbines. Le compresseur avant (compresseur basse pression) est monté sur le même arbre que la turbine arrière (turbine basse pression). La turbine basse pression alimente le compresseur à basse pression. Le compresseur arrière (compresseur haute pression) est monté sur le même arbre que la turbine avant (turbine haute pression).

La turbine haute pression alimente le compresseur à haute pression. L'arbre doté de compresseur haute pression et de la turbine haute pression est creux afin que l'arbre doté de compresseur basse pression et de la turbine basse pression puisse y passer. Aucun des deux compresseurs ni aucune des deux turbines ne sont reliés mécaniquement [2].

Les moteurs de la turbine à gaz développent la poussée, conformément aux lois du mouvement de Newton et notamment la deuxième loi qui stipule qu'un changement dans le mouvement est proportionnel à la force appliquée.

Et la troisième loi qui précise que : pour chaque action, il existe toujours une réaction opposée et égale. La poussée est générée par des forces aux pressions déséquilibrées provenant du moteur suite à une accélération d'un écoulement massique (Air et combustible).

La poussée générée par un générateur de gaz est utilisée pour déplacer des objets. L'objet peut être aussi grand qu'un avion ou aussi petit qu'une pale de turbine [3].

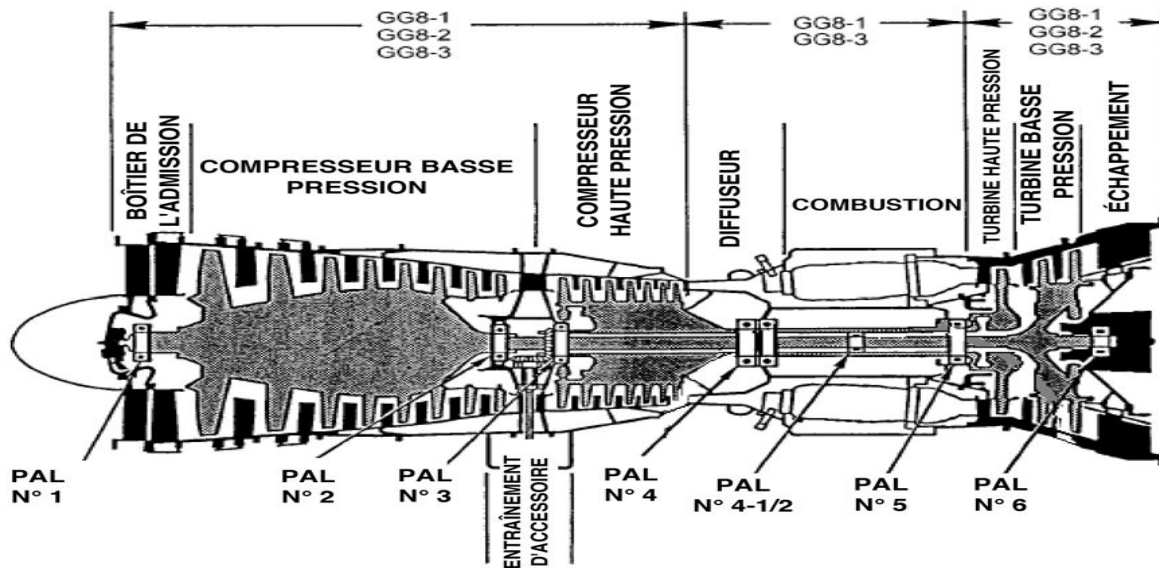


Figure 1.3 : Constitution principale de la turbine FT8 [3]

1.5.1. Caractéristiques de la turbine FT8 [3]

- Longueur totale : 330.20 Cm ;
- Diamètre de l'admission : 104.14 Cm ;
- Diamètre de l'échappement : 121.92 Cm ;
- Poids à sec : 2926.58 Kg.

1.5.2. Principe de fonctionnement du groupe TG

Pour la mise en route de la TG, on utilise un moteur de lancement qui joue le rôle de démarreur.

Le compresseur est constitué d'un ensemble d'ailettes fixes (stator) et mobiles (rotor). Il est destiné à comprimer l'air extérieur (qui passe à travers des filtres), jusqu'à 10 bars.

Du combustible (gazeux ou liquide pulvérisé), est injecté dans la chambre de combustion où il se mélange à l'air comprimé pour entretenir une combustion continue. Le gaz est chauffé à plus de 1200°C.

Les gaz chauds se détendent en traversant la turbine, où l'énergie thermique et cinétique des gaz chauds est transformée en énergie mécanique. La turbine est constituée de plusieurs roues également munies d'ailettes précédées d'aubages fixes (directrices). Les gaz de combustion s'échappent par la cheminée à travers un diffuseur, à une température de 540° C.

Le mouvement de rotation de la turbine est communiqué à l'arbre qui actionne d'une part le compresseur, d'autre part un alternateur accouplé à son extrémité.

Le réglage de la puissance est possible en agissant sur le débit de l'air en entrée et sur l'injection du carburant.

1.6. Générateur Brush [3]

Le générateur est composé d'un rotor cylindrique refroidi à l'air. Il fait appel à un exciteur sans balais (excitation brushless) pour l'excitation initiale et peut produire des charges de base ou de pointe.

1.6.1. Caractéristiques nominales

- Tension entre phase : 11.5 KV ;
- Puissance Active : 22.5 MW ;
- Fréquence : 50 Hz ;
- Vitesse nominale : 3000 tr/min ;
- Nombre de pair de pôle : 1 paire.

1.6.2. Composition du générateur

- 1)- Rotor ;
- 2)- Stator ;
- 3)- Châssis du stator ;
- 4)- Enroulement du stator ;
- 5)- Rotor monté avec Ventilateur de Refroidissement ;
- 6)- Exciteur.

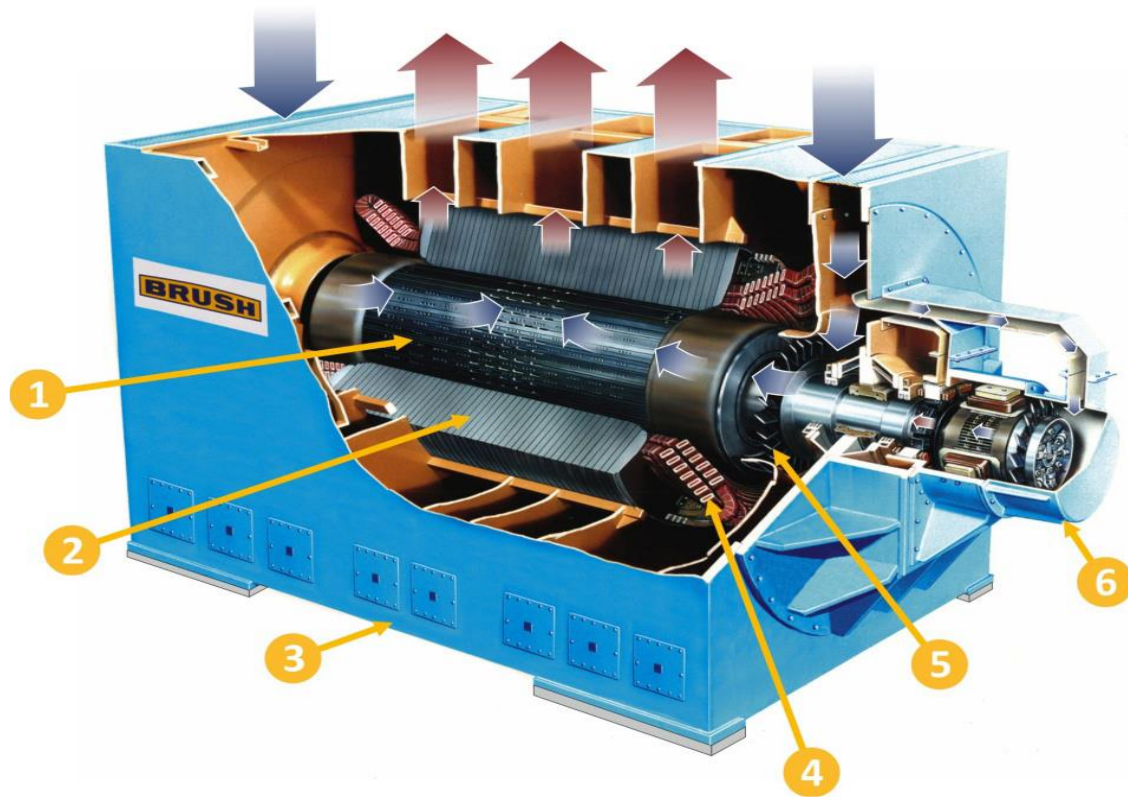


Figure 1.4: Générateur brush [3]

1.6.3. Système de lubrification du générateur [3]

Le générateur utilise des paliers lisses lubrifiés sous pression, le débit d'huile des paliers est contrôlé par un orifice dans la conduite d'alimentation.

L'huile utilisée se vidange vers la partie inférieure du bâti des paliers puis vers le bac de vidange, ces derniers sont dotés de joints étanches à l'huile pressurisée à double paroi qui sont montés sur les parties avant et arrière de chaque palier.

Le lubrifiant utilisé dans les générateurs doit être d'un liquide à base de pétrole de qualité supérieure qui a une excellente stabilité à l'oxydation, une excellente protection contre l'usure et la formation de rouille, une bonne désémulsibilité et une bonne résistance contre le moussage.

Ils utilisent l'air des ventilateurs du générateur pour pressuriser la chambre extérieure afin d'empêcher que l'huile et la vapeur ne s'écoulent le long de l'arbre du rotor.

1.7. Transformateurs ABB 60MVA [1]

Les transformateurs de la centrale d'Amizour sont uniques en leurs genres car ils ont la spécificité d'être mobiles et d'abaisser la tension primaires de 220 KV à 11.5 KV et vice versa.

L'entrée de chaque transformateur est alimentée par 02 turbines à gaz de 11.5 KV avec une puissance totale de 2x23.8 MW.

Chaque transformateur est équipé de son propre poste de transformation abaisseur 11.5 KV/400V pour alimenter ses propres auxiliaires.

La synchronisation du transformateur avec deux turbines est assurée par un synchroniseur automatique. L'ensemble de 02 turbines et du transformateur est protégé par un disjoncteur de ligne nommé 52L et deux sectionneurs, un en amont et l'autre en aval du disjoncteur de ligne 52L nommés respectivement (89UT-1 et 89UT-2), alors que la protection de chaque turbine est assurée par un disjoncteur nommé 52G.

Chaque transformateur communique avec les autres transformateurs de la centrale et avec le réseau via le bureau de reliage.

Le compartiment secondaire du transformateur jusqu'à la tête blindée est isolé avec le gaz SF₆. Une baisse de pression de ce gaz est synonyme d'un court-circuit.

Le compartiment primaire du transformateur jusqu'au secondaire est isolé et refroidi avec de l'huile.



Figure I.5 : Transformateur ABB d'AMIZOUR

1.8. Schéma unifilaire de la centrale

La figure (1.6) représente le schéma unifilaire de la centrale d'Amizour. Comme on peut remarquer, chaque deux groupes débitent sur un transformateur mobile de 60 MVA qui élève la tension à 220 KV, La liaison du transformateur au jeu de barre est protégée par un disjoncteur encadré par deux sectionneurs. L'énergie produite est évacuée sur les deux postes de Darguina et El Kseur.

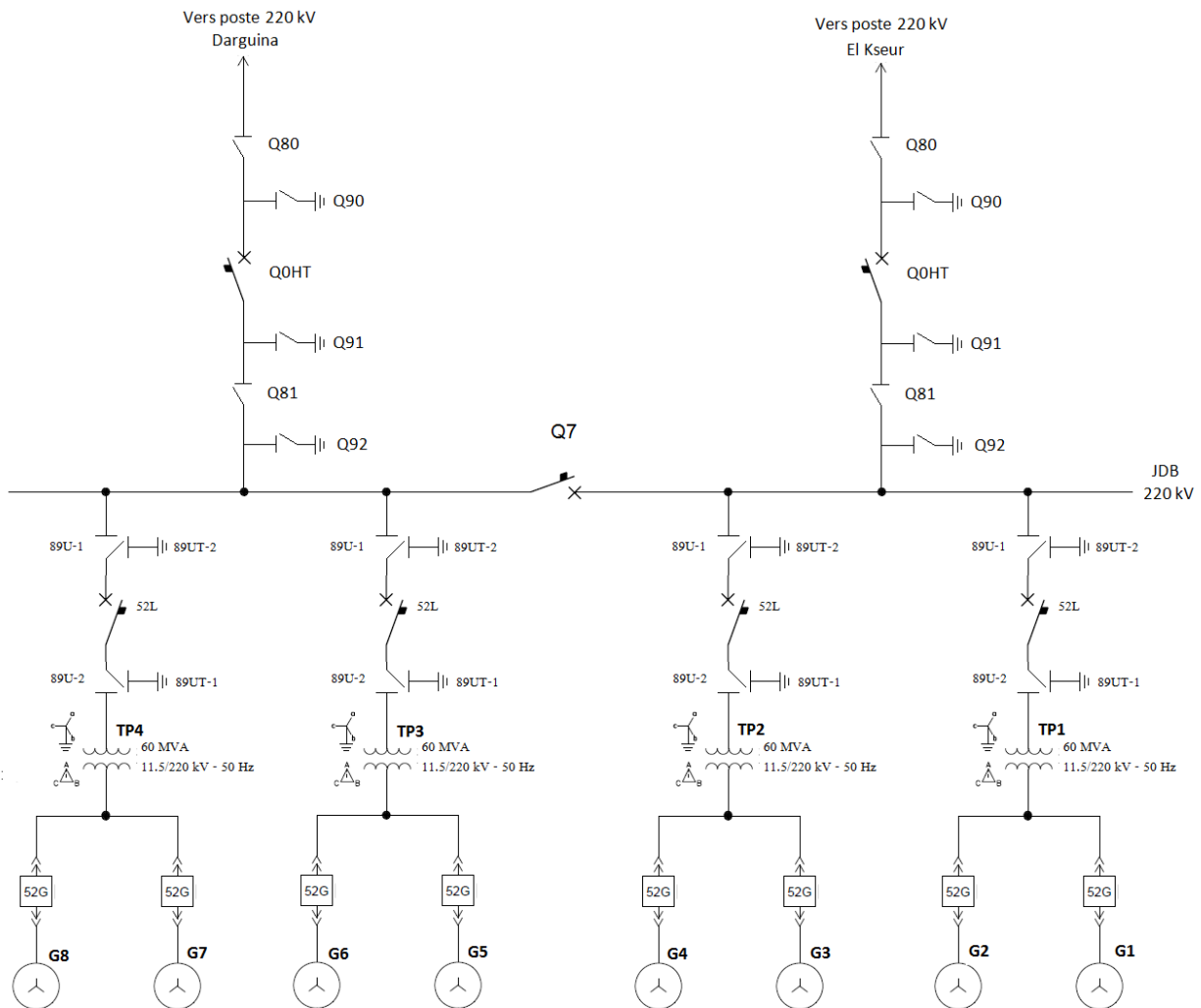


Figure 1.6 : Schéma unifilaire de la centrale d'Amizour [1]

1.9. Conclusion

Le stage nous a permis de découvrir l'environnement industriel et d'enrichir nos connaissances théoriques et pratiques et surtout nous initier au processus de production de l'énergie électrique dans les centrales à gaz.

La centrale électrique d'Amizour est constituée de 8 groupes de production, chaque 2 groupe sont reliés à un transformateur de 60 MVA qui alimente un jeu de barre, c'est ainsi que le transfert d'énergie s'effectue vers deux postes (poste de el Kseur et poste de Darguina).

Chaque groupe est constitué d'une cabine turbo-alternateur là où se trouvent la turbine et l'alternateur ainsi qu'une cabine de commande.

Pendant cette période de stage, nous avons eu l'occasion de nous familiariser avec la nouvelle technologie conçue par le constructeur Brush (alternateur, système d'excitation).

Chapitre 2

Généralités sur les systèmes d'excitation des alternateurs synchrones

2.1. Introduction

Les machines électriques sont nombreuses et variées, et le choix est vaste. Elles présentent des avantages et des inconvénients les uns par rapport aux autres qu'elles soient du même type ou de types différents, à courant alternatif ou à courant continu.

On distingue les machines synchrones qui représentent aujourd'hui une grande partie du marché des convertisseurs d'énergie électromécanique et couvrent une très large gamme de puissance qui s'étend de quelques Microwatts, jusqu'à un Gigawatt environ. Les fortes puissances restent le domaine réservé de la production d'électricité, par contre, dans le cas où ces machines sont utilisées en fonctionnement moteur, associés aux nouveaux convertisseurs électronique de puissances, les puissances installées dépassent rarement quelques dizaines de Mégawatts, mais présentent une grande souplesse lorsque l'on veut commander la vitesse ou la position d'un moteur [4].

Pour produire de l'énergie électrique, la génératrice synchrone a besoin d'un champ magnétique tournant. Ce champ est créé grâce à un courant continu dans le bobinage du rotor dans le cas d'une machine à rotor bobiné et par les aimants dans le cas de la machine à aimants permanents. On parle alors d'excitation de la machine.

Dans ce chapitre, nous allons nous initier en premier temps à la production d'électricité par turbine hydraulique et turbine à gaz. Nous allons présenter et expliquer le principe de fonctionnement de la turbine à gaz étudié dans notre projet.

Par la suite, nous allons présenter l'élément essentiel dans la production de l'énergie électrique qui est la machine synchrone, ainsi que la partie la plus importante qui constitue cette dernière défini par le système d'excitation.

2.2. Production d'électricité

L'électricité peut être produite par de nombreux types de centrales, dont les principales sont :

- Les centrales à gaz (gaz, vapeur et cycle combiné) ;
- Les centrales nucléaires ;
- Les centrales à charbon ;
- Les centrales hydroélectriques ;
- Les centrales au fioul ;
- Les centrales solaires ;
- Les centrales éoliennes.

En Algérie, l'infrastructure de production dominante est la centrale à gaz. Néanmoins, il existe des centrales hydroélectriques et des projets de centrales solaires et éoliennes.

2.2.1. Production d'électricité par turbine hydraulique

L'eau accumulée dans les barrages ou dérivées par les prises d'eau, constitue une énergie potentielle disponible pour entraîner en rotation la turbine d'une génératrice. L'énergie hydraulique se transforme alors en énergie mécanique. Cette turbine accouplée mécaniquement à un alternateur l'entraîne en rotation afin de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique. La puissance disponible résulte de la conjonction de deux facteurs : la hauteur de la chute et le débit de la chute.

Du point de vue des dimensions de la centrale et de sa puissance, on distingue :

- les grandes centrales hydroélectriques (GCH), d'une puissance de plus de 10 MW et pouvant atteindre des milliers de MW ;
- les petites centrales hydroélectriques (PCH), subdivisées en petites centrales (500 KW à 10 MW), microcentrales (20 KW à 500 KW) et picocentrales (moins de 20 KW).

Selon la hauteur de chute, on distingue :

- Les centrales de haute chute : Dans ce cas, la puissance est principalement liée à la forte dénivelée (hauteur de chute supérieure à 100 m) entre la prise d'eau et le rejet. La conduite est l'ouvrage le plus important de ces types de centrales (exemple : Les centrales de DARGUINA et MANSOURIA) ;
- Les centrales de moyenne chute : La puissance est liée à la fois à la hauteur de chute et au débit turbiné (exemple : Les centrales d'ERRAGUENE et KHERRATA) ;
- Les centrales de basse chute. La puissance dépend alors du débit turbiné. Il n'y a en règle générale pas de conduite forcée, ou celle-ci reste courte. L'ouvrage le plus important est le barrage ou la prise d'eau, le plus souvent construit en béton [6].

Ces centrales sont équipées de différentes sortes de roues (PELTON, FRANCIS,...).

Selon le mode de production, il y a trois types de centrales hydroélectriques :

- Les centrales gravitaires, dont les apports en eau effectués par la simple gravité ;
- Les stations de transfert d'énergie par pompage (Step), dont la réserve d'eau est pompée électriquement ;
- Les centrales marémotrices, qui utilisent les courants induits par les marées.

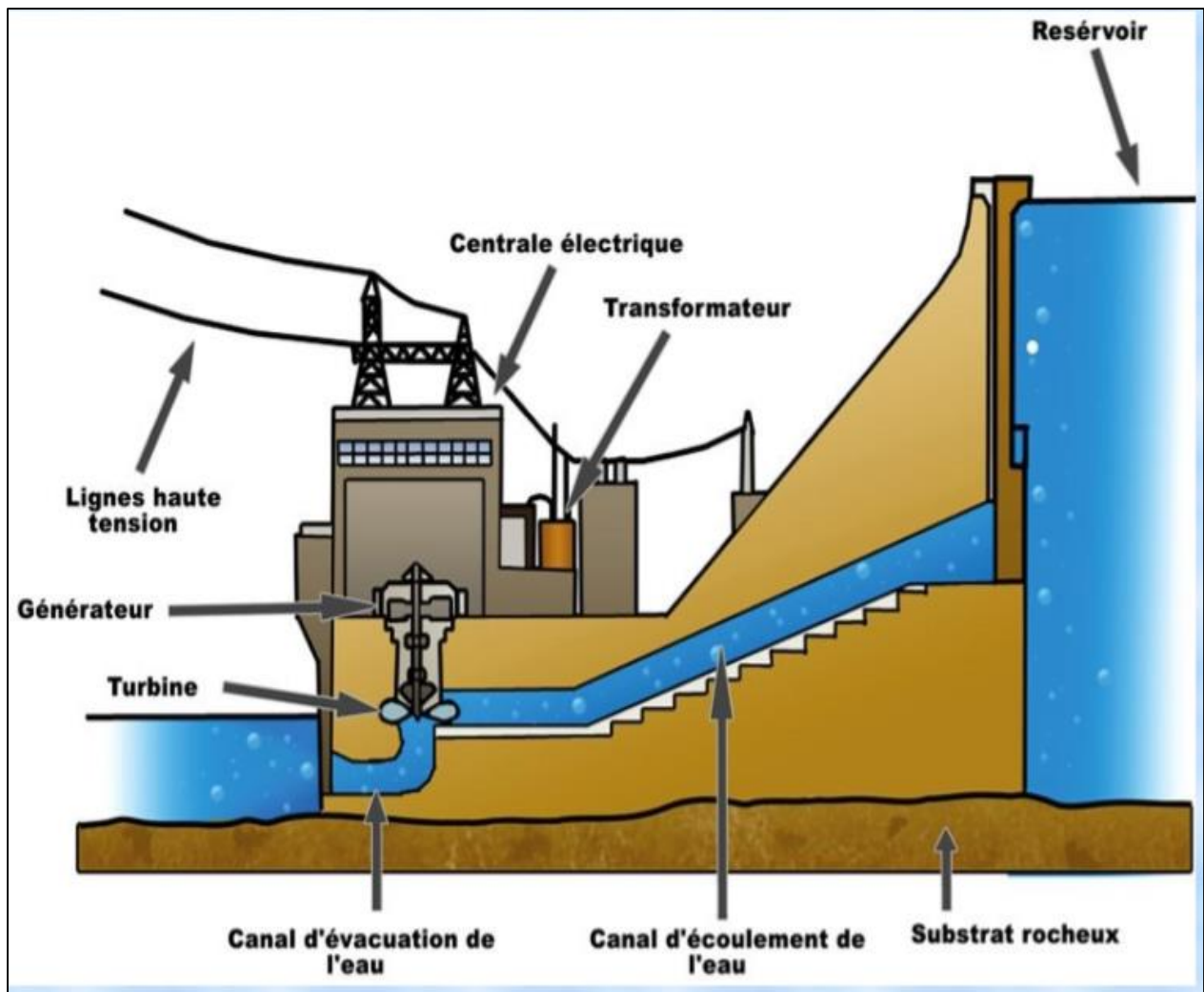


Figure 2.1 : Centrale hydraulique [1]

L'énergie hydraulique est plus respectueuse de l'environnement que les combustibles fossiles, comme le charbon ou le gaz, parce qu'elle ne cause aucune pollution. L'eau est une source d'énergie renouvelable et gratuite [5].

L'hydroélectricité joue un rôle crucial dans la sécurité et l'équilibre d'un système électrique, en permettant :

- Un démarrage rapide et une montée de puissance en quelques minutes,
- Une bonne stabilité de fonctionnement dans les situations très perturbées que peuvent connaître les réseaux électriques,
- Une capacité de redémarrage permettant, en cas d'écroulement du réseau électrique, de relancer le système électrique

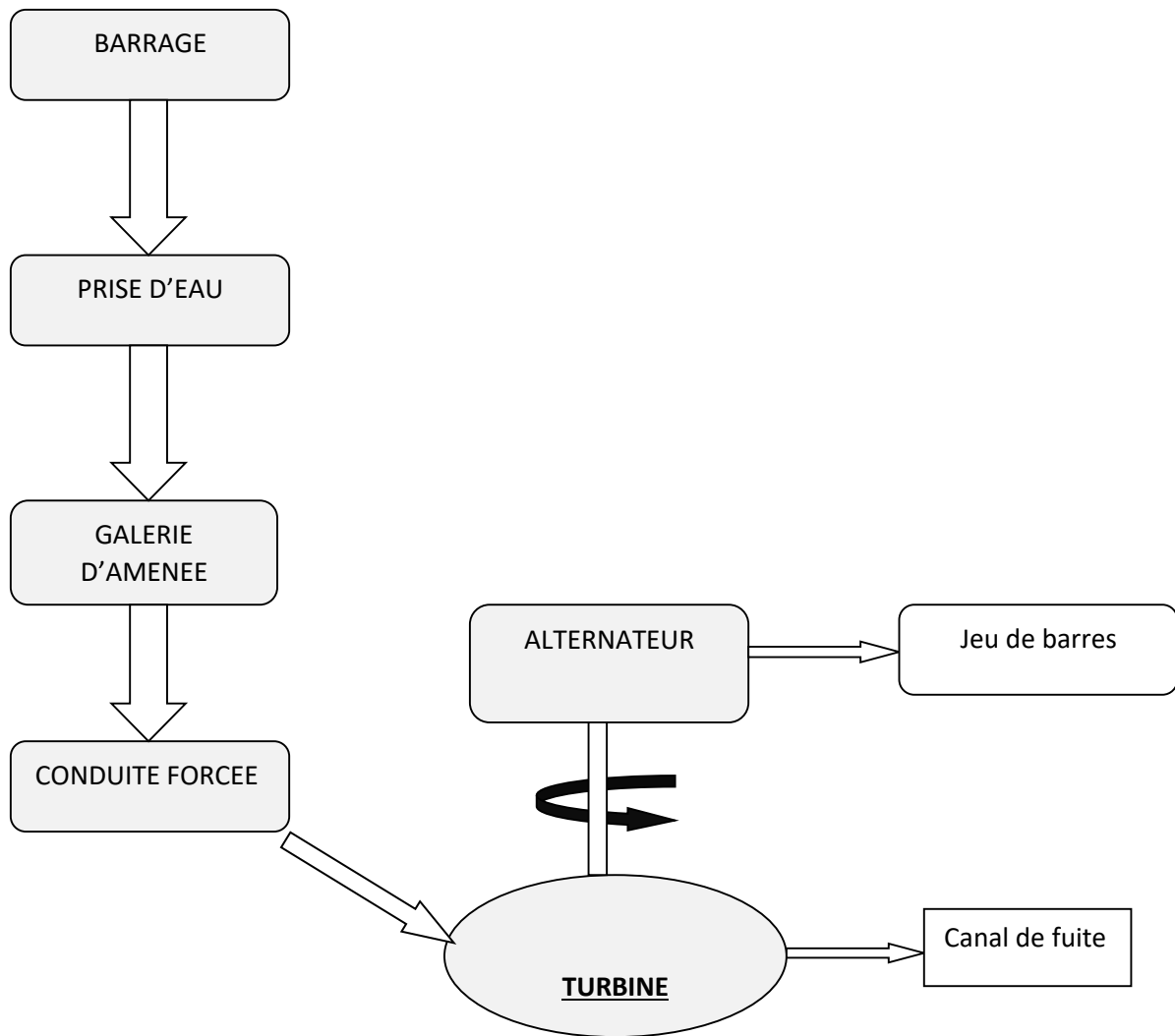


Figure 2.2 : Schéma d'une tranche de production hydraulique

2.2.2. Production d'électricité par turbine à gaz

Les turbines à gaz font partie de turbomachines définies par râteau comme étant des appareils dans lesquels a lieu un échange d'énergie entre un rotor tournant d'un axe à vitesse constante et un fluide en écoulement permanent. Une turbine à gaz, appelée aussi turbine à combustion, est une machine tournante thermodynamique appartenant à la famille des moteurs à combustion interne dont le rôle est de produire de l'énergie mécanique (rotation d'un arbre) à partir de l'énergie contenue l'hydrocarbure (fuel, gaz) [8] [9].

On prend l'exemple de la turbine à gaz FT8 de la centrale Amizour qui délivre une puissance entre 19MW à 20 MW lorsque la température ambiante varie dans les alentours de 40°C et 24 MW à 25 MW à des températures inférieure à 10°C, elle est constituée de [2] :

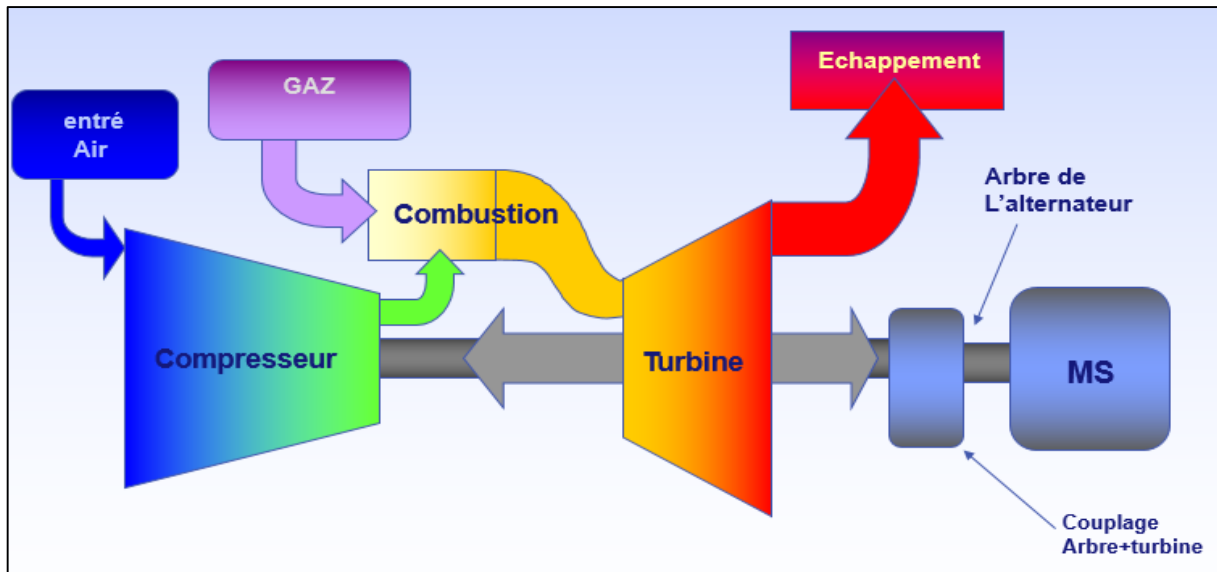


Figure 2.3 : Principe de fonctionnement de la turbine FT8 [2]

- Compresseur

Il augmente la pression de l'air lorsqu'il entre dans la chambre de combustion du générateur de gaz, l'air est comprimé afin d'optimiser le processus de combustion. En effet, l'énergie libérée est proportionnelle à la masse et, par conséquent, à la pression de l'air.

- Chambre de combustion

Elle fournit un espace pour la combustion et l'injection du combustible, l'air sortant du compresseur est mélangé au combustible dans la chambre de combustion, le mélange de combustible est ensuite allumé et brûlé, Cela augmente l'énergie thermique afin d'élargir la quantité d'air et d'accélérer l'écoulement massique des gaz chauds dans la turbine.

- Turbine

Elle extrait l'énergie cinétique provenant des gaz en expansion et convertit l'énergie en puissance sur l'arbre afin d'entraîner le ou les compresseurs.

- Turbine de puissance

Dans certaines applications, l'arbre à grande ou à faible vitesse est connecté à un dispositif entraîné, comme un générateur électrique, un compresseur de gaz ou une pompe. Dans certaines applications, le gaz d'échappement sortant de la turbine du moteur est utilisé pour alimenter une « Turbine de puissance » ou, comme on l'appelle parfois, une « turbine libre ». C'est cette

application qui est utilisée dans la TG d'Amizour. Les gaz chauds s'échappant de la turbine basse pression alimentera une turbine de puissance connectée au générateur électrique.

2.3. Le réseau électrique et le réglage de tension

- Le réseau électrique [10]

Le réseau électrique peut se définir comme l'infrastructure permettant la mise en relation entre la production d'électricité et les usages finaux. En réalisant cette interface, le réseau assure non seulement un lien physique permettant la circulation des flux d'énergie mais aussi une mise à disposition de services pour la collectivité qu'il irrigue :

- Il permet de tirer pleinement parti du foisonnement des usages ;
- Il permet des économies d'échelle et l'optimisation des outils de production ;
- Il accroît la sûreté d'alimentation grâce à la redondance et à la mutualisation des ressources. Mettant en regard l'offre et la demande, il joue nécessairement un rôle majeur dans la réalisation et le suivi de l'équilibre, en étant la structure clé des « systèmes électriques » ;
- Distribution ;
- Consommation.

Ceux-ci sont d'immenses machines distribuées, couvrant parfois des zones à l'échelle de continents. Ils sont régis par des lois physiques qui rendent leur gestion complexe et délicate, car leur bon fonctionnement repose sur des équilibres de chaque instant qui ne sont jamais acquis et sur le respect d'innombrables contraintes techniques évoluant au cours du temps.

- Régulation de tension [11]

La nature et la grandeur de la charge imposée à l'alternateur peuvent varier. En plus d'entraîner des variations de vitesse, ces variations de charge peuvent occasionner des variations de la tension de l'alternateur. Pour parer à cet inconvénient, on utilise un régulateur de tension qui a pour objectifs :

- Assurer une tension constante.
- Réaliser une bonne répartition de la puissance réactive entre les machines et les centrales fonctionnant en parallèle.
- Adapter l'excitation de manière adéquate dans le cas de certains défauts, ce afin d'assurer une meilleure stabilité du réseau.

Le régulateur de tension agit ordinairement sur le champ de l'excitation principale ou l'excitation pilote, selon le cas, afin de faire varier la tension aux bornes de celle-ci.

La tension et le courant de référence qu'utilise le régulateur de tension proviennent de transformateurs de tension et de courant raccordés aux bornes de l'alternateur, le régulateur de tension « analyse » la valeur de la tension aux bornes de l'alternateur à l'aide de transformateurs de tension tandis que les transformateurs de courant eux permettent de déterminer la nature de la charge ; Si les valeurs ne sont pas celles du point de consigne, le régulateur de tension apportera la correction requise.

En exploitation, la tension d'un alternateur alimentant un réseau séparé doit être maintenue constante quel que soit le facteur de puissance et l'intensité du courant débité par le stator. Pour arriver à ce résultat on augmente la f.e.m en agissant sur le courant dans le rotor de l'alternateur (courant d'excitation). Si on augmente ce courant, le champ produit par le rotor augmentera, il en résulte une augmentation de et la tension aux bornes de l'alternateur. On obtient le résultat inverse en diminuant le courant d'excitation.

2.4. Machine synchrone [12]

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre mécanique est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique inducteur est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique d'induit est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre les deux parties (l'inducteur et l'induit). Cette famille de machine regroupe en fait plusieurs sous familles, qui vont de l'alternateur de plusieurs centaines de mégawatts au moteur de quelques watts.

2.4.1. Définition d'une machine synchrone

Une machine synchrone est une machine électrique tournante réversible. En fonctionnement moteur, elle est alimentée par une source de tension alternative le plus souvent triphasée pour entraîner une charge mécanique à une vitesse de rotation constante. En fonctionnement générateur, elle est entraînée par un dispositif mécanique, cette énergie mécanique est alors convertie en énergie électrique, dont la fréquence est proportionnelle à la vitesse de rotation.

On l'appelle machine synchrone, comme le nom l'indique, le rotor de cette dernière tourne en synchronisme avec le champ tournant du stator, c'est-à-dire à la même vitesse que ce champ. Cette vitesse est donc liée à la fréquence de la source et comme cette fréquence est constante, la vitesse de la machine est rigoureusement constante (elle ne varie ni avec la charge, ni avec la tension de la source).

Cependant, l'utilisation de la MS dans la plupart des applications industrielles ne tient généralement pas au fait que sa vitesse est constante, mais elle dépend surtout de ses propriétés électriques tout à fait particulières.

2.4.2. Constitution d'une machine synchrone

- Stator :

C'est la partie fixe de la machine. Il est formé par un empilage de disques de tôles ferromagnétique isolées entre elles pour minimiser les pertes par courants de FOUCAULT.

L'intérieur du stator 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. Ce dernier est toujours raccordé en étoile et le neutre est accessible pour permettre sa mise à la terre, dans la plus part des cas on préfère la connexion en étoile à celle en triangle.

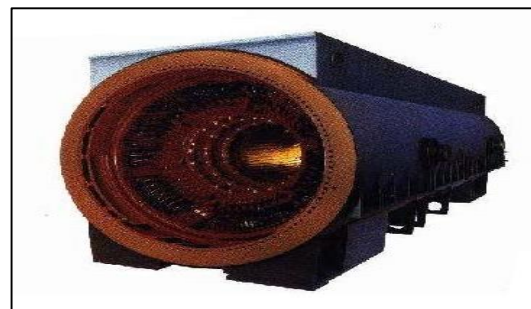


Figure 2.4: Stator d'un alternateur de grande puissance

- Rotor :

C'est la partie tournante de la machine (appelé aussi roue polaire) ayant pour rôle de générer le champ d'induction (inducteur). Il doit porter le même nombre de paires de pôle que le stator. Le rotor est composé d'un empilement de disques ferromagnétiques. A l'extérieur du rotor, on trouve des enroulements qui doit être alimentés par une source de tension continue dans le cas de machines de moyenne et grande puissance ou des aimants permanent dans le cas de machines de faible puissance pour créer le champ inducteur. On distingue donc trois grandes

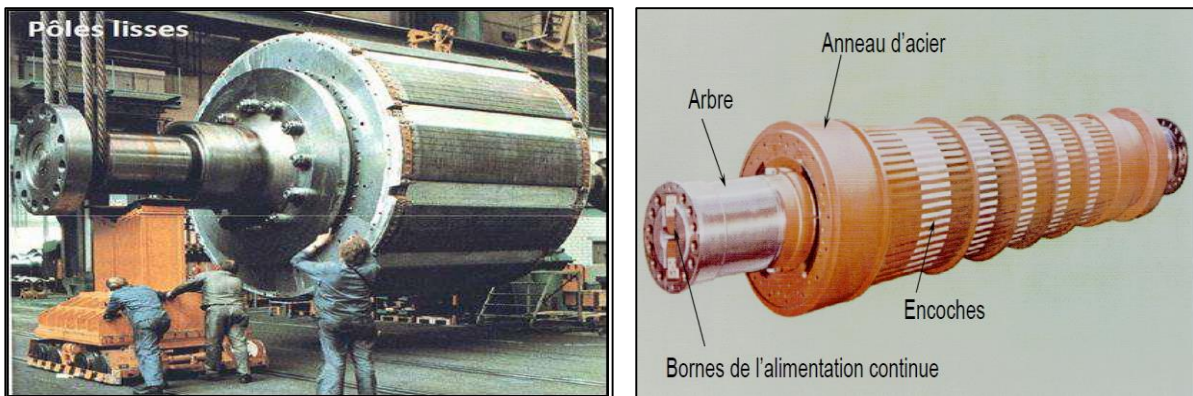
familles de machines synchrones : Les machines rotors bobinés à pôles lisses, les machines rotors bobinés à pôles saillants ainsi que les machines rotors à aimant permanent.

2.4.3. Type de machine synchrone à rotor bobiné

Il existe 3 types essentiels :

- **machines synchrone à pôles lisses :**

Le rotor est un cylindre plein (entrefer constant). Il possède le plus souvent deux pôles pour s'adapter aux grandes vitesses. Les enroulements sont logés dans des encoches pratiquées sur le rotor. L'alimentation en courant continu s'effectue via l'ensemble bagues-balais aux bagues de bout d'arbre.



- **machine synchrone à pôles saillants :**

Le rotor bobiné à pôles saillants est presque de même constitution que le rotor bobiné à pôles lisses dont les bobines sont enroulées sur les pôles laissant un vide entre un pôle et l'autre qui le succède (entrefer variable). Vu l'inertie importante de ce type de rotor, la machine à rotor bobiné à pôles saillants est souvent utilisée à basse vitesse ou à basse puissance.



Figure 2.6 : Rotor à pôle saillant

- Machine synchrone à aimant permanent :

Les aimants permanents sont disposés directement sur la périphérie du rotor. Les machines à aimant permanent sont disponibles depuis une vingtaine d'années, mais ce n'est que récemment que le faible prix des composants et une meilleure technologie les ont rendus accessibles à une large gamme d'applications.

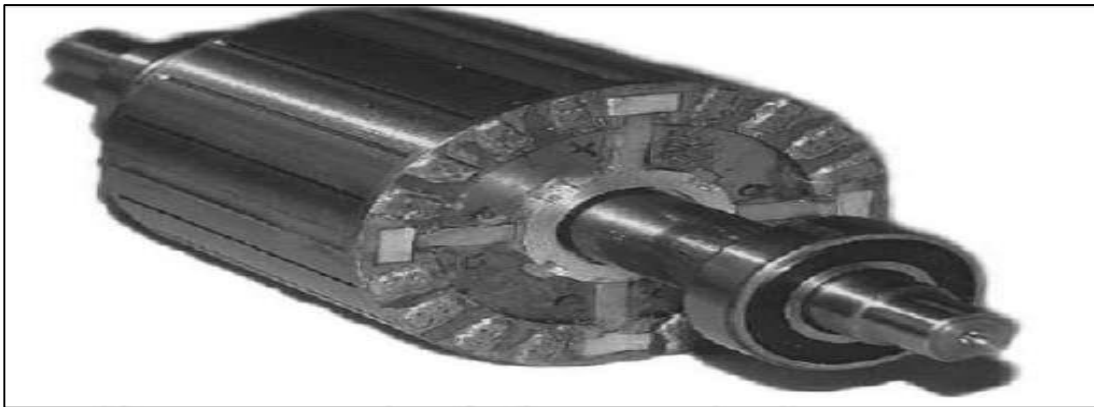


Figure 2.7 : Rotor à aimant permanent

2.5. Excitations des alternateurs synchrones à rotor bobinés

L'excitation est très importante dans la machine synchrone quand elle fonctionne comme générateur parce que le système peut régler la quantité de puissance réactive fournie ou absorbée par le générateur.

Lorsque la machine synchrone n'est pas à aimants permanents, son enroulement rotorique (l'inducteur) doit être alimenté par une source de tension continue réglable pour avoir un courant d'excitation variable. Ce courant peut atteindre plusieurs centaines d'ampères. Comme il est difficile de commander directement un courant d'une telle intensité, l'excitation est obtenue à partir d'un dispositif à plusieurs étages. La source d'excitation peut être une source extérieure au rotor, donc un système de balais-bagues, ou bien une source intérieure fixée au rotor.

Dépendamment de la source d'alimentation, les systèmes d'excitation pour les génératrices synchrones se distinguent selon trois types essentiels.

- système d'excitation à courant continu (DC) ;
- système d'excitation à courant alternatif (AC) ;
- système d'excitation statique

2.5.1. Système d'excitation à courant continu (DC)

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

L'excitation à courant continu est la première utilisée de l'année 1920 jusqu'en 1960 où elle a été remplacée par l'excitation de type AC [13]

Actuellement, ce type d'excitation est rarement utilisée à des fins d'étude de la stabilité car il exige une modélisation complexe. Il est souvent remplacé par l'excitatrice de type AC ou l'excitatrice statique ST [13].

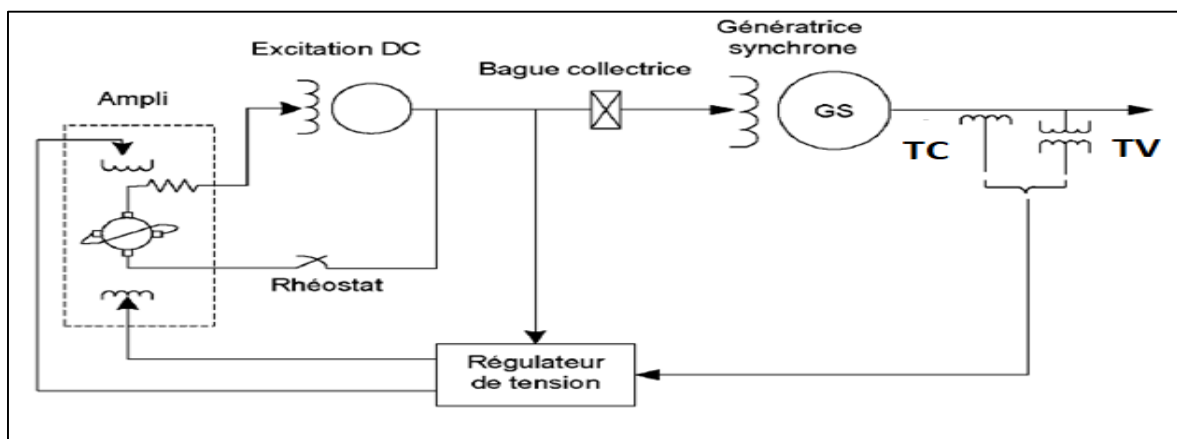


Figure 2.8 : Système d'excitation à courant continu DC [13]

2.5.2. Système d'excitation statique [14]

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

- Système statique avec redresseur commandé à source de tension.
- Système statique avec redresseur non commandé à source combinée.
- Système statique avec redresseur commandé à source combinée.

L'excitatrice statique par redresseur commandé à source de tension (Figure 2.9) 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 régulateurs (PI, PID, Flous, ... etc.) ;
- Moins coûteuse et facile à entretenir ;
- Plus adaptée pour les petites centrales hydroélectriques.

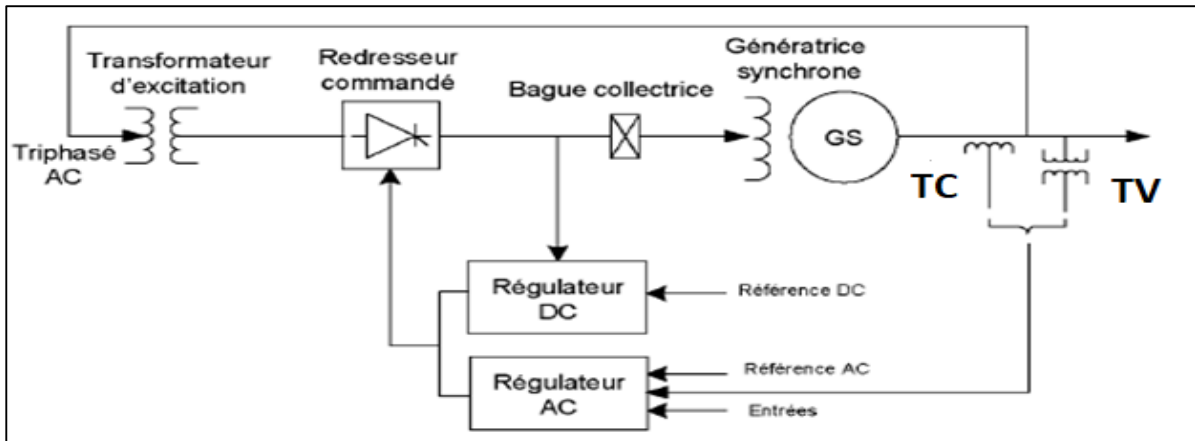


Figure 2.9: Excitatrice statique par redresseur commandé à source de tension [13].

2.5.3. Système d'excitation à courant alternatif (AC)

L'excitation à courant alternatif utilise un alternateur associé à un redresseur stationnaire ou tournant pour produire le courant de champ excitant de 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 champ au niveau de l'excitation. Les Figures (2.10) Et (2.11) montrent l'excitation de type AC muni d'un redresseur stationnaire non commandé et commandé respectivement.

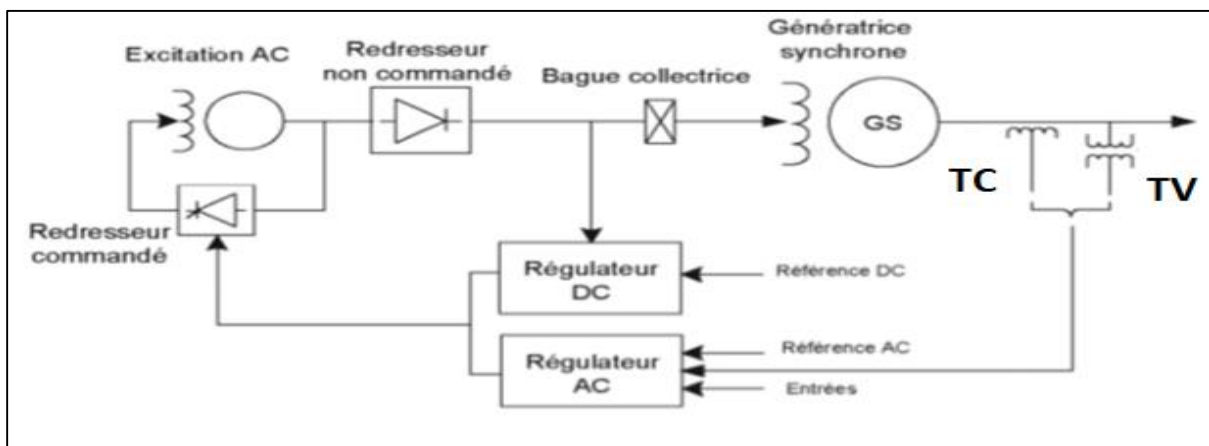


Figure 2.10 : Excitation de type AC avec redresseur non commandé [13]

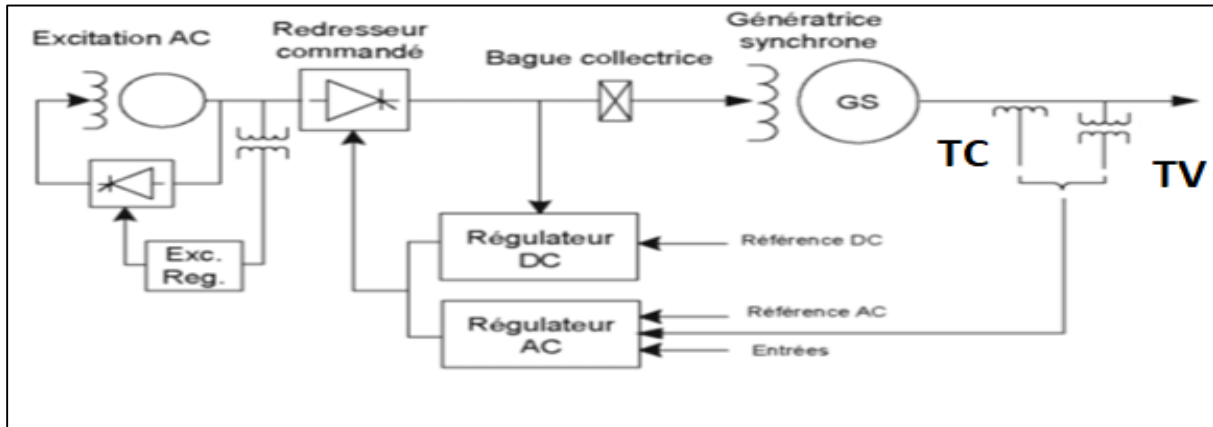


Figure 2.11 : Système d'excitation AC avec redresseur commandé [13]

2.5.4. Système d'excitation sans contact (Brushless)

Le principe de cette excitation est de fournir l'énergie à la partie tournante de l'alternateur principal (sans l'intermédiaire de bagues ni balais), elle est prévue pour être montée directement sur l'arbre de l'alternateur principal. Elle est équipée d'un redresseur à diodes tournant et est adaptée à chaque alternateur (Caractéristiques électriques, diamètre de l'arbre, interfaces mécaniques), de plus elle peut être mise en place sur des générateurs existants en remplacement d'excitatrices à collecteur ou de systèmes bagues et balais.

Le courant généré par l'excitatrice doit être redressé pour être injecté dans la roue polaire de l'alternateur principal, c'est le rôle de pont de diodes ou redresseur tournant. Il est constitué de 6 diodes au moins, et peut être équipé de fusible, surtension ou autres dispositifs de protection.

Le stator de l'excitateur est alimenté par un régulateur qui assure la précision de tension.

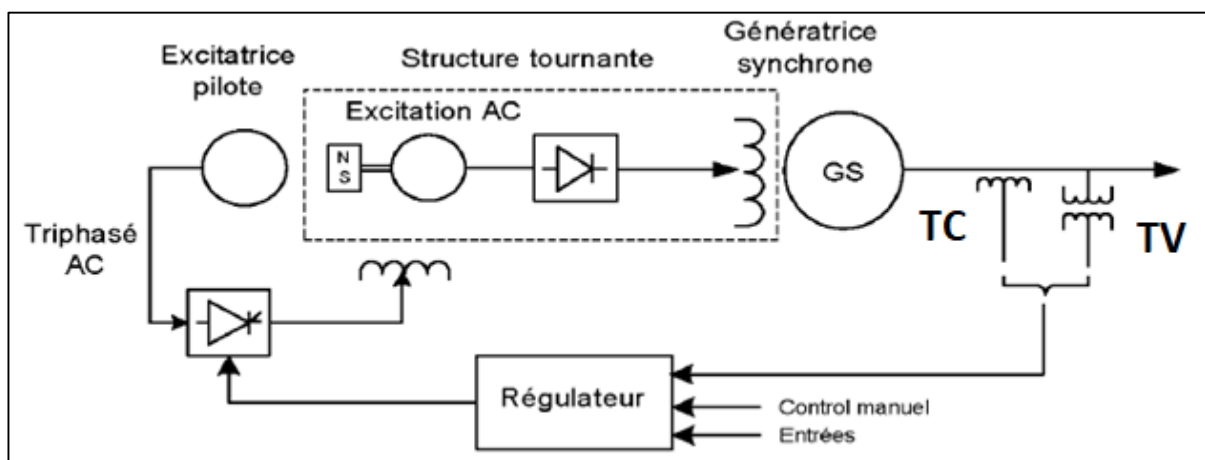


Figure 2.12 : Système d'excitation brushless [13]

2.6. Exigences du 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 [13] [15] [16], 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 [13] [17]. Cela implique aussi le maintien de la stabilité transitoire en cas de perturbations et de faibles signaux.

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. À partir des années 1960, l'importance et le rôle du système d'excitation ont été élargi 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 des stabilisateurs de puissance (Power System Stabilizer) [14].

Les systèmes d'excitation modernes sont actuellement capables de fournir une réponse pratiquement instantanée même avec des tensions élevées (HT).

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.

2.7. Commande et circuits de protection des systèmes d'excitation

La Figure (2.13) 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 un autre [13].

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 [13].

Le régulateur à courant alternatif (AC) 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 (2.13). Le régulateur à courant continu (DC) contrôle à son tour, la tension d'excitation. Souvent, il est défini par un régulateur automatique de tension (AVR). Par ailleurs, plusieurs types de régulateurs peuvent être utilisés dans le cas du courant alternatif, citant les correcteurs conventionnels (PI, PID).

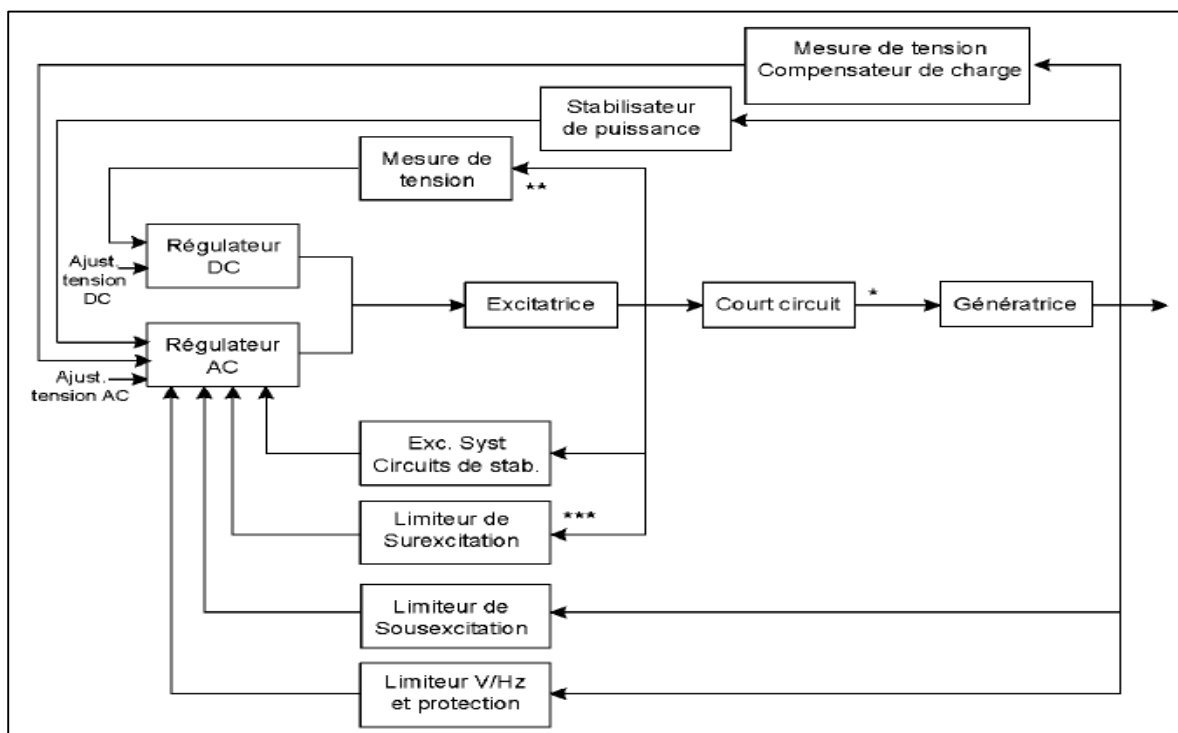


Figure 2.13 : Système d'excitation muni de circuits de protection [13]

Avec :

* 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 DC

2.8. 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) [15], 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 (2.14) 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 [8].

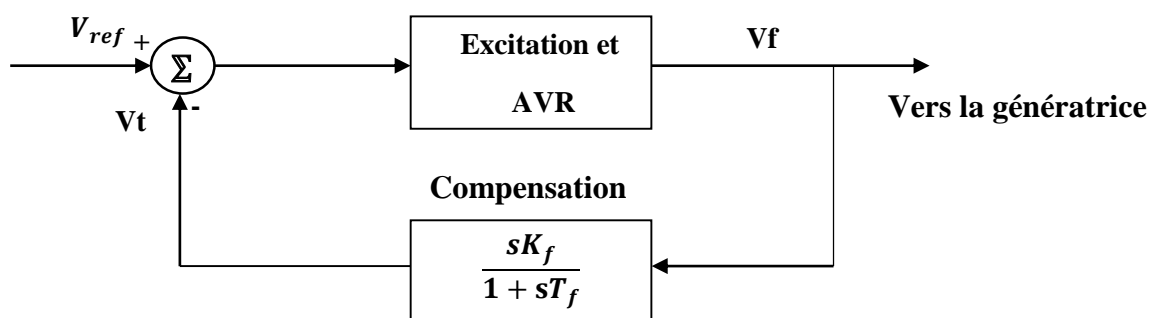


Figure 2.14 : Schéma de stabilisation et régulation de l'excitation [14]

2.9. Stabilisateur de puissance (PSS)

Le stabilisateur de puissance (PSS) utilise des signaux de stabilisation additionnelle qui agissent sur le système d'excitation dans le but d'améliorer les performances dynamiques du système électrique global. Généralement les grandeurs utilisées à une entrée d'un stabilisateur de puissance sont générées par la vitesse de rotation de l'arbre, la fréquence et la puissance [14].

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

2.10. Compensateur de charge

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.

Comme montré dans la Figure (2.15), le compensateur de charge est composé d'une résistance R_c et une réactance X_c en série, qui sont ajustables. 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 selon la formule suivante [14] :

$$V_c = |\tilde{E}_t + (R_c + jX_c)\tilde{I}_t|$$

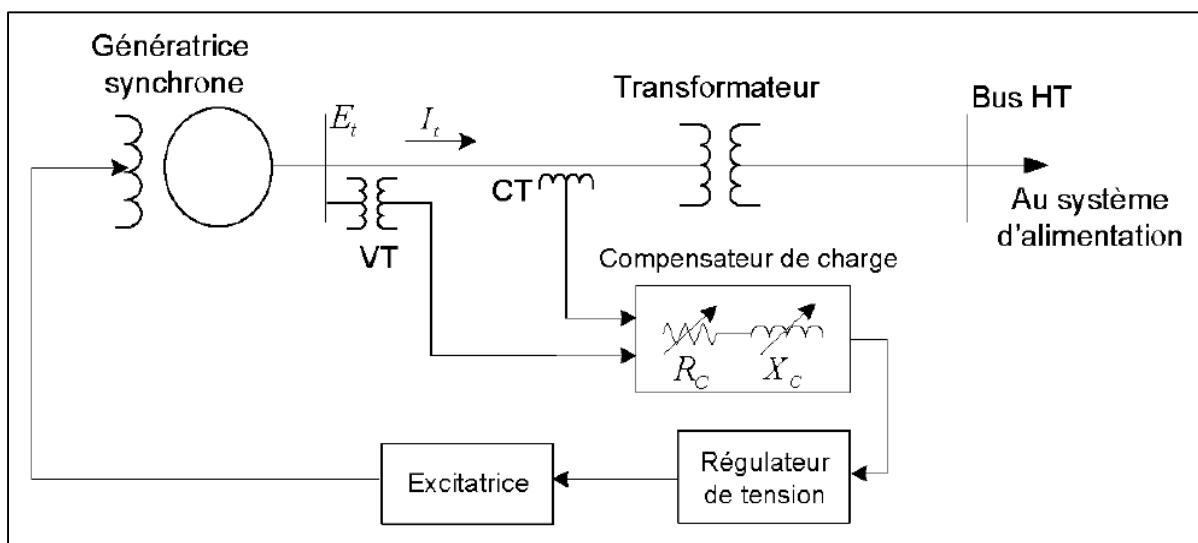


Figure 2.15 : compensateur de charge [13]

2.11. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation des généralités sur la machine synchrone. Après un bref aperçu sur les machines électriques et l'initiation au processus de production de l'énergie électrique dans les centrales électriques, nous avons donné une définition de la machine synchrone et son intérêt, ensuite nous avons présenté ses différents types selon leur type de rotors.

Nous avons par la suite entamé la partie la plus importante dans la machine synchrone qui est définie par le système d'excitation, pour cela nous avons présenté les types d'excitation qui existent ainsi que leurs avantages et inconvénients.

Dans le chapitre suivant, on s'intéressera à la modélisation de la machine synchrone, qui nous permettra d'établir son modèle mathématique.

Chapitre 3

Modélisation de la machine synchrone

3.1. Introduction

La modélisation analytique de la machine synchrone est basée sur l'analyse des différents phénomènes physiques de la machine pour en déduire les équations électromécaniques. L'étude des caractéristiques dynamiques de la machine synchrone par cette méthode a réellement débuté avec le développement de la théorie généralisée de Park de la machine synchrone en 1929 [23].

L'objet de ce chapitre est de développer un modèle mathématique approprié de la machine synchrone pour l'étude de son comportement aussi bien en régime permanent qu'en régime transitoire. Initialement, le modèle classique de la machine synchrone est présenté de façon détaillée afin d'établir les équations différentielles de la machine en grandeurs de phase dans un référentiel fixe (modèle abc). Par la suite, en utilisant la transformation de Park, plusieurs représentations du modèle de la machine synchrone, exprimée dans le repère de Park seront présentées. Les relations entre les différents paramètres, en utilisant les paramètres de la machine exprimés en termes de réactances et constantes de temps dans l'approche dite conventionnelle, seront montrées.

Enfin, nous terminerons le chapitre par des simulations numériques du modèle développé pour illustrer le comportement dynamique d'un alternateur synchrone connecté au réseau électrique, et en utilisant les paramètres fournis par le fabricant du générateur Brush 28 MVA-11.5 KV utilisé dans la centrale électrique d'Amizour.

3.2. Modèle de la MS dans le référentiel fixe (modèle de base)

Afin d'obtenir une formulation plus simple et de réduire la complexité du modèle de la machine synchrone, l'établissement de son modèle mathématique sera développé sur la base des hypothèses suivantes [18]:

- Seule le premier harmonique d'espace de la distribution de force magnétomotrice (f.m.m) créée par chaque phase de l'induit est pris en compte. Ceci implique que les enroulements des phases statoriques peuvent être considérés à distribution sinusoïdales.
- La perméabilité de la machine est constante. Ceci suppose que le circuit est parfaitement linéaire. La saturation magnétique est négligée. Cette hypothèse permet de considérer que les flux sont des fonctions linéaires simples des courants.

- Les circuits magnétiques sont laminés, ce qui permet de considérer que seuls les enroulements (inducteurs, induit, amortisseurs) sont parcourus par des courants.

3.2.1. Représentation schématique de la MS

Basée sur les hypothèses simplificatrices présentées ci-dessus, la machine synchrone peut être représentée par un système qui comprend essentiellement :

- Au stator trois phases d'induits a , b , c parcourus par des courants i_a, i_b, i_c respectivement, dont les tensions aux bornes sont définies comme v_a, v_b, v_c ;
- Au rotor le circuit d'inducteur f parcouru par le courant i_f et dont la tension aux bornes est notée v_f .

Les machines synchrones ont généralement un rotor muni de circuits d'amortisseur constitués de barres de cuivre, reliées entre elles à chaque extrémité du rotor par un anneau. En général, dans le cas des machines idéalisées, les amortisseurs sont symbolisés par deux enroulements fictifs court-circuités, l'un situé dans l'axe polaire d et l'autre dans l'axe en quadrature q . Ces deux enroulements sont repérés par les indices D et Q .

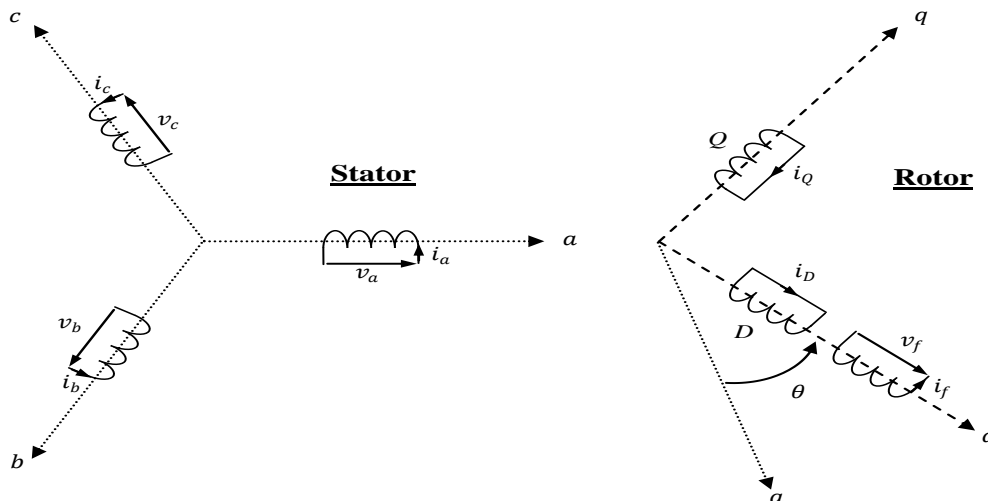


Figure 3.1 : Modèle de la machine synchrone dans le repère abc

La figure (3.1) représente une machine synchrone par les enroulements rotoriques et statoriques (cas d'une machine bipolaire). La position du rotor est caractérisée par l'angle θ entre l'axe de l'enroulement de la phase a et de l'axe polaire d , mesurés positivement dans le sens anti horaire. L'angle θ varie selon :

$$\theta = \omega t$$

Où ω est la vitesse du rotor.

Avec ces conditions, la machine synchrone peut être modélisée par des circuits électriques à paramètres localisés, constitués d'éléments linéaires que sont les inductances et les résistances.

Evidemment, cette approche est nécessairement approximative. Toutefois, sa simplicité et sa capacité à interpréter les grandeurs physiques donne un outil privilégié pour développer des modèles plus riches.

3.2.2. Equations de tensions et flux [18]

En utilisant les conventions décrites à la figure (3.1) (convention générateur), les équations de tension aux bornes des enroulements peuvent être développées sous forme matricielle suivante :

$$[v_s] = -[R_s] \cdot [i_s] + \frac{d}{dt} [\phi_s] \quad (3.1)$$

$$[v_r] = [R_r] \cdot [i_r] + \frac{d}{dt} [\phi_r] \quad (3.2)$$

Les vecteurs tensions, courants et flux sont définis comme :

$$[v_s] = \begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix}; \quad [i_s] = \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix}; \quad [\phi_s] = \begin{pmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{pmatrix};$$

$$[v_r] = \begin{pmatrix} v_f \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad [i_r] = \begin{pmatrix} i_f \\ i_D \\ i_Q \end{pmatrix}; \quad [\phi_r] = \begin{pmatrix} \phi_f \\ \phi_D \\ \phi_Q \end{pmatrix};$$

Avec :

ϕ_a, ϕ_b, ϕ_c : Sont les flux induits dans les phases a, b, c respectivement ;

ϕ_f : Le flux induit dans l'enroulement inducteur ;

ϕ_D, ϕ_Q : Le flux induit dans les enroulements amortisseurs ;

R_s, R_f, R_D, R_Q : Sont les résistances d'une phase de l'induit, de l'inducteur, des amortisseurs de l'axe d et q.

Les flux à travers les enroulements, exprimés par rapport aux matrices inductances et aux vecteurs courants sont :

$$[\phi_s] = [L_{ss}] \cdot [i_s] + [M_{sr}] \cdot [i_r] \quad (3.4)$$

$$[\phi_r] = [L_{rr}] \cdot [i_r] + [M_{rs}] \cdot [i_s] \quad (3.5)$$

Les matrices de résistances et d'inductances s'expriment sous forme :

$$[R_s] = \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{pmatrix} ;$$

$$[R_r] = \begin{pmatrix} R_f & 0 & 0 \\ 0 & R_D & 0 \\ 0 & 0 & R_Q \end{pmatrix} ;$$

Où R_s, R_f, R_D, R_Q sont respectivement : la résistance d'une phase statorique, d'une phase rotoriques, de l'enroulement amortisseur D , de l'enroulement amortisseur Q .

$$[L_{ss}] = \begin{pmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c \end{pmatrix} ;$$

$$[L_{rr}] = \begin{pmatrix} L_f & M_{fD} & 0 \\ M_{fD} & L_D & 0 \\ 0 & 0 & L_D \end{pmatrix} ;$$

$$[M_{rs}] = \begin{pmatrix} M_{af} & M_{aD} & M_{aQ} \\ M_{bf} & M_{bD} & M_{bQ} \\ M_{cf} & M_{cD} & M_{cQ} \end{pmatrix} ;$$

3.2.3. Expression des inductances du modèle de base [19]

Les inductances des enroulements statoriques et leurs mutuelles inductances sont, pour les machines à pôles saillants, fonction de la position relative du rotor caractérisés par θ :

$$\begin{cases} L_a = L_{s0} + L_{sv} \cos(2\theta) \\ L_b = L_{s0} + L_{sv} \cos 2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_c = L_{s0} + L_{sv} \cos 2\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (3.6)$$

$$\begin{cases} M_{ab} = M_{s0} + L_{sv} \cos 2\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ M_{bc} = M_{s0} + L_{sv} \cos 2\theta \\ M_{ac} = M_{s0} + L_{sv} \cos 2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (3.7)$$

Pour les machines à rotor lisse, L_{sv} est nul. Mais les mutuelles inductances entre enroulements du stator et du rotor sont fonctions de θ pour les deux types de machines :

$$\begin{cases} M_{af} = M_{sf} \cos \theta \\ M_{bf} = M_{sf} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{cf} = M_{sf} \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (3.8)$$

$$\begin{cases} M_{aD} = M_{sD} \cos \theta \\ M_{bD} = M_{sD} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{cD} = M_{sD} \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (3.9)$$

$$\begin{cases} M_{aQ} = -M_{sQ} \sin \theta \\ M_{bQ} = -M_{sQ} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{cQ} = -M_{sQ} \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (3.10)$$

Toutes les inductances liées aux enroulements statoriques sont fonction de la position θ du rotor, donc les équations de flux contiennent des fonctions non linéaires de θ . Pour supprimer la non linéarité, R.H Park a développé une transformation qui consiste à faire une projection des variables liées au stator dans référentielle qui tourne avec le rotor.

3.3. Modèle de la MS dans le repère de Park [20]

La mise en équation des machines synchrones triphasées aboutit à des équations différentielles à coefficients variables. L'étude analytique de la machine est alors relativement laborieuse, vu le grand nombre de variables.

La transformation de Park est un outil mathématique qui permet de décrire le comportement de la machine à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants. Cette dernière permet le passage d'un système triphasé en un autre diphasé tournant avec ou sans composante homopolaire.

La matrice de transformation de Park peut prendre l'écriture suivante :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos \theta & -\sin \theta \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

Ainsi écrite, la matrice choisie conserve l'invariance de la puissance instantanée, elle conduit à des schémas où les inductances mutuelles sont réciproques en faisant passer des tensions et courants statoriques réels à leurs composantes homopolaire, d'axe direct et d'axe en quadrature liées au rotor.

Pour passer du repère a, b, c vers le repère o, d, q, on prendra un point quelconque tel que :

$$[X]_{odq} = [P(\theta)][X]_{abc} \quad (3.12)$$

Donc de (3.12) on aura :

$$\begin{cases} [v_s]_{odq} = [P(\theta)][v_s]_{abc} \\ [i_s]_{odq} = [P(\theta)][i_s]_{abc} \end{cases} \quad (3.13)$$

Avec :

$$[v_s]_{odq} = \begin{pmatrix} v_o \\ v_d \\ v_q \end{pmatrix} \quad ; \quad [i_s]_{odq} = \begin{pmatrix} i_o \\ i_D \\ i_Q \end{pmatrix}$$

On obtient :

$$[P(\theta)][v_s]_{abc} = -[R_s] \cdot [P(\theta)] \cdot [i_s]_{odq} + \frac{d}{dt} ([L_{ss}] \cdot [P(\theta)] \cdot [i_s]_{odq} + [M_{sr}] \cdot [i_r]) \quad (3.14)$$

$$[v_r]_{odq} = [R_r] \cdot [i_r] + \frac{d}{dt} ([M_{rs}] \cdot [P(\theta)] \cdot [i_s]_{odq} + [L_{rr}] \cdot [i_r]) \quad (3.15)$$

Soit en pré multipliant par $[P(\theta)]^{-1}$ l'équation (3.14) :

$$[v_s]_{odq} = -[R_s] \cdot [i_s]_{odq} \cdot [P(\theta)]^{-1} + \frac{d}{dt} ([L_{ss}] \cdot [P(\theta)] \cdot [i_s]_{odq} + [M_{sr}] \cdot [i_r]) \quad (3.16)$$

$$[v_r]_{odq} = [R_r] \cdot [i_r]_{odq} + \frac{d}{dt} ([M_{rs}] \cdot [P(\theta)] \cdot [i_s]_{odq} + [L_{rr}] \cdot [i_r]) \quad (3.17)$$

En négligeant les composantes homopolaires (régime équilibré), on peut trouver les équations électriques et magnétiques de la machine synchrone dans le repère (o, d, q) respectivement comme suit [20] :

$$\begin{cases} v_d = -R_s i_d - \omega \phi_q + \frac{d\phi_d}{dt} \\ v_q = -R_s i_q + \omega \phi_d + \frac{d\phi_q}{dt} \\ v_f = R_f i_f + \frac{d\phi_f}{dt} \\ 0 = R_D i_D + \frac{d\phi_D}{dt} \\ 0 = R_Q i_Q + \frac{d\phi_Q}{dt} \end{cases} \quad (3.18)$$

$$\begin{cases} \phi_d = -L_d i_d + M_{sf} i_f + M_{sD} i_D \\ \phi_q = -L_q i_q + M_{sQ} i_Q \\ \phi_f = L_f i_f + M_{fD} i_D - M_{sf} i_d \\ \phi_D = L_D i_D + M_{fD} i_f - M_{sD} i_d \\ \phi_Q = L_Q i_Q - M_{sQ} i_q \end{cases} \quad (3.19)$$

Avec :

- L_D, L_Q : inductances propres des enroulements amortisseurs ;
- M_{sD}, M_{sQ} : inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et les enroulements d'amortisseur selon le axes d et q ;

- M_{fD} : inductance mutuelle entre l'enroulement d'excitation et l'enroulement amortisseur D ;
- M_{sf} : inductances mutuelle entre l'enroulement d'excitation et l'enroulement statoriques ;
- L_d, L_q : inductances propres des enroulements statoriques suivant les axes d et q ;

En posant [19] :

$$L_d = L_{s0} - M_{s0} + \frac{3}{2}L_{sv} \quad ; \quad L_q = L_{s0} - M_{s0} + \frac{3}{2}L_{sv} \quad ; \quad L_0 = L_{s0} + 2M_{s0}$$

$$M_f = \sqrt{\frac{3}{2}}M_{sf} \quad ; \quad M_D = \sqrt{\frac{3}{2}}M_{sD} \quad ; \quad M_Q = \sqrt{\frac{3}{2}}M_{sQ} \quad ; \quad M_{fD} = \sqrt{\frac{3}{2}}M_{fD} \quad ; \quad \omega = \frac{d\theta}{dt}$$

On obtient des équations (3.16) et (3.17) l'équation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_d \frac{d}{dt} & -L_q \omega & M_f \frac{d}{dt} & M_D \frac{d}{dt} & -M_Q \omega \\ L_d \omega & R_s + L_q \frac{d}{dt} & M_f \omega & M_D \omega & M_Q \frac{d}{dt} \\ M_f \frac{d}{dt} & 0 & R_f + L_f \frac{d}{dt} & M_{fD} \frac{d}{dt} & 0 \\ M_D \frac{d}{dt} & 0 & M_{fD} \frac{d}{dt} & R_D + L_D \frac{d}{dt} & 0 \\ 0 & M_Q \frac{d}{dt} & 0 & 0 & R_Q + L_Q \frac{d}{dt} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}$$

NB : la composante homopolaire est toujours négligée.

- En comparant les modèles abc et dqo, on remarque que les matrices inductances obtenus ne sont plus fonction de θ .

Les paramètres réels des enroulements d'amortisseur du rotor sont difficiles à obtenir car on ne peut pas mesurer directement les courants et tensions à leurs bornes. De plus, on ne connaît pas les nombres effectifs de spires des enroulements d'amortisseurs. Par conséquent, les variables du rotor sont généralement exprimées en grandeur relative par rapport au stator. La conversion des paramètres est également réalisée en grandeurs relatives.

La figure (3.2) représente de modèle de la machine synchrone dans le repère dq :

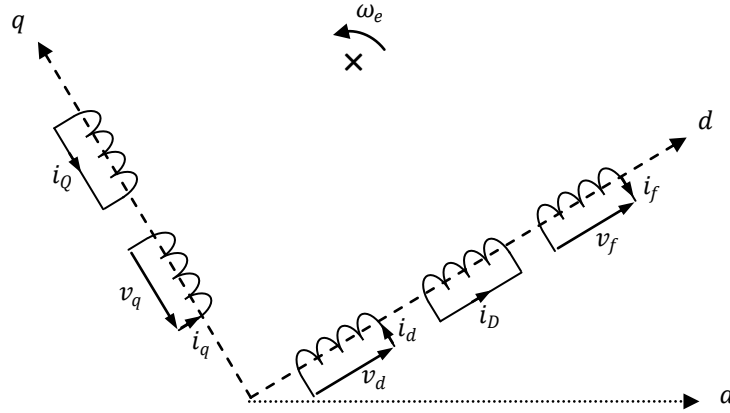


Figure 3.2 : Modèle de la machine synchrone dans le repère dq

3.4. Expression du couple électromagnétique [22]

Selon Park, l'expression de la puissance instantanée s'écrit comme suit :

$$P = v_d i_d + v_q i_q + v_f i_f + v_D i_D + v_Q i_Q \tag{3.20}$$

- L'expression de la puissance d'échange d'énergie électromagnétique entre la machine et ses sources s'écrit comme suit :

$$P_{ech} = i_d \frac{d\phi_d}{dt} + i_q \frac{d\phi_q}{dt} + i_f \frac{d\phi_f}{dt} + i_D \frac{d\phi_D}{dt} + i_Q \frac{d\phi_Q}{dt} \tag{3.21}$$

- L'expression des pertes joules s'écrit comme suit :

$$P_j = R i_d^2 + R i_q^2 + R i_f^2 + R i_D^2 + R i_Q^2 \tag{3.22}$$

- Puissance mécanique s'écrit comme suit :

$$P_m = \omega_m [i_q \phi_d - i_d \phi_q] \tag{3.23}$$

Donc l'expression du couple électromagnétique peut ce déduire à travers l'équation (3.23) et peut s'écrire comme suit :

$$T_e = P \left[(L_d - L_q) i_d i_q + \sqrt{\frac{3}{2}} M_{sf} i_f i_q + \left(\sqrt{\frac{3}{2}} M_{sD} i_D i_q - \sqrt{\frac{3}{2}} M_{sQ} i_Q i_d \right) \right] \tag{3.23}$$

L'expression du couple électromagnétique (3.23) met en évidence :

- Un couple de réductance variable : $P(L_d - L_q)i_d i_q$;
- Un couple principale : $P \left(\sqrt{\frac{3}{2}} M_{sf} i_f i_q \right)$;
- Un couple asynchrone : $P \left(\sqrt{\frac{3}{2}} M_{sD} i_D i_q - \sqrt{\frac{3}{2}} M_{sQ} i_Q i_d \right)$
- **Equation mécanique de la MS**

L'équation mécanique s'écrit sous la forme suivante :

$$T_e - T_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \quad (3.24)$$

Avec :

J : Moment d'inertie de la MS ;

T_r : Couple résistant (ou statique) imposé par la charge mécanique.

T_e : Couple électromagnétique.

Ω : Vitesse mécanique de rotation.

f : Coefficients des frottements visqueux.

3.5. Modèle de la MS dans le repère dq ramenée au stator

Pour supprimer les nombres de spires des enroulements du rotor, on peut ramener toutes les grandeurs du rotor au stator, comme il est souvent fait dans le cas des transformateurs. Il est convenable de définir les variables substituées pour indiquer les grandeurs relatives du rotor par rapport au stator :

La simulation du modèle de la machine dans le repère dq nécessite la détermination des différentes paramètres ($M_{sD}, M_{sQ}, M_{sf}, \dots$). Cependant, la plupart des essais d'identification des paramètres de la machine et la plupart des industriels raisonnent en termes de réactances et constantes de temps dans l'approche dite conventionnelle.

Afin de montrer les relations qui existent entre ces derniers paramètres généralement utilisés dans l'approche conventionnelle par les fabricants de machines et ceux qui nous ont servi

dans la modélisation de la machine ($M_{SD}, M_{SQ}, M_{Sf}, \dots$), il est indispensable d'utiliser le circuit électrique équivalent de la machine.

A cet effet, nous allons ramener tous les paramètres et les grandeurs rotoriques au circuit statoriques.

Les grandeurs ramenées au circuit statoriques sont [20]:

$$\begin{cases} \tilde{i}_f = \frac{i_f}{k_f} \\ \tilde{i}_D = \frac{i_D}{k_D} \\ \tilde{i}_Q = \frac{i_Q}{k_Q} \end{cases} \quad (3.25)$$

$$\begin{cases} \tilde{\phi}_f = k_f \phi_f \\ \tilde{\phi}_D = k_D \phi_D \\ \tilde{\phi}_Q = k_Q \phi_Q \\ \tilde{v}_f = k_f v_f \end{cases} \quad (3.26)$$

Avec :

k_f, k_D et k_Q sont respectivement les coefficients de réduction de l'inducteur et des enroulements d'amortisseur de l'axe d et de l'axe q.

$\tilde{i}_f, \tilde{i}_D, \tilde{i}_Q, \tilde{\phi}_f, \tilde{\phi}_D, \tilde{\phi}_Q$ sont les courant et les flux rotoriques ramenés au stator, \tilde{v}_f est la tension de l'inducteur ramenée au stator.

En utilisant les grandeurs statoriques présentés dans (3.25) et (3.26), les équations de la machine données dans (3.18) (3.19) seront :

- Equations magnétiques :

$$\begin{cases} \phi_d = -L_d i_d + M_{Sf} k_f \tilde{i}_f + M_{SD} k_D \tilde{i}_D \\ \phi_Q = -L_q i_q + M_{SQ} k_Q \tilde{i}_Q \\ \frac{\tilde{\phi}_f}{k_f} = L_f k_f \tilde{i}_f - M_{Sf} i_d + M_{fD} k_D \tilde{i}_D \\ \frac{\tilde{\phi}_D}{k_D} = L_D k_D \tilde{i}_D + M_{fD} k_f \tilde{i}_f - M_{SD} i_d \\ \frac{\tilde{\phi}_Q}{k_Q} = L_Q k_Q \tilde{i}_Q - M_{SQ} i_q \end{cases} \quad (3.27)$$

- Equations électriques :

$$\begin{cases} v_d = -R_s i_d - \omega \phi_q + \frac{d\phi_d}{dt} \\ v_q = -R_s i_q + \omega \phi_d + \frac{d\phi_q}{dt} \\ \frac{\tilde{v}_f}{k_f} = R_f k_f \tilde{i}_f + \frac{1}{k_f} \frac{d\tilde{\phi}_f}{dt} \\ 0 = R_D K_D \tilde{i}_D + \frac{1}{k_D} \frac{d\tilde{\phi}_D}{dt} \\ 0 = R_Q K_Q \tilde{i}_Q + \frac{1}{k_Q} \frac{d\tilde{\phi}_Q}{dt} \end{cases} \quad (3.28)$$

Avec :

$$R_f = \frac{\tilde{R}_f}{k_f^2}, \quad R_D = \frac{\tilde{R}_D}{k_D^2}, \quad R_Q = \frac{\tilde{R}_Q}{k_Q^2}$$

$$\begin{cases} L_d = L_{ad} + L_{\sigma sd} \quad , \quad L_q = L_{aq} + L_{\sigma sd} \\ M_{sQ} = \frac{L_{aq}}{k_Q} \quad , \quad M_{sD} = \frac{L_{ad}}{k_D} \quad , \quad M_{sf} = \frac{L_{ad}}{k_f} \quad , \quad M_{fD} = \frac{L_{ad}}{k_f k_D} \\ L_f = \frac{L_{ad}}{k_f^2} + \frac{\tilde{L}_{\sigma f}}{k_f^2} \quad , \quad L_D = \frac{L_{ad}}{k_D^2} + \frac{\tilde{L}_{\sigma D}}{k_D^2} \quad , \quad L_Q = \frac{L_{ad}}{k_Q^2} + \frac{\tilde{L}_{\sigma Q}}{k_Q^2} \end{cases}$$

- ω : Pulsation électrique.
- $\frac{d\phi_d}{dt}, \frac{d\phi_q}{dt}$: f.e.m statique dues aux variations de flux.
- $-\omega\phi_q, \omega\phi_d$: f.e.m dynamique dues à la rotation de la machine.

Tableau 3.1: Paramètres de la machine Brush

Libellé	Valeurs
Puissance nominal S_n	29.11 MVA
Résistance statoriques R_s	0.0145 Ω
Résistance rotoriques R_f	0.101 Ω
Tension entre phase U	11.50 kV
Réactance synchrone direct X_d	279%
Réactance synchrone inverse X_q	255%
constante de temps en circuit ouvert \dot{T}_{do}	7.6 (s)
Réactance synchrone direct transitoire \dot{X}_d	26.9%
Réactance synchrone inverse transitoire \dot{X}_q	3%
Constante de temps direct transitoire \dot{T}_d	0.59 (s)
Réactance synchrone direct sub-transitoire \ddot{X}_d	18.6%
Constante de temps directe sub-transitoire \ddot{T}_d	0.04 (s)
Réactance synchrone inverse sub-transitoire \ddot{X}_q	23%
Réactance de fuite X_0	11.3%

- **Circuit équivalent dans le repère d et q ramené au stator [20]**

La figure (3.3) montre d'un point de vue schématique la répartition des flux dans la machine en supposant que le flux de fuite de chaque enroulement n'est pas commun avec aucun autre.

Dans cette figure, toutes les grandeurs rotoriques sont ramenées au stator.

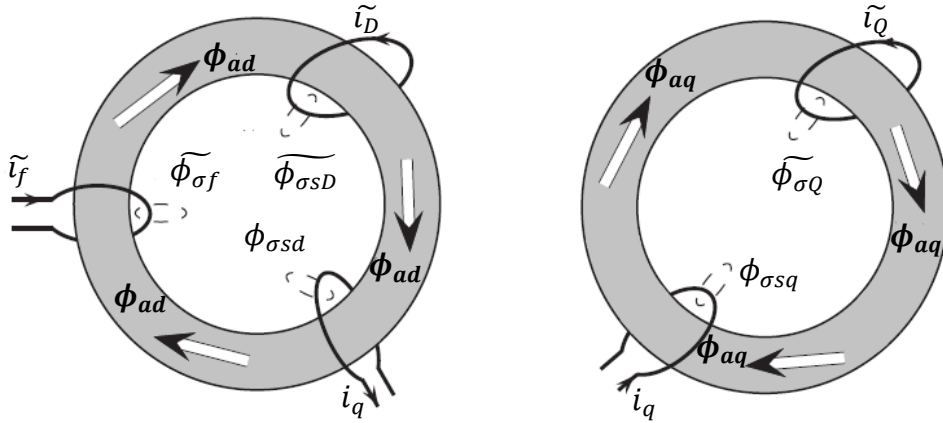


Figure 3.3 : Différents flux représentés dans l'axe dq [20]

✓ Selon l'axe direct :

- $\widetilde{\phi}_{\sigma D}$ Et $\widetilde{\phi}_{\sigma f}$: les flux de fuite des amortisseurs de l'axe d et de la roue polaire, ramenés au stator ;
- $\phi_{\sigma sd}$: le flux de fuite statoriques dans l'axe d ;
- ϕ_{ad} : le flux magnétisant commun dans l'axe d.

✓ Selon l'axe transverse :

- $\widetilde{\phi}_{\sigma Q}$: le flux de fuite des amortisseurs de l'axe q, ramené au stator ;
- $\phi_{\sigma sq}$: le flux de fuite statoriques dans l'axe q ;
- ϕ_{aq} : le flux magnétisant commun dans l'axe q.

D'après la figure (3.3), il est possible de décrire la répartition des flux de la façon suivante :

$$\begin{aligned}
 \phi_d &= \phi_{ad} + \phi_{\sigma sd} = L_{ad}(-i_d + \tilde{i}_D + \tilde{i}_f) - L_{\sigma sd}i_d \\
 \phi_q &= \phi_{aq} + \phi_{\sigma sq} = L_{aq}(-i_q + \tilde{i}_Q) - L_{\sigma sq}i_q \\
 \widetilde{\phi}_f &= \phi_{ad} + \widetilde{\phi}_{\sigma f} = L_{ad}(-i_d + \tilde{i}_D + \tilde{i}_f) - L_{\sigma f}\tilde{i}_f \\
 \widetilde{\phi}_D &= \phi_{ad} + \widetilde{\phi}_{\sigma D} = L_{ad}(-i_d + \tilde{i}_D + \tilde{i}_f) - L_{\sigma D}\tilde{i}_D \\
 \widetilde{\phi}_Q &= \phi_{aq} + \widetilde{\phi}_{\sigma Q} = L_{aq}(-i_q + \tilde{i}_Q) - L_{\sigma Q}\tilde{i}_Q
 \end{aligned} \tag{3.29}$$

Avec :

- $L_{\sigma sd}$ et $L_{\sigma sq}$: les inductances de fuite des enroulements statoriques de l'axe d et de l'axe q.
- $L_{\sigma f}$: l'inductance de fuite de la roue polaire, ramenés au stator.
- L_{ad} et L_{aq} : les inductances magnétisantes de l'axe d et de l'axe q.
- $L_{\sigma D}$ et $L_{\sigma Q}$: les inductances de fuite des amortisseurs de l'axe d et de l'axe q ramenées au stator.

La figure (3.4) montre le schéma électrique équivalent de la machine. Ce circuit est déduit en utilisant les équations de la machine données par (3.27) et (3.28) :

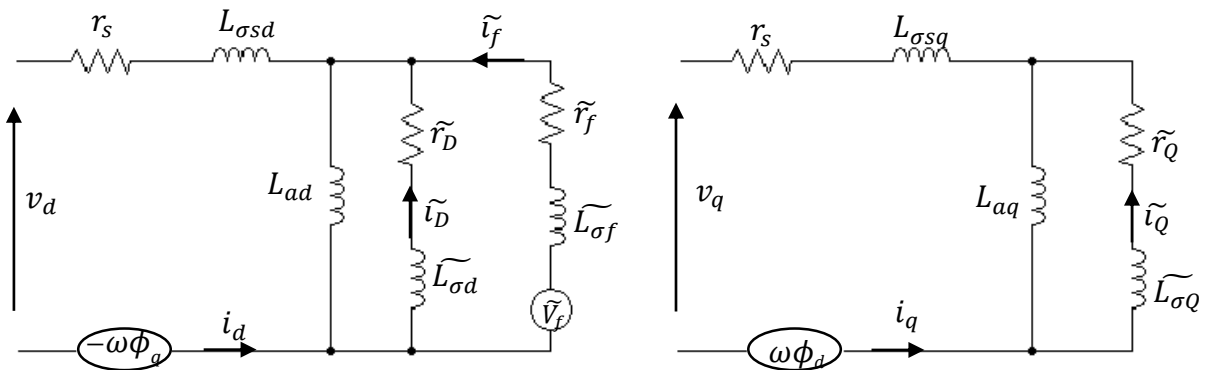


Figure 3.4: Circuit électrique équivalent ramené au stator

La simulation du comportement de la génératrice principale peut se faire en utilisant le circuit électrique équivalent. Le coefficient k_f est utilisé pour le calcul de \tilde{v}_f à partir de v_f , k_D et k_Q sont utilisés pour le calcul de i_D et i_Q à partir de \tilde{i}_D et \tilde{i}_Q .

3.6. Identification des paramètres de la MS

Les paramètres de la machine synchrone du modèle de Park peuvent être identifiés par les méthodes expérimentales, dont l'essai en court-circuit triphasé ou les essais de réponse en fréquence à l'arrêt.

Dans notre cas, nous allons utiliser la méthode de court-circuit, qui consiste à entrainer la machine à sa vitesse nominale avec une tension d'excitation non nulle, ensuite appliquer un court-circuit sur les bornes des phases statoriques de la machine, et relever l'évolution du courant en fonction du temps.

- **Expression du courant d'induit [21]**

Les expressions des courants dans une phase lors d'un court-circuit triphasé brusque sur les phases statoriques d'une machine synchrone munie d'enroulement amortisseur suite à un fonctionnement à vide sont données par :

$$i_a(t) = V_m \cdot \left[\frac{1}{X_d} + \left(\frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_d}} + \left(\frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_d}} \right] \cdot \cos(\omega t + \theta_0) + v_m \cdot \left[\left(\frac{1}{X_d} + \frac{1}{X_q} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_d}} \cdot \cos(\theta_0) + \left(\frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_q} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_d}} \cdot \cos(2\omega \cdot t + \theta_0) \right] \quad (3.30)$$

L'expression (3.30) peut être simplifiée en considérant que la composante apériodique du courant $\left(v_m \cdot \left(\frac{1}{X_d} + \frac{1}{X_q} \right) e^{-\frac{t}{T_d}} \cdot \cos(\theta_0) \right)$ est nulle. En outre, les réactances sub-transitoires directes \ddot{X}_d et inverse \ddot{X}_q sont presque les mêmes.

Finalement l'équation (3.30) devient :

$$i_a(t) = v_m \cdot \left[\frac{1}{X_d} + \left(\frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_d}} + \left(\frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_d}} \right] \cdot \cos(\omega \cdot t + \theta_0) \quad (3.31)$$

Avec :

X_d, \dot{X}_d , et \ddot{X}_d : Les réactances synchrone, transitoire et sub-transitoire de l'axe direct en Ω .

\ddot{X}_q : est la réactance sub-transitoire de l'axe transversal en Ω .

T_d, \ddot{T}_d : Les constantes de temps transitoire et sub-transitoire correspondant à l'axe direct en (s).

T_d : Constante de temps de l'induit en (s).

v_m : Valeur maximale de la tension d'induit avant le court-circuit.

Le courant dans les phases b et c s'obtient en remplaçant respectivement θ_0 par $\left(\theta_0 - \frac{2\pi}{3} \right)$ et

$\left(\theta_0 - \frac{4\pi}{3} \right)$ respectivement.

L'examen de l'expression du courant montre qu'il est la somme de trois termes qui sont :

- Un terme sinusoïdal amorti (sub-transitoire), de pulsation ω dont le coefficient d'amortissement est $\frac{1}{T_d}$; ce terme diminue relativement vite ;

- Un terme sinusoïdal amorti (transitoire), de pulsation ω dont le coefficient d'amortissement est $\frac{1}{T_d}$; c'est la composante transitoire du courant. $\dot{T}_d < \dot{T}_d$;
- Un terme sinusoïdal permanent : de pulsation ω_0 dont l'amplitude le plus faible que celui du transitoire et sub-transitoire. $\ddot{X}_d < \dot{X}_d < X_d$.

L'évolution du courant en fonction du temps est représentée dans la figure (3.5)

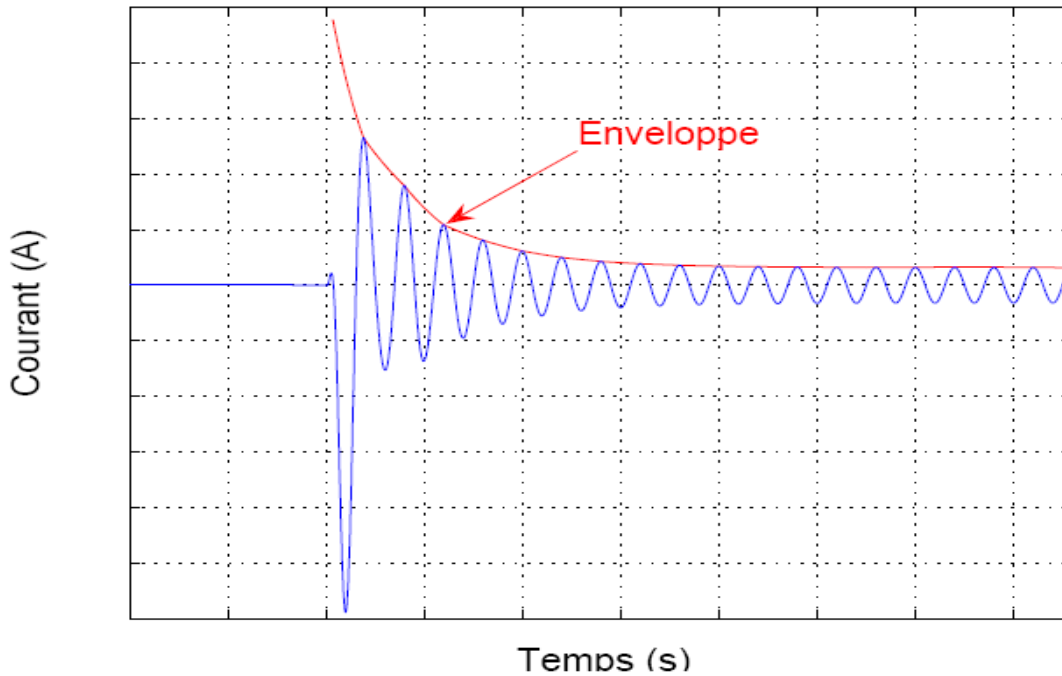


Figure 3.5 : Evolution du courant de court-circuit en fonction du temps [21]

3.7. Calcul des paramètres fondamentaux à partir des paramètres standards [23]

Les paramètres électriques de la machine fournis par le fabricant peuvent être exprimés sous forme de paramètres standards qui définissent des réactances et des constantes de temps de la machine. Les paramètres standards peuvent être traduits en résistances et inductances du modèle $dq0$.

Les inductances des enroulements peuvent être calculées à partir des réactances mesurées de la machine :

Tableau 3.2: Equations des inductances des enroulements

$L_{\sigma s} = \frac{X_0}{\omega}$	$\widetilde{L}_{\sigma f} = \frac{\widetilde{X}_{\sigma f}}{\omega} = \frac{1}{\omega} \frac{X_{ad}(\dot{X}_d - X_0)}{X_{ad} - (\dot{X}_d - X_0)}$
$L_{ad} = \frac{X_{ad}}{\omega} = \frac{X_d - X_0}{\omega}$	$\widetilde{L}_{\sigma D} = \frac{\widetilde{X}_{\sigma D}}{\omega} = \frac{1}{\omega} \frac{X_{ad}\widetilde{X}_{\sigma f}(\ddot{X}_d - X_0)}{X_{ad}\widetilde{X}_{\sigma f} - (\dot{X}_d - X_{ls})(X_{ad} + \widetilde{X}_{lf})}$
$L_{aq} = \frac{X_{aq}}{\omega} = \frac{X_q - X_0}{\omega}$	$\widetilde{L}_{\sigma Q} = \frac{\widetilde{X}_{\sigma Q}}{\omega} = \frac{1}{\omega} \frac{X_{ad}(\ddot{X}_d - X_{ls})}{X_{aq} - (\dot{X}_d - X_0)}$

Les valeurs numériques des résultats obtenus sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 3.3 : Valeurs des inductances des enroulements

$L_{\sigma s}$ (H)	L_{ad} (H)	L_{aq} (H)	$\widetilde{L}_{\sigma f}$ (H)	$\widetilde{L}_{\sigma D}$ (H)	$\widetilde{L}_{\sigma Q}$ (H)
0.0016	0.0387	0.0352	0.0024	0.0020	0.0018

La résistance de la phase statorique est normalement fournie par le fabricant. Les résistances des enroulements rotoriques sont déterminées par les constants de temps de la machine.

Si les constantes de temps en circuit ouvert sont fournies, les résistances rotoriques sont calculées par les formules suivantes :

Tableau 3.4 : Equations des résistances rotoriques ramenées

$\widetilde{R}_f = \frac{1}{\omega \tau_{do}} (\widetilde{X}_{\sigma f} + X_{ad})$
$\widetilde{R}_D = \frac{1}{\omega \tau_{do}} (\widetilde{X}_{\sigma D} + \dot{X}_d - X_{\sigma s})$
$\widetilde{R}_Q = \frac{1}{\omega \tau_{do}} (\widetilde{X}_{\sigma Q} + X_{aq})$

Les valeurs numériques des résultats obtenus sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 3.5 : Valeurs des résistances rotoriques ramenées

\widetilde{R}_f (Ω)	\widetilde{R}_D (Ω)	\widetilde{R}_Q (Ω)
0.0054	0.0848	0.3897

3.8. Simulation sous MATLAB/Simulink

Pour étudier le comportement dynamique de la machine synchrone à rotor bobiné connecté au réseau nous avons simulé son modèle mathématique sous Matlab/Simulink.

- Schéma synoptique réalisé sur Matlab/Simulink

Le schéma synoptique de la MS connectée au réseau est donné par la figure (3.6) :

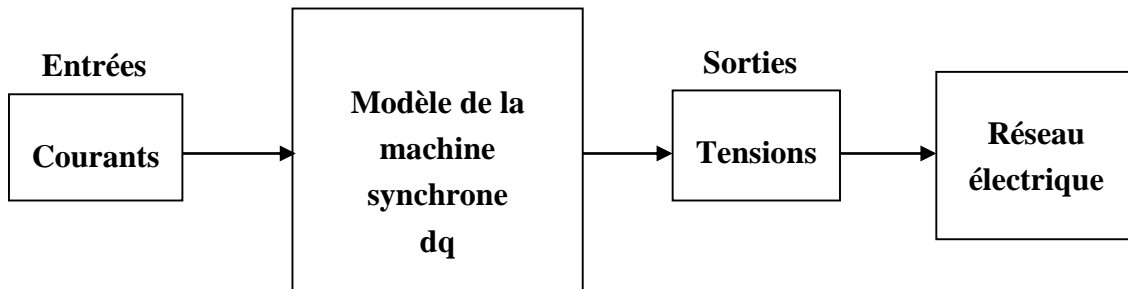


Figure 3.6: schéma synoptique en mode réseau

- Conditions de simulation

Afin d'analyser et étudier le comportement dynamique d'une machine synchrone connecté au réseau 11.5 KV de fréquence 50 Hz, un essai d'impact de charge a été réalisé dans un premier temps, puis un essai avec variation de tension d'excitation dans un deuxième temps.

Pour se faire, la génératrice synchrone est entraînée à la vitesse nominale jusqu'à son régime permanent. C'est alors qu'une variation brusque de charge (injection de puissance active au réseau) est pratiquée afin d'augmenter le courant de charge. Puis une fois que le système fonctionne de nouveau en régime permanent, la charge est subitement retirée.

En deuxième temps, la génératrice est entraînée à la vitesse nominale, on fixe la puissance mécanique à une valeur constante. C'est alors qu'une variation brusque de la tension d'excitation est appliquée.

3.8.1. Résultats de simulation

3.8.1.1. Variation brusque de la puissance active injectée

Dans cette essai la tension d'excitation reste constante à $V_f = 29V$ au démarrage (correspond au fonctionnement normal à vide de la machine).

Les valeurs de la puissance active injectée en fonction du temps sont présentées dans le tableau (3.6) suivant :

Tableau 3.6 : Valeurs de la puissance active lors de l'essai

Temps (s)	0	20	20	50	50	70
P (MW)	0	0	20	20	0	0

Le comportement dynamique de la machine synchrone face à ces variations est représenté dans les figures (3.7) (3.8) (3.9) (3.10) (3.11) (3.12) :

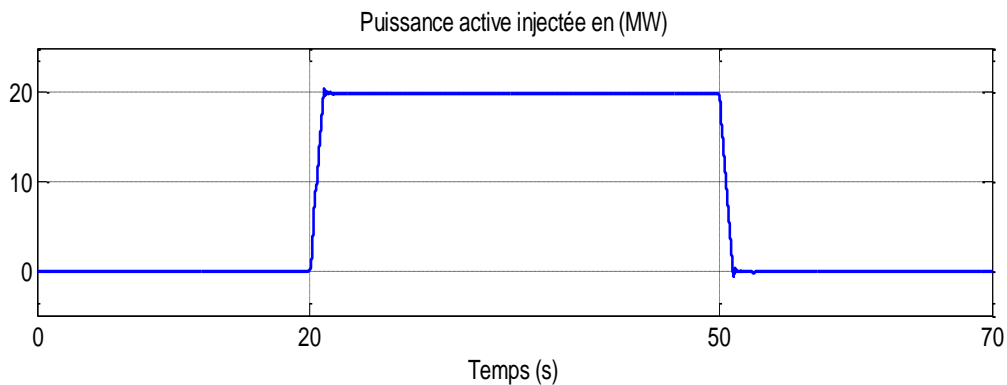


Figure 3.7 : Puissance active injecté

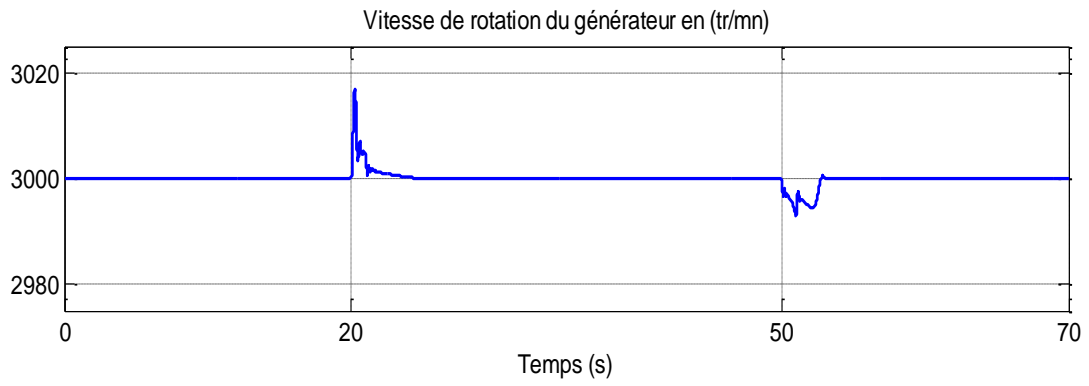


Figure 3.8 : Vitesse de rotation du générateur

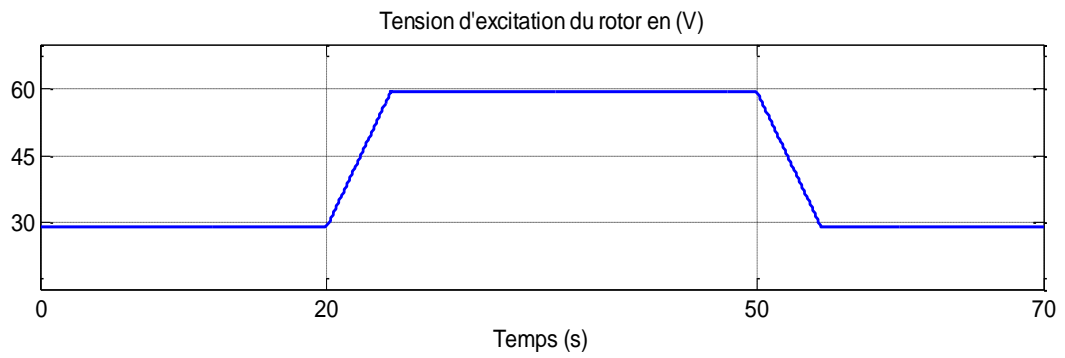


Figure 3.9 : Tension d'excitation du rotor

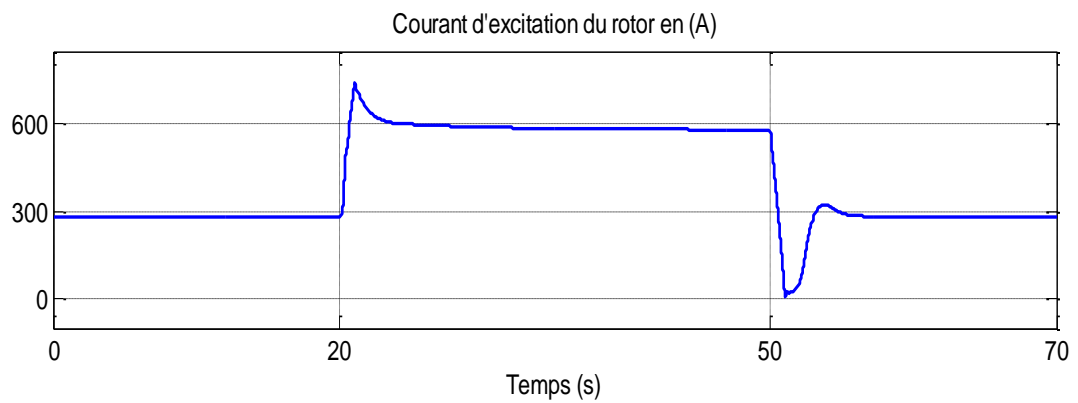


Figure 3.10 : Courant d'excitation du rotor

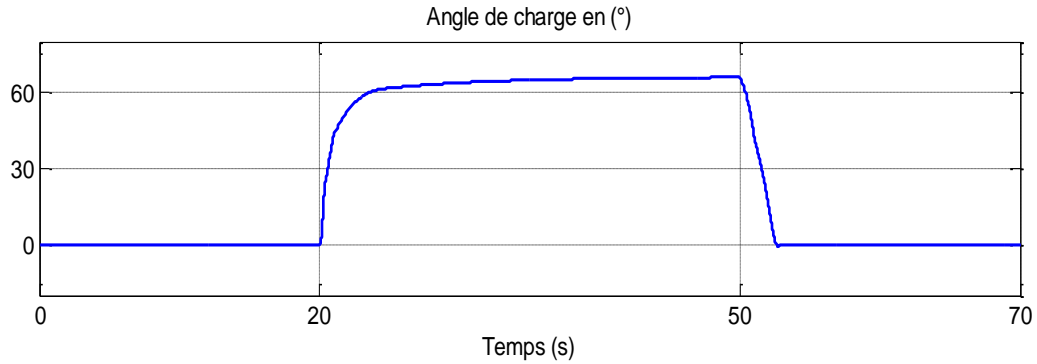


Figure 3.11 : Angle de charge

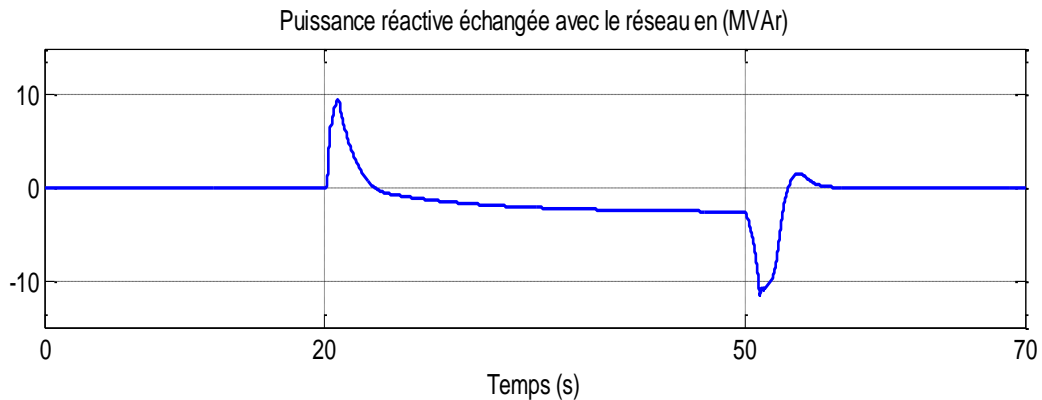


Figure 3.12 : Puissance réactive échangée avec le réseau

- Interprétation des résultats obtenus

D'après les résultats obtenus dans les figures précédentes :

- on remarque des oscillations qui sont dues aux variations brusques de la puissance mécanique (liée à l'inertie de la machine), au moment de la charge, la machine s'accélère et le réseau tend à la freiner (figure (3.8)).
- La machine répond parfaitement à l'appel de puissance active (figure (3.7)) et la puissance réactive (figure (3.12)) varie en conséquence puisque la tension d'excitation est maintenue constante.
- L'angle de charge varie en fonction de la charge appliquée (figure (3.11)).
- La vitesse du rotor est constante en régime établi, mais lors de l'application d'un couple C_m , comme le rotor se décale d'un angle θ , sa vitesse instantanée doit fluctuer avant de

reprendre sa vitesse de synchronisme, c'est pour cela qu'on obtient une oscillation amortie de la vitesse.

Lors de l'impact de charge, on assiste à une augmentation du courant d'excitation (figure (3.10)) de l'excitatrice, ce qui induit une augmentation de la tension aux bornes de cette dernière (figure (3.9)). Ainsi grâce au pont à diodes de l'inducteur, une tension d'excitation plus importante, alimente alors l'inducteur de la machine principale et permet de remédier à la chute de tension engendrée par cet impact de charge.

3.8.1.2. Variation de la tension d'excitation V_f

Dans cet essai on garde la puissance active constante $P = 15MW$.

Les valeurs de la tension d'excitation prises lors de l'essai sont représentées dans le tableau (3.7) suivant :

Tableau 3.7 : Valeurs de tension d'excitation lors de l'essai

Temps (s)	0	50	50	100	100	150
V_f (V)	30	30	25	25	35	35

Le comportement dynamique de la machine synchrone face à ces variations est représenté dans les figures (3.13) (3.14) (3.15) (3.16) (3.17) (3.18)

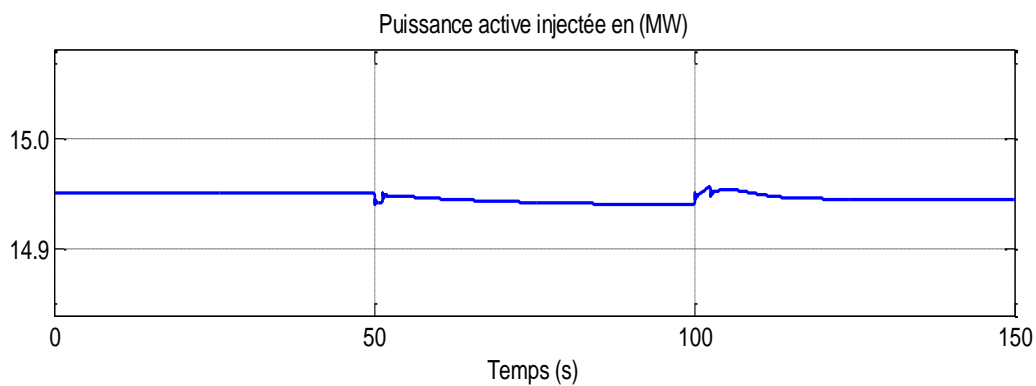


Figure 3.13: Puissance active injectée

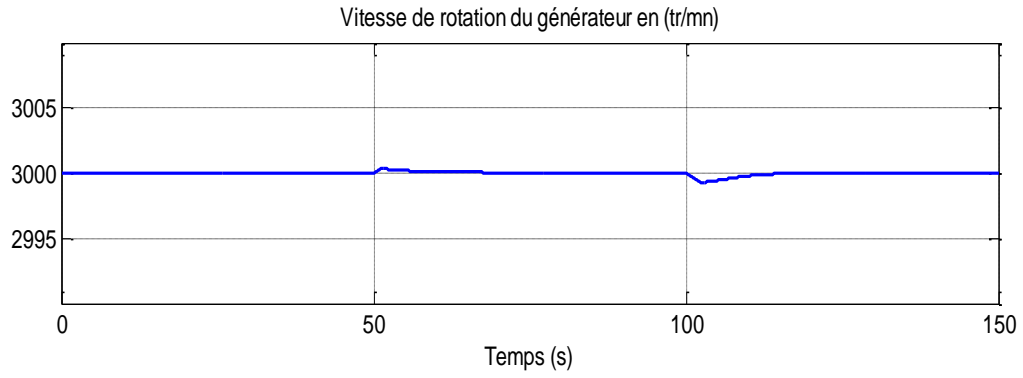


Figure 3.14: Vitesse de rotation du générateur

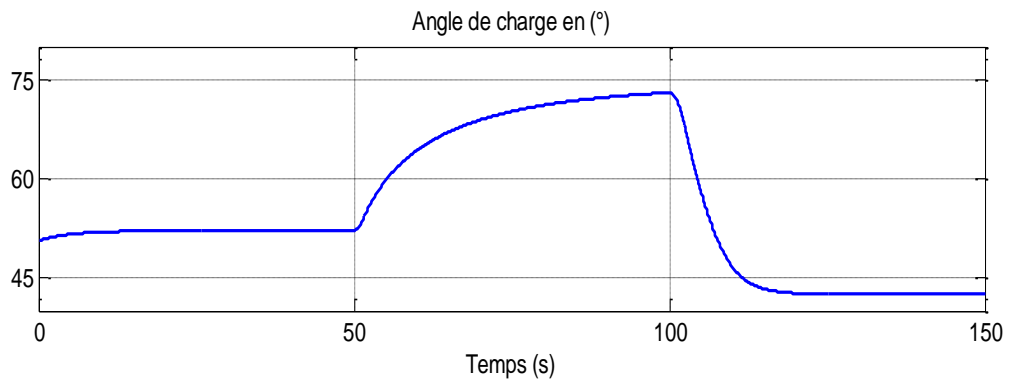


Figure 3.15: Angle de charge

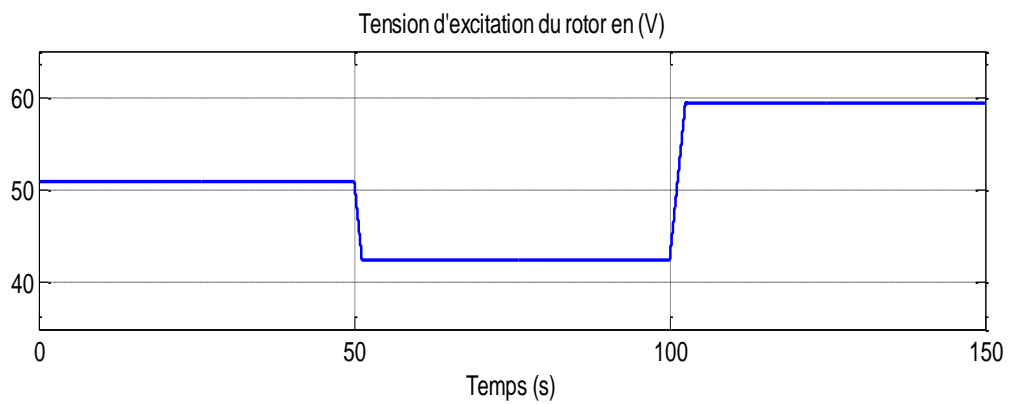


Figure 3.16: Tension d'excitation du rotor

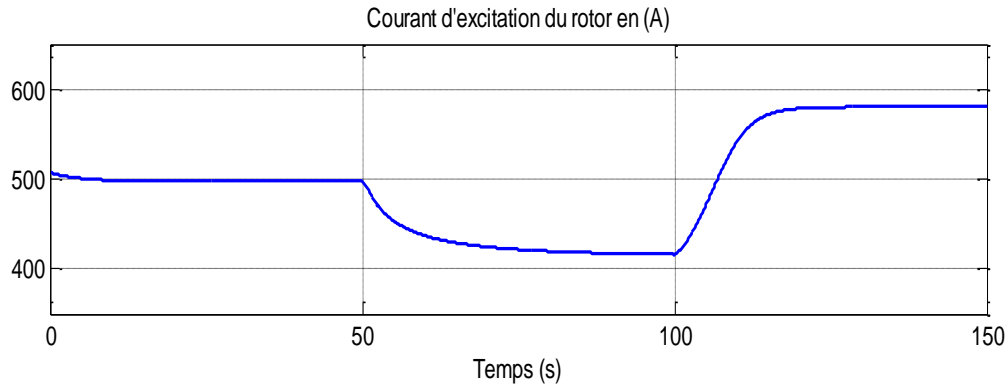


Figure 3.17: Courant d'excitation du rotor

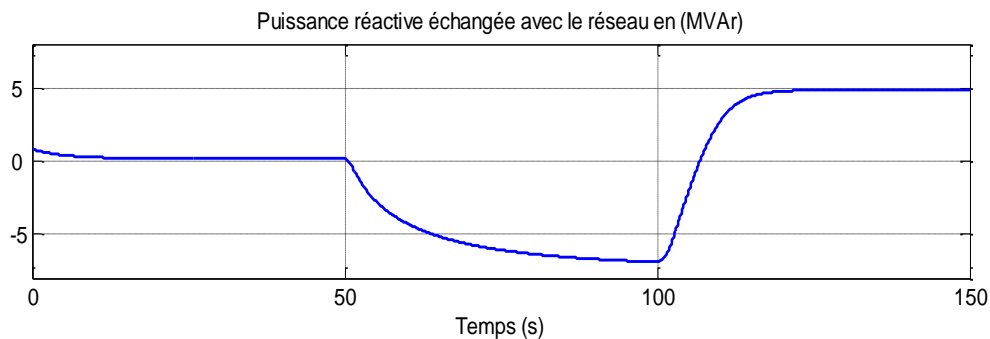


Figure 3.18: Puissance réactive échangée avec le réseau

- **Interprétation des résultats obtenus**

D'après les résultats obtenus, on peut arriver à dire que :

- la tension d'excitation n'a pas d'influence sur la puissance active (figure (3.13)) ainsi que la vitesse de rotation du générateur, d'où on remarque que ces derniers restent constants pendant l'essai.
- La machine absorbe de la puissance réactive (figure (3.18)) pour une tension d'excitation faible ($V_f < 37.5$ V) et cela afin de renforcer l'excitation insuffisante, mais dans le cas des fortes excitations ($V_f > 37.5$), la machine fournit de la puissance réactive. Cela nous permet de dire que le réglage de la puissance réactive se fait par le réglage de l'excitation.
- L'angle de charge varie en fonction de la puissance mécanique appliquée (figure (3.15)).

3.9. Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présenté toute la partie modélisation mathématique et mise en équation de chaque élément constitutif de la machine synchrone. Ensuite, on a pu concevoir un modèle mathématique qui nous a permis de décrire le fonctionnement dynamique de la machine synchrone, puis on a utilisé les réactances synchrones et les constantes de temps fournies par le constructeur (Brush) afin de déterminer les paramètres standards de notre machine.

Dans la deuxième partie, on a fait une étude en régime permanent de la machine connectée au réseau. On a présenté le diagramme de Blondel pour le réglage de puissance.

Enfin, nous avons effectué une simulation sous Matlab/Simulink afin de visualiser le comportement dynamique de notre machine face à des variations de la puissance mécanique et face aux variations de la tension d'excitation.

Chapitre 4

Etude du système d'excitation de l'alternateur Brush

4.1. Introduction

Ce chapitre traite l'équipement principal qui intervient au niveau du système d'excitation d'un groupe turbine alternateur. Cet élément dit régulateur automatique de tension ou en anglais Automatic Voltage Regulator est utilisé pour le réglage de la tension aux bornes de l'alternateur afin d'assurer le bon fonctionnement de ce dernier. Les groupes de production de la centrale d'Amizour sont équipés de régulateurs de type Prismic A32 de fabrication Brush. Celui-ci fait principalement l'objet de l'étude développée dans ce chapitre.

Une première partie est consacrée à la présentation du principe de fonctionnement de la régulation de tension en utilisant le régulateur de type Prismic A32. Celui-ci possède plusieurs fonctionnalités de réglage et de protection que nous allons décrire.

Ensuite, la modélisation des principaux éléments constituant le système d'excitation Brushless (sans contact) sera présenté, et les différentes boucles de régulation seront conçues. A la fin du chapitre, un essai de simulation sous Matlab d'une machine synchrone munie de son régulateur de tension sera effectué pour montrer les performances du système face à une connexion et une déconnexion soudaine de la charge.

4.2. Présentation de l'AVR Prismic A32

Le régulateur automatique de tension PRISMIC A32 est conçu pour contrôler l'excitation d'un générateur brushless. En incorporant une large gamme de fonctionnalités, l'AVR Prismic 32 nécessite seulement des instruments externes et des commutateurs de commande pour fournir le système d'excitation complet.

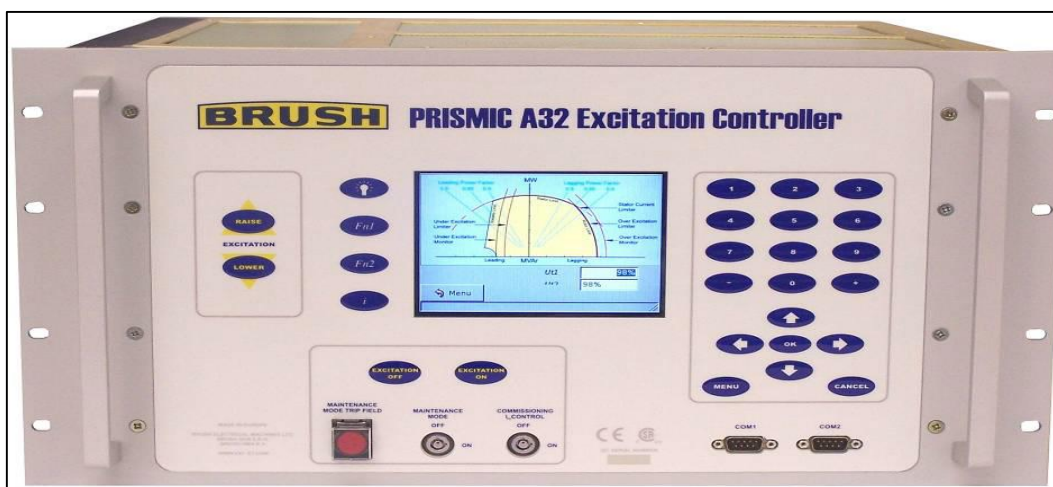


Figure 4.1: Contrôleur d'excitation Prismic A32 [24]

Pour la configuration et la mise en service de l'AVR Prismic 32, un PC est requis, un logiciel installé sur PC et deux câbles de communication série sont fournis [24].

4.2.1. Schéma global du contrôleur d'excitation

La figure (4.2) représente le schéma du contrôleur d'excitation, et ses paramètres sont reportés sur le tableau (4.1) :

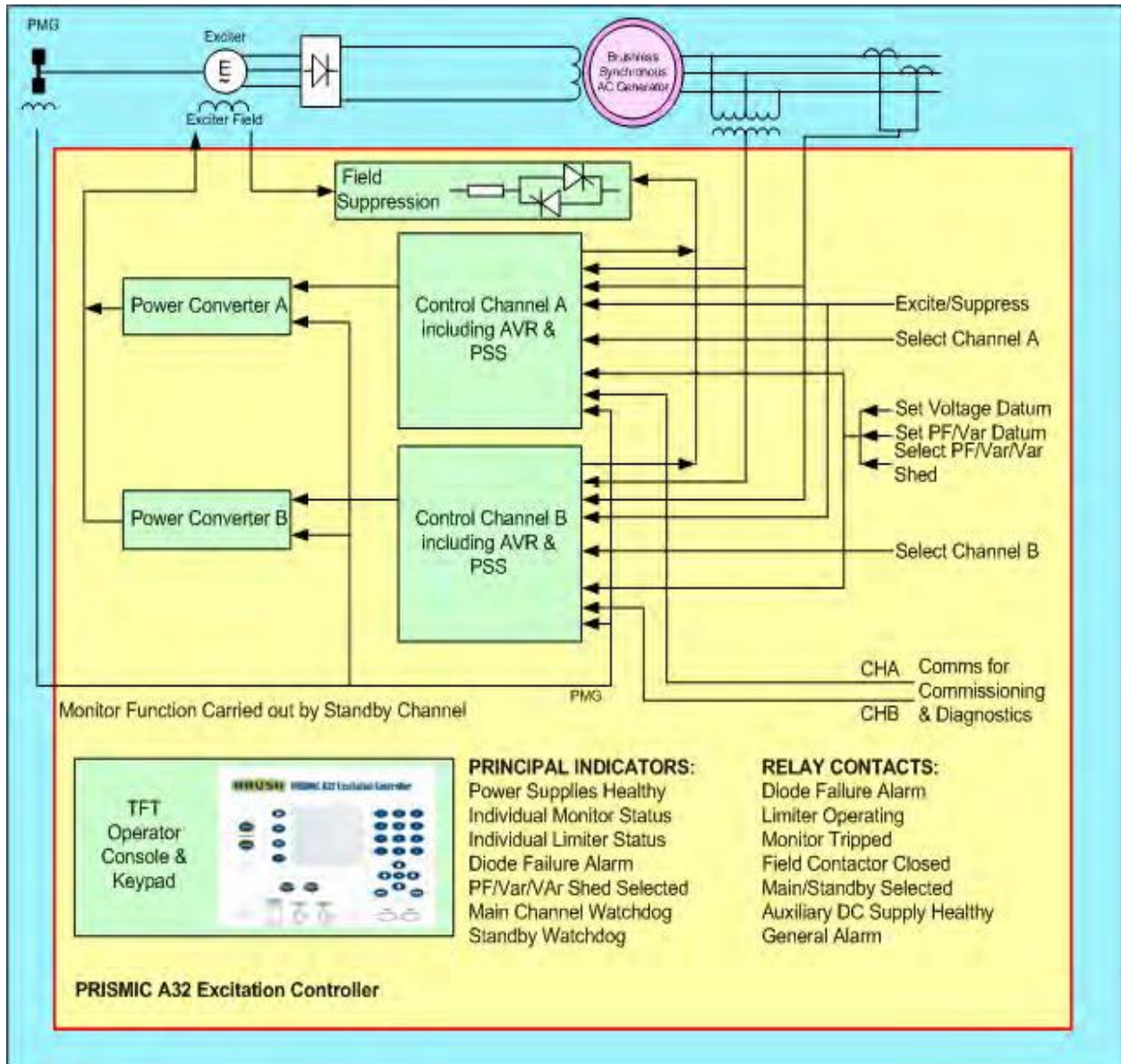


Figure 4.2 : Schéma du contrôleur d'excitation [24]

- Paramètres de l'AVR Prismic A32

Tableau 4.1: Paramètres de l'AVR Prismic 32 [24]

courant continue max de sortie	25A
Tension d'alimentation d'excitation	AC 110V A 330V monophasé
Tension d'alimentation des circuits de contrôle	AC 115V A 270V monophasé
Fréquence d'alimentation d'excitation	50 Hz A 480 Hz
Alimentation auxiliaire en courant continu	24V DC +15%, -20% ou 110/125V DC +15%
Tension nominale de détection	100V à 120V sélectionnable par pas de 0,1V
Phases de détection de tension	Triphasé avec option monophasé
Charge d'entrée de détection de tension	Moins de 0.5 VA par phase
Fréquence nominal du générateur	50 Hz ou 60 Hz
Courant nominal à l'entrée du transformateur	5A ou 1A
Charge d'entrée du transformateur de courant	Moins de 0.5VA
TENSION MAX DE CHAMP POUR FORCER	75% De la tension RMS d'alimentation monophasée
tension MIN de champ pour forçage négatif	-75% De la tension RMS d'alimentation monophasé
Précision de contrôle	±0.25%
Plage de température de fonctionnement	-20°C a +55°C
Plage de température de stockage	-20°C to +80°C
Dimensions	Largeur 483mm, Hauteur 266mm Profondeur (Sans poignées) 406mm Profondeur (Avec poignées) 446mm
Poids	23kg
Degré de pollution	2

4.2.2. Aperçu de l'enceinte A32 [24]

La figure (4.3) représente le panneau avant de l'AVR



Figure 4.3 : Panneau avant de l'A32 [25]

Le panneau avant comprend les fonctionnalités suivantes:

- **Écran LCD en couleur**

Il est utilisé pour afficher une application basée sur un menu en interface avec l'A32.

- **Boutons de contrôle LCD**

Ces boutons sont utilisés pour implémenter des fonctions spécifiques sur l'écran LCD.

- **Clavier**

Le clavier et les boutons de menu permettent à l'utilisateur de naviguer dans l'application IHM basée sur le menu de l'écran LCD.

- **Ports COMM**

COM1 peut être utilisé pour connecter l'IHM basée sur PC au canal A de l'A32, et COM2 peut être utilisé pour se connecter au canal B.

- **Boutons de contrôle d'excitation et interrupteurs à clé**

Les éléments suivants sont fournis:

a) Interrupteur à clé On / Off du mode maintenance

Lorsque cet interrupteur à clé est en position 'ON', l'excitation de l'AVR peut être contrôlée en utilisant les boutons poussoirs 'Excitation ON', 'Excitation OFF' et 'Field Mode Trip'.

b) Mise en service Ife Commande On / Off Interrupteur à clé

Cet interrupteur à clé peut être utilisé pour placer l'A32 en mode de contrôle de courant de champ d'excitation pendant la phase de mise en service. Cela permet à l'ingénieur de mise en service d'élever et d'abaisser l'excitation dans le contrôle du courant de champ d'excitation de zéro à la valeur maximale de l'A32. Cette fonction est utile pour effectuer des tests de court-circuit du générateur.

c) Bouton poussoir mode de maintenance

Ce bouton-poussoir est câblé à un dispositif à semi-conducteurs qui isole l'AVR du champ de l'excitatrice.

d) Boutons poussoirs <Excitation On> et<Excitation Off>

La fonction de ces boutons poussoirs est explicite. Le fonctionnement de ces boutons poussoirs est acheminé via le PC interne qui commande la console de l'opérateur.

e) Boutons Augmenter / Abaisser l'excitation

Ces boutons poussoirs sont utilisés pour augmenter ou abaisser l'excitation. Cette fonction peut être appliqué que lorsque l'interrupteur à clé 'Mode Maintenance' est en position 'ON'.

4.2.3. Les fonctionnalités de l'AVR Prismic 32 [24]

Les fonctionnalités essentielles de l'AVR sont présentées comme suit :

- **Canaux d'excitation principaux indépendants et canaux d'excitation en attente à chaud**

L'unité contient deux contrôleurs d'excitation numériques, dont l'un sert de veille à chaud à l'alimentation de l'appareil. Chaque contrôleur d'excitation tire sa propre puissance de la tension PMG et/ou de l'alimentation auxiliaire en courant continu. Ceci assure une redondance de l'alimentation électronique multiple et aussi permet de mettre l'électronique sous tension lorsque

la machine est à l'arrêt. Les deux excitations se succèdent automatiquement pour permettre un transfert en douceur de l'un à l'autre.

Le transfert vers le système de secours est déclenché par un module de surveillance (qui fonctionne à partir de l'appareil configuré en tant que veille) dans les circonstances suivantes :

- Surveillance de la tension (sur/sous tension sur les bornes du générateur) ;
- Surveillance de l'excitation (sur/sous excitation avec temporisation) ;
- Surveillance de surcharge de flux ;
- Défaillance du canal principal ;

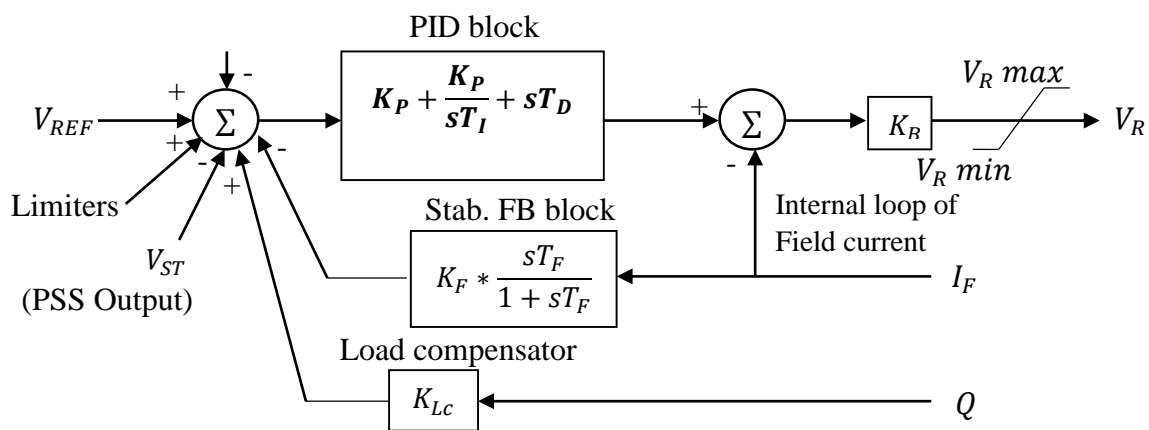


Figure 4.4 : Structure de l'AVR [25]

Les réglages du module moniteur sont sélectionnés pour que les réglages normaux de l'écrêteur permettent d'opérer en premier.

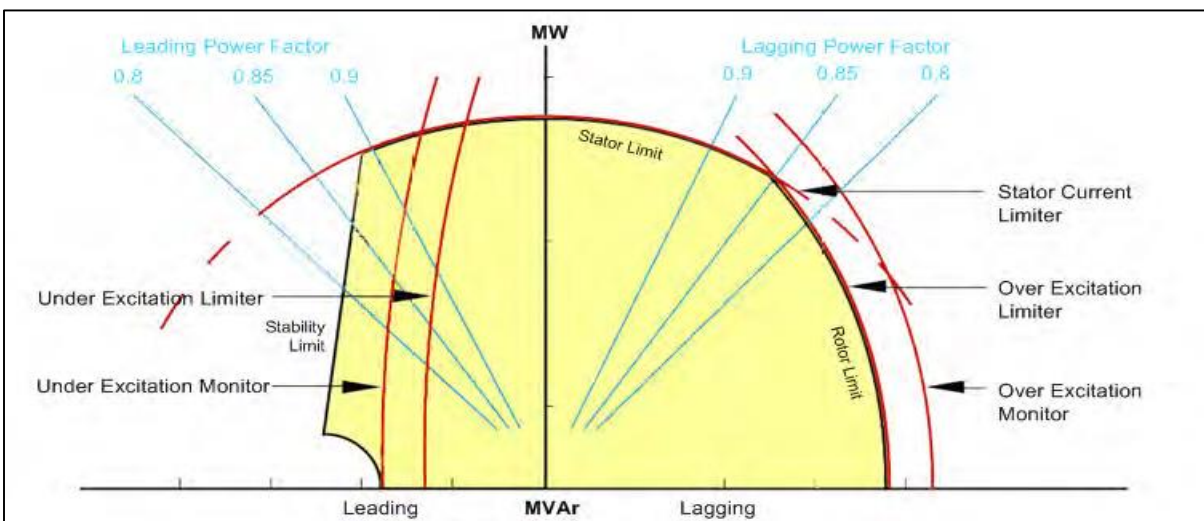


Figure 4.5 : Courbe de capacité du générateur [24]

- **Mode de contrôle de la tension de ligne**

En mode de contrôle de tension de ligne, la tension de ligne est contrôlée jusqu'à un point de consigne constant et réglable.

Dans ce mode, la capacité de fonctionnement en parallèle est assurée par un courant de compensation en quadrature (QCC) avec un réglage de statisme.

- **Mode de contrôle du facteur de puissance**

Disponible en fonctionnement parallèle.

- **Mode de contrôle de la puissance réactive**

Disponible en fonctionnement parallèle.

- **Délestage de la puissance réactive**

Le Var Shedding est disponible en modes de contrôle de tension, facteur de puissance et puissance réactive.

- **Installation de démarrage progressif**

Après la mise en marche de l'excitation, la tension de ligne est augmentée jusqu'au niveau nominal à une valeur ajustable.

- **Limiteur de courant de champ à action rapide**

Limite le courant d'excitation pour éviter un courant de ligne excessif pendant les pannes du système d'alimentation.

- **Limiteur de surexcitation**

En utilisant un délai de temps inverse et une compensation de température si nécessaire, cette installation permet d'éviter la surchauffe du rotor de la génératrice.

- **Limiteur de sous d'excitation**

Cette installation permet de faire fonctionner la génératrice au maximum de sa capacité avec un facteur de puissance principal mais en évitant le risque de glissement du pôle du générateur.

- **Limiteur de flux**

L'excitation est contrôlée pour s'assurer que la tension de ligne du générateur est limitée à une valeur pré-réglée rapport tension/fréquence réglable pour éviter la surchauffe du générateur.

- **Limiteur de tension aux bornes du générateur**

L'excitation est contrôlée pour s'assurer que la tension aux bornes du générateur est limitée à une valeur pré-réglée.

- **Mode de commande du système en veille sélectionnable**

Le système de secours peut être configuré pour fonctionner soit en tension du générateur, soit en mode de commande du courant de champ d'excitation. Si le système est configuré pour fonctionner en mode contrôle de tension, le diagnostic des pannes du VT commutera automatiquement en mode de contrôle du courant de champ en cas de défaillance du VT.

- **Alarme de défaillance de la diode tournante**

La détection d'une diode tournante ou d'un fusible défectueux est obtenue en surveillant le contenu en ondulation de courant de champ de l'excitateur.

- **Réponse par paliers ajustable**

Cette fonction permet d'appliquer une augmentation progressive réglable de la valeur de consigne pour évaluer les paramètres de stabilité du système d'excitation. Les paramètres PID de l'AVR peuvent alors être ajustés en conséquence. La réduction du pas de de consigne peut être utilisée pour évaluer la réponse du limiteur de sous-excitation.

- **Enregistreur d'événements**

Un journal des événements majeurs, tels que les opérations de limitation et de surveillance, ainsi que la suppression des champs est maintenu à l'intérieur de l'unité. Les événements peuvent être affichés à l'aide d'un PC connecté au port de communication de mise en service.

4.3. Description et principe de fonctionnement du système d'excitation sans contact

L'excitatrice sans contact (Brushless) est un alternateur inversé (inducteur au rotor et induit au stator), dont le circuit d'excitation est alimenté par l'alternateur pilote.

L'alternateur pilote est placé à l'extrémité de l'arbre de l'excitatrice, il est constitué d'un inducteur à aimants permanents en rotation et un induit bobiné en triphasé placé au stator.

L'excitatrice pilote génère une tension alternative sinusoïdale qui va être redressée à l'aide d'un pont à thyristor, afin d'obtenir une tension continue qui va alimenter l'enroulement de l'excitatrice principal, cette dernière va exciter à son tour l'induit de l'alternateur principal à l'aide d'un pont de diode inséré sur l'arbre du rotor [25].

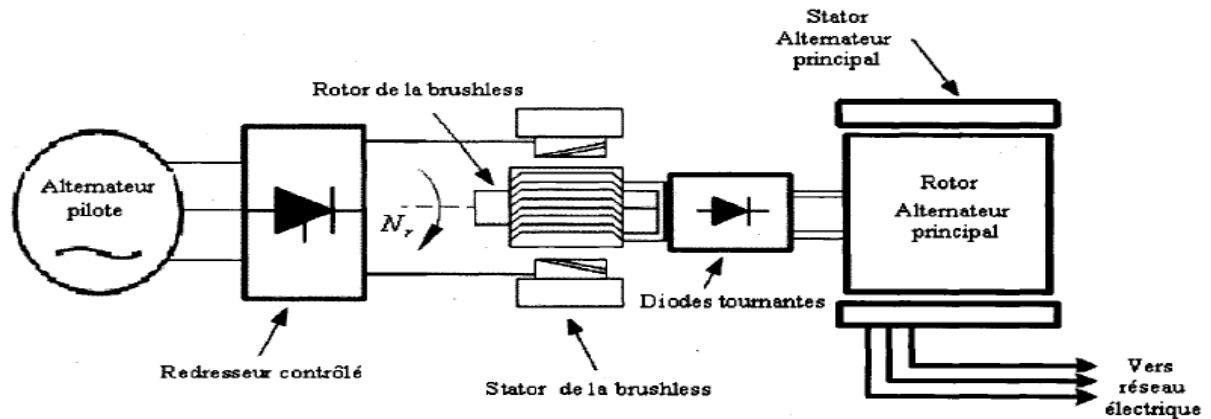


Figure 4.6 : Schéma décrivant la constitution du système d'excitation sans contact [25]

4.3.1. Alternateur pilote

L'alternateur pilote est un alternateur à aimant permanent qui permet un fonctionnement en ilotage sans la présence du réseau, dès la mise en rotation du groupe elle produit la puissance nécessaire à l'alimentation du régulateur de l'alternateur et ceci de façon autonome sans soutirage, elle améliore aussi les caractéristiques en court-circuit de l'alternateur, elle est principalement utilisée sur les groupes de production diesel ou hydraulique et plus généralement partout où le réseau électrique est susceptible d'être absent.



figure (a)

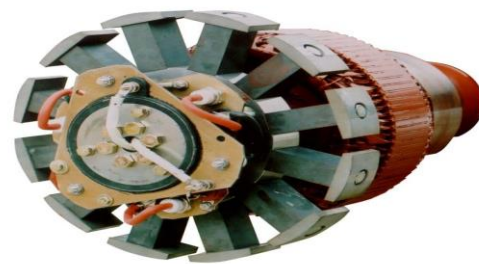


figure (b)

Figure 4.7: (a) Stator de la PMG [26]

(b) Rotor de la PMG [26]

4.3.2. Commande du redresseur PD2

Le redressement commandé est la conversion d'une tension alternative en une tension continue de valeur moyenne réglable. L'utilisation de commutateurs commandables tels que les thyristors permet de réaliser des redresseurs dont la tension moyenne de sortie peut varier en fonction de l'angle d'amorçage des commutateurs.

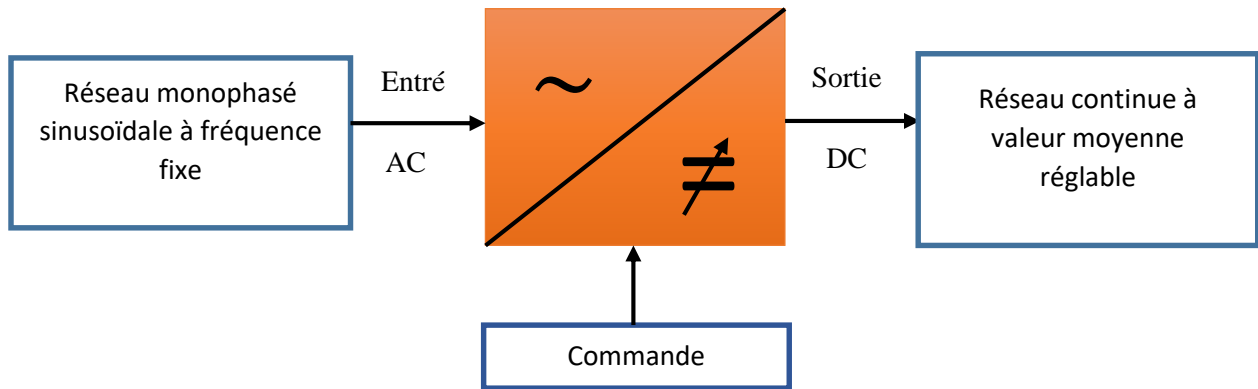


Figure 4.8 : Principe de la conversion AC/DC

4.3.2.1. Montage du redresseur PD2

Le montage de la figure (4.9) comporte deux thyristors à cathodes communes (Th1 et Th2) et deux thyristors à anodes communes (Th3 et Th4), l'amorçage de l'un des thyristors entraîne le blocage de celui qui lui est associé. L'amorçage de Th1 et Th3 n'est théoriquement possible que lorsque $V_s > 0$, celui de Th2 et Th4 lorsque $V_s < 0$.

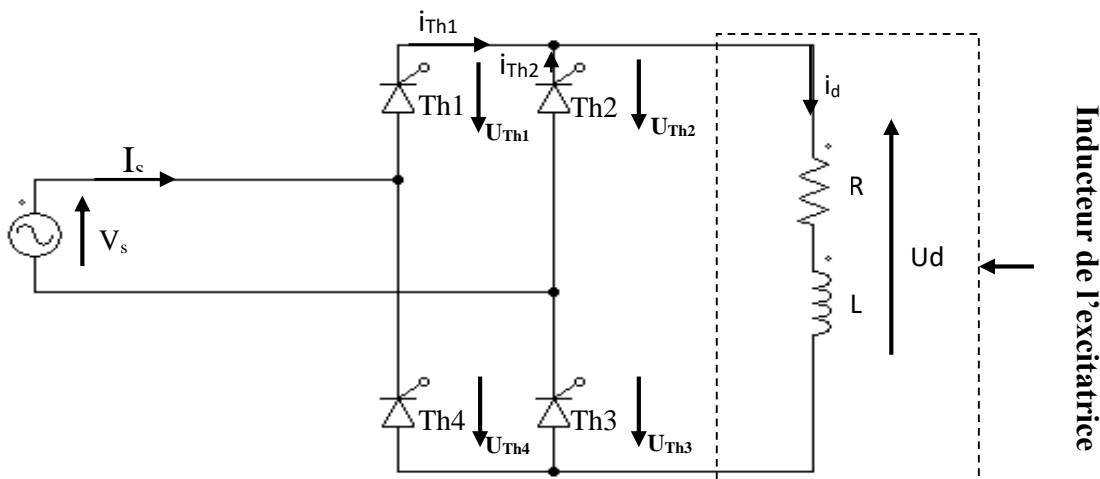


Figure 4.9: Schéma de réalisation d'un redresseur à thyristor PD2

Les allures des tensions et des courants redressés à la sortie du redresseur et aux bornes du thyristor sont représenté dans la figure (4.10) :

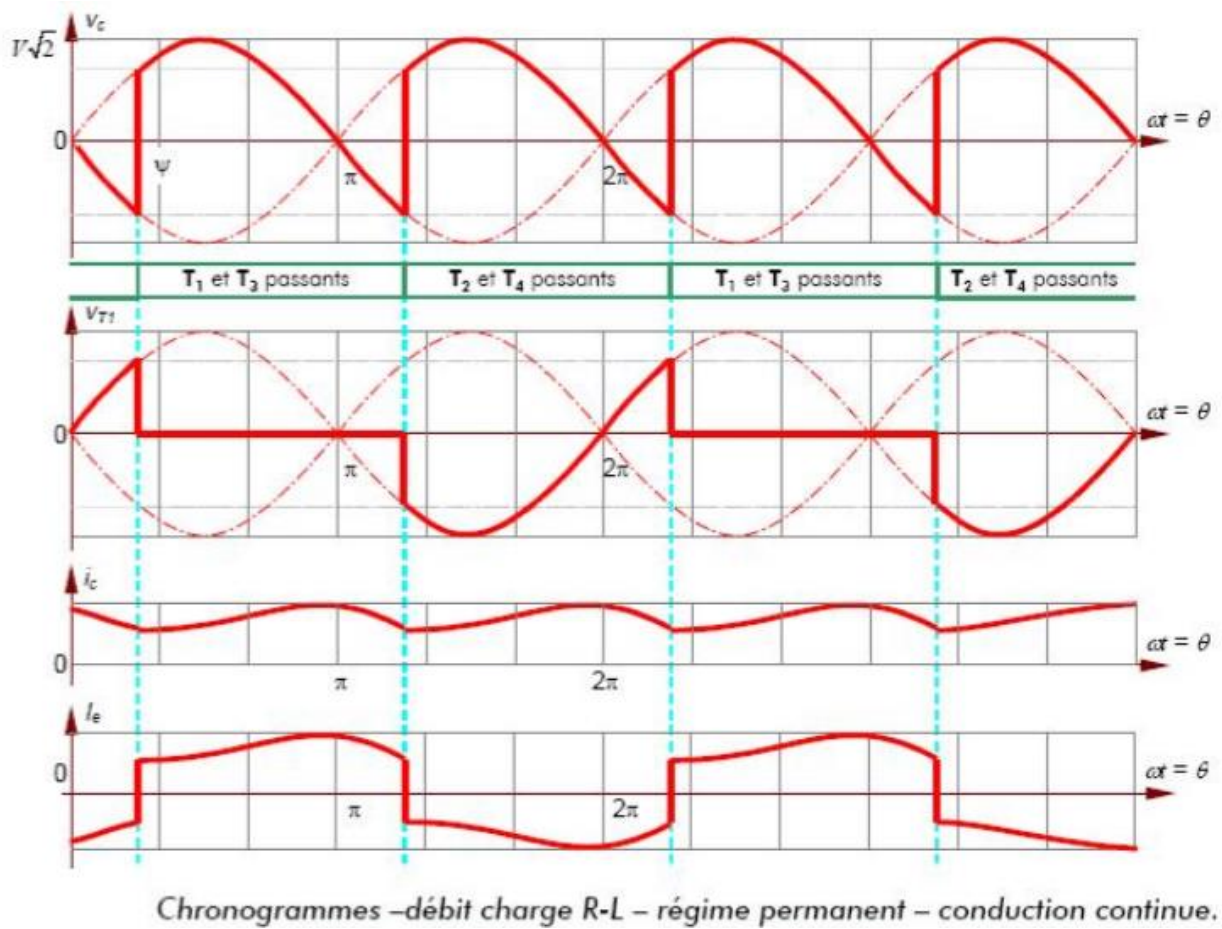


Figure 4.10 : Allures des tensions et courants du redresseur PD2

NB : fréquence sortie PMG 230V ; 400 Hz

4.3.2.2. Valeur moyenne de la tension redressée

La valeur moyenne de la tension redressée à la sortie du redresseur est donnée par :

$$U_{dmoy} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} V_m \sin \omega t \, dt$$

$$U_{dmoy} = \frac{2U_m}{\pi} \cos \alpha$$

4.3.2.3. Boucle de régulation interne du courant

Le système de régulation comporte deux boucles de régulation, on trouve la boucle de régulation interne du courant et externe de la tension. Dans cette partie on se basera sur la boucle de régulation interne du courant.

Cette dernière, permet de réguler le courant à la sortie du redresseur en le comparant a un courant de référence $i_{dref}=10A$, afin de généré les angles d'amorçage des thyristors du redresseur PD2.

La boucle de régulation du courant est représentée dans la figure (4.11) :

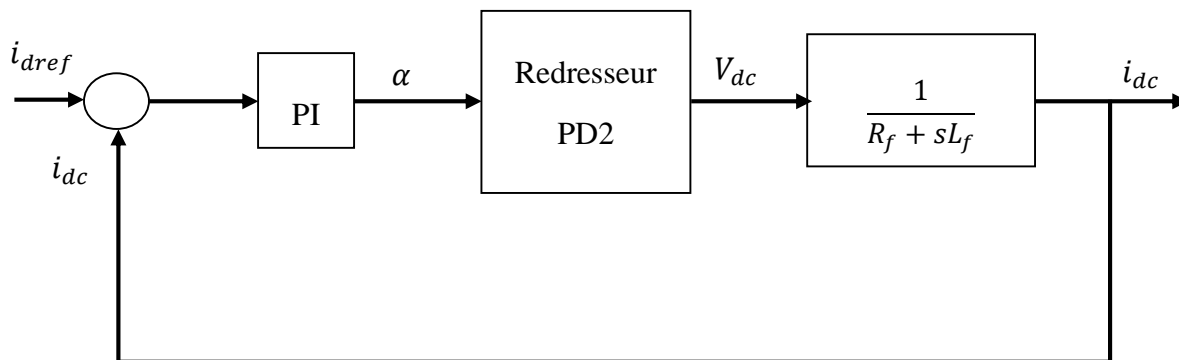


Figure 4.11 : Boucle de régulation de courant du redresseur.

- Résultats de simulation

Les allures du courant et de la tension moyenne régulée sont représentées respectivement dans les figures (4.12) et (4.13) :

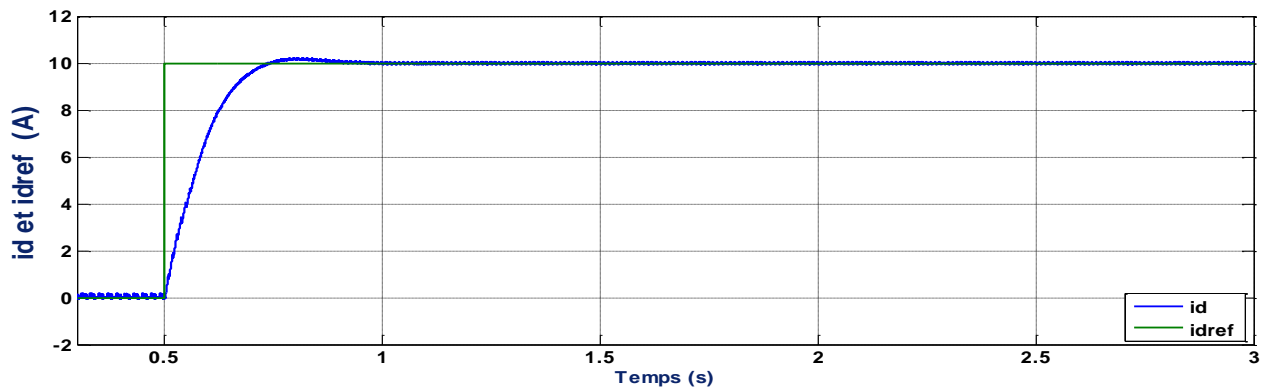


Figure 4.12 : Courbe de régulation de courant id

- On remarque à partir de la figure (4.12) que le courant i_d obtenu à la sortie du redresseur suit bien le courant de référence i_{dref} (consigne $i_{dref} = 10 A$).

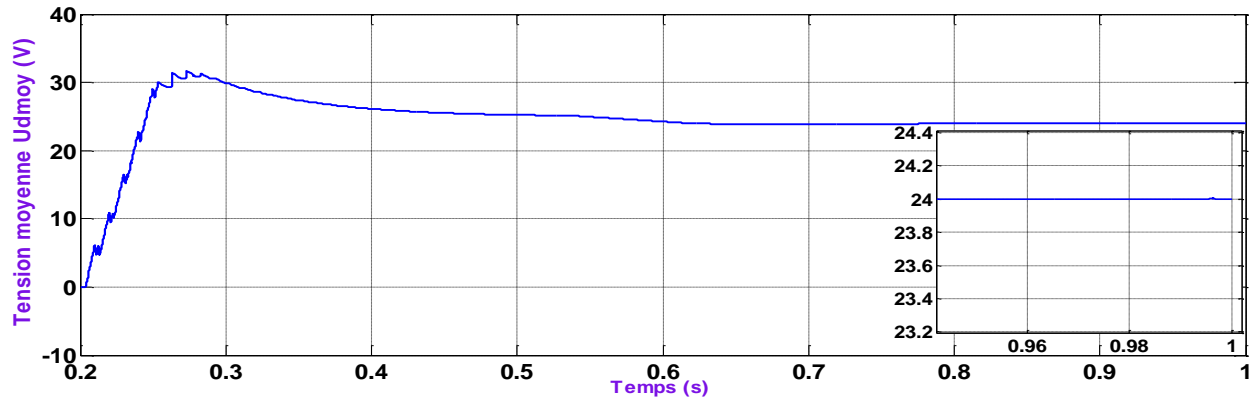


Figure 4.13: Tension moyenne redressée $U_{d moy}$

4.4. Excitatrice associés au pont de diodes tournant

Le courant généré par l'excitatrice doit être redressé pour être injecté dans la roue polaire de l'alternateur principal, c'est le rôle du plateau de diodes ou redresseur tournant.

Le schéma de la figure (4.14) représente le redresseur à diodes :

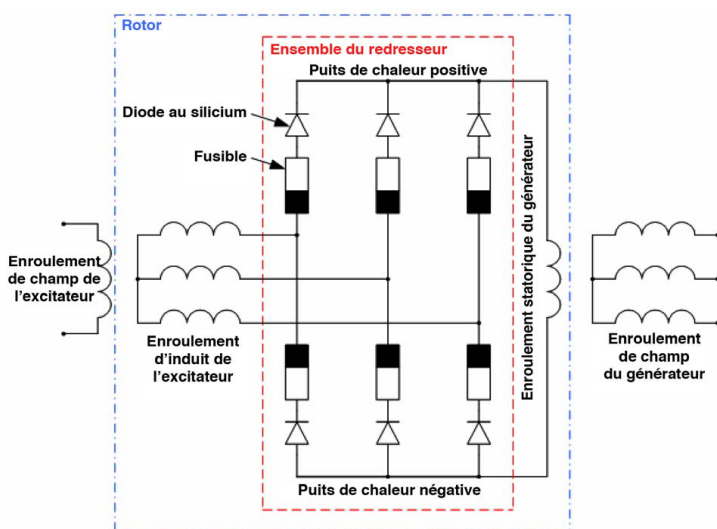


Figure (c)



Figure (d)

Figure 4.14: (c) Pont à diodes [24]

(d) Image réel d'un pont à diodes [24]

Ce dernier est constitué de diodes de puissance spécialement étudiées pour pouvoir résister à la force centrifuge. Il permet de convertir la tension triphasée de l'alternateur exciteur en une tension continue, l'amplitude de cette tension est réglée grâce au courant d'excitation I_{ex} . Afin d'éviter d'utiliser des bagues et balais pour le transfert d'énergie à l'inducteur de la machine principale, l'ensemble rotor d'excitatrice et pont à diodes sont montés sur l'axe de rotation. Cette stratégie permet de réduire les coûts de maintenance [21].

4.5. Développement des systèmes de régulation automatique de tension [27]

Vers les années cinquante, après plusieurs recherches et expérimentations, afin de garantir la stabilité des SEE, des résultats d'études ont permis d'élaborer des régulateurs automatiques d'excitation plus fiables, en introduisant un signal additionnel du stabilisateur PSS avec le régulateur de tension classique AVR. Ce dernier est caractérisé par des grandes valeurs de gains, en introduisant dans la loi de régulation des signaux de stabilisation par première et deuxième dérivée des paramètres du système à contrôler, ce qui permet d'assurer de grandes limites de stabilité statique et dynamique. L'utilisation des systèmes AVR - PSS a permis ainsi de garantir un domaine de stabilité aperiodique plus large des systèmes énergétiques avec des structures très compliquées.

Vu la modernisation des SEE et des conditions de leurs fonctionnements, ainsi que le développement des éléments d'électronique de puissance, l'étape suivante de développement des systèmes AVR, a été liée avec la réalisation des nouvelles structures plus complexes, mais plus fiables, moins coûteuses, de volumes réduits et plus adaptables aux changements des variations (internes et externes) qui peuvent solliciter le système à commander, en garantissant des performances dynamiques meilleures.

4.6. Analyse de régulateur de tension d'un groupe turbine-alternateur

4.6.1. Régulation et stabilisation de la tension d'excitation

Le régulateur de tension automatique AVR et l'excitatrice constituent principalement le système d'excitation du générateur [13] [14]. Comme vu dans le chapitre 2, il existe plusieurs types de systèmes d'excitation. Le régulateur de tension a pour entrée la tension de référence qui constitue la consigne, la tension terminale provenant de la machine synchrone, une tension de stabilisation provenant du stabilisateur de puissance enfin un retour après amortissement

(compensation). La différence entre la tension terminale et la tension de référence passe par un comparateur de phase puis par le régulateur principal. Ci-dessous est représenté le système d'excitation sans contact (Brushless).

Afin de contrôler la tension d'excitation V_f , le système peut être représenté comme suit (figure 4.15) [13] [15] :

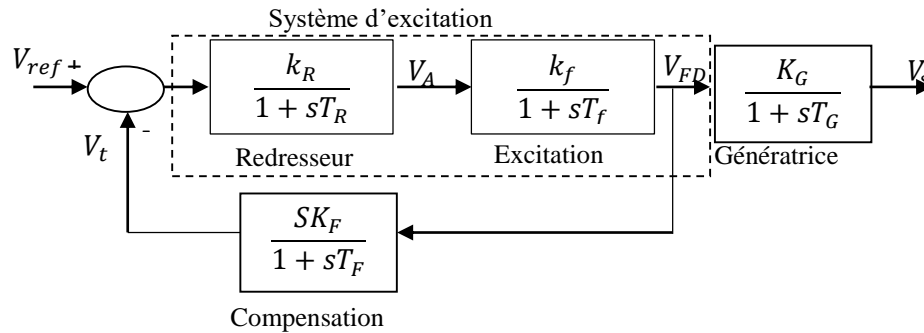


Figure 4.15 : Régulation et stabilisation de la tension [13]

4.6.2. Régulation de la tension de sortie de la génératrice synchrone

Afin de corriger la tension de sortie de la génératrice V_s , un régulateur de type PID classique est le plus souvent intégré au système vu son efficacité de donner des réponses plus performantes parcequ'il associe les trois actions principales (proportionnelle, intégrale et dérivée) [28] [14].

La figure (4.16) représente la boucle de régulation à la sortie de la génératrice :

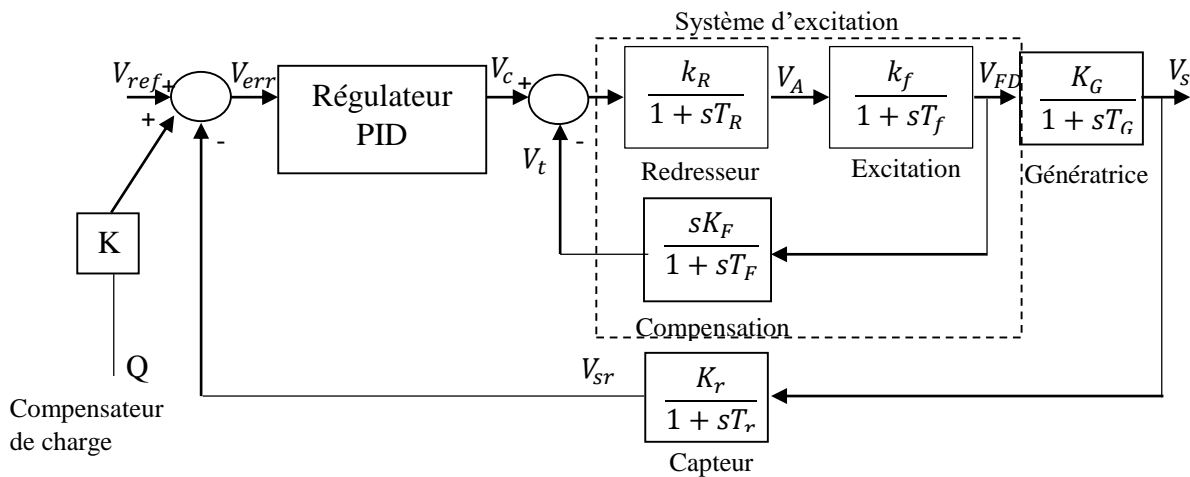


Figure 4.16 : Régulation de la tension de sortie de la génératrice [14]

Le schéma du régulateur associé à la génératrice est représenté dans la figure (4.17) :

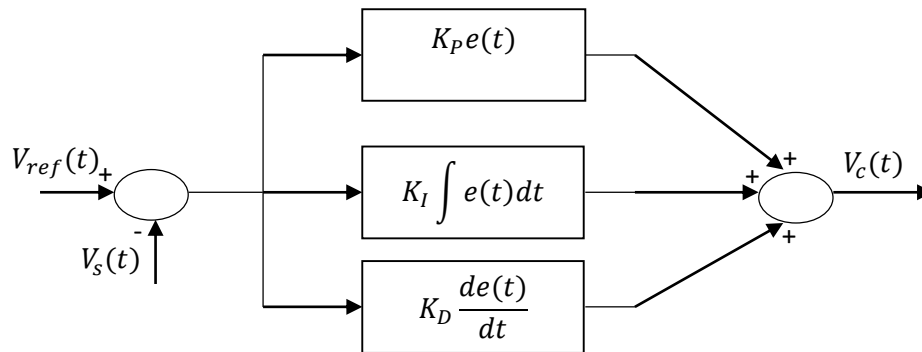


Figure 4.17 : Schéma fonctionnel d'un correcteur PID classique [8]

La tension de sortie corrigée est donnée par :

$$V_c(t) = K_P \left[e(t) + \frac{1}{T_I} e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (4.1)$$

Tel que $e(t)$ représente l'écart, K_P le gain proportionnel, T_I la constante intégrale de temps et T_D la constante dérivée du temps.

La fonction de transfert du correcteur PID s'écrit alors comme suit :

$$G_{PID}(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{sT_I} + sT_D \right) \quad (4.2)$$

4.6.3. Synthèse des paramètres des correcteurs :

Le schéma de régulation simplifié est représenté dans la figure (4.18) :

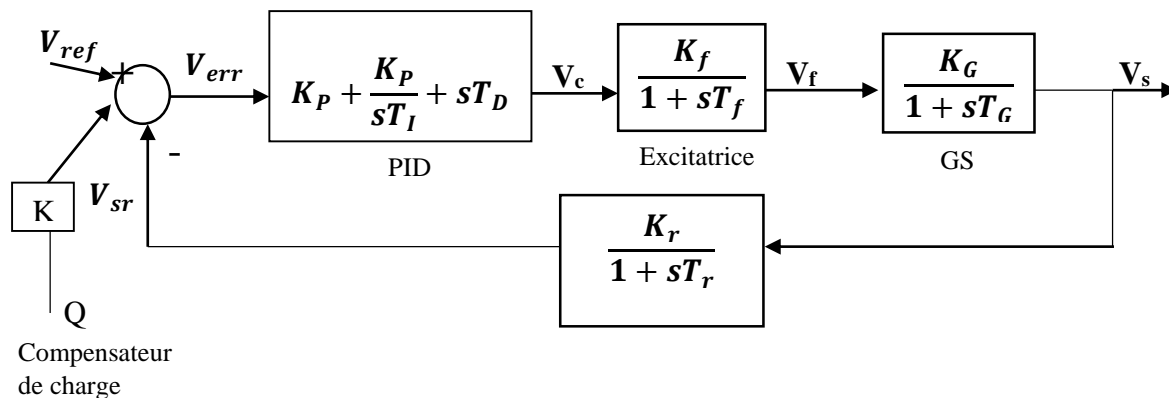


Figure 4.18 : Schéma de régulation de tension simplifié [14]

- Méthode par compensation de pôles :

Après simplification du système global précédent figure (4.16), le schéma fonctionnel obtenu montré ci-dessus nous permet de calculer aisément les paramètres du correcteur PID, en utilisant la méthode par compensation de pôles.

La fonction de transfert du correcteur PID peut s'écrire sous la forme :

$$G_{PID}(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{sT_I} + sT_D \right) = K_P \left(\frac{1+T_I s + T_I T_D s^2}{sT_I} \right) \quad (4.3)$$

La fonction de transfert (Excitatrice + Génératrice) est exprimée comme suit :

$$F_T(s) = \frac{K_f K_G}{(1+T_f s)(1+T_G s)} = \frac{K'}{1+(T_f+T_G)s+T_f T_G s^2} \quad (4.4)$$

Après compensation de pôle par les zéro du correcteur PID, on aura :

$$T_I = T_f + T_G \quad , \quad T_D = \frac{T_f T_D}{T_f + T_G} \quad (4.5)$$

En boucle ouverte, la fonction de transfert est exprimée comme :

$$G_{BO}(s) = \frac{K_{BO}}{T_I s} \quad (4.6)$$

Avec $K_{BO} = K_P K_f K_G$

En boucle fermée :

$$F_{BF}(s) = \frac{G_{BO}(s)H(s)}{1+G_{BO}(s)H(s)} \quad (4.7)$$

Tel que $H(s)$ définit la fonction de transfert du capteur qui s'écrit comme suit :

$$H(s) = \frac{K_r}{1+T_r s} \quad (4.8)$$

En remplaçant les équations (4.6) et (4.7) dans (4.8), on déduit la fonction de transfert du système global en boucle fermée :

$$F_{BF}(s) = \frac{\left(\frac{K_{BO}}{T_I s}\right) \left(\frac{K_r}{1+T_r s}\right)}{1 + \left(\frac{K_{BO}}{T_I s}\right) \left(\frac{K_r}{1+T_r s}\right)} = \frac{1}{1 + \left(\frac{T_r s}{K_{BO}}\right) \left(\frac{1+T_r s}{K_r}\right)}$$

$$\Rightarrow F_{BO}(s) = \frac{1}{1 + \left(\frac{T_I}{K_{BO}K_r}\right)s + \left(\frac{T_I T_r}{K_{BO}K_r}\right)s^2} \quad (4.9)$$

La forme canonique d'une fonction de transfert du deuxième ordre est la suivante :

$$F(s) = \frac{1}{1 + \left(\frac{2\varepsilon}{\omega_n}\right)s + \left(\frac{1}{\omega_n^2}\right)s^2} \quad (4.10)$$

Tel que ε et ω_n représentent respectivement le coefficient d'amortissement et la pulsation propre du système.

Par superposition entre les deux fonctions de transferts $F_{BF}(s)$ équation (4.9) et $F(s)$ équation (4.10) on aura :

$$\frac{T_I}{K_{BO}K_r} = \frac{2\varepsilon}{\omega_n} \quad (4.11)$$

$$\frac{T_I T_r}{K_{BO}K_r} = \frac{1}{\omega_n^2} \quad (4.12)$$

$$(4.11) \Rightarrow \omega_n = \frac{2K_{BO}K_r\varepsilon}{T_I} \quad (4.19)$$

$$(4.12) \Rightarrow K_{BO} = \frac{T_I T_r \omega_n^2}{K_r} \quad (4.14)$$

En remplaçant (4.13) dans (4.14), on obtient :

$$K_{BO} = \frac{T_I}{4T_r K_r \varepsilon^2}, \text{ et sachant que : } K_{BO} = K_P K_f K_G, T_I = T_f + T_G \text{ et } T_D = \frac{T_f T_G}{T_f + T_G}$$

On déduit alors les gains :

$$\left\{ \begin{array}{l} K_P = \frac{(T_f + T_G) T_r \omega_n^2}{K_r K_f K_G} \\ \text{ou} \\ K_P = \frac{(T_f + T_G)}{4K_f K_G T_r K_r \varepsilon^2} \end{array} \right., K_I = \frac{1}{T_f + T_G}, K_D = \frac{T_f T_G}{T_f + T_G} \quad (4.15)$$

- **Calcul des différents paramètres de chaque fonction de transfert**
 - Fonction de transfert simplifiée de la génératrice synchrone [13] :

$$G(s) = \frac{K_G}{(1 + sT_G)} \quad (4.16)$$

Le calcul de K_G et T_G se fait comme suit :

$$\begin{cases} G(s) = K_G \frac{1+s.T_{kd}}{(1+sT'_{d_0})} ; \Delta\Psi ds = G(s) * efd \\ K_G = \frac{x_{md}}{r_f}, T'_{d_0} = \frac{x_{md}+x_f+x_{kf1}}{r_f} \end{cases} \quad (4.17)$$

Avec $x_{kf1} \ll x_f, x_{md} \ll x_f \Rightarrow T_G = T'_{d_0} \simeq \frac{x_f}{r_f}$

T_{kd} et T'_{d_0} sont négligées [14].

- Fonction de transfert de l'amplificateur :

$$G_f(s) = \frac{K_f}{(1+s.T_f)} \quad (4.18)$$

La relation entre le courant d'excitation I_{exc} à la sortie du redresseur commandé en continue, et la tension d'excitation V_f obtenue à la sortie de la génératrice est donnée comme suit :

$$V_f = K_f * I_{exc}$$

$$\checkmark K_f = \frac{V_f}{I_{exc}}$$

$$\checkmark T_f \ll T_G, \text{ donc on peut négliger } T_f$$

4.7. Simulation sous MATLAB/Simulink

Afin de visualiser le fonctionnement et le comportement du régulateur AVR Prismic A32 en se basant sur la synthèse des paramètres de ce dernier, nous allons présenter un test de simulation réalisé sur Matlab/Simulink.

- Conditions de simulation

Nous allons utiliser le modèle de la machine synchrone obtenu dans le chapitre (3) connectée à une charge nominale de puissance active $P=10$ MW et de puissance réactive $Q=04$ MVar. Pour cela, un essai de connexion et de déconnexion brusque d'une charge a été réalisé.

Pour ce faire, l'alternateur est entraîné à une vitesse de rotation fixe (3000 tr/min). A l'instant $t=150$ (s) on connecte la charge à la machine, puis une fois que le système atteint le régime permanent, on procède à la déconnexion de la charge à l'instant $t=300$ (s).

4.7.1. Résultats de simulation

Les résultats de simulation sont présentés dans les figures (4.19) (4.20) (4.21) (4.22) (4.23) (4.24) respectivement : Vitesse de rotation de l'arbre, puissance active et réactive absorbées par la charge, Couple électromagnétique de l'alternateur, tension efficace à la sortie de l'alternateur, tension d'excitation du rotor, courant d'excitation du rotor :

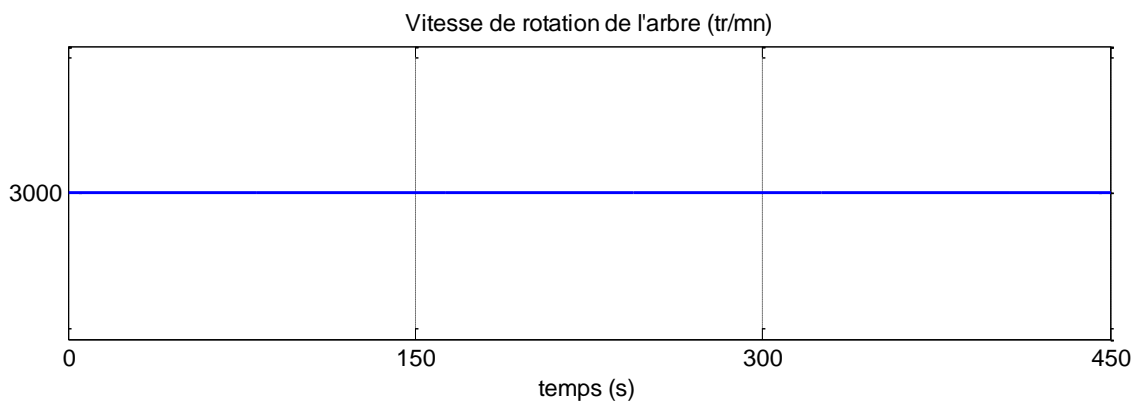


Figure 4.19: Vitesse de rotation de l'arbre

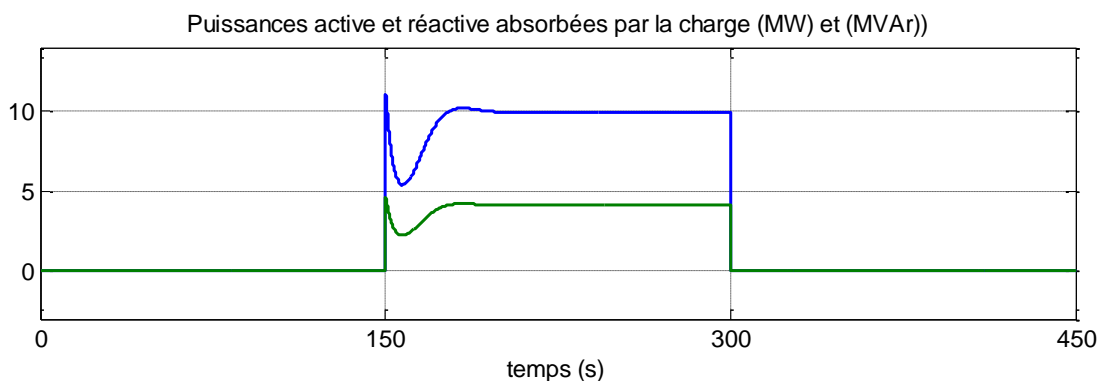


Figure 4.20 : Puissance active et réactive absorbées par la charge

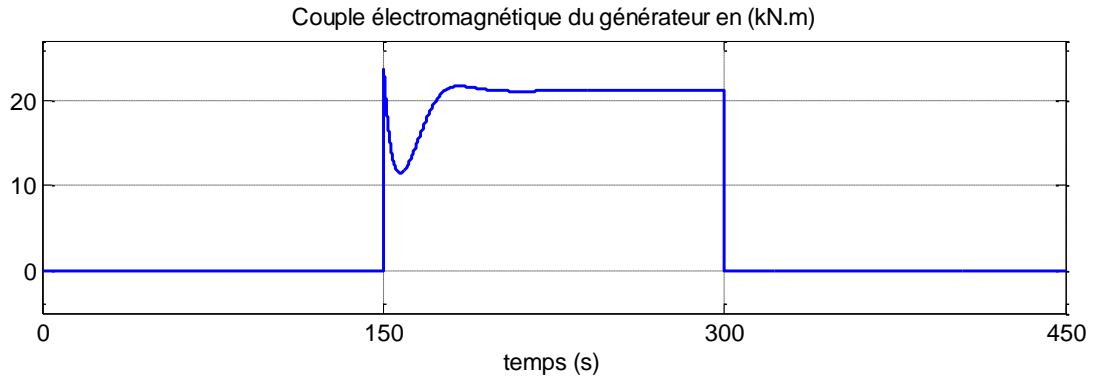


Figure 4.21 : Couple électromagnétique de l'alternateur

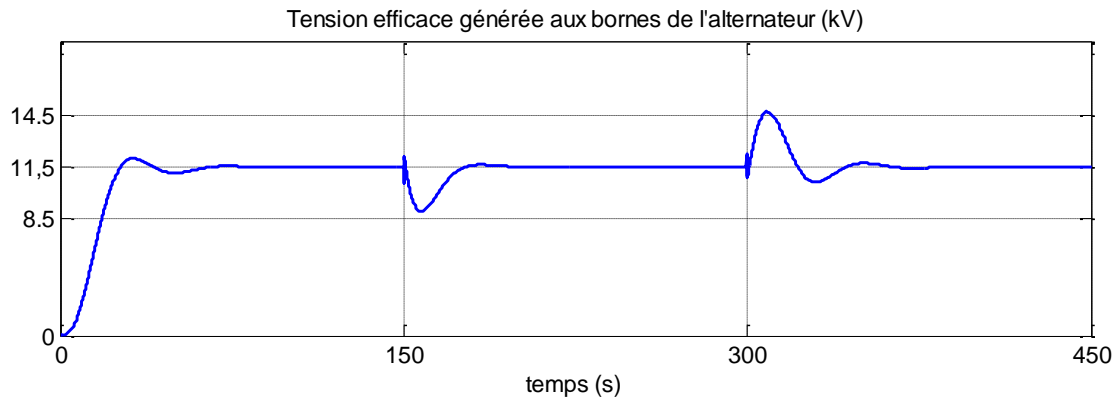


Figure 4.22 : Tension efficace à la sortie de l'alternateur

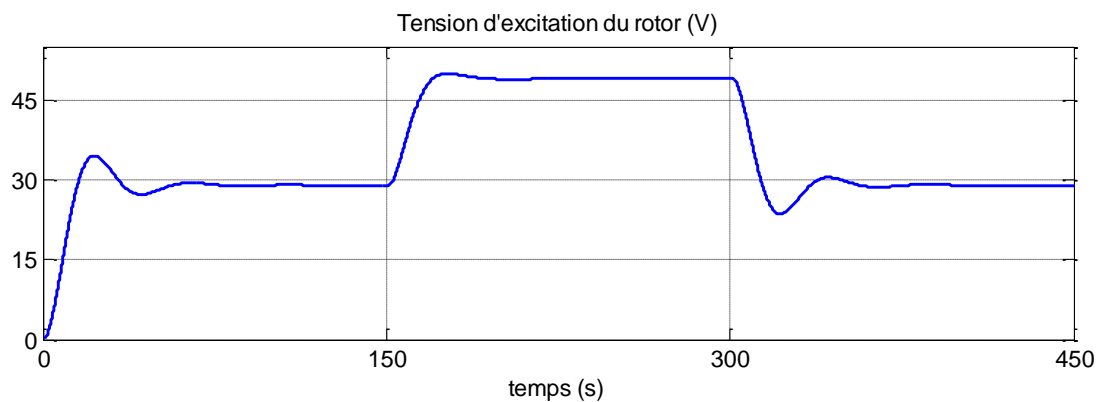


Figure 4.23 : Tension d'excitation du rotor

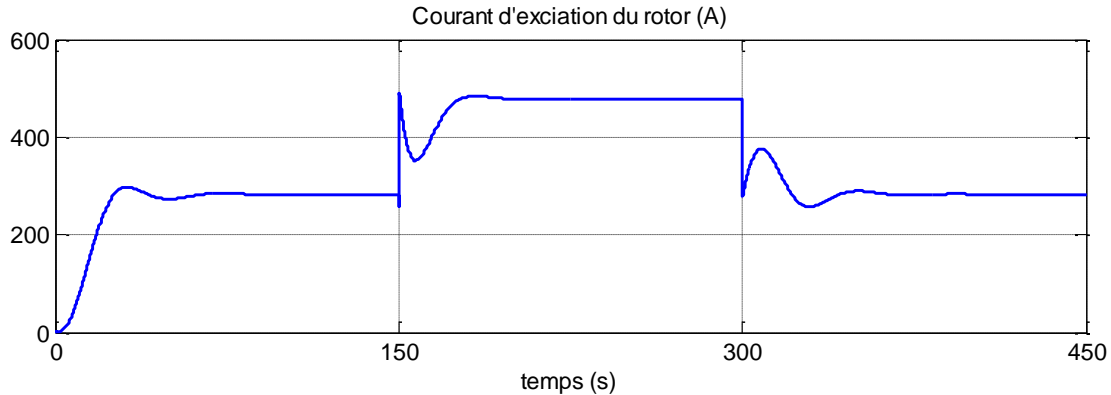


Figure 4.24 : Courant d'excitation du rotor

- Interprétation des résultats

D'après les résultats de simulation montrés ci-dessus, nous avons constaté une action rapide du système de régulation AVR sur la tension d'excitation.

Au moment de l'application de la charge on remarque une chute de tension à l'instant $t=150s$ (figure (4.22)), l'AVR donne l'ordre d'augmenter la tension d'excitation du rotor (figure (4.23)) afin de compenser cette chute de tension et la garder fixe à 11.5KV, cela engendre automatiquement l'augmentation du courant d'excitation (figure (4.24)).

4.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté de façon détaillée, le système de régulation automatique de tension AVR Prismic A32 de la centrale d'Amizour, afin de définir le mode de régulation automatique et ses différents modules.

Par la suite, nous avons donné une description du système d'excitation sans contact de l'alternateur Brush ainsi que son principe de fonctionnement.

A la fin de ce chapitre on a étudié l'influence du régulateur AVR Prismic A32 sur le fonctionnement du système et sa capacité de remettre l'alternateur à l'état stable après perturbation de charge.

Les résultats de simulation montrent l'importance et le rôle majeur des régulateurs dans les réseaux électriques pour faire face aux perturbations les plus fréquentes.

Conclusion générale

Conclusion générale

La performance des unités de production en termes de services et système est associée directement à des paramètres de régulation attachés aux générateurs. On s'est donc intéressé à l'étude des systèmes de régulation de l'excitation des groupes Turbo-Alternateurs, pour l'amélioration des performances de stabilité d'un système électro-énergétique. Ces contrôleurs d'excitation sont capables de maintenir de meilleures performances dynamiques et garantissent la stabilité du système étudié et sa robustesse, face à des perturbations en présence des incertitudes sur le système, sous différents régimes de fonctionnement et configurations des réseaux. Le but final est de maintenir la production de l'énergie électrique sans interruption et assurer la continuité de service pour les consommateurs.

Nous avons présenté dans ce mémoire une étude de l'alternateur d'une turbine d'une puissance de 20 MW de la centrale à gaz d'Amizour en vue d'analyser le système de régulation de la tension et ces capacités à réguler la tension d'excitation. En se basant sur la connaissance préalable des paramètres détaillés de l'alternateur et l'AVR (Automatic Voltage Regulator ou Contrôleur d'Excitation), nous avons établi une étude théorique permettant de reproduire les mêmes caractéristiques dynamiques de l'ensemble Alternateur-AVR que celui installé dans la centrale.

Dans un premier temps, une brève présentation de la centrale d'Amizour a été faite en précisant la fonction de chaque élément la constituant et en mettant en évidence les caractéristiques nominales des éléments électriques tels que l'alternateur, transformateur et le système d'excitation.

Le deuxième chapitre présente une modélisation détaillée de l'alternateur laquelle nous avons utilisé pour visualiser son comportement durant un fonctionnement couplé au réseau. En absence d'un système de régulation qui peut aider l'alternateur à retrouver son état stable, les résultats montrent l'instabilité qui peut avoir lieu et même la perte de synchronisme.

Dans la dernière partie de ce travail nous avons étudié l'AVR PRISMIC A32 de la centrale d'Amizour pour montrer l'efficacité du système envers certaines perturbations qui apparaissent quotidiennement dans le réseau électrique. La simulation de système associé Alternateur-AVR en mode autonome (alimentation d'une charge) nous a permis de constater l'effet indispensable des régulateurs AVR pour garder la tension dans les limites contractuelles et assurer une bonne qualité d'énergie aux consommateurs. Autrement, l'élimination des défauts dans les brefs délais joue un rôle important dans l'établissement de la stabilité des

Conclusion générale

réseaux de puissance ce qui exige un système de protection à intervention rapide et efficace en isolant les parties en défauts.

Bibliographie

- [1] : Société Algérienne de production de l'électricité, document délivré par Sonelgaz.
- [2] : « Programme de formation au FT8 », PRATT & WHITNEY POWER SYSTEMS, Édition publiée en AOÛT 2009.
- [3] : Ethos Energy. Pratt et Whitney power system Inc. Edition publiée en AOUT 2009.
- [4] : K.HACHEMI, «Etude De La Machine Synchrone Autopiloté : Modélisation et simulation», THESE de doctorat, UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE D'ORAN Mohamed BOUDIAF, Juillet 2012.
- [5] : « Les énergies en questions, l'énergie hydraulique » de Ian GRAHAM, édition GAMMA – Ecole active <http://energies2demain.com/eau/hydraulique/les-barrageshydroelectriques>.
- [6] : ADEME, « Guide pour le montage de projets de petite hydroélectricité », formation Hydro, Grenoble, session du 19 au 22 septembre 2006, pp. 6-17.
- [7] : https://www.google.com/search?biw=1536&bih=683&tbm=isch&sa=1&ei=6XMtW5OZF8T0UJ6JnYgI&q=central+hydraulique+sch%C3%A9ma&oq=central+hydraulique+sch%C3%A9ma&gs_l=img.3..0.38163.45630.0.45721.28.19.1.8.8.0.235.2919.0j14j3.17.0....0...1c.1.64.img..2.25.2829...35i39k1j0i67k1j0i30k1j0i5i30k1j0i24k1.0.ZwMV--cZlpU#imgrc=tE6bVoyhOX2bxM:
- [8] : S.L Dixon, 1978, «Fluid Mechanics, Thermodynamics of Turbomachinery», 3dr Edition pergamon press oxford (New York, Toronto, Sydney, Frankfurt).
- [9] : CHRISTIAN ROBERT, 2000, «Techniques de l'ingénieur : Machines hydraulique, thermique», Avril 2000.
- [10] : Extrait de technique de l'ingénieur « Généralités sur les réseaux électriques », Réf internet : 42261. www.techniques-ingenieur.fr
- [11] : M. A.MAHMOUDI, «Alternateur, fonctionnement et exploitation », école technique de Blida, Service Technique et Pédagogique, Edition 2009.
- [12] : T.WILDI « électrotechnique 3eme édition » De Boeck.France.2000
- [13] : P.Kundur, «Power System Stability and Control», New York: McGraw-Hill Inc, 1994.

[14] : K.OURAMDANE «Modélisation et optimisation du système d'excitation du groupe turbine-alternateur du simulateur Analogique d'Hydro-Québec», Mémoire PFE Ingénieure université du Québec en Abitibi Témiscamingue. CANADA 2015.

[15] : Haj agos, 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.

[16] : Dr.Dhiya Ali Al-Nimma, Dr. Majid Salim Matti, «Reactive Power Control of an Alternator with Static Excitation System Connected to a Network», Mosul University, Vol.18, N°3, June 2010.

[17] : M.S. Ghazizadeh, F. M. Hughs, «A Generator Transfer Function Regulator for Improved Excitation Control», IEEE Trans on. Power Systems, Vo1.13, N°2, May 1998, pp. 437- 441.

[18] : BARDADI BENDAHA Mansour, «Identification des paramètres d'une machine synchrone à aimant permanent en vue d'une intégration dans des simulations en temps réel », Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Magister, Université des sciences et de la technologie d'ORAN, Février 2015.

[19] : Jean-Luc KOTNY, «CONTRIBUTION A LA MODELISATION DES MACHINES SYNCHRONES A SIMPLE ET DOUBLE ETOILE», Thèse en vue de l'obtention du titre de DOCTEUR DE TROISIEME CYCLE, Université des sciences et techniques de LILE, Septembre 1984.

[20] : 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 de Doctorat, Université de POITIERS, Novembre 2011.

[21] : Emilie Bowendnére MOUNI, «Contribution à l'amélioration des performances des génératrices synchrones : nouvelle structure d'excitation basée sur une machine à aimants et combinée à des lois de commande avancées», Thèse de Doctorat, Université de POITIERS, Aout 2006.

[22] : T.VAN CUTSEM, «La machine synchrone (modèle détaillé) », Notes théoriques du cours ELEC009, Electric Power System Analysis, Université de Liège, Février 2017.

[23] : XIAOPING TU, «CONTRIBUTION A LA MODELISATION ET A LA SIMULATION DE LA MACHINE SYNCHRONE SOUMISE A DES DEFAUTS INTERNES », Thèse de Doctorat, Ecole de technologie supérieure-Université du QUEBEC, Février 2005.

[24] : BRUSH Electrical Machines Ltd. «Instruction Manual, PRISMIC A32 EXCITATION CONTROLLER», Aout 2010.

[25] : Maguiragua Mouhamadou « DIMENSIONNEMENT DES EXCITATRICES A DIODES TOURNANTES »

[26] : https://www.google.com/search?biw=1536&bih=683&tbm=isch&sa=1&ei=AnMtW5vNJImuUdz5hPgB&q=stator+d%27un+alternateur+a+aimants+permanents+brush&oq=stator+d%27un+alternateur+a+aimants+permanents+brush&gs_l=img.3...50206.51861.0.52255.6.6.0.0.0.0.208.989.0j5j1.6.0....0...1c.1.64.img..0.0.0....0.1HJenBIWMmo#imgrc=hiVG8DjRPdjE3M:

[27] : S.H Belkhira, «Etude et application des régulateurs automatiques AVR-PSS appliquée aux turbo alternateurs sous le régime des FACTS», Mémoire de Master, Université Dr. Tahar Moulay de Saida, Février 2017.

[28] : Anant Oonsivilai and Padej Pao-La-Or. "Application of Adaptive Tabu Search for Optimum PID Controller tuning AVR System". Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, vol. 3, June 2008.

Annexes

Annexe A

Paramètres du générateur BRUSH



ELECTRICAL DATA SHEET

P O Box 18, Falcon Works, Loughborough, Leics. LE11 1HJ, England
 Telephone: +44 (0) 1509 611511 Fax: +44 (0) 1509 612345 E-mail: Sales@bem.fki-et.com

CLASS 'F' RISES

1. RATING DETAILS

1.1	Frame size	BDAX 62-170ER
1.2	Terminal voltage	11.50 kV
1.3	Frequency	50 Hz
1.4	Speed	3000 rev/min
1.5	Power factor	0.900
1.6	Applicable national standard	IEC 60034-3
1.7	Rated air inlet temperature	15.0 °C
1.8	Rated output	26.200 MW, 29.111 MVA

2. PERFORMANCE CURVES

2.1	Output vs air inlet temperature	H.E.P. 23093
2.2	Reactive capability diagram	H.E.P. 23094
2.3	Efficiency vs output	H.E.P. 23095
2.4	Open and Short circuit curves	H.E.P. 23096
2.5	Permitted duration of negative sequence current	H.E.P. 1216

3. REACTANCES

3.1	Synchronous reactance, $X_{d(1)}$	279%
3.2	Saturated transient reactance, $X'_{d(v)}$	26.9 % ± 15 %
3.3	Saturated sub transient reactance, $X''_{d(v)}$	18.6 % ± 15 %
3.4	Unsaturated negative sequence reactance, $X_{2(1)}$	22.2 %
3.5	Unsaturated zero sequence reactance, $X_{0(1)}$	11.3 %
3.6	Synchronous reactance, $X_{q(1)}$	255%
3.7	Saturated transient reactance, $X'_{q(v)}$	32%
3.8	Saturated sub transient reactance, $X''_{q(v)}$	23%
3.9	Short circuit ratio	0.41

Notes:

- The electrical details provided are calculated values. Unless otherwise stated, all values are subject to tolerances as given in the relevant national standards.

Date: 23-Feb-2007

Ref: 110027/32/207S/102R

Page: 1 of 2



ELECTRICAL DATA SHEET - CONTINUATION

BDAX 62-170ER, 26.200 MW, 0.900 pf, 11.50 kV, 50 Hz

4. RESISTANCES AT 20°C

4.1	Rotor resistance	0.101 ohms
4.2	Stator resistance per phase	0.0145 ohms

5. TIME CONSTANTS AT 20°C

5.1	Transient O.C. time constant, T'_{d0}	7.6 seconds
5.2	Transient S.C. time constant, T'_d	0.59 seconds
5.3	Sub transient O.C. time constant T''_{d0}	0.05 seconds
5.4	Sub transient S.C. time constant, T''_d	0.04 seconds

6. INERTIA

6.1	Moment of inertia, WR^2 (See note 2)	340 Kg.m ²
6.2	Inertia constant, H	0.58 kW.secs/kVA

7. CAPACITANCE

7.1	Capacitance per phase of stator winding to earth	0.10 microfarad
-----	--	-----------------

8. EXCITATION

8.1	Excitation current at no load, rated voltage	283 amps
8.2	Excitation voltage at no load, rated voltage	29 volts
8.3	Excitation current at rated load and P.F.	913 amps
8.4	Excitation voltage at rated load and P.F.	129 volts
8.5	Inherent voltage regulation, F.L. to N.L.	45 %

Notes:

- The electrical details provided are calculated values. Unless otherwise stated, all values are subject to tolerances as given in the relevant national standards.
- The rotor inertia value may vary slightly with generator / turbine interface. In the event of conflict, the figure quoted on the rotor geometry drawing takes precedence.

Date: 23-Feb-2007

Ref: 110027/32/207S/102R

Page: 2 of 2

Annexe B

Courbes de fonctionnements du générateur Brush

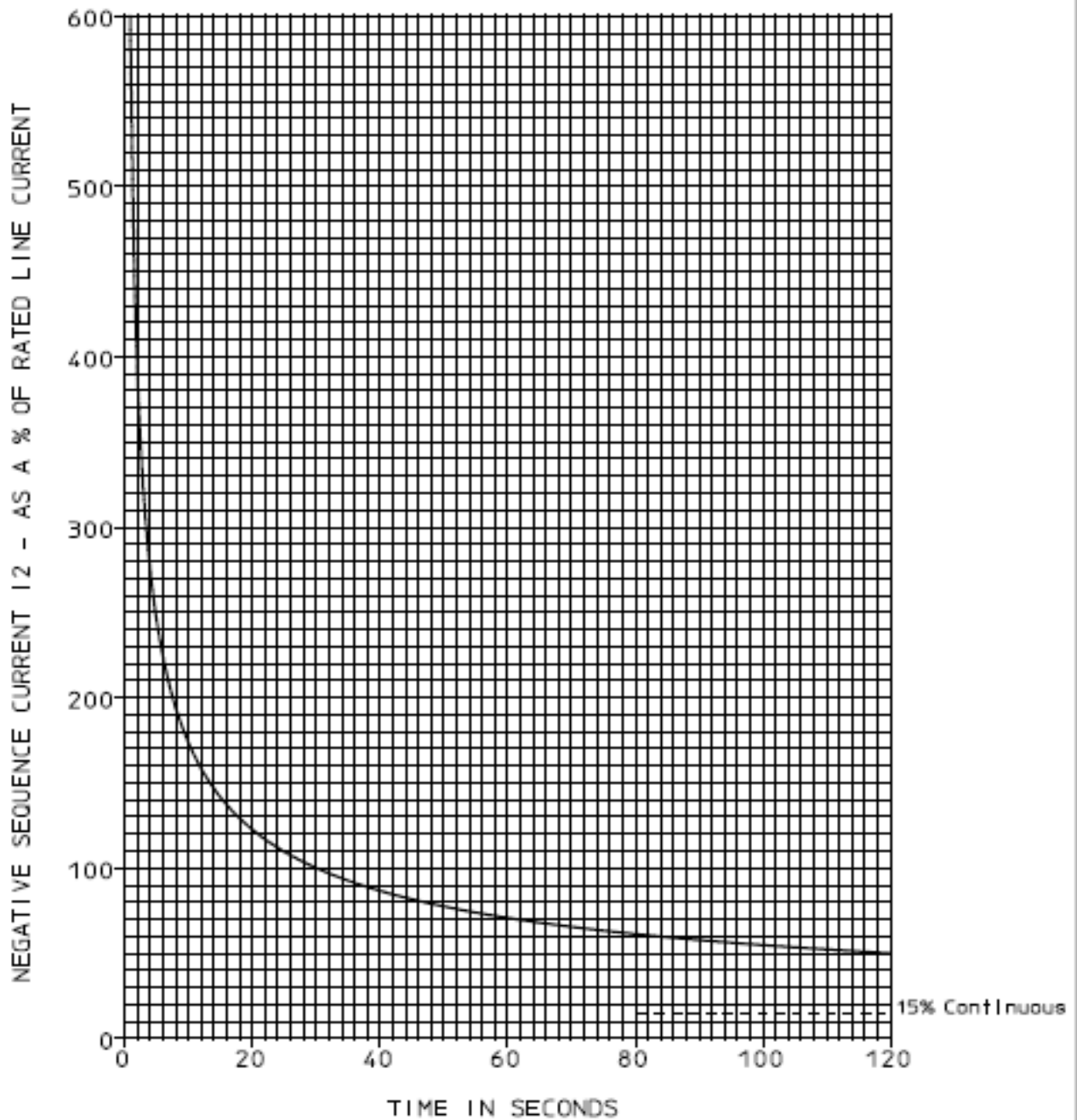
B.1. Durée admissible du courant inverse

BRUSH ELECTRICAL MACHINES LTD.

H. E P 1216

PERMISSIBLE DURATION OF NEGATIVE SEQUENCE CURRENT

$$\frac{I_2}{I_1} = 30$$



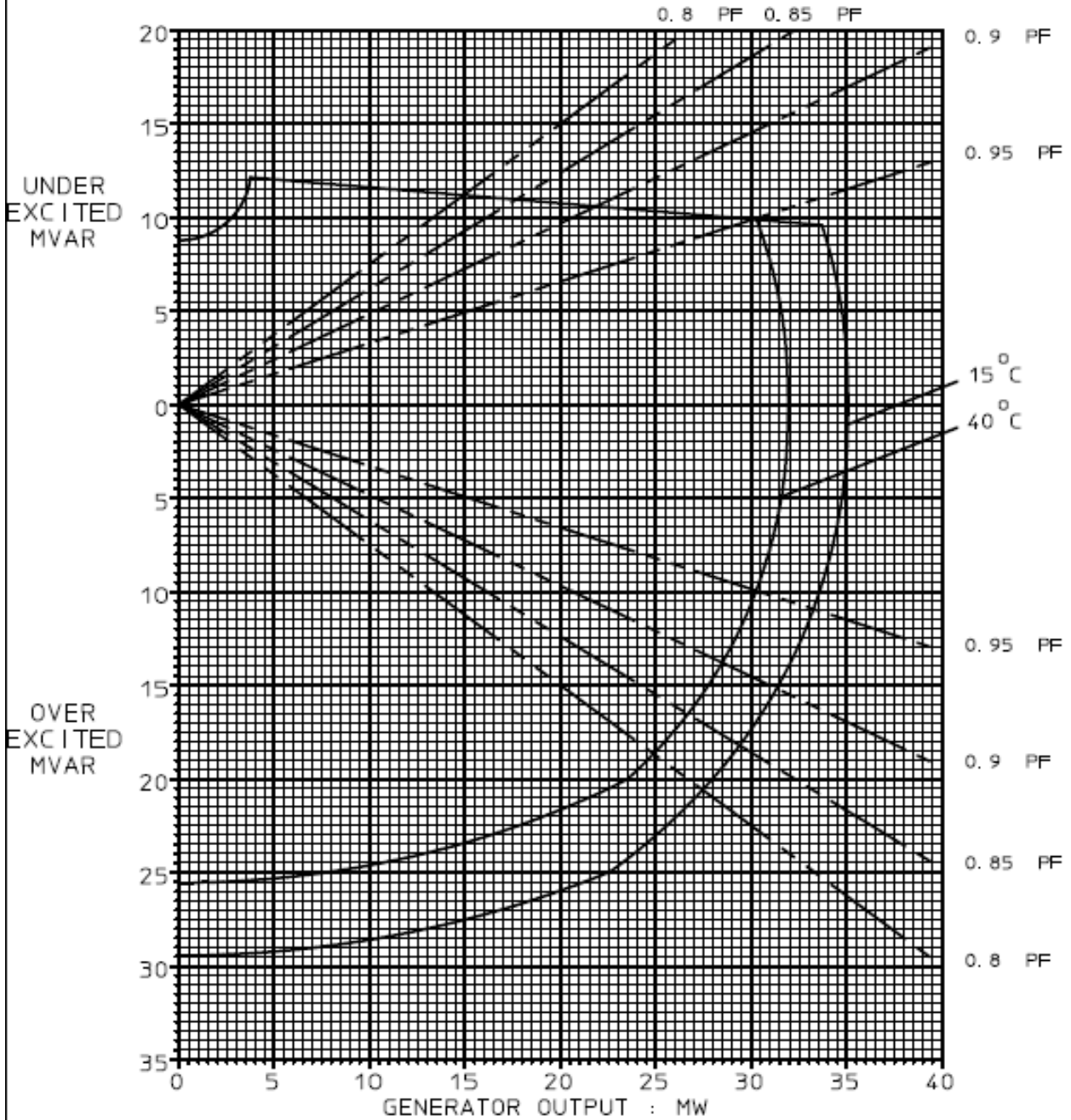
NOTE: For continuous operation
rated current must not be
exceeded in any one phase.

B.2. Diagramme de capacité du générateur

BRUSH ELECTRICAL MACHINES LTD.

H. E. P 23698

GENERATOR CAPABILITY DIAGRAM



BDAX 62-170ER
13.80KV, 3 Ph, 60Hz.

IN ACCORDANCE WITH
IEEE C50.13

Up to 1000 meters ASL

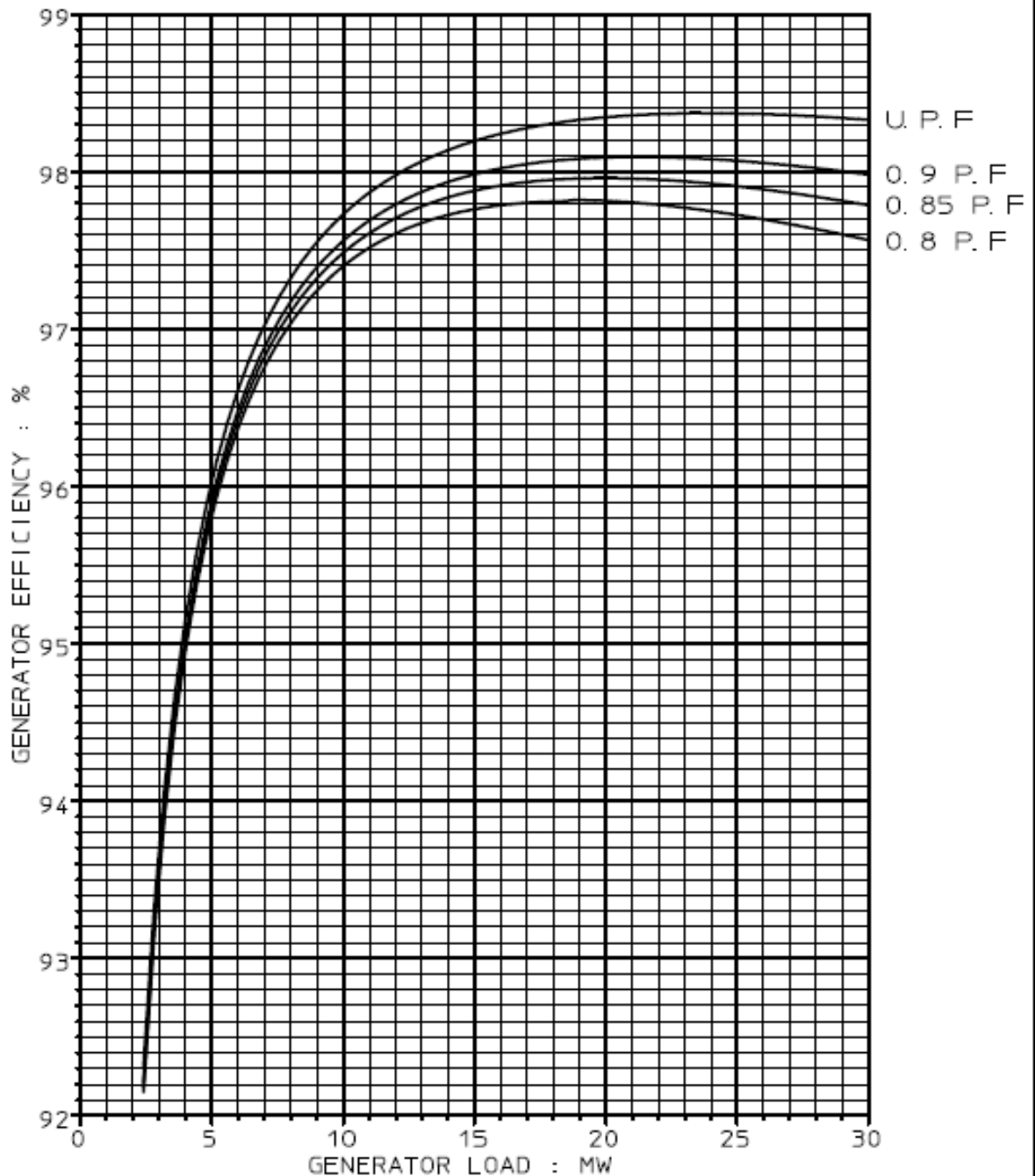
Class B temperatures.
Total temperatures Stator 148 Deg C
Rotor 145 Deg C

B.3. Variation du rendement de la génératrice en fonction de la charge

BRUSH ELECTRICAL MACHINES LTD.

H. E. P 23699

VARIATION OF GENERATOR EFFICIENCY WITH LOAD



BDAX 62-170ER
13.8 KV, 3 Ph, 60 Hz.

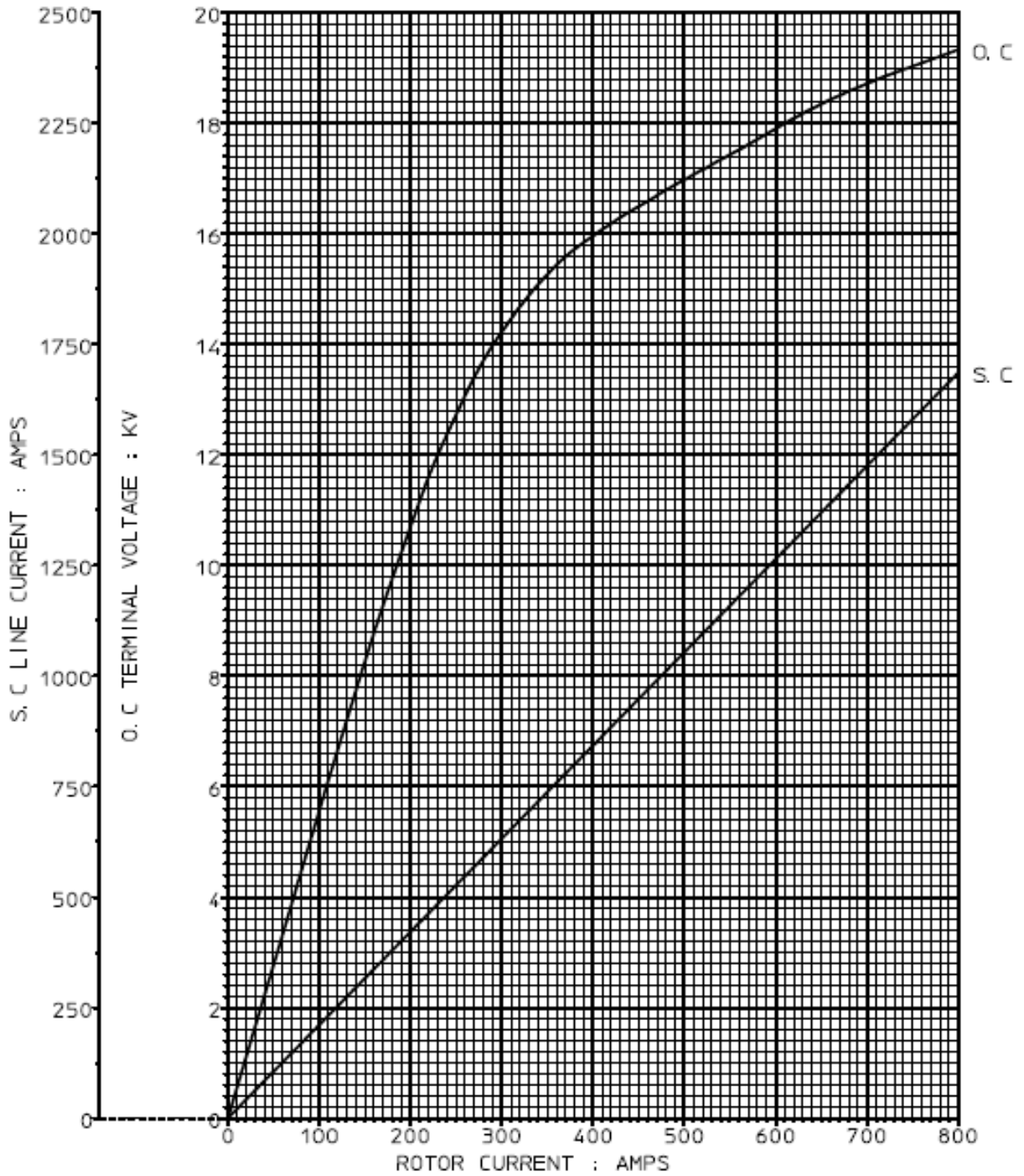
Efficiencies shown are guaranteed
subject to the tolerance
specified in IEC 60034-1.

B.4. Caractéristique de circuit ouvert et de court-circuit

BRUSH ELECTRICAL MACHINES LTD.

H. E P 16061

OPEN CIRCUIT AND SHORT CIRCUIT CHARACTERISTIC



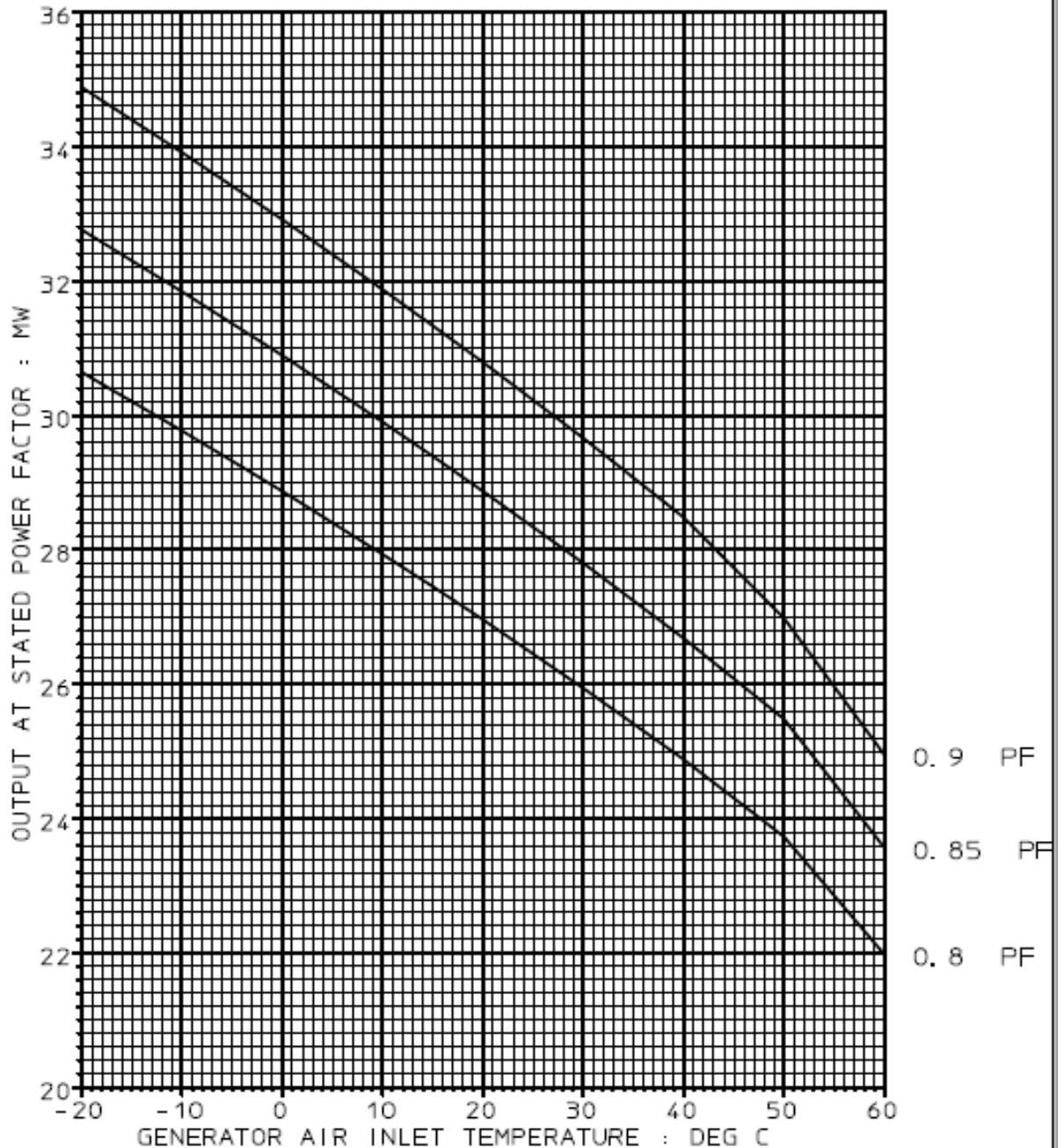
BDAX 62-170ER
 3Ph, 60. Hz, 3600. RPM.

B.5. Variation de la puissance du générateur en fonction de la température d'entrée d'air

BRUSH ELECTRICAL MACHINES LTD.

H. E. P 23697

VARIATION OF GENERATOR OUTPUT WITH AIR INLET TEMP



BDAX 62-170ER
13.80KV, 3 Ph, 60Hz.

Up to 1000 meters ASL

IN ACCORDANCE WITH
IEEE C50.13
Class F temperatures.

Total temperatures Stator 148 Deg C
Rotor 145 Deg C

Annexe C

Programme de calcul des paramètres de la machine

```

clear all
clc
sn=29.111e6;
un=11.5e3;
zb=sn\ (un^2);
rs=0.0145
rff=0.101;
xls=0.113*zb;
xd=2.790*zb;
xq=2.55*zb;
xd1=0.269*zb;
xq1=0.320*zb;
xd2=0.186*zb;
xq2=0.230*zb;
tdo1=7.6;
tdo2=0.05;
tqo2=0.095;
w=2*pi*50;
%-----
xls;
xmd=xd-xls;
xmqq=xq-xls;
xlfd=(xmd*(xd1-xls))/(xmd-(xd1-xls));
xlkd=(xmd*xlfd*(xd2-xls))/(xlfd*xmd-((xd2-xls)*(xmd+xlfd)));
xlkq=(xmqq*(xq2-xls))/(xmqq-(xq2-xls));
xfd=xlfd+xmd;
xkd=xlkd+xmd;
xkq=xlkq+xmqq;
rfd=(xlfd+xmd)/(w*tdo1);
rkd=(xlkd+xd1-xls)/(w*tdo2);
rkq=(xlkq+xmqq)/(w*tqo2);
%-----
%machine parameters in the stator frame
Lls=xls/w
Lmd=xmd/w
Lmq=xmqq/w
Llfd=xlfd/w
Llkd=xlkd/w
Llkq=xlkq/w
%kf=sqrt(rfd/rf)
rf=rfd
rD=rkd
rQ=rkq
kf=475/(1000*sqrt(3))
rf/kf^2

%Rf=rf*kf^2

%-----
%machine parameters in the natural frames
% kf=sqrt(rfd/rf);
% kD=1;
% kQ=1;
% Ld=Lls+Lmd;
% Lq=Lls+Lmq;

```

Annexes

```
% LD=(Lmd/kD^2)+(Llkd/kD^2);
% LQ=(Lmq/kQ^2)+(Llkq/kQ^2);
% Lf=(Lmd/kf^2)+(Llfd/kf^2);
% msf=Lmd/kf;
% msD=Lmd/kD;
% msQ=Lmq/kQ;
% mfD=Lmd/(kf*kD);
% rD=rD/kD^2;
% rQ=rQ/kQ^2;
% rf=rf/kf^2;
```

Annexe D

Modèle de simulation de la MS connectée au réseau

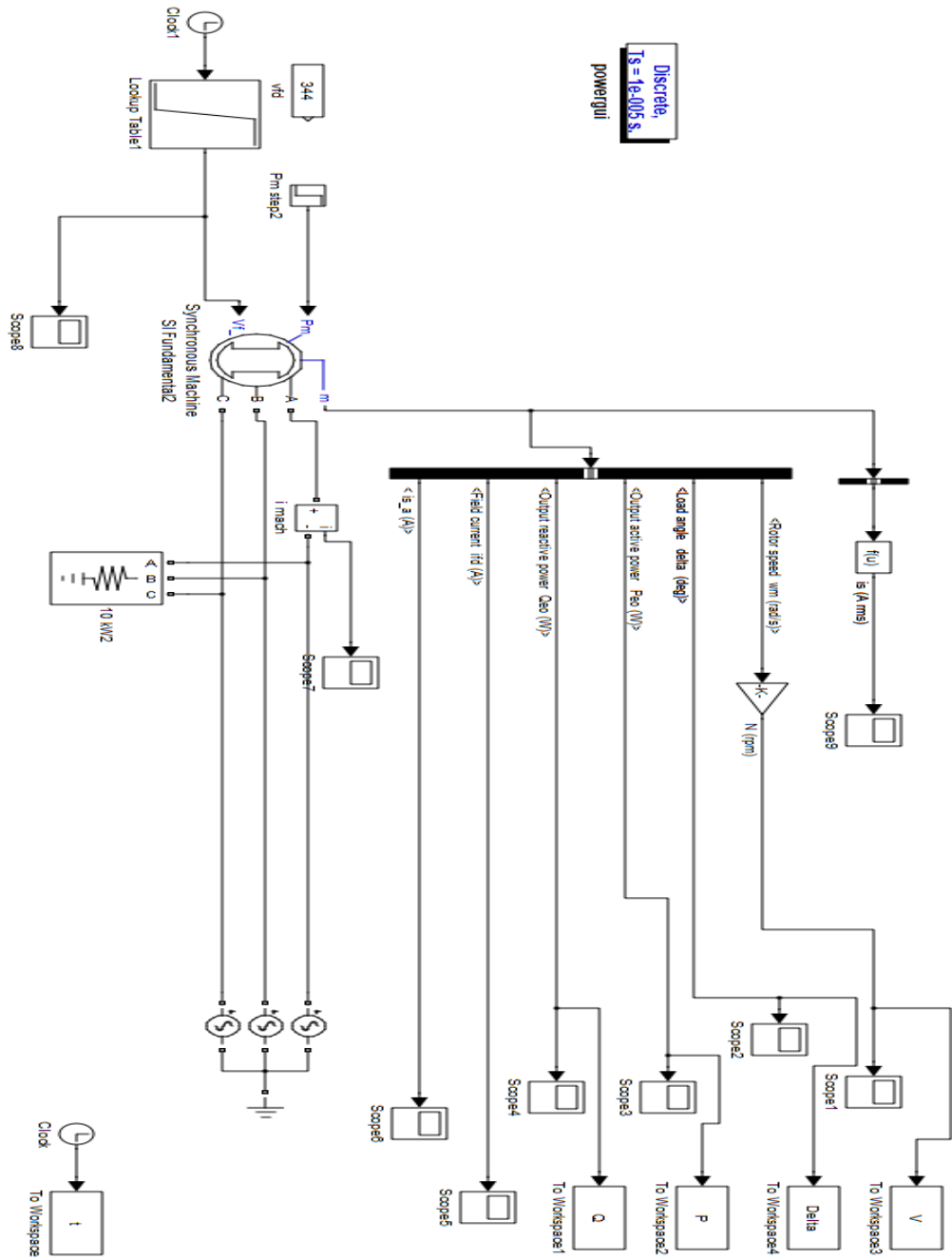
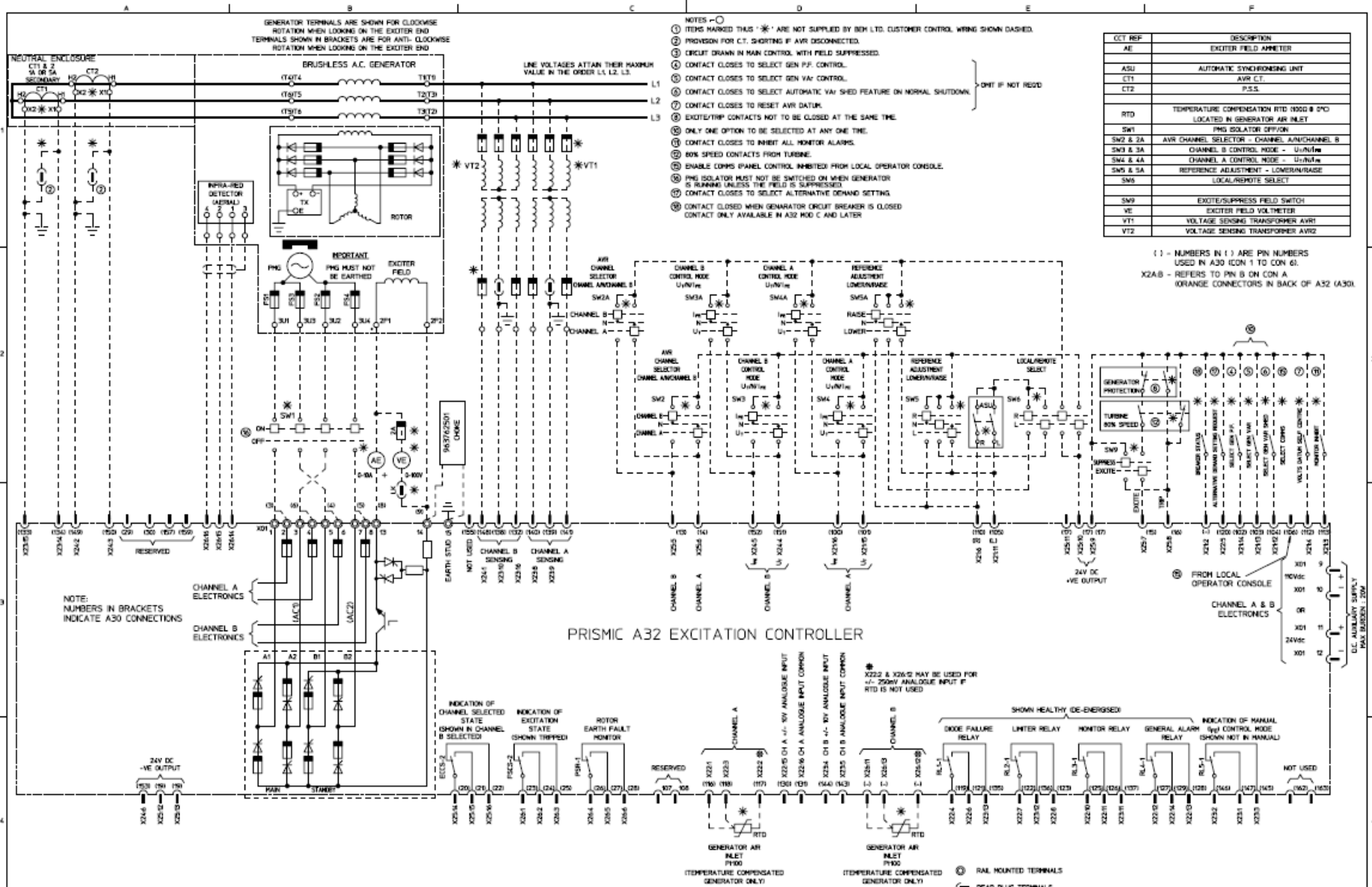


Figure D.1 : Schéma Simulink de la MS connectée au réseau

Annexe E

Circuits du contrôleur d'excitation Prismic A32



- NOTES - ○
- ITEMS MARKED THIS * ARE NOT SUPPLIED BY BSH LTD. CUSTOMER CONTROL WIRING SHOWN DASHED.
 - PROVISION FOR C.T. SHORTING IF AVR DISCONNECTED.
 - CIRCUIT DRAWN IN MAIN CONTROL, WITH FIELD SUPPRESSED.
 - CONTACT CLOSURES TO SELECT GEN VAV CONTROL.
 - CONTACT CLOSURES TO SELECT AUTOMATIC VAV SHED FEATURE ON NORMAL SHUTDOWN. ○ NOT IF NOT REQD.
 - CONTACT CLOSURES TO RESET AVR DATUM.
 - EXCITE/TRIP CONTACTS NOT TO BE CLOSED AT THE SAME TIME.
 - ONLY ONE OPTION TO BE SELECTED AT ANY ONE TIME.
 - CONTACT CLOSURES TO INHIBIT ALL MONITOR ALARMS.
 - ROK SPEED CONTACTS FROM TURBINE.
 - ENABLE COMPS PANEL CONTROL, INHIBITED FROM LOCAL OPERATOR CONSOLE.
 - PMG ISOLATOR MUST NOT BE SWITCHED ON WHEN GENERATOR IS RUNNING UNLESS THE FIELD IS SUPPRESSED.
 - CONTACT CLOSURES TO SELECT ALTERNATIVE DEMAND SETTING.
 - CONTACT CLOSED WHEN GENERATOR CIRCUIT BREAKER IS CLOSED. CONTACT ONLY AVAILABLE IN A32 MOD C AND LATER.

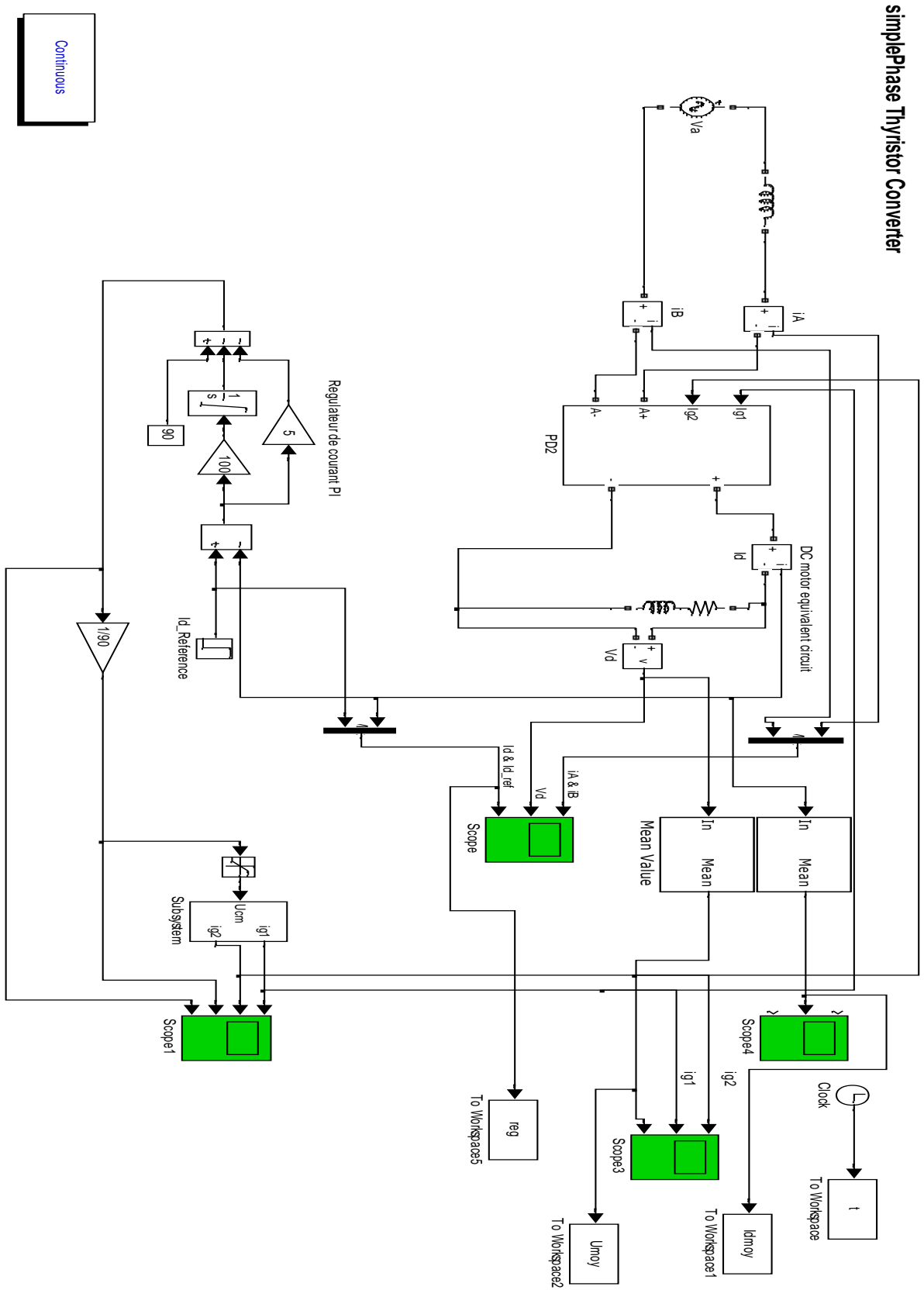
CCT REF	DESCRIPTION
AE	EXCITER FIELD AMP METER
ASU	AUTOMATIC SYNCHRONISING UNIT
AVR	AVR C.T.
CT2	P.S.S.
RTD	TEMPERATURE COMPENSATION RTD 100Ω @ 0°C LOCATED IN GENERATOR AIR INLET
SW1	PMG ISOLATOR SWITCH
SW2 & ZA	AVR CHANNEL SELECTOR - CHANNEL A/MANUAL CHANNEL B
SW3 & 3A	CHANNEL B CONTROL MODE - U ₁ /V ₁ /W ₁
SW4 & 4A	CHANNEL A CONTROL MODE - U ₂ /V ₂ /W ₂
SW5 & 5A	REFERENCE ADJUSTMENT - LOWER/Raise
SW6	LOCAL/REMOTE SELECT
SWP	EXCITE/SUPPRESS FIELD SWITCH
VE	EXCITER FIELD VOLTMETER
VT1	VOLTAGE SENSING TRANSFORMER AVR1
VT2	VOLTAGE SENSING TRANSFORMER AVR2

(1) - NUMBERS IN () ARE PIN NUMBERS USED IN A32 (CON 1 TO CON 6).
 X2A/B - REFERS TO PIN B ON CON A (ORANGE CONNECTORS IN BACK OF A32 (A30))

PRISMIC A32 EXCITATION CONTROLLER

Annexe F

Modèle de simulation du redresseur PD2



Continuous

Figure F.1 : Schéma Simulink du redresseur PD2

Annexe G

Modèle de simulation de la MS associé au régulateur de tension

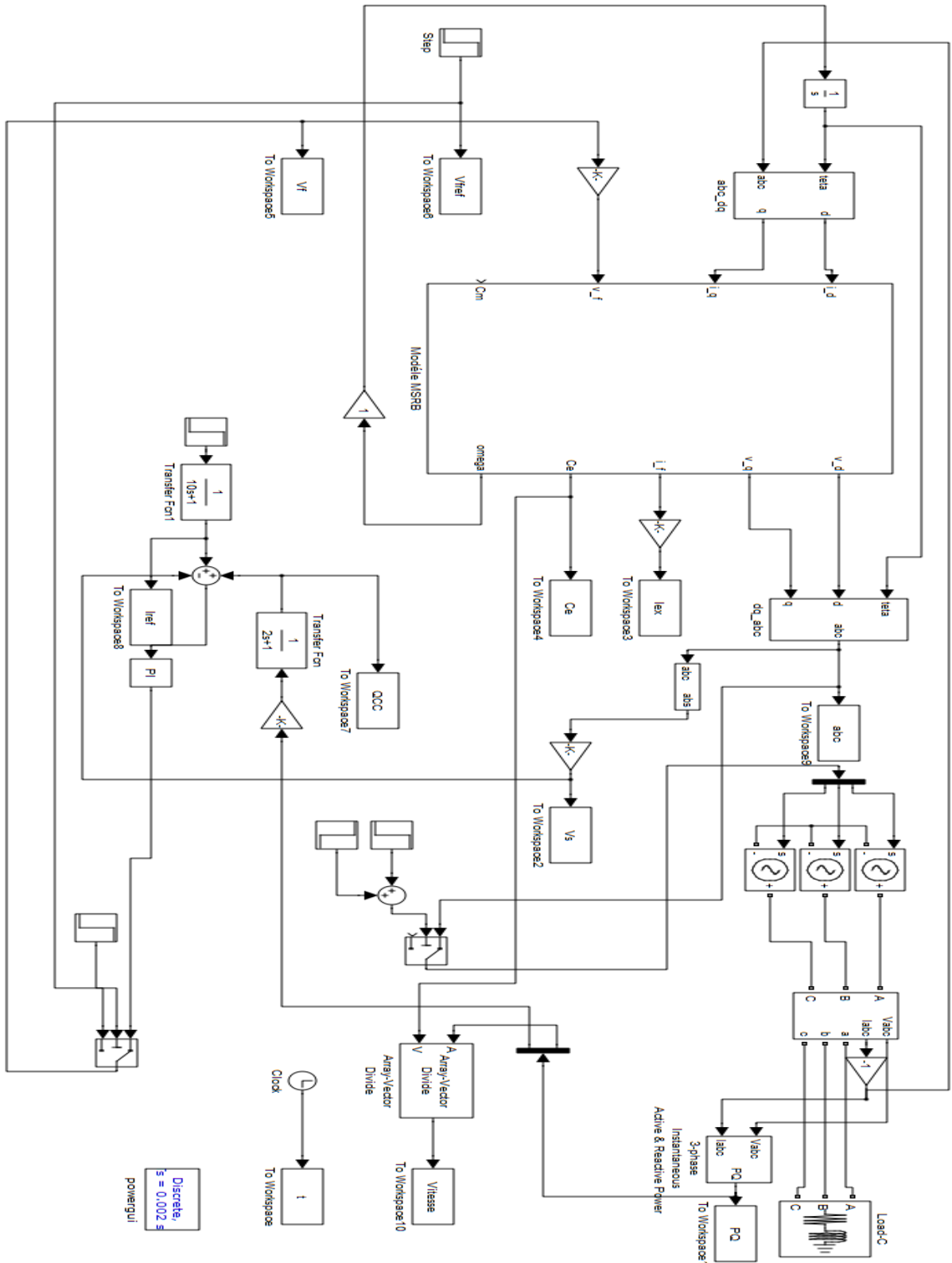


Figure G.1 : Schéma Simulink du modèle de la MS associé au régulateur

Annexe H

Détermination des paramètres du régulateur PID

1) Calcul de K_G et T_G de la génératrice synchrone :

$$\checkmark K_G = \frac{X_{ad}}{r_f}, \text{ avec } X_{ad} = 12.1615 (\Omega) \text{ (calculé dans le programme de l'annexe (..)).}$$

$$r_f = 0.101 (\Omega) \text{ (Résistance rotoriques de la machine).}$$

$$\text{AN : } K_G = \frac{12.1615}{0.101} = 120.41$$

$$\checkmark T_G = \dot{T}_{do} \text{ (}\dot{T}_{do} \text{ constante de temps donné par le constructeur).}$$

$$\text{AN : } T_G = 7.6 (s)$$

On aura donc la fonction de transfert de la génératrice synchrone comme suit :

$$G_{(s)} = \frac{120.41}{(1 + s7.6)}$$

2) Détermination de K_f et T_f de l'excitatrice

$$\text{On à } G_f(s) = \frac{K_f}{(1+sT_f)} \text{ fonction transfert de l'excitatrice.}$$

La relation entre la tension I_{exc} à la sortie du redresseur commandé en continue, et la tension d'excitation V_f obtenue à la sortie de la génératrice est donnée comme suit :

$$V_f = K_f * I_{exc}$$

Avec :

$$V_f = 146 V \text{ (Relevé à partir de la plaque signalétique de l'excitatrice).}$$

$$I_{exc} = 10 V$$

AN :

$$\checkmark K_f = \frac{V_f}{I_{exc}} \Rightarrow K_f = \frac{146}{10} = 14.6$$

On a le temps de réponse de la génératrice $T_f \ll T_G$, donc on peut négliger T_f , mais cela présentera un problème lors de calcul du facteur K_D du régulateur PID (si on néglige $T_f = 0$, $K_D = 0$), donc pour éviter ca on prend :

$$T_f = 0.2 (s).$$

On aura la fonction de transfert de l'excitatrice sous la forme suivante :

$$G_f(s) = \frac{14.6}{(1+s0.2)}$$

3) Calcule des paramètres K_P K_D K_I du régulateur PID

La constante K_D est négligée

On obtient alors :

➤ $K_p = 1.5 \cdot 10^{-3}$

➤ $K_I = 1.5 \cdot 10^{-3} / 0.01$

Annexe I

Caractéristiques de l'excitatrice brush et la PMG

Tableau 1.1 : Caractéristiques de l'excitatrice Brush

Rated Voltage	11.5 KV
OUTPUT DC AMPS	1013 A
OUTPUT DC VOLTS	155 A
REV/MIN	3000 tr/min
FIELD AMPS	6.6
FIELD VOLTS	38.4
SPEC	IEC 60034-3

Tableau 1.2 : Caractéristique de la machine a aimant permanent

REV/MIN	3600
PHASES / HZ	1 / 480
VOLTS	240
AMPS	15
MAXI 44.04-A1	FRAME
922673.010	MACHINE NO