

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

Université Saad Dahleb , Blida-1-



Faculté de Technologie

Département d'automatique & Electrotechnique

MEMOIRE DE MASTER

Spécialité : Machines électriques

Présenté par :

DAIKECHE ABDELHAMID

BOURI HAMZA

THEME :

**Etude de la régulation de tension
d'un groupe électrogène.**

Promoteur :

Pr KOUCHIH DJILALI

Année Universitaire : 2024/2025

Remerciement

Remerciements à Dieu , je remercie Dieu pour m'avoir permis de mener à bien ce travail, avec force, patience et persévérance.

Nous tenons à remercier notre encadreur monsieur et **Pr KOUCHIH DJILALI** qui a bien voulu nous diriger durant notre travail.

Nous tenons aussi à remercier tous les membres du jury qui ont accepté d'examiner notre travail.

Nos remerciements vont aussi vers tous les enseignants de notre département qui ont participé à notre formation.

Dédicace

À mes chers parents, pour votre amour, vos sacrifices et votre soutien indéfectible. Votre confiance a été ma force tout au long de ce parcours. Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon amour, mon respect, et mes profonds sentiments envers ils.

À mes frères, mes sœurs et toute ma famille, Pour votre affection, votre présence constante et vos encouragements qui m'ont toujours porté.

À mes professeurs, Pour la qualité de votre encadrement, vos conseils précieux et votre engagement dans ma formation.

À mon meilleur ami, Pour ton amitié sincère, ta patience et ton soutien dans les moments de doute comme dans les réussites.

DAIKECHE ABDELHAMID

Dédicace

À ma très chère et unique maman, pour votre amour, sacrifice et ton soutien indéfectible. Votre confiance a été ma force tout au long de ce parcours. Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon amour, mon respect, et mes profonds sentiments envers vous.

A mon défunt père (Allah yarahmou)

À mes frères, ma femme et ma petite et très cher fille Yasmine et toute ma famille, Pour votre affection, votre présence constante et vos encouragements qui m'ont toujours porté.

À mes professeurs, Pour la qualité de votre encadrement, vos conseils précieux et votre engagement dans ma formation.

À **Mr Bilal Louraichi** directeur technique au sein de l'entreprise Cummins Algerie.

Au professeur Réda Dermouche.

À mes meilleurs amis, Pour ton amitié sincère, ta patience et ton soutien dans les moments de doute comme dans les réussites.

BOURI HAMZA

RÉSUMÉ

Résumé

Ce travail porte sur l'étude de la régulation de tension d'un groupe électrogène à l'aide de **MATLAB**. Le rôle du régulateur automatique de tension (**AVR**) est analysé afin de comprendre son impact sur la stabilité de la tension en sortie. Une modélisation du système, incluant la génératrice synchrone et l'**AVR** de correcteur **PI**. Des simulations sont réalisées pour observer la réponse du système face à différentes perturbations de charge.

Mots-Clés : Alternateur, Modélisation, Régulation de tension, simulation

Abstract

This work focuses on the study of voltage regulation in a generator set using **MATLAB**. The role of the Automatic Voltage Regulator (**AVR**) is analyzed to understand its impact on output voltage stability. A system model, including the synchronous generator and the **AVR** with **PI** corrector. Simulations are carried out to observe the system & response to various load disturbances.

Key-words: Alternator, modeling, Voltage regulation, simulation

ملخص

في هذا العمل، تم دراسة نظام تنظيم الجهد لمولد متزامن باستخدام بيئة **MATLAB** يتمثل الدور الأساسي لمنظم الجهد الأوتوماتيكي **AVR** في الحفاظ على استقرار الجهد الخارج من المولد رغم التغيرات التي قد تطرأ على الحمل. لأجل ذلك، تم تطوير نموذج كامل للنظام يشمل المولد المتزامن، منظم الجهد، بالإضافة إلى مصحح أوتوماتيكي من نوع **PI** كما تم إجراء عدة محاكاة بهدف تحليل السلوك الديناميكي للنظام تحت تأثير اضطرابات مختلفة على الحمل، وذلك لتقييم كفاءة المنظم ومدى فعاليته في تثبيت الجهد الخارجي للمولد.

الكلمات المفتاحية: مولد متزامن، نمذجة، تنظيم الجهد، محاكاة

Sommaire

Introduction Générale	1
------------------------------------	----------

Chapitre I : GENERALITES SUR LE GROUPE ELECTROGENE

Introduction.....	3
I.1. Définition d'un groupe électrogène	3
I.2. Fonctionnement des groupes électrogènes	3
I.3. Les puissances d'un groupe électrogène	4
I.3.1. La puissance continue	4
I.3.2. La puissance de secours.....	4
I.4. Exigences de la puissance de secours.....	4
I.5.Synoptique du processus de conversion d'énergie pour un groupe électrogène.....	5
I.6. Description global des éléments principaux d'un groupe électrogène	6
I.6.1. La partie thermique	6
I.6.1.1. Les types des moteurs thermiques dans les groupes électrogènes	7
I.6.1.2. Systèmes de refroidissement.....	8
I.6.1.2.1. Types de systèmes de refroidissement.....	8
I.6.1.2.1.1. Refroidissement par air	8
I.6.1.2.1.2. Refroidissement par liquide.....	8
I.6.1.3. Système de carburant	9
I.6.1.4. Système de lubrification.....	9
I.6.1.5. Système d'échappement.....	9
I.6.2. La partie commande.....	10
I.6.2.1. Utilisation d'un groupe électrogène comme alimentation secours	10
I.6.2.2. Utilisation d'un groupe électrogène comme source principale d'énergie	11

I.6.2.3. Utilisation d'un groupe électrogène comme source d'appoint.....	11
I.6.3. La partie électrique.....	13
I.6.3.1. Générer : produire du courant électrique via la génératrice.....	13
I.6.3.1.1. génératrice (Alternateur)	13
I.6.3.1.2. Système de démarrage.....	14
I.6.3.2. Stabiliser : réguler la tension et la fréquence de sorti.....	15
I.6.3.2.1. AVR (Automatique Voltage Régulateur)	15
I.6.3.2.2. Régulateur de vitesse (ou module électronique de gestion moteur)	15
I.6.3.2.3. Capteurs de tension et de fréquence	16
I.6.3.3. Contrôler : gérer le fonctionnement du groupe électrogène.....	16
I.6.3.3.1. Contrôleur numérique (type DEEP, SEA, COMPEC, etc.)	17
I.6.3.3.2. Interface utilisateur (écran LCD, boutons de commande)	17
I.6.3.3.3. Capteurs (température, pression d'huile, niveau carburant, etc.)	17
I.6.3.4. Protéger : sécuriser le système contre les incidents électriques.....	18
I.6.3.4.1. Disjoncteurs et relais de protection	18
I.6.3.4.2. Fusibles	19
I.6.3.4.3. Capteurs de courant et de tension	19
I.6.3.5. Distribuer : acheminer le courant vers les équipements ou le réseau.....	19
I.6.3.5.1. Tableau de distribution	19
I.6.3.5.2. Inverseur de source (manuel ou automatique)	20
I.6.3.5.3. Barres de distribution, câblage, borniers	20
I.6.3.5.4. Systèmes de synchronisation (si fonctionnement en parallèle)	20
I.7. Type de groupe électrogène	20
I.7.1. Groupe électrogène diesel	20

I.7.2. Groupe électrogène à essence	21
I.7.3. Groupe électrogène à gaz	21
I.7.4. Groupe électrogènes inverter.....	22
I.8. La prévention des pannes d'un groupe électrogène diesel	23
I.8.1. Pannes liées au système de carburant	24
I.8.2. Pannes liées au système de démarrage et à la batterie	24
I.8.3. Pannes liées au système de refroidissement	24
I.8.4. Pannes liées au système électrique	24
I.8.5. Pannes liées au système d'échappement et aux émissions	24
I.8.6. Pannes mécaniques et d'entretien	25
I.9. Maintenance des groupes électrogènes et types	25
I.9.1. Maintenance préventive	25
I.9.2. Maintenance corrective	25
I.9.3. Maintenance conditionnelle	26
I.9.4. Maintenance proactive	26
I.9.5. Maintenance systématique	26
I.9.6. Maintenance de groupe électrogène de secours	26
I.10. Bonnes pratiques de maintenance	26
Conclusion.....	27

CHAPITRE II : DESCRIPTION DE LA GENERATRICE

Introduction.....	29
II.1. Définitions générale	29
II.1.1. La génératrice.....	29
II.1.2.Rotor.....	30

II.1.2.1. La description du rotor dans un groupe Électrogène	30
II.1.2.2. Les types du rotor	31
II.1.2.2.1. Rotor à pôles saillants (ou rotor à pôles visibles)	31
II.1.2.2.2. Rotor cylindrique (ou rotor lisse)	32
II.1.2.3. Types et sont domaines d'utilisation	33
II.1.3. Stator.....	33
II.1.3.1. La description du stator dans un groupe Électrogène.....	34
II.1.3.2. Les types du stator.....	35
II.1.3.3. Types et son domaines d'utilisation	37
II.2. Conception de la génératrice dans un groupe électrogène	38
II.2.1.Constitution principale.....	38
II.3. Processus de génération électrique : du moteur thermique à la charge	38
II.4. Les types de la génératrice.....	39
II.4.1. Génératrice à courant continu (DC)	39
II.4.2. Génératrice synchrone (Alternateur synchrone)	41
II.4.3. Génératrice asynchrone (ou alternateur asynchrone)	42
II.5. Les pannes de la génératrice	43
II.5.1. Absence totale de tension en sortie	43
II.5.2. Tension instable ou fluctuante	44
II.5.3. Surtension.....	44
II.5.4. Sous-tension.....	44
II.5.5. Défaut de fréquence (trop haute ou trop basse)	44
II.5.6. Courant de sortie asymétrique ou déséquilibré	45
II.5.7. Fuites de courant ou court-circuit à la masse.....	45

II.5.8. AVR brûlé ou hors service.....	45
II.6. Types des excitations de la génératrice	45
Conclusion.....	46

CHAPITRE III : MODELISATION DE LA GERATRICE SYNCHRONE

Introduction.....	48
III.1. Modélisation de la génératrice	48
III.1.1. Equations statoriques.....	48
III.1.1.1. Equations de tensions dans le repère ABC	48
III.1.1.2. Expressions des flux dans le repère ABC	49
III.1.1.3. Inductances statoriques	49
III.1.1.4. Transformation de Park	50
III.1.1.5. La transformation inverse de Park	50
III.1.1.6. Equations des tensions du repère $d - q$	51
III.1.2. Expressions des flux du repère $d - q$	51
III.1.2.1. Expression des flux rotoriques	52
III.1.2.2. Expressions des flux mutuels	52
III.2. Equations mécaniques	52
III.3. Expression du couple électromagnétique	53
III.3.1. Puissance électromagnétique P_{em}	53
III.4. Modèle d'état de la génératrice.....	54
III.4.1. Equations électriques statoriques	54
III.4.2. Equation rotorique	54
III.4.3. Equation mécanique	54
III.4.4. Equation du couplage.....	54

III.5. vecteur d'état	54
III.6. Analyse et interprétation des résultats sans régulation.....	54
Conclusion.....	59

CHAPITRE IV : TEST DES PERFORMANCES D'UN AVR

Introduction.....	61
IV.1. Fonctionnement des régulateurs de tension automatique (AVR)	61
IV.1.1. Mesure de la tension de sortie	62
IV.1.2. Comparaison avec une référence	63
IV.1.3. Correction automatique	64
IV.1.4. Stabilisation continue	64
IV.2. Les bénéfices d'un AVR pour un groupe électrogène.....	64
IV.3. Types des AVR's pour les groupes électrogène	65
IV.4. Le rôle de l'excitation	68
IV.4.1. Introduction.....	68
IV.4.2. Types d'excitations utilisées avec les AVR	68
IV.4.3. Choix d'un AVR (Automatique Voltage Régulateur)	70
IV.5. Introduction aux correcteurs dans les systèmes de régulation	72
IV.5.1. Description des correcteurs	72
IV.5.1.1. Définition des Correcteurs	72
IV.5.1.2. Rôle des Correcteurs	73
IV.5.1.3. Objectifs principaux.....	73
IV.6. Équation de transfert (exemple simplifié).....	76
IV.7. Classification des Correcteurs	76
IV.8. calcul de K_p et K_i	77

IV.9. Analyse et interprétation des résultats	81
Conclusion	87
Conclusion générale	89

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Schéma de principe d'une alimentation secours.....	4
Figure I.2 : Conversion d'énergie d'un groupe électrogène.....	5
Figure I.3 : Groupe électrogène marque cumins.....	5
Figure I.4 : Moteur thermique.....	6
Figure I.5 : Les quatre étapes d'un moteur thermique.....	7
Figure I.6 : Le système de refroidissement.....	8
Figure I.7 : Système de carburant	9
Figure I.8 : Système d'échappement.....	10
Figure I.9 : Alimentation d'un groupe électrogène comme point de secours.....	10
Figure I.10 : Utilisation d'un groupe électrogène comme source principale.....	11
Figure I.11 : Utilisation d'un groupe électrogène comme source d'appoint.....	12
Figure I.12 : La conversion de l'énergie dans la génératrice	14
Figure I.13 : Le fonctionnement général d'un groupe électrogène.....	14
Figure I.14 : Système de démarrage d'un moteur thermique.....	15
Figure I.15 : Système de régulation dans le groupe électrogène.....	16
Figure I.16 : Système de contrôle dans le groupe électrogène.....	18
Figure I.17 : Un disjoncteur et relai de protection.....	18
Figure I.18 : Fusibles.....	19
Figure I.19 : Capteur de courant et de tension	19
Figure I.20 : Groupe électrogène diesel.....	21
Figure I.21 : Groupe électrogène à essence	21
Figure I.22 : Groupe électrogène au gaz naturel.....	21
Figure II.1 : Fonctionnement en génératrice : alternateur.....	29
Figure II.2 : Représentation vectorielle : diagramme de Ben – Ehrenbourg.....	29

Figure II.3 : Rotor bobine.....	30
Figure II.4 : Rotor a poles saillants.....	32
Figure II.5 : Rotor cylindrique.....	32
Figure II.6 : Stator	34
Figure II.7: Stator triphasé bobine.....	35
Figure II.8 : Stator monophasé bobine.....	36
Figure II.9 : Stator a enroulements imbriqués.....	37
Figure II.10 : Génératrice a courant continue.....	40
Figure II.11 : Génératrice synchrone.....	41
Figure II.12 : Génératrice asynchrone	43
Figure II.13 : Les excitations de la machine.....	46
Figure III.1 : Représentation schématique de la génératrice synchrone a rotor bobiné sur repère (dq).....	50
Figure III.2 : Courant d'excitation	55
Figure III.3 : Les flux statorique	55
Figure III.4 : Les courant statorique.....	56
Figure III.5 : La tension d'excitation.....	57
Figure III.6 : Le couple électromagnétique.....	57
Figure III.7 : La tension de sortie d'une phase.....	58
Figure IV.1 : La boucle ferme d'un régulateur	61
Figure IV.2 : Excitatrice externe + avr.....	69
Figure IV.3 : Auto excitation d'un avr	69
Figure IV.4 : Bushes avr système.....	70
Figure IV.5 : Ajustement de courant d'excitation selon la variation de charge	81
Figure IV.6 : Ajustement des flux statorique selon la variation de charge.....	83

Figure IV.7 : Ajustement des courant statorique selon la variation de charge.....	84
Figure IV.8 : Ajustement de couple électromagnétique selon la variation de charge.....	85
Figure IV.9 : la tension de sortie d'une phase	85

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Exigence de la puissance de secours.....	4
Tableau I.2 : Les caractéristiques spécifiques des groupes électrogènes.....	22
Tableau II.1 : Types et domaines du rotor utilisé dans les groupes électrogène.....	33
Tableau II.2 : Types et domaines du stator utilisé dans les groupes électrogène.....	37
Tableau III.1: Caractéristiques de de la génératrice synchrone.....	59
Tableau IV.1 : Choix d'un avr cote caractéristiques.....	71
Tableau IV.2: Choix d'un avr selon le type d'excitation.....	71
Tableau IV.3: Choix d'un avr selon les paramètres électrique.....	71
Tableau IV.4: Choix d'un avr selon le type de charge.....	72
Tableau IV.5: Classification des correcteurs	76
Tableau IV.6: Comparaison caractéristiques ifd sans et avec régulation.....	82
Tableau IV.7 : Comparaison caractéristiques de vf sans et avec régulation	83
Tableau IV.8 : Caractéristiques de la génératrice après régulation.....	86
Tableau IV.9 : Comparaison finale de tension de sortie avant et après la régulation.....	87

LISTE DES ABREVIATIONS

R_s : Résistance statorique

v_{abcs} : Tension statorique dans le repère abc

i_{abcs} : Courant statorique dans le repère abc

φ_{abcs} : Flux statorique dans le repère abc

φ_f : Flux d'excitation

X_s : Réactance synchrone

d : Axe direct

q : Axe quadrature

K_s : Matrice de transformation de park

φ_{dqos} : Flux statorique dans le repère dq0

v_{dqos} : Tension statorique dans le repère dq0

i_{dqos} : Courant statorique dans le repère dq0

V_f : Tension d'excitation

R_f : Résistance d'excitation

L_f : Inductance d'excitation

ω_r : Vitesse mécanique (rad/s)

M_{fd} : Inductance mutuelle entre rotor et stator

L_d : Inductance axe direct

L_q : Inductance axe quadrature

L_o : Inductance axe homopolaire

L_{ch} : Inductance de charge

R_{ch} : Résistance de charge

ω_e : Vitesse de synchronisme (rad/s)

T_m : Couple mécanique appliqué

J : Moment d'inertie

C_e : Couple électromagnétique

T_f : Couple de frottement

w_m : L'énergie magnétique stockée

θ : Position angulaire

P_{em} : Puissance électromagnétique

P : Nombre paire pole

$i_f = i_{fd}$: Courant d'excitation

K : Constante (machine ou système)

PI : Correcteur proportionnel-intégral

PID : Correcteur proportionnel-intégral-dérivatif

AVR : Régulateur automatique de tension

f_s : Fréquence statorique (Hz)

$e(t)$: Erreur de régulation en fonction du temps

V_s : Tension de sortie

K_d : Gain dérivatif

K_p : Gain proportionnel

K_i : Gain intégral

K_e : Gain de l'amplificateur ou de l'excitation

G_{BO} : Fonction de transfert en boucle ouverte

G_{BF} : Fonction de transfert en boucle fermée

T_e : Temps d'établissement

V_{ref} : Tension de référence

V_{mes} : Tension mesurée

ω_n : Pulsation naturelle (rad/s)

ξ : Coefficient d'amortissement

t : temps

INTRODUCTION

GENERALE

L'électrotechnique peut se définir comme étant l'association de deux domaines qui sont l'électricité et la technique, profondément liés, ils sont à l'origine de l'ensemble des applications de l'énergie électrique, la filière électrotechnique joue un rôle primordial dans la société moderne : alarme voiture, chauffage ... Elle est présentée au quotidien au travers d'objets et d'équipements devenu indispensable à nos mode de vie. L'industrie n'est pas en reste, les secteurs sont variés : bâtiment, transport ferroviaire, chimie, intervention sur des constructions électriques (réseau), etc...

Cette filière regroupe des techniques et métiers très variés et liés à la fabrication d'équipements et leurs maintenances

L'histoire de la production d'électricité à la consommation ? L'électrotechnique ou génie électrique est aussi bien la science de la mise en œuvre que la gestion technique des systèmes électriques tels que : la production, le nucléaire, l'éolien, le solaire, l'hydraulique, le transport problématique majeur d'étude liée à l'électricité, la distribution acheminement aux différents consommateurs.

L'électrotechnique se divise en deux grandes familles d'installation, d'un côté l'habitat tertiaire comprend les installations électriques des bâtiments bureaux etc.... de l'autre côté l'électricité industrielle via la mise en œuvre de l'énergie électrique nécessaire au procédé de fabrication des entreprises et des automatismes industriels.

Dans les systèmes de production d'énergie autonome tels que les groupes électrogènes, la génératrice synchrone constitue un élément central pour assurer une alimentation électrique fiable. Or, dans les conditions réelles d'exploitation, la charge appliquée au système peut varier de manière significative (branchements ou débranchements d'équipements), ce qui engendre des fluctuations de la tension de sortie. Ces variations peuvent perturber le fonctionnement des appareils sensibles et dégrader la qualité de l'énergie fournie.

Notre génératrice, à savoir une génératrice synchrone triphasée à rotor bobiné à pôles saillants, fonctionnant à vitesse constante, est modélisée selon ses équations électromagnétiques dynamiques. Bien que cette modélisation permette de prédire son comportement, elle met en évidence une dépendance forte de la tension de sortie vis-à-vis des variations de charge, en particulier en l'absence de régulation.

La problématique centrale réside donc dans la capacité à maintenir une tension de sortie stable et conforme, malgré les perturbations induites par les variations de charge. Ceci soulève plusieurs défis techniques :

- Comment modéliser avec précision le comportement dynamique de la génératrice à pôles saillants ?
- Quelles sont les limites de la réponse naturelle du système sans régulation ?
- Comment concevoir un système de régulation automatique (AVR, correcteur PI) permettant d'assurer la stabilité de la tension en toutes conditions ?

L'enjeu est d'intégrer une régulation efficace en exploitant la modélisation dynamique, afin de garantir une tension stable quelles que soient les conditions de charge. Cette étude vise ainsi à proposer une solution de régulation performante, validée par simulation numérique, et à analyser son impact sur la stabilité et la qualité de l'énergie électrique produite par rapport à nos besoins.

CHAPITRE I :
GÉNÉRALITÉS SUR LES
GROUPEs ÉLECTROGÈNES

Introduction

Les groupes électrogènes sont utilisés dans de nombreux contextes, tels que les centrales électriques, les bâtiments industriels, les chantiers de construction, les hôpitaux, les centres commerciaux, les événements en plein air et les situations d'urgence où l'alimentation en électricité est interrompue.

Et pour cela, ce besoin d'énergie électrique doit être continu et assuré dans ses zones et secteurs, surtout où on a des coupures de courant régulières, tout ça pour protéger les marchandises ou les équipements industriels etc....

Et pour cela aura besoin donc d'une autre source de secours nécessaire pour assurer la continuité de la production.

La protection de fourniture de cette énergie sera assurée par plusieurs solutions tels que : deux sources en alternance, des groupes électrogènes, postes transfos etc....

Pour cela, dans ce chapitre, on le consacre sur les généralités du groupe électrogène, de son fonctionnement et ses composants de base .

I.1. Définition d'un groupe électrogène :

Un groupe électrogène est un dispositif autonome qui permet de produire de l'électricité à partir d'une source d'énergie, généralement un moteur thermique qui peut être alimenté par du diesel dans la moyenne et grande puissance, de l'essence généralement dans la petite puissance.

La puissance d'un groupe électrogène s'exprime généralement en KVA (kilo Volt Ampère), la catégorie du groupe électrogène dépend de sa taille, son poids et de son type du moteur à carburant utilisé. [1]

I.2. Fonctionnement des groupes électrogènes :

Les groupes électrogènes diesel fonctionnent en utilisant un moteur thermique diesel pour entraîner une turbine (généralement une génératrice) qui génère de l'électricité. Lorsque le moteur tourne, il entraîne la turbine qui produit de l'électricité. L'électricité produite est ensuite acheminée à un onduleur qui la convertit en courant alternatif (CA) pour alimenter les équipements électriques, le moteur thermique diesel est alimenté par du carburant diesel, qui est stocké dans un réservoir de carburant sur le groupe électrogène.

Les groupes électrogènes diesel sont particulièrement populaires en raison de leur fiabilité, de leur durabilité et de leur efficacité énergétique et ils peuvent fonctionner pendant de longues périodes sans interruption. [2]

I.3. Les puissances d'un groupe électrogène :

I.3.1. La puissance continue : La puissance continue est la puissance maximale accessible à la charge variable pendant un nombre illimité d'heures par an dans un réglage de charge variable, elle est utilisée généralement pour des applications commerciales et industrielles qui nécessitent une alimentation électrique constante. [3]

I.3.2. La puissance de secours : signifie la puissance disponible pour un moteur de secours en cas de panne d'électricité principale ou d'une autre façon c'est la puissance maximale qu'un groupe électrogène peut fournir pendant une période limitée.

Elles sont conçues pour fonctionner en mode secours seulement, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas conçus pour fonctionner à pleine charge pendant de longues périodes de temps. [4]

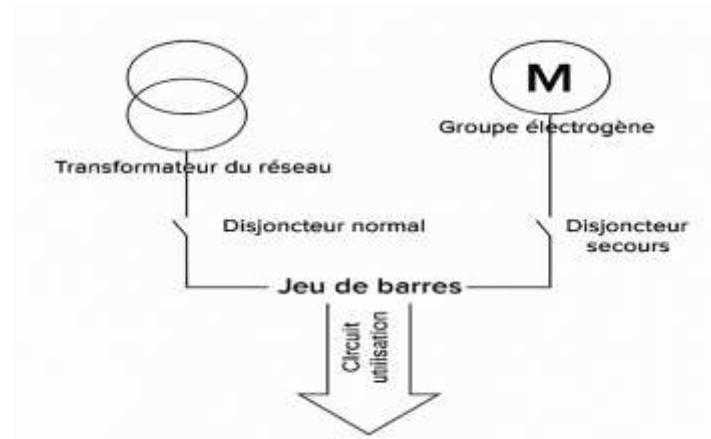


Figure I.1 : Schéma de principe d'une alimentation secours.

I.4. Exigences de la puissance de secours :

Les exigences dépendent des charges à alimenter.

Tableau I.1 : Exigence de la puissance de secours

Classe	Exigence	Exemples
G1	Ni tension ni fréquence	Éclairage
G2	Proche au réseau public	Ventilateur, pompe
G3	Etude stricte	Forme d'onde de la tension de génératrice
G4	Tension et fréquence	Systèmes informatiques

AFNOR. (2018). NF ISO 8528-1 : Groupes électrogènes entraînés par moteurs alternatifs à combustion interne – Partie 1 : Applications, définitions et classifications. Association Française de Normalisation.

I.5. Synoptique du processus de conversion d'énergie pour un groupe électrogène :

Tous les groupes électrogènes sont basés sur un même principe et qui est de transformer l'énergie thermique en énergie mécanique par rotation du moteur thermique (diesel), puis la transforme ce dernier de nouveau en énergie électrique par le biais d'une génératrice. [5]

Le processus si dessous est donné comme suit :

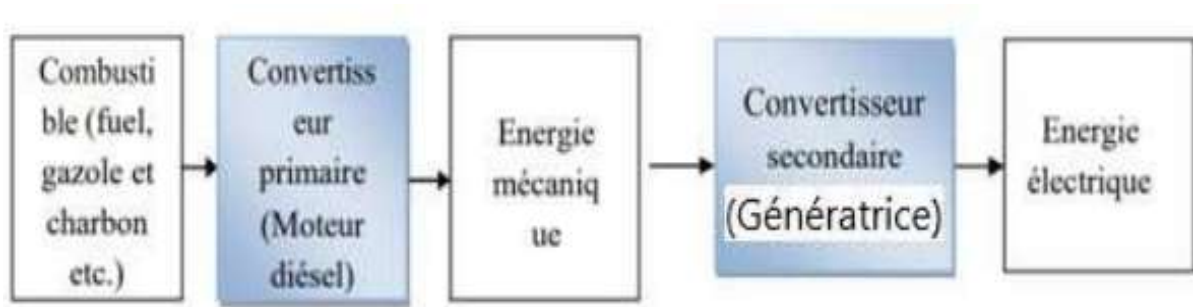


Figure I.2 : Conversion d'énergie d'un groupe électrogène

Groupe électrogène portable marque **CUMMINS** :

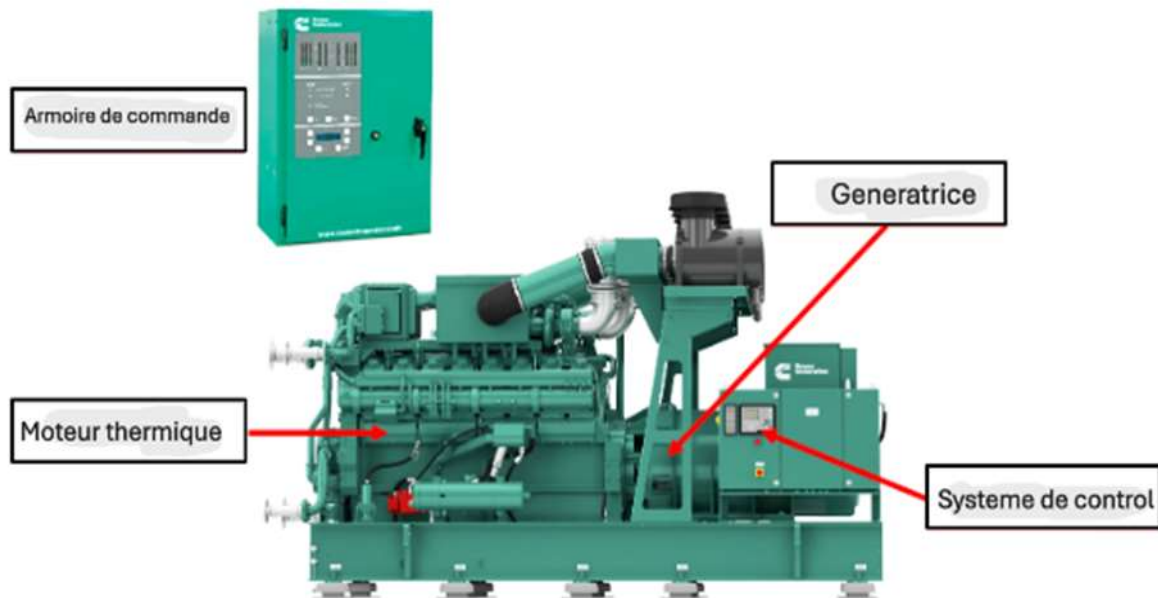


Figure I.3 : Groupe électrogène marque cumins

I.6. Description globale des éléments principaux d'un groupe électrogène :

Les éléments principaux du groupe électrogène appartiennent à trois parties essentielles :

I.6.1. La partie thermique :

La partie thermique est la transformation de l'énergie chimique (généralement du gasoil) en énergie mécanique par un moteur thermique. [6]

Le moteur thermique est la source d'énergie mécanique. Il fonctionne généralement au diesel, essence ou gaz, Il transforme l'énergie chimique contenue dans un carburant (diesel, essence, gaz) en énergie mécanique, qui sera ensuite convertie en électricité par l'alternateur.

Voici les grandes étapes générales pour transformer l'énergie thermique à l'énergie mécanique

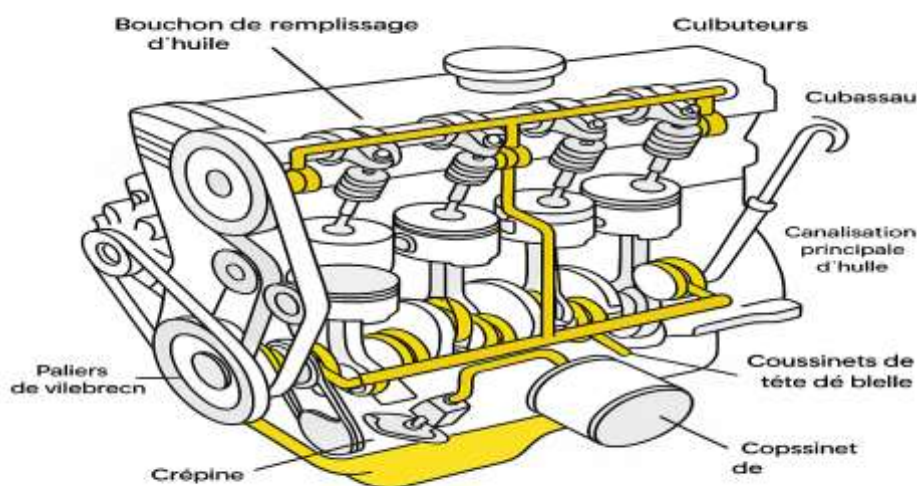


Figure I.4 : Moteur thermique

- Admission : Le moteur aspire de l'air (et du carburant pour les moteurs-essence).
- Compression : Le mélange air-carburant est comprimé dans le cylindre.
- Combustion/explosion : L'explosion (par étincelle ou auto-inflammation selon le type) pousse le piston.
- Échappement : Les gaz brûlés sont évacués par le système d'échappement.
- Transmission : Le mouvement du piston entraîne un vilebrequin, qui transmet une force rotative à l'alternateur. [7]

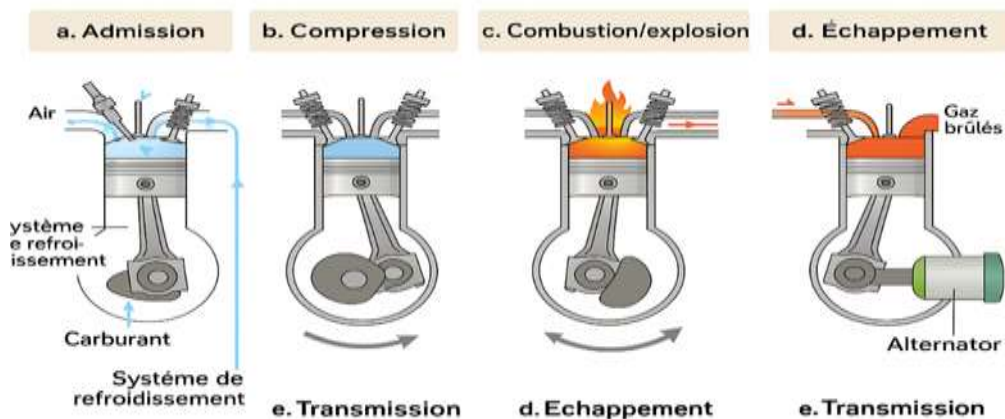


Figure I.5 : Les quatre étapes d'un moteur thermique

I.6.1.1. Les types des moteurs thermiques dans les groupes électrogènes :

Dans un groupe électrogène, les trois types de moteurs thermiques les plus couramment utilisés sont :

➤ Moteur diesel :

Le moteur diesel est le plus répandu, notamment pour les groupes électrogènes de moyenne et grande puissance. Il est apprécié pour sa robustesse, sa faible consommation de carburant et sa longévité. Toutefois, il est plus bruyant et émet plus de particules polluantes que d'autres types de moteurs, ce qui peut poser des problèmes en milieu urbain ou pour un usage intérieur.

➤ Moteur essence :

Le moteur à essence, quant à lui, est généralement utilisé pour les petits groupes électrogènes portables. Il est facile à démarrer, coûte moins cher à l'achat et convient bien aux usages ponctuels. Néanmoins, il consomme davantage de carburant que le moteur diesel, a une durée de vie plus courte et est moins adapté aux utilisations intensives.

➤ Moteur à gaz :

Le moteur à gaz est une alternative plus écologique. Il produit moins d'émissions polluantes, est plus silencieux et peut convenir à des installations en intérieur ou dans des environnements sensibles. En revanche, il nécessite un approvisionnement en gaz régulier, ce qui peut être contraignant, et son coût d'installation peut être plus élevé. [1]

I.6.1.2. Système de refroidissement :

Le système de refroidissement permet d'éviter et empêche la surchauffe du moteur thermique et l'alternateur (à air ou à liquide), pendant son fonctionnement. En effet, lors de la combustion du carburant, une grande quantité de chaleur est produite, et cette chaleur doit être dissipée pour assurer un fonctionnement sûr et durable du groupe électrogène. [8]

I.6.1.2.1. Types de systèmes de refroidissement :

I.6.1.2.1.1. Refroidissement par air :

- Utilisé dans les petits groupes électrogènes portables.
- L'air ambiant est forcé autour du moteur par un ventilateur.
- Avantages : Simplicité, légèreté, peu coûteux.
- Inconvénients : Moins efficace dans des environnements chauds ou confinés. [8]

I.6.1.2.1.2. Refroidissement par liquide (le plus courant) :

- Utilisé pour les groupes de moyenne et grande puissance.
- Le liquide (eau ou mélange eau-glycol) circule dans des canalisations autour du moteur pour absorber la chaleur.
- Le liquide est ensuite refroidi dans un radiateur (comme dans une voiture) avec l'aide d'un ventilateur.
- Avantages : Refroidissement plus stable et efficace.
- Inconvénients : Système plus complexe nécessitant de l'entretien. [8]

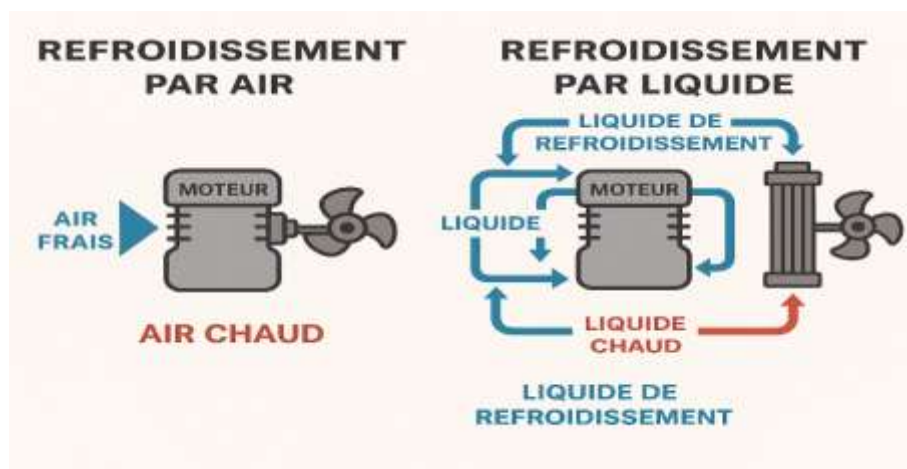


Figure I.6 : Le système de refroidissement

I.6.1.3. Système de carburant :

Le système de carburant a pour fonction de stocker, filtrer et acheminer le carburant (généralement du diesel ou de l'essence) vers le moteur thermique pour qu'il puisse fonctionner de manière continue et fiable, cela se passe par quatre étapes de base :

- Le carburant est stocké dans un réservoir.
- Une pompe à carburant aspire le carburant.
- Le carburant passe à travers un ou plusieurs filtres pour éliminer les impuretés et l'eau.
- Il est ensuite injecté dans le moteur par des injecteurs (ou un carburateur selon le type de moteur). [9]

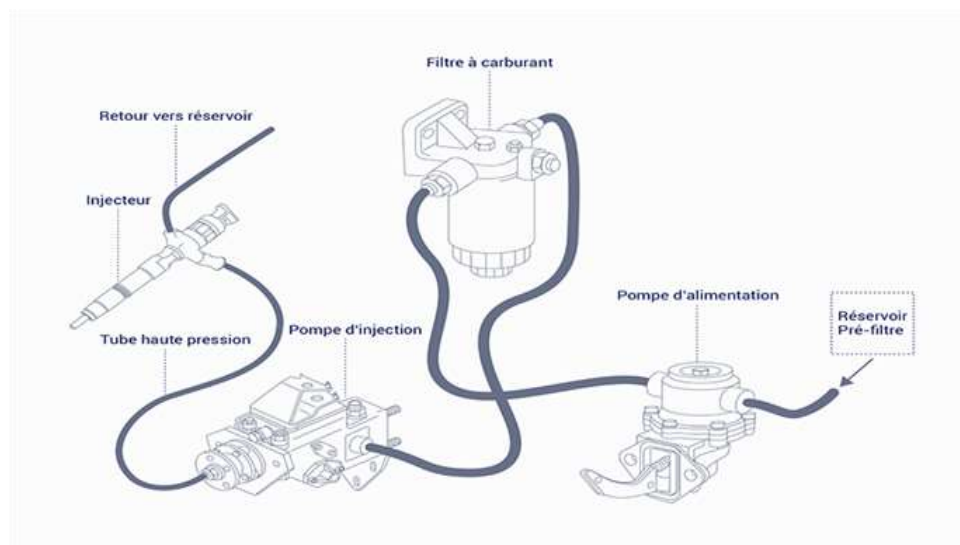


Figure I.7 : Système de carburant

I.6.1.4. Système de lubrification

Le système de lubrification assure la bonne circulation de l'huile dans le moteur thermique pour réduire les frottements, limiter l'usure des pièces mécaniques et éviter la surchauffe, C'est un élément essentiel pour la longévité et le bon fonctionnement du moteur du groupe électrogène. [10]

I.6.1.5. Système d'échappement

- Évacue les gaz produits lors de la combustion.
- Équipé parfois de silencieux pour réduire le bruit. [10]

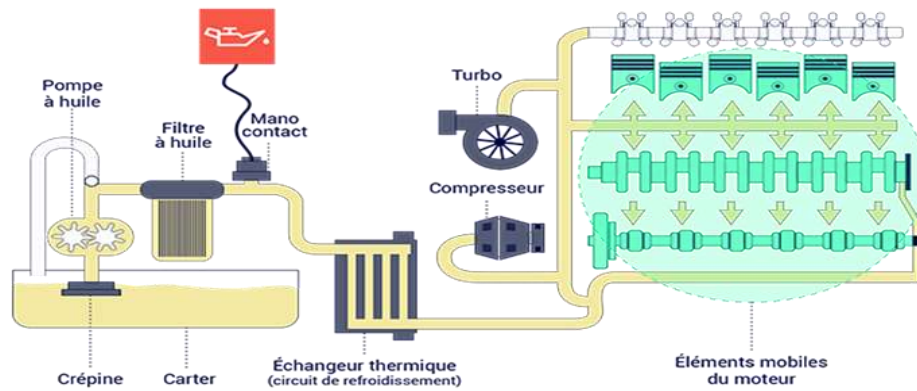


Figure I.8 : Système d'échappement

I.6.2. La partie commande :

La partie commande est la partie qui gère le démarrage et l'arrêt du groupe électrogène, elle est en fonction du mode d'utilisation de ce dernier il peut être utilisé avec différents manières tel que :

I.6.2.1. Utilisation d'un groupe électrogène comme alimentation secours :

Le cas où le groupe n'est utilisé qu'en cas d'absence de tension ou de déséquilibre du réseau. Ce démarrage peut être en manuel ou en utilisation automatique

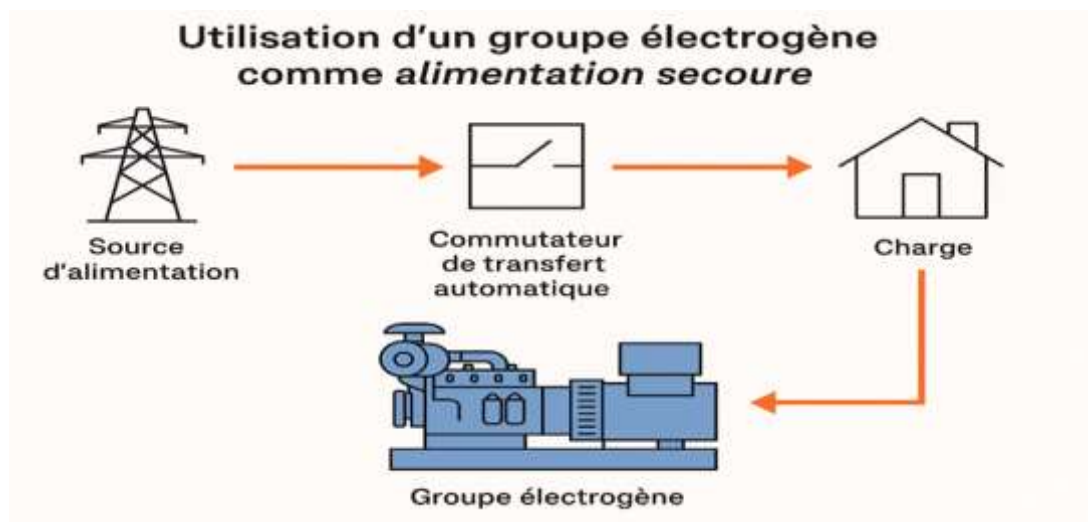


Figure I.9 : Alimentation d'un groupe électrogène comme point de secours

Exemple : Usine de fabrication de produits pharmaceutiques.

- L'usine dispose d'un groupe électrogène de secours pour maintenir les systèmes de contrôle de température, éclairage d'urgence, système de ventilation et autres équipements critiques lors d'une coupure de courant.

- Le groupe démarre automatiquement via un ATS en cas de coupure, permettant ainsi de préserver les conditions de fabrication sensibles et de respecter les normes de sécurité et d'hygiène.

I.6.2.2. Utilisation d'un groupe électrogène comme source principale d'énergie :

C'est le cas où le groupe utilise une seule source d'alimentation pour la charge. Il peut être commandé manuellement ou en permanence de fonctionnement.

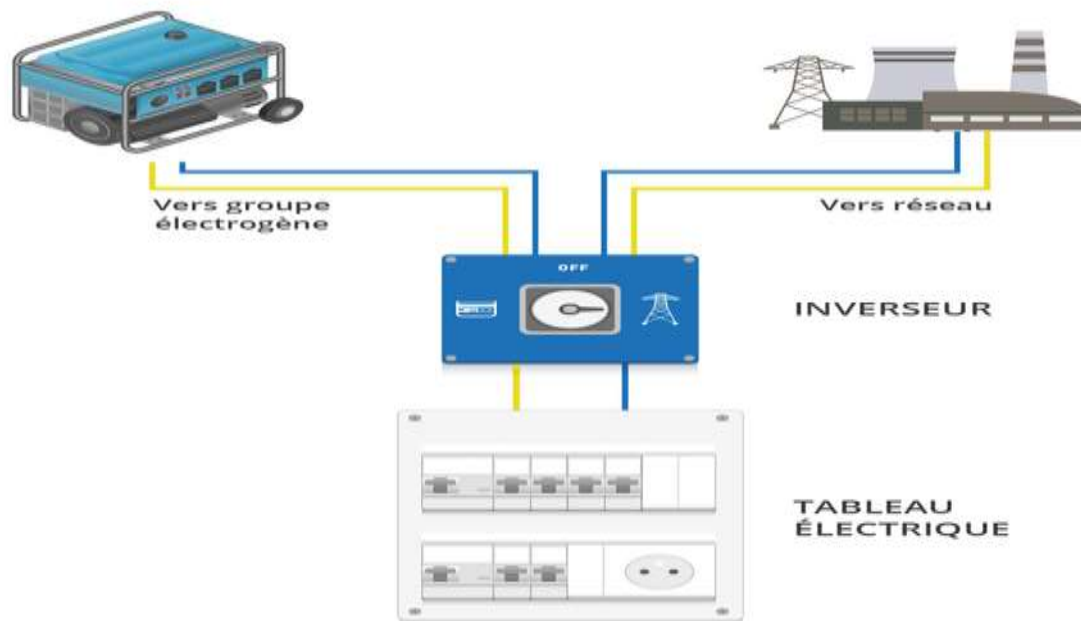


Figure I.10 : Utilisation d'un groupe électrogène comme source principale

Exemple : Plateforme pétrolière en mer

- En raison de l'éloignement du réseau électrique terrestre, le groupe électrogène fournit toute l'énergie nécessaire à la plateforme pour alimenter les équipements de production, les systèmes de sécurité et les installations de communication.
- L'alimentation électrique est en continu et peut être gérée manuellement ou automatiquement selon les besoins de l'opérateur.

I.6.2.3. Utilisation d'un groupe électrogène comme source d'appoint :

Le cas où la charge est très importante, la ligne du réseau doit être renforcée pour assurer la continuité de service, on parle alors du couplage de la génératrice avec le réseau. [11]

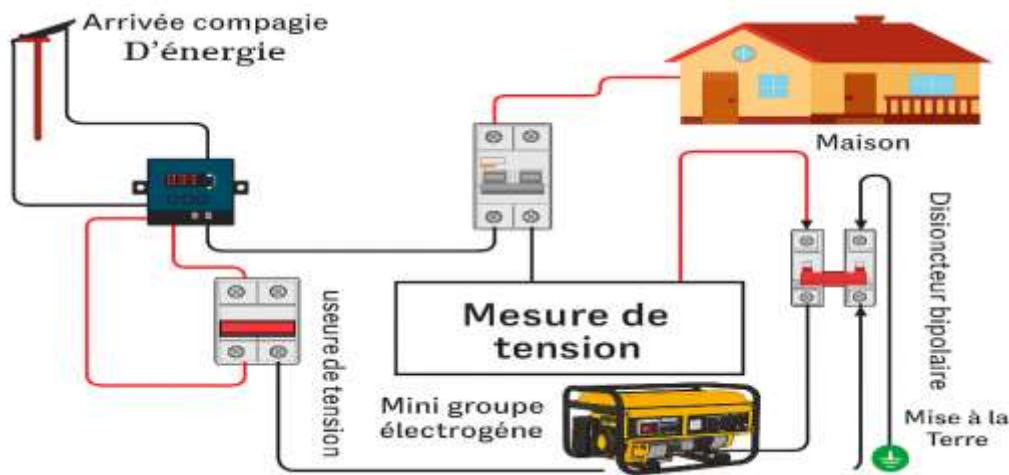


Figure I.11 : Utilisation d'un groupe électrogène comme source d'appoint

Exemple : Usine de production automobile

- Pendant la période de fabrication de modèles hautement personnalisés ou lors de sauts de production, l'usine demande plus de puissance que ce que le réseau peut fournir.
- Le groupe électrogène fonctionne en parallèle avec le réseau pour soutenir la production en fournissant l'énergie supplémentaire.
- La synchronisation est réalisée automatiquement, garantissant que la tension, la fréquence et l'ordre des phases soient compatibles avec celles du réseau, ce qui permet un fonctionnement harmonieux.

En appliquant les conditions de couplage qui suit :

- La tension du réseau et celle produite par le groupe sont presque égales.
- Même fréquence et l'ordre de phases (systèmes RST)
- Les deux systèmes doivent être en phase.

Les conditions ci-dessus nous permettent la synchronisation et le couplage du réseau au groupe.

Cette partie est commandée et contrôlée par le biais un système de contrôle et d'une commande électronique conçue spécialement aux besoins de ce groupe électrogène.

Ces systèmes sont supposés montés dans un coffret de commande posé soit dans l'habitacle du groupe coté électrique ou dans une armoire électrique placée à l'extérieur du groupe.

Le rôle de la commande est donc crucial pour :

- Assurer la sécurité des équipements et du personnel,

- Garantir la continuité de service,
- Adapter le fonctionnement du groupe aux besoins de l'exploitation. [12]

I.6.3. La partie électrique :

Toutes Les parties entrantes dans le cycle de transformation de l'énergie chimique jusqu'à l'énergie électrique sont capitales, mais, la partie électrique est essentiellement la partie la plus importante dans un groupe électrogène, cependant, cette partie comprend un dispositif de transformation essentiel dans son cycle et qui est la génératrice.

Cette partie regroupe divers composants et qui permettent à la : production, régulation, le contrôle, protection et la distribution de cette énergie, pour l'assurance d'une alimentation sécurisée et stable.

En l'occurrence, la fonction de chaque étape sera définie par :

- **Générer** : du courant électrique via la génératrice.
- **Stabiliser** : la tension et la fréquence de sortie.
- **Contrôler** : le fonctionnement du groupe (démarrage, arrêt, surveillance, etc. ...)
- **Protéger** : le système et les contrôleurs contre les incidents, risques et accidents électriques.
- **Distribuer** : le courant et le partage vers le réseau. [13]-[17]

I.6.3.1. Générer : produire du courant électrique via la génératrice

Fonctionnement : Un moteur thermique (diesel, gaz ou essence) entraîne la génératrice (alternateur) en rotation pour convertir l'énergie mécanique en énergie électrique (courant alternatif).

I.6.3.1.1. Génératrice (Alternateur) :

La génératrice, également appelée alternateur, est le composant du groupe électrogène chargé de produire l'électricité. Elle transforme l'énergie mécanique transmise par le moteur thermique en énergie électrique grâce au principe de l'induction électromagnétique.

- Le moteur thermique fait tourner l'arbre de la génératrice.
- Le rotor (partie tournante de la génératrice), équipé d'un champ magnétique, tourne à grande vitesse.
- Ce mouvement crée un champ magnétique variable à l'intérieur du stator (partie fixe composée de bobinages en cuivre).

- Le courant alternatif (AC) est ainsi induit dans les bobines du stator. [15]



Figure I.12 : La conversion de l'énergie dans la génératrice

Ce processus est basé sur **la loi de Faraday** de l'induction électromagnétique.

FUNCTIONNEMENT D'UN GROUPE ÉLECTROGÈNE

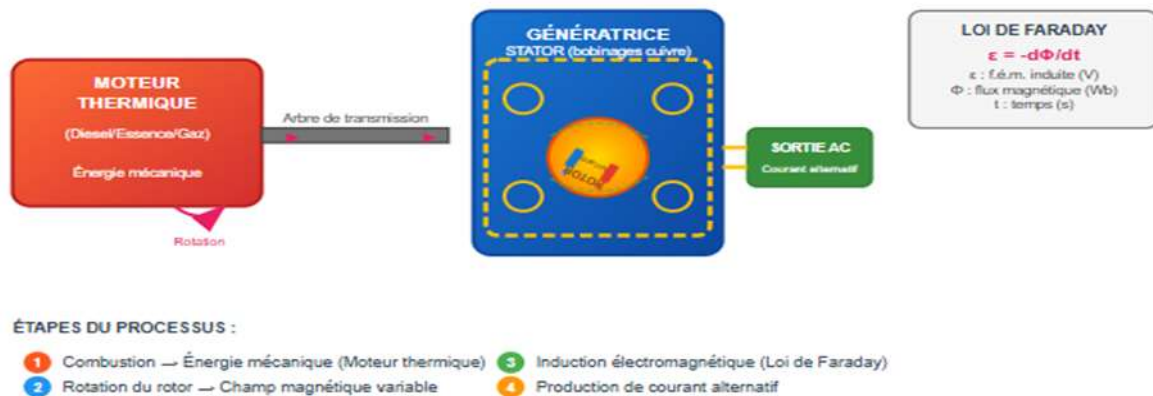


Figure I.13 : Le fonctionnement général d'un groupe électrogène

I.6.3.1.2. Système de démarrage (batterie, démarreur) :

- Rôle : Permettre le lancement du moteur thermique.
- Description :
 - Le démarreur est un moteur électrique alimenté par une batterie (généralement 12V ou 24V).
 - Lorsqu'on active le démarrage, le démarreur fait tourner le moteur thermique jusqu'à ce que celui-ci atteigne un régime suffisant pour fonctionner seul.
 - Un relais de démarrage ou un contacteur permet de piloter le démarreur via l'automate de commande.
 - Une alimentation de secours ou un chargeur de batterie est souvent intégré pour maintenir la batterie chargée. [19]

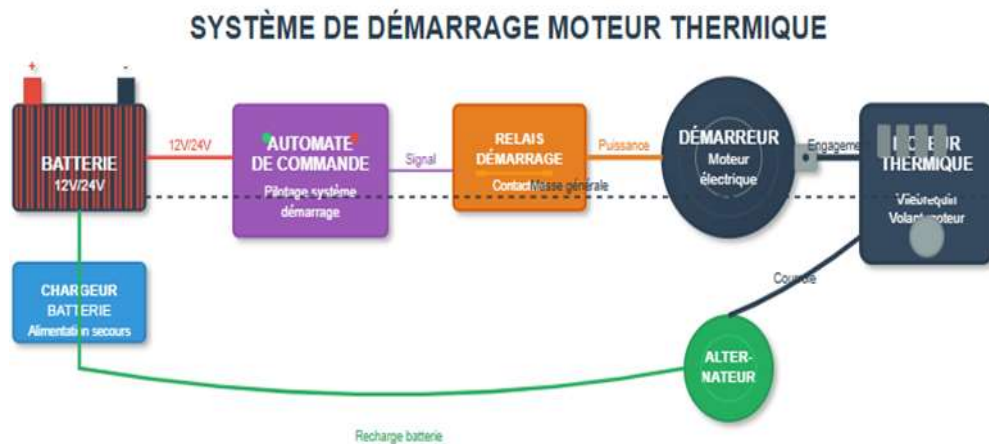


Figure I.14 : Système de démarrage d'un moteur thermique

I.6.3.2. Stabiliser : réguler la tension et la fréquence de sortie :

I.6.3.2.1. AVR (Automatique Voltage Régulateur) :

Le régulateur de tension, souvent appelé AVR (Automatique Voltage Régulateur), est un composant électronique qui stabilise automatiquement la tension de sortie du groupe électrogène, quelles que soient les variations de charge ou de vitesse du moteur.

- Rôle : Des régulateurs assurent que la tension et la fréquence du courant produit restent constantes malgré les variations de charge ou de vitesse du moteur.
 - Description de fonctionnement :
 - L'AVR mesure en temps réel la tension de sortie de l'alternateur.
 - En fonction de cette mesure, il ajuste l'excitation (le courant injecté dans le rotor de l'alternateur) pour stabiliser la tension.
 - Il compense ainsi les variations de charge (par exemple, lorsqu'une machine se met en marche).
 - Il est souvent intégré à l'alternateur ou monté à proximité dans le boîtier de commande.
- [20]

I.6.3.2.2. Régulateur de vitesse (ou module électronique de gestion moteur) :

- Rôle : Maintenir une fréquence de sortie stable, généralement 50 Hz (Europe) ou 60 Hz (Amérique du Nord).
- Description :
 - La fréquence dépend directement de la vitesse de rotation du moteur thermique.

- Le régulateur ajuste l'ouverture de la vanne de carburant ou commande les injecteurs pour maintenir le régime moteur constant.
- Il peut être mécanique (ancien modèle à masselottes) ou électronique (plus précis, avec capteur de régime).
- Ce dispositif garantit que les équipements électriques connectés reçoivent une fréquence correcte. [21]

I.6.3.2.3. Capteurs de tension et de fréquence :

- Rôle : Mesurer les valeurs réelles de tension et de fréquence pour permettre leur régulation.
- Description :
 - Ces capteurs (ou sondes) sont intégrés dans le système de commande.
 - Les mesures sont envoyées à l'AVR, au régulateur de vitesse, ou au contrôleur central pour traitement.
 - Ils permettent également d'afficher les valeurs en temps réel sur l'interface utilisateur.
 - En cas d'écart anormal, ils déclenchent des alarmes ou des actions de correction automatique. [22]

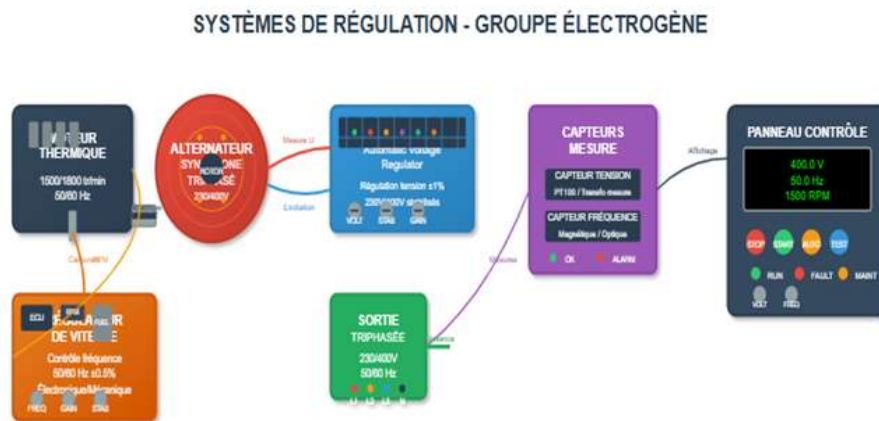


Figure I.15 : Système de régulation dans le groupe électrogène

I.6.3.3. Contrôler : gérer le fonctionnement du groupe électrogène :

Une unité de commande (automate ou contrôleur) surveille les paramètres du groupe et permet les actions automatiques ou manuelles (démarrage, arrêt, test, mode secours, etc.).

I.6.3.3.1. Contrôleur numérique (type DEEP, SEA, COMPEC, etc.) :

- Rôle : C'est le "cerveau" du système qui gère automatiquement toutes les opérations du groupe.
- Description :
 - Interface de gestion électronique programmée pour gérer le démarrage, l'arrêt, les alarmes et la surveillance.
 - Peut fonctionner en mode manuel, automatique ou distant.
 - Intègre souvent des logiques de sécurité et de priorités (ex. : fonctionnement en cas de coupure réseau).
 - Peut aussi gérer la synchronisation avec d'autres groupes ou le réseau.

I.6.3.3.2. Interface utilisateur (écran LCD, boutons de commande) :

- Rôle : Permet à l'opérateur d'interagir avec le contrôleur pour surveiller et modifier les paramètres.
- Description :
 - Affiche en temps réel la tension, fréquence, courant, température, pression, niveau carburant, alarmes, etc.
 - Permet de lancer manuellement un test ou de configurer des seuils d'alerte.
 - Peut-être tactile ou à boutons physiques selon le modèle.

I.6.3.3.3. Capteurs (température, pression d'huile, niveau carburant, etc.) :

- Rôle : Fournir des données au contrôleur pour la surveillance et la sécurité.
- Description :
 - Capteur de température moteur : évite les surchauffes.
 - Capteur de pression d'huile : protège le moteur contre les dommages internes.
 - Capteur de niveau de carburant : prévient les pannes sèches.
 - Capteurs reliés à des alarmes ou à des seuils d'arrêt d'urgence. [22]

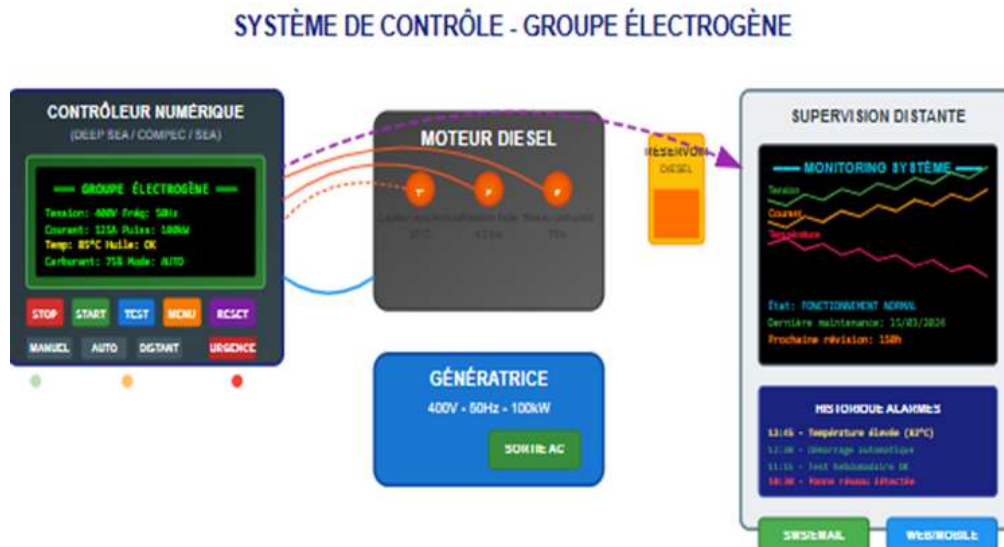


Figure I.16 : Système de contrôle dans le groupe électrogène

I.6.3.4. Protéger : sécuriser le système contre les incidents électriques :

Des dispositifs de protection détectent les anomalies (surtension, surintensité, court-circuit, défaut d'isolement) et déclenchent l'arrêt ou la déconnexion du système si nécessaire.

I.6.3.4.1. Disjoncteurs et relais de protection :

- Rôle : Couper automatiquement le circuit en cas de surintensité ou de court-circuit.
- Description :
 - Le disjoncteur principal interrompt le courant en cas de défaut grave.
 - Les relais de protection détectent les anomalies (surcharge, déséquilibre de phase, etc.) et commandent l'arrêt.
 - Ils évitent les dommages aux équipements et aux personnes. [23]



Figure I.17 : Un disjoncteur et relai de protection

I.6.3.4.2. Fusibles :

- Rôle : Protéger individuellement certains composants en cas de surcharge locale.
- Description :
 - Élément sacrificiel qui fond lorsqu'un courant anormal passe.
 - Utilisé sur des circuits secondaires (alimentation de contrôle, éclairage, capteurs...).
 - Moins coûteux que les disjoncteurs et très rapide à agir. [24]

**Figure I.18 : Fusibles****I.6.3.4.3. Capteurs de courant et de tension :**

- Rôle : Mesurer en continu les paramètres électriques pour détecter les défauts.
- Description :
 - Capteurs de courant (torrides) : surveillent l'intensité absorbée.
 - Capteurs de tension : détectent les surtensions ou chutes de tension.
 - Ces mesures sont exploitées par les relais ou le contrôleur pour agir rapidement. [25]

**Figure I.19 : Capteur de courant et de tension****I.6.3.5. Distribuer : acheminer le courant vers les équipements ou le réseau :**

Le courant est envoyé vers des tableaux électriques pour être distribué aux différentes charges ou injecté dans le réseau via un inverseur de source.

I.6.3.5.1. Tableau de distribution :

- Rôle : Répartir le courant vers différents circuits ou équipements.
- Description :
 - Contient les barres de répartition, disjoncteurs secondaires et les connecteurs.
 - Permet d'isoler des zones, d'ajouter ou de retirer des circuits, et de gérer la charge.
 - Peut-être basse, moyenne ou haute tension selon l'application. [26]

I.6.3.5.2. Inverseur de source (manuel ou automatique) :

- Rôle : Bascule entre le réseau électrique principal et le groupe électrogène.
- Description :
 - En cas de coupure réseau, l'inverseur commute automatiquement vers le groupe.
 - Une fois le réseau rétabli, il repasse automatiquement sur ce dernier.
 - Peut-être manuel dans les installations simples, ou automatique (ATS) dans les systèmes critiques. [26]

I.6.3.5.3. Barres de distribution, câblage, borniers :

- Rôle : Acheminer physiquement le courant vers les différents points de consommation.
- Description :
 - Les barres en cuivre ou aluminium transportent les fortes intensités.
 - Les borniers servent à raccorder les câbles en toute sécurité.
 - Les câbles doivent être dimensionnés selon la puissance transmise et protégés mécaniquement. [27]

I.6.3.5.4. Systèmes de synchronisation (si fonctionnement en parallèle) :

- Rôle : Assurer l'harmonisation du groupe avec une autre source (autre groupe ou réseau).
- Description :
 - Nécessaire pour faire fonctionner plusieurs groupes électrogènes en parallèle.
 - Le système aligne la tension, fréquence et phase entre les sources avant de les connecter ensemble.
 - Évite les retours de courant, les surtensions et les conflits de synchronisme. [26]

I.7. Type de groupe électrogène :**I.7.1. Groupe électrogène diesel :**

Les modèles diesel sont réputés pour leur durabilité et leur efficacité énergétique, ce qui en fait un choix préféré pour les applications industrielles lourdes et les utilisations prolongées. Bien qu'ils soient généralement plus coûteux à l'achat, leur longévité et leur robustesse compensent cet investissement initial. De plus, ils sont plus économiques en termes de consommation de carburant par rapport aux modèles à essence.



Figure I.20 : Groupe électrogène diesel

I.7.2. Groupe électrogène à essence :

Les groupes électrogènes à essence sont souvent privilégiés pour leurs coûts d'achat relativement bas et leur portabilité. Leur taille compacte les rend idéaux pour une utilisation domestique, pour des événements en plein air ou des chantiers exigeant de la mobilité. Toutefois, ils tendent à avoir une durée de vie plus courte et nécessitent des remplissages fréquents.



Figure I.21 : Groupe électrogène à essence

I.7.3. Groupe électrogène au gaz naturel :

Ces groupes électrogènes utilisent le gaz naturel comme source de carburant, ce qui en fait une option plus écologique. Ils émettent moins de polluants et sont souvent déployés dans des installations où le gaz naturel est facilement accessible. Leur maintenance est généralement moins coûteuse que celle de leurs homologues à diesel ou à essence, bien que leur puissance puisse être limitée par rapport à ces derniers.



Figure I.22 : Groupe électrogène au gaz naturel

I.7.4. Groupes électrogènes invertir :

Sont des groupes silencieux, ils ajustent automatiquement leur vitesse en fonction de la demande d'énergie, ce qui réduit le bruit. De plus, ils produisent une énergie de haute qualité, parfaite pour alimenter des appareils sensibles comme des ordinateurs ou des téléviseurs.

Les groupes électrogènes à diesel, essence et gaz naturel ont chacun des caractéristiques spécifiques qui les rendent plus ou moins adaptés selon l'usage, le coût, et les contraintes techniques. Cette comparaison est comme suit :

Tableau I.2 : Les caractéristiques spécifiques des groupes électrogènes

Type de groupe		Diesel	Essence	Gaz naturel
Carburant et fonctionnement	Carburant	Gazole	Essence	Méthane (GNV, GPL)
	Combustion	Allumage par compression	Allumage par étincelle	Allumage par étincelle
	Stockage carburant	Facile à stocker	Facile à stocker mais plus inflammable	Réseau ou bonbonnes (moins facile à stocker)
Rendement et efficacité	Rendement	Élevé (bon pour long usage)	Moyen	Bon à moyen
	Démarrage	Plus lent	Rapide	Variable
	Autonomie	Très bonne autonomie	Moyenne	Dépend du réseau ou de la capacité de stockage
Coût et achat	Coût à l'achat	Plus cher	Moins cher	Prie Variable
	Coût carburant	Moins cher que l'essence	Plus cher par litre	Très économique
	Entretien	Moins fréquent mais plus coûteux	Entretien plus fréquent	Moins d'entretien, moteur plus propre
Impact environnemental	Émissions CO ₂	Élevées	Moyennes	Faibles
	Pollution	Particules fines	Moins de particules, mais CO	Peu polluant

	Bruit	Bruyant	Bruit modéré	Assez silencieux
Applications recommandées	Idéal pour	Usage intensif, chantiers, secours longue durée	Usage occasionnel, portatif, domestique	Usage fixe, urbain, en continu avec réseau gaz

Dans un usage professionnel, les groupes électrogènes fonctionnant en diesel sont les plus efficaces et résistants, particulièrement sur les chantiers où ils ont une longue autonomie de réserve d'énergie et de secours, mais n'empêche pas de leurs désavantages notamment de l'achat ou sont très chers, aussi très bruyants et polluants.

De l'autre côté ; les groupes électrogènes à essence sont conçues pour un usage domestique (bricole) comme des campings ou autres, avec faciliter de démarrage et de manœuvre, aussi bien leurs couts d'achat est plus économique par rapport aux groupes diesel, sauf qu'ils sont moins durables et plus coûteux à long terme.

Par contre, les groupes électrogènes fonctionnant au gaz naturel sont les plus écologiques aussi que silencieux, ces groupes sont destinés pour un usage urbain ou encore fixe, tous en exigeant une installation bien spécifique. [28]

- Intensif et longue durée : Diesel
- Ponctuel et mobile : Essence
- Fixe et propre : Gaz naturel

I.8. La prévention des pannes d'un groupe électrogène diesel :

Les groupes électrogènes diesel sont des équipements essentiels pour assurer une alimentation électrique fiable, notamment dans les zones isolées ou lors de coupures de courant. Cependant, leur bon fonctionnement peut être compromis par diverses pannes, souvent liées à une maintenance insuffisante ou à une utilisation inappropriée. Une compréhension approfondie de ces pannes et de leurs diagnostics est cruciale pour garantir la performance et la longévité de ces générateurs.

I.8.1. Pannes liées au système de carburant :

- Problèmes d'alimentation en carburant : Une alimentation insuffisante en carburant peut être causée par un réservoir vide, une pompe à carburant défectueuse ou des filtres saturés. Cela peut entraîner un démarrage difficile ou une perte de puissance.
- Carburant contaminé : L'eau ou les impuretés dans le carburant peuvent obstruer les injecteurs et les filtres, réduisant ainsi l'efficacité du moteur.
- Air dans le système de carburant : La présence d'air peut empêcher le démarrage du générateur. Il est recommandé de faire fonctionner le générateur pendant quelques minutes par semaine pour purger l'air du système.

I.8.2. Pannes liées au système de démarrage et à la batterie :

- Batterie déchargée ou défectueuse : Une batterie en mauvais état peut empêcher le démarrage du moteur. Il est essentiel de vérifier régulièrement l'état de la batterie et de ses connexions.
- Problèmes de démarreur : Un démarreur défectueux ou un solénoïde en panne peut empêcher le moteur de démarrer. Un diagnostic approfondi est nécessaire pour identifier ces problèmes.

I.8.3. Pannes liées au système de refroidissement :

- Surchauffe du moteur : Une température excessive peut être causée par un niveau de liquide de refroidissement insuffisant, une pompe à eau défectueuse ou un radiateur bouché. Cela peut entraîner des arrêts d'urgence du générateur.
- Fuites dans le système de refroidissement : Des fuites d'eau peuvent réduire l'efficacité du refroidissement, provoquant une surchauffe et des arrêts du moteur.

I.8.4. Pannes liées au système électrique :

- Fluctuations de tension : Un régulateur de tension défectueux ou des connexions électriques desserrées peuvent entraîner des variations de la tension de sortie, affectant les équipements alimentés.
- Problèmes de la génératrice : Une génératrice endommagée peut ne pas produire une tension stable, entraînant des dysfonctionnements électriques.

I.8.5. Pannes liées au système d'échappement et aux émissions :

- Système d'échappement obstrué : Un échappement bouché peut réduire l'efficacité du générateur et entraîner une accumulation de gaz dangereux.
- Émissions de fumée : Des fumées noires peuvent indiquer une mauvaise combustion due à un filtre à air obstrué ou des injecteurs défectueux.

I.8.6. Pannes mécaniques et d'entretien :

- Usure des composants internes : L'usure des segments de piston, des coussinets ou des joints de culasse peut entraîner une perte de compression et une baisse de performance du moteur.
- Maintenance incorrecte : Un entretien insuffisant, tel que le non-changement de l'huile moteur ou le nettoyage des filtres, peut entraîner des pannes prématurées du générateur.

La prévention des pannes d'un groupe électrogène diesel repose sur une maintenance régulière et une surveillance attentive de ses différents systèmes. En identifiant rapidement les signes de défaillance et en intervenant de manière appropriée, il est possible de prolonger la durée de vie de l'équipement et d'assurer une alimentation électrique fiable. [29]

I.9. Maintenance des groupes électrogènes et types :

La maintenance des groupes électrogènes sera de garantir essentiellement leurs fiabilités, avec prolongation de leurs durées de vie et au final de prévenir les pannes possibles :

I.9.1. Maintenance préventive :

La maintenance préventive vise à réduire la probabilité de défaillance en effectuant des interventions planifiées selon des critères prédéfinis. Elle permet d'augmenter la durée de vie du groupe électrogène, d'améliorer sa fiabilité et de diminuer les coûts liés aux pannes imprévues. Elle s'applique généralement sur la régularisation telle que la vérification des niveaux de fluides, le remplacement des filtres, et l'inspection des composants principaux.

I.9.2. Maintenance corrective :

La maintenance corrective intervient après une défaillance pour remettre le groupe électrogène en état de fonctionnement. Elle se divise en :

- Maintenance palliative : Interventions temporaires visant à limiter les conséquences de la panne.
- Maintenance curative : Réparations visant à restaurer le fonctionnement normal de l'équipement.

- Maintenance a : Modifications visant à améliorer les performances ou la fiabilité du groupe électrogène.

I.9.3. Maintenance conditionnelle :

La maintenance conditionnelle est basée sur l'observation directe et l'analyse des conditions de fonctionnement du groupe électrogène. Elle implique des inspections régulières et des tests pour évaluer l'état des composants et décider des actions à entreprendre.

I.9.4. Maintenance proactive :

La maintenance proactive consiste à identifier et éliminer les causes profondes des défaillances pour éviter leur réapparition. Elle implique une analyse approfondie des défaillances passées et la mise en place de mesures correctives pour améliorer la conception ou l'exploitation du groupe électrogène.

I.9.5. Maintenance systématique :

La maintenance systématique suit un plan prédéfini basé sur les recommandations du fabricant et les conditions d'exploitation. Elle comprend des interventions régulières telles que la vidange d'huile, le remplacement des filtres, et l'inspection des systèmes de refroidissement et d'alimentation en carburant. Fluides and Lubricités.

I.9.6. Maintenance de groupe électrogène de secours :

Les groupes électrogènes de secours, utilisés en cas de panne du réseau principal, nécessitent une maintenance spécifique. Il est recommandé de les faire fonctionner périodiquement pour vérifier leur bon état de marche, de remplacer l'huile, les filtres et de vérifier les systèmes de démarrage et de régulation. [29]

I.10. Bonnes pratiques de maintenance :

- Démarrage régulier : Même en l'absence de panne, il est conseillé de démarrer le groupe électrogène tous les trois mois pour maintenir les composants lubrifiés. GRUPEL
- Nettoyage périodique : Maintenir le groupe électrogène propre, exempt de poussière et de saleté, pour éviter l'usure prématurée des composants. GRUPEL
- Vérification des systèmes de sécurité : Contrôler régulièrement les dispositifs de protection incendie, les systèmes de transfert de puissance et les capteurs pour assurer une réponse appropriée en cas de défaillance. EMSA Génération.

Conclusion :

Une maintenance adéquate des groupes électrogènes diesel est essentielle pour assurer leur fiabilité et leur longévité. En combinant différentes stratégies de maintenance adaptées aux besoins spécifiques de l'équipement et aux conditions d'exploitation, il est possible de minimiser les risques de panne et d'optimiser les performances de l'installation.

CHAPITRE II :

DESCRIPTION DES

GÉNÉRATRICES

Introduction :

Dans un groupe électrogène, chaque cycle de conversion d'énergie est capital, sauf que, la génératrice et qui représente la partie électrique du groupe électrogène est considérée comme la partie primordiale et majeure pour la conversion de l'énergie mécanique qui a été fournie par le moteur thermique en énergie électrique exploitable.

Dans ce chapitre, il nous étudie tous ce qui est de la description, fonctionnement et conception de la génératrice.

II.1. Définition générale :**II.1.1. La génératrice :**

Dite aussi machine synchrone, C'est une machine a conversion électromécanique de tensions et courants sous forme alternative, leur vitesse de rotation est synchronisée avec la fréquence des courants alternatifs délivrés. [30]

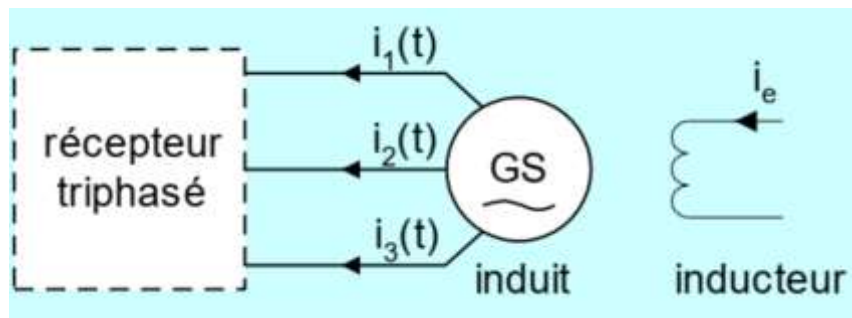


Figure II.1 : Fonctionnement en génératrice : alternateur

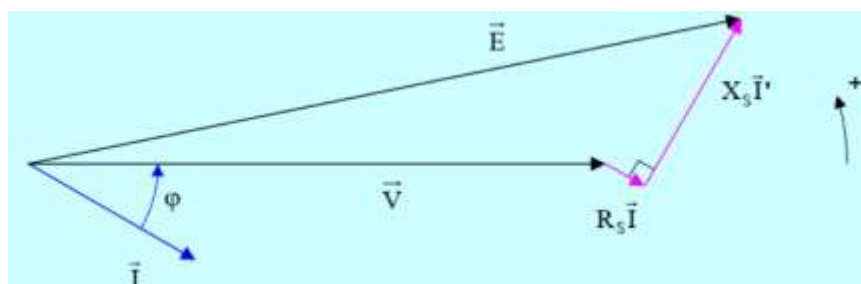


Figure II.2 : Représentation vectorielle : diagramme de Ben – Ehrenbourg

- Depuis la figure II.2 on obtient l'équation des tension suivantes :

$$\vec{V} = \vec{E} - (R_s \vec{I} + X_s \vec{I}')$$

Chute de tension en charge :

$$\Delta V = E - V$$

II.1.2. Rotor :

Le rotor est un dispositif mécanique et la partie mobile d'une machine électrique, telle qu'un moteur ou un générateur, qui tourne sous l'effet d'un champ magnétique. Dans les moteurs à courant alternatif (CA) ou à courant continu (CC), le rotor interagit avec le champ magnétique produit par le stator (partie fixe) pour générer un mouvement de rotation. Ce mouvement permet de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique ou, inversement, dans le cas d'un générateur, de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique. Les rotors peuvent être de différentes configurations, telles que ceux à (cage d'écureuil, à enroulements (bobine), ou à aimant permanent), en fonction du type de moteur et des exigences de performance. [30]

Dans un groupe électrogène, le rotor est une composante essentielle du générateur électrique. Il est connecté à un moteur à combustion (comme un moteur diesel ou à essence) qui entraîne la rotation du rotor. Ce rotor, qui tourne à une vitesse constante, est situé à l'intérieur du stator et induit un champ magnétique rotatif. Le mouvement du rotor génère une variation du flux magnétique dans les enroulements du stator, ce qui induit une tension électrique (courant alternatif) dans ces enroulements. Ainsi, dans le groupe électrogène, le rotor permet de convertir l'énergie mécanique produite par le moteur en énergie électrique qui sera utilisée pour alimenter des appareils électriques. [30]



Figure II.3: Rotor bobine

II.1.2.1. La description du rotor dans un groupe Électrogène :

- **ROTOR** : Le rotor d'un groupe électrogène est la partie tournante de l'alternateur, qui joue un rôle essentiel dans la génération de l'électricité.
- **Comportements** :
 - Axe ou arbre : pour transmettre la rotation depuis le moteur thermique.
 - Bobines d'excitation (ou aimants) : créent le champ magnétique.
 - Noyau en fer : pour renforcer le champ magnétique.

- Anneaux collecteurs ou bagues (dans certains types) : pour alimenter les bobines en courant continu. [30]

II.1.2.2. Les types du rotor :

Il existe deux grands types de rotors utilisés dans les groupes Électrogène en fait dans les machines électriques en générale, chacun étant adapté à des vitesses et des applications spécifiques, Le choix du type de rotor dans un alternateur dépend principalement de la vitesse de rotation à laquelle il doit fonctionner.

Le rotor à pôles saillants est spécialement adapté aux basses vitesses, généralement inférieures à 1500 tr/mn. Il est typiquement utilisé avec des moteurs diesel lents ou dans des centrales hydroélectriques, où les turbines tournent lentement. Ce type de rotor se distingue par la présence de pôles magnétiques en relief (en saillie), ce qui le rend particulièrement efficace pour générer un champ magnétique stable à faible vitesse.

En revanche, le rotor cylindrique, aussi appelé rotor lisse, est conçu pour fonctionner à des vitesses élevées, généralement entre 1500 et 3000 tr/min. Il convient parfaitement aux moteurs rapides, comme les moteurs diesel à haute vitesse ou à essence, couramment utilisés dans les groupes électrogènes compacts ou mobiles. Sa forme lisse et bien équilibrée lui permet de tourner de manière stable et silencieuse, même à grande vitesse, tout en minimisant les pertes mécaniques. [31]

II.1.2.2.1. Rotor à pôles saillants (ou rotor à pôles visibles) :

➤ Description :

C'est un type de rotor où les pôles magnétiques sont bien visibles et dépassent de la surface du rotor. Chaque pôle est enroulé d'une bobine d'excitation, et l'ensemble est monté sur un noyau en fer. Il est principalement utilisé dans les machines tournant à basse vitesse, comme les groupes électrogènes à moteur diesel lent ou les turbines hydrauliques. Ce rotor permet de générer un champ magnétique fort et faible vitesse. [31]

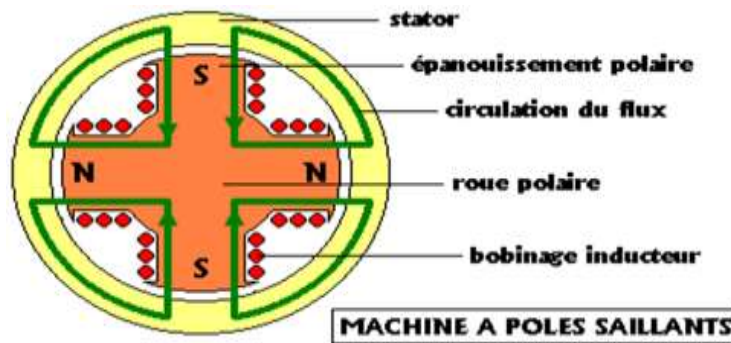


Figure II.4 : Rotor a pôles saillants

➤ **Avantages :**

- Conception simple et robuste.
- Excellente ventilation naturelle.
- Convient bien aux grandes machines tournantes lentement.

➤ **Inconvénients :**

- Moins adapté aux vitesses élevées.
- Moins compact

II.1.2.2.2. Rotor cylindrique (ou rotor lisse) :

➤ **Description :**

Aussi appelé rotor lisse, il a une forme uniforme et équilibrée sans pôles visibles. Les bobines d'excitation sont insérées dans des encoches creusées dans la surface du cylindre. Il est conçu pour fonctionner à haute vitesse (1500 à 3000 tr/min), ce qui le rend idéal pour les groupes électrogènes rapides et les turbines à vapeur. Sa construction lisse permet une rotation stable et silencieuse. [31]

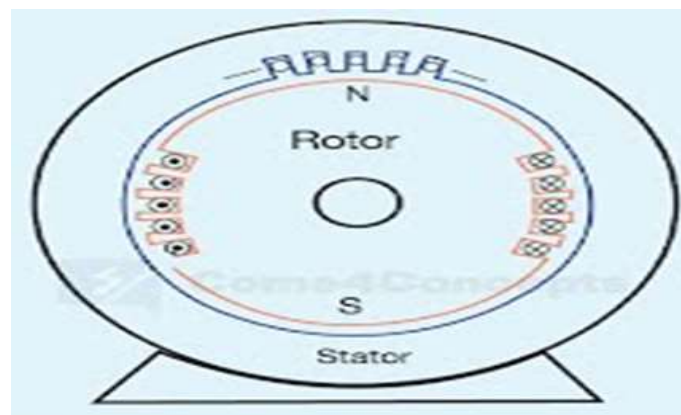


Figure II.5 : Rotor cylindrique

➤ **Avantages :**

- Très bien équilibré pour les rotations rapides.
- Structure compacte et aérodynamique.
- Moins de pertes mécaniques à grande vitesse.

➤ **Inconvénients :**

- Moins bien ventilé naturellement.
- Moins efficace à basse vitesse.

II.1.2.3. Types et sont domaines d'utilisation :**Tableau II.1 :** Types et domaines du rotor utilisé dans les groupes électrogènes

Application	Type de rotor recommandé	Pourquoi ?
Groupe électrogène mobile	Rotor cylindrique	Léger, compact, adapté aux vitesses élevées
Centrale hydroélectrique	Rotor à pôles saillants	Vitesse lente, couple élevé
Groupe électrogène de secours	Rotor cylindrique	Démarrage rapide, fonctionnement à haute vitesse
Générateur marin ou industriel	Rotor à pôles saillants	Stabilité à basse vitesse, robustesse
Turbine à vapeur	Rotor cylindrique	Très haute vitesse, haute performance

II.1.3. Stator :

Le stator est un dispositif principal électrique et la partie fixe d'une machine électromécanique, comme un moteur ou un générateur. Il est constitué d'enroulements de fils conducteurs, souvent en cuivre, et peut également comprendre des composants magnétiques. Le rôle du stator est de générer un champ magnétique qui interagit avec le rotor (partie tournante) pour induire un mouvement de rotation dans les moteurs ou pour générer un courant électrique dans les générateurs. Dans un moteur à courant alternatif (CA), par exemple ; le stator produit un champ magnétique tournant, qui induit un courant dans les conducteurs du rotor, provoquant ainsi la rotation de ce dernier. [31]



Figure II.6 : Stator

Dans un groupe électrogène, le stator est généralement constitué de bobinages de cuivre. Le rotor, qui est entraîné par un moteur à combustion interne, tourne à l'intérieur du stator. Le mouvement du rotor dans le champ magnétique du stator génère un courant électrique dans les enroulements du stator. Ce courant alternatif (CA) est ensuite collecté et distribué pour fournir de l'énergie électrique. Le stator joue donc un rôle clé dans la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique dans le groupe électrogène. [31]

II.1.3.1. La description du rotor dans un groupe Électrogène :

- **STATOR** : Le stator est la partie fixe de l'alternateur dans un groupe électrogène. Il joue un rôle essentiel en transformant le champ magnétique tournant du rotor en courant électrique alternatif.
- **Comportements** :
 - Noyau en fer (ou fer laminé) : canalise le flux magnétique pour optimiser l'induction.
 - Enroulements ou bobinages : fils de cuivre disposés dans des encoches du noyau, dans lesquels le courant est induit.
 - Système de refroidissement (dans certains modèles) : permet de dissiper la chaleur générée. [31]
- **Principe de fonctionnement** :
 - Le champ magnétique tournant produit par le rotor traverse le noyau en fer du stator.
 - Ce champ variable induit une force électromotrice (FEM) dans les enroulements du stator (loi de Faraday).
 - Cette FEM génère un courant alternatif qui est ensuite acheminé vers les appareils ou le réseau.
 - Le nombre de phases (souvent 3 pour les usages industriels) détermine la configuration des enroulements. [31]

II.1.3.2. Les types du stator :

Dans le domaine des machines électriques en général, le stator peut prendre plusieurs formes selon le type de machine (moteur ou génératrices), le mode de fonctionnement et l'application, le plus répandu est le stator à enroulements bobinés, que l'on retrouve aussi bien dans les moteurs asynchrones que dans les génératrices synchrones. Il peut être monophasé ou triphasé, avec des enroulements en cuivre insérés dans un noyau en fer laminé. Cette configuration permet une grande souplesse d'utilisation, notamment en permettant des connexions en étoile, triangle ou double étoile selon les besoins. Un autre type courant est le stator à aimants permanents, les générateurs d'éoliennes, ou les alternateurs de véhicules électriques. Dans ce cas, ce n'est plus le rotor mais le stator qui contient les aimants permanents, supprimant ainsi le besoin d'alimentation d'excitation, ce qui améliore le rendement énergétique. Enfin, dans certaines applications avancées, on peut trouver des stators à double enroulement, qui permettent de varier la vitesse, la tension ou la fréquence de sortie. Ces types sont utilisés notamment dans les machines à double alimentation ou dans des systèmes où un contrôle précis de la puissance est nécessaire. Ainsi, le choix du type de stator dépend non seulement du type de machine mais aussi des performances attendues et du contexte d'utilisation. [31]

- **Stator triphasé bobiné (classique) :**

- **Description :**

C'est le type le plus courant dans les groupes électrogènes industriels et de moyenne à grande puissance. Il est constitué de trois enroulements en cuivre, décalés de 120° , insérés dans un noyau en fer laminé. Il génère un courant triphasé, idéal pour l'alimentation des machines, réseaux et équipements industriels. [31]

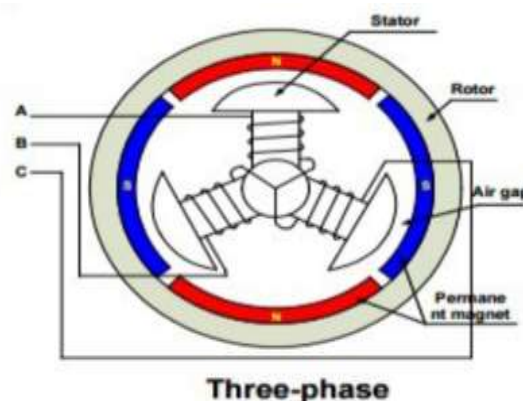


Figure I.7: Stator triphasé bobine

➤ **Avantages :**

- Fournit une énergie électrique stable et puissante.
- Compatible avec les réseaux triphasés industriels.
- Peut-être configuré en étoile ou triangle selon les besoins en tension.
- Très bon rendement et robuste.

➤ **Inconvénients :**

- Plus complexe à construire et à entretenir.
- Encombrant pour les petits systèmes.
- Nécessite une bonne régulation de la tension et de la fréquence.

• **Stator monophasé :**❖ **Description :**

Utilisé dans les petits groupes électrogènes portables ou domestiques, ce stator possède un seul enroulement pour produire une tension monophasée (230 V). [31]

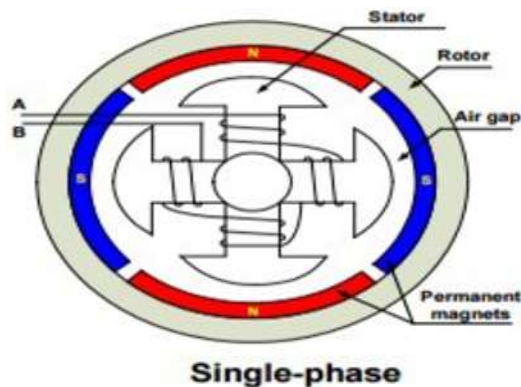


Figure I.8: Stator monophasé bobine

➤ **Avantages :**

- Simple et économique.
- Idéal pour les usages domestiques (lumières, petits appareils).
- Plus léger et compact que les modèles triphasés.

➤ **Inconvénients :**

- Moins puissant que les stators triphasés.
- Ne convient pas aux applications industrielles ou aux moteurs triphasés.
- Moins efficace pour la répartition de la charge.

- **Stator à enroulements imbriqués (forme spéciale triphasée) :**

- **Description :**

Ce type est une variante optimisée du stator triphasé, avec des enroulements imbriqués pour améliorer le rendement, le refroidissement et réduire les pertes. [31]

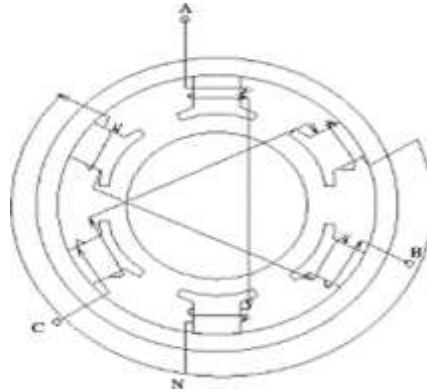


Figure II.9 : Stator a enroulements imbriques

- **Avantages :**

- Meilleure efficacité thermique.
- Moins de pertes fer et cuivre.
- Réduction des harmoniques dans la tension générée.

- **Inconvénients :**

- Fabrication plus complexe.
- Coût légèrement plus élevé.
- Moins courant dans les petits groupes électrogènes.

II.1.3.3. Types et son domaine d'utilisation :

Tableau II.2 : Types et domaines du stator utilisé dans les groupes électrogènes

Domaine	Type de stator	Application typique
Groupe électrogène	Triphasé bobiné	Usage industriel, secours, chantiers
Groupe électrogène	Monophasé	Usage domestique, petit générateur mobile
Machine électrique (général)	Bobiné classique	Moteurs/alternateurs industriels
Machine électrique (moderne)	À aimants permanents	véhicules électriques, éoliennes
Machine spéciale	Double enroulement	Variation de vitesse, tension, fréquence

II.2. Conception de la génératrice dans un groupe électrogène :

Une génératrice est le cœur électrique du groupe électrogène. Sa mission principale est de convertir l'énergie mécanique fournie par le moteur thermique en énergie électrique utilisable.

II.2.1. Constitution principale :

- **Rotor** (partie tournante) : génère un champ magnétique tournant.
 - Soit à pôles saillants (basse vitesse),
 - Soit cylindrique (haute vitesse),
 - Parfois à aimants permanents (compact et efficace).
- **Stator** (partie fixe) : contient des enroulements en cuivre où se crée le courant par induction.
 - Peut-être triphasé (industriel) ou monophasé (domestique).
- **Système d'excitation** : alimente les bobines du rotor en courant continu pour créer le champ magnétique.
 - Peut-être auto-excité ou via un régulateur électronique (AVR).
- **Ventilation et refroidissement** : pour éviter la surchauffe.
- **Boîtier et châssis** : assurent le maintien et l'isolation des composants. [33]

II.3. Processus de génération électrique du moteur thermique à la charge :

- Couplage avec le moteur thermique :

Le moteur (essence ou diesel) entraîne le rotor de la génératrice à une vitesse constante (souvent 1500 ou 3000 tr/min selon la fréquence requise : 50 Hz ou 60 Hz).

- Génération de courant :

La rotation du rotor crée un champ magnétique tournant, qui induit un courant alternatif dans les enroulements du stator.

→ Ce courant est ensuite utilisé pour alimenter les charges électriques. [34]

- Régulation automatique :

Un régulateur de tension (AVR) ajuste le courant d'excitation pour stabiliser la tension de sortie, quelle que soit la charge. [35]

- Réponse dynamique :

En cas de variation de charge (par exemple, démarrage d'un moteur), la génératrice doit adapter rapidement sa puissance sans trop faire chuter la tension ou la fréquence. C'est pourquoi une bonne conception assure une réponse rapide et stable. [36]

- Protection et sécurité :

Intègre des systèmes contre :

- Sur – charges.
- Courts- circuits.
- Surchauffe.
- Perte d'excitation ou déséquilibre de phase. [37]

II.4. Les types de la génératrice :

II.4.1. Génératrice à courant continu (DC) :

➤ Définition :

Une génératrice à courant continu est une machine électrique tournante qui convertit une énergie mécanique (souvent fournie par un moteur thermique) en énergie électrique sous forme de courant continu.

Selon la loi de Faraday, lorsqu'un conducteur (bobine) se déplace dans un champ magnétique, une force électromotrice (FEM) est induite dans ce conducteur. Si le circuit est fermé, un courant électrique y circule.

L'induction naturelle est en courant alternative lorsque le rotor (ou l'induit) tourne dans un champ magnétique :

- La tension induite dans les spires change de sens périodiquement, naturellement cela produit un courant alternatif (AC) dans les enroulements du rotor.
- Le rôle du collecteur à segments (commutateur) Le collecteur est un cylindre composé de segments de cuivre isolés les uns des autres.
- Ces segments sont connectés aux extrémités des bobines de l'induit.
- Des balais en graphite (charbons) frottent sur ces segments pendant que le rotor tourne.

À chaque demi-tour :

- Le collecteur inverse les connexions entre les bobines et le circuit externe.

- Cela rectifie la tension sinusoïdale produite par les bobines → le courant devient unidirectionnel dans le circuit externe.

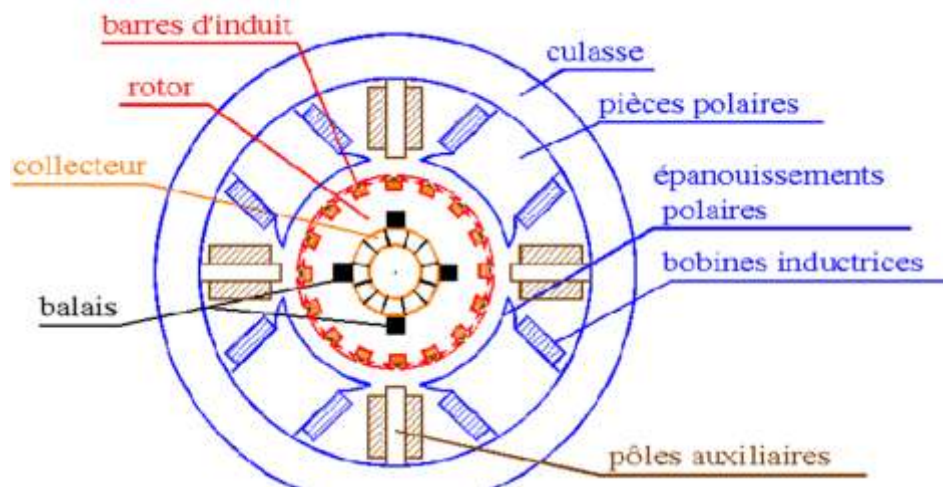


Figure II.10 : Génératrice à courant continu

➤ **Constitution principale :**

- Inducteur (stator) :
 - Partie fixe de la machine.
 - Contient les bobines d'excitation ou aimants.
 - Crée le champ magnétique nécessaire à l'induction.
- Induit (rotor) :
 - Partie tournante sur laquelle est induite la tension.
 - Contient des enroulements (bobines) où naît la force électromotrice (FEM).
- Collecteur à segments (ou collecteur à commutateur) :
 - Pièce cylindrique composée de segments en cuivre isolés.
 - Convertit le courant alternatif induit dans l'induit en courant continu à la sortie.
 - Fixé au rotor.
- Balais (charbons) :
 - Glissent sur le collecteur.
 - Assurent la liaison entre le collecteur (tournant) et le circuit externe (fixe).

➤ **Avantages :**

- Facilité de régulation de la tension.
- Fournit du courant continu directement, utile dans : Les moteurs DC.
Les systèmes de charge de batteries.
Les applications industrielles anciennes.

➤ **Inconvénients :**

- Entretien fréquent (usure des balais et collecteur).
- Moins efficace à grande puissance.
- Remplacée progressivement par les alternateurs + redresseurs (AC → DC).

[38]

II.4.2. Génératrice synchrone (Alternateur synchrone) :

➤ **Définition :**

Elle est appelée "synchrone" car son rotor tourne à la même vitesse que le champ magnétique du stator, Le rotor est entraîné mécaniquement (par moteur diesel, turbine...), ce qui produit un courant continu dans le rotor crée un champ magnétique tournant.

Ce champ tourne à vitesse synchronisée avec la fréquence du réseau (ex : 1500 tr/min pour 50 Hz), il coupe les enroulements du stator, ce qui induit une tension alternative triphasée dans le stator (loi de Faraday).

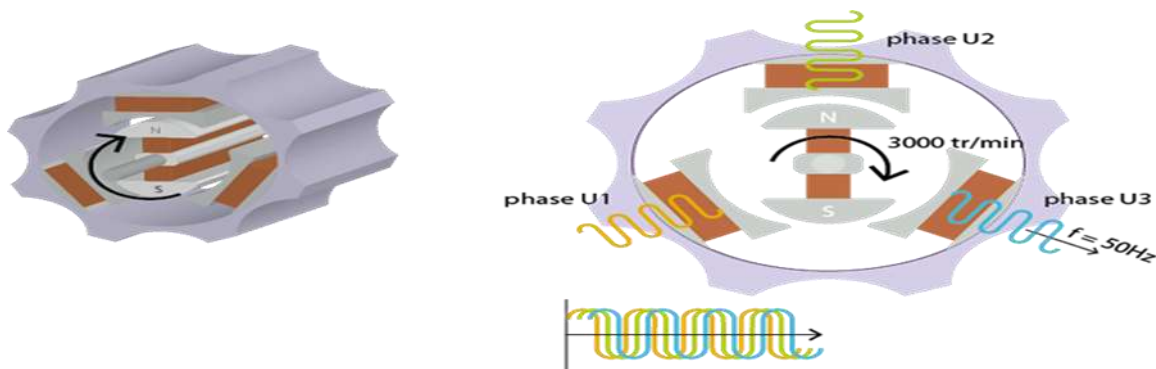


Figure II.11 : Génératrice synchrone

La fréquence de la tension dépend de la vitesse de rotation et du nombre de pôles de la machine.

N_s : vitesse synchrone en tr/min

F : fréquence du courant (Hz)

P : nombre de pôles

➤ **Constitution principale :**

- **Rotor** (inducteur) : Partie tournante de la machine.

- Génère un champ magnétique tournant.
- Contient des bobines d'excitation alimentées par un courant continu (via une source externe ou auto excitation).
- Peut - être : À pôles lisses (haute vitesse, turbines à vapeur)
- À pôles saillants (basse vitesse, turbines hydrauliques)
 - **Stator** (induit) : Partie fixe de la machine
- Contient les bobines triphasées dans lesquelles la tension est induite.
- Produit le courant alternatif triphasé utilisé dans les réseaux électriques.
 - **Système d'excitation** : Fournit du courant continu au rotor.
- Peut- être un excitateur à courant continu, un excitateur à aimants permanents ou un excitateur sans balais.
 - **Régulateur de tension** (AVR – Automatique Voltage Régulateur) : Contrôle automatiquement le courant d'excitation pour maintenir une tension de sortie stable.
- **Avantages :**
 - Très stable en fréquence et en tension.
 - Bien adaptée aux charges sensibles (informatique, médical).
 - Très utilisée dans les centrales électriques et groupes électrogènes modernes.
 - Compatible avec les systèmes de synchronisation au réseau.
- **Inconvénients :**
 - Plus complexe qu'une génératrice asynchrone.
 - Nécessite un système d'excitation.
 - Démarrage plus délicat (souvent avec dispositifs spéciaux). [39]

II.4.3. Génératrice asynchrone (ou alternateur asynchrone) :

➤ Définition :

Ne fonctionne pas à la même vitesse que le champ magnétique (d'où "asynchrone"), utilisée dans des petits groupes électrogènes, souvent pour des applications simples ou rurales, Nécessite souvent une source d'excitation externe (comme le réseau ou des condensateurs).

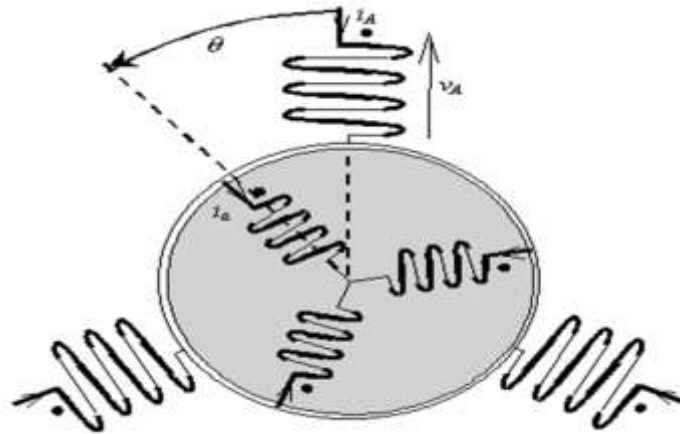


Figure II.12 : Génératrice asynchrone

- En mode connecté au réseau, c'est le réseau qui fournit la puissance réactive.
- En mode isolé, des condensateurs sont nécessaires pour l'auto excitation.
- **Avantages :**
 - Construction simple et robuste.
 - Moins coûteuse qu'une génératrice synchrone.
 - Moins d'entretien (pas de balais, pas de collecteur).
 - Démarrage plus facile (surtout en parallèle avec le réseau).
- **Inconvénients :**
 - Ne peut pas démarrer seule sans source réactive externe.
 - Fréquence et tension moins stables → pas idéale pour les charges sensibles.
 - Difficile à réguler sans électronique de puissance.
 - Moins efficace en production isolée ou autonome. [40]

II.5. Les pannes de la génératrice :

II.5.1. Absence totale de tension en sortie :

- **Description :** Aucun courant n'est généré malgré le bon fonctionnement du moteur.
- **Causes possibles :**
 - Perte d'aimantation résiduelle (absence d'excitation initiale).
 - Défaillance de l'AVR (régulateur de tension).
 - Rupture ou desserrage de connexions (bornier alternateur, câblage).
 - Balais usés ou collecteur en mauvais état (dans les modèles à balais).

- Court-circuit dans l'enroulement rotor ou stator.

II.5.2. Tension instable ou fluctuante :

- **Description** : La tension monte et descend de manière irrégulière pendant le fonctionnement.
- **Causes possibles** :

- Régulateur AVR défectueux ou mal calibré.
- Mauvais isolement des enroulements.
- Problème de charge déséquilibrée.
- Balais usés ou faux contact.
- Rotor déséquilibré ou endommagé mécaniquement.

II.5.3. Surtension :

- **Description** : Tension de sortie supérieure à la valeur nominale.
- **Causes possibles** :

- Défaillance de l'AVR (excitation excessive).
- Mauvais réglage de la tension de consigne.
- Signal de tension erroné envoyé à l'AVR.

II.5.4. Sous-tension :

- **Description** : Tension de sortie inférieure à la valeur normale.
- **Causes possibles** :

- Défaut d'AVR ou réglage trop bas.
- Défaut de l'excitation (bobine d'excitation en panne ou fil coupé).
- Aimantation résiduelle insuffisante.
- Enroulements du rotor ou stator endommagés.

II.5.5. Défaut de fréquence (trop haute ou trop basse) :

- **Description** : La fréquence de sortie (en Hz) ne correspond pas à la norme (50 Hz ou 60 Hz).

➤ **Causes possibles :**

- Moteur thermique tournant trop vite ou trop lentement (régulation moteur défectueuse).
- Mauvaise régulation de vitesse (problème sur le régulateur moteur, pas l'alternateur en lui-même).

II.5.6. Courant de sortie asymétrique ou déséquilibré :

➤ **Description :** L'intensité n'est pas égale sur les trois phases.

➤ **Causes possibles :**

- Déséquilibre de charge entre les phases.
- Défaut interne sur un enroulement (court-circuit partiel).
- Connexions incorrectes ou desserrées.

II.5.7. Fuites de courant ou court-circuit à la masse :

➤ **Description :** Détection de courant parasite vers la carcasse ou la terre.

➤ **Causes possibles :**

- Isolation endommagée d'un enroulement.
- Environnement humide ou présence d'huile dans la génératrice.
- Accumulation de poussière conductrice ou débris métalliques.

II.5.8. AVR brûlé ou hors service :

➤ **Description :** L'AVR ne régule plus du tout, ou génère une tension erratique.

➤ **Causes possibles :**

- Surcharge électrique.
- Mauvaise ventilation autour de l'AVR.
- Court-circuit externe répercuté sur l'AVR.
- Mauvais branchement (inversion polarité ou phase). [41]

II.6. Types d'excitations des génératrices :

❖ **Génératrice à excitation indépendante :**

- L'inducteur est alimenté par une source extérieure.

- Bon contrôle de la tension.

❖ **Génératrice à excitation série :**

- Le courant d'excitation passe dans le même circuit que la charge.
- La tension varie fortement avec la charge.

❖ **Génératrice à excitation dérivation (shunt) :**

- L'enroulement d'excitation est branché en parallèle avec l'induit.
- Tension plus stable.

❖ **Génératrice à excitation composée (compound) :**

- Combine excitation série et dérivation.
- Utilisée pour compenser les variations de tension avec la charge.

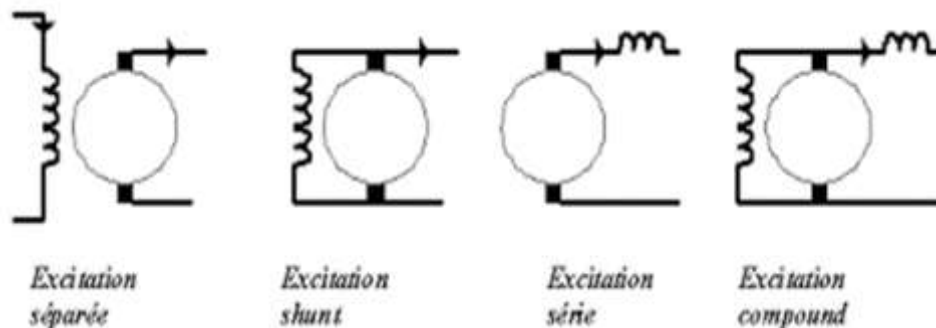


Figure II.13 : Les excitations de la machine

Conclusion :

La génératrice joue un rôle essentiel dans la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. À travers cette description, nous avons pu identifier ses principales composantes, son principe de fonctionnement ainsi que ses caractéristiques techniques. Cette compréhension constitue une base indispensable pour aborder les aspects liés à la régulation de tension et au comportement dynamique de la machine dans les chapitres suivants.

CHAPITRE III :

MODÉLISATION DE LA

GÉNÉRATRICE SYNCHRONÉ

Introduction

La modélisation d'un système permet de simplifier des équations compliquées variables dans le temps et l'espace (ex : tensions, courants, flux) en équations simplifiées et facile à appliquer le comportement dynamique des machines, et pour cela on utilise la transformation de Park, et qui est une transformation matricielle qui convertit les grandeurs triphasées (a, b, c) en grandeurs dans le référentiel tournant (d, q, 0), en passant par deux étapes :

- Transformation de Clarke : passe de (abc) à un système orthogonal stationnaire (α , β)
- Transformation de Park : passe de (α , β) à un système synchronisé (d, q) tournant à la vitesse angulaire ω du rotor.

Et pour une génératrice synchrone triphasée, la modélisation de Park nous permet :

- Éliminer la dépendance temporelle des inductances
- Simplifier le système d'équations
- Découpler les axes d et q en régime permanent

III.1. Modélisation de la génératrice :

Le sens du courant d'une génératrice dans une machine synchrone est inversé par rapport au fonctionnement moteur d'une même machine, on obtient alors :

III.1.1. Equations statoriques :

III.1.1.1. Equations de tensions dans le repère ABC :

$$V_a = -R_a i_a - d\phi_a / (dt)$$

$$V_b = -R_b i_b - d\phi_b / (dt)$$

$$V_c = -R_c i_c - d\phi_c / (dt)$$

Dans une machine équilibrée (génératrice) on a :

$$R_a = R_b = R_c = R_s$$

Avec R_s : est la résistance statorique

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} d\varphi_a/(dt) \\ d\varphi_b/(dt) \\ d\varphi_c/(dt) \end{bmatrix}$$

$$[V_{abc}] = - [R_s] [i_{abc}] - d [\varphi_{abc}] / dt$$

Pour le rotor :

$$\text{On pose : } [0] = - [R_r] [i_{abc}] - d [\varphi_{abc}] / dt$$

Avec : R_r : est la résistance rotorique

III.1.1.2. Expressions des flux dans le repère ABC :

$$\varphi_a = L_{aa} * i_a + M_{ab} * i_b + M_{ac} * i_c + M_{af} * i_f$$

$$\varphi_b = M_{ba} * i_a + L_{bb} * i_b + M_{bc} * i_c + M_{bf} * i_f$$

$$\varphi_c = M_{ca} * i_a + M_{cb} * i_b + L_{cc} * i_c + M_{cf} * i_f$$

$$\begin{pmatrix} M_{af} \\ M_{bf} \\ M_{cf} \end{pmatrix} = M_{fd} * \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) \end{pmatrix}$$

Avec :

M_{fd} : est l'inductance mutuelle maximale stator/rotor

Varie avec la position θ

II.1.1.3. Inductances statoriques :

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L_s + L_m$$

$$M_{ab} = M_{bc} = M_{ca} = -L_m/2$$

Avec :

L_s : est l'inductance de fuite statorique

L_m : est l'inductance magnétique

II.1.1.4. Transformation de Park :

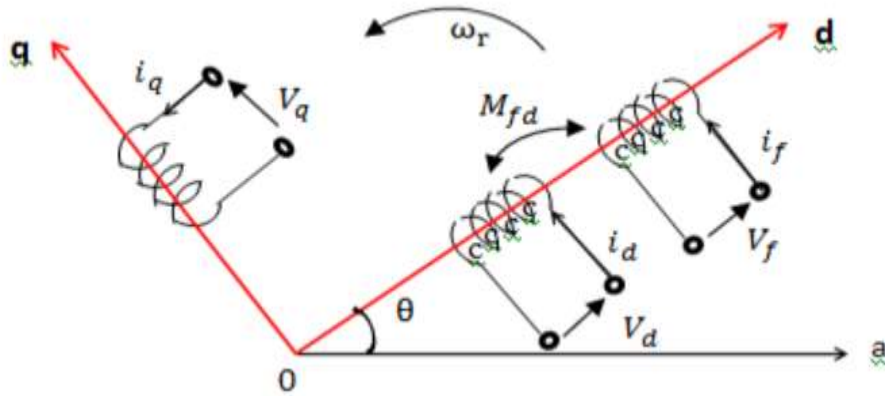


Figure III.1 : Représentation schématique de la génératrice synchrone à rotor bobiné sur repère $(d - q)$

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

La transformation en grandeur :

On obtient :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} = [P(\theta)] * \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}$$

II.1.1.5. La transformation inverse de Park :

Pour basculer du repère $d - q$ au repère ABC

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

Equations de tensions passant par le repère ABC :

$$[V_{abc}] = - [R_s] [i_{abc}] - d [\phi_{abc}] / dt$$

Appliquant la transformation de **Park**

$$[i_{dqo}] = [K_s] * [i_{abc}]$$

$$[v_{dqo}] = [K_s] * [v_{abc}]$$

III.1.1.6. Equations des tensions du repère $d - q$:

$$V_{ds} = -R_s * i_{ds} - \frac{d\varphi_{ds}}{dt} + w_r * \varphi_{qs}$$

$$V_{qs} = -R_s * i_{qs} - \frac{d\varphi_{qs}}{dt} - w_r * \varphi_{ds}$$

$$V_f = R_f * i_f + d\varphi_{ds}/dt$$

Le terme $w_n * \varphi$ dépend de la rotation

III.1.2. Expressions des flux du repère $d - q$:

On applique la transformation de **Park** aux flux statoriques en fonction des courants et les inductances.

$$\varphi_{ds} = L_d * i_{ds} + M_{fd} * i_f$$

$$\varphi_{qs} = L_q * i_{qs}$$

$$\varphi_{os} = L_o * i_{os}$$

Puisque le système est équilibré :

$$\begin{aligned} i_{os} &= 0, \text{ on aura alors :} \\ \varphi_{os} &= 0 \end{aligned}$$

De cela, la matrice des tensions transformées devient :

$$\begin{bmatrix} -v_{ds} \\ -v_{qs} \\ v_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -w_r * L_q & 0 \\ w_r * L_d & R_s & w_r * M_{fd} \\ 0 & 0 & R_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 & M_{fd} \\ 0 & L_q & 0 \\ M_{fd} & 0 & L_f \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_f \end{bmatrix}$$

Pour un système à vide (sans charge connectée)

$$i_{ds} = i_{qs} = 0$$

En incluant une charge RL , les équations du repère $d - q$ seront comme suit :

$$\text{II} \dots \dots \dots \begin{cases} v_{ds} = R_{ch} * i_{ds} + L_{ch} * \frac{di_{ds}}{dt} \\ v_{qs} = R_{ch} * i_{qs} + L_{ch} * \frac{di_{qs}}{dt} \end{cases}$$

En insérant les courants à vide dans la matrice des tensions transformées, on obtient :

$$\begin{aligned} -v_{ds} &= M_{fd} * \frac{di_f}{dt} \\ -v_{qs} &= w_r * M_{fd} * i_f \\ v_f &= R_f * i_f + L_f * \frac{di_f}{dt} \end{aligned}$$

En introduisant l'équation, de II dans la matrice des tensions transformées, on aura le résultat suivant :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(R_s + R_{ch}) & w_r * L_q & 0 \\ -w_r * L_d & -(R_s + R_{ch}) & -w_r * M_{fd} \\ 0 & 0 & R_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -(L_d + L_{ch}) & 0 & -M_{fd} \\ 0 & -(L_d + L_{ch}) & 0 \\ M_{fd} & 0 & L_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ v_f \end{bmatrix}$$

On peut l'écrire sous la forme suivante :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(L_d + L_{ch}) & 0 & -M_{fd} \\ 0 & -(L_d + L_{ch}) & 0 \\ M_{fd} & 0 & L_f \end{bmatrix}^{-1} * \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ v_f \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -(R_s + R_{ch}) & w_r * L_q & 0 \\ -w_r * L_d & -(R_s + R_{ch}) & -w_r * M_{fd} \\ 0 & 0 & R_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_f \end{bmatrix} \right) \dots [46]$$

III.1.2.1. Expression des flux rotoriques :

$$\varphi_f = L_f * i_f + M_{fd} * i_f$$

Avec L_f : est l'inductance propre du rotor

III.1.2.2. Expressions des flux mutuels :

$$\varphi_f = M_{fd} * i_f \text{ Ce flux est produit par l'excitation}$$

On aura alors :

$$\varphi_{ds} = L_d * i_{ds} + \varphi_f =$$

$$\varphi_{qs} = L_q * i_{qs}$$

Et au final :

$$v_{ds} = -R_s * i_{ds} + w_r * L_q * i_{qs}$$

$$v_{qs} = -R_s * i_{qs} - w_r * (L_d * i_{ds} + \varphi_f)$$

III.2. Equations mécaniques :

$$J * dw_m/dt = T_m - C_e - T_f$$

Avec :

J : Moment d'inertie ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)

w_m : vitesse mécanique (rad/s)

$$1 \text{ tr/min} = 2\pi / 60 \quad \text{rad/s}$$

$$\text{Avec } w_r = w_m * P \rightarrow w_m = w_r / P$$

T_m : Couple mécanique (Nm)

C_e : Couple résistant électromagnétique (Nm)

T_f : Couple de frottement due aux pertes (Nm)

III.3. Expression du couple électromagnétique :

$$C_e = \frac{\partial w_m}{\partial \theta} \quad i$$

w_m : est l'énergie magnétique stockée,

θ : est l'angle de rotation.

Pour la démonstration du couple électromagnétique dans le repère $d - q$,

III.3.1. Puissance électromagnétique P_{em} :

$$P_{em} = v_{ds} * i_{ds} + v_{qs} * i_{qs}$$

Dans le régime permanent :

$$P_{em} = -R_s * i_{ds}^2 - R_s * i_{qs}^2 + w_r * (\varphi_{ds} * i_{qs} - \varphi_{qs} * i_{ds})$$

On obtient alors :

$$C_e = \frac{P_{em}}{w_r} = \varphi_{ds} * i_{qs} - \varphi_{qs} * i_{ds}$$

En introduisant les flux dans l'expression du couple précédent, l'expression finale du couple C_e , sera comme suit :

$$\begin{aligned} C_e &= (L_d * i_{ds} + \varphi_f) * i_{qs} - L_q * i_{qs} * i_{ds} \\ &= \varphi_f * i_{qs} + (L_d - L_q) * i_{qs} * i_{ds} \end{aligned}$$

Avec :

$$\varphi_f * i_{qs} \quad : \text{ Couple d'excitation}$$

$$(L_d - L_q) * i_{qs} * i_{ds} \quad : \text{ Couple de reluctance}$$

Dans un modèle a pole lisse :

$$L_d = L_q$$

L'expression du couple devient :

$$C_e = \varphi_f * i_{qs} = M_{fd} * i_f * i_{qs}$$

Puisque : $\varphi_f = M_{fd} * i_f$

III.4. Modelé d'état de la génératrice :**III.4.1. Equations électriques statoriques :**

$$v_{ds} = -R_s * i_{ds} - L_d * \frac{di_{ds}}{dt} + w_r * L_q * i_{qs}$$

$$v_{qs} = -R_s * i_{qs} - L_q * \frac{di_{qs}}{dt} - w_r * (L_d * i_{ds} + \varphi_f)$$

III.4.2. Equation rotorique :

$$v_f = R_f * i_f + L_f * \frac{di_f}{dt}$$

III.4.3. Equation mécanique :

$$J * \frac{dw_m}{dt} = T_m - C_e - T_f$$

III.4.4. Equation du couplage :

$$\varphi_f = M_{fd} * i_f$$

$$w_m = w_r / P$$

$$C_e = \varphi_f * i_{qs} + (L_d - L_q) * i_{ds} * i_{qs}$$

III.5. Vecteur d'état :

$$X = \begin{bmatrix} \frac{di_{ds}}{dt} = \left(\frac{L_f}{D}\right) \left(- (R_s + R_{ch}) i_{ds} + w_r L_q i_{qs} + \left(-\frac{M_{fd}}{D}\right) (-R_f i_f + v_f)\right) \\ \frac{di_{qs}}{dt} = \left(\frac{1}{(L_q + L_{ch})}\right) \left(- (R_s + R_{ch}) i_{qs} - w_r * (L_d i_{ds} + M_{fd} i_f)\right) \\ \frac{di_f}{dt} = \left(-\frac{M_{fd}}{D}\right) \left(- (R_s + R_{ch}) i_{ds} + w_r L_q i_{qs}\right) + \left(\frac{(L_d + L_{ch})}{D}\right) (-R_f i_f + v_f) \\ C_e = \frac{3}{2} P (M_{fd} * i_f * i_{qs} + (L_d - L_q) i_{ds} * i_{qs}) \end{bmatrix}$$

III.6. Analyse et interprétation des résultats :

Depuis ces calculs, il est essentiel d'analyser l'impact de la régulation de tension sur les grandeurs électriques clés, notamment le courant d'excitation (i_f) et la tension de sortie de phase (v_{as}).

Cette comparaison permet de mettre en évidence la capacité du système de régulation (PI) à maintenir la tension de sortie stable malgré les variations de charge.

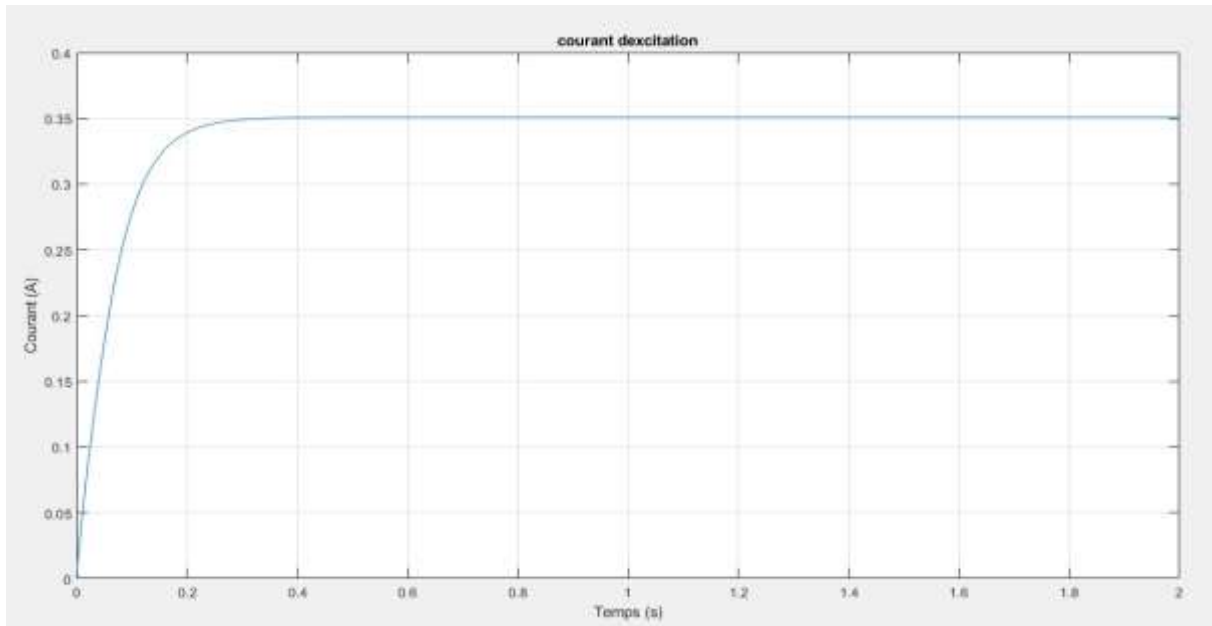


Figure III.2 : Courant d'excitation

Au démarrage, le courant d'excitation augmente rapidement puis atteint une valeur constante d'environ **0,35 A**.

Cette réponse indique un établissement libre de l'excitation selon les conditions initiales du système (c'est-à-dire les paramètres fixes de la machine et la tension d'alimentation initiale), absence de réaction aux variations de charge : malgré les perturbations appliquées (comme la modification de la résistance de charge), le courant i_f reste inchangé.

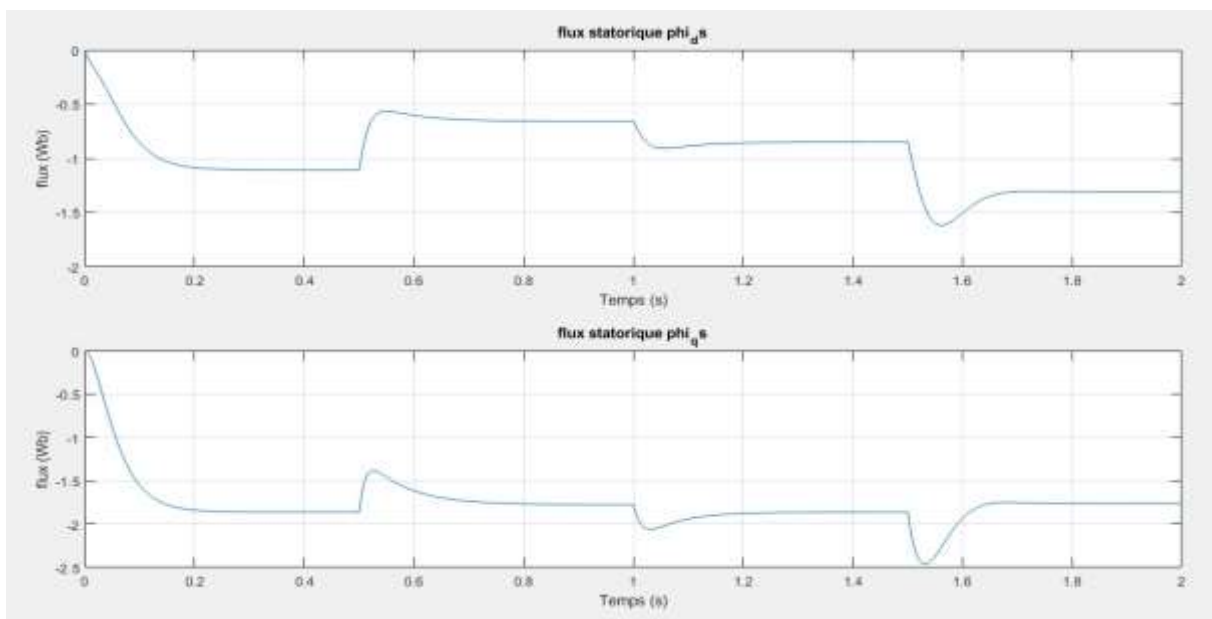


Figure III.3 : Les flux statorique

Les variations brusques des flux correspondent directement aux instants de changement de charge et les phénomènes transitoires et les oscillations sont caractéristiques de la réponse dynamique de la machine synchrone face aux sollicitations mécaniques.

La tendance globale montre que l'amplitude des flux diminue lorsque la charge augmente, la stabilité retrouvée après chaque transitoire indique que la machine reste capable de s'adapter aux nouvelles conditions de charge.

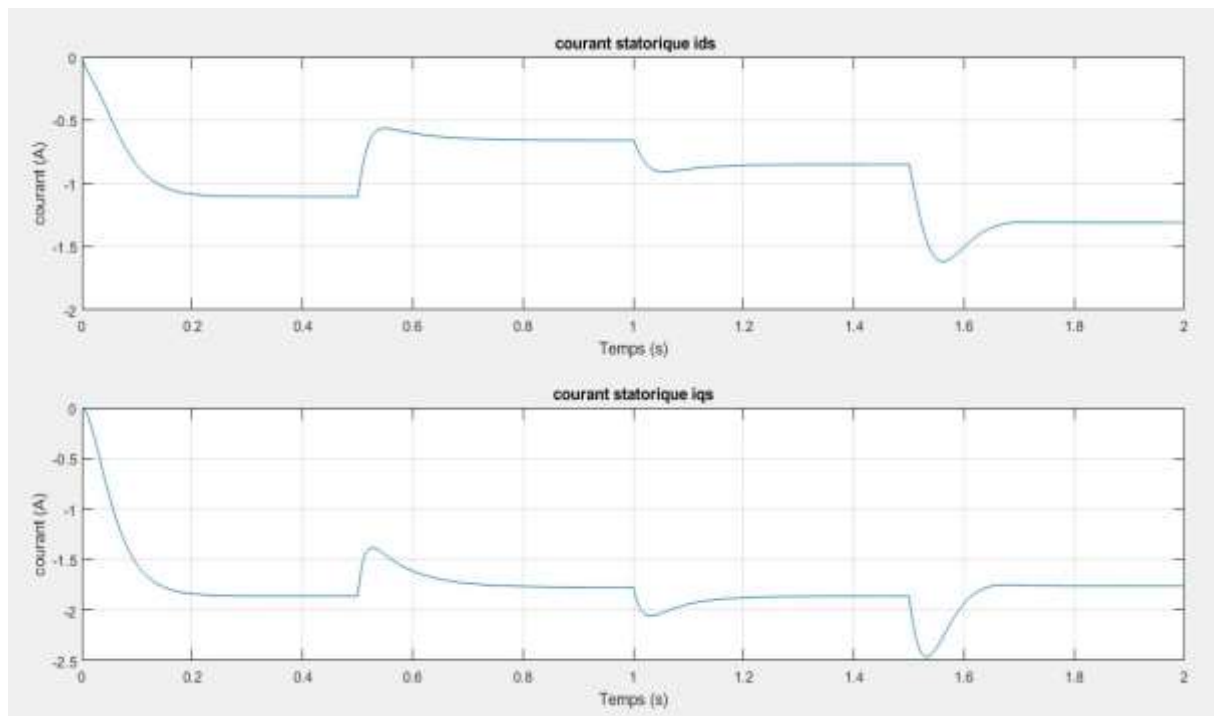


Figure III.4 : Les courants statoriques

Lors d'une augmentation de charge, i_{qs} augmente pour fournir plus de puissance active (couple électromagnétique), tandis que i_{ds} s'ajuste pour maintenir l'équilibre des flux statoriques. Inversement, une diminution de charge réduit i_{qs} et ajuste i_{ds} . Ces variations modifient les flux statoriques selon $\varphi_{ds} = L_d \cdot i_{ds}$ et $\varphi_{qs} = L_q \cdot i_{qs}$, créant une redistribution magnétique permettant l'adaptation dynamique aux nouvelles conditions de charge.

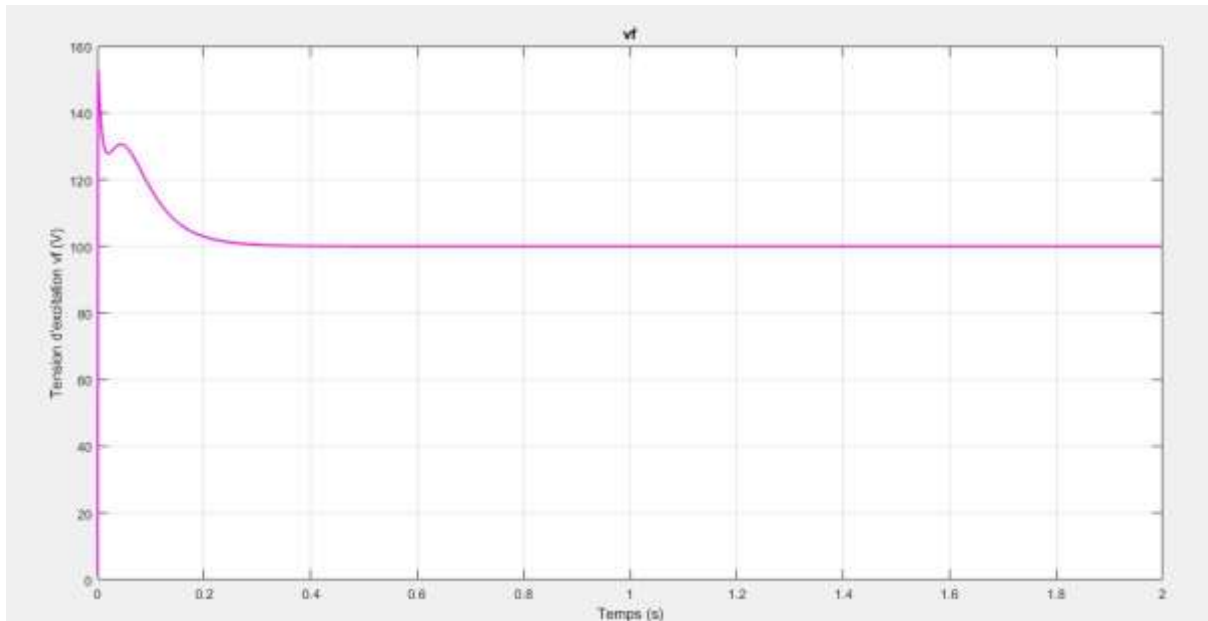


Figure III.5 : La tension d'excitation

Cette courbe de tension d'excitation (v_f) présente un pic initial à **155V** suivi d'une oscillation amortie avant de se stabiliser à **100V** en régime permanent. Cette évolution contrôle directement le courant d'excitation rotorique ($i_f = v_f/R_f$), où le pic de tension génère un courant d'excitation élevé pour établir rapidement le flux magnétique initial, tandis que l'oscillation traduit la réponse transitoire du circuit d'excitation. La stabilisation finale à 100V maintient le courant d'excitation nominal nécessaire pour produire les flux statoriques et courants i_{ds}/i_{qs} d'équilibre, assurant ainsi la coordination entre l'excitation rotorique et la réponse électromagnétique statorique de la génératrice.

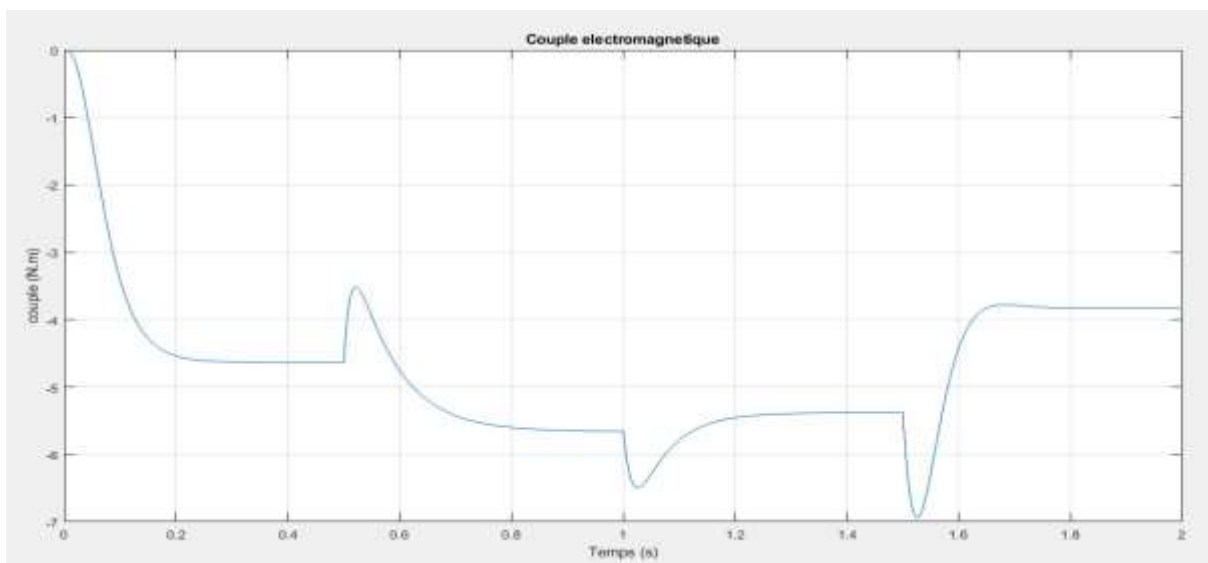


Figure III.6 : Le couple électromagnétique

Cette courbe de couple électromagnétique montre la réponse dynamique de la génératrice synchrone lors des variations de charge, évoluant de **0** vers des valeurs négatives (mode générateur). Le couple suit plusieurs phases : stabilisation initiale autour de **-4.5 N.m**, puis variations transitoires avec des pics à **-3.5 N.m** et **-6.5 N.m**, et stabilisation finale à **-3.8 N.m**. Ces évolutions de couple sont directement liées au courant en quadrature i_{qs} selon la relation $T_e = k \cdot \varphi_f \cdot i_{qs}$, où les variations de couple reflètent les changements de puissance électrique délivrée lors des modifications de charge. Les valeurs négatives confirment le fonctionnement en mode générateur, et les transitoires correspondent aux redistributions de flux statoriques observées dans les courbes i_{ds}/i_{qs} précédentes.

Cela signifie que la machine ne comporte pas un régulateur, ce qui va provoquer une variation non maîtrisée de la tension de sortie v_{as} .

Sans régulation, la tension v_{as} présente des variations significatives en réponse aux perturbations, traduisant une faible robustesse face aux changements de charge. En revanche, avec l'introduction d'une régulation automatique, on observe une amélioration notable de la stabilité de v_{as} et un ajustement dynamique du courant i_f permettant de compenser efficacement les variations de charge.

Cette figure va présenter le changement de tension de sortie (chute et augmentation) selon la variation de charge

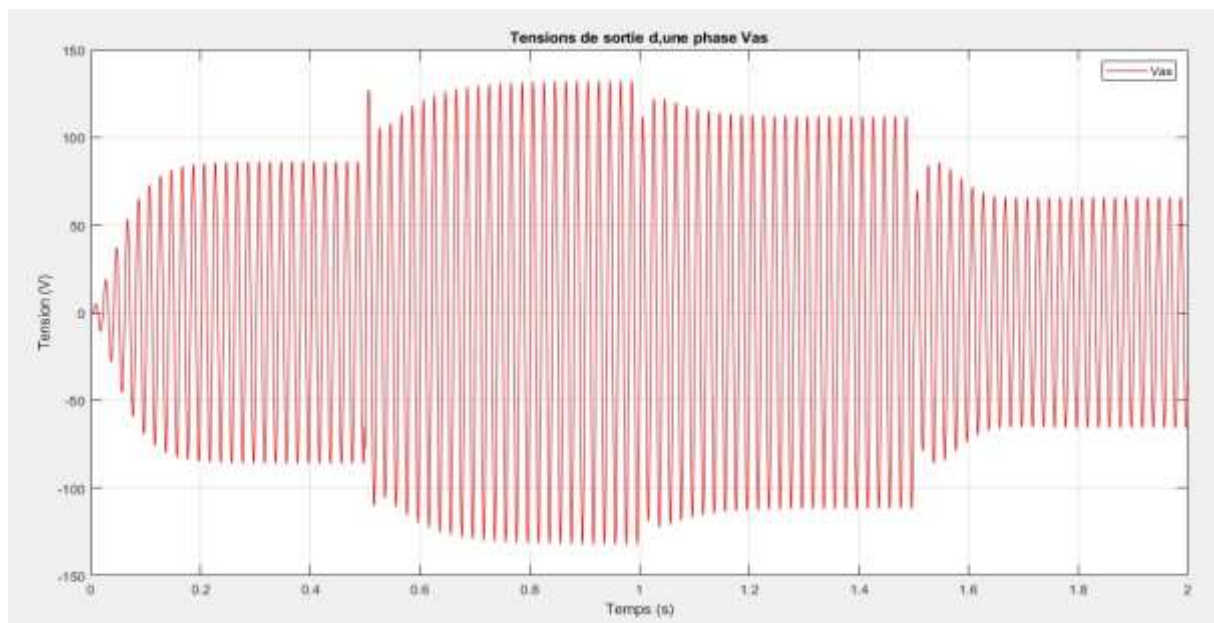


Figure III.7 : La tension de sortie d'une phase

La courbe de la tension de phase v_{as} nous montre clairement l'effet des variations de charge appliquées successivement aux instants 0 s, 0.5 s, 1 s et 1.5 s. Au démarrage ($t = 0$ s), la tension s'établit progressivement avec une faible oscillation transitoire. À $t = 0.5$ s, une augmentation soudaine de la charge entraîne une élévation significative de l'amplitude de la tension, traduisant l'absence de contrôle automatique. Ensuite, à $t = 1$ s, la charge diminue, ce qui provoque une chute rapide de la tension de phase. Enfin, à $t = 1.5$ s, une nouvelle variation de charge génère une nouvelle augmentation de la tension. L'ensemble de ces réponses met en évidence un comportement instable où la tension suit directement les variations de charge sans correction, confirmant que la machine fonctionne sans système de régulation pour compenser les perturbations.

Tableau III.1 : Caractéristiques de de la génératrice synchrone

Temps (s)	Charge appliquée (ohm)	Flux statorique φ_{ds} (Wb)	Flux statorique φ_{qs} (Wb)	Tension sorti v_{as} (V)	Couple (N.m)
$t > 0s$ à $t < 0.5s$	40	-1.1	-1.86	86	-4.63
$t > 0.5s$ à $t < 1s$	70	-0.65	-1.77	132	-5.64
$t > 1s$ à $t < 1.5$	55	-0.85	-1.86	112	-5.38
$t > 1.5s$ à $t < 2s$	30	-1.31	-1.76	65	-3.82

Et pour une simulation sans régulation, la tension v_{as} présente des variations significatives en réponse aux perturbations, traduisant une faible robustesse face aux changements de charge.

Conclusion :

La modélisation d'une génératrice synchrone triphasée à rotor bobiné constitue une étape essentielle pour comprendre, analyser et optimiser son fonctionnement dans un contexte de production d'énergie électrique, avec un but principal pour la prévention, le contrôle et le comportement de la machine pour bien garantir une tension triphasée soigneusement équilibrée, stable et proche a la tension nominale pour toutes variation de charges

À travers l'étude, nous analysons les équations fondamentales régissant la machine, notamment les relations entre les tensions, les courants et les flux dans les enroulements

statoriques et rotoriques, ainsi que l'impact des paramètres électriques et mécaniques sur les performances du système.

En finalisons cette étude pour bien proposer une ou plusieurs solutions d'amélioration sur :

- Régime transitoire et permanent
- L'évaluation de la stabilité du système,
- Correction par régulation PI ou par AVR
- L'analyse comportementale du système via simulation numérique en régime transitoire, en présence de perturbations ou de variations de charge.

CHAPITRE IV :
PERFORMANCES DE LA
GÉNÉRATRICE
SYNCHRONNE AVEC LA
RÉGULATION DE TENSION
DE SORTIE

Introduction aux régulateurs de tension automatique :

Dans tout système électrique ou électronique, la stabilité de la tension d'alimentation est cruciale. Les composants électroniques, qu'ils soient analogiques ou numériques, nécessitent une tension bien définie pour fonctionner correctement. C'est dans ce contexte que les régulateurs de tension automatique entrent en jeu : ce sont des dispositifs conçus pour maintenir une tension de sortie constante, malgré les variations de la tension d'entrée ou des charges connectées.

Un régulateur de tension automatique (parfois appelé régulateur de tension, ou stabilisateur) a pour mission de corriger automatiquement les fluctuations de tension provenant de la source d'alimentation (secteur, batterie, alternateur, etc.) pour fournir une tension stable et fiable à l'équipement alimenté. Ces dispositifs sont largement utilisés dans les systèmes de distribution d'énergie, les équipements sensibles (ordinateurs, appareils médicaux, télécommunications), et dans les circuits électroniques embarqués.

Le régulateur de tension automatique ajuste continuellement la tension en temps réel grâce à des composants internes tels que des transistors, relais, transformateurs, condensateurs, ou des circuits à découpage, selon le type de régulateur (linéaire ou à découpage). [42]

IV.1.Fonctionnement des régulateurs de tension automatique (AVR) :

Le fonctionnement d'un régulateur de tension automatique repose sur un système de contrôle en boucle fermée. Son objectif est de comparer en permanence la tension de sortie réelle à une valeur de référence, et de corriger automatiquement toute déviation pour maintenir une tension stable. [43]

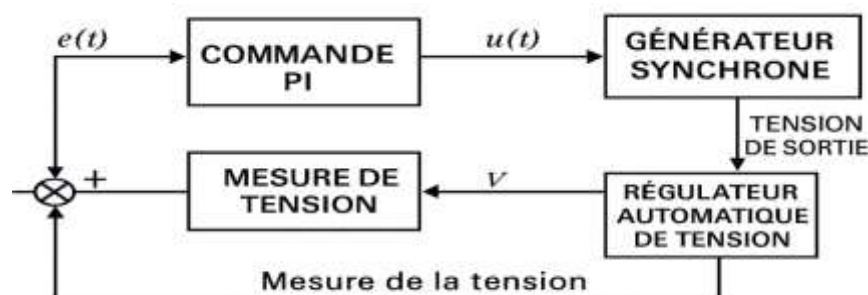


Figure IV.1 : La boucle fermée d'un régulateur

Ça se passe à quatre étapes essentielles :

IV.1.1. Mesure de la tension de sortie :

Le régulateur surveille en continu la tension produite par la source (générateur, transformateur, secteur, etc.). Un circuit de détection mesure cette tension.

Circuit de détection, appelé aussi circuit de rétroaction (**feedback**). Ce circuit est connecté aux bornes de sortie de la source (comme l'alternateur dans un groupe électrogène) et prélève une petite partie de la tension pour l'analyse. [44]

- Étapes de la mesure :

1. Prélèvement de la tension :

- Le régulateur prélève une partie proportionnelle de la tension de sortie à l'aide d'un diviseur de tension constitué de résistances.
- Cela permet de ramener une haute tension (par exemple 220 V) à une valeur plus basse et sécurisée, exploitable par l'électronique interne (ex : 5V ou 1.1V).

2. Filtrage et conditionnement du signal :

- Avant l'analyse, la tension est filtrée (élimination du bruit ou des pics) et parfois redressée (passage de l'alternatif au continu) si nécessaire.

3. Comparaison par un amplificateur opérationnel ou un microcontrôleur :

- Cette tension échantillonnée est envoyée vers un comparateur (souvent un amplificateur opérationnel ou un convertisseur analogique-numérique dans un microcontrôleur).
- Elle est comparée à une tension de référence générée en interne (souvent par une diode (**ZENER**) ou un circuit intégré de référence de tension).

4. Décision de correction :

- Si la tension mesurée est différente de la référence, le circuit déclenche une action de régulation (par exemple, augmenter ou réduire le courant d'excitation dans l'alternateur).

- Composants utilisés dans la mesure :

- Diviseur de tension : pour ramener la haute tension à une plage mesurable.
- Filtre RC (résistance + condensateur) : pour stabiliser le signal.
- Amplificateur opérationnel ou microcontrôleur : pour comparer et décider.
- Source de tension de référence : pour avoir un point de comparaison stable.

IV.1.2. Comparaison avec une référence :

La tension mesurée est comparée à une tension de référence (fixée en interne ou par l'utilisateur). Si une différence est détectée (trop haute ou trop basse), le régulateur réagit. [44]

Le système de contrôle en boucle fermée, basé sur un composant appelé amplificateur d'erreur, Voici les étapes détaillées :

➤ Tension de consigne (valeur de référence) :

La tension de consigne est une tension fixe que le régulateur doit maintenir en sortie. Elle peut être fournie :

- Par une diode **ZENER** (dans les régulateurs simples),
- Par un pont diviseur de tension calibré,
- Ou par un circuit intégré de référence de précision (comme le TL431).

❖ Mesure de la tension de sortie :

La tension réellement produite par le générateur ou l'alimentation est mesurée, souvent réduite à une échelle plus faible grâce à un pont diviseur de tension, pour pouvoir être comparée sans danger.

➤ Comparateur ou amplificateur d'erreur :

La tension mesurée et la tension de consigne sont envoyées à un amplificateur opérationnel, configuré comme comparateur ou amplificateur d'erreur. Ce composant :

- Compare les deux tensions,
- Calcule la différence (erreur),
- Génère un signal proportionnel à cette erreur.

➤ **Réaction à l'erreur :**

Ce signal d'erreur est ensuite utilisé pour :

- Commander un transistor ou un circuit de régulation (dans les régulateurs linéaires),
- Contrôler un circuit de découpage (dans les régulateurs à découpage),

- Ou ajuster le courant d'excitation dans un alternateur (dans un groupe électrogène).

Le but est toujours le même : réduire l'erreur à zéro, c'est-à-dire que la tension de sortie réelle atteigne la valeur de consigne.

IV.1.3. Correction automatique :

Selon le type de régulateur :

- Dans un régulateur linéaire, des transistors agissent comme des résistances variables pour absorber l'excès de tension ou ajuster le passage du courant.
- Dans un régulateur à découpage (**switch ING**), des interrupteurs électroniques (transistors de puissance) s'ouvrent et se ferment rapidement pour moduler la tension, avec l'aide de bobines (inductances) et condensateurs.
- Dans un **AVR** de groupe électrogène, il ajuste l'excitation de l'alternateur (le courant fourni à son enroulement inducteur) pour stabiliser la tension en sortie.
- Le système répète ce processus en continu. [44]

IV.1.4. Stabilisation continue :

Le système fonctionne en boucle fermée : dès qu'une variation de tension est détectée, elle est immédiatement compensée. Ce processus se répète en continu pendant tout le fonctionnement. [44]

IV.2. Les bénéfices d'un AVR pour un groupe électrogène :

- Tension de sortie stable :

L'AVR maintient une tension constante, même lorsque la charge varie (par exemple quand un appareil démarre ou s'arrête). Cela protège les équipements connectés contre les surtensions et sous-tensions.

- Protection des appareils sensibles :

Les appareils électroniques modernes (ordinateurs, téléviseurs, équipements médicaux, etc.) sont très sensibles aux variations de tension. L'AVR évite les dommages ou dysfonctionnements causés par une tension instable.

➤ Amélioration de la durée de vie des équipements :

En assurant une alimentation stable, le régulateur réduit l'usure des moteurs, compresseurs, composants électroniques et autres appareils branchés sur le groupe électrogène.

➤ Fonctionnement optimal du groupe électrogène :

Une tension régulée permet au groupe électrogène de fournir une puissance de la qualité, ce qui est crucial pour les applications industrielles, professionnelles ou critiques (ex. hôpitaux, data centres).

➤ Réduction des coupures et pannes :

En évitant les chutes brutales de tension ou les pics, l'AVR diminue le risque d'interruption de service ou d'arrêt brutal des appareils.

➤ Amélioration de la régulation de fréquence (indirectement) :

Bien que l'AVR ne régule pas directement la fréquence, une tension bien stabilisée soutient la stabilité générale du système électrique et améliore le comportement des charges sensibles à la fréquence. [45]

En résumé :

Un AVR dans un groupe électrogène assure une tension de sortie propre, stable et sécurisée, ce qui permet de protéger les appareils, éviter les pannes, et optimiser la performance globale du système.

IV.3. Types des AVR pour les groupes électrogènes :

➤ **Régulateur de tension analogique :**

✓ **Fonctionnement :**

Utilise des composants électroniques analogiques (amplificateurs, diodes, transistors) pour détecter les variations de tension en sortie de l'alternateur et ajuster le courant d'excitation du rotor en conséquence.

✓ **Avantages :**

- Simplicité de conception
- Fiabilité éprouvée
- Coût modéré

✓ **Inconvénients :**

- Moins précis que les systèmes numériques
- Moins adapté aux charges sensibles ou aux variations rapides de charge leroy-somer.com+13fr.fridayparts.com+13leroy-somer.com+13

➤ **Régulateur de tension numérique (ou électronique à microcontrôleur) :**

- ✓ **Fonctionnement :**
- Intègre un microcontrôleur qui mesure en continu la tension de sortie et ajuste finement le courant d'excitation via des algorithmes numériques.

✓ **Avantages :**

- Haute précision de régulation
- Pro amabilité et adaptabilité
- Fonctions de diagnostic et de protection avancées

✓ **Inconvénients :**

- Coût plus élevé
- Complexité de configuration et de maintenance

➤ **Régulateur à réponse rapide (FAST REPONSE AVR) :**

- ✓ **Fonctionnement :**
- Conçu pour réagir très rapidement aux variations brusques de charge, en ajustant instantanément le courant d'excitation pour maintenir la tension de sortie stable.

✓ **Avantages :**

- Idéal pour les applications critiques (hôpitaux, industries sensibles)
- Maintien de la stabilité de tension lors de variations rapides de charge

✓ **Inconvénients :**

- Coût plus élevé que les AVR standard
- Peut nécessiter une configuration spécifique selon l'application

➤ **Régulateur de tension statique (STATIC excitation AVR) :**

✓ **Fonctionnement** :

Fournit l'excitation via des composants statiques (thyristors, IGBT) sans balais ni pièces mobiles, améliorant ainsi la fiabilité et la rapidité de réponse.

✓ **Avantages :**

- Maintenance réduite (pas de pièces mobiles)
- Réponse rapide aux variations de charge
- Adapté aux alternateurs de grande puissance

✓ **Inconvénients :**

- Technologie avancée nécessitant une expertise pour l'installation et la maintenance
- Coût plus élevé

➤ **Régulateur BRUSHLESS (sans balais) :**

✓ **Fonctionnement** :

Conçu pour les alternateurs sans balais, il commande l'excitation via un petit générateur auxiliaire tournant avec le rotor, éliminant ainsi les contacts mécaniques.

✓ **Avantages :**

- Absence d'usure mécanique (pas de balais)
- Maintenance réduite
- Fiabilité accrue

✓ **Inconvénients :**

- Dépend du design spécifique de l'alternateur
- Moins flexible pour certaines configurations

➤ **Régulateur redondant (double AVR ou AVR avec secours) :**

✓ **Fonctionnement** :

Deux AVR sont installés (un principal et un de secours) pour assurer la continuité de service en cas de défaillance du régulateur principal.

✓ **Avantages :**

- Haute fiabilité et disponibilité
- Essentiel pour les installations critiques nécessitant une alimentation ininterrompue

✓ **Inconvénients :**

- Coût d'installation et de maintenance plus élevé
- Complexité accrue du système

IV.4. Le rôle de l'excitation :

IV.4.1. Introduction :

Le système d'excitation fournit le courant continu nécessaire à l'enroulement rotor (inducteur) d'une génératrice synchrone. Ce courant est régulé automatiquement par l'AVR pour maintenir une tension de sortie constante au stator, même si la charge varie.

IV.4.2. Types d'excitations utilisées avec les AVR :

1. Excitation indépendante (excitatrice externe + AVR) :

- Le courant d'excitation est fourni par une source de courant externe indépendante, souvent une petite génératrice d'excitation (excitatrice).
- L'AVR contrôle cette source pour réguler l'excitation du rotor.

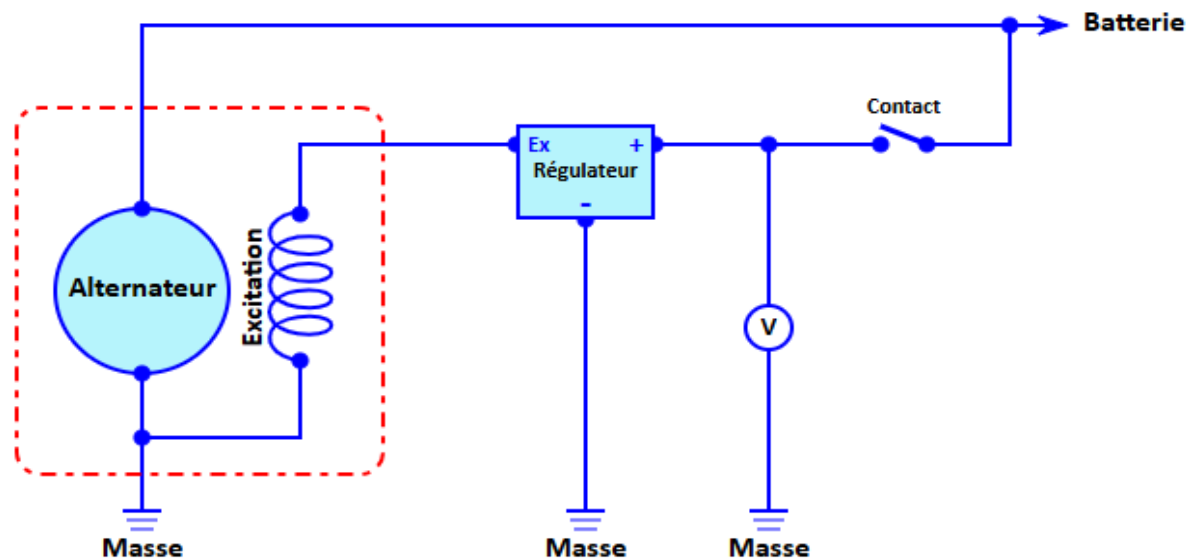


Figure IV.2 : Excitatrice externe + avr.

Caractéristiques :

- Très stable, utilisé dans les grandes centrales.
- Permet une excitation même au démarrage (pas besoin d'aimantation résiduelle).

Exemple : Excitatrice à courant continu alimentée par un moteur auxiliaire, pilotée par l'AVR

2. Auto-excitation (self-excited AVR):

- L'AVR prélève l'énergie directement des bornes de la génératrice (stator).
- Il la redresse et l'utilise pour alimenter le rotor.

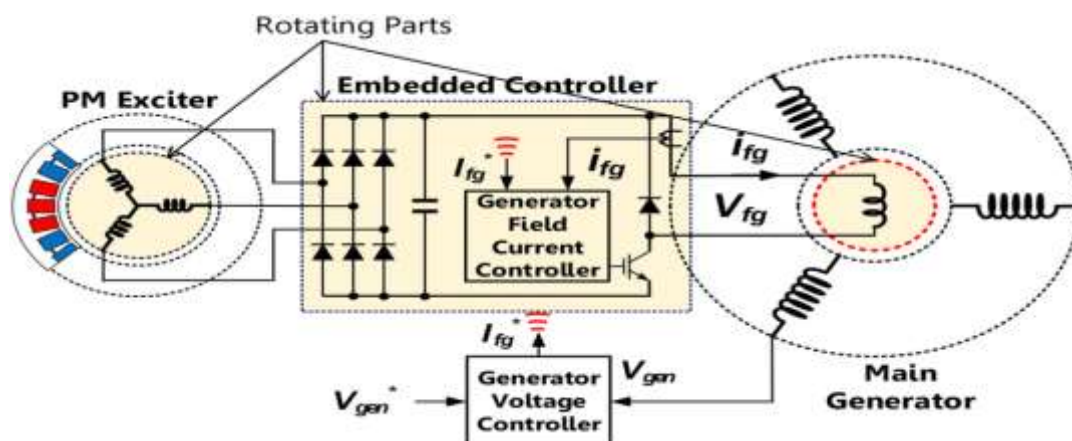


Figure IV.3 Auto excitation d'un avr.

Caractéristiques :

- Simplicité, pas besoin de source externe.
- Dépend de l'aimantation résiduelle pour démarrer.
- Peut poser problème si la tension initiale est trop faible.

Exemple : Groupes électrogènes portables ou industriels standards.

3. Excitation via excitatrice tournante (bushes AVR system) :

- La génératrice est couplée à une excitatrice sans balais (génératrice AC montée sur le même arbre).
- L'AVR contrôle le champ de l'excitatrice.
- La sortie AC de l'excitatrice est redressée par un redresseur rotatif (pont de diodes tournant), qui injecte du courant continu dans le rotor principal.

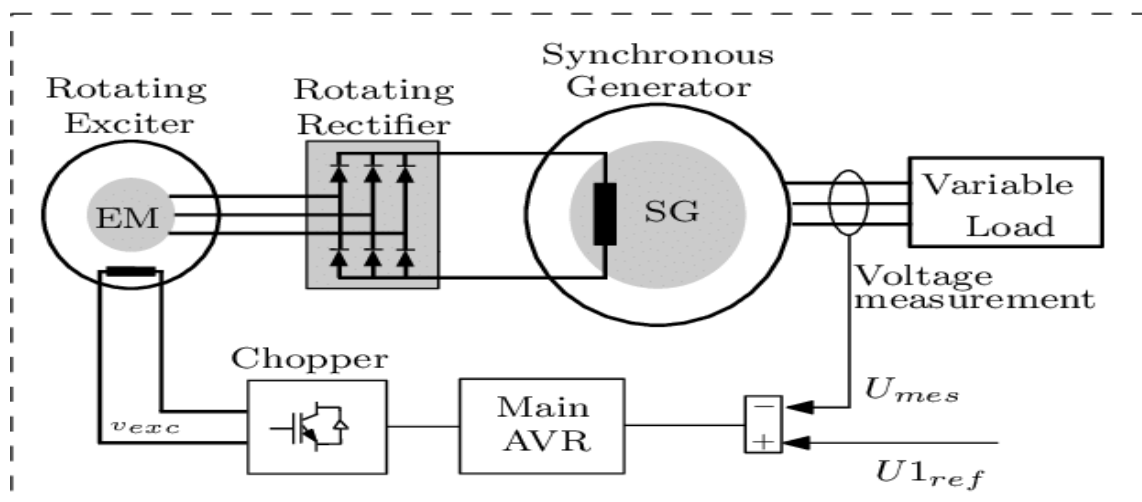


Figure IV.4 bushes avr système

Caractéristiques :

- Aucun balai → pas d'usure mécanique.
- Fiable, durable, idéal pour les environnements sévères.
- L'AVR régule le champ de l'excitatrice, pas directement le rotor principal.

IV.4.3. Choix d'un AVR (Automatique Voltage Régulateur) :

1. Connaître les caractéristiques de la génératrice :

Avant tout, il faut récupérer les données techniques de la génératrice :

Tableau IV. 1 Choix d'un avr selon les caractéristiques

Caractéristique	À faire
Puissance nominale (KVA/kW)	Vérifier si l'AVR supporte cette puissance
Tension nominale de sortie (V)	220V / 400V / autre ? L'AVR doit être compatible
Fréquence de fonctionnement (Hz)	50 Hz (Algérie) ou 60 Hz
Type de rotor	Rotor bobiné ou aimants permanents
Type d'excitation	Indépendante, auto-excitée ou sans balais
Présence ou non d'un exciter	S'il y a un exciter, il faut un AVR bushes

1. **Choisir selon le type d'excitation :**

Tableau IV.2 Choix d'un avr selon le type d'excitation

Type de génératrice	Type d'AVR recommandé
Auto-excitée avec balais	AVR classique à connexion sur enroulement principal
Avec exciter (bushes)	AVR bushes, avec régulation à travers exciter
À excitation indépendante	AVR à alimentation externe (DC supplie)

2. **Vérifier les paramètres électriques de l'AVR :**

Tableau IV.3 Choix d'un avr selon les paramètres électrique

Paramètre de l'AVR	Ce qu'il faut vérifier
Plage de tension d'entrée	Compatible avec la tension de l'enroulement statique auxiliaire
Tension de sortie régulée (DC)	Compatible avec les bobines du rotor (généralement 40–90 VDC)
Courant de sortie maximal (A)	Doit suffire pour l'excitation du rotor (ex. 3–6 A ou plus)
Stabilité de régulation (%)	Choisir $< \pm 1\%$ pour applications sensibles
Temps de réponse	Court pour des charges dynamiques

3. Choisir selon le type de charge (utilisation) :

Tableau IV.4 choix d'un avr selon le type de charge

Type de charge ou d'application	Recommandation AVR
Charges électroniques (informatique, UPS)	AVR avec <1% de variation de tension, réponse rapide
Charges de démarrage moteur	AVR avec surcharge temporaire admissible
Groupes électrogènes de secours	AVR à démarrage autonome, bon maintien de tension
Parallélisme avec réseau ou autres groupes	AVR avec fonction de synchronisation

IV.5. Introduction aux correcteurs dans les systèmes de régulation :

Dans le domaine de l'automatique et du contrôle des systèmes électrotechniques, les correcteurs jouent un rôle fondamental pour assurer la stabilité, la précision et la performance des processus régulés. Lorsqu'il s'agit de maintenir une grandeur physique (comme la tension d'un alternateur synchrone) à une valeur souhaitée malgré les perturbations (variation de charge, fluctuation de vitesse, etc.), une boucle de régulation est mise en place. Cette boucle inclut un capteur, un système à réguler (comme une génératrice), un actionneur, et surtout un correcteur.

Le correcteur est l'élément central qui traite l'erreur entre la consigne (valeur désirée) et la mesure réelle. Il produit alors un signal de commande qui agit sur le système (ici : le courant d'excitation du rotor) afin de minimiser cette erreur dans le temps.

IV.5.1. Description des correcteurs :

IV.5.1.1. Définition des Correcteurs :

Un correcteur est un composant ou une fonction mathématique utilisée dans les systèmes de commande automatique pour modifier dynamiquement le comportement d'un système dans le but d'obtenir une réponse plus précise, plus rapide, et plus stable. Il agit en traitant le signal d'erreur (écart entre la consigne et la mesure) afin de produire un signal de commande optimal qui pilote l'actionneur (par exemple, l'excitation dans une génératrice synchrone).

Les correcteurs sont couramment utilisés dans :

- Les régulateurs de tension (**AVR**),
- Les régulateurs de vitesse,

- Et d'autres systèmes de contrôle de processus industriels.

IV.5.1.2. Rôle des Correcteurs :

Les correcteurs sont des dispositifs ou fonctions mathématiques intégrés dans les systèmes de commande automatique (comme l'AVR – Automatique Voltage Régulateur) pour améliorer le comportement dynamique et la précision du système. Leur rôle principal est de traiter le signal d'erreur (la différence entre la grandeur mesurée et la consigne) afin de produire un signal de commande optimal.

IV.5.1.3. Objectifs principaux :

a) Réduction de l'erreur :

- Corriger la différence entre la consigne (valeur désirée, par exemple 400 V) et la sortie réelle (tension mesurée en sortie de l'alternateur).
- Un correcteur bien choisi permet de réduire l'erreur statique et dynamique.

b) Amélioration de la stabilité :

- Éviter les oscillations ou les comportements instables.
- Rendre le système plus robuste face aux perturbations (ex : variations de charge sur la génératrice).

c) Réduction du temps de réponse :

- Accélérer la réponse du système après une perturbation.
- Par exemple : si une charge est ajoutée brusquement, le correcteur permet un retour rapide à la tension nominale.

d) Anticipation et adaptation :

- Certains correcteurs (comme le D ou le PID) anticipent les évolutions de l'erreur pour corriger avant que le système ne s'écarte trop.
- Cela améliore la réactivité et la prévision du comportement.

4. Fonctionnement des correcteurs dans un système de régulation :

1) Principe de base :

Un correcteur agit dans la boucle de régulation. Il reçoit le signal d'erreur, c'est-à-dire la différence entre la valeur désirée (**consigne**) et la valeur mesurée (**sortie réelle**), puis traite cette erreur pour générer un signal de commande destiné à agir sur l'actionneur (exemple : l'AVR, qui régule l'excitation de la génératrice).

Erreur $e(t) = V \text{ consigne} - V \text{ mesurée}$

Commande $u(t) = \text{Correcteur}(e(t))$

Le correcteur transforme donc $e(t)$ pour que la tension de sortie suive au mieux la consigne.

2) Fonctionnement par type de correcteur :

a) Correcteur Proportionnel (P) :

- Réagit proportionnellement à l'erreur.
- Si l'erreur est grande, la correction est grande.

$$U(t) = K_p \cdot e(t)$$

Effet :

- Accélère la réponse.
- Diminue l'erreur, mais ne l'annule pas complètement.

b) Correcteur Intégral (I) :

- Intègre l'erreur dans le temps → effet cumulatif.

$$U(t) = K_i \cdot \int_0^t e(t) dt$$

Effet :

- Corrige l'erreur statique (écart permanent).
- Peut rendre le système plus lent ou instable si mal réglé.

c) *Correcteur Dérivé (D) :*

- Anticipe les changements de l'erreur → dérivée temporelle.

$$U(t) = K_d \cdot \frac{d e(t)}{dt}$$

Effet :

- Stabilise le système.
- Réduit les dépassements et oscillations.

d) *Correcteur PID (Proportionnel-Intégral-Dérivé) :*

$$U(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(t) dt + K_d \cdot \frac{d e(t)}{dt}$$

Effet :

- Combine les avantages des trois correcteurs.
- Réglable pour obtenir un compromis optimal entre :
 - Stabilité
 - Temps de réponse
 - Précision
 - Amortissement

Exemple de boucle :

1. **Consigne** : tension désirée (par ex. 400 V)
2. **Capteur** : mesure la tension de sortie réelle
3. **Erreur** : différence entre consigne et tension mesurée
4. **Correcteur PID** : traite l'erreur
5. **AVR** : reçoit le signal corrigé et ajuste le courant d'excitation
6. **Génératrice** : modifie la tension en conséquence

- Le processus continue en boucle pour maintenir une tension stable, malgré :

- Les variations de charge
- Les perturbations
- L'usure mécanique

IV.6. Équation de transfert (exemple simplifié) :

Pour un correcteur **PID** appliqué à un système de régulation :

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

Et si on modélise l'**AVR + génératrice synchrone** par une fonction de transfert simplifiée :

$$G_{systeme}(s) = \frac{K}{1 + \tau s}$$

Alors la fonction de transfert **en boucle ouverte** devient :

$$G_{BO}(s) = G_c(s) \cdot G_{systeme}(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) \cdot \frac{K}{1 + \tau s}$$

Et la fonction de transfert **en boucle fermée** est donnée par :

$$G_{BF}(s) = \frac{G_{BO}(s)}{1 + G_{BO}(s)}$$

IV.7. Classification des Correcteurs :

Les correcteurs sont des composants essentiels dans les systèmes de régulation automatique. Ils permettent d'améliorer les performances dynamiques (temps de réponse, stabilité) et la précision (erreur statique) du système. Voici une classification des correcteurs P, PI, PD et PID selon trois critères : temps de réponse, précision et stabilité.

Tableau comparatif des correcteurs :

Tableau IV.5 : classification des correcteurs

Type de correcteur	Temps de réponse	Précision (erreur statique)	Stabilité du système	Commentaires
P (Proportionnel)	Rapide	Moyenne (erreur résiduelle)	Bonne (si K_p bien choisi)	Simple, mais laisse une erreur permanente

PI (Proportionnel + Intégral)	Plus lent que P	Élevée (erreur nulle en régime permanent)	Bonne (si K i modéré)	Corrige l'erreur statique mais ralentit un peu la réponse
PD (Proportionnel + Dérivé)	Très rapide	Moyenne	Améliorée (meilleure anticipation)	Réduit l'oscillation, améliore la stabilité mais ne corrige pas l'erreur statique
PID (Proportionnel + Intégral + Dérivé)	Bon compromis	Très élevée (erreur nulle)	Très bonne (si bien réglé)	Le plus complet et utilisé, équilibre précision et rapidité

IV.8. Calcul de Kp et Ki :

La régulation de la tension de sortie d'une génératrice synchrone nécessite un correcteur (généralement de type **PI**) capable de garantir :

- Une tension stable,
- Une réponse rapide sans dépassement excessif,
- Et une bonne précision statique.

Pour concevoir ce correcteur, il est indispensable de connaître le comportement dynamique de la machine, c'est-à-dire son modèle mathématique. Ce modèle permet de prévoir comment la tension réagit à une variation de l'excitation ou de la charge.

Donc comme on a vu dans le chapitre 3, Nos modèle d'état est :

$$\begin{cases} \dot{i}_{ds} = \left(\frac{L_f}{D}\right)(-(R_s + R_{ch})i_{ds} + w_r L_q i_{qs} + \left(-\frac{M_{fd}}{D}\right)(-R_f i_f + v_f)) \\ \dot{i}_{qs} = \left(\frac{1}{(L_q + L_{ch})}\right)(-(R_s + R_{ch})i_{qs} - w_r (L_d i_{ds} + M_{fd} i_f) \\ \dot{i}_f = \left(-\frac{M_{fd}}{D}\right)(-(R_s + R_{ch})i_{ds} + w_r L_q i_{qs}) + \left(\frac{(L_d + L_{ch})}{D}\right)(-R_f i_f + v_f) \end{cases} \quad [47]$$

On a trois équations différentielles : (i_{ds}, i_{qs}, i_f)

Donc l'ordre du système est **n = 3**, Si on ajoute un **régulateur PI** :

$$\dot{z} = e(t) \rightarrow z(t) = \int e(t) dt$$

Donc, ordre total est égal à **3 (machine) + 1 (PI) = 4**

On isole la boucle lente principale, dominée par :

- La dynamique de l'excitation (i_f), très importante,
- La régulation de tension v_s
- Le correcteur PI.

Et on néglige (temporairement) :

- Les courants statoriques i_{ds}, i_{qs}
- Les effets rapides transverses.

On simplifie le **modèle machine + AVR** comme, donc notre système soit d'ordre 2 :

$$G(s) = \frac{K_e}{1+T_e s} \text{ et le régulateur PI : } C(t)=K_p \frac{K_i}{s}$$

D'abord on a l'entrée du régulateur : **$e(t) = V_{ref} - V_t$**

La sortie du régulateur :

U_f Tension d'excitation vers l'inducteur, on prend le régulateur PI :

$$U_f(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt$$

On veut que le système en boucle fermée ait un bon comportement avec une dynamique plus rapide que la machine, la boucle devient :

$$\frac{C(s)G(s)}{1+C(s)G(s)} = \text{fonction de transfert de la boucle fermée}$$

$$\text{On pose : } C(s) G(s) = \frac{K_p K_e + \frac{K_i K_e}{s}}{1+T_e s} \text{ On mise au même dominateur :}$$

$$C(s) G(s) = \frac{K_e(K_p S + K_i)}{S(1 + T_e S)}$$

$$F(S) = \frac{PI(s) \cdot G(s)}{1 + PI(s) \cdot G(s)} \approx \frac{w_n^2}{s^2 + 2\xi w_n s + w_n^2}$$

$$\text{Notre boucle ferme soit : } H(s) = \frac{K_e(K_p S + K_i)}{S(1 + T_e S) + K_e(K_p S + K_i)}$$

Développons le dénominateur :

$$S(1 + T_e S) + K_e(K_p S + K_i) = S + T_e S^2 + K_e K_p S + K_e K_i$$

$$\text{On regroup: } = T_e S^2 + (1 + K_e K_p) S + K_e K_i$$

On veut une boucle ferme sous forme :

$$\frac{w_n^2}{s^2 + 2\xi w_n s + w_n^2}$$

Donc on identifie les coefficients :

$$\begin{cases} T_e = 1 \text{ (normalisation)} \\ 1 + K_e K_p = 2\xi w_n \\ K_e K_i = w_n^2 \end{cases}$$

Donc on a quelque paramètre nécessaire pour le calcul de Kp et Ki :

- K_e : Gain statique du système (machine + excitation)

$$K_e = \frac{V_t}{U_f} \text{ (à régime permanent)}$$

- T_e : constante de temps du système $T_e = \frac{L_f}{R_f}$

Car le circuit d'excitation est généralement un RL, donc sa réponse est :

$$U_f(t) = R_f i_f(t) + L_f \frac{di_f}{dt}$$

- w_n : Pulsation propre (**rad/s**)

But : fixer la vitesse de réponse du système.

- Plus w_n est grand, plus le système est rapide
- ξ : coefficient d'amortissement

But : garantir la stabilité et limiter les oscillations.

$\xi = 0.7$ à 0.8 : Bon compromis stabilité/rapidité (standard industriel)

$\xi = 1$: Temps de réponse plus lent mais sans dépassement

$\xi < 0.7$: Système oscillante

Donc dans nos simulations au Matlab on a les paramètres nécessaires suivants,

$$i_f = 0,35A,$$

, on pose que :

$$\xi=0,8$$

$$w_n = \frac{1}{T_e}, \text{ avec } T_e = \frac{L_f}{R_e} = 0,7s \rightarrow w_n = 1.4 \text{ rad/s}$$

Donc notre système :

$$\begin{cases} T_e = 0,7 \\ 1 + 0,095.K_p = 2.0,8.(1,4) \\ .K_i = (1,4^2) \end{cases}$$

$$K_p = \frac{2.0,8.(1,4)-1}{0.095} = 13 \quad , K_i = \frac{1,96}{0.095} = 20$$

IV.9. Analyse et interprétation des résultats avec régulation :

L'introduction d'une régulation automatique, on observe une amélioration notable de la stabilité de v_{as} et un ajustement dynamique du courant i_f permettant de compenser efficacement les variations de charge.

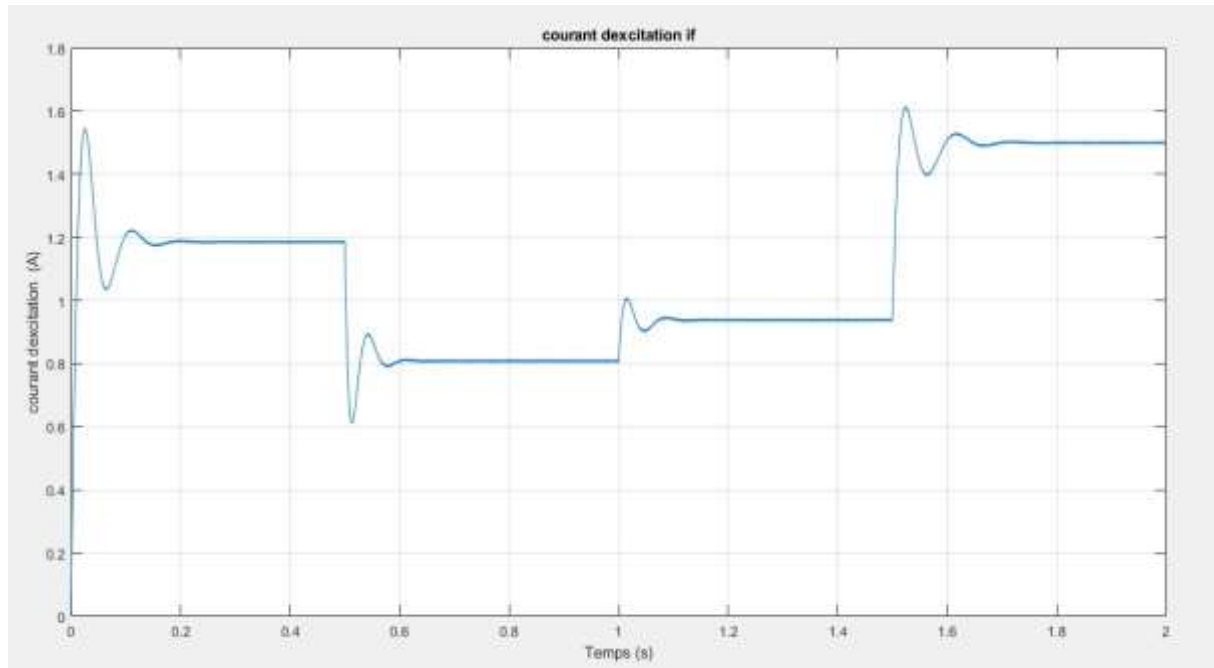


Figure IV.5 Ajustement de courant d'excitation selon la variation de charge

La figure illustre l'évolution du courant d'excitation i_f en présence d'un **régulateur PI**. Contrairement au cas sans régulation, on observe ici une dynamique d'ajustement continue et rapide du courant i_f en réponse aux différentes variations de charge appliquées à $t = 0$ s, 0.5 s, 1 s et 1.5 s.

Au démarrage ($t = 0$ s), le courant i_f s'établit rapidement avec une légère oscillation transitoire, signe d'une réponse dynamique du régulateur. Lorsque la charge change à $t = 0.5$ s, le courant i_f diminue brusquement, traduisant une adaptation immédiate de l'excitation pour compenser l'augmentation de la charge et maintenir la tension de sortie stable. Une autre correction rapide se produit à $t = 1$ s, où i_f augmente suite à une réduction de la charge, montrant encore une fois l'efficacité de la régulation. Enfin, une réponse similaire est observée à $t = 1.5$ s avec une augmentation significative de i_f pour s'adapter à une nouvelle variation de charge.

Le courant i_f détermine le flux magnétique du rotor, qui contrôle directement la tension générée.

- Lorsque la charge change :

- Si la charge augmente $\rightarrow$ la tension tend à chuter $\rightarrow$ le régulateur augmente rapidement i_f pour compenser.
- Si la charge diminue $\rightarrow$ la tension tend à augmenter $\rightarrow$ le régulateur réduit rapidement i_f pour stabiliser la tension.

Ces ajustements successifs et rapides confirment que le régulateur PI agit efficacement pour corriger les écarts de tension en modulant le courant d'excitation. Les petites oscillations après chaque perturbation sont typiques d'une réponse transitoire bien amortie, caractéristique d'un régulateur bien dimensionné.

Tableau IV.6 : Comparaison caractéristiques de i_f sans et avec régulation

Temps (s)	Charge appliquée (ohm)	Courant d'excitation i_f (V)
t>0s à t<2s sans régulation	Toutes les charges	$i_f=0,35A$
t>0s à t<0.5s	$R_{ch}=40ohm$	$i_f=1.18A$
t>0.5s à t<1s	$R_{ch}=70ohm$	$i_f=0.81A$
t>1s à t<1.5	$R_{ch}=55ohm$	$i_f=0.93A$
t>1.5s a t<2s	$R_{ch}=30ohm$	$i_f=1.49A$

La tension maintient un niveau de base constant avec des pics transitoires à chaque changement de charge (vers 0.4s, 0.8s, 1.0s et 1.6s). Ces pics correspondent aux actions correctives du régulateur automatique de tension (AVR) qui ajuste rapidement la tension d'excitation pour compenser les variations de tension statorique causées par les changements de charge.

Le courant d'excitation suit proportionnellement ces variations ($i_f = v_f/R_f$), augmentant temporairement lors des pics pour renforcer le flux magnétique et maintenir la tension de sortie constante. Entre les perturbations, la tension revient à sa valeur nominale, démontrant

l'efficacité de la régulation qui assure une tension statorique stable malgré les variations de charge par des ajustements dynamiques de l'excitation rotorique.

Tableau IV.7 : Comparaison caractéristiques de v_f sans et avec régulation

Temps (s)	Charge appliquée (ohm)	Tension d'excitation v_f (V)
$t > 0s$ à $t < 2s$ Sans régulation	Toutes les charges	$v_f = 100v$
$t > 0s$ à $t < 0.5s$	$R_{ch} = 40ohm$	$v_f = 223v$
$t > 0.5s$ à $t < 1s$	$R_{ch} = 70ohm$	$v_f = 182v$
$t > 1s$ à $t < 1.5$	$R_{ch} = 55ohm$	$v_f = 200v$
$t > 1.5s$ à $t < 2s$	$R_{ch} = 30ohm$	$v_f = 241v$

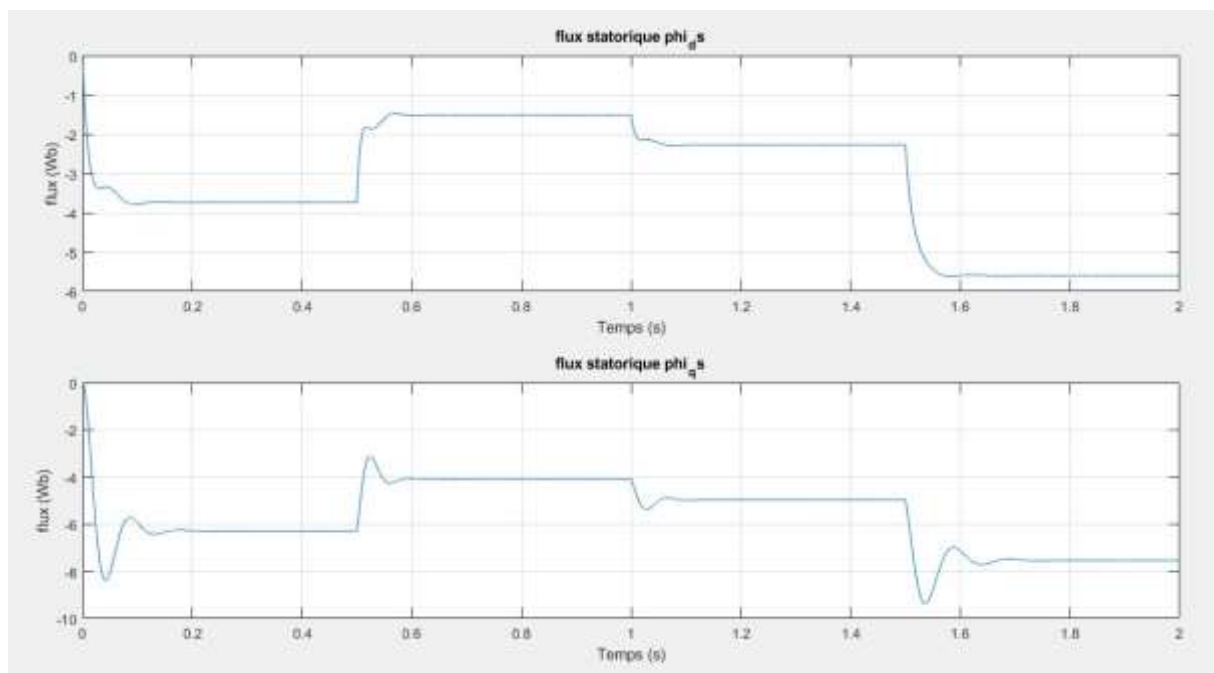


Figure IV.6 Ajustement des flux statorique selon la variation de charge

Ces courbes de flux statoriques φ_{ds} et φ_{qs} montrent l'évolution des composantes directe et en quadrature du flux lors des variations de charge de la génératrice synchrone. Le flux direct φ_{ds} évolue par paliers de -3.72 à -1.51 puis à -2.27 et finalement -5.6 **Wb**, reflétant les ajustements du flux d'excitation en réponse aux changements de charge. Le flux en quadrature

φ_{qs} présente des variations similaires mais avec des amplitudes différentes, évoluant de -6.28 à -4.09 puis -4.97 et -7.53 Wb. Ces variations de flux sont directement liées aux courants statoriques selon $\varphi_{ds} = L_d \cdot i_{ds} + \varphi_f$ et $\varphi_{qs} = L_q \cdot i_{qs}$, où les changements de charge modifient les courants i_{ds} et i_{qs} , entraînant une redistribution des flux magnétiques dans la machine. Les transitions par paliers correspondent aux différents régimes de charge, tandis que les valeurs négatives indiquent l'orientation des flux dans le repère de référence choisi pour la génératrice synchrone.

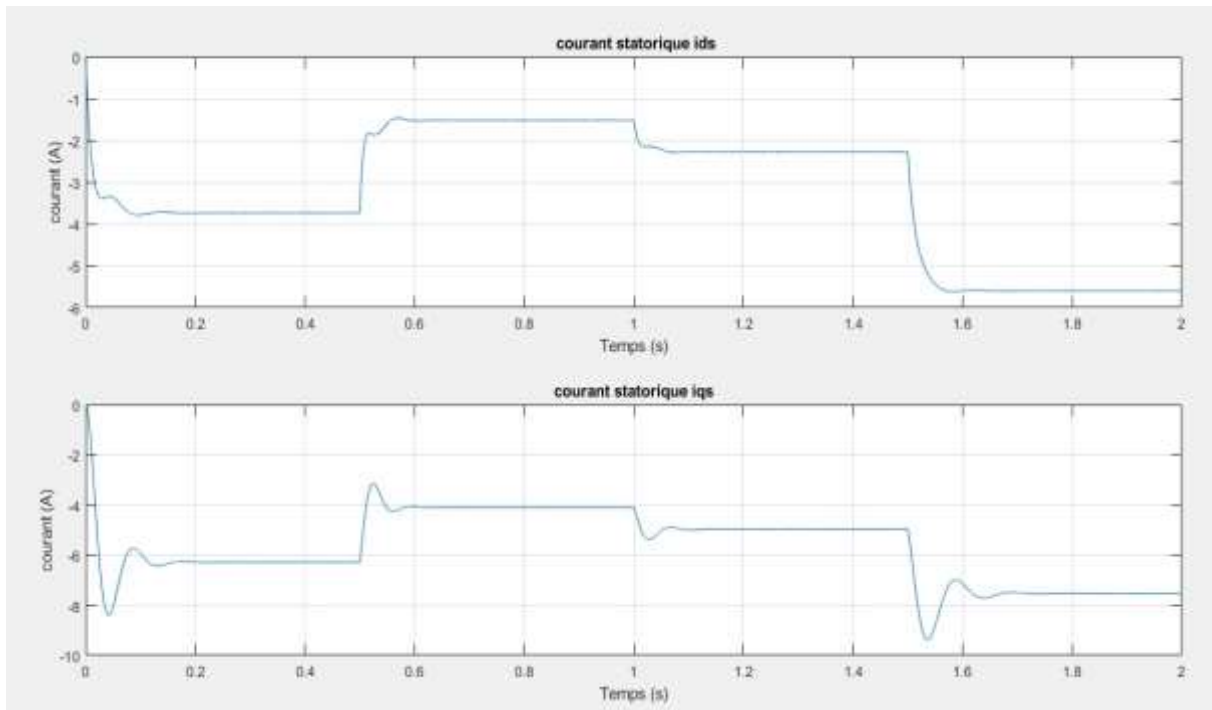


Figure IV.7: Ajustement des courant statorique selon la variation de charge

Ces courbes de courants statoriques i_{ds} et i_{qs} illustrent la réponse dynamique de la génératrice synchrone lors de variations de charge échelonnées. Le courant direct i_{ds} évolue par paliers de -3.72A à -1.52A puis -2.27A et finalement -5.59A, reflétant les ajustements du flux d'excitation pour maintenir l'équilibre magnétique. Le courant en quadrature i_{qs} présente des variations similaires mais avec des amplitudes plus importantes, passant de -6.28A à -4.09A puis -4.97A et -7.53A, car il est directement lié à la puissance active délivrée. Ces variations par paliers correspondent à des échelons de charge appliqués successivement, où chaque augmentation de charge nécessite une adaptation des courants statoriques pour fournir plus de puissance tout en maintenant la tension constante. Les transitions rapides entre paliers montrent la capacité de la génératrice à s'adapter rapidement aux nouvelles conditions de fonctionnement.

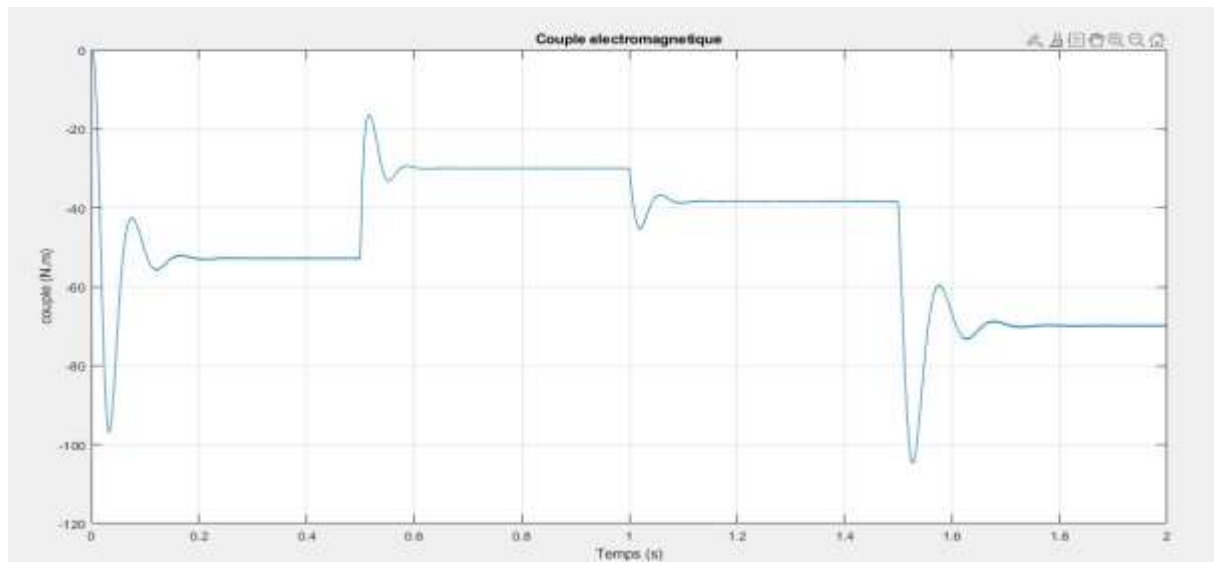


Figure IV.8: Ajustement de couple électromagnétique selon la variation de charge. Cette courbe de couple électromagnétique avec régulation montre la réponse stabilisée lors des variations de charge échelonnées. Le couple évolue par paliers négatifs bien définis : -52 N.m, -30 N.m, -38 N.m et -70 N.m, avec des transitions nettes et des oscillations minimales grâce à l'action du système de régulation. La régulation automatique de tension (AVR) maintient la stabilité du couple en ajustant l'excitation, ce qui se traduit par des plateaux stables entre les changements de charge et des dépassements réduits lors des transitoires. Cette réponse régulée assure un fonctionnement optimal de la génératrice avec une adaptation rapide et stable aux différents niveaux de charge.

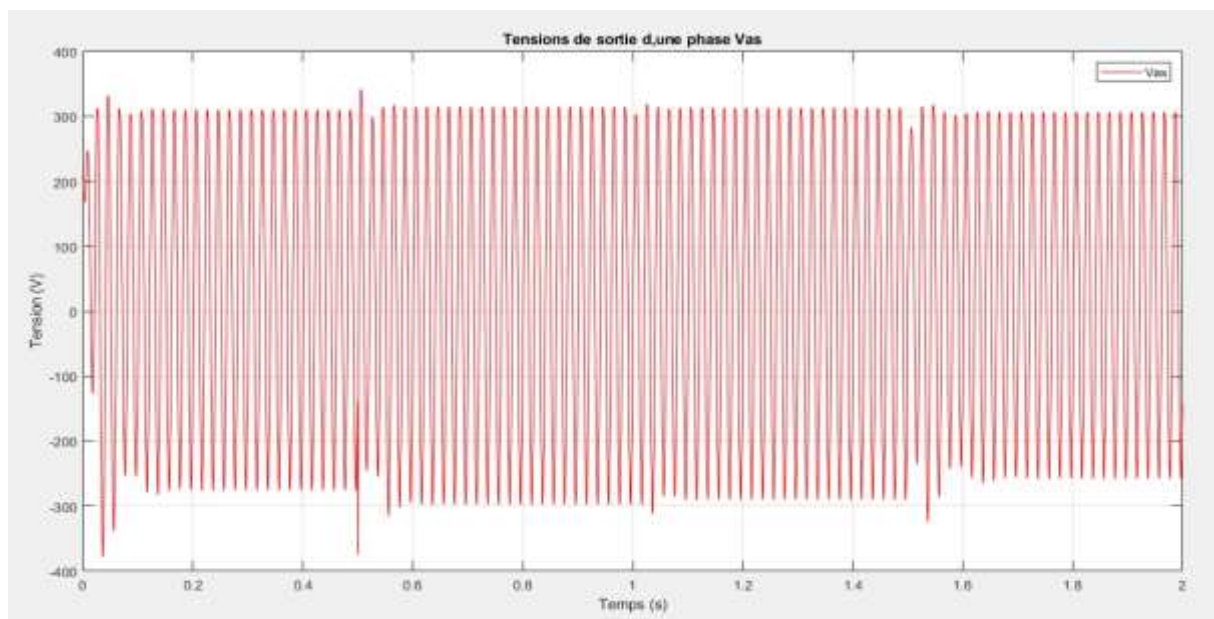


Figure IV.9 : la tension de sortie d'une phase après régulation

- La tension v_{as} s'établit rapidement et reste globalement stable autour de sa valeur de référence (~310V crête).

- Aux instants de changement de charge :

- À $t = 0.5 \text{ s}$ et $t = 1.5 \text{ s}$: de légères chutes transitoires de la tension sont observées, mais elles sont rapidement corrigées.
- À $t = 1 \text{ s}$: la tension s'ajuste rapidement suite à la diminution de la charge.

- Les variations transitoires sont courtes et bien amorties, preuve que le régulateur corrige efficacement les perturbations.

Le comportement de la tension v_{as} dans cette figure confirme l'efficacité de la régulation automatique. Le régulateur PI parvient à maintenir une tension de sortie stable en compensant rapidement les effets des variations de charge.

Ce résultat prouve que la régulation est indispensable pour assurer la qualité et la continuité de l'alimentation électrique, surtout dans des environnements soumis à des perturbations fréquentes.

Tableau IV.8: Caractéristiques de la génératrice après régulation

Temps (s)	Charge appliquée (ohm)	Flux statorique $\varphi_{ds}(\text{Web})$	Flux statorique $\varphi_{ds}(\text{Web})$	Tension sortie $v_{as}(\text{V})$	Couple (N.m)
$t > 0\text{s}$ à $t < 0.5\text{s}$	40	-3.72	-6.28	309	-52
$t > 0.5\text{s}$ à $t < 1\text{s}$	70	-1.51	-4.09	314	-30
$t > 1\text{s}$ à $t < 1.5$	55	-2.27	-4.97	312	-38
$t > 1.5\text{s}$ à $t < 2\text{s}$	30	-5.6	-7.53	306	-70

L'analyse suivante compare les tensions mesurées avant et après régulation pour évaluer l'efficacité du système régulateur pour $v_{ref} = 310 \text{ v}$

Tableau IV.9 : Comparaison finale de tension de sortie avant et après la régulation

Temps (s)	Charge appliquée (ohm)	Tension sortie avant la régulation $v_{as}(V)$	Tension sortie après la régulation $v_{as}(V)$
t>0s à t<0.5s	40	86	309
t>0.5s à t<1s	70	132	314
t>1s à t<1.5	55	112	312
t>1.5s à t<2s	30	65	306

- Le tableau IV.9 présente la comparaison de la tension de sortie avant et après l'application de la régulation pour différentes charges et instants de fonctionnement. Avant la régulation, on observe que la tension de sortie varie de manière significative en fonction des changements de charge. Par exemple, lorsque la charge appliquée est de 40 Ω , la tension chute à 86 V, tandis qu'à 70 Ω , la tension s'élève à 132 V. Ces variations indiquent que la tension de sortie est fortement dépendante des fluctuations de charge et ne reste pas stable en l'absence de régulation. En revanche, après l'activation de la régulation, la tension de sortie se stabilise autour de 309 V à 314 V, quelle que soit la charge appliquée.
- Cela démontre l'efficacité du système de régulation, qui parvient à maintenir la tension proche de la valeur de consigne malgré les perturbations causées par les variations de charge. La régulation permet donc d'assurer une alimentation stable et de compenser rapidement les chutes ou augmentations de tension. Ces résultats mettent en évidence le rôle essentiel de la régulation dans l'amélioration de la qualité de la tension de sortie des génératrices synchrones.

Conclusion

L'étude met clairement en évidence l'importance du système de régulation pour maintenir la tension de sortie stable face aux variations de charge. Sans régulation, la tension fluctue fortement, ce qui peut compromettre le bon fonctionnement des équipements alimentés. Grâce à la régulation, la tension reste pratiquement constante, assurant ainsi une alimentation fiable et de qualité.

CONCLUSION GÉNÉRALE

En conclusion, cette étude a permis de répondre aux enjeux posés par les variations de charge dans les groupes électrogènes équipés de génératrices synchrones à pôles saillants. La modélisation dynamique du système, fondée sur ses équations électromagnétiques, s'est révélée essentielle pour comprendre les interactions entre charge, courant d'excitation et tension de sortie.

Sans régulation, les résultats ont montré une forte instabilité de la tension lors des variations de charge, soulignant les limites de la réponse naturelle du système. En revanche, l'intégration d'un correcteur PI au sein d'un système de régulation automatique (AVR) a démontré une efficacité remarquable pour maintenir la tension stable, même face à des perturbations successives. Le courant d'excitation s'ajuste dynamiquement, permettant de suivre la consigne de tension avec rapidité et précision.

Ainsi, la régulation de tension s'impose comme une solution indispensable pour garantir la fiabilité, la stabilité et la qualité de l'énergie produite. Ce travail confirme également l'importance de bien concevoir et dimensionner les régulateurs pour répondre efficacement aux conditions réelles d'exploitation. La problématique initiale est ainsi résolue par la mise en œuvre d'un régulateur PI performant, validé par simulation numérique, et intégré à un modèle réaliste de la génératrice.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. TAGUIDA, M.I.F.M. — *Mémoire de fin d'étude*, Université Badji Mokhtar Annaba, Département de Génie Électrique, 2013.
2. COLIN, B. (2008). "Groupes électrogènes de secours." *Techniques de l'ingénieur*.
3. DESBAZEILLE, M. (2011). "Diagnostic de groupes électrogènes diesel par analyse de vitesse de vilebrequin." Thèse de Doctorat, Université Jean Monnet.
4. TOUNSI, B. (2007). "Étude comparative des groupes électrogènes embarqués à large gamme de vitesse variable associant machines à aimants permanents et convertisseur statique." Thèse de Doctorat, Institut Polytechnique de Toulouse.
5. BARRET, P. (1987). "Régimes transitoires des machines électriques tournantes." Éditions EYROLLES.
6. HAZEL, T. (2003). "Génération électrique intégrée aux sites industriels et bâtiments commerciaux." *Cahier Technique Schneider* n° 196.
7. Institut IMSI — *Présentation de l'institut*, Université Oran 2, 2023.
8. BISON GENERATOR — *Comparaison entre générateurs à refroidissement à air et à eau*, Blog technique, 2022.
9. N. Toumi, "Etude d'une pompe à eau solaire pour alimenter un chantier pétrolière"
Mémoire de Magister université Ouargla, 2013
10. MEKHADMI, A. — *Étude du fonctionnement et plan de maintenance préventive d'un groupe électrogène*, Mémoire de Master, Université en ligne, 2022.
11. Université de Biskra — *Étude de la régulation d'une génératrice synchrone*, Mémoire de Master, Département Électrotechnique, 2021.
12. Université de Boumerdès — *Commande vectorielle d'une machine synchrone*, Mémoire de Master, Département Génie Électrique, 2021.
13. Université de Béjaïa — *Catalogue de la bibliothèque universitaire*, 2020.
14. UBBA (2024). *UBBA Repository – Universal Bibliographic and Bibliometric Archive*. UBBA.
15. NIDEC — *Catalogue technique Leroy-Somer*, ACIM, Nidec Corporation, 2019.
16. ABB — *Technologies et solutions électriques*, ABB Group, 2020.

17. Scribd — *Polycopie de machines électriques approfondies*, Édition anonyme, 2019.
18. **Schneider Electric** (2003). *Cahier Technique n° 196 – Génération et gestion des groupes électrogènes*. Schneider Electric.
19. Université de Batna 2 — *Support de cours de machines électriques*, Faculté de Génie Électrique, 2021.
20. Université de Blida 1 — *Régulation de tension d'un alternateur triphasé*, Mémoire de Master, 2022.
21. DSF Technologies — *Régulation électronique de vitesse : gamme de produits*, Présentation commerciale, 2017.
22. AÏT SALAH, M. — *Capteurs et instrumentation*, Notes de cours, ResearchGate, 2021
23. Université de M'Sila — *Polycopie de Machines électriques*, Année universitaire 2015-2016.
24. Université USTO — *Cours IEA - Machines synchrones*, Faculté de Génie Électrique, 2020.
25. Université USTO — *Support de cours : électromécanique*, Faculté de Génie Électrique, 2023.
26. Université de Blida — *Étude de commande d'une génératrice synchrone*, Mémoire de Master, 2006.
27. Université de M'Sila — *Cours en ligne : Machines tournantes*, Moodle officiel, 2023.
28. Groupe-Électrique.fr — *Présentation des groupes électrogènes industriels*, Fiche technique, 2021.
29. Université de Boumerdès — *Guide de maintenance des systèmes électriques*, Département de Génie Électrique, 2021.
30. OTMANE-CHERIF, A. (2016). "Observation de la Machine Synchrone à Rotor Bobiné Sans Capteurs (Sensorless)." Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
31. *Polycopie de Machines Électriques Approfondies*, Université USTHB, Département de Génie Électrique, Alger, 2021.

32. *Faculté de Génie Électrique - USTHB*, contenu de cours et documents pédagogiques. Université des Sciences et de la Technologie Houari-Boumédiène, 2022.
33. *Structure des alternateurs*, Cours de machines synchrones, GEOSSC, Maroc, 2022.
34. *Polycopie de Cours - Machines Électriques*, Faculté des Sciences Appliquées, Université de Tiaret, 2021.
35. A. Chafa, Z. Aziz, *Étude et modélisation d'une génératrice synchrone connectée à un réseau*, Mémoire de fin d'études, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO), 2017.
36. M. Hamza, *Modélisation et simulation d'une génératrice synchrone triphasée avec AVR*, Mémoire de Master, École Nationale Polytechnique (ENP), 2021.
37. M. Sahki, *Commande vectorielle d'une machine synchrone*, Mémoire de fin d'études, Université Badji Mokhtar - Annaba, 2018.
38. M. Chabane, *Commande d'une machine synchrone par la méthode de champs orientés*, Université Batna 2, Cours, 2022.
39. *Cours de Machines Synchrones*, Faculté des Sciences Appliquées, Université Frères Mentouri de Constantine (UMC), 2020.
40. H. Kerbouai, Y. Zermani, *Commande d'un alternateur avec régulation automatique de tension (AVR)*, Mémoire de Master, École Nationale Polytechnique (ENP), 2019.
41. H. Khou, *Simulation et analyse d'un alternateur avec AVR*, Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO), 2019.
42. MOUADH, S. (2007). "*Régulation Industrielle de Processus*." Projet de Fin d'Études, Projet Automatismes.
43. ANNANE, A. (2010). "*Analyse du comportement du moteur synchrone dans les entraînements électriques à vitesse variable*." Thème Magister en Électrotechnique, Université Badji Mokhtar-Annaba, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Département d'Électromécanique.
44. ANDERSON, P.M., & FOUAD, A.A. (1977). "*Power System Control and Stability*." Press AMES, Iowa, USA.
45. *Analyse et commande d'une machine synchrone connectée au réseau*, Mémoire de Master, Université de Batna, 2020.

46. ABDESSEMED, R. — *Modélisation et simulation des machines électriques*, Éditions Ellipses, 2011, page 118.
47. BOUREZAK, S. — *Régulation des systèmes électriques et modélisation des génératrices synchrones*, Mémoire de Magister, Université de Boumerdès, 2014.
48. FG .Wilson "*Manuel d'utilisation et d'entretien des groupes électrogènes*"
49. CHEVASSU, C. (s.d.). "*Machines synchrones.*" Cours, École Nationale Supérieure Maritime.
50. KAIDI, I. (2009). "*Contribution à la mise en place d'un contrôle santé intégré sur un turboalternateur.*" Mémoire de Magister, Université de Annaba, Algérie. 51. Cummins. (s.d.). Schéma d'un groupe électrogène diesel avec ses composants principaux. Cummins Power Génération.
52. BENCHOUA, M. T. (s.d.). "*Commande de la machine à courants alternatifs par différents techniques de contrôle avancées.*" Thèse de Doctorat, Université de Biskra, Algérie..
53. KADRI, A. Y. (2013-2014). "*Régulation Automatique.*" Cours, Université Kasdi Merbah-Ouargla.