

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la
Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Électromécanique

Thème

**Optimisation des performances du générateur
de moteur diesel grâce à des stratégies de
contrôle avancées**

Réalisé par :

- AD Rabie
- BENKEDDA Mohammed Saddok
- CHERADID Abderezzak
- GUERMIT Amara

Encadré par :

- Dr. MAHMOUDI Abdelkader

Année Universitaire 2023/2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements



Tout d'abord, je remercie dieu -ALLAH- de tout puissante m'avoir donné le courage et la patience durant toutes ces années d'études.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude et mes sincères remerciements à Monsieur

Dr : MAHMOUDI Abdelkader, Docteur à L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, pour avoir dirigé ce travail.

Mes sincères remerciements aux messieurs les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en participant au jugement de ce travail.

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidé à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.

En fin je remercie tout particulièrement mes parents, pour leur soutien inconditionnel tout au long de ces longues années d'études.

Dédicaces



Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents qui m'ont soutenu durant toute la durée de mes études.

À mes très chères sœurs et à ma grande famille.

À tous mes amis.

À tous ceux qui m'aiment et que j'aime

À vous.

الملخص
résumé
Abstract

Résumé:

Les générateurs sont le meilleur moyen de produire cette électricité dans les zones isolées non reliées aux réseaux de distribution d'électricité, en raison de leur modularité et de leur coût, et en raison des conditions géographiques difficiles, pour lesquelles l'énergie électrique est requise.

Dans cette étude, nous avons étudié et testé stabilité du groupe électrogène avec diverses charges et conditions.

Mots clés: Groupe électrogène, Alternateur, Moteur thermique, stabilité ,MATLAB.

Abstract:

In isolated places not connected to electricity distribution networks, generators represent the best way to produce this electricity due to its modularity and cost, and due to difficult geographical conditions, for which electrical energy is necessary.

In this study, we studied and tested stability of the generator set with various loads and conditions.

Keywords: Generator, Alternator, Thermal engine, stability, MATLAB.

الملخص:

في الأماكن المعزولة غير المتصلة بشبكات توزيع الكهرباء، تمثل المولدات أفضل وسيلة لإنتاج هذه الكهرباء نظرا لوحدها وتكلفتها، ونظرا للظروف الجغرافية الصعبة التي تحتاج للطاقة الكهربائية. في هذه الدراسة، قمنا بدراسة واختبار ثبات مجموعة المولدات مع الأحمال والظروف المختلفة.

الكلمات المفتاحية: مولد كهربائي، مولد تيار متردد، محرك حراري، الاستقرار، ماتلاب.

Sommaire

Dédicace

Remerciement

Résumé

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Notations et symboles

Introduction générale

a

CHAPITRE I : Généralité sur les groupes électrogènes	
I.1.Introduction	4
I.2. Definition D'un Groupe Electrogene	4
I.3. Constitution d'un groupe électrogène	5
I.4.Les elements principaux d'un groupe electrogene	6
I.4.1. Moteurs thermiques	6
I.4.2. Système de Refroidissement	6
I.4.3. Circuit de lubrification	7
I.4.4. Circuit d'alimentation en combustible	7
I.4.5. Circuit de démarrage	8
I.4.5.1. Démarrage électrique	8
I.4.5.2. Avantages du démarrage électrique	9
I.4.6. Alternateur	10
I.4.6.1. Le stator	10
I.4.6.2. Le Rotor	11
I.4.6.3. Régulation de la tension de l'alternateur	12
I.5. Accessoires du groupe électrogène	12
I.5.1. Système de contrôle et commande	12
I.5.2. Coffret de commande	13
I.5.3. Coffret de contrôle	14
I.5.4. La batterie	14
I.5.5. Chargeur de batterie	14
I.6. Mode D'installation	14
I.6.1. Un groupe électrogène à emplacement fixe	14
I.6.1.1. Sans capot de protection	14

I.6.1.2. Avec capot de protection	15
I.6.2 Groupe électrogène mobile	16
I.6.2.1 Groupe électrogène sans remorque	16
I.6.2.2 Groupe électrogène sur remorque	17
I.6.2.3 Mât d'éclairage	17
I.6.3. Groupe électrogène en conteneur	18
I.6.3.1. Conteneurs ISO 20 et ISO 40	18
I.6.3.2. Conteneur CIR 20	19
I.6.3.3. Conteneur EUR 40	20
I.6.3.4. Conteneur sur remorque	20
I.6.4. Plaques d'identification	21
I.6.4.1. Identification des groupes électrogènes	21
I.6.4.2. Emplacement des plaques sur groupes électrogènes avec et sans capot	22
I.6.4.3. Emplacement des plaques sur groupes électrogènes en conteneur	22
I.7. Identification des composants des groupes électrogènes	23
I.8. Le Principe De Fonctionnement	24
I.8.1. Cycle a quatre temps	24
I.8.2. Fonctionnements de refroidissement	27
I.8.3. Principe du refroidissement	28
I.8.4. Fonctionnements de lubrification	29
I.8.5. Principe de fonctionnement de l'alternateur triphasé	29
I.8.6. Principe de fonctionnement de l'AVR	30
I.9. Domaine d'utilisation des groupes électrogènes	31
I.9.1. Source de secours en électricité	31
I.9.2. Source de pointe	31
I.9.3. Source d'énergie électrique	32
I.10. Conclusion	33
CHAPITRE II : Modélisation et simulation du groupe électrogène	
L'alternateur	
II.1. Introduction	35
II.2. Présentation de la machine synchrone (alternateur) à étudier	35
II.3. Hypothèses simplificatrices	36
II.4. Conventions de signes	36
II.5. Equations électriques et mécaniques de la machine synchrone munie d'enroulements	36

amortisseurs	
II.5.1. Equations électriques du stator	36
II.5.2. Transformation de Park	37
II.5.3. Equation électrique du rotor et des amortisseurs	38
II.5.3.1. Enroulements inducteurs	38
II.5.3.2. Amortisseurs	39
II.5.4. Equations des puissances, des couples et équations mécaniques de la machine	39
II.5.4.1. Calcul des puissances	39
II.5.4.2. Calcul des couples	39
II.5.4.3. Equations mécaniques de l'alternateur	40
II.6. Equations électriques et mécaniques de la machine sans amortisseurs	41
II.7. Equations générales du groupe électrogène en charge	42
II.8. Détermination du régime permanent du groupe électrogène	43
II.9. Modèle la machine synchrone	44
II.9.1. Détermination de la tension d'excitation nominale	45
II.9.2. Calcul des paramètres de la machine en unités réduites	45
II.9.3. Calcul des grandeurs de base	46
II.10. Application numérique	46
II.10.1. Calcul de la mutuelle M_{af}	46
II.10.2. Calcul des grandeurs de base	47
II.10.3. Calcul des grandeurs en unités réduites	47
Moteur Diesel	
II.1. Introduction	48
II.2. Fonctionnement du moteur diesel	48
II.3. Gouverneur	48
II.4. Excitateur	49
II.5. Modélisation mathématique du moteur diesel	49
II.6. Modèle simulink et résultats de simulation	51
II.6.1. Valeurs nominales du générateur diesel connecte	51
II.6.2. Modele simulink complet de générateur diesel	53
II.7. Conclusion	53
CHAPITRE III : Étude de stabilité du groupe électrogène	
III.1. Introduction	55
III.2. Type de charge	55

III.2.1. Charge resistive	55
III.2.2. Charge capacitive	56
III.2.3. Charge inductif	57
III.3. Modélisation et Simulation du Système	58
III.3.1. Résultats de la simulation	59
III.3.1.1. Moteur asynchrone	59
III.3.1.2. Charge(R) équilibre	60
III.3.1.3. Charge (LC) déséquilibré	62
III.3.1.4. Défaut	63
III.4. Conclusion	65
Conclusion générale	67
Bibliographique	

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Page

Chapitre I : Généralité sur les groupes électrogènes		
Figure 1	<i>Constitution d'un groupe électrogène.</i>	5
Figure 2	<i>Système de refroidissement d'un groupe électrogène</i>	7
Figure 3	<i>Démarrage électrique : phase d'appel</i>	8
Figure 4	<i>Démarrage électrique : phase de maintien</i>	9
Figure 5	<i>Alternateur de groupe électrogène</i>	10
Figure 6	<i>Stator</i>	10
Figure 7	<i>Rotor à pôle lisse</i>	11
Figure 8	<i>Rotor à pôle saillant</i>	11
Figure 9	<i>Rotor à aimant permanent</i>	12
Figure 10	<i>Tableau de commande et de contrôle</i>	13
Figure11	<i>Groupe électrogène sans capot de protection</i>	14
Figure12	<i>Groupe électrogène avec capot de protection</i>	15
Figure 13	<i>Groupe électrogène avec capot de protection</i>	16
Figure14	<i>Groupe électrogène mobile sur remorque</i>	17
Figure 15	<i>Groupe électrogène mât d'éclairage</i>	18
Figure 16	<i>Exemple de conteneur</i>	19
Figure 17	<i>Exemple de conteneur ISO 40</i>	19
Figure 18	<i>Exemple de conteneur ISO 20</i>	19
Figure 19	<i>Exemple de conteneur EUR 40</i>	20
Figure 20	<i>Exemple de conteneur EUR 40</i>	20
Figure 21	<i>Exemple de plaque d'identification groupe électrogène</i>	21
Figure 22	<i>Emplacement de la plaque d'identification des groupes électrogènes avec et sans capots de protection</i>	22
Figure 23	<i>Emplacement de la plaque d'identification des groupes électrogènes en conteneur capots</i>	22
Figure 24	<i>Exemples de plaques d'identification moteur</i>	23
Figure 25	<i>Exemples de plaques d'identification alternateur</i>	23
Figure 26	<i>Exemple de plaque d'identification d'armoire électrique</i>	23
Figure 27	<i>Le cycle à quatre temps</i>	24
Figure 28	<i>Admission</i>	25
Figure 29	<i>Compression</i>	25

Figure 30	<i>Détente</i>	26
Figure 31	<i>Echappement</i>	26
Figure 32	<i>Circuit de refroidissement à thermostat fermé</i>	27
Figure 33	<i>Circuit de refroidissement à thermostat ouvert</i>	27
Figure 34	<i>Circuit électrique de refroidissement</i>	28
Figure 35	<i>Circuit de lubrification</i>	29
Figure 36	<i>Alternateur triphasée</i>	29
Figure 37	<i>Circuit de régulation de la tension de sortie</i>	30
Figure 38	<i>Description distributeur alimentation le réseau électrique avec le groupe électrogène</i>	31
Figure 39	<i>Description distributeur alimentation plusieurs groupe électrogène avec groupe électrogène en maintenance</i>	32
Chapitre II : Modélisation et simulation du groupe électrogène		
Figure 1	<i>Représentation des enroulements d'une machine synchrone sans amortisseurs</i>	35
Figure 2	<i>Représentation schématique de la machine Synchrone après transformation de Park</i>	36
Figure 3	<i>Modèle la machine synchrone</i>	44
Figure 4	<i>Modèle MATLAB/Simulink du modèle de moteur diesel et de régulateur</i>	49
Figure 5	<i>Schéma fonctionnel du moteur diesel et du régulateur Modèle</i>	51
Figure 6	<i>Modèle MATLAB/Simulink de moteur diesel et modèle de gouverneur</i>	51
Figure 7	<i>Modèle Simulink complet de générateur diesel</i>	53
Chapitre III : Étude de stabilité du groupe électrogène		
Figure 1	<i>Charge résistive (i en phase avec v)</i>	60
Figure 2	<i>Charge capacitive (i en avance d'1/4 de période sur v)</i>	61
Figure 3	<i>Charge purement inductive (i en retard d'1/4 de période sur v)</i>	62
Figure 4	<i>Diagrammes de Fresnel correspondant aux oscillogrammes</i>	62
Figure 5	<i>Modélisation et Simulation du Système</i>	62
Figure 6	<i>Courbe de tension à une Moteur asynchrone</i>	63
Figure 7	<i>Courbe de courant à une Moteur asynchrone</i>	63
Figure 8	<i>Courbe de la vitesse et Puissance mécanique et tension d'excitation à une Moteur asynchrone</i>	64
Figure 9	<i>Courbe de tension à une charge résistive équilibre</i>	64
Figure 10	<i>Courbe de courant à une charge résistive équilibre</i>	65
Figure 11	<i>Courbe de la vitesse et Puissance mécanique et tension d'excitation à une charge résistive équilibre</i>	65
Figure 12	<i>Courbe de tension à une charge capacitive et inductif déséquilibré</i>	66
Figure 13	<i>Courbe de courant à une charge capacitive et inductif déséquilibré</i>	66

Figure 14	<i>Courbe de la vitesse et puissance mécanique et tension d'excitation à une charge résistive déséquilibré</i>	67
Figure 15	<i>Courbe de tension à une Défaut</i>	67
Figure 16	<i>Courbe de courant à une Défaut</i>	68
Figure 17	<i>Courbe de la vitesse et Puissance mécanique et tension d'excitation à une Défaut</i>	69

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Page

Chapitre I : Généralité sur les groupes électrogènes		
Tableau 1	<i>Constitution d'un groupe électrogène</i>	5
Tableau 2	<i>Tableau de commande et de contrôle</i>	13
Tableau 3	<i>Eléments Générateurs sans capot de protection</i>	15
Tableau 4	<i>Eléments Groupe électrogène avec capot de protection</i>	16
Tableau 5	<i>Eléments Groupe électrogène avec capot de protection</i>	17
Chapitre II : Modélisation et simulation du groupe électrogène		
Tableau 1	<i>Fiche technique du générateur diesel</i>	52
Tableau 2	<i>Paramètres du générateur synchrone triphasé</i>	52
Tableau 3	<i>Paramètres de l'excitateur de diesel</i>	52

Notations et symboles

Notations et symboles

t : Temps (s)

a, b, c : Axes liés aux enroulements triphasés

d, q : Axes du référentiel de *Park*

α, β : Axes du référentiel statorique

$[(\theta_P)]$: Position angulaire du rotor par rapport Matrice de *Park*

$[V_{an}, V_{bn}, V_{cn}]$: Tension de sortie de l'onduleur (V) Si $(i=1, 2, 3)$ Grandeurs booléennes de commande (des interrupteurs de l'onduleur)

V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} : Tension statorique de la phase a, b , ou c (V)

V_s : Tension statorique (V)

V_{sd}, V_{sq} : Tension statorique sur l'axe d et l'axe q (V)

$V_{s\alpha}, V_{s\beta}$: Tension statorique sur l'axe α et l'axe β (V)

i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} : Courant statorique de la phase a, b , ou c (A)

I_s : Courant statorique (A)

I_d, I_q : Courant statorique sur l'axe d et l'axe q (A)

$I_{s\alpha}, I_{s\beta}$: Courant statorique sur l'axe α et l'axe β (A)

L_a, L_b, L_c : Inductances propres des phases a, b, c respectivement (H)

E : Tension d'entrée de l'onduleur (V)

θ : Position angulaire du rotor par rapport (Rad)

θ_{ref} : Position de référence (Rad)

ϕ_a, ϕ_b, ϕ_c : Flux statorique de la phase a, b , ou c (Wb)

ϕ_d, ϕ_q : Flux statorique sur l'axe d et l'axe q (Wb)

$\phi_{s\alpha}, \phi_{s\beta}$: Flux statorique sur l'axe α

φ_s : Flux statorique (Wb)
 φ_f : Flux magnétique du rotor (Wb)
 $\bar{\varphi}_s$: Vecteur de flux statorique
 φ_{sf} : Flux des aimants (Wb)
 $\Delta \bar{\varphi}_s$: Variation du vecteur flux statorique
 Ω : Vitesse mécanique de rotor (Rad/s)
 $\Omega_{\text{réf}}$: Vitesse de référence (Rad/s)
 J : Moment d'inertie du moteur (Kg.m²)
 f_r : Coefficient de frottement visqueux (Nm/Rad/s)
 C_e : Couple électromagnétique délivré par le moteur (N.m)
 C_r : Couple résistant, ou de charge (N.m)
 C_f : Couple de frottement (N.m)
 ω : pulsation de rotation électrique (Rad/s)
 ω_s : Pulsation de fréquence statorique (Rad/s)
 R_s : Résistance d'une phase statorique (Ω)
 L_d : Inductance sur l'axe d (H)
 L_q : Inductance sur l'axe q (H)
 L_s : Inductance d'une phase statorique (H)
 L_{s0} : Inductance propre d'une phase statorique (H)
 L_{ss} : Inductance statorique (H)
 M_{s0} : Inductance mutuelle entre deux phases statoriques (H)
 K_p, K_i : Actions proportionnelle et intégrale
 T_d, T_{iq} : de temps électrique relative à l'axe d et à l'axe q
 x : Vecteur d'état
 U : Vecteur de commande
 U_{eq} : Commande équivalente
 U_n : Commande discontinue
 $\hat{x}$: Estimation de x

Introduction générale

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Actuellement l'énergie électrique est devenue plus que nécessaire dans tous les domaines, car en ces temps-ci ce sont toutes les applications (industriels ou particulières), ce sont consommatrices d'énergie électrique, ce qui fait que chaque coupure provoque des désagréments pour l'utilisateur. La continuité et la qualité de l'énergie électrique fournie par le réseau est donc très importante surtout en ce qui concerne certaines activités. [1] Car certaine activité nécessite une alimentation continue à chaque instant, car la moindre interruption de l'alimentation met en danger la vie d'êtres humains ce qui rend nécessaire la présence d'une source de secours. Pour d'autres activités, l'interruption de l'alimentation est synonyme de pertes financières qui sont très importantes. Ce qui fait que ces coupures ne seront pas admises par l'utilisateur, par exemple les activités utilisant les systèmes informatiques. Ce genre d'activités ne tolèrent pas d'interruptions quelques soit leurs durées.

Dans les sites isolés qui ne sont pas couplés aux réseaux de distribution de l'énergie électrique. Les groupes électrogènes représentent le meilleur moyen pour produire cette énergie de la faite de leur modularité et leur coût. Les groupes électrogènes sont un très bon moyen de production de l'énergie électrique surtout dans les endroits reculés ou le réseau ne peut pas être établi de la faite des conditions géographiques et économiques et pour lesquelles l'énergie électrique est une nécessité[1].

Pour atteindre les objectifs fixés nous avons réalisé ce mémoire structuré comme suit :

Dans le premier chapitre nous allons discuter sur les groupes électrogènes afin de connaître le principe de fonctionnement et les différents composants du groupe électrogène

Dans le deuxième chapitre chapitre est réservé à une application qui consiste en l'étude par simulation numérique d'un groupe électrogène en boucle ouverte.

Le troisième chapitre, nous avons étudié et tester stabilité du groupe électrogène avec diverses charges et conditions.

Finalement, une conclusion générale résumera tous les résultats obtenus dans ce présent travail.

Chapitre I

**Généralité sur les groupes
électrogènes**

I.1.Introduction

Les besoins en électricité d'urgence pour les zones sensibles telles que les hôpitaux et les zones de communication filaire et sans fil sont assurés par l'utilisation de générateurs électriques.

Dans ce chapitre, nous nous concentrerons sur l'étude des générateurs électriques dans le but de comprendre leur principe de fonctionnement et les composants qui les constituent, ainsi que les différentes configurations utilisées pendant le fonctionnement du réseau. Nous aborderons également la construction des générateurs et les types de lignes utilisés pendant les périodes de coupure de courant.

I.2. Definition D'un Groupe Electrogene

Un groupe électrogène est un appareil qui sert à produire de l'électricité. On dit aussi que c'est un générateur électrique de courant. Le groupe électrogène permet de fournir une énergie électrique de façon autonome. Pour ce faire, le groupe ou alternateur a besoin d'essence, de gaz naturel, de gasoil ou fonctionne à partir d'un système hybride. Ce carburant permet ensuite de faire tourner le moteur. Tous les carburants sont en mesure de mettre en marche un groupe. La puissance d'un groupe électrogène s'exprime en VA (Volt Ampère), kVA (kiloVolt Ampère), ou MVA (Méga Volt Ampère). [1]

Un groupe électrogène peut être fixe ou mobile. La puissance du groupe se mesure en Watts, kilowatts pour la puissance active et en Volts pour la tension de courant de sortie. Plus un groupe électrogène est puissant, plus le rendement d'électricité est élevé. L'ensemble des groupes électrogène en service doivent répondre à la norme ISO 8528-1. D'autres normes permettent aussi de cadrer la réglementation installation groupe électrogène et encadrer leur utilisation.

I.3. Constitution d'un groupe électrogène

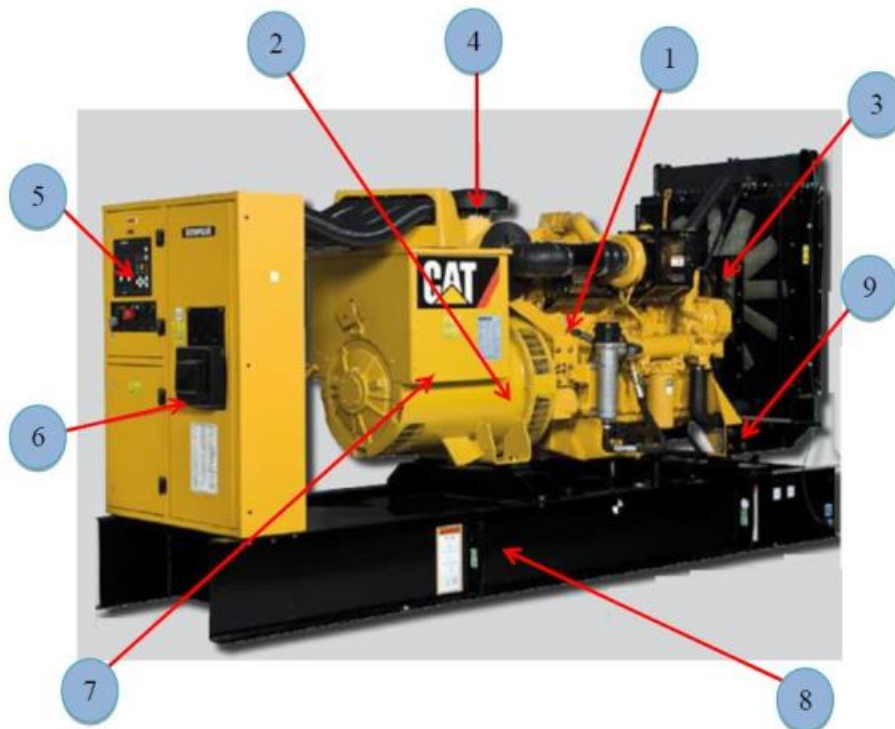


Figure I.1: Constitution d'un groupe électrogène. [2]

Numéro	Désignation
1	Moteur thermique diesel
2	Alternateur
3	Système de refroidissement
4	Filtre à air
5	Tableau de commande et de contrôle
6	Disjoncteur
7	Régulateur de tension (AVR)
8	Châssis
9	Dispositif de protection

Tableau I.1: Constitution d'un groupe électrogène[2]

I.4. Les éléments principaux d'un groupe électrogène

I.4.1. Moteurs thermiques

Les moteurs thermiques sont des machines qui convertissent l'énergie thermique en énergie mécanique. Ils sont également connus sous le nom de moteurs à combustion et se divisent en deux types principaux[1] :

➤ **Moteurs à combustion interne**

- Le système est renouvelé à chaque cycle.
- Le système est en contact avec une seule source de chaleur (l'atmosphère).

Exemples: moteurs à essence et diesel.

➤ **Moteurs à combustion externe:**

- Le système (air) est recyclé sans renouvellement.
- Le système nécessite deux sources de chaleur.

Exemples: machines à vapeur, moteurs Stirling.

I.4.2. Système de Refroidissement

➤ **Le groupe électrogène**

- Consomme du carburant pour produire de l'énergie.
- A un rendement généralement inférieur à 50%.
- Convertit la moitié du carburant en chaleur (jusqu'à 2000°C).

➤ **Conséquences de l'échauffement**

- Surconsommation de carburant.
- Baisse du rendement.
- Destruction du moteur en cas d'échauffement excessif.

➤ **Nécessité d'un système de refroidissement**

- Évite l'échauffement du système.
- Améliore l'efficacité du groupe électrogène.
- Prolonge la durée de vie du moteur.

➤ **Composants du système de refroidissement**

- **Radiateur:** dissipe la chaleur du liquide de refroidissement.
- **Pompe:** fait circuler le liquide de refroidissement.
- **Vase d'expansion:** absorbe les variations de volume du liquide.

- **Thermostat:** régule la température du liquide.
- **Ventilateur:** aide à dissiper la chaleur.
- **Liquide de refroidissement:** eau additionnée d'additifs

➤ **Avantages du Système de Refroidissement:**

- Meilleure performance du groupe électrogène.
- Réduction de la consommation de carburant.
- Augmentation de la durée de vie du moteur.
- Fonctionnement plus fiable et plus sûr.

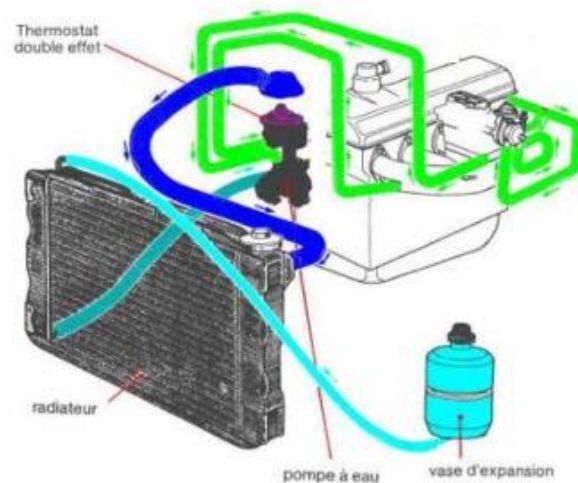


Figure I.2: Système de refroidissement d'un groupe électrogène[1]

I.4.3. Circuit de lubrification

Un moteur est composé de nombreuses pièces métalliques en mouvement. Lorsque ces pièces frottent les unes contre les autres, cela génère de la chaleur en raison de la friction. Pour assurer la durabilité des différents mécanismes, il est essentiel qu'ils soient correctement lubrifiés, c'est-à-dire qu'une fine couche de lubrifiant soit présente entre les pièces. Explorons maintenant le principe de la lubrification ainsi que les éléments nécessitant une lubrification. [3]

I.4.4. Circuit d'alimentation en combustible

Un groupe électrogène reçoit son combustible d'un réservoir journalier alimenté d'un réservoir de stockage principal dimensionné en fonction de l'application et de la puissance du groupe. Si la pompe de transfert est installée dans le même emplacement que le groupe, elle assure généralement automatiquement le remplissage du réservoir quotidien, qui a une capacité de 500 litres. Cette pompe est commandée par des niveaux de contacts haut et bas.

I.4.5. Circuit de démarrage

Le circuit de démarrage du groupe électrogène doit être fiable et assurer un démarrage à coup sûr du moteur. Le système de démarrage d'un groupe électrogène peut être soit électrique, soit pneumatique. Dans certains cas, il est possible d'installer les deux systèmes de démarrage, pour des raisons de sécurité.

I.4.5.1. Démarrage électrique

Le démarrage électrique du groupe électrogène est réalisé par un démarreur. Bien que les démarreurs diffèrent légèrement dans leur construction, ils partagent tous le même principe de fonctionnement. [2]

a. Composants du démarreur

Un démarreur est généralement composé de trois éléments principaux :

- **Moteur électrique** : Fournit l'énergie nécessaire pour lancer le moteur du groupe électrogène.
- **Solénoïde** : Actionne le lanceur et engage le pignon du démarreur avec la couronne du moteur.
- **Lanceur** : Déplace le pignon du démarreur et l'engrène avec la couronne du moteur.

b. Fonctionnement du démarreur (trois phases)

- **Phase d'appel** : Les deux enroulements 4 et 5 sont alimentés. Ces derniers attirent le noyau 6 qui déplace le lanceur 13 à l'aide de la fourchette 17. Le pignon 14 s'engrène avec la couronne. Comme le montre la figure I.3.

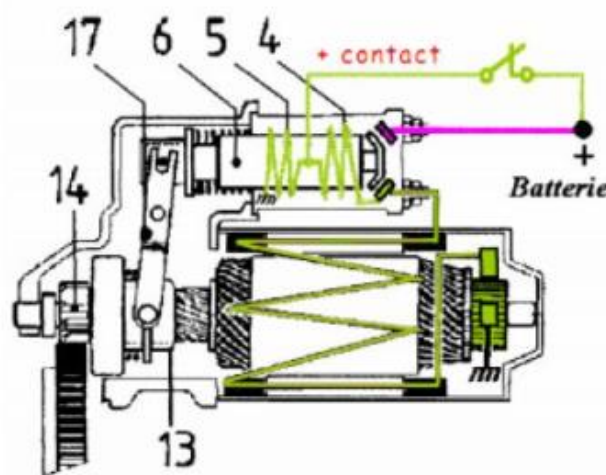


Figure I.3: Démarrage électrique : phase d'appel[4]

- **Phase de maintien :** A la mise en contact, toute la capacité de la batterie est à la disposition du démarreur car dès sa mise sous tension, le bobinage d'appel 4 n'a plus d'action. Le noyau vient en appui contre les contacts. L'inducteur 12 et l'induit 11 sont alimentés l'induit tourne. L'enroulement d'appel 4 possède une charge positive à chacune de ses extrémités et est donc parcouru par aucun courant. L'enroulement de maintien 5 assure seulement le maintien du noyau plongeur dans sa position. [4]

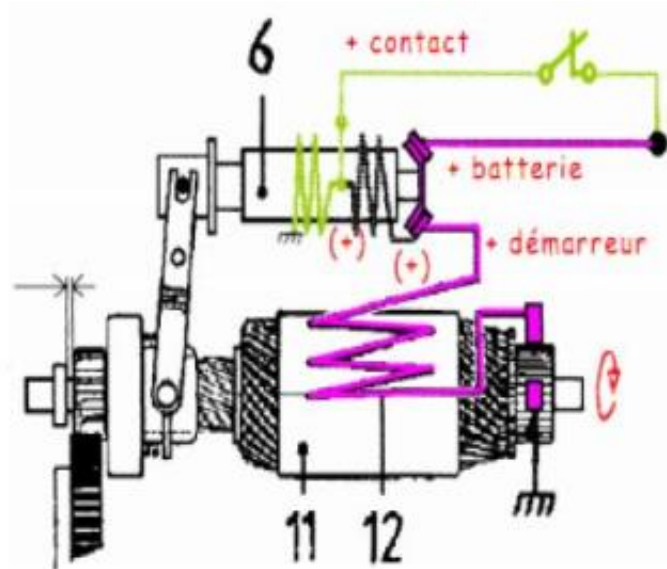


Figure I.4: Démarrage électrique : phase de maintien[4]

I.4.5.2. Avantages du démarrage électrique

- **Fiabilité et sécurité:** Le démarrage électrique est un moyen fiable et sûr de démarrer un groupe électrogène.
- **Facilité d'utilisation:** Le démarrage électrique est simple et ne nécessite aucun effort physique.
- **Démarrage rapide:** Le démarrage électrique permet un démarrage rapide du groupe électrogène.
- **Phase d'arrêt :** Après que le pignon a entraîné le moteur en rotation à une vitesse précise, le moteur continue à tourner de manière autonome. À ce stade, l'opérateur arrête l'action sur le contacteur, interrompant ainsi l'alimentation électrique de l'enroulement de maintien et coupant la connexion aux bornes.

I.4.6. Alternateur

Les alternateurs triphasés représentent la principale source d'énergie électrique que nous utilisons. Ce sont les plus grands convertisseurs d'énergie au monde. Leur fonctionnement repose sur une conversion de la puissance mécanique, obtenue par rotation, en puissance électrique sous forme alternative. Ce processus est réalisé de manière simple et avec des rendements très élevés, atteignant près de 100%. Les machines utilisées dans les groupes électrogènes sont généralement des machines synchrones auto-excitées. Ces machines se caractérisent par un stator (partie fixe) et un rotor (partie mobile) servant d'induit. [3]



Figure I.5: Alternateur de groupe électrogène[3]

I.4.6.1. Le stator

Le stator est la partie fixe de l'alternateur, souvent constituée de l'induit. Il se compose d'un noyau en tôle d'acier avec des encoches pour les conducteurs des enroulements. Ces enroulements, fabriqués en fils de cuivre, sont isolés les uns des autres. Dans les alternateurs monophasés, les enroulements sont connectés en série, tandis que dans les alternateurs triphasés, ils sont divisés en trois enroulements distincts, disposés à 120 degrés les uns des autres. [5]



Figure I.6: Stator[5]

I.4.6.2. Le Rotor

Le rotor de l'alternateur est un électroaimant qui tourne à l'intérieur du stator fixe. Il comporte un enroulement placé dans des encoches disposées autour de sa périphérie. On distingue trois types de rotors : le rotor à pôles lisses, le rotor à pôles saillants et le rotor à aimant permanent.

a. Rotor à pôle lisse

Les rotors lisses de la Figure I.7 sont destinés aux générateurs qui tournent à une vitesse élevée. Leur forme est similaire à celle d'un cylindre, comme l'illustre la figure I.8 qui suit ; la bobine d'excitation est insérée dans les encoches pré-usinées pour y parvenir. En raison de sa fréquence de rotation élevée, il est appelé « Turbo Alternateur ». Ils ont une capacité de 1,5 GVA et peuvent être intégrés dans la majorité des centrales électriques traditionnelles. [5]

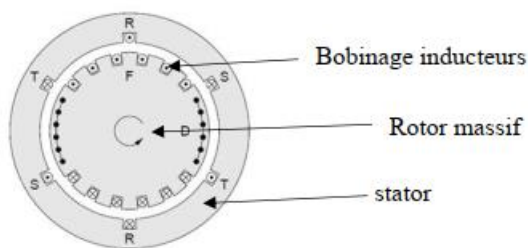


Figure I.7: Rotor à pôle lisse[5]

b. Rotor à pôle saillant

Dans les applications à basse vitesse, on utilise un alternateur avec un rotor à pôle saillant. Des bobines d'excitation, fabriquées à partir de file ou de barre de cuivre, sont directement fixées sur les pièces polaires. Les polarités contraires entre deux pôles voisins sont créées par la liaison en série de ces bobines. La plupart des centrales hydrauliques, des groupes de secours administratifs et des navires sont équipés de ce type d'alternateur d'une puissance de 1 MVA à 250 MVA .

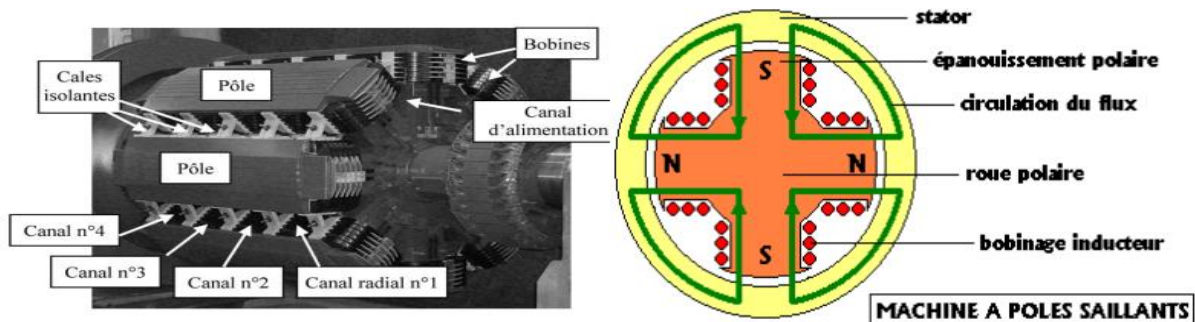


Figure I.8: Rotor à pôle saillant[5]

c. Rotor à aimant permanent

Les aimants sont utilisés pour remplacer l'électroaimant (Figure I.9), ce qui présente l'avantage d'éliminer le système de bague de balais, les pertes rotoriques et le circuit d'excitation. [4]



Figure I.9: Rotor à aimant permanent[5]

I.4.6.3. Régulation de la tension de l'alternateur

En raison de son impédance interne, qui est constituée de la réaction de fuite et de la résistance de l'induit, lorsque l'alternateur est en charge, sa tension de sortie diminue. Un régulateur de tension est utilisé pour maintenir la tension de sortie à une valeur acceptable. Un régulateur de tension automatique est le régulateur le plus couramment utilisé. L'AVR est un appareil électronique composé de diodes, de condensateurs, de résistances, de potentiomètres ou même de microcontrôleurs. Il est conçu pour réguler automatiquement la tension. [6]

I.5. Accessoires du groupe électrogène

I.5.1. Système de contrôle et commande

Le groupe électrogène est équipé d'un système de contrôle et de commande électronique spécialement conçu pour commander et contrôler son fonctionnement (figure I.10). Les différents coffrets peuvent être standardisés sur le groupe en fonction des besoins. Il est possible d'installer d'autres systèmes plus spécialisés pour des installations particulières, ce qui nécessite une documentation spécifique. Ces systèmes de contrôle sont constitués de trois composants essentiels qui fonctionnent ensemble. [6]

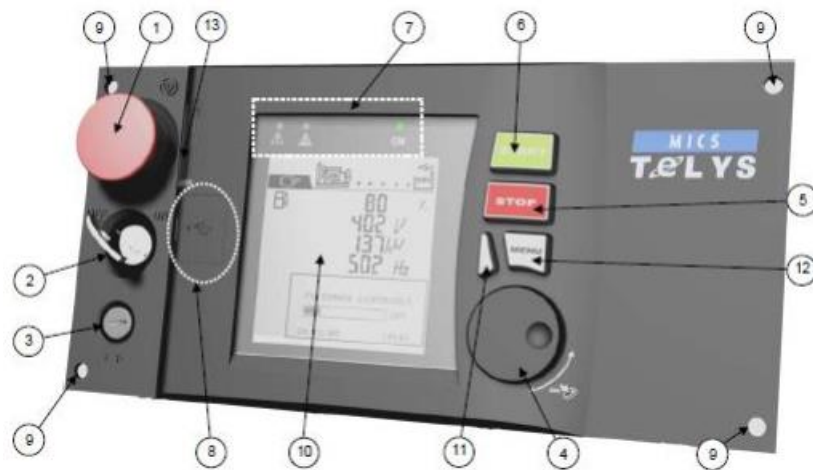


Figure I.10: Tableau de commande et de contrôle[6]

Numéro	Désignation
1	Bouton d'arrêt d'urgence permettant d'arrêter le groupe électrogène en cas de problème susceptible de mettre en danger la sécurité des personnes et des biens.
2	Commutateur à clé de mise sous / hors tension du module.
3	Fusible de protection de la carte électronique.
4	Molette de défilement et de validation permettant le défilement des menus et des écrans avec validation par simple pression sur la molette.
5	Bouton STOP permettant sur une impulsion d'arrêter le groupe électrogène.
6	Bouton START permettant sur une impulsion de démarrer le groupe électrogène.
7	LEDS de mise sous tension et de synthèse des alarmes et défauts.
8	Emplacement des ports USB
9	Vis de fixation
10	Ecran LCD pour la visualisation des alarmes et défauts, états de fonctionnement, grandeurs électriques et mécaniques
11	Bouton ESC : retour à la sélection précédente et fonction RESET de défaut.
12	Bouton MENU permettant l'accès aux menus.
13	Eclairage du bouton d'arrêt d'urgence.

Tableau I.2: Tableau de commande et de contrôle[6]

I.5.2. Coffret de commande

Il permet de démarrer et d'arrêter le groupe électrogène, de surveiller son fonctionnement et son efficacité et de l'arrêter automatiquement en cas de situation critique. Pour éviter de graves dommages au moteur ou à l'alternateur. [7]

I.5.3. Coffret de contrôle

Il est destiné à surveiller le fonctionnement du groupe électrogène en permanence. Il surveille la tension et le courant à la sortie de l'alternateur et contrôle la fréquence du courant et détecte s'il y a des anomalies dans le fonctionnement du groupe.

I.5.4. La batterie

Il s'agit d'un accumulateur électrique chargé d'alimenter le démarreur du moteur en courant continu. De plus, il est utilisé pour alimenter certains accessoires tels que le moto-ventilateur.

I.5.5. Chargeur de batterie

C'est un redresseur de courant alternatif pour groupe électrogène qui permet d'alimenter la batterie avec du courant redressé à la bonne tension. [6]

I.6. Mode D'installation

Les groupes électrogènes sont classés en trois catégories principales[7] :

I.6.1. Un groupe électrogène à emplacement fixe

I.6.1.1. Sans capot de protection

Groupe électrogène fixe Sans capot de protection dans la figure ci-dessous.

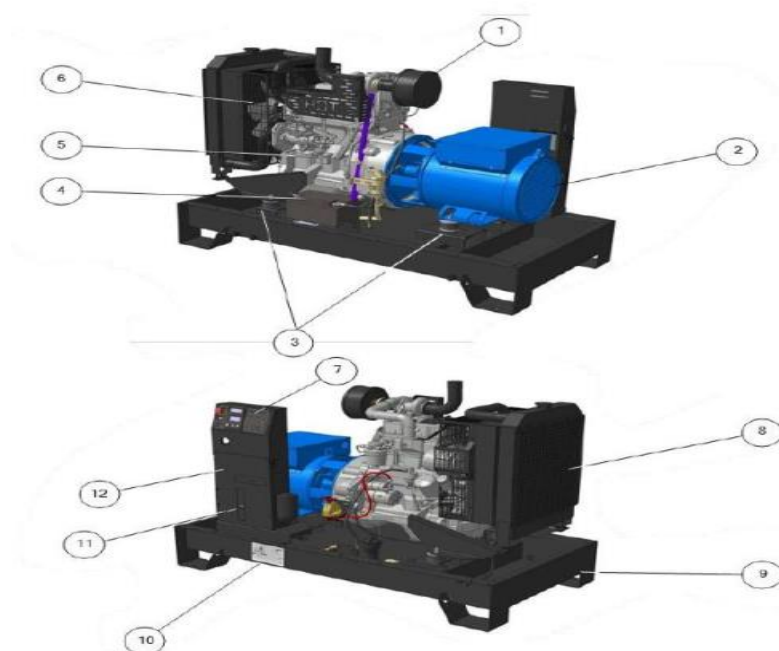


Figure I.11: Groupe électrogène sans capot de protection [7]

Numéro	Désignation
1	Filtra a air
2	Alternateur
3	Plots amortisseurs
4	Batterie de démarrage
5	Moteur
6	Grille de protection parties tournantes
7	Coffret de commande
8	Radiateur
9	Châssis
10	Plaque d'identification
11	Disjoncteur
12	Pupitre

Tableau I.3: Eléments Générateurs sans capot de protection[7]

I.6.1.2. Avec capot de protection

Groupe électrogène fixe Avec capot de protection dans la figure ci-dessous.

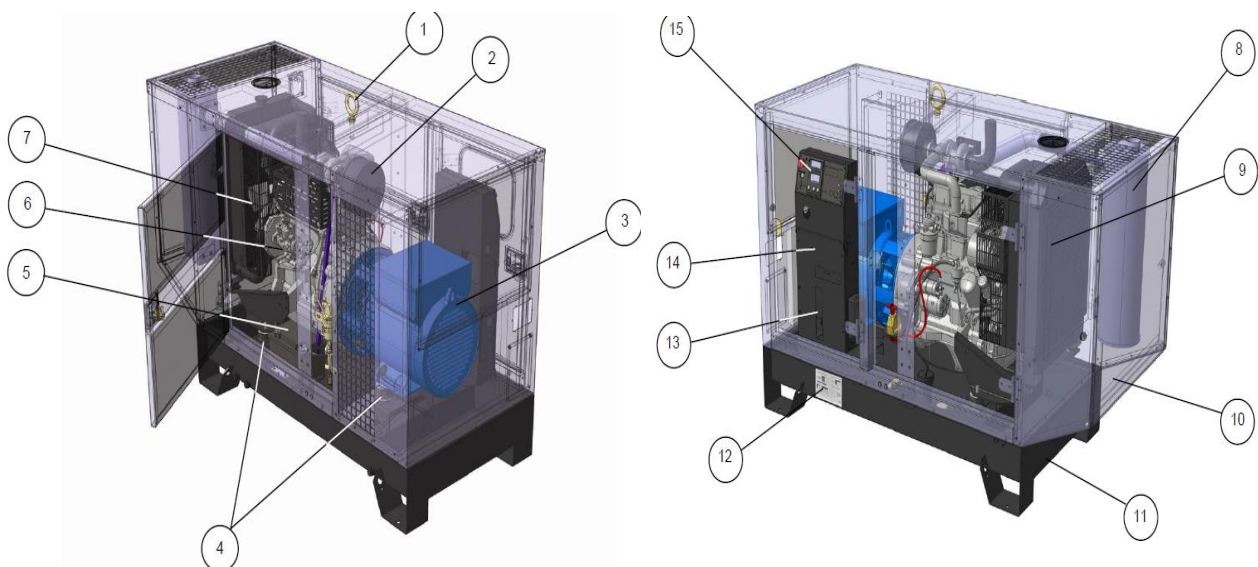


Figure I.12: Groupe électrogène avec capot de protection[7]

Numéro	Désignation
1	Anneau de levage
2	Filtre à air
3	Alternateur
4	Plots amortisseurs
5	Batterie de démarrage
6	Moteur
7	Grille de protection parties tournantes
8	Echappement
9	Radiateur
10	Capot de protection
11	Châssis
12	Plaque d'identification
13	Disjoncteur
14	Pupitre
15	Coffret de commande

Tableau I.4: Eléments Groupe électrogène avec capot de protection[7]

I.6.2. Groupe électrogène mobile

I.6.2.1. Groupe électrogène sans remorque

Groupe électrogène mobile Sans remorque dans la figure ci-dessous. [5]

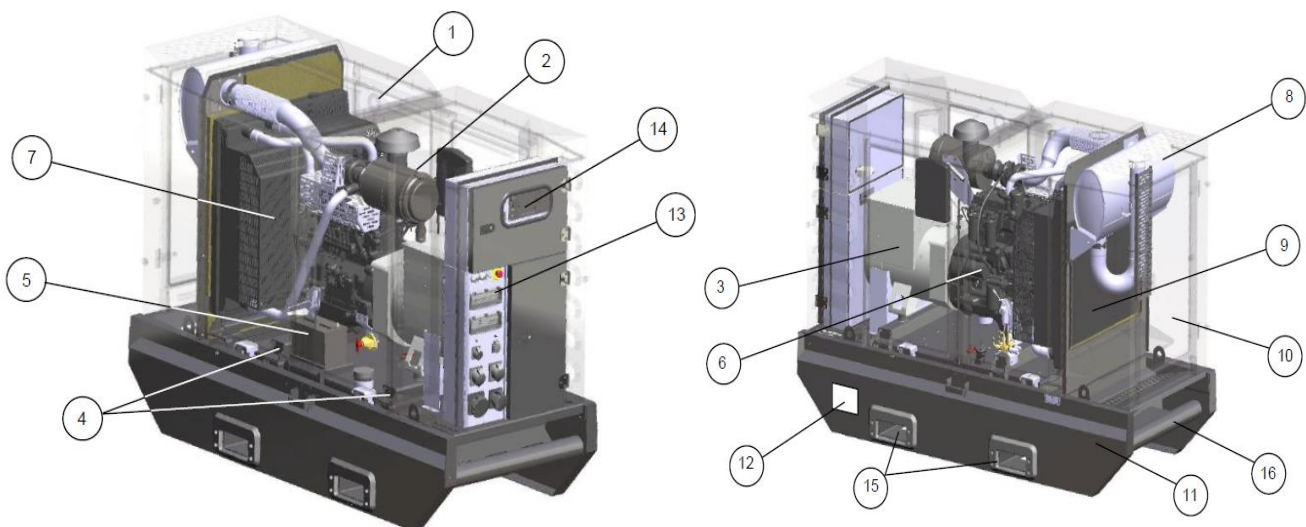


Figure I.13: Groupe électrogène avec capot de protection[5]

Numéro	Désignation
1	Anneau de levage
2	Filtre à air
3	Alternateur
4	Plots amortisseurs
5	Batterie de démarrage
6	Moteur
7	Grille de protection parties tournantes
8	Echappement
9	Radiateur
10	Châssis
12	Plaque d'identification
13	Disjoncteur
14	Coffret de commande
15	Passages de fourches
16	Barre de traction

Tableau I.5: Eléments Groupe électrogène avec capot de protection[5]

I.6.2.2. Groupe électrogène sur remorque

Tous les groupes électrogènes mobiles existent en version sur remorque.



Figure I.14: Groupe électrogène mobile sur remorque[6]

I.6.2.3. Mât d'éclairage

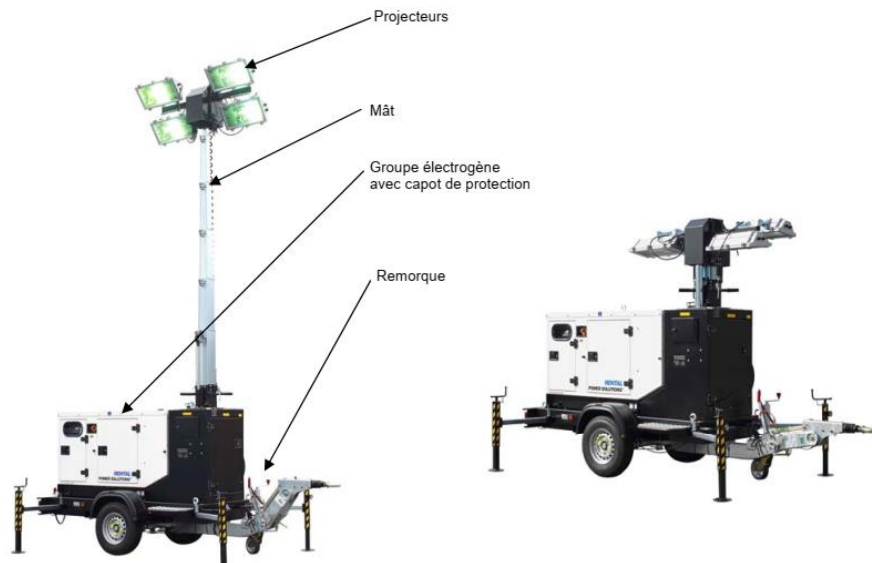


Figure I.15: Groupe électrogène mât d'éclairage[6]

I.6.3. Groupe électrogène en conteneur

L'appellation « conteneur » correspond à un terme générique employé pour une boîte conçue pour le transport de marchandises, suffisamment solide pour un usage répété et dotée d'éléments (coins ISO) permettant le transfert entre modes de transports. La gamme SDMO CONTENENERGY comporte 3 types de conteneurs[9] :

- ISO 20 et ISO 40.
- CIR 20.
- EUR 40.

Les désignations ISO, CIR et EUR sont des désignations commerciales SDMO.

Ces conteneurs aménagés sont issus de conteneurs grande capacité (HC : High Cube) normalisés ISO :

- **1AAA** : Conteneur 40 pieds (12.192m x 2.438m x 2.896m), utilisés pour les ISO 40 et EUR 40.
- **1CCC** : Conteneur 20 pieds (6.058m x 2.438m x 2.896m), utilisés pour les ISO 20 et CIR 20.

I.6.3.1. Conteneurs ISO 20 et ISO 40

Les conteneurs ISO 20 et ISO 40 en 20 pieds et 40 pieds sont conformes aux normes de l'ISO/TC104 et certifiés C.S.C.2 ce qui autorise leur transport maritime.

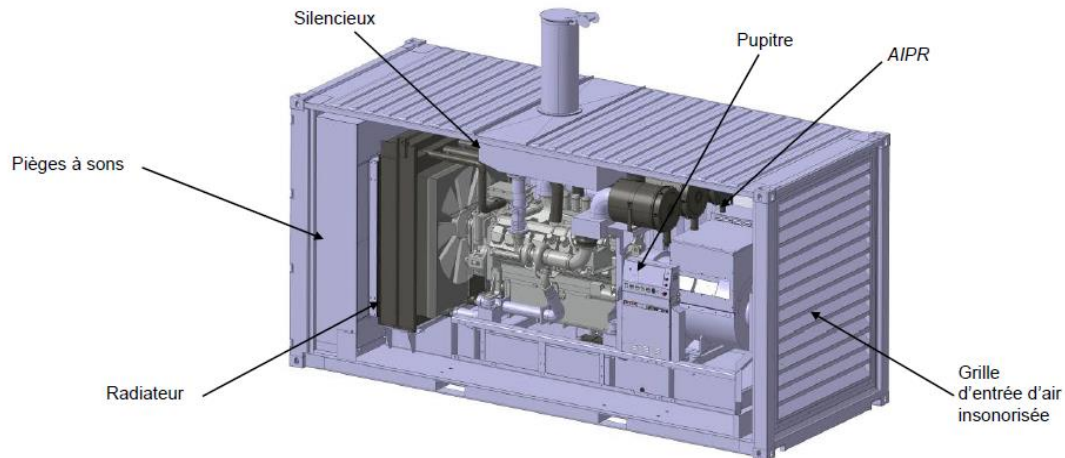


Figure I.16: Exemple de conteneur ISO 20[9]

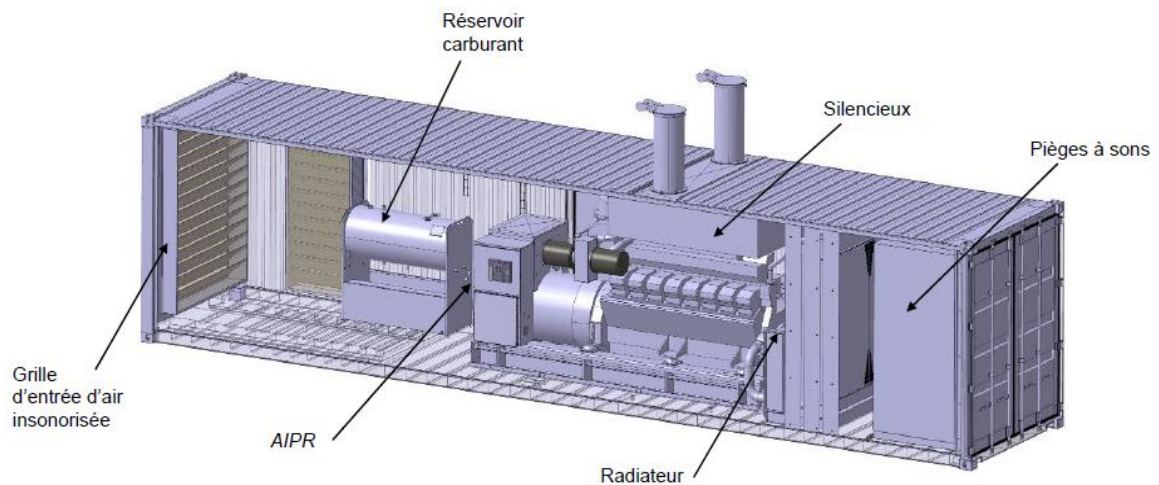


Figure I.17: Exemple de conteneur ISO 40[9]

I.6.3.2. Conteneur CIR 20

Les conteneurs CIR 20 (non certifiés C.S.C.) sont construits sur la base des conteneurs ISO 20 (conforme à l'ISO/TC104 sur demande). Ces conteneurs de faible niveau sonore sont bien adaptés aux applications mobiles et de location.

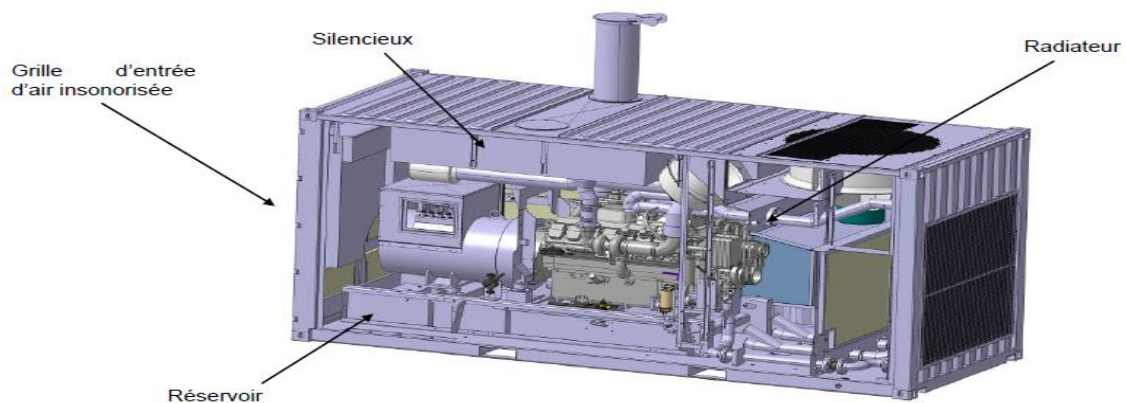


Figure I.18: Exemple de conteneur ISO 20[9]

I.6.3.3. Conteneur EUR 40

Les conteneurs EUR 40 sont réalisés uniquement en 40 pieds (non certifiés C.S.C.). Ces conteneurs dédiés aux groupes électrogènes équipés de moteurs MTU de la série 4000 existent en 2 versions d'insonorisation : Silent et Supersilent. [9]

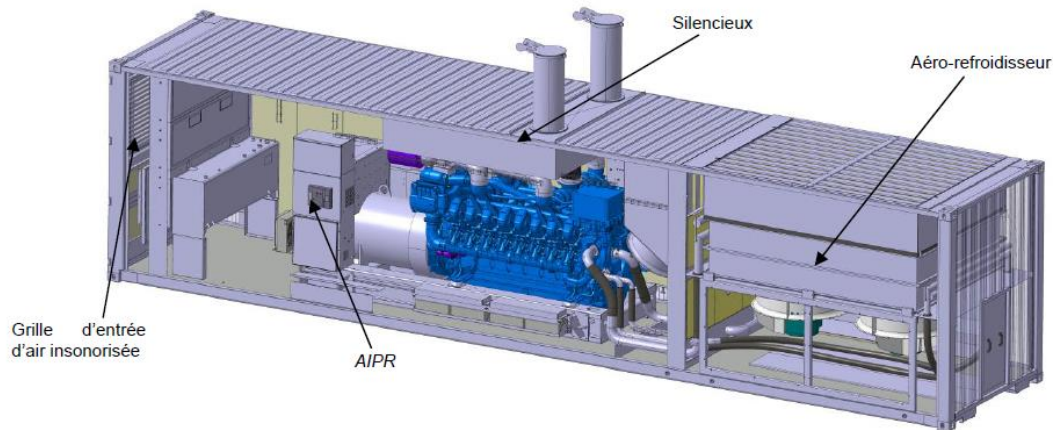


Figure I.19: Exemple de conteneur EUR 40[9]

I.6.3.4. Conteneur sur remorque

Tous les groupes électrogènes en conteneurs (20 et 40 pieds) existent en version sur remorque. [6]

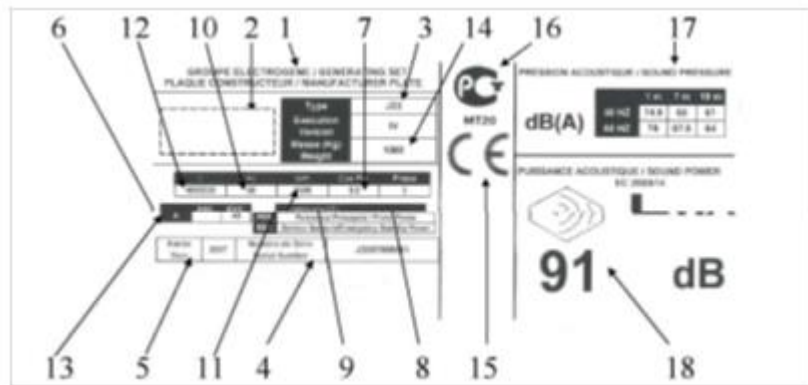


Figure I.20: Exemple de conteneur EUR 40[6]

I.6.4. Plaques d'identification

I.6.4.1. Identification des groupes électrogènes

Les groupes électrogènes et leurs composants sont identifiés au moyen de plaques d'identification. Les règles précises d'identification de chaque composant majeur (moteur, alternateur...) sont décrites dans les documents propres à chaque fabricant se trouvant en annexes de ce manuel. [10]



- | | |
|--|--|
| 1 - Groupe électrogène | 10 - Fréquence assignée (Hz) |
| 2 - Marque du constructeur | 11 - Vitesse de rotation du groupe électrogène (RPM) |
| 3 - Modèle | 12- Tension assignée (V) |
| 4 - Numéro de série | 13 - Intensité assignée (A) |
| 5 - Année de fabrication | 14 - Masse (kg) |
| 6 - Puissance assignée (kVA et kW) suivant la norme ISO 8528-1 | 15 - Marquage CE |
| PRP : puissance principale | 16 - Marquage norme hors CE (exemple GOSSTANDART) |
| ESP : puissance de secours | 17 - Pression acoustique |
| 7 - Facteur de puissance assigné | 18 - Puissance acoustique |
| 8 - Altitude maximale du site au dessus du niveau de la mer (m) pour la puissance assignée | |
| 9 - Température ambiante maximale pour la | |

Figure I.21: Exemple de plaque d'identification groupe électrogène[10]

I.6.4.2. Emplacement des plaques sur groupes électrogènes avec et sans capot

La plaque d'identification des groupes électrogènes avec et sans capots de protection est collée en partie basse du châssis.

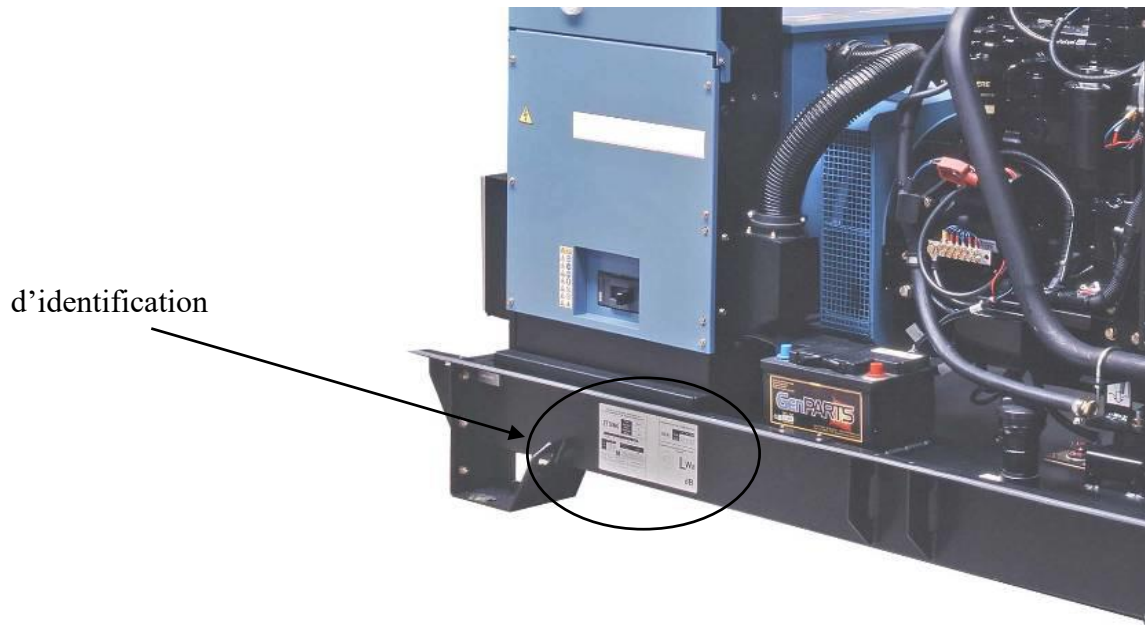


Figure I.22: Emplacement de la plaque d'identification des groupes électrogènes avec et sans capots de protection[10]

I.6.4.3. Emplacement des plaques sur groupes électrogènes en conteneur

La plaque d'identification des conteneurs est collée au niveau de l'arrêt d'urgence.

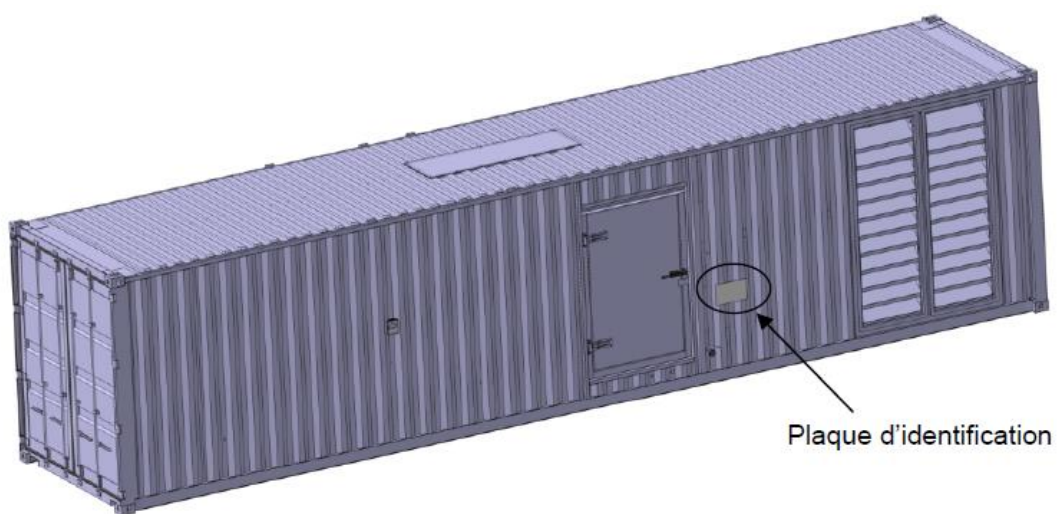


Figure I.23: Emplacement de la plaque d'identification des groupes électrogènes en conteneur capots [10]

I.7. Identification des composants des groupes électrogènes



Figure I.24: Exemples de plaques d'identification moteur[10]

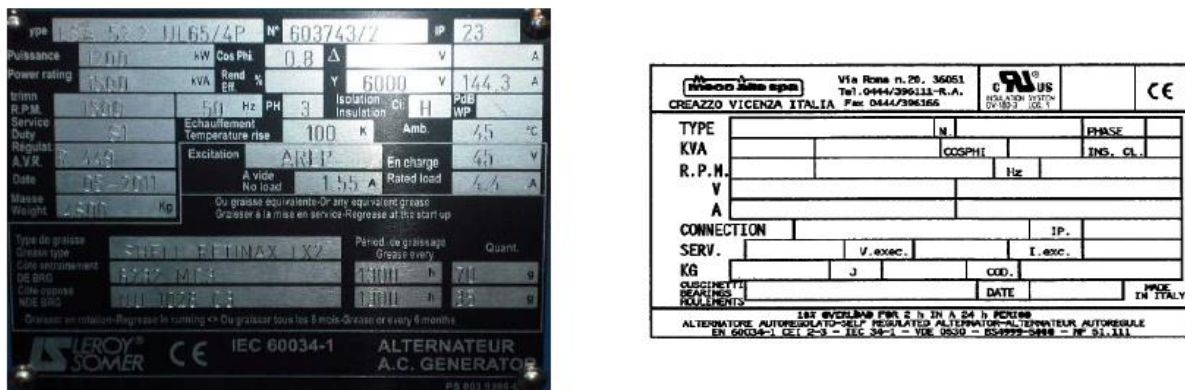


Figure I.25: Exemples de plaques d'identification alternateur[10]

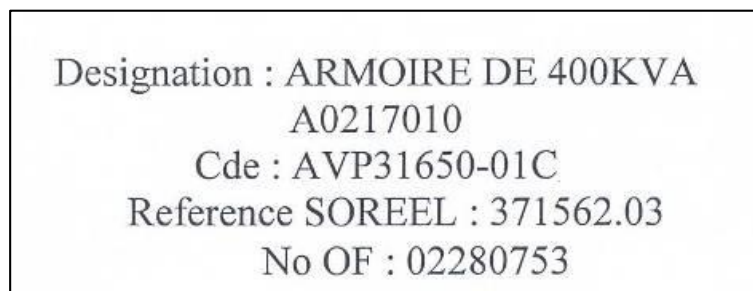


Figure I.26: Exemple de plaque d'identification d'armoire électrique[10]

I.8. Le Principe De Fonctionnement

Le fonctionnement d'un moteur diesel est différent de celui d'un moteur à essence. Même si leurs principaux organes sont similaires et respectent le même cycle à quatre temps.

Un moteur diesel est un moteur à explosion qui présente des différences sensibles, en particulier dans la façon dont le mélange est enflammé et la façon dont la puissance est régulée. Le mélange carburé est enflammé par une étincelle électrique dans un moteur à essence, tandis que dans un moteur diesel, l'allumage est obtenu par l'auto-inflammation du gasoil à la suite de l'échauffement. La température de l'air dans le cylindre augmente à plus de 450°C en raison de ce taux de compression. Cette température est celle de l'auto-inflammation du gasoil, qui s'enflamme spontanément en contact avec l'air sans être étincellé et par conséquent sans système d'allumage. de l'air sous l'effet de compression. Un moteur diesel a un rapport volumétrique normal de 1/20, contre 1/10 pour un moteur à essence. [11]

I.8.1. Cycle a quatre temps

Le cycle de fonctionnement d'un moteur diesel est divisé en quatre étapes : admission, compression, détente et échappement. Ce cycle implique deux mouvements aller-retour du piston et deux mouvements de rotation du vilebrequin, ce qui donne un angle vilebrequin de 720° . Chacun des cylindres se déroule de manière déphasée et identique.

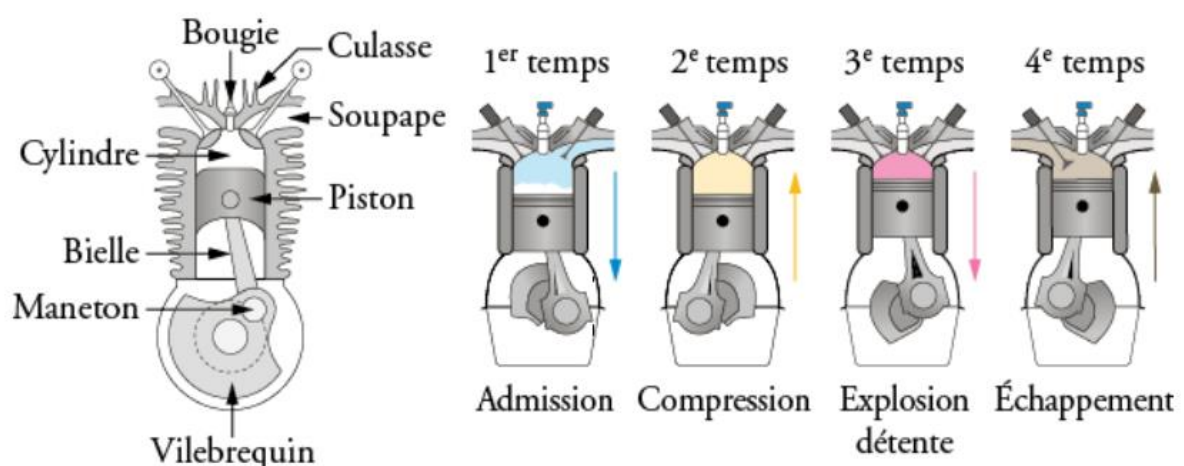


Figure I.27: Le cycle à quatre temps. [11]

A. Temps 1 : Admission : premier temps (figure I.28)

- La soupape d'admission est ouverte
- Le piston se dirige vers le PMB.
- Le cylindre n'aspire que de l'air

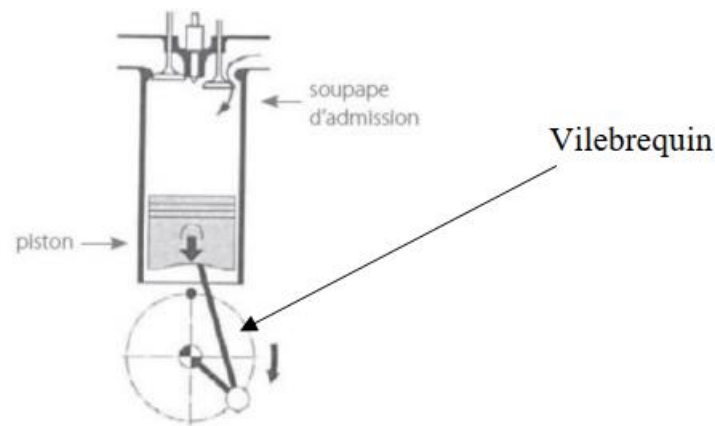


Figure I.28: Admission. [2]

B. Temps 2 : de compression : deuxième temps (figure I.29)

- Les soupapes d'admission et d'échappement sont fermées ;
- Le piston se déplace vers le haut et comprime l'air qui a été admis auparavant.
- La pression d'air augmente de dix à vingt fois sa valeur initiale.
- La température augmente et dépasse le point d'inflammation du carburant.
- Un injecteur situé entre les soupapes injecte du combustible dans la chambre de combustion sous une très haute pression.
- Le combustible se mélange à l'air chaud, se vaporise puis s'enflamme spontanément.

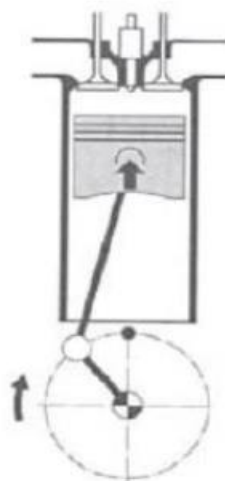


Figure I.29: Compression [2]

C. Temps 3 : La détente : le troisième temps correspond à la détente des gaz. (Figure I.30)

- L'injection continue sur dix degrés.
- La combustion libère de l'énergie du combustible.
- La pression dans la chambre de combustion augmente, ce qui repousse le piston vers le PMB.
- Le travail mécanique du moteur se produit pendant la phase de détente.
- Le système bielle-manivelle transforme ce travail en mouvement de rotation du vilebrequin.

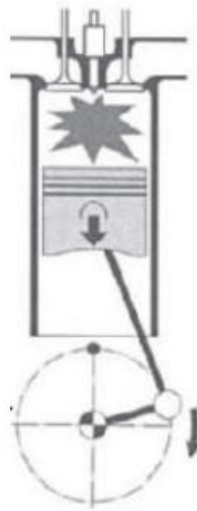


Figure I.30: Détente [10]

D. Temps 4 : d'échappement : quatrième temps (figure I.31)

Le quatrième temps correspond à l'échappement des gaz brûlés. La soupape d'échappement est ouverte. Le piston remonte du PMB au PMH (Point Mort Haut) et refoule les gaz brûlés. Le cycle moteur est alors bouclé. [10]

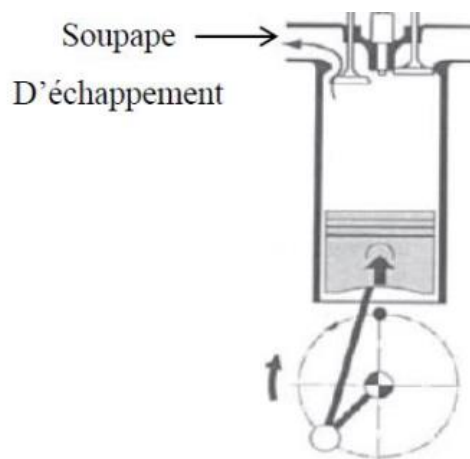


Figure I.31: Echappement[10]

I.8.2. Fonctionnements de refroidissement

Au démarrage, le circuit est réduit afin de favoriser une montée en température. Il est représenté en rouge sur le schéma de la Figure (I.32). [11]

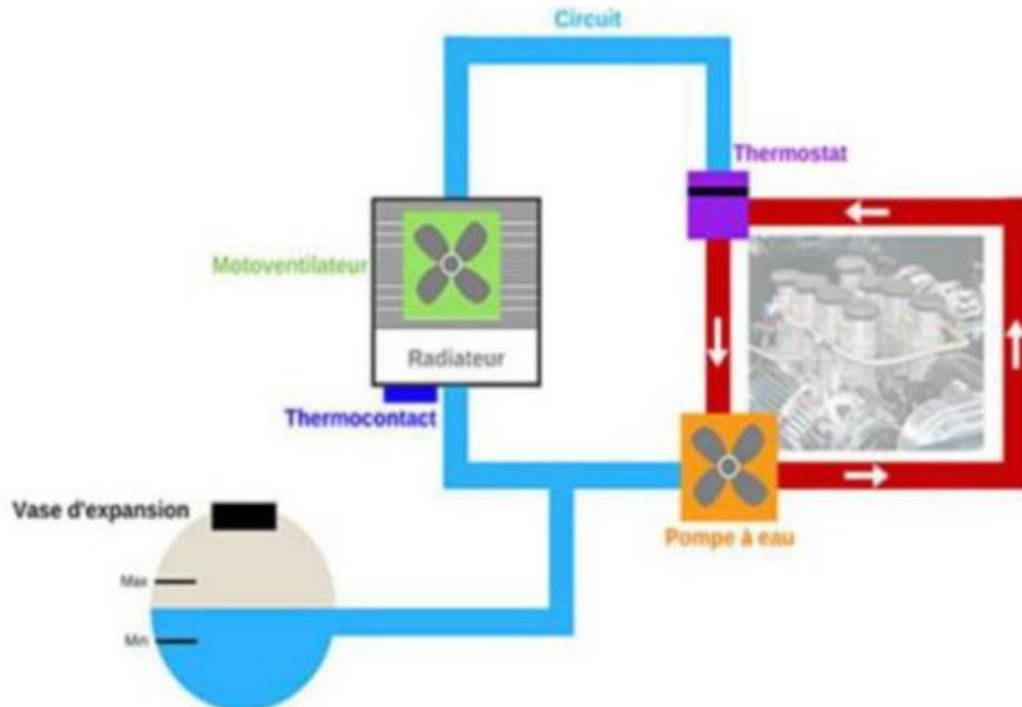


Figure I.32: Circuit de refroidissement à thermostat fermé[11]

Lorsque le moteur est chaud, le thermostat s'ouvre ce qui permet au liquide d'accéder à l'autre partie du circuit ici en bleu afin d'éviter une surchauffe. La température optimale est de 88°C.

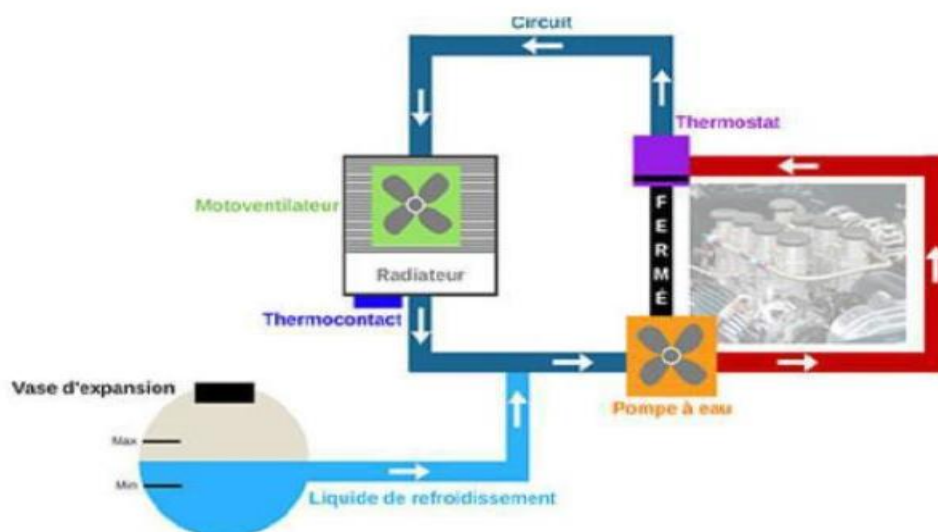


Figure I.33: Circuit de refroidissement à thermostat ouvert[11]

I.8.3. Principe du refroidissement

Lorsque le moteur est froid le thermostat est fermé, ce qui contraint l'eau à ne circuler que dans le moteur. L'eau circulera dans les cylindres et les culasses, ensuite elle retourne à la pompe à eau par une conduite de canalisation au bloc moteur. Une fois la température de seuil est atteinte, le thermostat va s'ouvrir, il ouvre la canalisation interne du retour à la pompe à eau. L'eau va être amenée à circuler dans le radiateur et une petite quantité d'eau va transiter au vase d'expansion qui permet de compenser la différence volumique de l'eau en fonction de la température. Le liquide de refroidissement traverse les barres du radiateur pour être refroidie par l'air ambiant. En cas d'insuffisance de l'air de refroidissement, la température de l'eau va s'élever. Il faut donc faire appel à un circuit électrique auxiliaire qui est représenté sur la figure I.34. Lorsque la température est trop élevée le thermo contact se ferme et il alimente le relais qui ferme son contact de puissance, ce qui fait mène au passage d'un grand courant qui alimente le moto-ventilateur. Une fois l'eau est refroidie, le thermocontact s'ouvre et l'eau retourne à la pompe à eau par une conduite externe du moteur. [12]

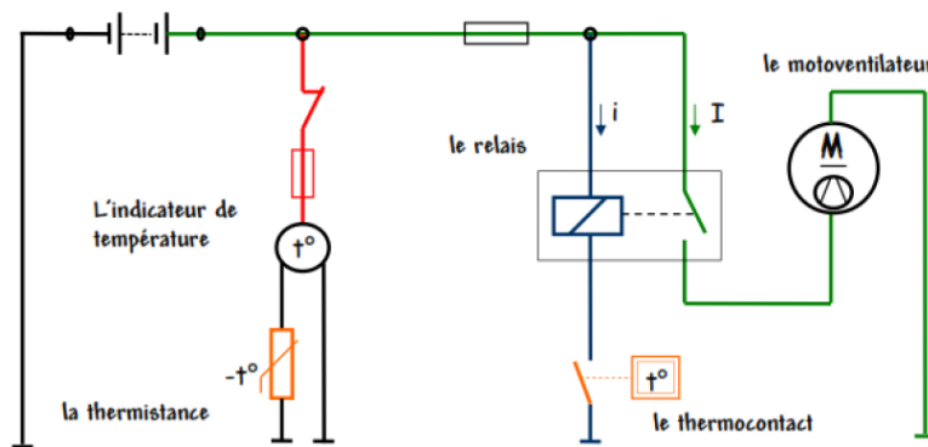


Figure I.34: Circuit électrique de refroidissement[12]

I.8.4. Fonctionnements de lubrification

La pompe à huile (entraînée par une courroie du moteur) aspire l'huile du carter. Le lubrifiant passe ensuite par un filtre pour retenir toutes les particules présentes. Ensuite, les conduites ou les trous dans le haut du moteur, du cylindre ou de la culasse Ils permettent à l'huile de se diriger vers les endroits à lubrifier. Ces conduites ne sont pas visibles de l'extérieur car elles sont internes à ces pièces. Le vilebrequin (ses roulements), l'arbre à cames, les soupapes, le turbo (roulement de l'axe), les bielles et les pistons sont les principales pièces qui doivent être lubrifiées. [11]

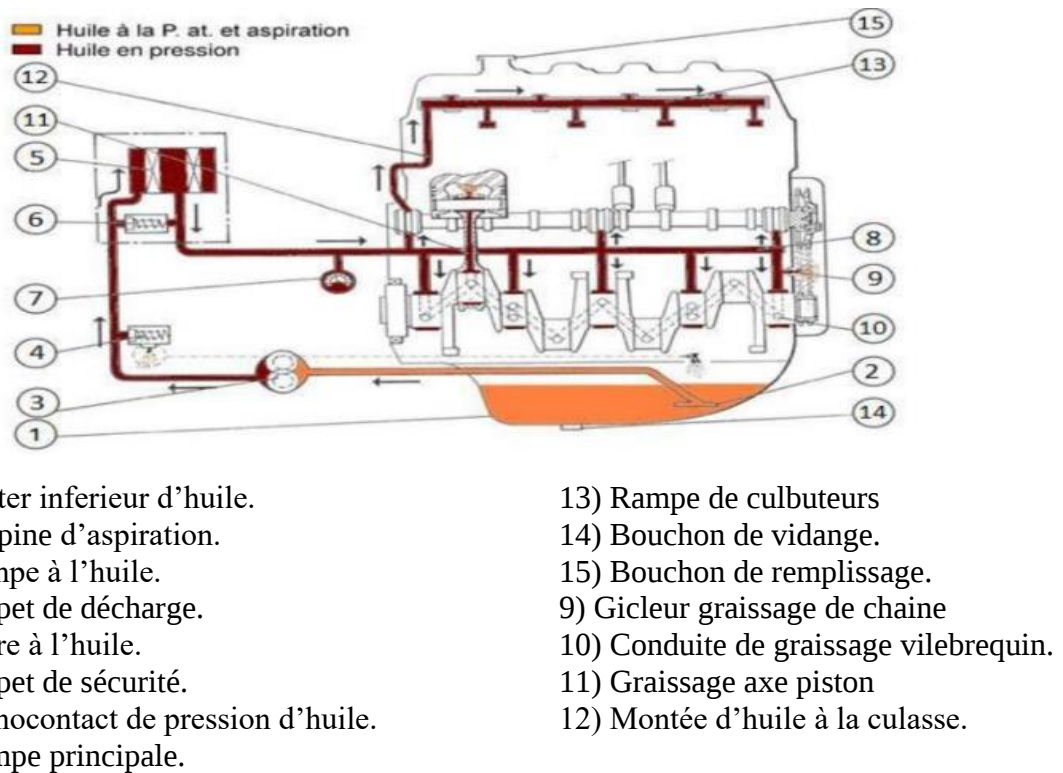


Figure I.35: Circuit de lubrification[11]

I.8.5. Principe de fonctionnement de l'alternateur triphasé

Le rotor est alimenté par le courant d'excitation continu. En tournant, il crée un champ tournant. Dans chaque roulement stationnaire, une force électromotrice est créée par l'interaction de ce champ tournant avec les conducteurs. [6]

En utilisant l'énergie du carburant, le moteur déplace un électroaimant dans une bobine, générant ainsi de l'électricité. Cette dernière est reçue par la batterie et stockée simplement sous forme chimique. Lorsque l'alternateur ne fonctionne plus (pour diverses raisons), il ne recharge plus la batterie. Pour s'en rendre compte, il suffit de voir l'allumage du voyant batterie lorsque le moteur tourne (ce qui est normal à l'arrêt avec le contact). [3]

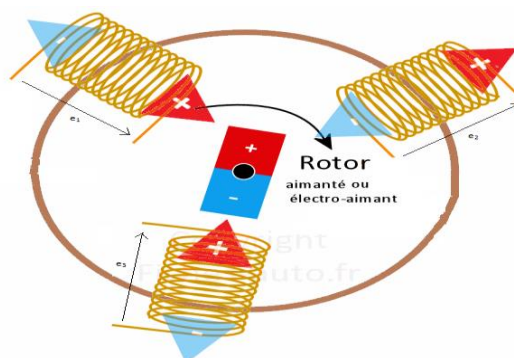


Figure I.36: Alternateur triphasée [3]

I.8.6. Principe de fonctionnement de l'AVR

En premier lieu, le régulateur commande la tension d'entrée de l'excitatrice de l'alternateur et surveille la tension de sortie. La tension de sortie du générateur augmente ou diminue en conséquence de la tension de commande du générateur. Le régulateur calcule fréquemment la quantité de tension qui doit être envoyée à l'excitateur, stabilisant ainsi la tension de sortie à une valeur de consigne prédéterminée. Les principes fondamentaux utilisés pour stabiliser la tension d'un groupe électrogène avec un alternateur auto-excité sont illustrés dans le circuit présenté dans la figure I.37. Une tension alternative est générée dans l'enroulement d'excitation lorsque le rotor est mis en rotation par le moteur. Convertir ce courant alternatif en courant continu le pont de redressement "RB" et le condensateur de filtrage "C". Le circuit de détection active ou désactive le transistor "Q" en comparant une tension de sortie V à une valeur de consigne. [8]

Un courant traverse l'enroulement de champ (rotorique) lorsque "Q" est activé.

Lorsque "Q" est désactivé, le courant de champ continue de circuler via la diode de roue libre "D". Pour fournir un certain courant de base lorsque "Q" est désactivé, le rotor an un petit aimant permanent. La tension de sortie V sera régulée en faisant varier convenablement le rapport cyclique du fonctionnement du transistor "Q".

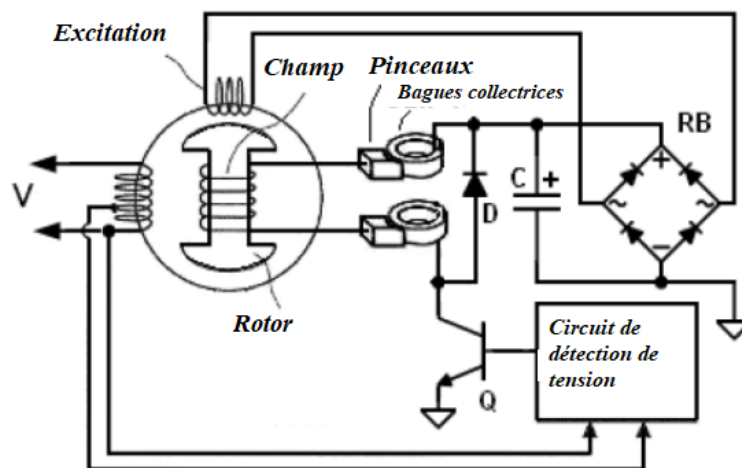


Figure I.37: Circuit de régulation de la tension de sortie. [8]

I.9. Domaine d'utilisation des groupes électrogènes

I.9.1. Source de secours en électricité

Une installation qui connecte un objet ou une installation au réseau électrique en cas de panne du réseau public. Une panne de courant est le début de ces installations. Dans la plupart des cas, ils sont en mode « veille ». Ces opérations se déroulent pendant les périodes où le réseau public reçoit du courant électrique. Le courant est activé pour éviter de nuire aux personnes. Les entreprises où des dysfonctionnements peuvent survenir peuvent également utiliser des centrales électriques de secours. [11]

Ex : Des applications militaires, des hôpitaux, des usines et des industries, des foires et des événements importants.

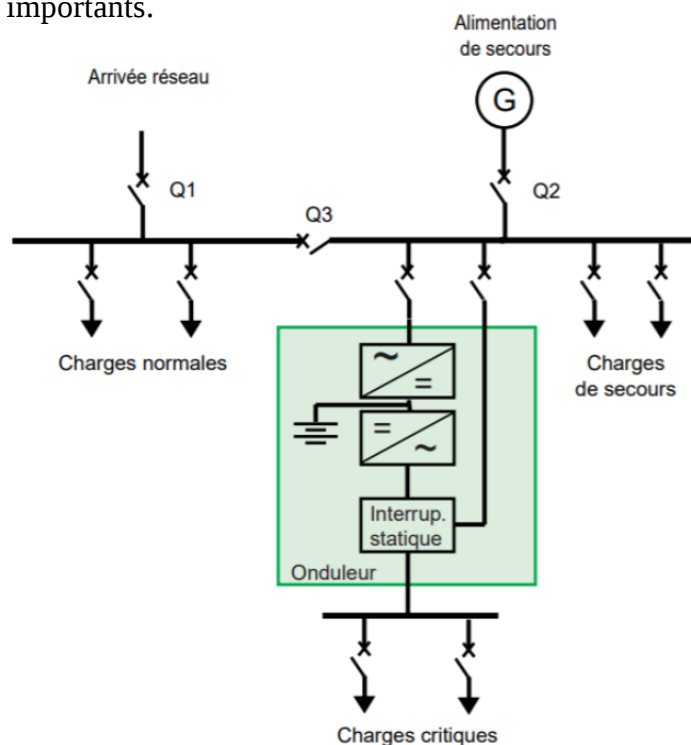


Figure I.38: Description distributeur alimentation le réseau électrique avec le groupe électrogène[11]

I.9.2. Source de pointe

Les besoins en pointe du réseau électrique public sont satisfaits grâce à l'utilisation du groupe électrogène. Le générateur se trouve en mode "stand-by" lorsque le réseau fonctionne normalement et n'entre en activité que pour compenser la consommation électrique à des points de pointe. La plupart du temps, cette méthode est employée dans les pays en voie de développement lorsque les infrastructures en développement d'une région ne sont plus alimentées par le réseau principal. Les tarifs EJP (effacement jours de pointe) sont des tarifs spéciaux pour 22 jours dans l'année où l'électricité fournie par le réseau

public est beaucoup plus chère. Certaines entreprises choisissent de subvenir à leurs besoins quotidiens en énergie pendant cette durée en utilisant des groupes électrogènes pour éviter ce surcoût. [6]

I.9.3. Source d'énergie électrique

L'application du groupe électrogène en tant que « producteur d'énergie électrique » Le groupe électrogène est une source électrique principale que nous Epargnes des dépenses énorme qu'acheminer électricité de Sonelgaz via des câbles Permet d'alimenter un réseau privé.

L'alimentation en énergie électrique provient groupes comme la montre là Le nombre de groupes à utiliser dépend de la puissance du site à alimenter. Dans ce type d'installation un groupe électrogène nécessite périodiquement des opérations de maintenance alors il faut que groupes assurent le fonctionnement sans appel au délestage. Dans certains cas, les conditions de fonctionnement de groupes doivent être examinées. [9]

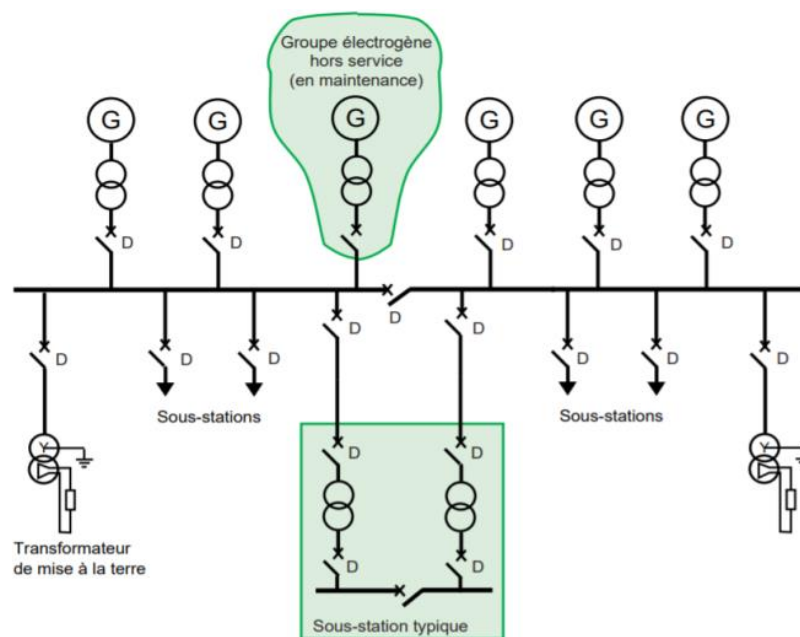


Figure I.39: description distributeur alimentation plusieurs groupe électrogène avec groupe électrogène en maintenance[9]

Les groupes électrogènes doivent être choisis pour fonctionner à 50 % de leur puissance nominale au moins. La durée de fonctionnement annuelle de ces groupes électrogènes est généralement assez longue.

I.10.Conclusion

Le principe de fonctionnement d'un groupe électrogène a été étudié en détail dans ce chapitre, ainsi que les principales pièces qui le composent. L'objectif est de maîtriser l'application de la maintenance préventive et de faciliter la localisation des défauts.

Chapitre II

**Modélisation et simulation du groupe
électrogène**

✚ L'alternateur

II.1. Introduction

La principale composante du générateur diesel est une turbine diesel qui entraîne une génératrice, habituellement de type synchrone. Il s'agit de l'élément essentiel d'un système diesel, car il est généralement installé en premier. Donc, toute modification du système doit être conditionnée par le bon fonctionnement de ce générateur.

II.2. Présentation de la machine synchrone (alternateur) à étudier

Avant de procéder à la modélisation de l'alternateur, nous commencerons par présenter les hypothèses simplificatrices et les conventions de signes à utiliser. La mise en équation sera réalisée en enregistrant toutes les relations entre les différentes grandeurs qui régissent son fonctionnement, en utilisant les principes fondamentaux de l'électrotechnique. En ce qui concerne la mise en équations, cette machine est utilisée en suivant la représentation schématisée de la figure II.1. [11]

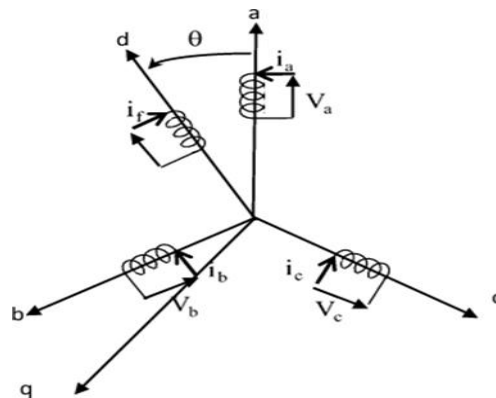


Figure II.1: Représentation des enroulements d'une machine synchrone sans amortisseurs [11]

II.3. Hypothèses simplificatrices

- Le circuit magnétique n'est pas saturé, ce qui permet d'exprimer le débit en fonction linéaire du courant.
- Le circuit magnétique est parfaitement feuilleté, seuls les conducteurs sont porteurs de courant (sans tenir compte des courants de Foucault).
- La densité de courant dans la section conductrice est uniforme.
- La répartition des f.m.m produits par les conducteurs statoriques le long de l'entrefer est sinusoïdale.

II.4. Conventions de signes

Les conventions associées aux équations électriques et magnétiques sont les suivantes [12]:

- Un flux positif est généré par un courant positif grâce à son propre enroulement.
- Le courant positif circule lorsque la f.é.m. est positive.
- Le récepteur est perçu comme l'inducteur, tandis que le générateur est perçu comme l'induit (stator).
- Le sens trigonométrique est la direction positive de l'angle interne de l'alternateur et de la vitesse de rotation.

Il n'est pas nécessaire d'adopter de convention pour les amortisseurs car ils sont en court-circuit.

II.5. Equations électriques et mécaniques de la machine synchrone munie d'enroulements amortisseurs

II.5.1. Equations électriques du stator

Dans le prochain passage, nous substituerons l'opérateur d/dt qui représente une dérivation temporelle par l'opérateur de Laplace « p ».

Soient Φ_a , Φ_b , Φ_c les flux traversant chaque phase à un instant donné, dans le plan (a, b, c), la machine est régie par les équations suivantes [13] :

$$\begin{cases} V_a = E_a - R_a i_a = -p\Phi_a - R_a i_a \\ V_b = E_b - R_b i_b = -p\Phi_b - R_b i_b \\ V_c = E_c - R_c i_c = -p\Phi_c - R_c i_c \end{cases} \quad (II.1)$$

R_a : Résistance d'une phase du stator

i_a , i_b , et i_c sont les courants traversant les enroulements a, b et c respectivement.

V_a , V_b et V_c sont les tensions aux bornes des enroulements a, b et c respectivement.

II.5.2 Transformation de Park

La transformée de Park, fréquemment confondue avec la transformée dqo, est un outil mathématique employé dans le domaine de l'électrotechnique, dans le but de représenter un système triphasé en utilisant un modèle diphasé. C'est une modification de repère. Les deux

premiers axes de la nouvelle base sont habituellement désignés sous les noms de d et q. En règle générale, les grandeurs transformées sont des courants, des tensions ou des flux. [14]

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta - 4\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta - 4\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_d \\ \Phi_q \\ \Phi_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta - 4\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

En appliquant les transformations définies par les systèmes (II.2), (II.3) et (II.4) aux tensions, courants et flux des phases a, b et c, on obtient les équations de Park suivantes.

- Dans le plan (d,q) :

$$\begin{cases} V_d = -p\Phi_d - \Phi_q p\theta - R_a i_d \\ V_q = -p\Phi_q - \Phi_d p\theta - R_b i_d \\ V_0 = -p\Phi_0 - R_c i_0 \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

V_d, i_d : Composante dans l'axe direct du rotor de la tension et du courant par phase après transformation de Park.

V_q, i_q : Composante dans l'axe en quadrature du rotor de la tension et du courant par phase après transformation de Park

Φ_d : Composante du flux tournant suivant l'axe direct du rotor

Φ_q : Composante du flux tournant suivant l'axe en quadrature du rotor

θ : Angle électrique de l'axe direct du rotor avec l'axe de la phase a

Si on pose : $d\theta/dt = p$. $\theta = \Omega r$

Ωr : vitesse de rotation du rotor de l'alternateur

On obtient :

$$\begin{cases} V_d = -p\Phi_d - \Phi_q \Omega r - R_a i_d \\ V_q = -p\Phi_q - \Phi_d \Omega r - R_a i_d \\ V_0 = -p\Phi_0 - R_c i_0 \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

Après transformation de Park, la machine peut être représentée par la figure.

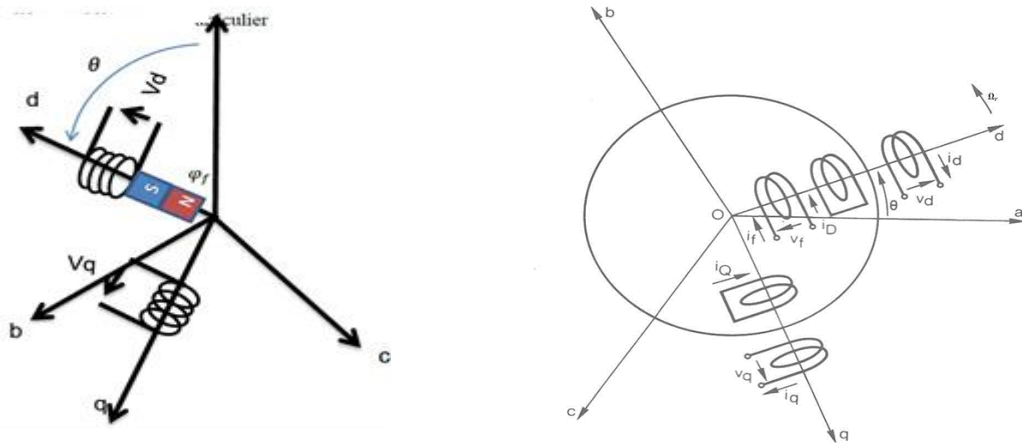


Figure II.2: Représentation schématique de la machine Synchrone après transformation de Park [15]

Au cours de notre recherche ultérieure, nous allons prendre en compte les deux premières équations (en fonction des axes d et q) du système d'équations (II.6), avec la composante homopolaire étant nulle.

II.5.3. Equation électrique du rotor et des amortisseurs

II.5.3.1. Enroulements inducteurs

L'inducteur est décrit par l'équation suivante :

$$V_f = p\Phi_f + R_f i_f \quad (II.7)$$

V_f : Tension aux bornes de l'enroulement inducteur

Φ_f : Flux total embrassé par l'enroulement inducteur

R_f : Résistance de l'enroulement inducteur

i_f : Courant traversant l'enroulement inducteur

II.5.3.2. Amortisseurs

La tension étant nulle aux bornes des circuits amortisseurs, nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} 0 = p\Phi_{kd} + R_{kd} i_{kd} \\ 0 = p\Phi_{kq} + R_{kd} i_{kq} \end{cases} \quad (II.8)$$

II.5.4. Equations des puissances, des couples et équations mécaniques de la machine.

Dans la suite, nous présentons les équations concernant une machine bipolaire.

II.5.4.1. Calcul des puissances

Dans l'ensemble, la puissance instantanée utilisée aux bornes de la machine est la somme des puissances des trois phases[16] :

$$P_i = V_a i_a + V_b i_b + V_c i_c \quad (\text{II.9})$$

La puissance de cette machine est positive car elle fonctionne en tant que générateur, ce qui est en accord avec les normes de classification.

En utilisant le système (II.6), les tensions (V_a, V_b, V_c) sont écrites en fonction de (V_d, V_q) et les courants (i_a, i_b, i_c) en fonction de (I_d, I_q). Nous parvenons à l'équation suivante :

$$P_i = \frac{3}{2} (V_d i_d + V_q i_q) + 2V_0 i_0 \quad (\text{II.10})$$

II.5.4.2. Calcul des couples

En substituant les tensions V_d et V_q dans l'expression (II.9) par les termes fournis dans le système d'équation (II.6).

$$P_i = \frac{3}{2} (i_d p \Phi_d + i_q p \Phi_q) - \frac{3}{2} R_a (i_d^2 + i_q^2) + \frac{3}{2} (i_q \Phi_d - i_d \Phi_q) \Omega r \quad (\text{II.11})$$

- La première parenthèse se compose de termes élémentaires de la forme $I \cdot p \cdot \Phi$. Ils correspondent à la puissance mise en jeu dans la machine par les variations de l'énergie électromagnétique emmagasinée mais ils ne contribuent pas à la création de la puissance électrique.
- La deuxième parenthèse représente la somme des pertes joule de l'induit (stator).
- La troisième parenthèse se compose de termes de la forme $I \Phi$ qui représente la puissance électromagnétique P_{ei} .

$$P_i = \frac{3}{2} (i_q \Phi_d - i_d \Phi_q) \Omega r \quad (\text{II.12})$$

La puissance P_{ei} est la seule présente dans l'expression de P_i qui peut générer une puissance électrique, tandis que le facteur $I \cdot \Phi$ correspond au couple électromagnétique qui se produit à l'intérieur de la machine. [16]

$$C_{ei} = \frac{3}{2} (i_q \Phi_d - i_d \Phi_q) \quad (\text{II.13})$$

II.5.4.3. Equations mécaniques de l'alternateur

- Le choix du sens positif pour les couples est celui qui permet à la machine de tourner dans le sens de rotation habituel, c'est-à-dire le sens trigonométrique.
- Le couple C_m fourni par le moteur thermique devra être compté positivement.

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} = C_m - C_e \quad (\text{II.14})$$

J : Est le moment d'inertie de la partie tournante.

θ : Est l'angle électrique du rotor, par rapport à un axe fixe a.

II.5.5. Equations magnétiques de la machine

Les courants et les flux sont représentés sous les formes matricielles ci-dessous.

- Flux dans l'axe direct :

$$\begin{bmatrix} \Phi_d \\ \Phi_f \\ \Phi_{kd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & M_{af} & M_{kd} \\ \frac{2}{3} M_{af} & L_f & M_{fkd} \\ \frac{2}{3} M_{akd} & M_{fkd} & L_{kd} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_d \\ i_f \\ i_{kd} \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

- Flux dans l'axe en quadrature :

$$\begin{bmatrix} \Phi_q \\ \Phi_{kq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_q & M_{akq} \\ \frac{2}{3} M_{akq} & L_{kq} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_q \\ i_{kq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

Les équations qui régissent la machine multipolaire demeurent inchangées, à l'exception de celles du couple électromagnétique et de l'équation du mouvement qui se transforment en[17] :

$$C_{ei} = \frac{3}{2} P_1 (i_q \Phi_d - i_d \Phi_q) \quad (\text{II.17})$$

$$\frac{J}{p_1} \frac{d^2 \theta}{dt^2} = C_m - C_e \quad (\text{II.18})$$

P_1 : Nombre de paire de pôles

II.6. Equations électriques et mécaniques de la machine sans amortisseurs

Les équations électriques et mécaniques ont une forme similaire à celle de la machine équipée d'amortisseurs (II.5, II.6, II.10, II.12, II.13, II.14). Il vous suffit de reproduire les équations magnétiques de la machine avec des enroulements amortisseurs et de les poser :

$$\Phi_{kd} = \Phi_{kq} = i_{kd} = i_{kq} = M_{akd} = M_{akq} = M_{fkd} = L_{ka} = L_{kq} = 0$$

On obtient alors les relations entre les flux et les courants sous la forme :

$$\begin{bmatrix} \Phi_d \\ \Phi_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & M_{af} \\ \frac{2}{3}M_{af} & L_f \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_d \\ i_f \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

$$\Phi_q = L_q i_q \quad (\text{II.20})$$

Les transformations des équations II.8 et II.19 se font en regroupant des termes pour donner naissance à des grandeurs mesurables qui ont une signification physique précise. [14]

$$\begin{cases} \Phi_d = L_d i_d + M_{af} i_f \\ \Phi_f = \frac{2}{3} M_{af} i_d + L_f i_f \\ V_f = p \Phi_f + R_a i_d \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

En supprimant Φ_f des deux équations précédentes, on obtient :

$$i_f = \frac{V_f - \frac{2}{3} M_{af} \cdot p i_d}{R_f + L_f p} \quad (\text{II.22})$$

Après avoir supprimé Φ_f et i_f des trois équations du système (II.23), on obtient l'expression de Φ_d

$$\Phi_d = L_d \frac{1 + \frac{1}{R_f} \left(L_f - \frac{2}{3} \frac{M_{af}^2}{L_d} \right)}{1 + \frac{L_f}{R_f} p} \cdot p i_d + \frac{M_{af}}{R_f \left(1 + \frac{L_f}{R_f} p \right)} V_f \quad (\text{II.23})$$

Dans cette expression on a :

$L_f - \frac{2}{3} \frac{M_{af}^2}{L_d}$: à la dimension d'une inductance de fuite.

On posera : $L_f - \frac{2M_{af}^2}{L_d} = N_f$

$\frac{1}{R_f} \left(L_f - \frac{2M_{af}^2}{L_d} \right) = \frac{N_f}{R_f}$: à la dimension d'une constante de temps.

On posera : $\frac{N_f}{R_f} = T_d'$

$\frac{L_f}{R_f}$: a la dimension d'une constante de temps.

On posera : $\frac{L_f}{R_f} = T_{d0}'$

II.7. Equations générales du groupe électrogène en charge

Les équations qui nous permettent d'étudier le groupe électrogène en charge sont récapitulées dans ce qui suit [18]:

$$\begin{cases} V_d = -p\Phi_d - \Phi_q\Omega r - R_a i_d \\ V_q = -p\Phi_q - \Phi_d\Omega r - R_a i_q \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

$$\begin{cases} \Phi_d = L_d I_d + M_{af} i_f + M_{akd} i_{kd} \\ \Phi_q = L_q I_q + M_{af} i_f + M_{akq} i_{kq} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

$$C_{ei} = \frac{3}{2} P_1 (i_q \Phi_d - i_d \Phi_q) \quad (\text{II.26})$$

$$\frac{J}{P_1} p\Omega r = C_m - C_e \quad (\text{II.27})$$

$$P_e = V_d i_q - V_q i_d \quad (\text{II.28})$$

$$Q_e = V_d i_q - V_q i_d \quad (\text{II.29})$$

$$V = \left(\frac{V_d^2 - V_q^2}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II.30})$$

$$i = \left(\frac{i_d^2 - i_q^2}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II.31})$$

II.8. Détermination du régime permanent du groupe électrogène

Toutes les modifications liées au temps seront annulées :

$$p = \frac{d}{dt} = 0 \quad (\text{II.32})$$

Le symbole " 0 " indique que le régime est permanent.

$$\begin{cases} V_{d0} = -\Phi_{q0}\Omega r - R_a i_{d0} \\ V_q = \Phi_{d0}\Omega r - R_a i_{q0} \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

$$\begin{cases} \Phi_{d0} = L_d I_{d0} + M_{af} i_{f0} \\ \Phi_{q0} = L_q I_{q0} + M_{af} i_{f0} \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

$$C_{e0} = \frac{3}{2} P_1 (i_q \Phi_d - i_d \Phi_q) \quad (\text{II.35})$$

$$C_{e0} = C_m \quad (\text{II.36})$$

$$\Omega r = \Omega \quad (\text{II.37})$$

$$P_{e0} = V_{d0} i_{q0} - V_{q0} i_{d0} \quad (\text{II.38})$$

$$Q_{e0} = V_{d0} i_{q0} - V_{q0} i_{d0} \quad (\text{II.39})$$

$$V_0 = \left(\frac{V_{d0}^2 - V_{q0}^2}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II.40})$$

$$i = \left(\frac{i_{d0}^2 - i_{q0}^2}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II.41})$$

II.9. Modèle la machine synchrone

Dans le cadre de SPS, la machine synchrone et la charge R-L sont représentées par des sources de courants. Ainsi, une charge résistive pure est ajoutée en parallèle afin d'éviter la présence de deux sources de courant simultanées. On peut voir le schéma global du modèle de simulation sur la figure II.3.

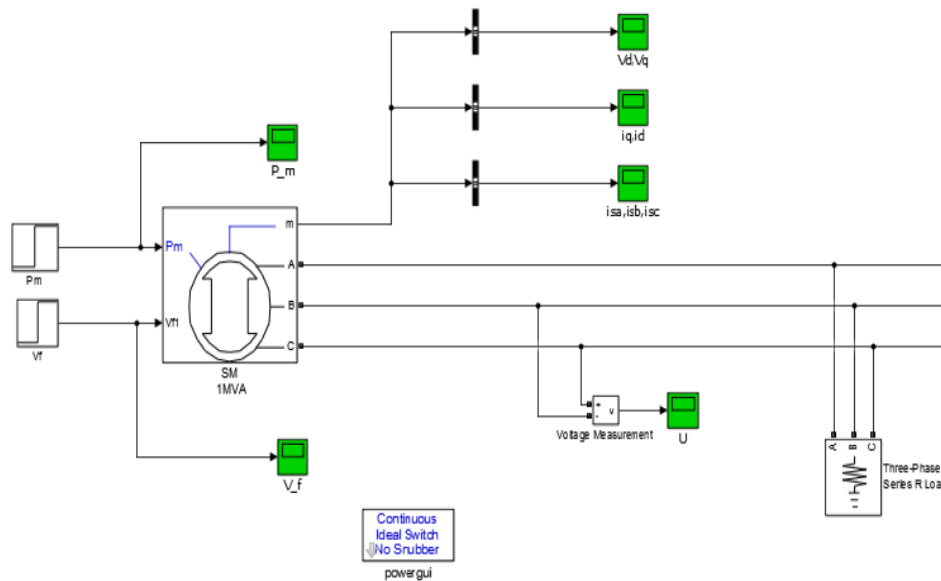


Figure II.3: Modèle la machine synchrone

Le modèle de l'alternateur est donné en unités réduites. La machine comporte deux entrées qui sont :

P_m : la puissance mécanique qui va entrainer le rotor de l'alternateur. Cette puissance représente la puissance mécanique du moteur thermique du groupe.

V_f : la tension d'excitation qui va alimenter l'enroulement rotorique. Cette tension est obtenue soit automatiquement dans la plupart des cas, soit au niveau de la batterie du groupe.

La machine possède aussi une sortie triphasée (a, b, c) qui agit comme une source de courant, ainsi qu'une sortie "m" qui nous fournit les signaux des différentes mesures des dimensions de la machine.

Les grandeurs d'entrée P_m et V_f seront présentées dans notre bloc de simulation sous la forme d'échelons de puissance et de tension, respectivement.

II.9.1. Détermination de la tension d'excitation nominale

On sait que $V_{fn} = R_f * I_{fn}$

Calcul du courant d'excitation nominal :

En excluant la saturation, il est connu que l'équation située à droite de la caractéristique à vide de l'alternateur est [19]:

$$E = \frac{\omega S * M_{af}}{\sqrt{2}} I_f \quad (\text{II.42})$$

Remarque :

Il est connu que lorsque la tension nominale par phase " V_n " est la valeur de la f.é.m interne " E ", il est nécessaire que " I_f " soit la valeur du courant d'excitation nominal " I_{fn} ", ce qui permet d'écrire [20]:

$$V_n = B I_{fn} \quad (\text{II.43})$$

Calcul de M_{af}

$$M_{af}^2 = \frac{2}{3} \frac{(L_f - N_f) * X_d}{\omega S} \quad (\text{II.44})$$

$$M_{af}^2 = \frac{2}{3} \frac{(T'_{d0} - T'_d) * R_f * X_d}{\omega S} \quad (\text{II.45})$$

II.9.2. Calcul des paramètres de la machine en unités réduites

En général, la loi de calcul en valeur réduite (per unit) est :

$$A_{(pu)} = A_{(SI)} / A_{base}$$

$A_{(pu)}$: la grandeur en unités réduites.

$A_{(SI)}$: la grandeur en unités réelles SI

A_{base} : la grandeur de base (de référence) exprimée en SI.

II.9.3. Calcul des grandeurs de base

Courant de base: $I_{base} = \sqrt{2} I_n$

Tension de base: $V_{base} = \sqrt{2} V_n$

Puissance de base : $P_{base} = S_n$

Impédance de base : $Z_{base} = V_{base} / I_{base}$

Pulsation de base : $\omega_{base} = 2 * \pi * f_n$

Calcul de la résistance statoriques en pu:

$$R_a (pu) = R_a (SI) / Z_{base}$$

Calcul de l'inertie en "s"

$$H = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{p_1} \right)^2 \frac{J \omega b^2}{P_b}$$

Calcul de la tension d'excitation en pu:

$$V_f (pu) = \frac{V_f}{V_{fbase}} = \frac{2K_f V_f}{3 * V_n * \sqrt{2}}$$

K_f : Appelé coefficient d'équivalence des courant inducteur et d'induit qui peut être choisi arbitrairement

$$K_f = 58.72$$

II.10. Application numérique

II.10.1. Calcul de la mutuelle M_{af}

$$M_{af}^2 = \frac{2 (L_f - N_f) * X_d}{3 \omega_s}$$

$$M_{af}^2 = \frac{2 (3.03 - 0.185) * 0.44}{3 * 314}$$

$$M_{af}^2 = 0.00554$$

$$M_{af} = 0.075 \Omega$$

Calcul du courant d'excitation nominal avec $V_n = 230 \text{ V}$

$$I_{fn} = V_n / 16.65$$

$$I_{fn} = 230 / 16.65$$

$$I_{fn} = 13.81 \text{ A}$$

D'où;

$$V_{fn} = 28.86 \text{ V}$$

II.10.2. Calcul des grandeurs de base

Courant de base : $I_{base} = \sqrt{2} I_n$

$$I_n = \frac{S_n}{3V_n} = \frac{1000000}{3 * 230} = 1449.27 \text{ A}$$

$$I_{base} = 2049.57 \text{ A}$$

Tension de base : $V_{base} = \sqrt{2}V_n$

$$V_{base} = 325.26 \text{ V}$$

Puissance de base : $P_{base} = S_n$

$$P_{base} = 1000000 \text{ W}$$

Impédance de base :

$$Z_{base} = V_{base} / I_{base}$$

$$Z_{base} = 325.26 / 2049.57$$

$$Z_{base} = 0.16$$

Pulsation de base :

$$\omega_{base} = 2 * \pi * f_n$$

$$\omega_{base} = 2 * 3.14 * 50$$

$$\omega_{base} = 314 \text{ rad/s}$$

II.10.3. Calcul des grandeurs en unités réduites

Calcul de la résistance statoriques en pu :

$$R_a(pu) = R_s(SI) / Z_{base}$$

$$R_a(pu) = 0.002 / 0.16$$

$$R_a(pu) = 0.0125$$

Calcul de l'inertie en seconde :

$$H = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{P_1} \right)^2 \frac{J \omega b^2}{P_b}$$

$$H = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} \right)^2 \frac{22.39287 * 314^2}{1000000}$$

$$H = 0.28 \text{ s}$$

Calcul de la puissance mécanique en pu

$$P_m(pu) = \frac{P_m(SI)}{P_{base}}$$

$$P_m(pu) = 0.842$$

La tension d'excitation en pu

$$V_f(pu) = 3.484$$

Moteur Diesel

II.1. Introduction

Le moteur a été développé par l'inventeur allemand Rudolf Diesel en 1893. Un moteur diesel est un moteur à combustion interne (IC) moteur qui convertit l'énergie chimique du carburant en l'énergie mécanique [1], [6]. Dans le carburant d'un moteur IC consomme avec de l'air emballé à l'intérieur de la chambre d'allumage et le résultat de la combustion produit de la puissance mécanique.

II.2. Fonctionnement du moteur diesel

Une température élevée est créée à l'intérieur de la chambre de combustion du moteur diesel en entrant dans l'air par le filtre d'entrée haute pression. En raison de la chaleur de l'air comprimé, comme de petites gouttelettes de carburant sont pulvérisées sur l'air comprimé, il commence à brûler. La chaleur de l'air comprimé vaporizes le carburant des molécules de la surface des gouttelettes. Il y a un retard dans la combustion du carburant en raison du processus de vaporisation. Parmi les procédures d'inflammation du carburant dans la chambre de combustion, une pression exceptionnellement élevée se développe au-dessus du cylindre. En raison de l'extension rapide offerte par les gaz de combustion, une pression est créée dans la chambre, la pression sur le cylindre dépasse la limite et le cylindre est entraîné vers l'extérieur à cause de cette pression soudaine. De ce fait, l'extérieur Avec le mouvement du piston, la puissance développée est transférée au vilebrequin. En raison d'un taux de compression élevé, le moteur diesel fonctionne à une efficacité thermique maximale concernant l'énergie de combustion normale externe ou interne systèmes[21].

II.3. Gouverneur

Initialement, on observe que le régulateur et ses paramètres de conception sont réglés à la valeur d'état stable « zéro » et que la puissance mécanique de référence est également observée dans un scénario sans écart de vitesse. Cette hypothèse s'applique lorsque machine à l'état d'initialisation et change directement une fois entrée dans l'état pratique [22]. Il en a deux bornes d'entrée; l'une est la vitesse de référence et une autre est la vitesse réelle, et une borne de sortie est la puissance mécanique (P_m). Ces P_m produits sont introduites dans le bloc générateur synchrone. La vitesse de l'arbre détectée par le bloc générateur est renvoyée au bloc moteur diesel, et la différence (erreur) entre la vitesse de référence et la vitesse réelle est mesurée et contrôlée à l'aide d'un contrôleur PID approprié qui minimise l'erreur de

vitesse. L'actionneur reçoit un signal du régulateur pour ajuster le taux d'injection de carburant qui maintient la sortie de fréquence constante du système [23]. La fonction de transfert et la boucle de rétroaction du régulateur modélisé sont illustrées à la figure II.4.

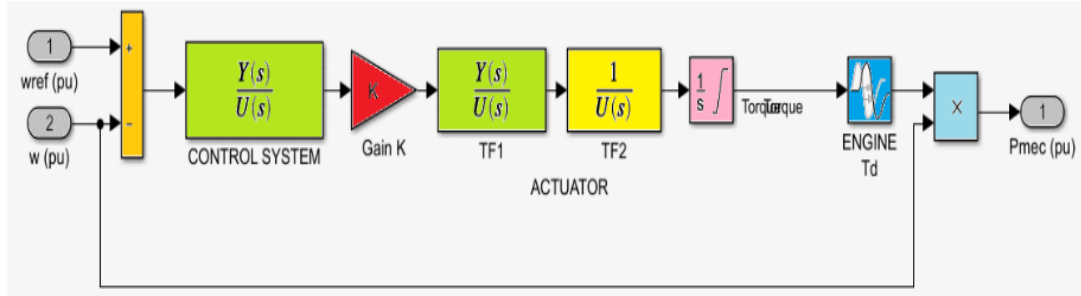


Figure II.4 : Modèle MATLAB/Simulink du modèle de moteur diesel et de régulateur

II.4. Excitateur

La présence d'un excitateur est très importante dans tout générateur en raison de sa capacité à contrôler le champ et les tensions aux bornes dans des situations normales et anormales. Joue également un rôle dans l'instabilité de la tension en contrôlant la puissance active et réactive dans le générateur [20].

Le système de régulateur de tension automatique (AVR) contrôle le courant d'excitation en utilisant l'erreur de tension aux bornes comme entrée de commande dans la boucle de contrôle d'excitation et ainsi de suite. La tension de sortie du générateur est détectée en continu jusqu'à ce que cette erreur devienne nulle [18]. Génératrice Le contrôle d'excitation est un système de contrôle non linéaire typique à variation temporelle qui met en œuvre un régulateur de tension SM et un excitateur basé sur le modèle de système d'excitation IEEE de type AC1 A. Sa sortie est la tension de champ (V_f) considérée comme une entrée dans le bloc SM. La forme d'onde de tension de la grille isolée est générée par le SM et son L'AVR contrôle la tension pendant les deux modes de fonctionnement.

II.5. Modélisation mathématique du moteur diesel

Le moteur Diesel comprend un moteur à combustion interne et un régulateur. Le fonctionnement du moteur IC a déjà été discuté dans la section 1.2. Le régulateur se compose principalement de deux parties, le régulateur de vitesse et l'actionneur [22]. Le régulateur maintient la vitesse constante tout au long de la grâce au fonctionnement du moteur diesel. Un régulateur PID est utilisé comme régulateur de vitesse [21]. Les fonctions de transfert du

contrôleur et de l'actionneur peuvent être données par l'équation (II.46) et l'équation (II.47) séparément.

$$H_r = \frac{K_r(1 + T_3s)}{(1 + T_1 + T_1T_2s^2)} \quad (\text{II.46})$$

$$H_a = \frac{1 + T_4s}{(1 + T_5s) + (1 + T_6s)} \quad (\text{II.47})$$

Où :

K_r est le gain du régulateur, T_1, T_2, T_3 sont les constantes de temps du régulateur T_4, T_5, T_6 sont les constantes de temps de l'actionneur Les équations différentielles décrivant le moteur diesel et la régulation de la vitesse sont représentées par les équations [23].

$$\frac{dP_c}{dt} = \frac{K_1}{\omega_{ref}} \Delta\omega \quad (\text{II.48})$$

$$\frac{dm_B}{dt} = \frac{1}{\tau_2} \left(K_2 - \frac{K_2}{\omega_{ref}} \Delta\omega m_B \right) \quad (\text{II.49})$$

P_c : est le taux de compression, M_o est le carburant du moteur diesel taux de consommation (kg/sec),

K_1 : est le facteur d'amplification de la boucle de sommation du régulateur

R : est l'affaïssement permanent de la vitesse du moteur diesel

ω_{ref} : est la vitesse de référence du moteur en rad/sec

Le moteur est représenté par un gain K_2 et un temps mort τ_2 .

Le temps mort peut être exprimé comme suit [24]:

$$\tau_2 = \frac{60S_t}{2N_n} + \frac{60}{4N} \quad (\text{II.50})$$

Où

$S_t = 4$ pour un moteur quatre temps, N est le régime en tr/min et n est le nombre de cylindres.

La puissance mécanique (P_m) produite à la suite de la combustion est [25]

$$P_m = C_1 m \beta \eta \quad (\text{II.51})$$

Où:

C_1 est la constante de proportionnalité et η est l'efficacité. Les figures 5 et 6 montrent respectivement le schéma fonctionnel complet et le modèle MATLAB / Simulink d'un moteur diesel. Le régulateur de vitesse est utilisé pour minimiser l'erreur entre la vitesse réelle et la vitesse de référence. Le signal de sortie du contrôleur, c'est-à-dire le signal de position, est transmis en entrée à l'actionneur. L'actionneur ajuste l'injection de carburant pour maintenir la vitesse à une valeur constante.

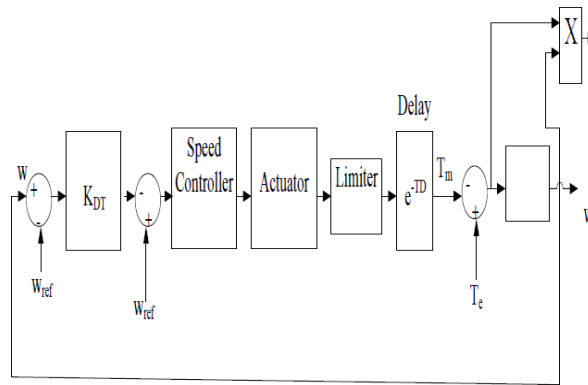


Figure II.5: Schéma fonctionnel du moteur diesel et du régulateur Modèle

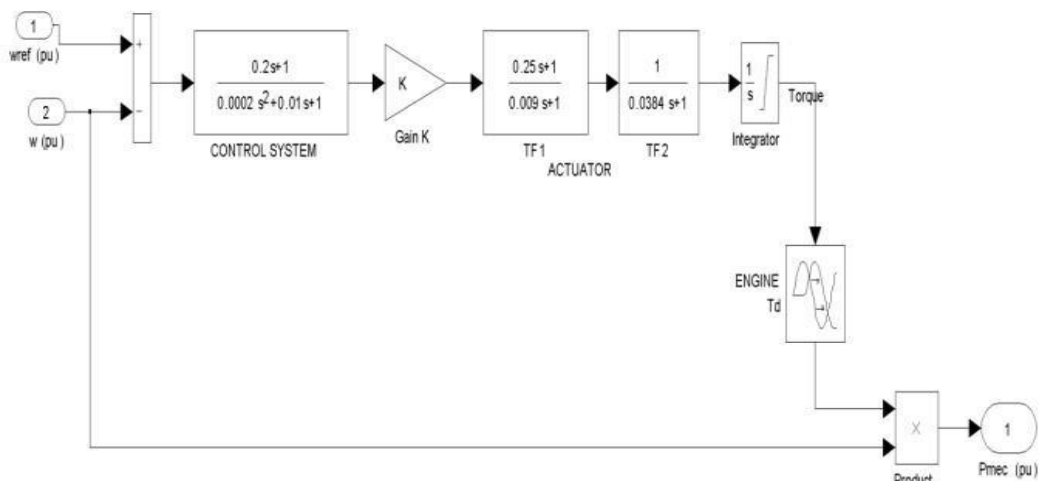


Figure II.6: Modèle MATLAB/Simulink de moteur diesel et modèle de gouverneur

II.6. Modèle simulink et résultats de simulation

II.6.1. Valeurs nominales du générateur diesel connecte

Paramètres du générateur diesel de puissance nominale 10kVA, p.f 0,8 (lag), tension 400 V.

Fiche technique de l'ensemble de MD	
Kva	10
Puissance nominale (kW)	8
courant (A)	14.49A
Fréquence (Hz) et vitesse (rpm)	50/1500

Tableau II.1: Fiche technique du générateur diesel

N°	Paramètres	Symbole	Valeurs
1	réactance synchrone sur l'axe d	X_d	3.23 pu
2	réactance transitoire sur l'axe d	X_d'	0.21 pu
3	réactance subtransitoire sur l'axe d	X_d''	0.15 pu
4	réactance synchrone sur l'axe q	X_q	2.79 pu
5	réactance subtransitoire sur l'axe q	X_q''	0.37 pu
6	Réactance de fuite	X_l	0.09 pu
7	Temps O.C. transitoire sur l'axe d const.	T_{do}'	1.7 s
8	Constante de temps de circuit ouvert subtransitoire sur l'axe d	T_{do}''	0.008 s
9	O.C. sous-transitoire de l'axe q. la constante de temps	T_{qo}''	0.004 s
10	Bras. résistance	R_s	0.017 pu

Tableau II.2: Paramètres du générateur synchrone triphasé

Paramètres du gouverneur			
N°	Paramètres	Symbole	Valeurs
1	Gain du régulateur	K_A	300
2	Constante de temps du régulateur	T_A	1 ms
3	Constante de temps du compensateur	T_B	0 ms
4	Constante de temps du compensateur	T_c	0 ms
5	Constante de temps de l'excitatrice	T_E	0.0 ms
6	Gain du circuit de stabilisation du régulateur	K_F	0.001
7	Constante de temps du circuit de stabilisation du régulateur	T_F	100 ms
8	Auto-excitation de l'excitatrice à pleine tension de champ de charge	K_E	100

Tableau II.3: Paramètres de l'excitateur de diesel

II.6.2. Model simulink complet de générateur diesel

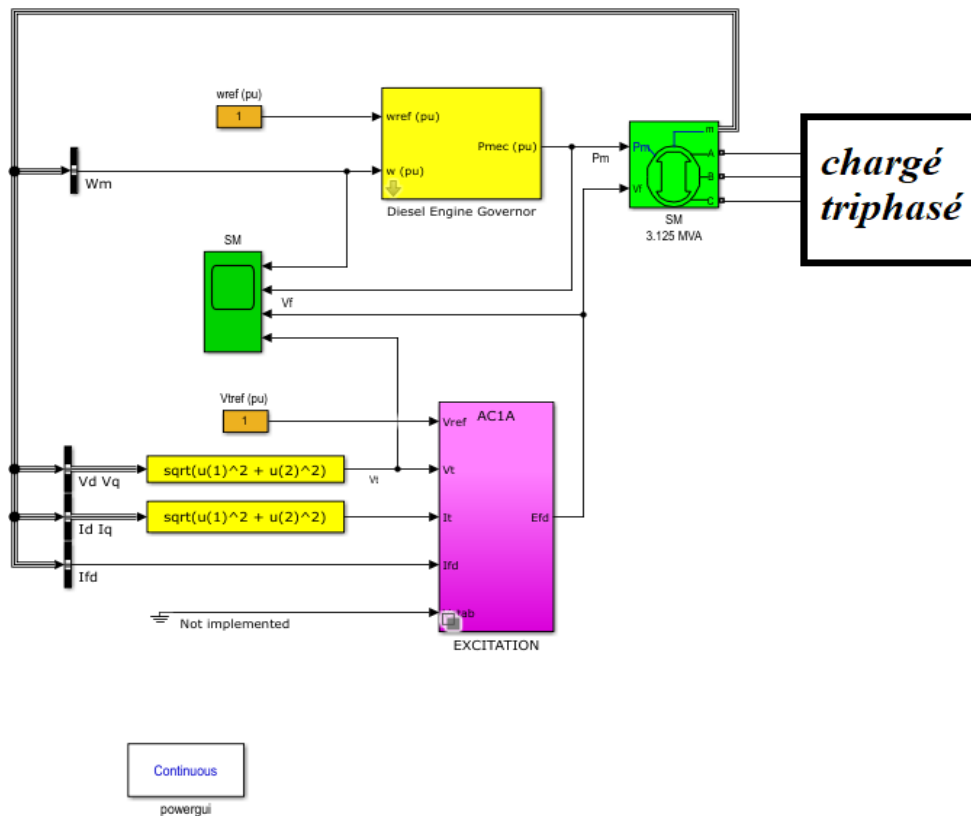


Figure II. 7: Modèle Simulink complet de générateur diesel

II.7. Conclusion

Nous avons étudié dans ce chapitre le modèle du sous-système générateur diesel, Utilisez-nous fonctions de transfert pour analyser les boucles de régulation en utilisant les méthodes traditionnelles.

La simulation en utilisant le logiciel Matlab/Simulink® m'a donné de bons résultats .

CHAPITRE III

**Étude de stabilité du groupe
électrogène**

III.1. Introduction

Et d'après ce qui précède, nous pouvons définir un générateur diesel comme un ensemble composé d'un moteur diesel et d'un alternateur synchrone. Les composants principaux d'un groupe électrogène diesel incluent un régulateur de vitesse, un moteur diesel, un système d'excitation et un alternateur synchrone [26]. Le moteur diesel entraîne l'alternateur synchrone et sa vitesse est régulée par un mécanisme de régulation. Un groupe électrogène diesel se compose de deux éléments principaux : le système de régulation et l'actionneur. Les groupes électrogènes diesel sont communément utilisés dans les régions dotées d'un réseau électrique fiable. En effet, leur approvisionnement est souvent impossible ou indisponible dans les zones reculées et rurales [27]. Cependant, l'utilisation des groupes électrogènes diesel peut être limitée en raison de leur impact environnemental néfaste et de leur coût élevé. Ils ont néanmoins été employés comme sources d'énergie de secours dans les micro-réseaux [28], lesquels comprennent des charges résistives, inductives et capacitatives.

III.2. Type de charge

- Charge résistive
- Charge capacitive
- Charge inductif

III.2.1. Charge résistive

Une charge résistive est un composant électrique ou électronique dans un circuit qui possède une résistance spécifique. Contrairement à d'autres types de charges, telles que les charges capacitatives ou inductives, les charges résistives convertissent principalement l'énergie électrique en chaleur plutôt qu'en d'autres types d'énergie. Des exemples courants de charges résistives incluent les résistances, les éléments chauffants et les ampoules. Ces charges sont couramment utilisées dans une variété de circuits électroniques, d'équipements de chauffage et d'applications d'éclairage. [27]

Charge purement résistive, la sinusoïde de courant $i(t)$ est « en phase » avec celle de tension $v(t)$; Ce qui fait que le facteur de puissance est égal à un ($\cos \phi=1$), et la puissance active est égale à la puissance réactive $S=P$ Comme le montre la figure III.1.

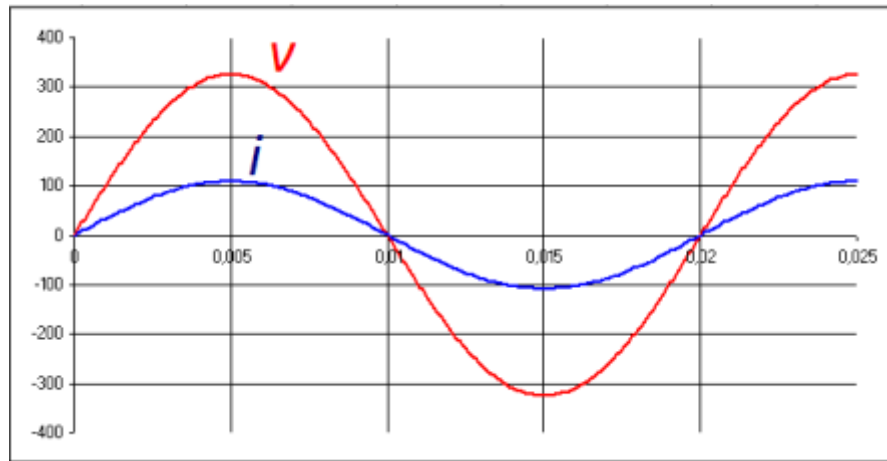


Figure III.1 : Charge résistive (i en phase avec v). [28]

III.2.2. Charge capacitive

Une charge capacitive est un élément dans un circuit électrique qui présente une capacité électrique spécifique. Contrairement aux charges résistives, les charges capacitives stockent l'énergie électrique sous forme de champ électrique entre deux surfaces conductrices séparées par un matériau isolant, appelé diélectrique. Les condensateurs sont les composants les plus courants utilisés pour créer des charges capacitives. Lorsqu'un condensateur est connecté à une source de tension, il se charge en accumulant des charges électriques sur ses plaques conductrices. Ces charges électriques restent stockées jusqu'à ce que le condensateur soit déchargé. [26]

Les charges capacitives sont largement utilisées dans les circuits électroniques pour diverses applications telles que le filtrage de signaux, le stockage d'énergie, la temporisation, et bien plus encore. Elles jouent également un rôle important dans les circuits de démarrage des moteurs électriques et dans les systèmes d'alimentation à découpage. Ce qui fait que le facteur de puissance est égal à un ($\cos \phi \neq 1$), et la puissance active N n'est pas égale à la puissance réactive $S \neq P$. Comme le montre la figure III. 2

La sinusoïde de courant est déphasée d'un quart de période (angle de déphasage à 90°) en avance par rapport à la tension. [26]

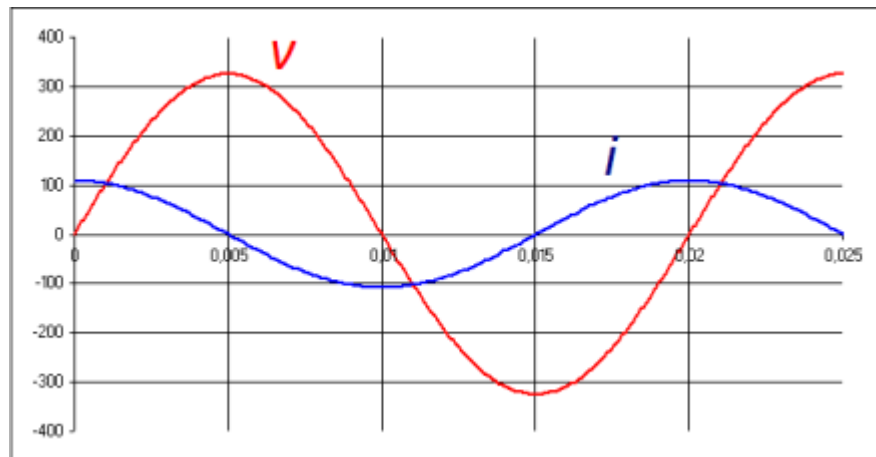


Figure III.2 : Charge capacitive (i en avance d' $1/4$ de période sur v) [28]

III.2.3. Charge inductif

Une charge inductive est un composant électrique qui présente une inductance, c'est-à-dire une capacité à stocker de l'énergie magnétique dans un champ magnétique créé par le courant électrique qui le traverse. Contrairement aux charges résistives, les charges inductives stockent principalement l'énergie électrique sous forme de champ magnétique plutôt que de la convertir en chaleur.

L'inducteur le plus commun est la bobine, qui est constituée d'un enroulement de fil conducteur. Lorsqu'un courant électrique traverse la bobine, un champ magnétique est généré autour de celle-ci. Lorsque le courant varie, le champ magnétique varie également, induisant une tension dans la bobine selon la loi de Faraday.

Les charges inductives sont utilisées dans divers circuits électroniques pour des applications telles que la conversion d'énergie, le filtrage de signaux, la réduction du bruit électromagnétique, etc. Les moteurs électriques, les transformateurs, les relais et les bobines d'allumage sont quelques exemples courants de charges inductives. [25]

La sinusoïde de courant est déphasée d'un quart de période (angle de déphasage à 90°) en retard par rapport à la tension. Ce qui fait que le facteur de puissance est égal à un ($\cos \phi \neq 1$), et la puissance active n'est pas égale la puissance réactive $S \neq P$. Comme le montre la figure III.3.

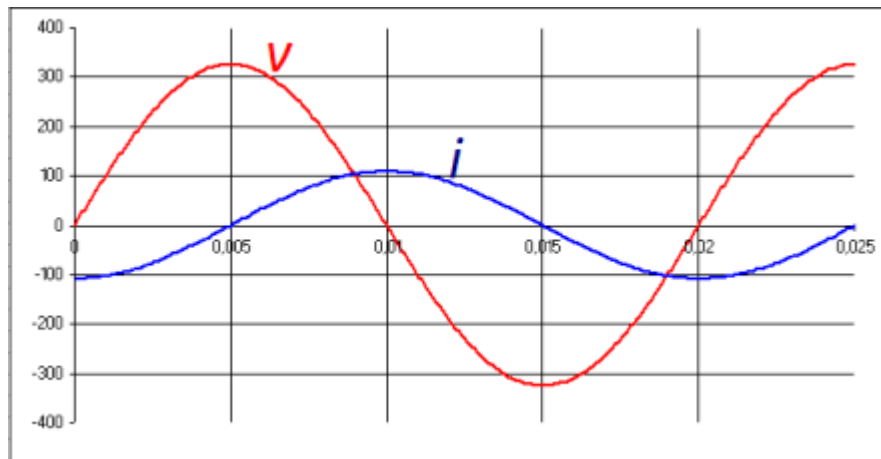


Figure III.3 : Charge purement inductive (i en retard d' $1/4$ de période sur v) [28]

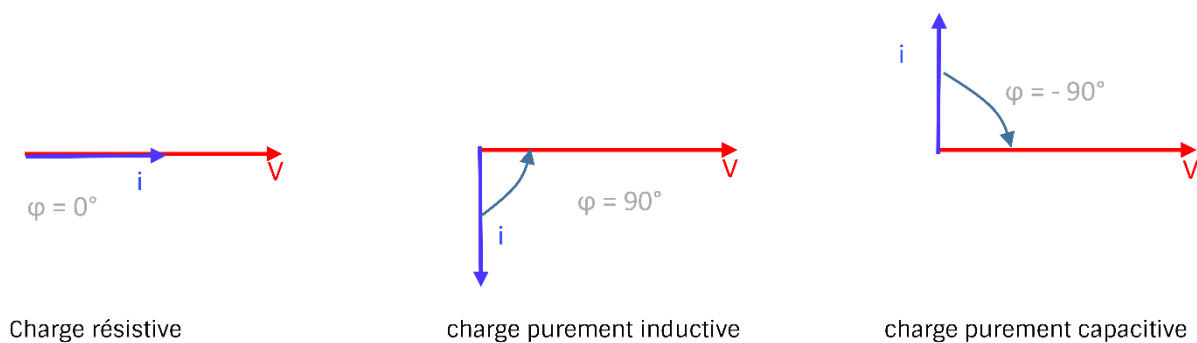


Figure III.4 : Diagrammes de Fresnel correspondant aux oscillogrammes [28]

III.3. Modélisation et Simulation du Système

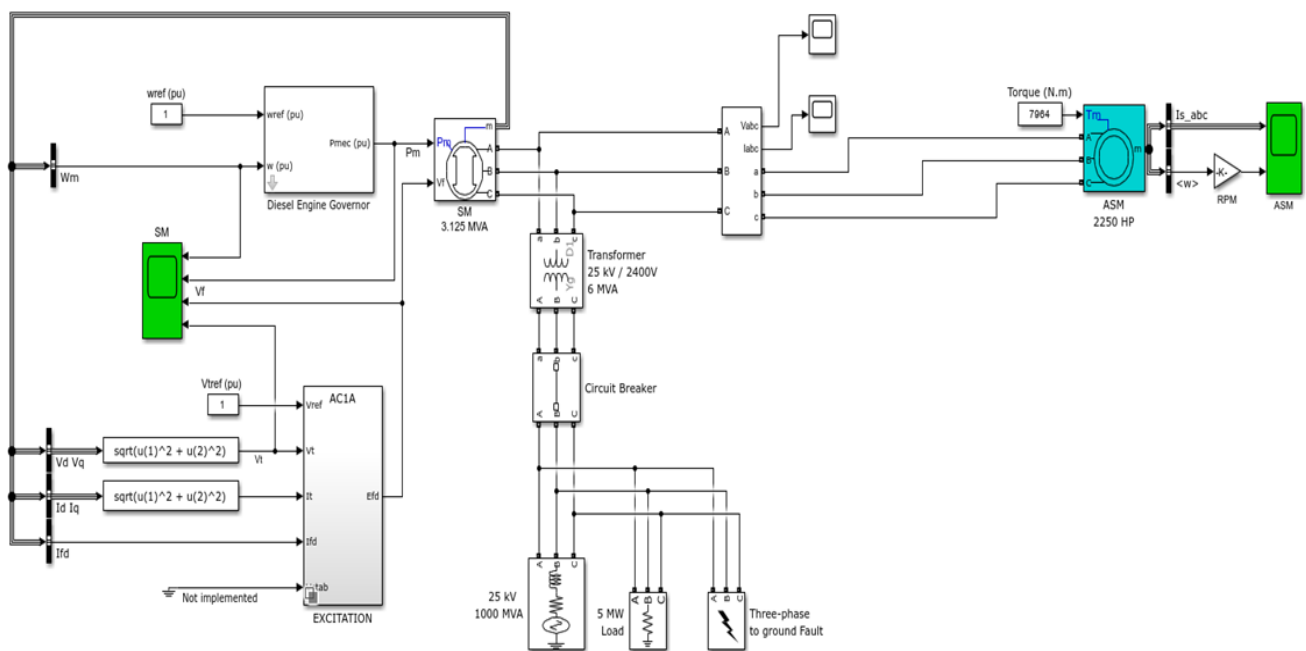


Figure III.5 : Modélisation et Simulation du Système

III.3.1. Résultats de la simulation

Dans ce chapitre nous allons étudier et tester le générateur diesel sous différentes charges et en cas de fuite.

III.3.1.1. Moteur asynchrone

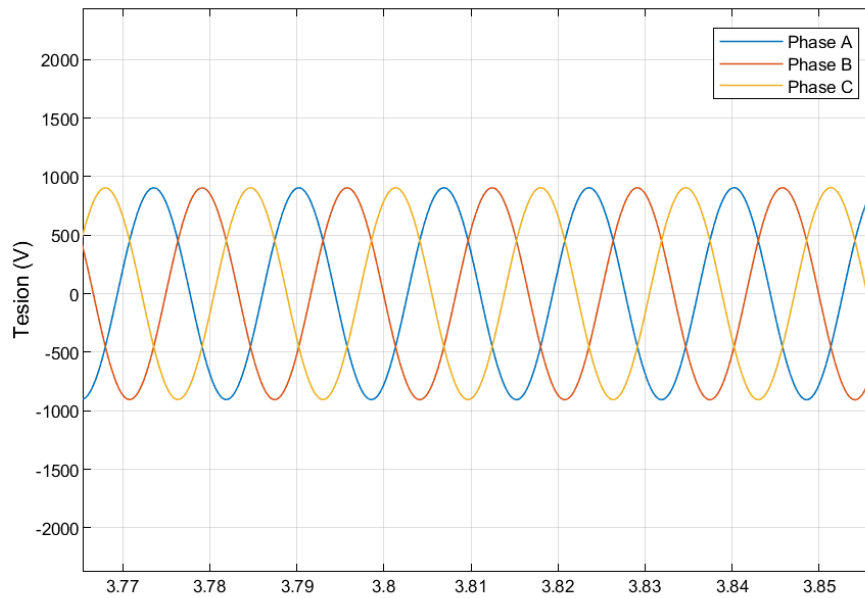


Figure III.6 : Courbe de tension à une Moteur asynchrone

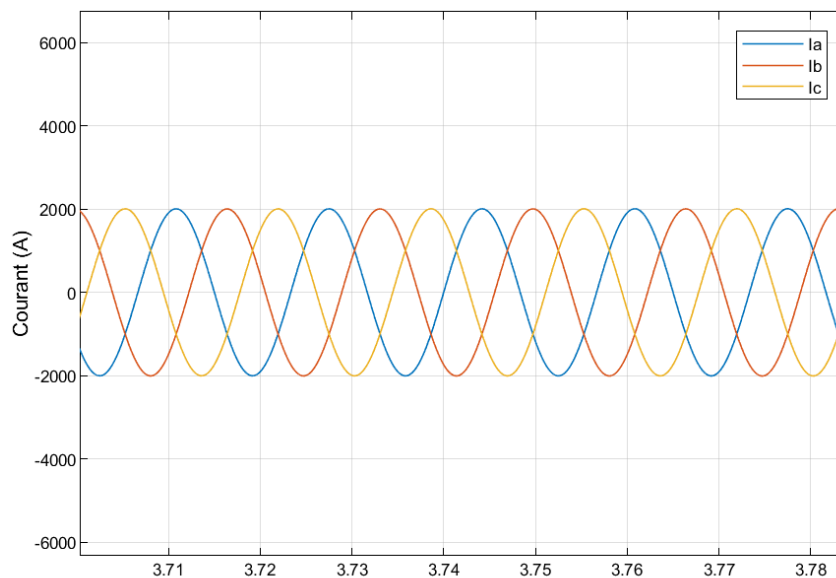


Figure III.7 : Courbe de courant à une Moteur asynchrone

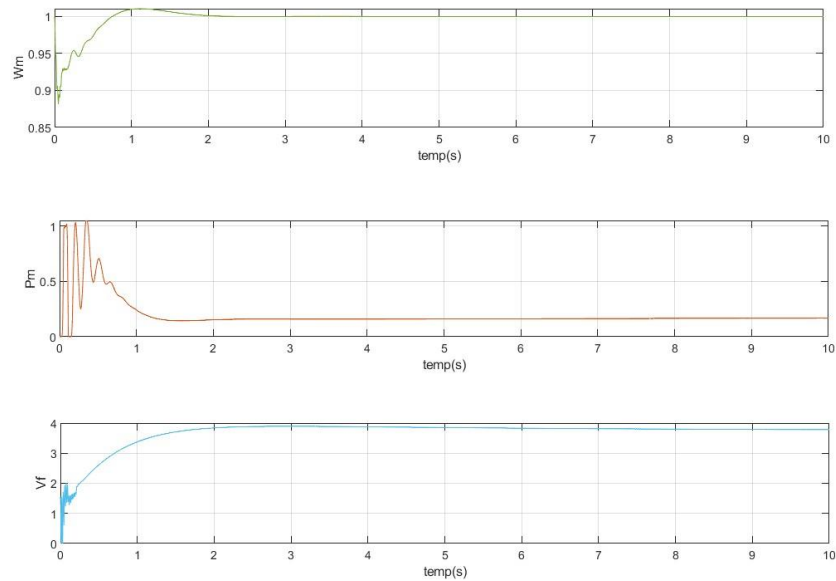


Figure III.8 : Courbe de la vitesse et Puissance mécanique et tension d'excitation à une Moteur asynchrone

Interprétation

Les courbes indiquent une correspondance entre la tension et le courant. De plus, on observe une stabilité dans la valeur de la vitesse du générateur, de la puissance mécanique et de la tension d'excitation, attribuable à l'absence de problèmes de charges.

III.3.1.2. Charge(R) équilibre

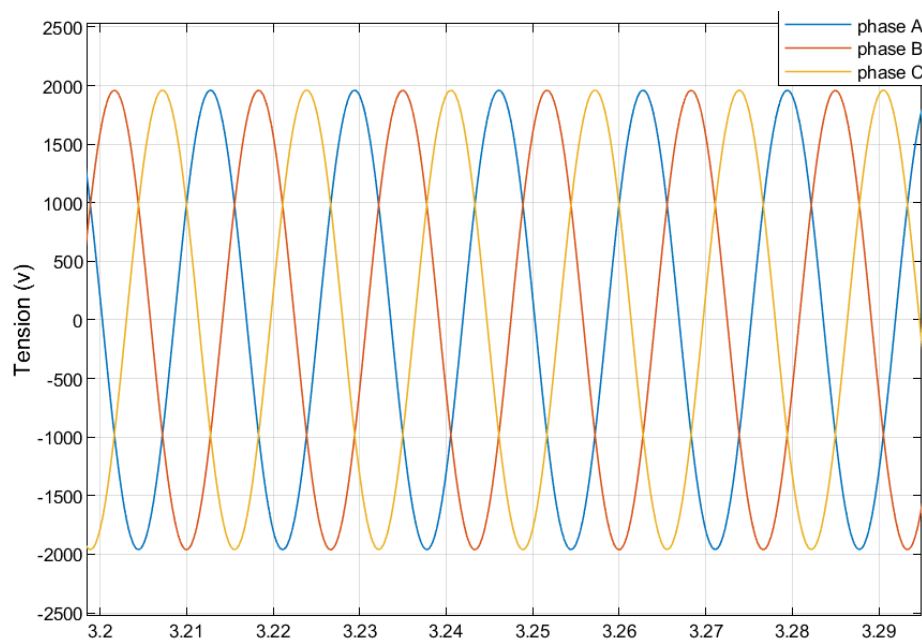


Figure III.9 : Courbe de tension à une charge résistive équilibrée

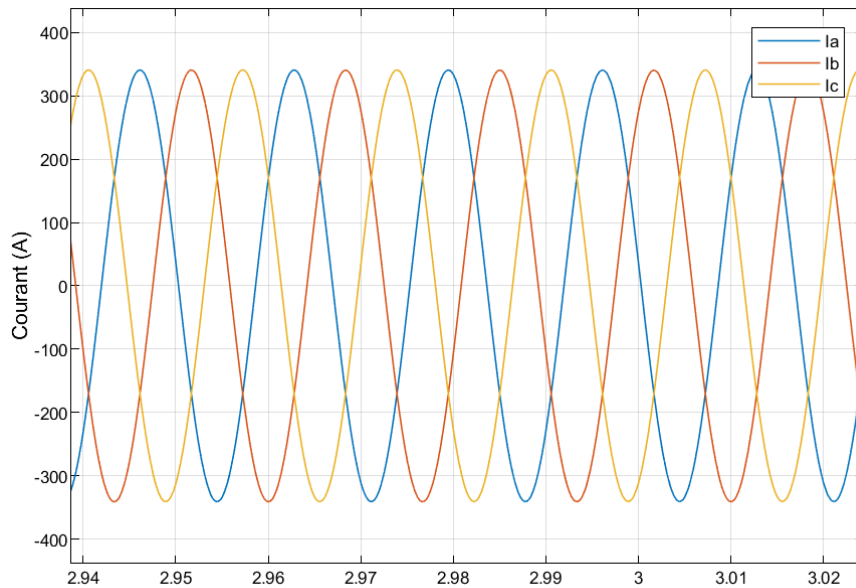


Figure III.10 : Courbe de courant à une charge résistive équilibrée

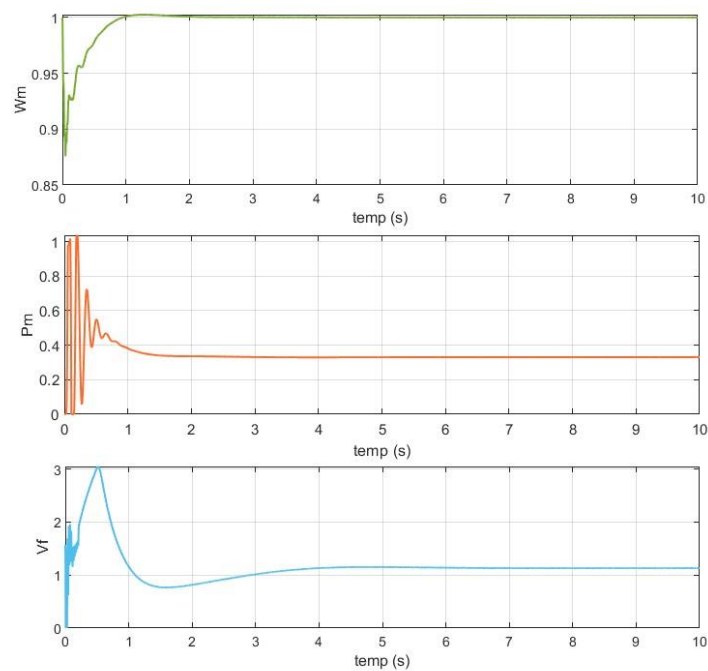


Figure III.11 : Courbe de la vitesse et Puissance mécanique et tension d'excitation à une charge résistive équilibrée

Interprétation

D'après les graphiques, la tension et le courant électriques sont équilibrés, grâce au type de charge utilisé, qui est une charge résistive ne consommant pas d'énergie réactive. On observe également une stabilité de la valeur de la vitesse du générateur et de sa puissance mécanique, ce qui est également dû au type de charge résistive.

III.3.1.3. Charge (LC) déséquilibré

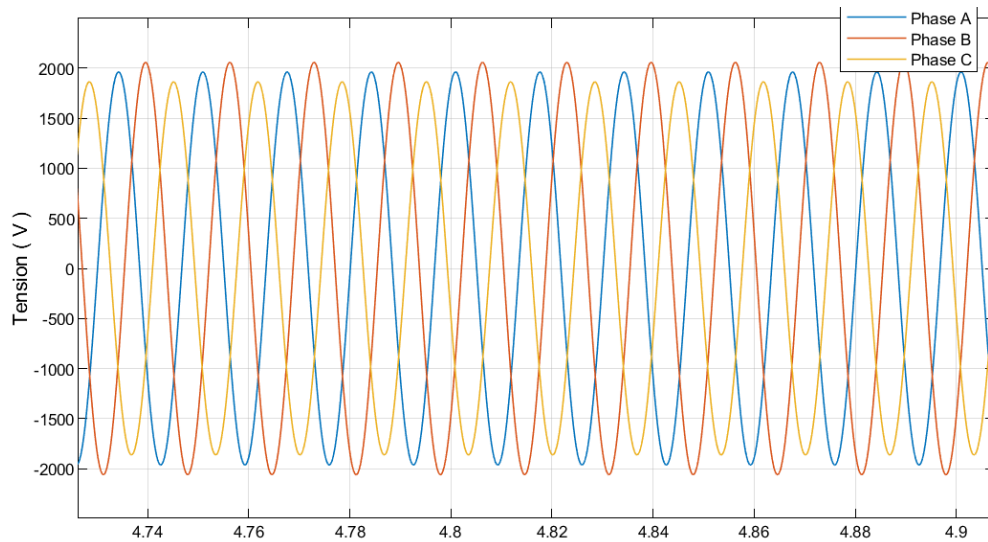


Figure III.12 : Courbe de tension à une charge capacitive et inductif déséquilibré

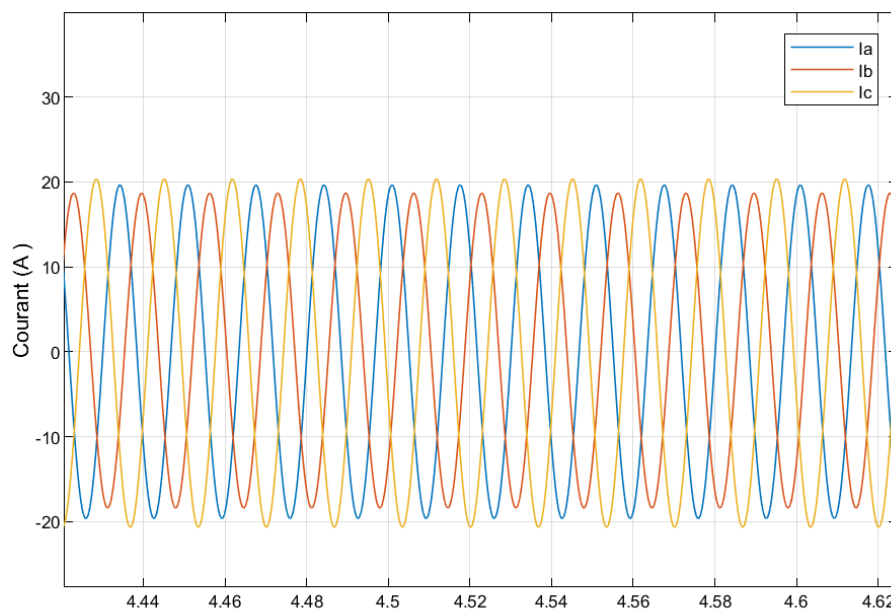


Figure III.13 : Courbe de courant à une charge capacitive et inductif déséquilibré

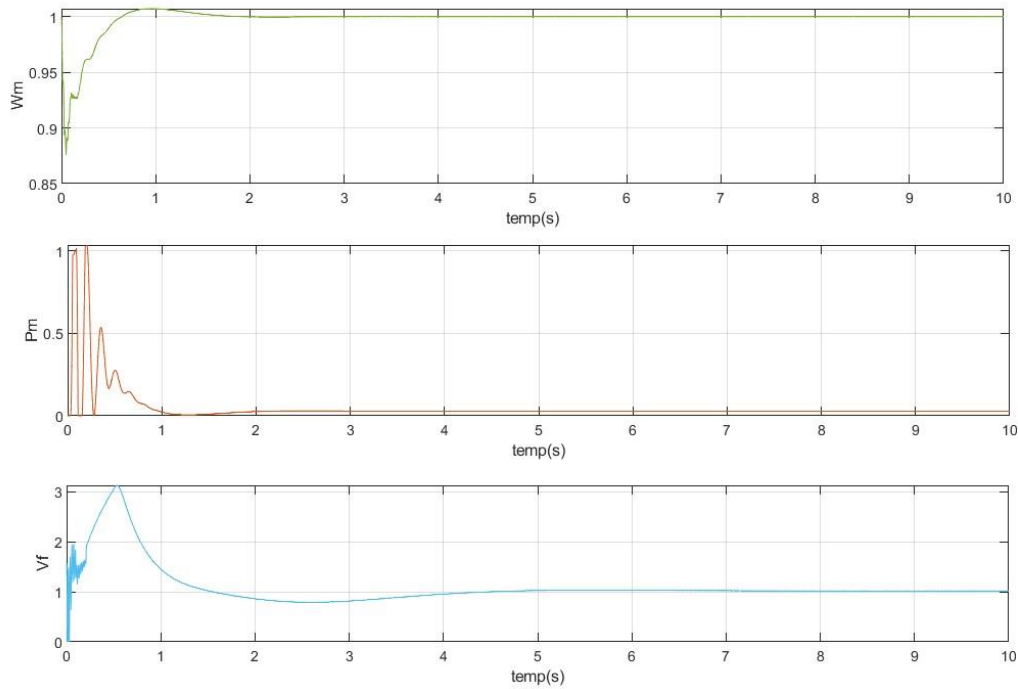


Figure III.14 : Courbe de la vitesse et puissance mécanique et tension d'excitation à une charge résistive déséquilibré

Interprétation

D'après les graphiques, la tension et le courant électriques sont équilibrés, grâce au type de charge utilisé, qui est une charge résistive ne consommant pas d'énergie réactive. On observe également une stabilité de la valeur de la vitesse du générateur et de sa puissance mécanique, ce qui est également dû au type de charge résistive.

III.3.1.4. Défaut

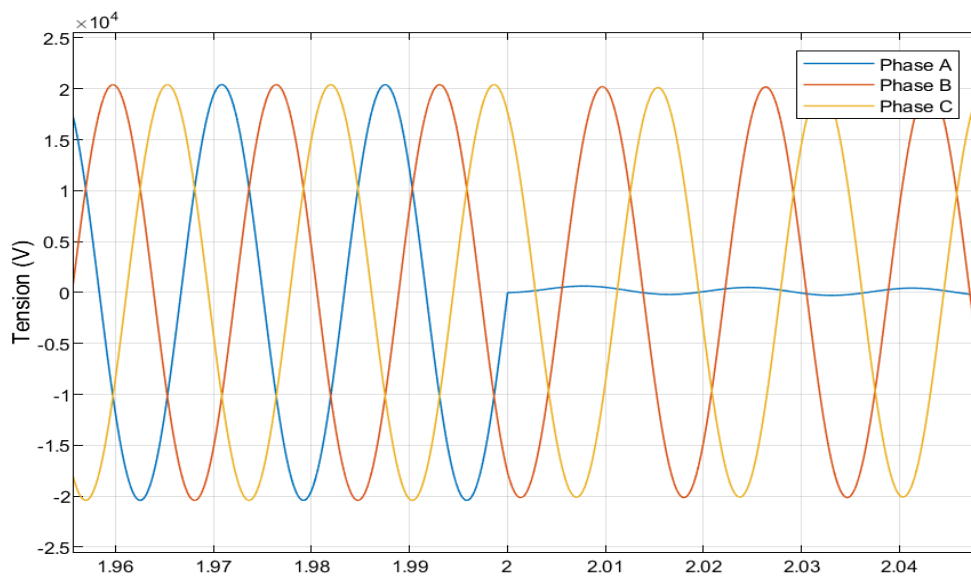


Figure III.15 : Courbe de tension à une Défaut

Interprétation

On observe une stabilisation des tensions sur les trois phases de 0 à 2 secondes, indiquant l'absence de tout défaut. De 2 à 5 secondes, on constate une chute de tension sur l'une des phases due à un contact entre cette phase et le fil de terre. Ce contact a provoqué un court-circuit, ce qui a entraîné une baisse de la tension à une valeur très basse.

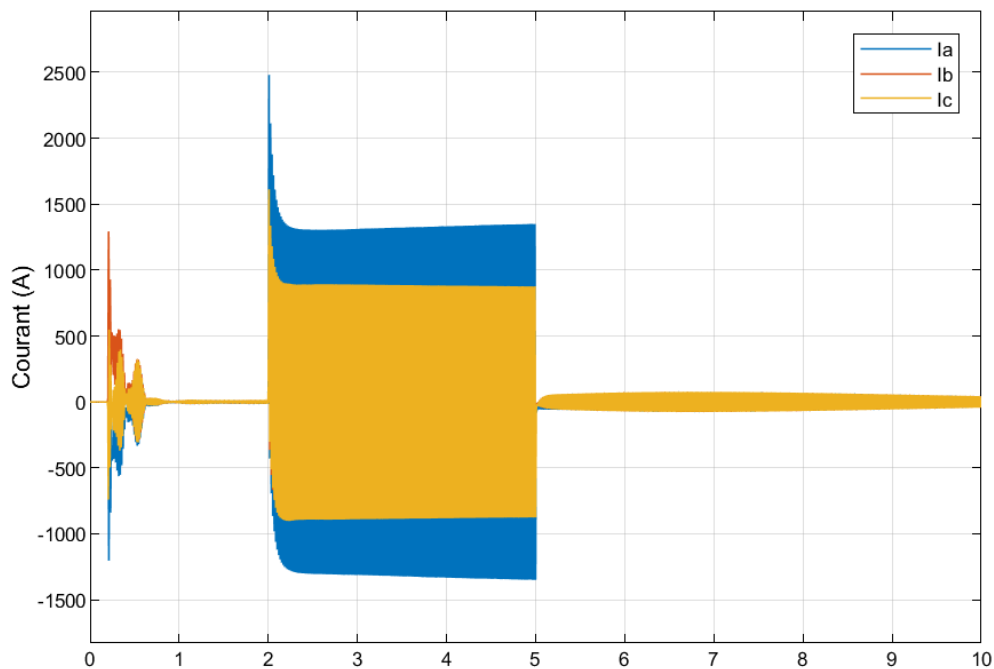


Figure III.16 : Courbe de courant à une Défaut

Interprétation

On observe une stabilité du courant électrique de 0 à 2 secondes, sans aucune différence de valeur entre les trois phases. On constate également une augmentation notable de la valeur du courant dans l'une des phases de 2 à 5 secondes. Cela est dû à un contact entre cette phase et le fil de terre, provoquant un court-circuit et faisant grimper l'intensité du courant à sa valeur maximale.

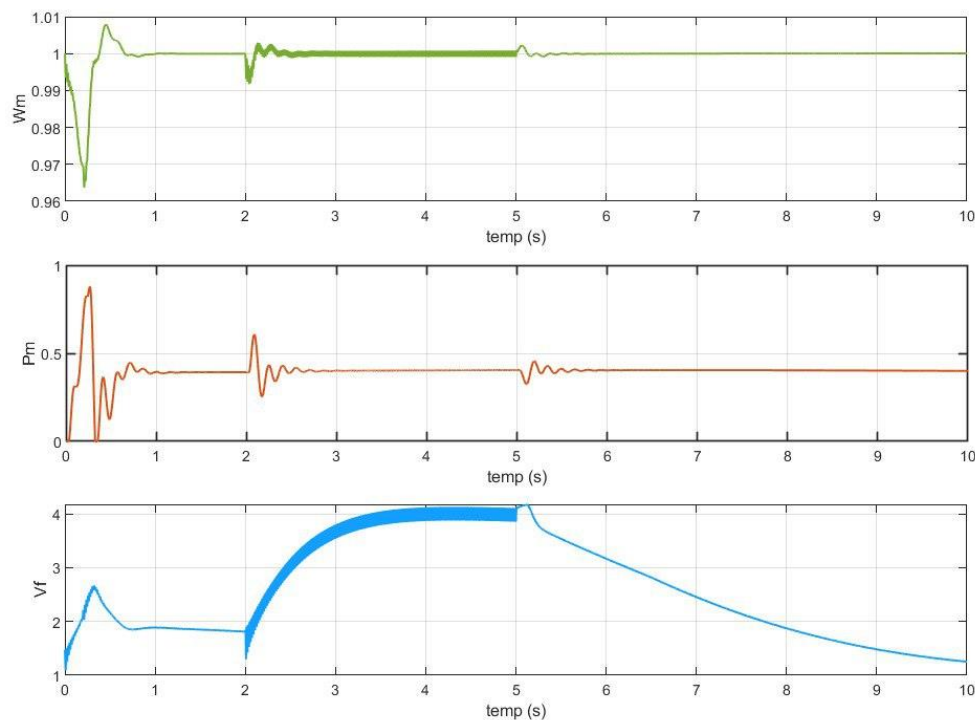


Figure III.17 : Courbe de la vitesse et Puissance mécanique et tension d'excitation à une Défaut

Interprétation

On observe des oscillations de la vitesse, de la puissance mécanique et de la tension d'excitation de 2 à 5 secondes. Cela est dû à un court-circuit survenu pendant cette période, ce qui a eu un impact significatif sur ces valeurs. Après 5 secondes, la stabilité commence à revenir à ces valeurs, et elles retrouvent leur état normal après l'ouverture du disjoncteur.

III.4. Conclusion

Après avoir étudié et testé le générateur diesel avec différentes charges et conditions, il devient clair qu'il est préférable de ne pas faire fonctionner de charges capacitives et inductives lorsque la source d'alimentation est un générateur diesel, en raison de leur impact négatif sur la tension et le courant consommés. D'un autre côté, les charges résistives peuvent bien fonctionner grâce à leurs caractéristiques qui n'affectent pas la tension ni le courant. Il doit y avoir un système de protection qui protège contre la chute d'une des phases et contre un court-circuit entre les phases ou entre les phases et terre. Cela nous motive à l'avenir à développer un système de protection intégré et à développer des moyens de diagnostic de divers défauts.

Conclusion générale

CONCLUSION GÉNÉRALE

On trouve fréquemment des groupes électrogènes composés d'un moteur et d'un alternateur dans les sites industriels et les bâtiments commerciaux, soit comme principal fournisseur d'énergie électrique, soit pour alimenter les charges essentielles en cas de défaillance du réseau de distribution publique. Le groupe électrogène, dans ses applications secours ou production, présente des avantages liés à[17] :

- Un large éventail de puissance
- La rapidité de sa mise en œuvre
- Sa capacité à fonctionner pendant de longues périodes

Ces bénéfices lui donnent une place prépondérante devant toutes les autres sources de substitution. On peut donc dire que le groupe électrogène reste un produit d'avenir, d'autant plus que les performances du moteur diesel s'améliorent en permanence en termes de rendement, de fiabilité et de pollution.

Grâce à notre étude, nous avons pu appréhender le fonctionnement d'un groupe électrogène. Grâce à cette étude menée à l'aide de Matlab, nous avons également pu approfondir nos compétences en simulation.

Une fois que le générateur diesel a été étudié et testé avec diverses charges et conditions, il est évident qu'il est préférable de ne pas utiliser de charges capacitives et inductives lorsque la source d'alimentation est un générateur diesel, car elles ont un effet négatif sur la tension et le courant consommés. En revanche, les charges résistives peuvent être utilisées de manière efficace en raison de leurs caractéristiques qui ne modifient ni la tension ni le courant.

Les perspectives ouvertes par ce travail sont :

- L'étude du groupe en charge variable
- L'étude avec une charge non linéaire pour voir le comportement du système

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- [1] R. Ahmadi, D. Paschedag, and M. Ferdowsi, "Closed-loop input and output impedances of DC-DC switching converters operating in voltage and current mode control," in Proc. Industrial Electron. Conf., pp. 2311– 2316, 2010.
- [2] B. Colin, "Groupes électrogènes de secours", Techniques de l'ingénieur, 2008.
- [3] M. Desbazeille, "Diagnostic de groupes électrogènes diesel par analyse de vitesse de vilebrequin", Thèse de Doctorat à l'université de Jean Monnet, 2011.
- [4] B. Tounsi, "Etude comparative des groupes électrogènes embarqués à large gamme de vitesse variable associant machines à aimants permanent et convertisseur statique", Thèse de Doctorat à l'institut polytechnique de Toulouse, 2007.
- [5] G. Konar, A.K. Singh, N. Chakraborty, "Modeling and Simulation of Stand Alone Micro Hydro – Diesel Hybrid Power Plant for Indian Hilly Region", IET, Chennai Fourth International Conference on Sustainable Energy and Intelligent Systems (SEISCON 2013) 12-14 Dec 2013
- [6] P. Barret, "Régimes transitoires des machines électriques tournantes", Edition EYROLLES, 1987.
- [7] T. Hazel, " Génération électrique intégrée aux sites industriels et bâtiments commerciaux" Cahier technique Schneider N° 196.
- [8] J. Delmas, "Catalogue groupe électrogène CAT"
- [9] "Compact, Interpact et Masterpact Inverseur de source", catalogue Schneider Electric 2007.
- [10] Chafa Aiane, A. Z. « Etude d'un groupe électrogène par simulation numérique », mémoire de master. UMMTO 2016.
- [11] Merzoug . M.S "Machine synchrone à aimant permanent (MSAP) techniques de commande et applications" Thèse Doctorat en science en électrotechnique. Université de Mentouri. Costantine.
- [12] Karoui, A., Brahim. A "Détection De Défaut Statorique Par Suivi Paramétrique D'un Moteur Synchrone A Aimants Permanents" Mémoire académique en électrotechnique (machine électrique et électronique de puissance). Université Kasdi merbah. Ouargla, 2014.
- [13] M. Banzi, « Demarrer avec Arduino principe de base et premier montage », édition DUNOD, Paris 2011.

- [14] C.Taverier. « Arduino : Maitraiser sa programmation et ses cartes d'interface (shield)», édition DUNOD, Paris 2011.
- [15] Z. Tir, “Etude d’une machine asynchrone double étoile (modélisation, alimentation et Commande) “, Mémoire de master en université d’El-Oued, 2014.
- [16] A. Benbrahim, —Commande prédictive généralisée d,une machine synchrone à aimants permanents, Mémoire de Magister, Université de Batna, 18 Juin 2009.
- [17] T. Theubou, R. Wamkeue, I. Kamwa, “Dynamic Model of Diesel Generator Set for Hybrid Wind-Diesel Small Grids Applications”, 25th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), 978-1-4673-1433-, 2012.
- [18] Merabti Djahida « Conception et réalisation d’une commande automatique d’une station de pompage à base d’une carte Arduino Mega2560 », mémoire de master. UMMTO. 2017.
- [19] D.Blin « Automatique et informatique industrielle », édition Casteilla, Paris 1995
- [20] Bobroff, F. B « Microcontrôleur Arduino ». Paris 2015
- [21] E. Bartmane. « Le grand livre de l'Arduino, 2^{ém} Edition », édition DUNOD, Paris 2011.
- [22] Saeed Mohajeryami, Zia Salami, Iman Naziri Moghaddam, “Study of Effectiveness of Under-excitation Limiter in Dynamic Modeling of Diesel Generators”, Power and Energy Conference at Illinois (PECI). 978-1-4799-4881-9, April 2014, DOI: 10.1109/PECI.2014.6804572G
- [23] N. Toumi, "Etude d’une pompe à eau solaire pour alimenter un chantier pétrolière" Mémoire de Magister université Ouargla, 2013
- [24] J.L Dalmasso "Cours d’électrotechnique" ’ machines à courant alternatifs‘ Edition Belin 1985
- [25] "Dossier groupe électrogène "Contexte et problématique". F2A Equipementier en traitement de l’air
- [26] www.Schneider-electric.com "Régimes du neutre".
- [27] FG. Wilson "Manuel d’utilisation et d’entretien des groupes électrogènes".
- [28] Système de refroidissement "[http://www.profauto.fr/2-apports _théoriques /Refroidissement.pdf](http://www.profauto.fr/2-apports_théoriques/Refroidissement.pdf)“, consulté le 10/07/2016