

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

## Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER PROFESSIONNEL

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : **Electrotechnique industrielle**

*Présenté par*  
**Chafa Aliane**  
**Aziz Zeroul**

Thème

## **Etude d'un groupe électrogène par simulation numérique**

*Mémoire soutenu publiquement le 16 /07/2016 devant le jury composé de :*

**M Mohammed Megherbi**  
Professeur, UMMTO, Président

**Melle Rahma Kachenoura**  
MCB, UMMTO, Encadreur

**Mr Salah. Haddad**  
Professeur, UMMTO, Examineur

**Mr Meziane Aoues**  
MAA, UMMTO, Examineur

## ***REMERCIEMENTS***

Nous tenons à remercier notre encadreur mademoiselle Rahma Kachenoura qui a bien voulu nous diriger durant notre travail.

Nous tenons à remercier vivement madame Ferroudja Bitam-Megherbi ainsi que monsieur Ahmed Challal, pour leurs précieux conseils et pour leur soutien tout au long de notre travail.

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

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

# ***DEDICACES***

Je dédie ce travail à :

- ✓ Mes parents.
- ✓ Mes frères et ma sœur.
- ✓ Mes oncles et tantes
- ✓ Mes cousins et cousines
- ✓ Mes amis.

**Aziz ZERIOUL**

Je dédie ce travail à :

- ✓ Mes parents.
- ✓ Mes frères et sœurs.
- ✓ Mes oncles et tantes
- ✓ Mes cousins et cousines
- ✓ Mes amis.

**Chafa ALIANE**

## Sommaire:

|  |    |
|--|----|
| Introduction Générale .....  | 1  |
| <b>Chapitre I : Généralités sur le Groupe électrogène</b>                      |    |
| I.1. Introduction .....  | 3  |
| I.2 Définitions .....  | 3  |
| I.3 Constitution d'un groupe électrogène.....                                  | 6  |
| I.4 Description des différents éléments du groupe électrogène.....             | 7  |
| I.4.1. Moteur thermique .....  | 7  |
| I.4.1.1. Principe de fonctionnement du moteur thermique .....                  | 7  |
| I.4.1.2 Système de refroidissement .....                                       | 9  |
| I.4.1.3 Circuit de lubrification.....  | 12 |
| I.4.1.4 Circuit d'alimentation en combustible.....                             | 12 |
| I.4.1.5 Circuit de démarrage.....  | 12 |
| I.4.2 Alternateur.....   | 14 |
| I.4.2.1 Description des Constitution d'un alternateur .....                    | 15 |
| I.4.2.1.1 Le stator.....   | 15 |
| I.4.2.1.2 Le rotor.....  | 15 |
| I.4.2.1.3 principes de fonctionnement de l'alternateur triphasé.....           | 17 |
| I.4.2.1.4 Régulation de la tension de l'alternateur.....                       | 18 |
| I.4.2.1.5 Principe de fonctionnement de l'AVR.....                             | 18 |
| I.4.3 Accessoires du groupe électrogène.....                                   | 19 |
| I.4.3.1 Système de contrôle / commande et détection des pannes.....            | 19 |
| I.4.3.1.1 Description du Système de Contrôle / Commande et Identification..... | 19 |
| I.4.3.1.2 Coffret de commande.....   | 21 |
| I.4.3.1.3 Coffret de contrôle.....   | 21 |
| I.4.3.2 Tableau inverseur de source automatique.....                           | 21 |
| I.4.3.3 Le synchroscope.....   | 22 |
| I.4.3.4 La batterie.....   | 22 |
| I.4.3.5 Chargeur de batterie.....  | 22 |

## **Chapitre II : Fonctionnement du Groupe électrogène**

|   |    |
|---|----|
| II.1 Introduction.....  | 23 |
| II.2 Mode d'utilisation du groupe électrogène .....   | 23 |
| II.3 Couplage des groupes électrogènes avec le réseau ou avec d'autres groupes<br>électrogènes..... | 26 |
| II.3.1 Différentes méthodes de couplage.....  | 27 |
| II.4 Conséquences d'un mauvais couplage.....  | 29 |
| II.4.1 Le non-respect de l'égalité des fréquences.....  | 29 |
| II.4.2 Le non-respect de l'égalité des tensions.....  | 29 |
| II.4.3 Le non-respect de la concordance des phases.....   | 30 |
| II.5 Le délestage.....  | 30 |
| II.5.1 Augmentation progressive de la charge.....   | 30 |
| II.5.2 Pertes d'un groupe électrogène.....  | 31 |
| II.5.3 Default électriques.....   | 31 |
| II.6 Protections du groupe électrogène.....   | 31 |
| II.6.1 Protection des alternateurs.....   | 31 |
| II.6.2 Protection du moteur.....  | 32 |
| II.7 Régime du neutre.....  | 32 |
| II.7.1 Régime du neutre en basse tension.....   | 32 |

## **Chapitre III : Modélisation et simulation du groupe électrogène**

|  |    |
|--|----|
| III.1. Introduction.....   | 35 |
| III.2. Présentation de la machine synchrone (alternateur) à étudier.....                                     | 36 |
| III.3-Hypothèses simplificatrices.....   | 36 |
| III.4-Conventions de signes.....   | 37 |
| III.5- Equations électriques et mécaniques de la machine synchrone munis<br>d'enroulements amortisseurs..... | 37 |
| III.5.1-Equations électriques de l'induit (stator).....  | 37 |
| III.5.2 Transformation de Park.....  | 37 |

|  |    |
|--|----|
| III.5.3 Equation électrique du rotor et des amortisseurs.....                                | 39 |
| III.5.4- Equations des puissances, des couples et équations mécaniques de<br>la machine..... | 40 |
| III.5.4.1-Calcul des puissances.....   | 40 |
| III.5.4.2-Calcul des couples .....   | 40 |
| III.5.4.3-Equations mécaniques de l'alternateur.....   | 41 |
| III.5.5 Equations magnétiques de la machine.....   | 41 |
| III.6 Equations électriques et mécaniques de la machine sans amortisseurs.....               | 42 |
| III.7 Equations générales du groupe électrogène en charge.....                               | 43 |
| III.8 Détermination du régime permanent du groupe.....                                       | 44 |
| III.9 Modèle sous Sim Power System.....  | 45 |
| III.10 Simulation du modèle en boucle ouverte.....   | 50 |
| III.11 Interprétation de courbes obtenues.....   | 53 |
| Conclusion générale.....   | 54 |
| Références bibliographique   |    |
| Annexe   |    |

## **Résumé:**

Toutes interruption de l'énergie électrique dans l'industrie engendre des perturbations et des désordres pour l'utilisateur.. L'installation des alimentations de secours est indispensable. Parmi ces sources de secours le groupe électrogène

Le groupe électrogène est un organe autonome capable de produire de l'énergie électrique. Il est généralement constitué d'un moteur thermique et d'un alternateur.

Le couplage des groupes électrogènes est une opération très délicate.

Pour coupler un groupe électrogène avec d'autres groupes ou avec le réseau il faut y avoir entre eux :

- Égalité des tensions, Égalité des fréquences, Concordance des phases

Dans la plus part des cas pour réaliser le couplage il faut disposer d'un synchroscope, d'un régulateur de tension et d'un coupleur.

Le groupe électrogène dans ses applications « secours », présente des avantages liés à :

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

Ces avantages lui confèrent une position prépondérante loin devant toutes les autres sources de remplacement.

L'étude en boucle ouverte du groupe électrogène sous Matlab Sim Power system, nous a montré que la tension et la fréquence ne se stabilisent pas à des valeurs bien précises. Pour Palier à ce problème le calcul de la boucle de régulation est la solution La plus envisageable.

Nous espérons que ce travail va être développé en faisant sur l'étude du groupe électrogène en boucle ferme afin d'avoir des fréquences et des tensions constantes.

## **Mots clés :**

Groupe électrogène, Alternateur, Moteur thermique, L'AVR., Inverseur de source, Synchroscope, Coupleur automatique, Délestage, Unités réduites. Sim Power System.

# **Introduction générale**

Dans la société actuelle, toutes les activités, qu'elles soient professionnelles ou privées, sont consommatrices d'énergie électrique. Toute interruption ou perturbation dans la distribution de cette énergie entraîne des désordres qui peuvent devenir insupportables par l'utilisateur. L'importance de la continuité et de la qualité de l'alimentation électrique est fonction de l'activité concernée.

Certaines applications exigent une permanence quasi complète de l'alimentation car une absence met en péril la sécurité des personnes ou des biens. Le législateur s'est préoccupé de ce problème et tout site de cette nature doit être équipé de moyens d'alimentation de secours en énergie électrique.

D'autres consommateurs, pour lesquels la fiabilité de l'alimentation électrique ne se mesure pas en termes de risques humains, ne peuvent admettre toutefois de coupure car celle-ci peut avoir des conséquences extrêmement préjudiciables sur le plan économique. Les activités mettant en jeu des systèmes informatiques sont un exemple évident de ce type d'exigence puisqu'elles ne peuvent admettre la moindre coupure de quelque durée que ce soit.

Dans des zones non couplées au réseau de distribution de l'énergie électrique les groupes électrogènes, leur modularité et leur coût en font le moyen de production d'électricité idéal. Les groupes électrogènes sont ainsi indispensables dans les zones sous équipées, où la construction du réseau électrique n'est techniquement pas possible ou économiquement pas supportable, et pour lesquelles l'énergie électrique constitue un facteur de développement incontournable.

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous intéressons à l'étude d'un groupe électrogène.

Après une introduction générale, nous donnons dans le premier chapitre les notions de base d'un groupe électrogène en donnant ses différents constituants et le rôle de chacun pour sa bonne mise en marche. Le deuxième chapitre est consacré au fonctionnement du

groupe électrogène en présence d'autres groupes ou du réseau électrique. Nous y citons les différents modes de fonctionnement, les différentes méthodes de couplage ainsi que les protections nécessaires pour le groupe électrogène. Le troisième chapitre est réservé à une application qui consiste en l'étude par simulation numérique d'un groupe électrogène en boucle ouverte. Dans cette étude, la machine synchrone (Alternateur) est modélisée en utilisant la méthode classique basée sur la transformée de Park, suivie d'une simulation sous MATLAB Sim-Power-Systems. Nous terminons notre travail avec une conclusion générale ou nous donnons les principaux résultats de notre application ainsi que les perspectives ouvertes par ce travail.

# Chapitre I

**Notions de base sur le groupe  
électrogène**

## I.1. Introduction

Depuis la découverte des forces électromagnétiques jusqu'à l'invention des systèmes de distribution de l'énergie électrique, les technologies ont évolué avec comme point central l'élaboration de machines de plus en plus complexes reposant sur l'utilisation du courant électrique. Maintenant que cette énergie est devenue un des vecteurs de croissance économique et industrielle les plus importants, il est primordial d'assurer sa production continue.

Les réseaux publics ne sont pas toujours capables de supporter les intensités électriques nécessaires au fonctionnement de la multitude d'entreprises reposant sur cette énergie pour la pérennité de leur activité. Pour pallier les éventuelles insuffisances et défaillances occasionnelles des réseaux publics, les groupes électrogènes constituant des sources d'énergie électrique mobiles, ont été développés et perfectionnés. Aujourd'hui ils deviennent essentiels et répondent à plusieurs enjeux selon leur utilisation :

## I.2. Définitions

**Un groupe électrogène** est un dispositif autonome capable de produire de l'électricité. La plupart des groupes sont constitués d'un moteur thermique qui entraîne un alternateur. Leur taille et leur poids peuvent varier de quelques kilogrammes à plusieurs dizaines de tonnes. Le groupe électrogène permet d'atteindre des puissances et des durées de fonctionnement importantes.

En plus de son application comme source de remplacement, le groupe électrogène offre des possibilités d'utilisation dans différents domaines.

**Un groupe électrogène** sert à produire de l'énergie électrique à partir de l'énergie chimique, cette énergie chimique (le carburant) est transformée en énergie mécanique en utilisant un moteur thermique. L'énergie mécanique développée par le moteur est transformée en énergie électrique via un alternateur.

**Le groupe électrogène** fonctionne avec toutes sortes de carburant, les plus utilisés sont : l'essence, le gasoil, le gaz naturel, les biocarburants et le fuel. Le type de carburant à

choisir dépend de plusieurs paramètres : l'environnement d'utilisation du groupe, la puissance du groupe, le coût...etc.

La puissance d'un groupe électrogène est définie comme étant la puissance disponible aux bornes de l'alternateur (puissance nominale), il faut qu'elle soit en accord avec le programme d'entretien, le constructeur du moteur et de l'alternateur et l'appareillage de coupure et de commande.

**Le groupe électrogène** est défini selon deux puissances :

### **1. La puissance continue**

Elle correspond à la puissance que le groupe est capable de fournir en service continu, pendant un nombre illimité d'heures par an, en respectant les arrêts normaux pour maintenance et dans les conditions ambiantes définies. C'est la notion utilisée pour un groupe de production. [5]

### **2. La puissance de secours**

C'est la puissance maximale que le groupe peut délivrer, durant une période limitée, généralement moins de 500 heures par an. Cette définition ne doit être appliquée que pour les groupes électrogènes travaillant exclusivement en secours. Du fait que le moteur n'est pas en mesure de fournir une puissance supérieure, il convient d'appliquer un facteur de sécurité d'au moins 10 % pour la détermination de la puissance de secours nécessaire. [5]

**Le groupe électrogène** doit être aussi défini en fonction de la charge qu'il doit alimenter. Nous distinguons quatre classes d'application qui ont été définies pour répondre aux besoins de la charge à alimenter. [1]

**La classe G1** : elle est définie pour alimenter des charges qui ne nécessitent pas une exigence en tension et en fréquence.

Exemple : éclairage et charges simples.

**La classe G2 :** elle est définie pour alimenter des charges qui nécessitent des caractéristiques proches de celle du réseau public.

Exemple : éclairage, pompes et ventilateurs.

**La classe G3 :** elle est définie pour alimenter des charges alimentées par thyristors, L'alimentation de ce type de charges nécessite une étude particulière en raison de leur influence sur la forme d'onde de tension de l'alternateur.

**La classe G4 :** elle est définie pour des exigences en tension, en fréquence et en forme d'onde exceptionnellement sévères.

Exemple : Systèmes informatiques.

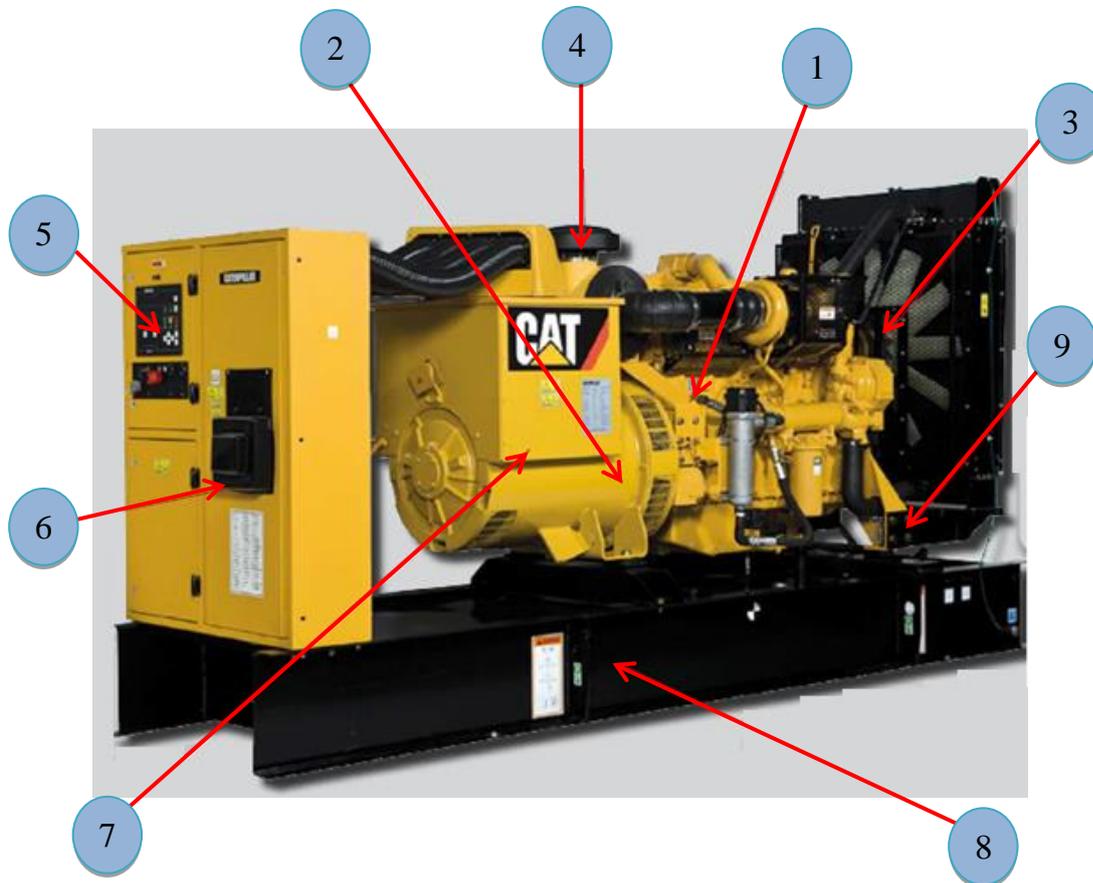
**Le groupe électrogène** de secours est défini aussi en termes de délais d'intervention. On trouve cette notion d'intervention dans le cas où le groupe est destiné à fonctionner en secours. Le temps admissible de coupure peut être plus ou moins long suivant le site secouru. Dans le cas d'un délai d'intervention non spécifié, la durée de coupure a peu d'importance et il est possible d'utiliser un démarrage manuel du groupe. Dans le cas d'un délai d'intervention à coupure spécifiée, la durée de coupure est définie en fonction des impératifs du site à secourir, où le temps de reprise varie de 8 à 15 secondes. Ce délai d'intervention est couramment rencontré dans les hôpitaux, les bâtiments recevant du public et dans les chaînes de production. Dans ces cas, il est impératif d'utiliser un démarrage automatique. [1]

**Le groupe électrogène** est choisi aussi selon le type de vitesse de fonctionnement :

- Groupe électrogène à vitesse fixe
- Groupe électrogène à vitesse variable

### I.3. Constitution d'un groupe électrogène

Le schéma de principe d'un groupe électrogène est donné sur la figure I.1.



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.

Figure I.1. Groupe électrogène. [6]

## I.4. Description des différents éléments du groupe électrogène

### I.4.1. Moteur thermique

Le moteur thermique à combustion interne est un organe qui transforme l'énergie thermique produite par la combustion d'un carburant en énergie mécanique. Le moteur Diesel est un moteur à pistons qui fonctionne suivant le principe de l'auto-inflammation. La pression et la température au sein d'un tel moteur atteignent des niveaux si élevés que le carburant s'enflamme spontanément.

#### I.4.1.1 Principe de fonctionnement du moteur thermique

Son principe de fonctionnement se déroule en quatre temps : [2]

**Admission** : premier temps (figure I.2)

- La soupape d'admission est ouverte
- Le piston se déplace vers le PMB (Point Mort Bas).
- Le cylindre aspire uniquement de l'air.

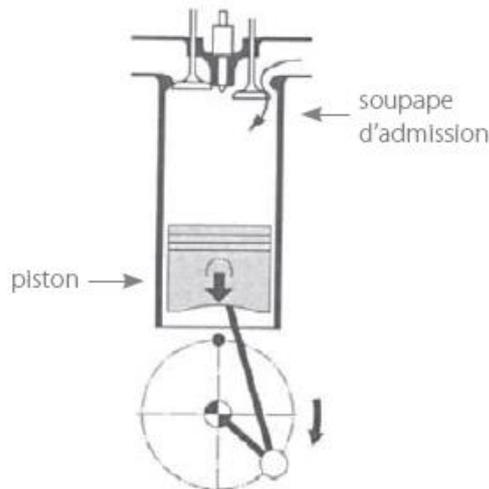


Figure I.2. Admission

**Compression** : deuxième temps (figure I.3)

- Les soupapes d'admission et d'échappement sont fermées
- Le piston se déplace vers le haut et comprime l'air admis précédemment.
- La pression d'air atteint 10 à 20 fois la valeur initiale.
- La température augmente et dépasse le point d'inflammation du carburant.

- Le combustible se pulvérise sous très haute pression dans la chambre de combustion au moyen d'un injecteur situé entre les soupapes.
- Le combustible se mélange avec l'air chaud, se vaporise puis s'enflamme spontanément.

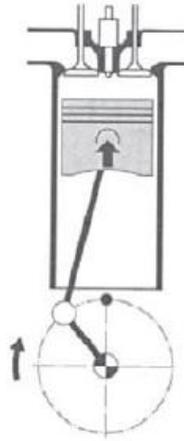


Figure I.3. Compression

**La détente** : le troisième temps correspond à la détente des gaz. (figure I.4)

- L'injection se poursuit sur une dizaine de degrés.
- La combustion libère l'énergie du carburant.
- Il en résulte une augmentation importante de la pression dans la chambre de combustion qui repousse le piston vers le PMB.
- C'est au cours de la phase de détente que le moteur produit un travail mécanique.
- Ce travail est converti en mouvement de rotation du vilebrequin par l'intermédiaire du système bielle-manivelle.

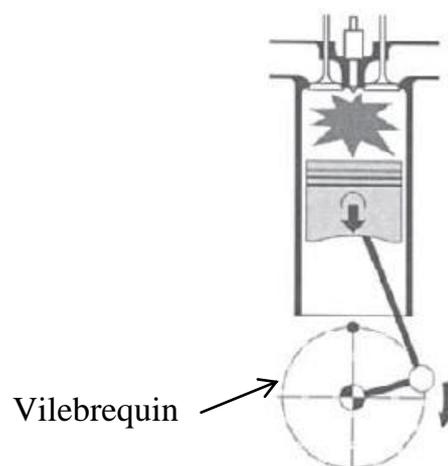


Figure I.4. Détente

**Echappement** : quatrième temps (figure I.5)

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.

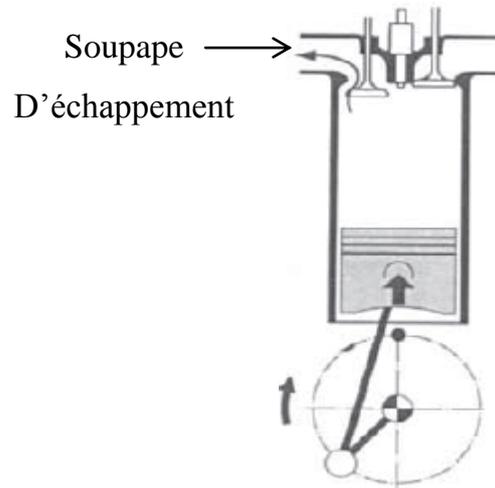


Figure I.5. Echappement

Le moteurs Diesel a besoin de circuits auxiliaires pour assurer :

- son refroidissement
- sa lubrification.
- son alimentation en combustible
- son démarrage

Ces circuits auxiliaires sont vitaux pour le moteur et sont de ce fait équipés de systèmes de sécurité entraînant des alarmes ou des arrêts sur défauts en cas de nécessité.

#### **I.4.1.2. Système de refroidissement [10]**

Lors de son fonctionnement, le groupe électrogène consomme du carburant et produit de l'énergie. Les groupes électrogènes actuels ont un rendement souvent bien inférieur à 50% par rapport à la valeur calorifique du carburant. C'est-à-dire que lors de sa combustion, la moitié du carburant est convertie en énergie électrique tandis que l'autre est convertie en chaleur qui arrive jusqu'à l'ordre de 2000°C. Lors de sa transformation, le carburant réchauffe le groupe et l'augmentation de température qui en résulte peut entraîner :

- Une surconsommation de carburant par le groupe.
- Une baisse de son rendement.
- La destruction du moteur si l'échauffement est excessif.

Ainsi, l'installation d'un système de refroidissement pour le groupe électrogène est nécessaire, afin d'éviter l'échauffement du système. Le système de refroidissement (figure I.6) comprend :

- le radiateur
- la pompe qui entraine le liquide de refroidissement
- le vase d'expansion
- le thermostat
- le ventilateur
- le liquide de refroidissement (eau + additif).

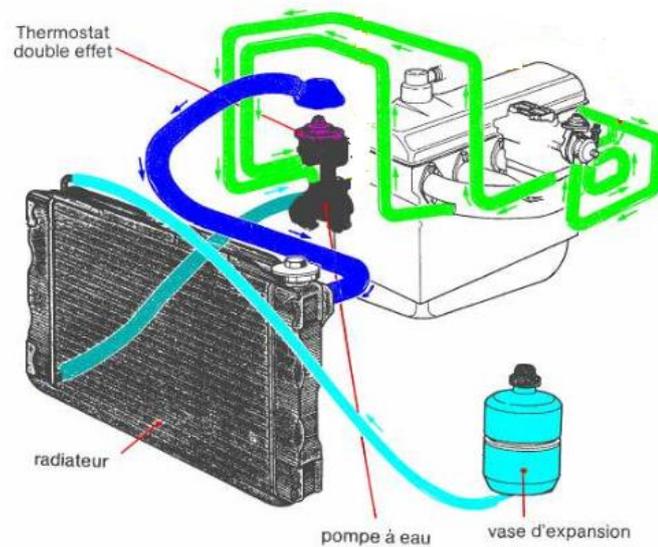


Figure I.6 : Système de refroidissement d'un groupe électrogène.[14]

### 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.7. 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 thermo-contact s'ouvre et l'eau retourne à la pompe à eau par une conduite externe du moteur.

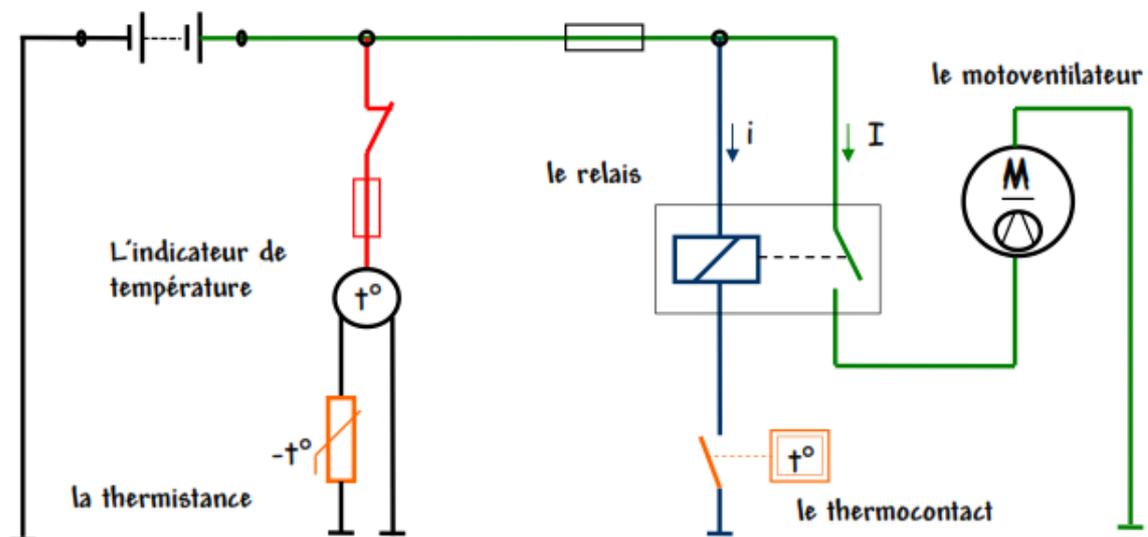


Figure I.7. Circuit électrique de refroidissement.[14]

### **I.4.1.3. Circuit de lubrification**

Le circuit de lubrification permet d'abord d'assurer le graissage du moteur mais également d'assurer le refroidissement des pièces en mouvement (pistons). L'huile est refroidie dans un échangeur Huile/Eau. Pour permettre la prise en charge rapide du groupe, certains constructeurs prévoient la mise en œuvre d'un système de prégraissage pouvant être cyclique ou permanent. Ce dispositif de prégraissage peut également être couplé avec un système de préchauffage de l'huile. [1]

### **I.4.1.4. Circuit d'alimentation en combustible**

L'alimentation en combustible d'un groupe électrogène est assurée à partir d'un réservoir journalier alimenté depuis un réservoir de stockage principal dimensionné en fonction de l'application et de la puissance du groupe. Le remplissage du réservoir journalière, de capacité limitée à 500 litres, si elle est installée dans le même local que le groupe, est normalement assuré de façon automatique par une pompe de transfert commandée par des niveaux de contacts haut et bas. [1]

### **I.4.1.5. 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.

#### **– Démarrage électrique**

Le démarrage électrique est assuré par le démarreur. Les démarreurs ont tous le même principe de fonctionnement, mais diffèrent quelque peu dans leur construction. Généralement un démarreur est constitué d'un moteur électrique, d'un solénoïde et d'un lanceur. La procédure de fonctionnement d'un démarreur se compose de trois phases principales :

**Phase d'appel :** Figure I.8

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.8.

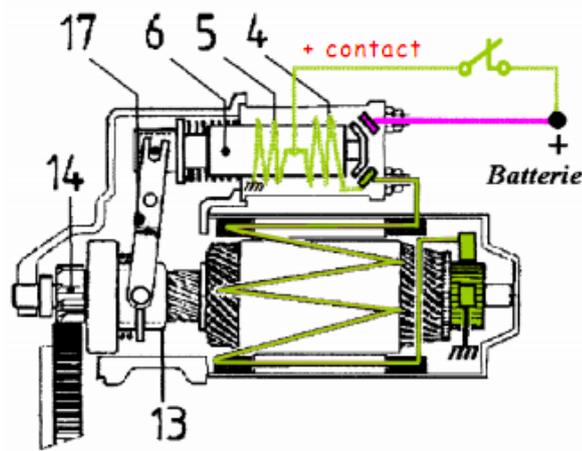


Figure I.8. Démarrage électrique : phase d'appel [12]

**Phase de maintien :** Figure I.9

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. [12]

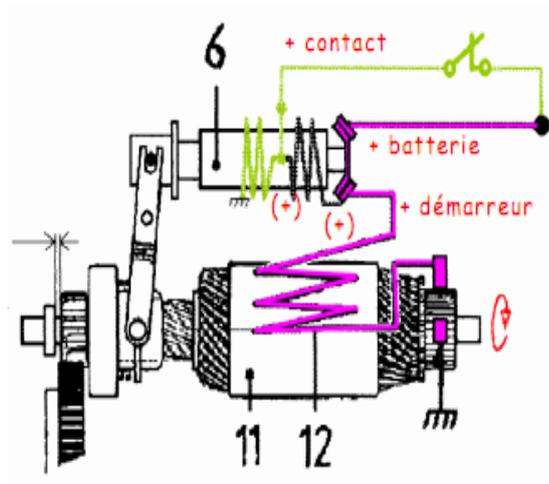


Figure I.9. Démarrage électrique : phase de maintien [12]

### Phase d'arrêt

Le pignon entraîne le moteur en rotation à une vitesse précise et celui-ci devient autonome. Une fois autonome, l'opérateur cesse l'action sur le contacteur coupant l'alimentation électrique de l'enroulement de maintien et la liaison aux bornes.

### I.4.2. Alternateur

Les alternateurs triphasés sont la source primaire de toute l'énergie électrique que nous consommons. Ces machines constituent les plus gros convertisseurs d'énergie au monde. L'alternateur convertit une puissance mécanique, qu'il absorbe sous la forme d'une rotation, en puissance électrique, qu'il délivre sous forme alternative, et ce au travers d'un principe simple et avec des rendements extrêmement importants puisque proches de 100 %.

Les machines utilisées dans les groupes électrogènes sont ordinairement des machines synchrones auto-excitées. Ce type de machine possède un induit (le stator) qui est fixe, un inducteur (rotor) qui est mobile.

### I.4.2.1 Description des constituants d'un alternateur

#### I.4.2.1. 1. Le stator

Le stator (figure I.10) comprend un circuit magnétique constitué par un empilage de tôles en forme de couronne, isolées les unes des autres pour limiter les courants de Foucault. L'ensemble des couronnes avec leur isolation est fortement serré, il constitue le circuit magnétique du stator. Dans sa partie intérieure, le circuit magnétique comporte des encoches uniformément réparties dans lesquelles vient se loger l'enroulement triphasé du stator. Le circuit magnétique du stator est en fer afin d'augmenter le champ magnétique engendré par le rotor. Le bobinage d'un stator triphasé comprend trois bobines décalées l'une par rapport à l'autre de  $120^\circ$ . Les deux extrémités de l'enroulement aboutissent chacune à une borne de la plaque à bornes de la machine. Elles constituent l'entrée et la sortie de l'enroulement. Elles ne sont pas connectées ensemble : l'enroulement est ouvert et c'est à l'utilisateur de réaliser le couplage.

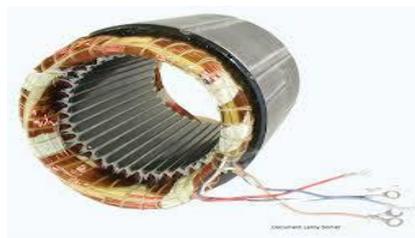


Figure I.10 : Stator d'un alternateur triphasé

#### I.4.2.1.2. Le rotor

Le rotor est un électroaimant qui tourne à l'intérieur du stator immobile. Le rotor porte, dans les encoches disposées à sa périphérie un enroulement. Nous distinguons trois types de rotors : le rotor à pôles lisses, rotor à pôles saillants et rotor à aimant permanent.

### 1. Rotor à pôles lisses

Le rotor à pôles lisses est un cylindre plein dans lequel des encoches sont usinées (figure I.11). Il possède le plus souvent deux ou quatre pôles. Il est généralement utilisé dans les centrales thermiques car la turbine à vapeur tourne à des grandes vitesses.

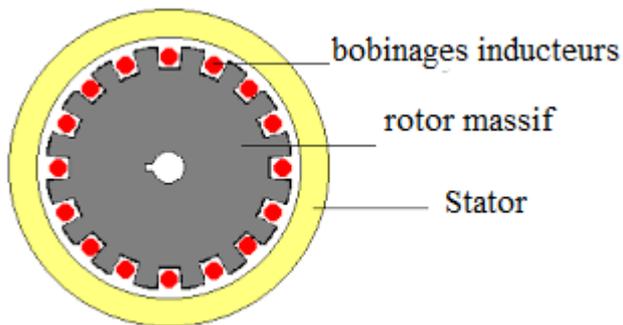


Figure I.11. Rotor à pôles lisses.

### 2. Rotor à pôles saillants

C'est un électroaimant dont les pôles sont alternativement nord et sud, il possède un grand nombre de pôles (supérieur ou égale à 4) (figure I.12). Les enroulements sont alimentés en courant continu. Ils sont placés autour des noyaux polaires. Il est généralement utilisé dans les centrales hydrauliques car elles tournent à des vitesses lentes.

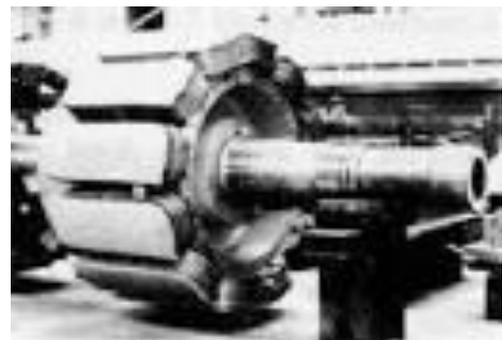
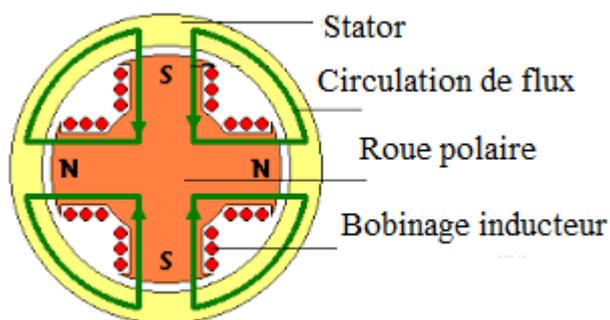


Figure I.12. Rotor à pôles saillant.

### 3. Rotor à aimant permanent

L'électroaimant est remplacé par des aimants (Figure I.13), et ceci présente l'avantage d'éliminer le système balais bague, les pertes rotorique ainsi que le circuit d'excitation.

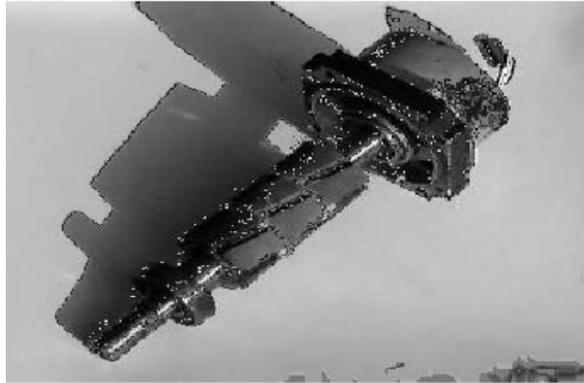


Figure I.13 Rotor à aimant permanent

#### I.4.2.1.3. Principe de fonctionnement de l'alternateur triphasé

L'électroaimant (le rotor) est alimenté par le courant d'excitation continu, le rotor excité, en tournant, il produit un champ tournant avec lui. L'interaction de ce champ tournant avec les conducteurs engendre, une force électromotrice dans chaque enroulement statorique.

#### **I.4.2.1.4. Régulation de la tension de l'alternateur**

Lorsque l'alternateur est en charge, sa tension de sortie chute en raison de son impédance interne qui est formé de la réactance de fuite et de la résistance de l'induit. Pour maintenir la tension de sortie à une valeur acceptable, on fait appel à un régulateur de tension. Le régulateur le plus utilisé est un AVR (automatic voltage regulator).

L'AVR est un dispositif électronique constitué de plusieurs composants tels que des diodes, des condensateurs, des résistances, des potentiomètres ou même des microcontrôleurs. IL est destiné à réguler la tension automatiquement.

#### **I.4.2.1.5. Principe de fonctionnement de l'AVR**

En premier lieu, le régulateur surveille la tension de sortie et commande la tension d'entrée de l'excitatrice de l'alternateur. En augmentant ou en diminuant la tension de commande du générateur, la tension de sortie du générateur augmente ou diminue en conséquence. Le régulateur calcule la quantité de tension doit être envoyée à l'excitateur de nombreuses fois par seconde, en stabilisant ainsi la tension de sortie à une valeur de consigne prédéterminée.

Le circuit représenté dans la (figure I.14) illustre les concepts de base utilisés dans la stabilisation de la tension d'un groupe électrogène avec un alternateur auto-excité. Lorsque le rotor est mis en rotation par le moteur, une tension alternative est générée dans l'enroulement d'excitation. Ce courant alternatif est converti en courant continu du pont redresseur, "RB" et d'un condensateur de filtrage "C". Le circuit de détection compare une tension de sortie  $V$  avec une valeur de consigne et active ou désactive le transistor "Q". Lorsque «Q» est activé, un courant circule à travers l'enroulement de champ (rotorique). Lorsque "Q" est désactivé, le courant de champ continue à circuler via la diode de roue libre "D". Le rotor comporte un petit aimant permanent pour fournir un certain courant de base lorsque "Q" est désactivé. En faisant varier convenablement le rapport cyclique du fonctionnement du transistor "Q", la tension de sortie  $V$  sera régulée. [15]

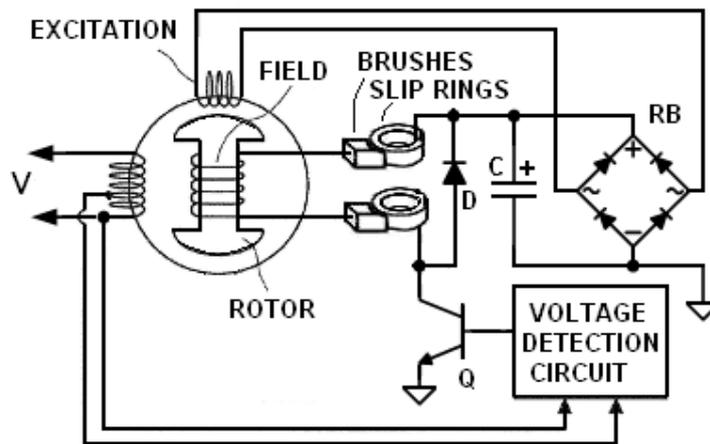


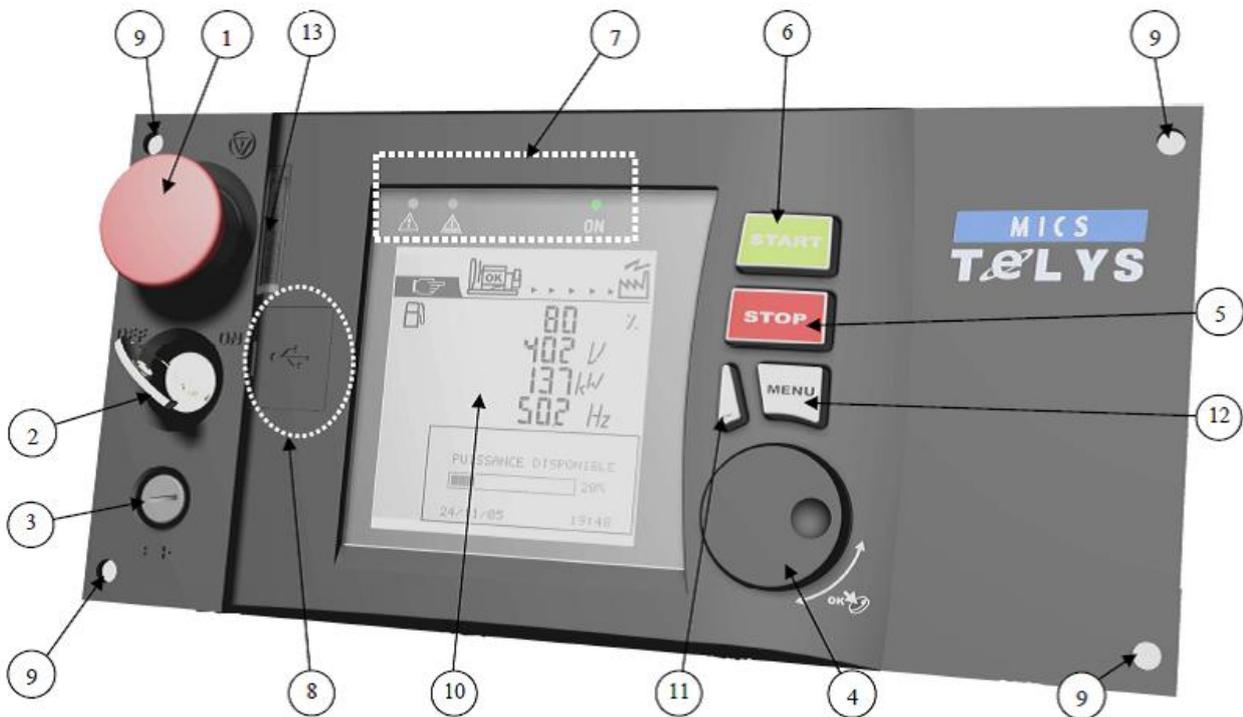
Figure I.14 Circuit de régulation de la tension de sortie [15]

### I.4.3. Accessoires du groupe électrogène

#### I.4.3.1. Système de contrôle / commande et détection des pannes

##### I.4.3.1.1. Description du système de contrôle / commande et identification

Pour commander et contrôler son fonctionnement, le groupe électrogène est équipé d'un système de contrôle / commande électronique (figure I.15), spécialement conçu à cet effet. En fonction des besoins, divers coffrets peuvent être montés, en standard, sur le groupe. D'autres systèmes plus spécialisés peuvent être aménagés pour des installations spécifiques, auquel cas une documentation distincte est fournie. Ces systèmes de contrôle se composent de trois éléments essentiels qui fonctionnent conjointement.



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.

Figure I.15 : Tableau de commande et de contrôle [13]

#### I.4.3.1.2. Coffret de commande

Il permet de démarrer et d'arrêter le groupe électrogène, en surveillant son fonctionnement et son rendement et aussi en arrêtant automatiquement le groupe électrogène en cas de survenue de situation critique. Afin d'éviter des dommages importants au niveau du moteur ou de l'alternateur.

#### I.4.3.1.3. Coffret de contrôle

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

#### I.4.3.2. Tableau inverseur de source automatique (figure I.16)

C'est un dispositif électrique installé dans le groupe électrogène lorsqu'il est destiné à fonctionner en secours. Sa fonction est de permuter l'alimentation de la charge au groupe électrogène lorsque le réseau d'alimentation est interrompu.



Figure I.16 Inverseur de source [7]

**I.4.3.3. Le synchronoscope**

Il est généralement installé dans tous les groupes de grande puissance qui sont destinés à fonctionner en parallèle avec d'autres groupes électrogènes, ou lorsque le groupe est couplé au réseau d'alimentation. Sa fonction est d'emmener chaque phase de groupe en coïncidence avec chaque phase d'un autre ou plusieurs groupes ou avec le réseau à alimenter.

**I.4.3.4. La batterie**

C'est un accumulateur électrique dont le rôle est d'alimenter le démarreur du moteur en courant continu. Il sert aussi à alimenter quelques accessoires comme le moto-ventilateur.

**I.4.3.5. Chargeur de batterie**

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

# **Chapitre II**

**Fonctionnement du groupe  
électrogène**

## II.1. Introduction

Nous allons aborder dans ce chapitre le fonctionnement du groupe électrogène en présence d'autres groupes et du réseau électrique.

Lorsque le groupe électrogène est utilisé comme source principale d'énergie électrique, il est nécessaire de prendre en compte les points suivants :

- Pouvoir fonctionner en parallèle avec d'autres groupes
- Prévoir de longues périodes de maintenance.
- Assurer le démarrage autonome

Lorsque le groupe électrogène est utilisé comme source de secours ou de pointe, il faut prendre en considération ce qui suit :

- Assurer le fonctionnement en parallèle avec le réseau
- Assurer la rapidité et la fiabilité de démarrage.
- Réaliser un système de délestage fiable pour éviter la surcharge et le décrochage.
- Fournir si nécessaires le courant magnétisant pour les transformateurs de distribution.

## II.2. Mode d'utilisation du groupe électrogène

Selon le lieu dans lequel un groupe est déployé et les enjeux auxquels il répond, son utilisation, son rendement et son importance varient grandement.

- **Production de pointe**

Le groupe électrogène est utilisé pour couvrir les besoins en pointe du réseau électrique public. En fonctionnement normal du réseau, le générateur se trouve en mode «stand-by», et n'entre en activité que pour compenser les pointes de consommation électrique. Cette technique est majoritairement utilisée dans les pays en voie de développement, lorsque le réseau principal ne suffit plus à alimenter les infrastructures en développement dans une région. Les tarifs EJP (effacement jours de pointe) sont des tarifs spéciaux correspondant à 22 jours dans l'année où l'électricité fournie par le réseau public est beaucoup plus onéreuse. Pour éviter ce surcoût, certaines entreprises choisissent d'avoir recours à des groupes électrogènes pour subvenir à leurs besoins quotidiens en énergie pendant cette durée. [8],[10]

- **Production d'énergie électrique**

L'application du groupe électrogène en tant que «producteur d'énergie électrique» permet d'alimenter un réseau privé.. L'alimentation en énergie électrique provient de N groupes comme la montre la figure II.1. 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 N-1 groupes assurent le fonctionnement sans appel au délestage. Dans certains cas, les conditions de fonctionnement à N-2 groupes doivent être examinées. La puissance des groupes électrogènes doit être choisie de sorte à ce qu'ils fonctionnent au moins à 50% de leur puissance nominale. En Principe la durée de fonctionnement annuelle de ces groupes électrogènes est assez élevée. [5].[8]

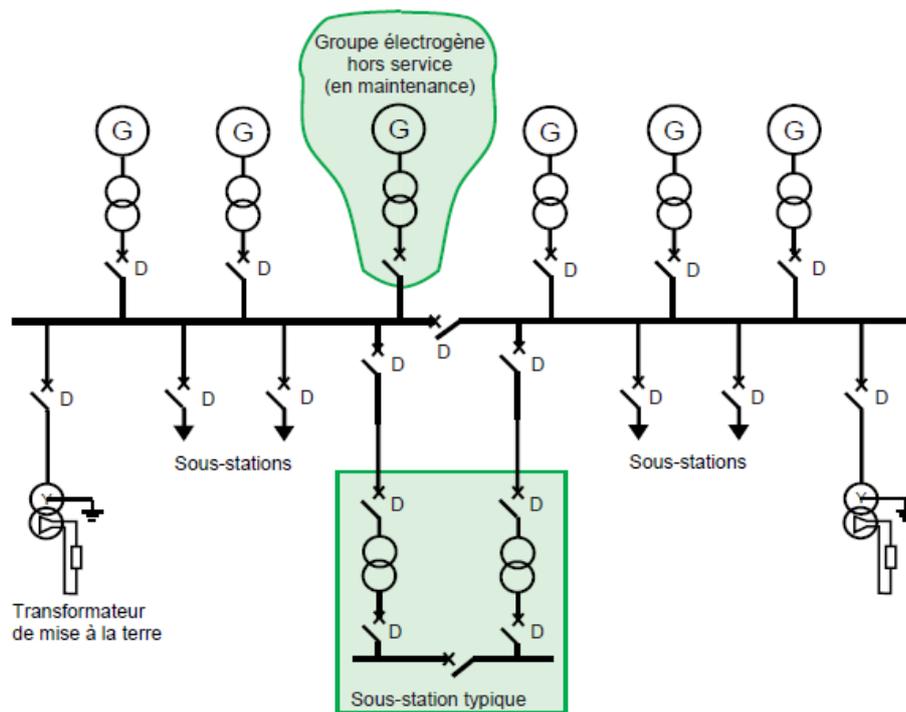


Figure II.1. Site industriel sans raccordement au réseau. [5]

- **Production de secours**

On entend par la notion «groupes électrogènes de secours» les groupes électrogènes destinés à approvisionner un objet (établissement) en courant électrique en cas d'une panne du réseau public. Ces installations se mettent automatiquement en route dès qu'une interruption de l'alimentation du courant électrique apparaît. Dans l'état normal, elles se trouvent dans un mode «stand-by». Ces installations ne sont pas destinées à couvrir les pointes du courant électrique du réseau public et ne fonctionnent donc que quelques heures par année. L'application de ces groupes électrogènes a lieu dans les établissements où une interruption du courant électrique peut provoquer des nuisances pour les êtres humains. Parmi ces établissements il y a lieu de citer les hôpitaux, les maisons de soins, les maisons de retraite,...etc. Les installations de production d'énergie électrique de secours trouvent également leur application dans les établissements où une coupure du courant électrique peut entraîner des pertes économiques (banques). On donne sur la figure II.2 un exemple typique d'un réseau secouru par un groupe électrogène. [8], [10].

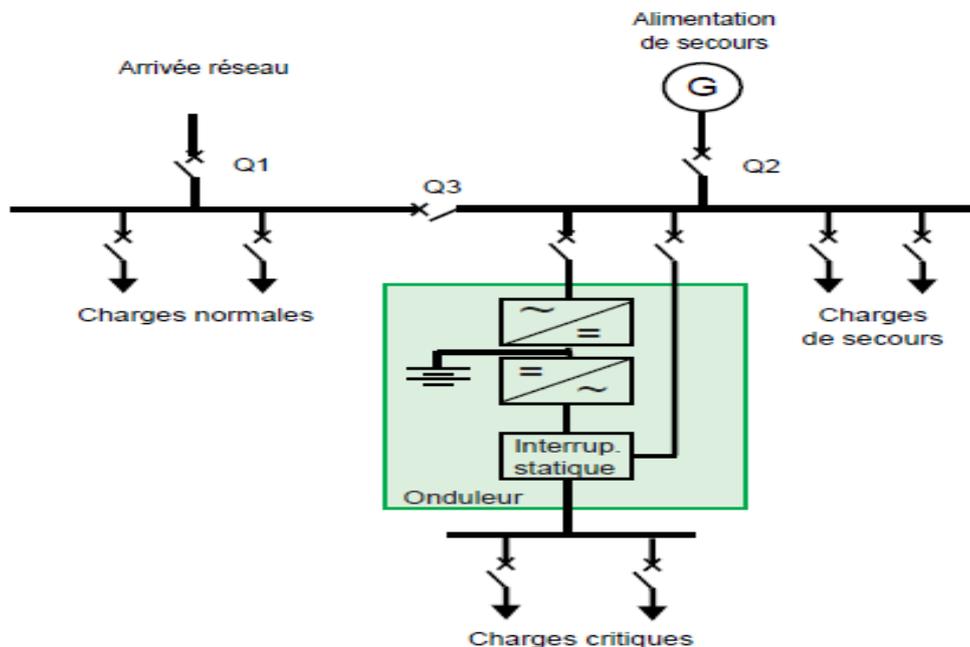


Figure II.2. Schéma de réseau de secours d'un site industriel [5]

Le tableau 1 montre les familles d'utilisation de groupes électrogènes selon la puissance nominale et la vitesse de rotation.

| <b>Tableau 1 – Familles d'application des groupes électrogènes [1]</b> |             |                        |                       |
|--|-------------|------------------------|-----------------------|
| <b>Vitesse de rotation</b>   | <b>Type</b> | <b>Puissances</b>      | <b>Applications</b>   |
| 3 000 tr/min   | Rapide      | Faible                 | Domestiques - Secours |
| $900 < N < 1\ 800$ tr/min  | Rapide      | Moyenne $< 5\ 000$ kVA | Production - Secours  |
| $350 < N < 900$ tr/min   | Semi-rapide | Forte $4 < P < 20$ MVA | Production - Secours  |
| $N < 350$ tr/min   | Lent        | Forte                  | Production            |

### **II.3. Couplage des groupes électrogènes avec le réseau ou avec d'autres groupes électrogènes**

La puissance appelée par une installation ou la variation importante de cette puissance peut rendre nécessaire la mise en parallèle de plusieurs groupes électrogènes. Cette possibilité permet de mettre en production un nombre de groupes adapté à la puissance appelée en évitant ainsi de faire fonctionner un groupe à une puissance trop faible. En effet, un groupe électrogène ne doit pas fonctionner à des puissances inférieures à 30% de sa puissance nominale, car cela peut empêcher une bonne combustion qui entrainerait une dégradation rapide de l'huile de lubrification.[1] ;[5]

Pour coupler un groupe électrogène sur un réseau ou avec un autre groupe électrogène, il faut respecter les conditions suivantes :

- a/ égalité des tensions
- b/ égalité des fréquences
- c/ concordance des phases

L'ordre de fermeture de l'organe de puissance ne sera autorisé que si ces trois conditions sont remplies. Cet organe de puissance devra avoir un temps de fermeture suffisamment rapide pour que l'angle de déphasage entre les deux tensions à coupler ne soit pas trop important à l'instant de la fermeture. Dans le même but, la fréquence de glissement (différence entre les deux fréquences) doit être suffisamment faible pour autoriser le couplage. Le temps de fermeture maximal de l'organe de coupure doit être inférieur à 100 ms. La figure II.3 résume les conditions de couplage du groupe électrogène au réseau.

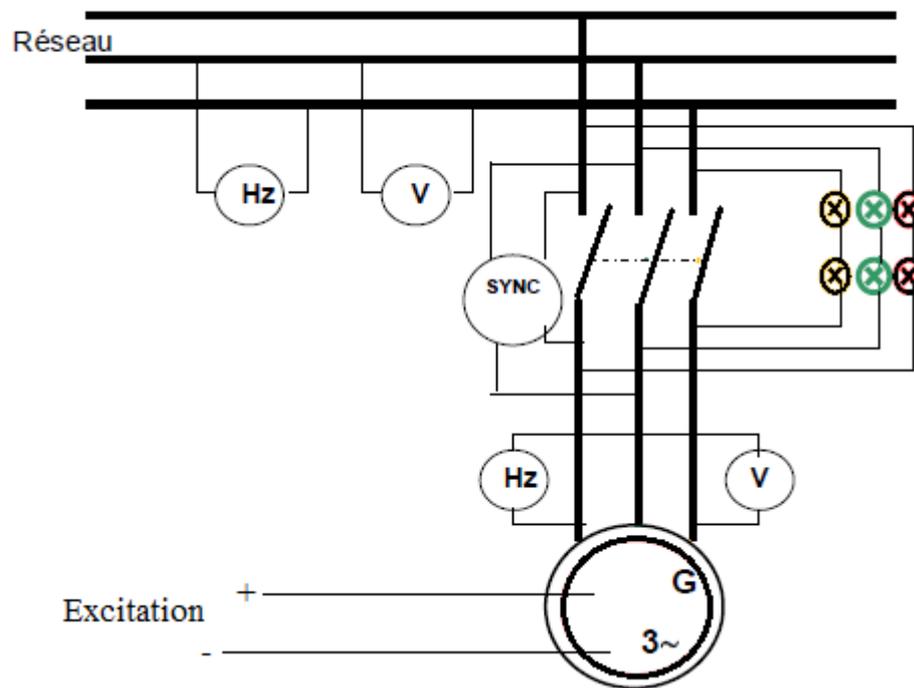


Figure II.3. Montage des équipements de synchronisation. [9]

### II.3.1. Différentes méthodes de couplage [1], [9]

#### 1. Couplage manuel

Pour réaliser le couplage d'un groupe électrogène sur un réseau ou un autre groupe, il faut disposer de deux dispositifs de réglage.

##### – Le dispositif de réglage de la vitesse du moteur Diesel

Il est constitué habituellement d'un potentiomètre d'ajustage agissant sur la consigne de vitesse du régulateur. Ce dispositif permet d'ajuster la fréquence du groupe à coupler à celle de la source qui est prise comme référence. Les conditions d'égalité des fréquences et de concordance de phases sont contrôlées respectivement par un fréquencemètre double et par un synchroscope.

##### – Le dispositif de réglage de la tension de l'alternateur :

Il est constitué habituellement par un potentiomètre d'ajustage agissant sur la consigne de tension du régulateur. Il faut noter qu'une différence de tension faible, de

l'ordre de 5 %, est admissible. Cette différence se traduit, au moment du couplage par un échange de puissance réactive sur le réseau de référence et le groupe. Le contrôle de l'égalité des tensions est réalisé par un voltmètre différentiel .`

## 2. Couplage automatique

Les centrales de secours demandent des temps de réalimentation rapide des installations secourues. Il est donc indispensable de prévoir des systèmes de couplage automatique qui nécessitent la mise en œuvre des composants suivants :

- **un synchronoscope** qui amène les tensions au synchronisme par action sur la consigne de vitesse du régulateur.
- **un égaliseur de tension** qui assure l'ajustement de la tension de l'alternateur à celle de la source de référence.
- **un coupleur** qui effectue le contrôle de l'ensemble des conditions de couplage et qui délivre l'ordre de fermeture de l'organe de coupure du groupe électrogène automatiquement.

## 3. Couplage à l'arrêt

Le couplage à l'arrêt présente de nombreux avantages qui seront précisés après présentation de cette technique.

Sur demande de démarrage de la centrale électrique :

- fermeture du disjoncteur de chacun des groupes électrogènes.
- démarrage simultané des moteurs, l'excitation des alternateurs étant hors service.
- à l'arrivée du dernier groupe à sa vitesse nominale, mise en service simultanée de l'excitation de tous les groupes.
- la synchronisation des groupes est obtenue pendant la phase d'établissement de la tension aux bornes des alternateurs.
- Une temporisation contrôle que chacun des groupes arrive à sa vitesse nominale dans un temps imparti. Si un groupe n'atteint pas sa vitesse à l'écoulement de cette temporisation, son disjoncteur est ouvert et la séquence se poursuit avec les autres groupes. Le groupe

défaillant sera démarré ultérieurement et couplé en utilisant une procédure classique de synchronisation.

Ce procédé de couplage présente les avantages suivants :

- **mise à disposition rapide de tous les moyens de production**

Ce temps correspond au temps de démarrage d'un groupe et permet donc de répondre, avec la souplesse présentée par l'utilisation de plusieurs groupes, aux impératifs réglementaires des reprises en secours de sites sensibles comme les hôpitaux.

- **capacité de magnétiser les transformateurs :**

Dans le cas de l'alimentation d'un réseau HTA : en effet, la magnétisation se réalise de façon progressive pendant la phase d'établissement de la tension.

- **suppression de la procédure de synchronisation et de couplage**

Qui est toujours une opération délicate pouvant durer plusieurs secondes.

## **II.4. Conséquences d'un mauvais couplage [9]**

### **II.4.1. Le non-respect de l'égalité des fréquences**

Le non-respect de l'égalité des fréquences peut provoquer des retours de puissance ou des couplages en opposition de phases qui peuvent détériorer l'alternateur et les artifices d'excitation et créer des incidents sur les autres groupes. Il est conseillé, au moment du couplage, de garder la fréquence de l'alternateur légèrement supérieure à celle du réseau pour éviter les retours de puissance.

### **II.4.2. Le non-respect de l'égalité des tensions**

Cela implique que la différence des tensions entre l'alternateur et le réseau n'est pas nulle, ce qui va provoquer des courants de circulation dans les enroulements de l'alternateur. Ces courants sont d'autant plus élevés que la différence est plus grande. Ce phénomène est susceptible d'endommager l'alternateur et les artifices d'excitation tels que : les diodes, le régulateur de tension... etc.

### II.4.3. Le non-respect de la concordance des phases

Le non-respect de cette condition conduit à un couplage en opposition de phases avec des courants de circulations très forts qui peuvent endommager le disjoncteur, l'alternateur et les artifices d'excitation. Le couplage en opposition de phase peut provoquer des incidents sur les autres groupes. De façon générale, un mauvais couplage peut détériorer un groupe, créant ainsi son immobilisation temporaire, ce qui peut engendrer des pertes financières.

## II.5 Le délestage : [5]

Le délestage est souvent nécessaire afin de s'assurer que les éléments essentiels d'un processus restent alimentés en énergie durant les pointes de consommation ou lors de perturbations du réseau électrique.

Cette fonction est réalisée à l'aide d'un délesteur de charges

Le délestage est à considérer dans trois cas suivants :

- augmentation progressive de la charge,
- perte d'un groupe électrogène,
- défauts électriques.

Pour une alimentation électrique fiable d'un équipement, le délestage dans chacun des cas ci-dessus doit être étudié. En général, le système de délestage doit vérifier en permanence l'équilibre entre la charge et la puissance disponible afin de délester les charges non essentielles et maintenir ainsi la stabilité du système. On trouvera ci-après la description des effets et des remèdes dans chacun des cas.

### II.5.1. Augmentation progressive de la charge

Il est possible qu'à certaines périodes, la charge excède la puissance nominale des groupes électrogènes. Le fait que les groupes électrogènes de production soient prévus pour une surcharge de 10% pendant une heure, lors d'une évolution progressive de la charge, le système de délestage peut effectuer en temps réel tous les calculs et donner les ordres de délestage aux charges non essentielles. L'opérateur peut reconnecter les charges non essentielles après la période de pointe.

### **II.5.2 Perte d'un groupe électrogène**

La perte d'un groupe peut brusquement entraîner une réduction considérable de la puissance disponible par rapport aux besoins de la charge. Le délestage immédiat des charges non essentielles est alors nécessaire afin d'assurer la stabilité du réseau de distribution. Sans délestage, il y aura déclenchement par surcharge, baisse de tension, ou baisse de fréquence, conduisant à la perte probable de la totalité de l'alimentation électrique.

Le système de délestage doit être programmé pour envoyer immédiatement les ordres de déclenchement nécessaires. Le délestage peut se faire en moins de 200 ms, ce qui est généralement suffisant pour empêcher de perdre la stabilité du système, et pourrait éventuellement conduire à une panne totale du réseau de distribution interne.

### **II.5.3. Défaits électriques**

Les défauts électriques sont détectés par les relais de protection, provoquant le déclenchement des disjoncteurs et isolant ainsi l'équipement défectueux. Durant le temps d'élimination du défaut, la tension dans la zone du défaut peut tomber pratiquement à zéro, ce qui peut entraîner le ralentissement de tous les moteurs de l'installation. A l'élimination du défaut, les moteurs absorberont un courant supplémentaire pour retrouver leur vitesse normale. Cela pourrait accentuer la chute de tension dans certaines zones de l'installation jusqu'au déclenchement des disjoncteurs alimentant les parties saines de l'installation. Pour empêcher une telle perte de stabilité, il est nécessaire d'avoir un système de délestage agissant sur baisse de tension et/ou baisse de fréquence.

## **II.6 Protections du groupe électrogène**

### **II.6.1 Protection des alternateurs**

Le fonctionnement en parallèle de groupes électrogènes entre eux ou avec le réseau implique la mise en œuvre de dispositifs de protection destinés à sauvegarder l'intégrité des matériels. L'objet des protections est de limiter l'amplitude et la durée des contraintes électriques thermiques ou mécaniques engendrées par des perturbations de façon à diminuer les conséquences et l'importance des avaries.

Le choix de protections doit être fait en fonction de critères liés à l'importance du réseau et de la centrale :

Protection de surcharge de l'alternateur ;

Protection contre les court-circuits ;

Protection thermique du bobinage stator réalisée à partir de sondes insérées dans le bobinage.

### **II.6.2. Protections du moteur : [2]**

Le groupe électrogène doit également avoir des protections relatives au moteur thermique. Il s'agit essentiellement :

- du niveau et de la température de l'huile
- du niveau et de la température d'eau
- de la température d'échappement.

### **II.7 Les régimes du neutre :**

Dans un réseau, le régime du neutre joue un rôle très important. Il protège les personnels contre l'électrocution lors d'un défaut d'isolement ou de la mise accidentelle d'une phase à la terre. L'étude du régime du neutre est différente d'une installation alimentée par un ou plusieurs groupes électrogènes et suivant la grandeur de la tension (basse ou haute) de l'alimentation.

#### **II.7.1. Régime du neutre en basse tension :**

Un groupe électrogène doit être soumis au même régime de neutre que l'installation qu'il va secourir. Nous distinguons trois régimes du neutre en basse tension. [1]

##### **1. Régime du neutre TT :**

Dans ce régime (Figure II.6), le neutre de l'alternateur est mis directement à la terre et les charges à alimenter sont aussi raccordées à la terre. L'installation de dispositifs

différentiels résiduels (DDR) est obligatoire dans ce régime. Lors de l'apparition d'un défaut, le DDR déclenche et ouvre le circuit de défaut. [11]

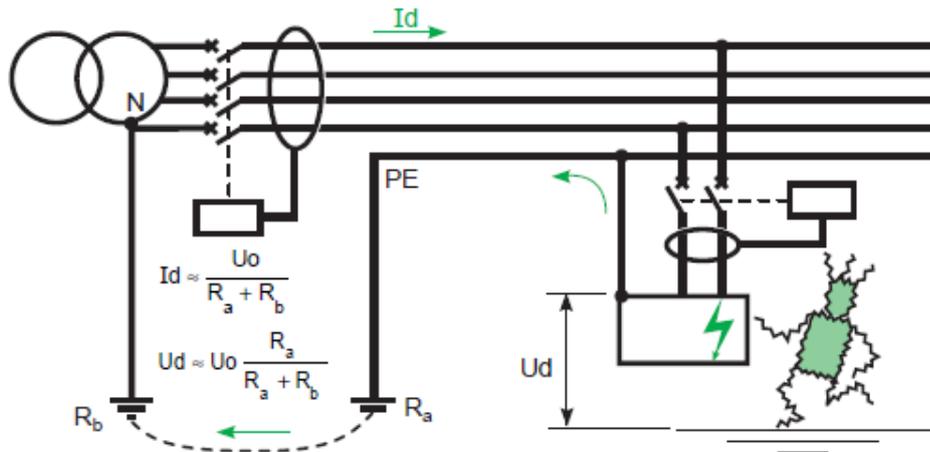


Figure II.6. Régime du neutre TT [11]

**2. Régime du neutre IT :**

Dans ce régime (Figure II.7), le neutre de l'alternateur est isolé ou relié à la terre par une impédance très élevée, les masses des récepteurs sont interconnectées et reliées à la terre. Dans ce type d'installation la protection est assurée soit par des fusibles ou par des disjoncteurs. Lors de l'apparition d'un premier défaut, les protections n'agissent pas mais il faut chercher à éliminer le premier défaut, car lors de l'apparition d'un deuxième défaut les protections se déclenchent et elles ouvrent le circuit de défaut. Le régime du neutre IT nous offre donc un avantage qui est la continuité de service. [11]

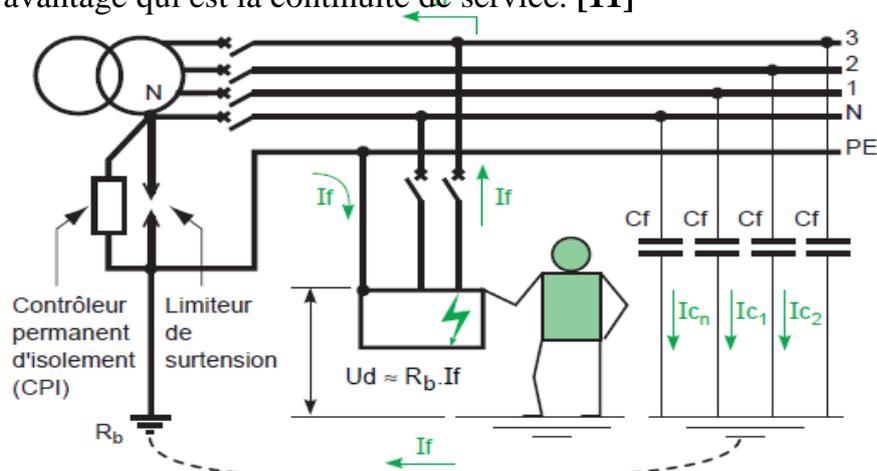


Figure II.7 : régime du neutre IT [11]

### 3. Régime du neutre TN :

Il existe 2 régimes TN : TNC et TNS.

**Régime TNC (Figure II.8) :** Le neutre (N) et le conducteur de protection (PE) sont confondus (PEN sur le schéma). Ce régime est interdit pour des sections de câbles inférieures à 10 mm<sup>2</sup>. En effet, la tension entre les extrémités du conducteur de protection doit rester aussi faible que possible.

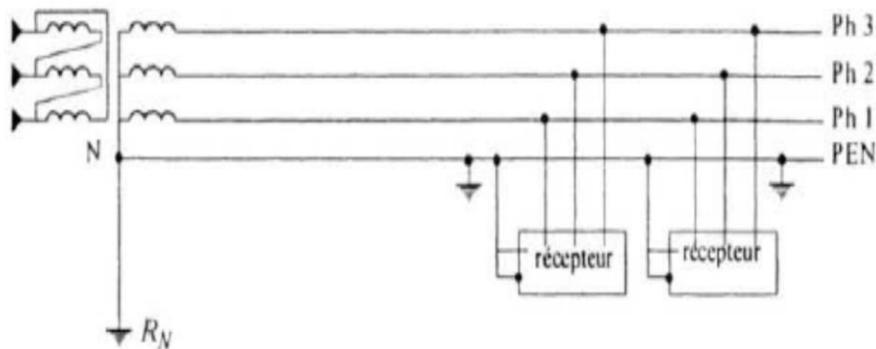


Figure II.8. Régime du neutre TNC

**Régime TNS (Figure II.9) :** Le neutre (N) et le conducteur de protection (PE) sont séparés. Il faut utiliser des appareils tripolaire + neutre.

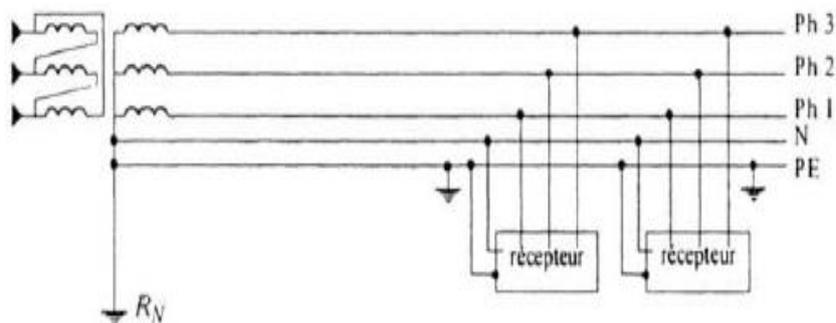


Figure II.9. Régime du neutre TNS

Il est à noter que dans les deux cas du régime TN, la protection doit être assurée par coupure au premier défaut.

# **Chapitre III**

**Modélisation et simulation du  
groupe électrogène**

### III.1. Introduction

Dans cette partie, nous allons présenter une étude par simulation d'un groupe électrogène dont les paramètres, issus du cahier des charges (Annexe 1), sont consignés dans le tableau III.1. La puissance mécanique du moteur diesel sera injectée dans notre modèle sous forme d'un échelon de puissance. L'alternateur est à pôles saillants et sera modélisé en utilisant la transformée de PARK utilisée dans l'étude des machines à courant alternatif.

| Cahier des charges de l'étude                                    |                          |         |
|--|--------------------------|---------|
| Nombre de phases   | m                        | 3       |
| Couplage   |                          | Etoile  |
| Puissance apparente nominale                                     | $S_n$ (kVA)              | 1000    |
| Tension nominale   | $U_n$ (V)                | 400     |
| Facteur de puissance nominal                                     | $\cos(\varphi)$          | 0.8     |
| Moment d'inertie   | $J$ (kg.m <sup>2</sup> ) | 22.9287 |
| Vitesse de rotation nominale                                     | $N_n$ (tr/min)           | 1500    |
| Fréquence  | f (Hz)                   | 50      |
| Résistance de l'enroulement statorique                           | $R_a$ ( $\Omega$ )       | 0.002   |
| Résistance de l'enroulement rotorique                            | $R_f$ ( $\Omega$ )       | 2.09    |
| Réactance de fuite de l'induit                                   | $X_l$ (p.u)              | 0.08    |
| Réactance synchrone directe                                      | $X_d$ (p.u)              | 2.73    |
| Réactance transitoire directe                                    | $X'_d$ (p.u)             | 0.22    |
| Réactance subtransitoire directe                                 | $X''_d$ (p.u)            | 0.15    |
| Réactance synchrone transversale                                 | $X_q$ (p.u)              | 1.61    |
| Réactance subtransitoire transversale                            | $X''_q$ (p.u)            | 0.19    |
| Constante de temps transitoire longitudinale à circuit ouvert    | $T'_{d0}$ (s)            | 3.03    |
| Constante de temps subtransitoire longitudinale en court-circuit | $T''_d$ (s)              | 0.025   |
| Constante de temps transitoire longitudinale en court-circuit    | $T'_d$ (s)               | 0.185   |
| Constante de temps subtransitoire transversale à circuit ouvert  | $T''_{q0}$ (s)           | 0.08    |
| Constante de temps subtransitoire transversale à court-circuit   | $T''_q$ (s)              | 0.02    |
| Puissance mécanique à la sortie du moteur thermique              | Pm (kW)                  | 842     |

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

Avant de passer à la modélisation de l'alternateur, nous donnons d'abord les hypothèses simplificatrices et les conventions de signes à adopter. Sa mise en équation s'effectuera en écrivant toutes les relations entre les différentes grandeurs qui régissent son fonctionnement en appliquant les lois fondamentales de l'électrotechnique. Pour la mise en équations, cette machine est adoptée selon la représentation schématique de la figure III.1.

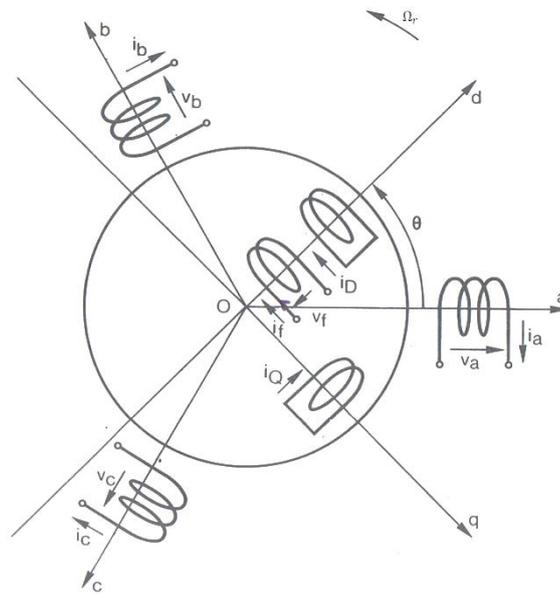


Figure III.1. Représentation schématique de la machine synchrone avec amortisseurs. [4]

### III.3. Hypothèses simplificatrices [4]

Notre étude est basée sur les hypothèses simplificatrices ci-dessous :

- le circuit magnétique n'est pas saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants.
- Le circuit magnétique est parfaitement feuilleté, seuls les conducteurs sont parcourus par des courants (les courants de Foucault sont négligés).
- La densité de courant est uniforme dans la section des conducteurs.
- La distribution le long de l'entrefer de la f.m.m créée par les conducteurs statoriques est sinusoïdale.

### III.4. Conventions de signes [4]

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

- Un courant positif crée à travers son propre enroulement un flux positif.
- Une f.é.m. positive fait circuler un courant positif.
- L'inducteur est considéré comme récepteur, l'induit (stator) comme générateur.
- Le sens positif de l'angle interne de l'alternateur et de la vitesse de rotation est le sens trigonométrique.

Aucune convention n'est à adopter pour les amortisseurs étant donné que ceux-ci sont en court-circuit.

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

#### III.5.1. Equations électriques du stator

Dans ce qui suit, nous remplacerons l'opérateur  $d/dt$  qui indique une dérivation par rapport au temps, par l'opérateur de Laplace «  $p$  ».

Soient  $\Phi_a, \Phi_b, \Phi_c$  les flux traversant chaque phase à un instant donné, dans le plan (a, b, c), la machine est régie par les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_a = E_a - R_a i_a = -p\Phi_a - R_a i_a \\ V_b = E_b - R_a i_b = -p\Phi_b - R_a i_b \\ V_c = E_c - R_a i_c = -p\Phi_c - R_a i_c \end{cases} \quad \text{III.1}$$

$R_a$  : 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.

#### III.5.2 Transformation de Park

La mise en équation de la machine selon le modèle de Park est régie par les équations ci-après.

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

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

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

En appliquant aux tensions, courants et flux relatifs aux phases a, b et c, les transformations définies par les systèmes (III.2), (III.3), (III.4), on obtient le système d'équations de Park suivants.

- Dans le plan (d,q) :

$$\begin{cases} V_d = -p\Phi_d - \Phi_q \cdot p \cdot \theta - R_a i_d \\ V_q = -p\Phi_q + \Phi_d \cdot p \cdot \theta - R_a i_q \\ V_0 = -p\Phi_0 - R_a i_0 \end{cases} \quad \text{III.5}$$

$V_d, i_d$  : 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

$\Phi_d$  : Composante du flux tournant suivant l'axe direct du rotor

$\Phi_q$  : Composante du flux tournant suivant l'axe en quadrature du rotor

$\theta$  : Angle électrique de l'axe direct du rotor avec l'axe de la phase a

Si on pose :  $\frac{d\theta}{dt} = p \cdot \theta = \Omega_r$

$\Omega_r$  : vitesse de rotation du rotor de l'alternateur

On obtient :

$$\begin{cases} V_d = -p\Phi_d - \Phi_q \cdot \Omega_r - R_a i_d \\ V_q = -p\Phi_q + \Phi_d \cdot \Omega_r - R_a i_q \\ V_0 = -p\Phi_0 - R_a i_0 \end{cases} \quad \text{III.6}$$

Après transformation de Park, la machine peut être représentée par la figure III.2.

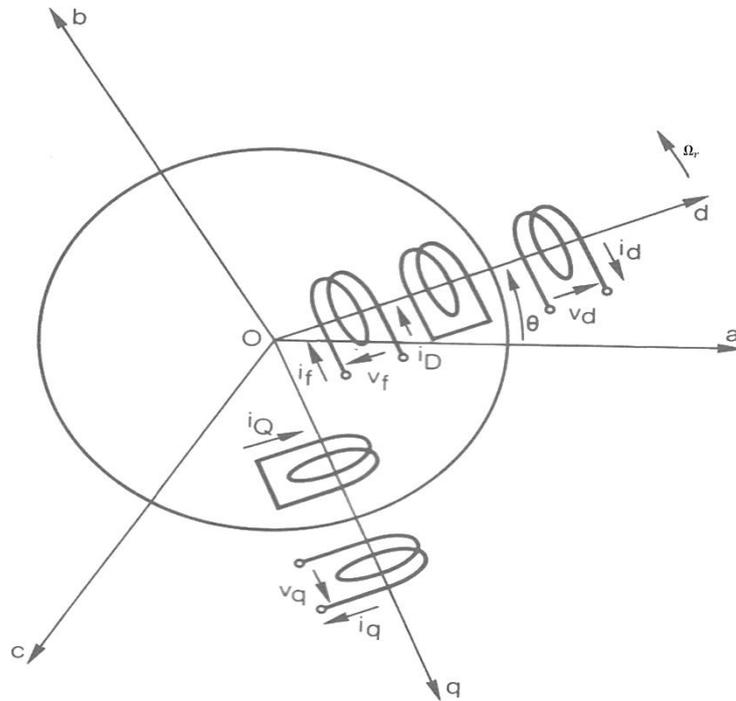


Figure III.2. Représentation schématique de la machine synchrone après transformation de Park. [4]

Dans la suite de notre étude, nous allons utiliser les deux premières équations (selon les axes d et q) du système d'équations (III.6), la composante homopolaire étant nulle.

### III.5.3. Equation électrique du rotor et des amortisseurs

#### 1. Enroulements inducteurs

L'inducteur est décrit par l'équation suivante :

$$V_f = p \cdot \Phi_f + R_f i_f \quad \text{III.7}$$

$V_f$  : Tension aux bornes de l'enroulement inducteur

$\Phi_f$  : Flux total embrassé par l'enroulement inducteur

$R_f$  : Résistance de l'enroulement inducteur

$i_f$  : Courant traversant l'enroulement inducteur

## 2. Amortisseurs

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

$$\begin{cases} 0 = p \cdot \Phi_{kd} + R_{kd} \cdot i_{kd} \\ 0 = p \cdot \Phi_{kq} + R_{kq} \cdot i_{kq} \end{cases} \quad \text{III.8}$$

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

Dans ce qui suit, nous donnons les équations relatives à une machine bipolaire.

#### III.5.4.1. Calcul des puissances

La puissance instantanée mise en jeu aux bornes de la machine dans le cas général, est la somme des puissances des trois phases :

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

Cette puissance est positive parce que la machine fonctionne en générateur ce qui est conforme aux conventions de signe.

On écrit les tensions ( $V_a, V_b, V_c$ ) en fonction de ( $V_d, V_q$ ) et les courants ( $i_a, i_b, i_c$ ) en fonction de ( $I_d, I_q$ ), en utilisant le système (III.6) nous aboutissons à l'équation suivante :

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

#### III.5.4.2. Calcul des couples

En remplaçant dans l'expression (III.9) les tensions  $V_d, V_q$  par les termes donnés dans le système d'équation (III.6)

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

- . 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  $P_{ei}$ .

$$P_{ei} = \frac{3}{2} (i_q \Phi_d - i_d \Phi_q) \Omega_r \quad \text{III.12}$$

$P_{ei}$  est la seule puissance contenue dans l'expression de  $P_i$ , qui soit susceptible de produire une puissance électrique, le facteur  $I \cdot \Phi$  représente le couple électromagnétique qui se produit à l'intérieur de la machine.

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

### III.5.4.3. Equations mécaniques de l'alternateur

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

$$J \cdot \frac{d^2 \theta}{dt^2} = C_m - C_e \quad \text{III.14}$$

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

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

### III.5.5. Equations magnétiques de la machine

Les relations entre les courants et les flux sont donnés sous les formes matricielles ci-dessous.

- Flux dans l'axe direct :

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

- Flux dans l'axe en quadrature:

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

Pour la machine multipolaire, les équations régissant la machine restent inchangées sauf celles du couple électromagnétique et l'équation du mouvement qui deviennent :

$$C_{ei} = \frac{3}{2} p_1 (i_q \Phi_d - i_d \Phi_q) \quad \text{III.17}$$

$$\frac{J}{P_1} \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} = C_m - C_e \quad \text{III.18}$$

$P_1$  : Nombre de paire de pôles

### III.6 Equations électriques et mécaniques de la machine sans amortisseurs

La forme des équations électriques et mécaniques est la même que celle de la machine avec amortisseurs (III.5, III.6, III.10, III.12, III.13, III.14)

Pour obtenir les équations magnétiques, il suffit de reprendre celles de la machine avec enroulements amortisseurs et de poser :

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

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

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

$$\Phi_q = L_q i_q \quad \text{III.20}$$

Les équations III.8 et III.19 subissent des transformations par regroupements de termes afin de faire apparaitre des grandeurs mesurables qui ont une signification physique précise.

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

En éliminant  $\Phi_f$  entre les deux dernières équations, on obtient :

$$i_f = \frac{V_f - \frac{3}{2} M_{af} \cdot p \cdot I_d}{R_f + L_f \cdot p} \quad \text{III.22}$$

En éliminant  $\Phi_f$  et  $I_f$  entre les trois équations du système (III.25) on obtient l'expression de  $\Phi_d$  :

$$\Phi_d = L_d \cdot \frac{1 + \frac{1}{R_f} \cdot (L_f - \frac{3/2 M_{af}^2}{L_d})}{1 + \frac{L_f}{R_f} \cdot p} \cdot p \cdot I_d + \frac{M_{af}}{R_f \cdot (1 + \frac{L_f}{R_f} \cdot p)} \cdot V_f \quad \text{III.23}$$

Dans cette expression on a :

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

$$\text{On posera : } L_f - \frac{3/2 M_{af}^2}{L_d} = N_f$$

- $\frac{1}{R_f} \cdot (L_f - \frac{3/2 M_{af}^2}{L_d}) = \frac{N_f}{R_f}$  : à la dimension d'une constante de temps.

$$\text{On posera : } \frac{N_f}{R_f} = T'_d$$

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

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

### III.7. Equations générales du groupe électrogène en charge

Nous donnons dans ce qui suit le récapitulatif des équations nous permettant d'étudier le groupe électrogène en charge.

$$V_d = -p\Phi_d - \Phi_q \cdot \Omega_r - R_d i_d$$

$$V_q = -p\Phi_q + \Phi_d \cdot \Omega_r - R_d i_q$$

$$\Phi_d = L_d I_d + M_{af} i_f + M_{akd} i_{kd}$$

$$\Phi_q = L_d I_d + M_{af} i_f + M_{akd} i_{kd}$$

$$C_{ei} = \frac{3}{2} p_1 (i_q \Phi_d - i_d \Phi_q)$$

$$\frac{J}{P_1} \cdot p \Omega_r = C_m - C_e$$

$$P_e = V_d i + V_q i_q$$

$$Q_e = V_d i_q - V_q i_d$$

$$V = \left( \frac{V_d^2 + V_q^2}{2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$i = \left( \frac{i_d^2 + i_q^2}{2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

### III.8. Détermination du régime permanent du groupe

Toutes les variations par rapport au temps seront annulées  $p = \frac{d}{dt} = 0$

L'indice " 0 " indique le régime permanent

$$V_{d0} = -\Phi_{q0} \cdot \Omega - R_a i_{d0}$$

$$V_q = +\Phi_{d0} \cdot \Omega - R_a i_{q0}$$

$$\Phi_{d0} = L_a i_{d0} + M_{af} i_{f0}$$

$$\Phi_{q0} = L_a i_{q0} + M_{af} i_{f0}$$

$$C_{e0} = \frac{3}{2} p_1 (i_q \Phi_d - i \Phi_q)$$

$$C_{e0} = C_m$$

$$\Omega_r = \Omega$$

$$P_{e0} = V_{d0} i_{d0} + V_{q0} i_{q0}$$

$$Q_{e0} = V_{d0} i_{q0} - V_{q0} i_{d0}$$

$$V_0 = \left( \frac{V_{d0}^2 + V_{q0}^2}{2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$i = \left( \frac{i_{d0}^2 + i_{q0}^2}{2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

### III.9. Modèle du groupe électrogène sous Sim Power System (SPS)

Sous SPS, la machine synchrone et la charge R-L sont modélisées par des sources de courants, pour cela une charge résistive pure est mise en parallèle pour ne pas avoir deux sources de courant en série. Le schéma global du modèle de simulation est donné sur la figure III.3.

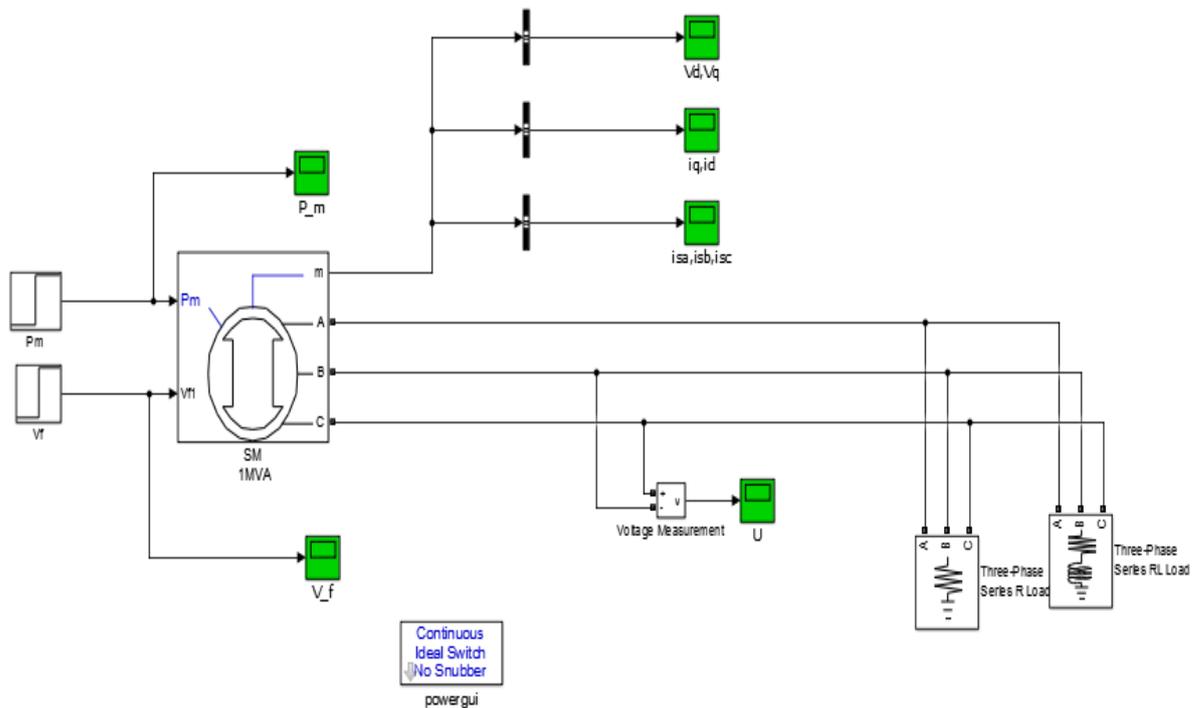


Figure III.3 : Modèle du groupe électrogène sous Sim Power System.

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 comporte également une sortie triphasée (a, b, c) qui se comporte comme une source de courant et une sortie "m" qui nous donne les signaux des différentes mesures des grandeurs de la machine.

Dans notre bloc de simulation les grandeurs d'entrées  $P_m$  et  $V_f$  seront introduites sous forme d'échelons de puissance et de tension respectivement.

### Détermination de la tension d'excitation nominale :

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

Calcul du courant d'excitation nominal :

En négligeant la saturation, on sait que l'équation de la droite de la caractéristique à vide de l'alternateur est :

$$E = \frac{(\omega_s * Maf)}{\sqrt{2}} I_f$$

### Remarque:

On sait que lorsque la valeur de la f.é.m interne "E" a pour valeur la tension nominale par phase "Vn" il faut que "I<sub>f</sub>" vaille le courant d'excitation nominale "I<sub>fn</sub>", donc on peut écrire :

$$V_n = B I_{fn}$$

Calcul de Maf :

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

$$Maf^2 = \frac{2}{3} \frac{(T'd_0 - T'd) * R_f * X_d}{\omega_s}$$

### Calcul des paramètres de la machine en unités réduites :

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

$$A_{(pu)} = \frac{A(SI)}{A_{base}}$$

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

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

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

**Calcul des grandeurs de base :**

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

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

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

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

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

Calcul de la résistance statoriques en pu :

$$R_a (\text{pu}) = \frac{Ra(SI)}{Z_{\text{base}}}$$

Calcul de l'inertie en "s"

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

Calcul de la tension d'excitation en pu :

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

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

$$K_f = 58.72$$

**Application numérique :****Calcul de la mutuelle Maf :**

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

$$Maf^2 = \frac{2}{3} \left( \frac{3.03 - 0.185}{314} \right) * 0.44$$

$$Maf^2 = 0.00554$$

$$Maf = 0.075 \Omega$$

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

$$I_{fn} = \frac{V_n}{16.65}$$

$$I_{fn} = \frac{230}{16.65}$$

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

D'où :

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

### Calcul des grandeurs de base :

Courant de base :

$$I_{\text{base}} = \sqrt{2}I_n$$

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

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

Tension de base :

$$V_{\text{base}} = \sqrt{2}V_n$$

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

Puissance de base :

$$P_{\text{base}} = S_n$$

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

Impédance de base :

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

$$Z_{\text{base}} = \frac{325.26}{2049.57}$$

$$Z_{\text{base}} = 0.16 \Omega$$

Pulsation de base :

$$\omega_{\text{base}} = 2 \cdot \pi \cdot f_n$$

$$\omega_{\text{base}} = 2 \cdot 3.14 \cdot 50$$

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

### Calcul des grandeurs en unités réduites

Calcul de la résistance statoriques en pu :

$$R_a (\text{pu}) = \frac{R_s(SI)}{Z_{\text{base}}}$$

$$R_a (\text{pu}) = \frac{0.002}{0.16}$$

$$R_a (\text{pu}) = 0.0125$$

Calcul de l'inertie en seconde :

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

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

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

Calcul de la puissance mécanique en pu :

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

$$P_m(\text{pu}) = \frac{842000}{1000000}$$

$$P_m(\text{pu}) = 0.842$$

La tension d'excitation en pu

$$V_f(\text{pu}) = 3.484$$

- Echelon de tension d'excitation

La tension d'excitation de l'alternateur est introduite sous la forme d'un échelon de tension d'amplitude 3.484 (pu) (figure III.4).

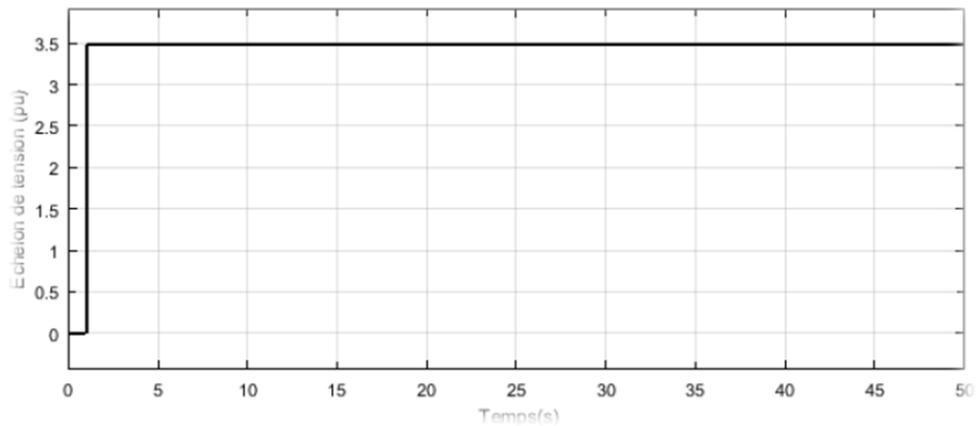


Figure III.4. Echelon de la tension d'excitation

- La puissance mécanique délivrée par le moteur thermique du groupe électrogène est introduite sous la forme d'un échelon de puissance de 0.842 (pu) (Figure III.5).

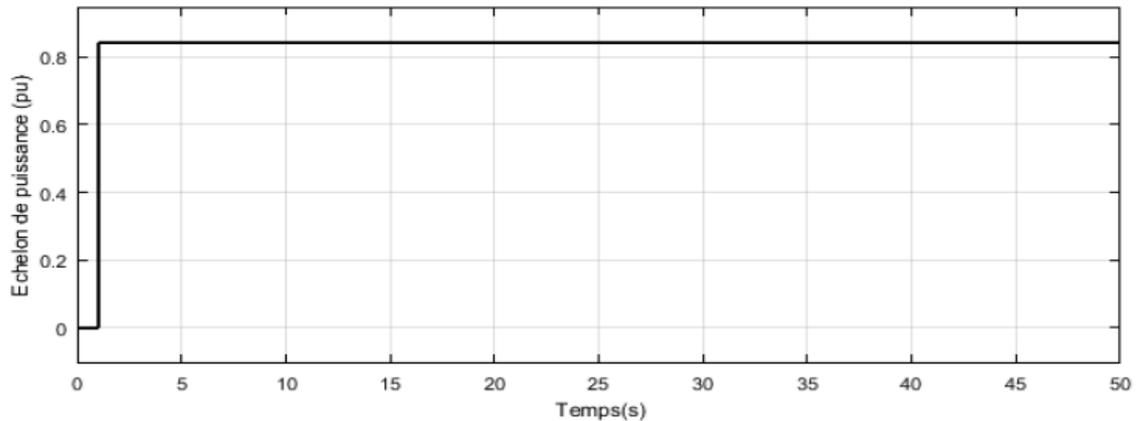


Figure III.5. Echelon de puissance

### III.10 Simulation du modèle en boucle ouverte :

#### - Charge R, L

Après avoir simulé sur MATLAB Simulink (SPS), nous donnons les résultats de simulation du groupe pour une charge linéaire nominale en boucle ouverte. Les valeurs nominales des puissances : active P et réactive Q sont :  $P = 800000$  W et  $Q = 600000$  VAR.

La tension entre phases sur une durée de 50s est donnée sur la figure III.6. Un zoom de cette tension correspondant au régime permanent est donné sur la figure III.7.

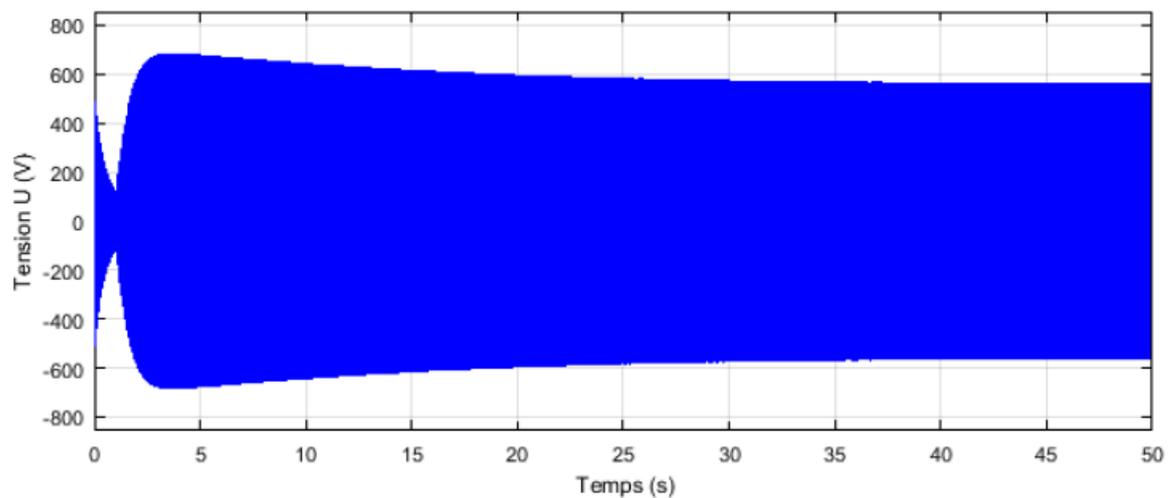


Figure III.6. Tension entre phases aux bornes de la charge.

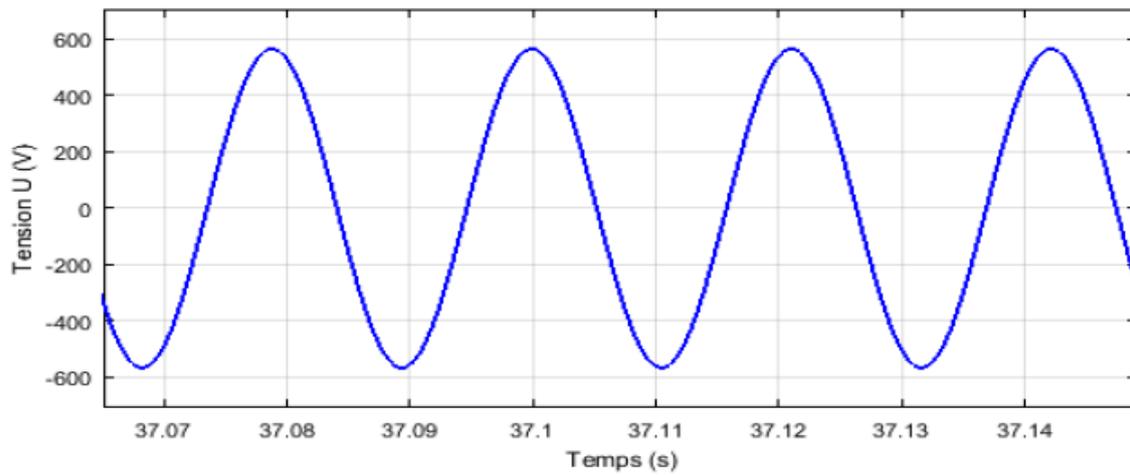


Figure III.7. Zoom de la tension entre phases aux bornes de la charge.

Nous donnons sur la figure III.8 les courants des trois phases et un zoom de ces courants sur la figure III.9.

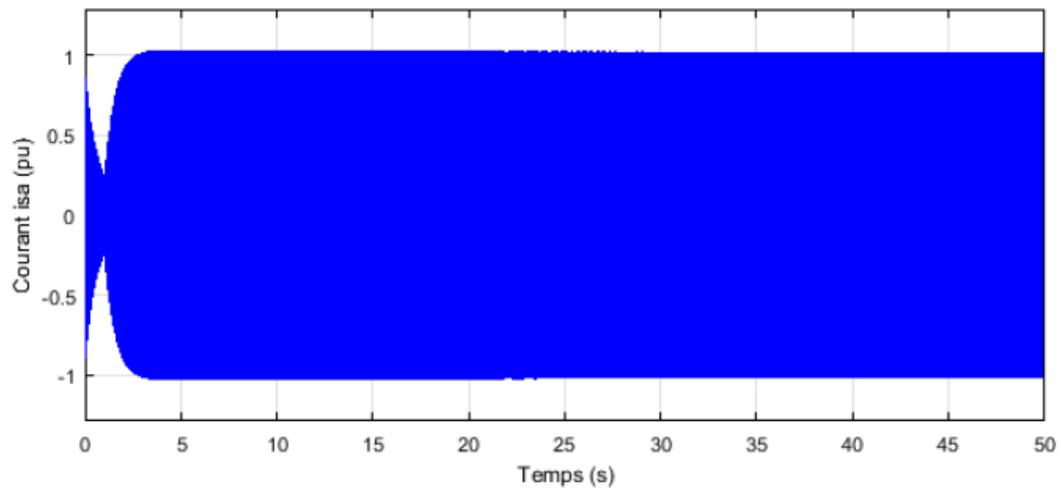


Figure III.8. Courants traversant les trois phases de la charge

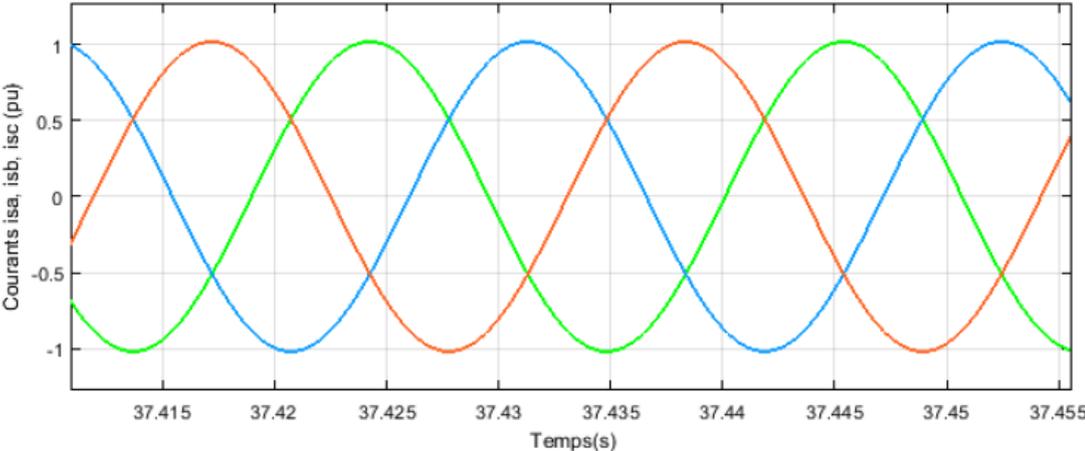


Figure III.9. Zoom des courants traversant la charge.

Nous donnons sur les figures III.10 et III.11 les tensions et les courants dans les axes d et q.

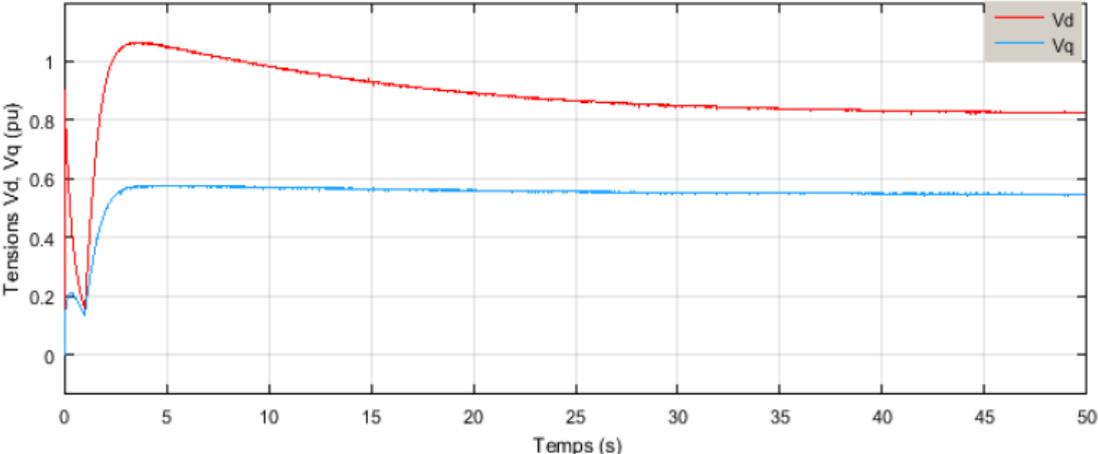
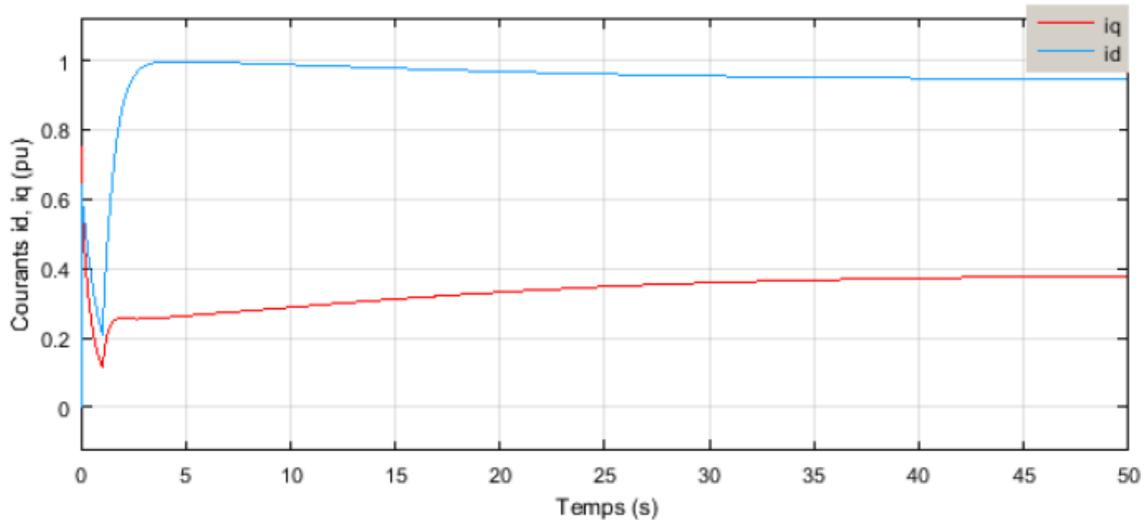


Figure III.10. Tensions Vd et Vq

Figure III.11. Courants  $i_d$  et  $i_q$ 

### III.11. Interprétations des courbes obtenues

La figure III.6 nous donne le comportement de la tension aux bornes de la charge après application des échelons de puissance (puissance mécanique) et de tension (excitation). On remarque que la tension a une forme sinusoïdale et augmente progressivement avec le temps puis se stabilise après 37 secondes environ. La tension entre phases atteint des valeurs proches des grandeurs nominales, ce qui montre que les chutes de tension sont minimales. Pour pallier à ce problème il faut s'équiper d'un régulateur de tension qui surveille la tension aux bornes de la charge en agissant sur le courant d'excitation.

La figure III.9 montre le comportement du courant débité par l'alternateur pour chaque phase. Nous remarquons que les trois courants ont une même valeur et une forme sinusoïdale et sont déphasés d'un même angle les uns des autres. Pendant le régime transitoire, le courant débité par l'alternateur est un peu élevée par rapport au courant au régime nominal et cela est dû aux contraintes mécaniques sur le rotor.

Les figures III.10 et III.11 montrent les composantes de la tension dans le plan de Park. On remarque que les courbes ont une réponse de même forme (exponentielle).

# **Conclusion générale**

Les groupes électrogènes constitués d'un moteur et d'un alternateur sont souvent installés dans les sites industriels et bâtiments commerciaux, soit en tant que principal fournisseur de l'énergie électrique, ou bien pour assurer l'alimentation des charges essentielles lors d'une défaillance du réseau de distribution publique. Le groupe électrogène, dans ses applications secours ou production, présente des avantages liés à :

- un large éventail de puissance
- la rapidité de sa mise en œuvre
- sa capacité à fonctionner pendant de longues périodes

Ces avantages lui confèrent une position principale loin devant toutes les autres sources de remplacement. Il est donc permis d'affirmer que le groupe électrogène est toujours un produit d'avenir, d'autant que les performances du moteur diesel s'améliorent constamment dans les domaines du rendement de la fiabilité et de la pollution.

L'étude que nous avons réalisée nous a permis de comprendre le fonctionnement d'un groupe électrogène. Cette étude réalisée sous Matlab nous a permis également d'approfondir nos connaissances en simulation.

Nous avons effectué une étude du groupe électrogène en boucle ouverte. Les entrées de la machine sont représentées par un échelon de puissance pour la puissance mécanique et un échelon de tension pour l'excitation de l'alternateur. Nous avons relevé la tension entre phases, les courants des trois phases ainsi que les composantes des tensions et des courants dans les axes direct et en quadrature. La tension a une forme sinusoïdale et augmente progressivement avec le temps jusqu'à trois ou cinq fois la constante du temps mécanique ( $3\tau$  ou  $5\tau$ ) ou nous pouvons dire que le régime permanent est atteint. La tension entre phases atteint des valeurs proches des grandeurs nominales, ce qui montre que les chutes de tension sont minimales.

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
- L'étude en boucle fermée pour travailler à fréquence et tension constantes.
- Confronter les résultats de simulation à des résultats expérimentaux.

# **Références bibliographiques:**

- [1] B. Colin, "Groupes électrogènes de secours", Techniques de l'ingénieur, 2008.
- [2] M. Desbazeille, "Diagnostic de groupes électrogènes diesel par analyse de vitesse de vilebrequin", Thèse de Doctorat à l'université de Jean Monnet, 2011.
- [3] B. Tounsi, "Etude comparative des groupes électrogènes embarqués a large gamme de vitesse variable associant machines à aimants permanent et convertisseur statique", Thèse de Doctorat à l'institut polytechnique de Toulouse, 2007.
- [4] P. Barret, "Régimes transitoires des machines électriques tournantes", Edition EYROLLES, 1987.
- [5] T. Hazel, " Génération électrique intégrée aux sites industriels et bâtiments commerciaux" Cahier technique Schneider N° 196.
- [6] J. Delmas, "Catalogue groupe électrogène CAT"
- [7] "Compact, Interpact et Masterpact Inverseur de source", catalogue Schneider Electric 2007.
- [8] N. Toumi, "Etude d'une pompe à eau solaire pour alimenter un chantier pétrolière" Mémoire de Magister université Ouargla, 2013
- [9] J.L Dalmasso "Cours d'électrotechnique" ' machines à courant alternatifs' Edition Belin 1985
- [10] "Dossier groupe électrogène "Contexte et problématique". F2A Equipementier en traitement de l'air
- [11] [www.Schneider-electric.com](http://www.Schneider-electric.com) "Régimes du neutre".

[12] M. MIARD "Circuit de démarrage"

[13]FG .Wilson "Manuel d'utilisation et d'entretien des groupes électrogènes"

[14] Système de refroidissement "[http://www.profauto.fr/2-apports \\_théoriques /Refroidissement.pdf](http://www.profauto.fr/2-apports_theoriques/Refroidissement.pdf) ", consulté le 10/07/2016

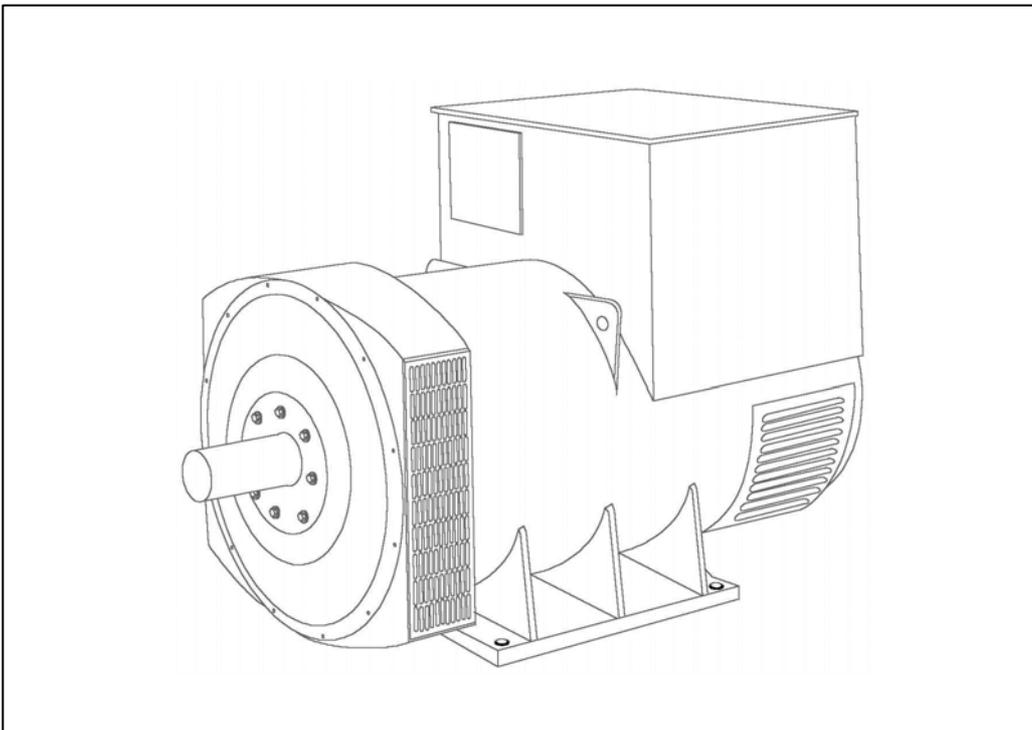
[15] <http://portable.generatorguide.net/avr.html>, consulté le 10/07/2016

# **Annexe 1**

## Annexe 1



## HCI634J - Technical Data Sheet



**WINDING 312**

|                         |  |                          |  |
|-------------------------|--|--------------------------|--|
| CONTROL SYSTEM          | SEPARATELY EXCITED BY P.M.G.                     |                          |  |
| A.V.R.                  | MX321  |                          |  |
| VOLTAGE REGULATION      | ± 0.5 %  | With 4% ENGINE GOVERNING |  |
| SUSTAINED SHORT CIRCUIT | REFER TO SHORT CIRCUIT DECREMENT CURVES (page 7) |                          |  |

|                        |   |
|------------------------|---|
| INSULATION SYSTEM      | CLASS H   |
| PROTECTION             | IP23  |
| RATED POWER FACTOR     | 0.8   |
| STATOR WINDING         | DOUBLE LAYER LAP  |
| WINDING PITCH          | TWO THIRDS  |
| WINDING LEADS          | 6   |
| STATOR WDG. RESISTANCE | 0.002 Ohms PER PHASE AT 22°C STAR CONNECTED   |
| ROTOR WDG. RESISTANCE  | 2.09 Ohms at 22°C   |
| R.F.I. SUPPRESSION     | BS EN 61000-6-2 & BS EN 61000-6-4,VDE 0875G, VDE 0875N. refer to factory for others |
| WAVEFORM DISTORTION    | NO LOAD < 1.5% NON-DISTORTING BALANCED LINEAR LOAD < 5.0%                           |
| MAXIMUM OVERSPEED      | 2250 Rev/Min  |
| BEARING DRIVE END      | BALL. 6224 (ISO)  |
| BEARING NON-DRIVE END  | BALL. 6317 (ISO)  |

|                             | 1 BEARING                | 2 BEARING                |
|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|
| WEIGHT COMP. GENERATOR      | 2279 kg                  | 2300 kg                  |
| WEIGHT WOUND STATOR         | 1120 kg                  | 1120 kg                  |
| WEIGHT WOUND ROTOR          | 962 kg                   | 916 kg                   |
| WR <sup>2</sup> INERTIA     | 22.9287 kgm <sup>2</sup> | 22.3814 kgm <sup>2</sup> |
| SHIPPING WEIGHTS in a crate | 2328kg                   | 2329kg                   |
| PACKING CRATE SIZE          | 183 x 92 x 140(cm)       | 183 x 92 x 140(cm)       |

|  | 50 Hz                 |         |         |         | 60 Hz                 |         |         |         |
|--|-----------------------|---------|---------|---------|-----------------------|---------|---------|---------|
| TELEPHONE INTERFERENCE                   | THF<2%                |         |         |         | TIF<50                |         |         |         |
| COOLING AIR                              | 1.614 m³/sec 3420 cfm |         |         |         | 1.961 m³/sec 4156 cfm |         |         |         |
| VOLTAGE STAR                             | 380/220               | 400/231 | 415/240 | 440/254 | 416/240               | 440/254 | 460/266 | 480/277 |
| VOLTAGE DELTA                            | 220                   | 230     | 240     | 254     | 240                   | 254     | 266     | 277     |
| kVA BASE RATING FOR REACTANCE VALUES     | 1000                  | 1000    | 1000    | 1000    | 1150                  | 1200    | 1250    | 1300    |
| X <sub>d</sub> DIR. AXIS SYNCHRONOUS     | 3.02                  | 2.73    | 2.54    | 2.26    | 3.49                  | 3.25    | 3.10    | 2.96    |
| X' <sub>d</sub> DIR. AXIS TRANSIENT      | 0.24                  | 0.22    | 0.20    | 0.18    | 0.28                  | 0.26    | 0.25    | 0.24    |
| X'' <sub>d</sub> DIR. AXIS SUBTRANSIENT  | 0.17                  | 0.15    | 0.14    | 0.12    | 0.19                  | 0.18    | 0.17    | 0.16    |
| X <sub>q</sub> QUAD. AXIS REACTANCE      | 1.78                  | 1.61    | 1.50    | 1.33    | 2.05                  | 1.91    | 1.82    | 1.74    |
| X'' <sub>q</sub> QUAD. AXIS SUBTRANSIENT | 0.21                  | 0.19    | 0.18    | 0.16    | 0.25                  | 0.23    | 0.22    | 0.21    |
| X <sub>L</sub> LEAKAGE REACTANCE         | 0.09                  | 0.08    | 0.08    | 0.07    | 0.10                  | 0.10    | 0.09    | 0.09    |
| X <sub>2</sub> NEGATIVE SEQUENCE         | 0.21                  | 0.19    | 0.18    | 0.16    | 0.25                  | 0.23    | 0.22    | 0.21    |
| X <sub>0</sub> ZERO SEQUENCE             | 0.03                  | 0.02    | 0.02    | 0.02    | 0.03                  | 0.03    | 0.03    | 0.03    |

VALUES ARE PER UNIT AT RATING AND VOLTAGE INDICATED

|           |       |
|-----------|-------|
| T'd (s)   | 0.185 |
| T''d (s)  | 0.025 |
| T'do.(s)  | 3.03  |
| T''d0 (s) | 0.05  |
| T''q (s)  | 0.08  |
| T''qo.(s) | 0.05  |

| DONNEES GENERALES - GENERAL DATA |                            |
|----------------------------------|----------------------------|
| Version - Version                | S                          |
| PRP kVA                          | 1.000,0                    |
| PRP kW                           | 800,0                      |
| LTP kVA                          | 1.100,0                    |
| LTP kW                           | 880,0                      |
| Cos-fi - Power factor            | 0,8                        |
| Tension - Voltage (VAC)          | 400                        |
| Fréquence - Frequency (Hz)       | 50                         |
| Phases - Phases                  | Triphasé - Threephases     |
| Neutre - Neutral                 | Avec neutre - With neutral |
| Capotage - Canopy                | C65                        |
| Modèle châssis - Baseframe Model | ST65                       |
| Capacité - Capacity (l)          | 400                        |

MODELE - MODEL

**MT 1000 S**

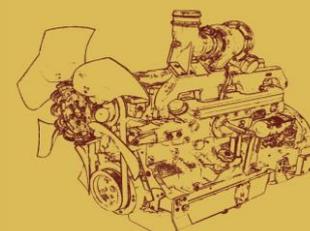
**POWERFULL**

| DIMENSIONS*-DIMENSIONS*    |             |
|----------------------------|-------------|
| Longueur - Length (-L- mm) | 8.600       |
| Largeur - Width (-W- mm)   | 2.200       |
| Hauteur - Height (-H- mm)  | 3.400       |
| Poids - Weight (kg)        | N.D. - N.A. |

NON DISPONIBILE  
 NOT AVAILABLE  
 NICHT VERFUGBAR  
 PAS DISPONIBILE  
 NO DISPONIBILE  
 NAO DISPONIVEL

| BRUIT - NOISE                       |             |
|-------------------------------------|-------------|
| Pression sonore-Sound Pr. (7mt dBA) | N.D. - N.A. |
| Puissance sonore-Sound Pow. (dBA)   | N.D. - N.A. |

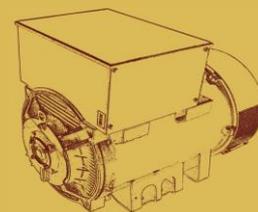
| DONNEES MOTEUR - ENGINE DATA                                 |                               |
|--|-------------------------------|
| Marque - Brand   | MTU                           |
| Modèle - Model   | 16V2000G65                    |
| Tours/min - RPM  | 1.500                         |
| Régulation tours - Speed regulator                           | Electronique - Electronic     |
| Classe régulateur - Regulator class                          | N.D. - N.A. Standard          |
| Régulation électronique - Electronic governor                | - Standard Eau -              |
| Refroidissement - Cooling                                    | Water                         |
| Aspiration - Air intake                                      | Turbo-comprimé - Turbocharged |
| Cylindres - Cylinders  | 16                            |
| Cylindrée - Cubic capacity (l)                               | 31,8                          |
| Tension - Voltage (VDC)                                      | 24                            |
| Puissance au volant PRP - PRP flywheel Power (kWm)           | 842,0                         |
| Puissance au volant LTP - LTP flywheel Power (kWm)           | 931,0                         |
| BMEP (kPa)   | 2.240                         |
| Poids - Weight (kg)  | 3.100                         |
| Consommation LTP - Fuel consumption LTP (l/h)                | 222,0                         |
| Consommation 100% - Fuel consumption 100% (l/h)              | 201,0                         |
| Consommation 75% - Fuel consumption 75% (l/h)                | 149,0                         |
| Consommation 50% - Fuel consumption 50% (l/h)                | 102,0                         |
| Consommation 25% - Fuel consumption 25% (l/h)                | 56,2                          |
| Quantité antigel radiateur - Radiator cooling liquid qty (l) | N.D. - N.A.                   |
| Quantité antigel moteur - Engine cooling liquid qty (l)      | 110,0                         |
| Quantité huile - Oil qty (l)                                 | 92,0                          |
| Absorption ventilateur - Fan loss (kW)                       | 44,0                          |
| Chaleur émis - Heat to radiation (kW)                        | 45,0                          |
| Chaleur gaz d'échappement - Heat to exhaust (kW)             | N.D. - N.A.                   |
| Chaleur liquide de refroidissement - Heat to coolant (kW)    | 400,0                         |
| Température gaz d'échappement - Exhaust temp. (°C)           | 530,0                         |
| Débit air de refroidissement - Cooling air flow (m3/min)     | N.D. - N.A.                   |
| Débit air de combustion - Combustion air flow (m3/min)       | 66,0                          |
| Débit gaz d'échappement - Exhaust gas flow (m3/min)          | 177,0                         |
| Emissioné TA Luft - TA Luft emissions                        | Standard - Standard           |
| Emissioné TA Luft 2000 - TA Luft 2000 emissions              | N.D. - N.A.                   |
| Emissioné EPA - EPA emissions                                | N.D. - N.A.                   |
| Emissioné EU97/68 - EU97/68 emissions                        | N.D. - N.A.                   |



\* DESSIN GÉNÉRIQUE SEULEMENT POUR ILLUSTRER, POUR LES DÉTAILS VISITER WWW.VISAEVOLUTION.COM

**DONNEES ALTERNATEUR - ALTERNATOR DATA**

|   |          |
|---|----------|
| Marque - Brand  | STAMFORD |
| Modèle - Model  | HCI6J    |
| Puissance continue (cl. H kVA) - Contin. Power (H cl.kVA) | 1.000,0  |
| Puissance continue (cl. H kW) - Contin. Power (H cl.kW)   | 800,0    |
| Puissance stand by - Stand by power (kVA)                 | 1.100,0  |
| Puissance stand by - Stand by power (kW)                  | 880,0    |
| Régulateur électronique - Electronic governor             | MX321    |
| Protection IP - IP protection                             | 23       |
| Précision - Precision (+/- %)                             | 0,5      |
| Rendement - Efficiency (%)                                | 95,0     |
| Poids - Weight (kg)                                       | 2.268    |



**DONNEES TABLEAUX ELECTRIQUES - CONTROL PANEL**

**BORNIER PW005 - PW005 TERMINAL BOX**

|                                    |                               |
|------------------------------------|-------------------------------|
| Type disjoncteur - Breaker type    | Sans disjoncteur - No breaker |
| Temp. ambiante - Ambient Temp (°C) | 40                            |
| Protection IP - IP Protection      | 44                            |

PW005



**GUARD EVOLUTION - GUARD EVOLUTION**

|                                    |                |
|------------------------------------|----------------|
| Version - Version                  | Toutes - All   |
| Courant - Current (A)              | 1443           |
| Type disjoncteur - Breaker type    | ABB S7S 1600 A |
| Temp. ambiante - Ambient Temp (°C) | 40             |
| No. pôles - Poles nr.              | 3/4            |
| Protection IP - IP Protection      | 2X             |

GUARD EVOLUTION



**TABLEAU ATS - ATS PANEL**

|                                       |                           |
|---------------------------------------|---------------------------|
| Courant - Current (A)                 | 1443                      |
| Type inverseur - Transfer switch type | Technoelectric CS5 2000 A |
| Temp. ambiante - Ambient Temp (°C)    | 40                        |
| No. pôles - Poles nr.                 | 3/4                       |
| Protection IP - IP Protection         | -                         |

ATS



**TABLEAU IN SYNC - IN SYNC PANEL**

|                                    |                |
|------------------------------------|----------------|
| Courant - Current (A)              | 1443           |
| Type disjoncteur - Breaker type    | ABB S7S 1600 A |
| Temp. ambiante - Ambient Temp (°C) | 40             |
| No. pôles - Poles nr.              | 3/4            |
| Protection IP - IP Protection      | 2X             |

IN SYNC



**DONNEES ACCESSORIES - ACCESSORIES DATA**

|  |           |
|--|-----------|
| Modèle échappement - Silencer model                      | MSR/a 150 |
| Diamètre échappement - Silencer diameter (mm)            | 168,0     |
| Modèle flexible de décharge - Bellows                    | DN150     |
| Diamètre flexible de décharge - Flexible pipe diam. (mm) | 168,0     |
| Capacité batterie - Battery capacity (Ah)                | 220       |
| Quantité batterie - Battery qty (nr)                     | 4         |



QUALITY SYSTEM CERTIFIED ISO 9001-2000 / 14001-2004

**VISA S.p.A.**

via Vallonto, 53

31043 Fontanelle (TV) -ITALY-

TEL. +39 0422 5091 FAX +39 0422 509350

visa@visa.it - www.visa.it

Conditions de référence standard: température 25 °C, altitude 1-1000 mt. S.N.M., humidité relative 30%, pression atmosphérique 100 kPa (1 bar), facteur de puissance 0.8 en retard. Charge appliqué équilibré, pas de distorsion. Les valeurs de puissance mentionnés sont conformes au standard ISO8528-1.  
Standard reference conditions 25 °C temperature, altitude 1-1000 mt. A.S.L., R. humidity 30%, atmospheric pressure 100 kPa (1 bar), power factor 0.8 lag, load balanced, non distortional. The mentioned power values are according to ISO8528-1 standards.