

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Université A. MIRA – BEJAIA**



**Faculté de Technologie**

**Département de Génie électrique**

**Spécialité : Machines Electriques**

## **MEMOIRE DE FIN D'ETUDE**

En vue de l'obtention du diplôme de Master

**Thème**

### **Etude d'un groupe électrogène à base d'une génératrice asynchrone**

**Réalisé par :**

- BEDJOU Fayçal
- CHIKOU Kaci

**Présenté devant le jury composé de :**

- |                       |              |
|-----------------------|--------------|
| ➤ Mr TAMALOUZT Salah  | Président    |
| ➤ Mr ALITOUCHE Karim  | Examineur    |
| ➤ Mr AOUZELLAG Djamel | Encadreur    |
| ➤ Mr MERNACHE Hamza   | Co-encadreur |

**Promotion 2021/2022**

# *Remerciements*

*Ce travail a été réalisé au sein de l'université Abderrahmane Mira-Bejaïa.*

*Tout d'abord, nous tenons à remercier DIEU le tout puissant de nous avoir accordé  
santé et courage pour accomplir ce travail.*

*Nous tenons à remercier vivement messieurs les membres du jury d'avoir consacré de  
leurs temps à la lecture de ce manuscrit, et d'accepter de juger et d'évaluer ce travail.*

*Nous remercions chaleureusement notre promoteur Professeur Mr **AOUZELLAG  
DJAMAL**, pour sa démarche et son exigence scientifique qui nous ont permis de  
prendre de bonnes leçons pour la suite de notre parcours. Il a été le garant des  
orientations de ce travail.*

*Nous remercions également notre Co-promoteur Mr **MERNACHE HAMZA** pour son  
aide précieuse.*

*Nous remercions nos familles et nos amis pour leur aide, soutien et encouragement  
durant notre cursus universitaire, ainsi que toute personne ayant participé de près ou  
de loin dans notre formation et à tous ceux qui nous ont soutenus depuis le début pour  
arriver là où nous sommes aujourd'hui.*

## *Dédicaces 1*

*Ce travail est dédié à mon très cher père, grand symbole de force et de courage.  
A la personne la plus chère à mon cœur, ma mère car c'est grâce à son soutien  
que j'ai pu arriver à ce stade; je souhaite que ce travail soit à la hauteur de tout  
ce qu'ils ont pu faire pour moi.*

*A mes très chers frères et sœurs :  
Aissa, Mazigh, Salima, Thileli, Faiza et Nadjat, en signe d'amour, de  
reconnaissance et de gratitude.*

*En hommage à mon oncle Yazid Chikou, qu'il repose en paix.*

*Une spéciale dédicace pour mes meilleurs amis :*

*Housseem, Chamsou, Madjid, laarbi, koukou, lhachemi, Samir, Houcin*

*Et bien-sûr à Tina qui m'a tant aidé et motivé*

*Sans oublier toutes personnes qui me connaissent de loin ou de près, en  
particulier : la classe de M2 Machines électriques.*

Chikou Kaci

## *Dédicaces 2*

*Ce projet fin d'étude est dédié à mes chers parents, qui m'ont toujours inspiré et motivé dans mes études.*

*Sans eux, je n'aurais jamais pu atteindre mes objectifs. Ce projet de fin d'étude est le résultat du soutien et des encouragements qu'ils m'ont voué tout au long de ma scolarité. Qu'ils en soient remerciés par cette modeste dédicace.*

*A ma très chère grand-mère que DIEU la préserve.*

*C'est un moment de plaisir de dédier cet œuvre, à mes frères et sœurs : Elhachemi et sa femme Amina, Oussama, Sara, Kenza et ma petite Maryouma, en signe d'amour, de reconnaissance et de gratitude pour le dévouement et les sacrifices dont vous avez fait toujours preuve à mon égard.*

*En hommage à mon cousin Sofiane Bessai, qu'il repose en paix.*

*Et finalement, à mes amis qui n'ont jamais cessé de me soutenir.*

Bedjou Fayçal

## *Table des matières*

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>I Généralités sur les groupes électrogènes .....</b>	<b>2</b>
<b>I.1 Introduction .....</b>	<b>2</b>
<b>I.2 Définition du groupe électrogène .....</b>	<b>2</b>
<b>I.2.1 Puissance continue .....</b>	<b>2</b>
<b>I.2.2 Puissance de secours .....</b>	<b>3</b>
<b>I.2.3 Groupe électrogène fonctionnant à vitesse fixe .....</b>	<b>4</b>
<b>I.2.4 Groupe électrogène fonctionnant à vitesse variable .....</b>	<b>4</b>
<b>I.3 Constitution d'un groupe électrogène.....</b>	<b>4</b>
<b>I.3.1 Moteur thermique.....</b>	<b>4</b>
<b>I.3.2 Génératrice synchrone.....</b>	<b>8</b>
<b>I.3.3 Génératrice asynchrone.....</b>	<b>11</b>
<b>I.4 Accessoires du groupe électrogène .....</b>	<b>15</b>
<b>I.4.1 Coffret de commande .....</b>	<b>15</b>
<b>I.4.2 Coffret de contrôle .....</b>	<b>16</b>
<b>I.4.3 Tableau inverseur de source automatique.....</b>	<b>16</b>
<b>I.4.4 Synchronoscope.....</b>	<b>16</b>
<b>I.4.5 Batterie.....</b>	<b>16</b>
<b>I.4.6 Chargeur de batterie.....</b>	<b>16</b>
<b>I.5 Système de contrôle de tension et de fréquence pour les groupes électrogènes .</b>	<b>16</b>
<b>I.6 Conclusion .....</b>	<b>18</b>
<b>II Modélisation des différentes parties du groupe électrogène à étudier ..</b>	<b>18</b>
<b>II.1 Introduction .....</b>	<b>18</b>
<b>II.2 Modélisation de la machine asynchrone.....</b>	<b>18</b>
<b>II.2.1 Equations électriques.....</b>	<b>19</b>
<b>II.2.2 Equations magnétiques.....</b>	<b>20</b>
<b>II.2.3 Equations mécanique et de couple électromagnétique .....</b>	<b>22</b>
<b>II.3 Transformation de Park .....</b>	<b>23</b>
<b>II.3.1 Différents repères.....</b>	<b>23</b>
<b>II.3.2 Modélisation de la MAS dans le plan biphasé <math>dqo</math> .....</b>	<b>23</b>
<b>II.3.3 Equations des tensions.....</b>	<b>24</b>

II.3.4	Equations magnétiques.....	24
II.3.5	Equations de couple électromagnétique.....	25
II.3.6	Equation d'auto-amorçage.....	25
II.3.7	Limite de modèle linéaire .....	26
II.3.8	Modélisation de la génératrice asynchrone en régime non-linéaire (saturé)..	26
II.3.9	Phénomène d'effet croisée .....	26
II.3.10	Mise en œuvre du modèle saturé dans le référentiel de Park .....	27
II.4	Modélisation du moteur thermique .....	29
II.5	Conclusion .....	30
<b>III</b>	<b>Identification et simulation de la génératrice asynchrone .....</b>	<b>31</b>
III.1	Introduction .....	31
III.2	Identification des paramètres de la génératrice asynchrone .....	31
III.2.1	Banc d'essai expérimental.....	31
III.2.2	Essai Volt-ampèremétriques .....	33
III.2.3	Détermination des pertes mécaniques.....	33
III.2.4	Détermination de la résistance de magnétisation.....	34
III.2.5	Détermination de l'inductance propre cyclique statorique et de la résistance magnétisante (Essai au synchronisme).....	35
III.2.6	Détermination de $l_{fs}$ , $l'_{fr}$ , $L_m$ et $R'_r$ (Essai à rotor bloqué).....	39
III.2.7	Détermination des paramètres mécaniques.....	43
III.2.8	Identification et approximation de l'inductance de magnétisation $L_m$ .....	44
III.3	Simulation de la machine asynchrone en fonctionnement moteur .....	45
III.4	Simulation de la génératrice asynchrone en régime linéaire .....	48
III.5	Simulation de la génératrice asynchrone en régime non linéaire .....	50
III.6	Etude de la génératrice asynchrone auto-excitée.....	51
III.6.1	Essai à vide.....	51
III.6.2	Essai en charges équilibrées .....	54
III.6.3	Charges déséquilibrées .....	62
III.7	Conclusion .....	64
	<b>Conclusion générale .....</b>	<b>65</b>
	<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>67</b>

## *Liste des figures*

Fig.I.1 - Photo d'un groupe électrogène .....	4
Fig.I.2 - Admission.....	5
Fig.I.3 - Compression.....	5
Fig.I.4 - Détente .....	6
Fig.I.5 - Echappement .....	6
Fig.I.6 - Système de refroidissement d'un groupe électrogène .....	7
Fig.I.7 - Stator d'une machine synchrone .....	9
Fig.I.8 - Différents types du rotor de la MS .....	9
Fig.I.9 – Rotor d'une génératrice synchrone à deux étages .....	10
Fig.I.10 - Génératrice synchrone à triple étages.....	10
Fig.I.11- Schéma d'auto excitation d'une génératrice synchrone .....	11
Fig.I.12 - Stator d'une MAS.....	11
Fig.I.13 - Rotor à cage d'écureuil .....	12
Fig.I.14 - Rotor bobiné.....	12
Fig.I.15 - Auto-amorçage d'une génératrice asynchrone en fonctionnement autonome .....	13
Fig.I.16 - Exemple d'une génératrice monophasée excitée avec un condensateur et un redresseur à diode.....	14
Fig.I.17 - Exemples de génératrices monophasée à une et deux diodes .....	14
Fig.I.18 - Tableau de commande et de contrôle de fonctionnement .....	15
Fig.I.19 - Chargeur de batterie .....	16
Fig.I.20 - Système de régulation de la tension par AVR.....	17
Fig.II.1 - Représentation d'une machine électrique généralisée triphasée.....	18
Fig.II.2 - Référentiel tournant d'axe ( $d$ et $q$ ) .....	23
Fig.III.1 - Appareils de mesure utilisée.....	32
Fig.III.2 - Oscilloscope numérique (Siglent Shs806).....	32
Fig.III.3 - Banc d'essai expérimental .....	32
Fig.III.4 – Schéma de montage .....	33
Fig.III.5 - Schéma équivalent par phase, l'essai au synchronisme .....	35
Fig.III.6 – Schéma de montage de l'essai au synchronisme .....	35
Fig.III.7 - Evolution de la tension et du courant lors de l'essai au synchronisme .....	37
Fig.III.8 - Allures de la tension efficace, du courant efficace et du déphasage .....	37
Fig.III.9 - Evolution des puissances active et réactive par phase lors de l'essai au synchronisme.....	38
Fig.III.10 - Evolution de l'inductance cyclique $L_s$ .....	38
Fig.III.11 - Schéma équivalent par phase ramené au stator l'essai à rotor bloqué.....	39
Fig.III.12 - Evolution de la tension et du courant lors de l'essai à rotor bloqué.....	40
Fig.III.13 - Allures de la tension efficace, du courant efficace et du déphasage (à rotor bloqué) .....	41
Fig.III.14 - Evolution des puissances active et réactive lors de l'essai à rotor bloqué.....	41
Fig.III.15 – Evolution de l'inductance de fuite $l_{f_s}$ .....	42

Fig.III.16 - Evolution de la résistance équivalent $R_{eq}$ .....	42
Fig.III.17 - Essai au ralentissement .....	43
Fig.III.18 – Evolution de l’inductance magnétisante en fonction du courant magnétisant et son polynôme d’ordre 3 .....	45
Fig.III.19 - Schéma bloc de la MAS fonctionnement moteur dans le repère $dqo$ .....	46
Fig.III.20 - Résultats de la simulation de démarrage à vide du moteur asynchrone suivi de l'application de la charge nominale .....	47
Fig.III.21 – Allure des courants statoriques .....	47
Fig.III.22 – Allure des courants rotoriques .....	48
Fig.III.23 - Allures de la tension statorique de la phase « a » .....	49
Fig.III.24 - Allures du courant statorique de la phase « a » .....	49
Fig.III.25 - Allures de la tension statorique de la phase « a » .....	50
Fig.III.26 - Allures de courant statorique de la phase « a » .....	50
Fig.III.27 - Allures de la tension de la phase « a ».....	51
Fig.III.28 - Allures des valeurs efficaces obtenus de la tension d’induit par la simulation et l’expérimentation .....	52
Fig.III.29 – Evolution d’erreur relative entre les résultats de simulation et l’expérimentation (tension statorique).....	52
Fig.III.30 - Allures du courant de la phase « a » .....	53
Fig.III.31 - Allures des valeurs efficaces du courant statorique par la simulation et par l’expérimentation .....	53
Fig.III.32 – Evolution d’erreur relative entre les résultats de simulation et l’expérimentation (courant statorique) .....	53
Fig.III.33 - Evolution de l’inductance mutuelle en fonction du temps .....	54
Fig.III.34 - Génératrice asynchrone auto – excitée avec un banc de capacité alimentant une charge autonome .....	55
Fig.III.35 - Allures de la tension et du courant de la phase « a » lors de la variation de la charge.....	55
Fig.III.36 - Evolution du courant magnétisant .....	56
Fig.III.37 - Evolution du courant de charge connectée à la phase « a ».....	56
Fig.III.38 – Allure de la fréquence statorique en fonction du temps .....	56
Fig.III.39 - Allures de la tension et du courant de la phase « a » lors de la connexion de la charge $RL$ .....	57
Fig.III.40 - Evolution du courant magnétisant .....	57
Fig.III.41 - Evolution du courant de charge connectée à la phase « a ».....	57
Fig.III.42 - Allure de la fréquence statorique en fonction du temps .....	58
Fig.III.43 - Génératrice asynchrone auto – excitée avec compensation parallèle .....	59
Fig.III.44 - Allures de la tension et du courant de la phase « a » lors de l’insertion d’une charge $RLC$ (compensation parallèle).....	59
Fig.III.45 - Evolution du courant magnétisant .....	60
Fig.III.46 - Evolution du courant de charge connectée à la phase « a ».....	60
Fig.III.47 - Allure de la fréquence statorique en fonction du temps .....	60
Fig.III.48 - Génératrice asynchrone auto – excitée avec compensation série .....	60

Fig.III.49 - Allures de la tension et du courant de la phase « a » lors de l'insertion d'une charge <i>RLC</i> (compensation série) .....	61
Fig.III.50 - Evolution du courant magnétisant .....	61
Fig.III.51 - Evolution du courant de charge connectée à la phase « a ».....	61
Fig.III.52 - Allure des tensions statoriques lors de l'insertion .....	62
Fig.III.53 - Allure des courants statoriques lors de l'insertion.....	63
Fig.III.54 - Evolution du courant magnétisant .....	63
Fig.III.55 - Evolution des trois courants de la charge .....	64

## *Liste des tableaux*

Tableau III.1 - Valeurs mesurées de la tension et du courant et calculées de la résistance statorique dans les trois phases.....	33
Tableau III.2 - Valeurs mesurées de la puissance absorbée de la MS et calculées des pertes mécaniques de la GAS .....	34
Tableau III.3 - Valeurs mesurées et calculées par l'essai à vide.....	34
Tableau III.4 - Valeurs mesurées et calculées par l'essai au synchronisme.....	36
Tableau III.5 - Valeurs mesurées et calculées par l'essai à rotor bloqué .....	40

## *Liste des symboles*

$v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}$	V	Tensions statoriques
$v_{ra}, v_{rb}, v_{rc}$	V	Tensions rotoriques
$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$	A	Courants statoriques
$i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}$	A	Courants rotoriques
$i_m$	A	Courant magnétisant
$\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}$	Wb	Flux statoriques
$\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc}$	Wb	Flux rotoriques
$\Phi_{sd}, \Phi_{sq}$	Wb	Flux statoriques dans l'axe $(d, q)$
$\Phi_{rd}, \Phi_{rq}$	Wb	Flux rotoriques dans l'axe $(d, q)$
$[L_s]$	H	Matrice des inductances statoriques
$[L_r]$	H	Matrice des inductances rotoriques
$[M_{sr}]$	H	Matrice des inductances mutuelles statoriques
$[M_{rs}]$	H	Matrice des inductances mutuelles rotoriques
$[P(\theta)]$	-	Matrice de Park
$[P(\theta)]^{-1}$	-	Matrice inverse de Park
$R_s$	$\Omega$	Résistance statorique
$R_r$	$\Omega$	Résistance rotorique
$R'_r$	$\Omega$	Résistance rotorique ramenée au stator
$R_m$	$\Omega$	Résistance de magnétisation
$X_m$	$\Omega$	Réactance cyclique magnétisante
$X_s$	$\Omega$	Réactance statorique
$X_r$	$\Omega$	Réactance rotorique
$X'_r$	$\Omega$	Réactance cyclique rotorique ramené au stator
$L_s$	H	Inductance cyclique propre
$l_{fs}, l_{fr}$	H	Inductances de fuite statorique et rotorique
$L_m$	H	Inductance mutuelle (magnétisante) cyclique
$L_d$	H	Inductance cyclique sur l'axe direct
$L_q$	H	Inductance cyclique sur l'axe en quadrature
$L_{dq}$	H	Inductance magnétisante d'effet croisé
$\omega_s$	$rad/s$	Pulsation électrique des grandeurs statorique
$\omega_r$	$rad/s$	Pulsation électrique des grandeurs rotorique
$\omega_{coord}$	$rad/s$	Vitesse angulaire de rotation du système d'axe biphasé par rapport au système d'axe triphasé
$\theta_{coord}$	rad	Angle de rotation entre le repère naturelle et biphasé
$\theta_r$	rad	Angle électrique entre les axes statorique et rotorique
$\Omega_r$	$rad/s$	Vitesse rotorique
$C$	F	Capacité du condensateur

$p$	-	Nombre de pair de pole
$C_e$	N.m	Couple électromagnétique
$C_r$	N.m	Couple résistant
$J$	$kg.m^2$	Moment d'inertie
$f$	$N.m.s/rad$	Coefficient de frottement
$\tau_m$	$s$	Constante du temps mécanique
$p_j$	W	Pertes à effet Joule
$p_f$	W	Perte fer
$p_{mec}$	W	Pertes mécaniques
$P_i$	W	Puissance fournie par le moteur thermique
$P_{diss}$	W	Perte en puissance pour le moteur thermique
$P_{ci}$	$kJ/kg$	Pouvoir calorifique inférieur du carburant
$n_i$	-	Rendement pour un moteur thermique
$m_f$	L/min	Débit de carburant injecté dans la chambre de combustion

### *Abréviations*

<b>AC</b>	Courant alternatif
<b>PMB</b>	Point Mort Bas
<b>PMH</b>	Point Mort Haut
<b>MAS</b>	Machine asynchrone
<b>GAS</b>	Génératrice asynchrone
<b>MS</b>	Machine synchrone
<b>GS</b>	Génératrice synchrone

## **Introduction générale**

Ces dernières années, la demande en matière de continuité de l'alimentation électrique dans les différentes zones locales est en constante croissance. De nos jours, de plus en plus de consommateurs (hôpitaux, laboratoires, serveurs informatiques, etc.), exigent une disponibilité constante de l'énergie électrique. Cette demande croissante d'énergie et l'épuisement des ressources existantes en combustibles fossiles, et les conséquences résultantes de la pollution de l'environnement ont contraint l'humanité à explorer de nouvelles technologies de production d'énergie électrique, faisant appel à des sources renouvelables propres telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire et l'hydraulique.

Malgré le fait que les ressources d'énergie renouvelable sont bien adaptées à la production d'électricité, leur application pose un problème majeur d'instabilité de la production en raison de la nature fluctuante de ces ressources-là, de leur rendement relativement faible et leur coût élevé. Par conséquent, la continuité de l'alimentation électrique d'un réseau local doit être soutenue par d'autres sources d'énergie primaire fiables et non fluctuantes, telle l'énergie électrique générée par des groupes électrogènes [1].

Ces groupes électrogènes sont surtout indispensables dans les zones sous équipées (site isolé, chantier), où la construction du réseau électrique n'est techniquement pas possible ou ne pouvant pas être prise en charge financièrement, où l'énergie électrique est considérée comme un facteur de développement indispensable.

Dans ce contexte général, le travail présenté dans ce mémoire est l'étude d'un groupe électrogène à base d'une génératrice asynchrone.

La présentation de ce manuscrit est étalée sur trois chapitres :

Premièrement, et après cette introduction, le premier chapitre sera consacré à la présentation d'un état de l'art sur les groupes électrogènes, en donnant sa définition ainsi que celle des différentes parties le constituant, et les domaines de ses utilisations.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons la modélisation de différentes parties du groupe électrogène. Tout d'abord, nous donnerons les différentes équations (électriques, magnétiques et mécaniques) en utilisant le modèle naturel *abc* et biphasé *dqo* de la GAS. En dernier lieu, nous présenterons le modèle simplifié du moteur thermique.

Le troisième chapitre sera réservé à une application qui consiste à l'étude par simulation numérique sous Matlab/Simulink d'une GAS après avoir identifié ses paramètres, pour observer son comportement à travers les différentes grandeurs tel que les courants et les tensions, pour différents cas (à vide, charges équilibrés et déséquilibrés).

Nous terminerons notre travail avec une conclusion générale, où nous donnerons les principaux résultats de notre application et quelques perspectives.

# **Chapitre I**

## **Généralités sur les groupes électrogènes**

## I Généralités sur les groupes électrogènes

### 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 des 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 des multitudes 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 [2].

L'objectif de ce premier chapitre est donc de présenter un état de l'art sur les groupes électrogènes en donnant sa définition ainsi que les différentes parties le constituant, et les domaines de son utilisation.

### I.2 Définition du groupe électrogène

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 une génératrice. 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 fonctionnements importants. 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 dernière (carburant) est transformée en énergie mécanique en utilisant un moteur thermique. L'énergie mécanique développée par le moteur est transformée en énergie électrique via une génératrice.

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.

Le groupe électrogène est défini selon deux puissances :

#### I.2.1 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 [3].

### I.2.2 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 [3].

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 [4].

**Classe G1** : Représente les groupes électrogènes destinés à alimenter des charges qui ne nécessitent pas une exigence en tension et en fréquence.

Exemple : Eclairage et charges simples.

**Classe G2** : Concerne l'alimentation des charges qui nécessitent des caractéristiques proches de celle du réseau public.

Exemple : Eclairage, pompes et ventilateurs.

**Classe G3** : Il s'agit des groupes électrogènes destinés à 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.

**Classe G4** : Elle est définie pour des exigences en tension, en fréquence et en forme d'ondes 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 moins 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 [3].

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

- Groupe électrogène à vitesse fixe ;
- Groupe électrogène à vitesse variable.

### I.2.3 Groupe électrogène fonctionnant à vitesse fixe

Les groupes électrogènes sont généralement constitués d'un moteur diesel tournant à vitesse fixe accouplé à un alternateur synchrone. Cette solution présente l'avantage de la simplicité et d'un prix d'énergie au kilowattheure compétitif [5].

### I.2.4 Groupe électrogène fonctionnant à vitesse variable

Les groupes électrogènes fonctionnant à vitesse variable sont basés sur l'association d'un alternateur fonctionnant à vitesse et puissance variables entraîné par un moteur diesel et un convertisseur AC/AC qui alimente une charge électrique triphasée à fréquence et à puissance variables. L'association d'un convertisseur statique à la machine électrique permet de fournir une énergie électrique à une fréquence donnée à partir d'un moteur diesel fonctionnant à vitesse variable [5].

## I.3 Constitution d'un groupe électrogène

La constitution globale d'un groupe électrogène est donnée sur la figure I.1 :

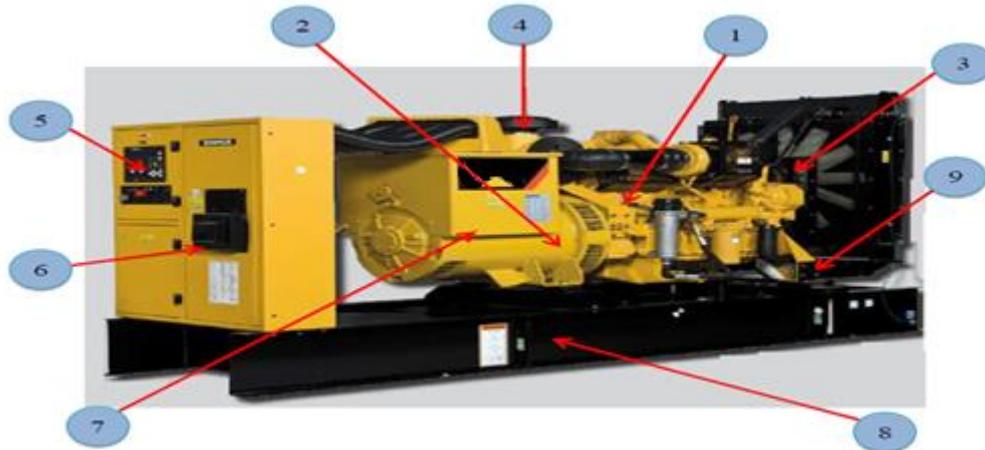


Fig.I.1 - Photo d'un groupe électrogène

1 - Moteur thermique ; 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

### I.3.1 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.

#### a) Principe de fonctionnement du moteur thermique

Son principe de fonctionnement se déroule en quatre temps [6] :

**Admission :** Le premier temps est illustré dans la 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.

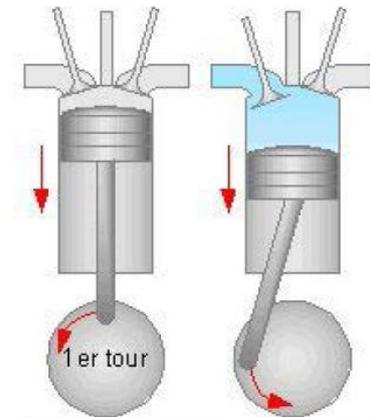


Fig.I.2 - Admission

**Compression** : Le deuxième temps est illustré sur la 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.

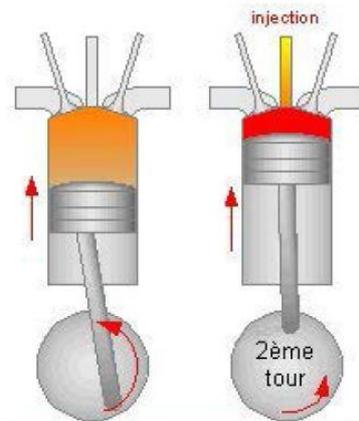


Fig.I.3 - Compression

**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.

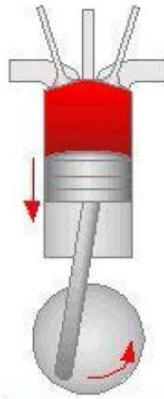


Fig.I.4 - Détente

### **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.

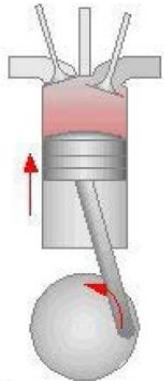


Fig.I.5 - Echappement

Le moteurs Diesel à besoin de circuits auxiliaires pour assurer :

- Son refroidissement ;
- Sa lubrification ;
- Son alimentation en combustible ;
- Son démarrage.

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

#### ***b) Système de refroidissement***

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 [7] :

- 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 représenté sur la figure I.6 comprend : Un radiateur ; Une pompe qui entraîne le liquide de refroidissement ; Un vase d'expansion ; Un thermostat ; Un ventilateur ; Un liquide de refroidissement (eau + additif).

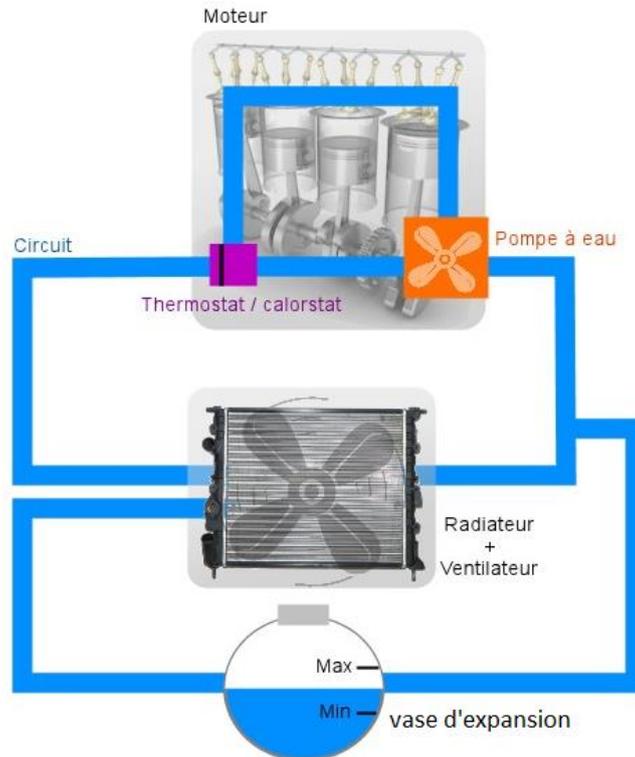


Fig.I.6 - Système de refroidissement d'un groupe électrogène

### c) 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 pré-graissage pouvant être cyclique ou permanent. Ce dispositif de pré-graissage peut également être couplé avec un système de préchauffage de l'huile [4].

### d) 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 journalier, 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 [4].

*e) Circuit de démarrage*

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

*f) 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.

**I.3.2 Génératrice synchrone**

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.

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

*a) Description des constituants d'une génératrice synchrone**Stator*

Le stator comprend un circuit magnétique constitué par un empilage de tôles en forme de couronne, isolées les unes des autres pour minimiser les pertes par 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 au stator. Le circuit magnétique du stator est en fer afin de canaliser le champ magnétique engendré par le rotor. Le bobinage d'un stator généralement en triphasé pour les grandes puissances 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 [2].

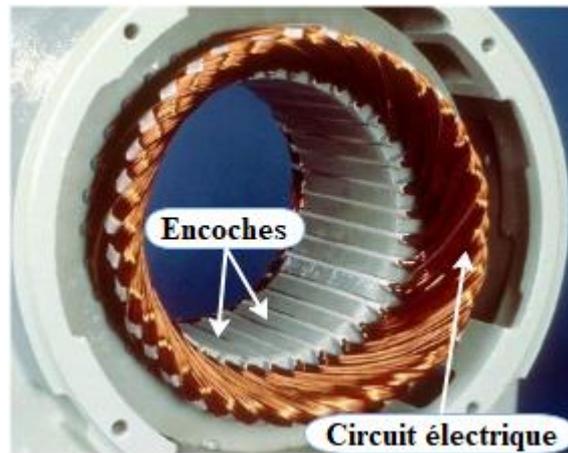


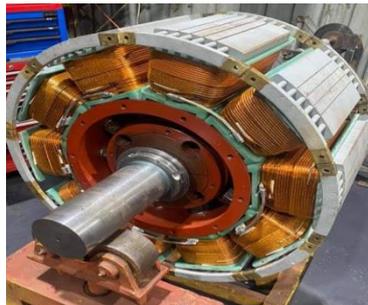
Fig.I.7 - Stator d'une machine synchrone

### **Rotor**

Le rotor est un électroaimant ou aimants permanents qui tournent à l'intérieur du stator immobile. Le rotor bobiné 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 aimants permanents.



a) -Rotor a pôles lisses



b) - Rotor à pôles saillants



c) - Rotor à aimants permanents

Fig.I.8 - Différents types du rotor de la MS

A part les alternateurs basse puissance (alternateur de voiture, petits groupe électrogène), on utilise maintenant presque toujours un alternateur à deux étages. Il se compose de :

- Le premier alternateur est appelé alternateur auxiliaire ou excitatrice. C'est un alternateur inversé (le stator produit l'excitation et le rotor est l'induit), comme ce générateur produit du courant alternatif triphasé, un pont de diodes est placé sur une plaquette montée sur l'axe, pour exciter l'alternateur principale ;
- Le second alternateur est l'alternateur principal ou l'alternateur de puissance. Il reçoit son excitation de l'alternateur auxiliaire via un câble qui passe dans l'axe de transmission.

Ces alternateurs sont utilisés pour la production industrielle d'électricité (centrales électriques, gros groupes électrogènes, etc.). Chaque étage amplifie la puissance, un alternateur à deux étages ne nécessite qu'une excitation faible pour produire une puissance élevée.

Pour les génératrices de grande puissance, on utilise des GS à trois étages, le système se compose d'une sous-excitatrice (à aimants permanents) et d'une excitatrice et l'alternateur principal.

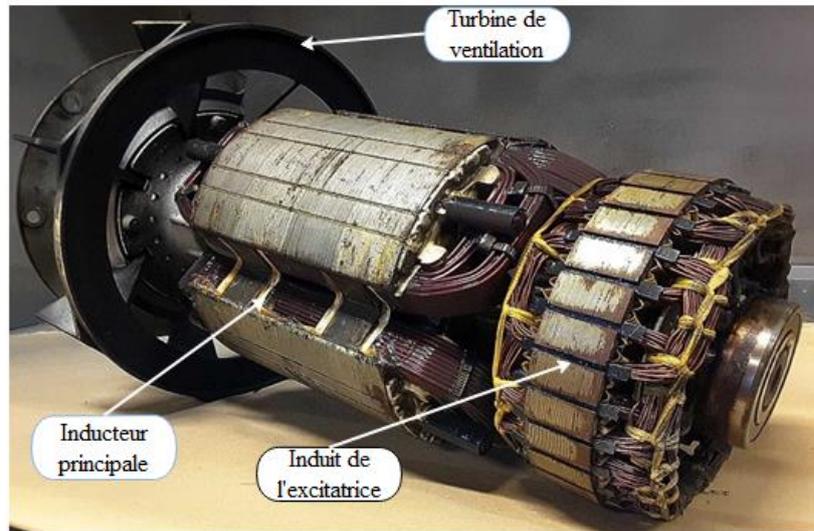


Fig.I.9 – Rotor d'une génératrice synchrone à deux étages

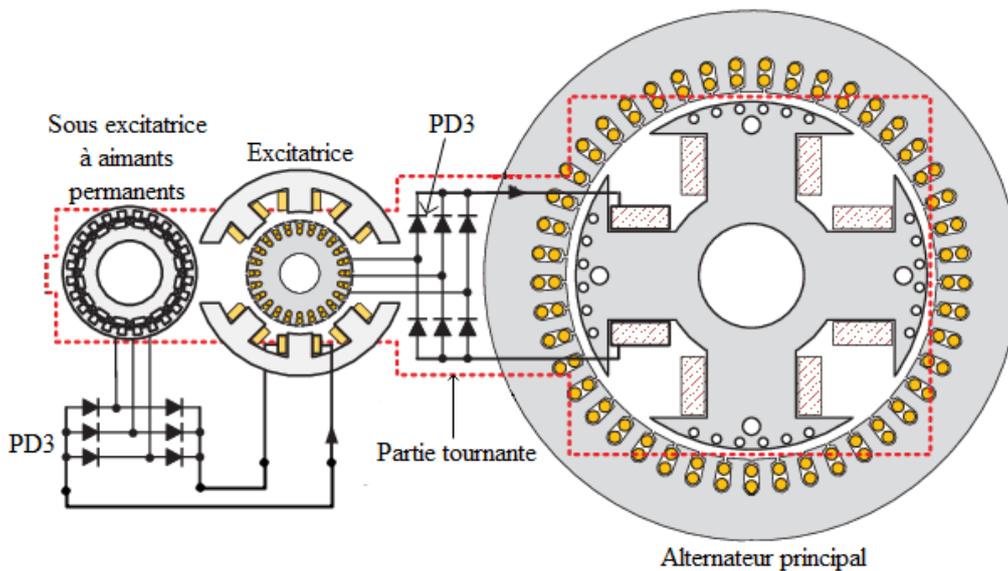


Fig.I.10 - Génératrice synchrone à triple étages

**b) Génératrice synchrone auto-excitée**

L'autoamorçage de la GS est dû à la présence d'un champ magnétique rémanent au niveau de son stator. Il faut que la machine ait été utilisée au moins une fois en fonctionnement moteur ou par l'insertion de deux aimants permanents à l'extrémité du rotor.

Au démarrage et sans excitation, la FEM de la machine n'est donc pas totalement nulle, cela suffit à faire circuler un petit courant dans le bobinage statorique, ce qui augmente la FEM, ce qui augmente le courant inducteur.

L'excitation du rotor est prélevée de l'enroulement du stator, le redressement du courant alternatif est assuré par redresseurs (PD3 commandé, PD3 non commandé +hacheur ou PD3 non commandé + rhéostat).

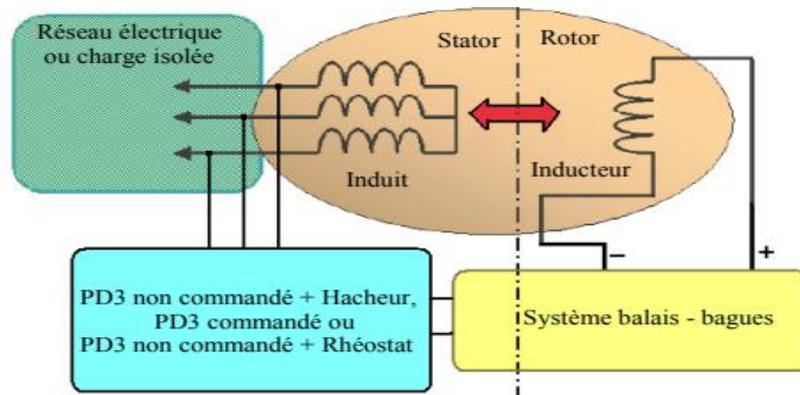


Fig.I.11- Schéma d'auto excitation d'une génératrice synchrone

### I.3.3 Génératrice asynchrone

La GAS est une machine à induction qui transforme de l'énergie mécanique en énergie électrique.

#### *Stator*

Son stator est assimilable à un stator d'une GS.



Fig.I.12 - Stator d'une MAS

#### *Rotor*

Le rotor est réalisé de deux façons :

1) **Rotor à cage** : Il est constitué par un empilement de tôles percées de trous, dans les quelles, on loge des barres conductrices. Ces barres sont court-circuitées à leurs extrémités par des couronnes conductrices, ce qui constitue une véritable cage d'écureuil.

2) **Rotor bobiné** : Au lieu de loger des barres dans le fer du rotor, on peut disposer des conducteurs dans les encoches et réaliser un bobinage polyphasé (généralement triphasé en étoile flottante) similaire à celui du stator.



Fig.I.13 - Rotor à cage d'écureuil



Fig.I.14 - Rotor bobiné

### a) Principe de fonctionnement de la GAS

En exerçant un couple moteur sur le rotor de la MAS de sorte que la vitesse du rotor devienne supérieure à la vitesse du champ tournant, le champ statorique force de le ramener à la vitesse de synchronisme. La machine développera alors un couple résistant et absorbe de l'énergie mécanique qu'elle renverra sous forme d'énergie électrique. Et pour créer son champ magnétique (sa magnétisation) elle a besoin d'une source réactive qui peut parvenir soit du réseau auquel elle est reliée ou bien fournie par une batterie de condensateurs branchée à ces bornes [8].

En outre, en ajustant ces condensateurs de façon précise, il est possible d'utiliser une GAS en dehors d'un réseau, fonctionnement autonome pour alimenter des charges isolées, en tenant compte des conditions suivantes :

- Vitesse d'entraînement suffisante ;
- Existence d'une aimantation rémanente, pour cela, il suffit que la génératrice ait été mise déjà au moins une fois sous tension ;
- La source d'énergie réactive doit être correctement dimensionnée.

Dans ces conditions, la f.e.m induite et les courants statoriques accroîtront jusqu'à atteindre un équilibre imposé par la saturation magnétique de la machine.

### b) Génératrice asynchrone triphasée auto-excitée par condensateurs fixes

L'utilisation de la MAS à cage connectée à des capacités a l'avantage de la simplicité de mise en œuvre et le faible coût, dû à l'absence de convertisseurs statiques.

Cependant, cette configuration admet des limites de fonctionnement qu'il faut prendre en compte, notamment les variations de l'amplitude et de la fréquence des tensions lors des variations de charge et de vitesse. Par ailleurs, il faut prendre des précautions et éviter de surcharger la machine au risque de la démagnétiser. Cela nécessiterait alors une intervention externe ou une phase de fonctionnement spécifique afin de la remagnétiser. Il existe plusieurs configurations dans la littérature pour connecter les capacités aux bornes de la génératrice, parmi ces configurations, on trouve [9] :

- GAS excitée par un seul condensateur fixe : consiste à utiliser une seule capacité, généralement lorsqu'on alimente des charges monophasées ;
- GAS excitée par une batterie de condensateurs fixes : consiste à utiliser un banc de capacités constitué de 3 condensateurs connectés soit en étoile ou en triangle aux bornes de la génératrice, destinée à alimenter des charges monophasées ou triphasées.

Pour qu'une GAS produise de l'électricité, il faut que le rotor ait un champ magnétique et pour se faire, il est mis en "charge" par l'intermédiaire du stator. Cela s'appelle l'amorçage (figure I.15), il permet de créer la puissance réactive. L'amorçage se fait avec des condensateurs.

Ces condensateurs doivent fournir une puissance réactive un peu supérieure à celle consommée par le bobinage de la machine. En variant la vitesse de rotation ou la valeur du banc de capacités, on aura d'autres points d'amorçage.

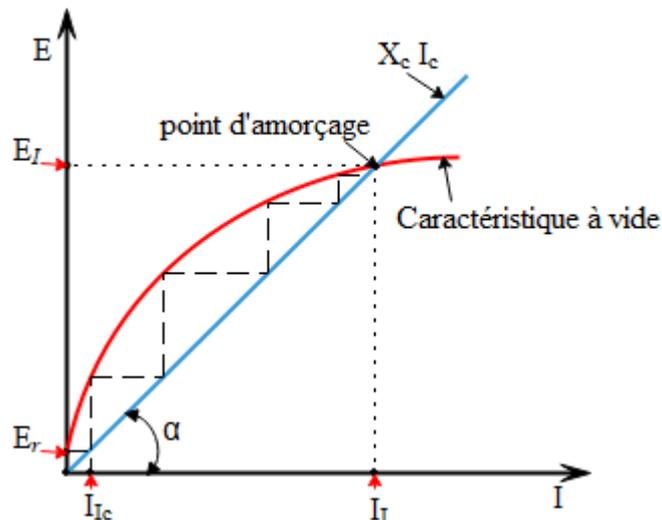


Fig.I.15 - Auto-amorçage d'une génératrice asynchrone en fonctionnement autonome

### c) Excitation avec un condensateur et un redresseur à diode

L'utilisation de cette technique est généralement limitée aux générateurs monophasés de puissances inférieures à 10 kW par exemple les génératrices des groupes électrogènes.

Un bobinage d'excitation séparé dans le stator a un condensateur connecté directement à travers sa sortie comme indiqué dans la Fig.I.15, généralement ce bobinage occupe 1/3 d'encoches avec une section faible et dans 2/3 d'encoches restantes, on connecte la charge monophasée.

Le rotor est généralement de construction à pôles saillants, mais dans ce cas, le bobinage du rotor est court-circuité à travers une (ou deux) diode(s). Pendant le démarrage, le flux rémanent dans le circuit magnétique rotorique induit une petite tension dans l'enroulement statorique d'excitation et un courant circule à travers le condensateur. Ce courant produit deux champs magnétiques autour de l'entrefer du générateur (théorème de Leblanc). Un champ direct avec la même direction de rotation du rotor, pour créer la réaction d'armature, le deuxième champ se déplace dans une direction opposée au sens de rotation du rotor, qu'il induit une tension dans l'enroulement rotorique à deux fois la fréquence de rotation rotorique électrique. Le courant qui

circule dans le bobinage rotorique par cette tension induite est redressé par une (ou deux) diode(s) pour produire un courant continu, ce dernier augmente le flux magnétique rotorique, qui à son tour conduit plus de courant à travers le bobinage d'excitation statorique, qui augmentera le courant rotorique. Ce processus d'auto excitation se poursuit jusqu'à ce que le flux atteigne un point auquel le circuit magnétique se sature, et une tension stable résulte.

L'amorçage de cette machine se fait comme l'amorçage d'une génératrice à CC à excitation shunt.

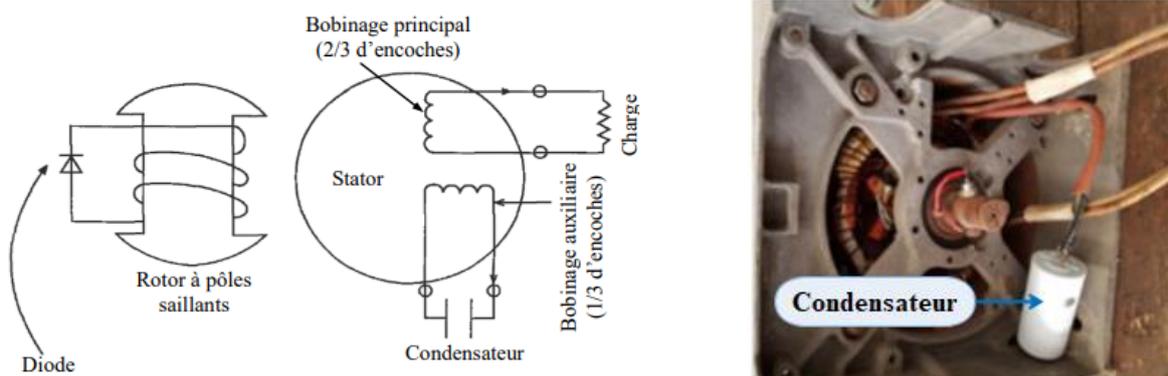


Fig.I.16 - Exemple d'une génératrice monophasée excitée avec un condensateur et un redresseur à diode



a) Rotor

b) Stator

Fig.I.17 - Exemples de génératrices monophasée à une et deux diodes

## I.4 Accessoires du groupe électrogène

### • Description du système de contrôle et de commande

Pour commander et contrôler son fonctionnement, le groupe électrogène est équipé d'un système de contrôle / commande électronique, 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 [2].

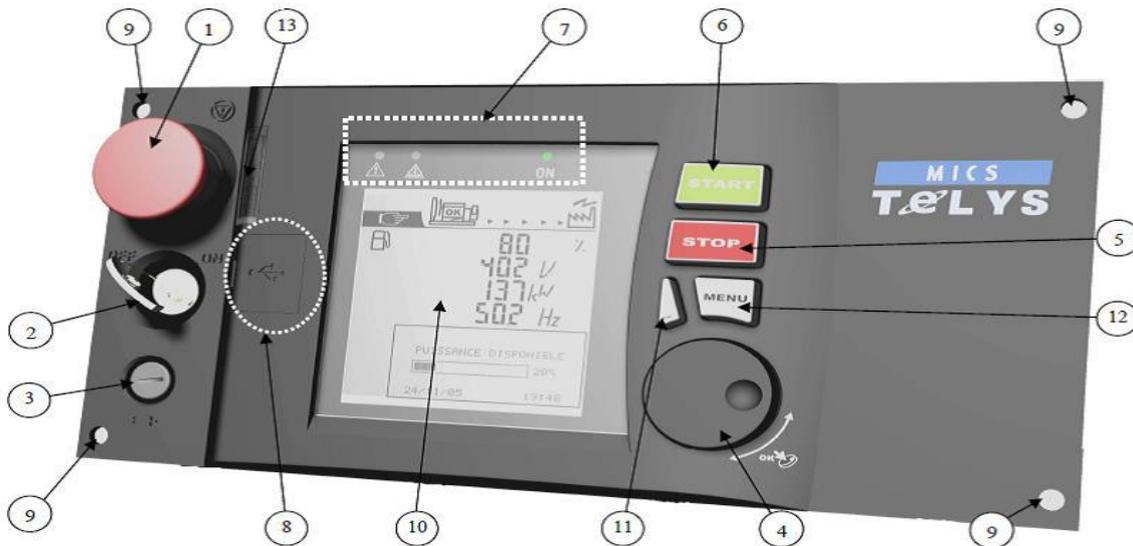


Fig.I.18 - Tableau de commande et de contrôle de fonctionnement

Où : 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.

### I.4.1 Coffret de commande

Permet de démarrer et d'arrêter le groupe électrogène, en surveillant son fonctionnement et son rendement, et en arrêtant automatiquement le groupe électrogène en cas de survenue de situation critique, comme une baisse de la pression d'huile ou une augmentation du liquide de refroidissement, afin d'éviter des dommages importants au niveau du moteur ou de la génératrice [10].

#### I.4.2 Coffret de contrôle

Pour la surveillance continue du fonctionnement du groupe électrogène. Il est utilisé pour détecter s'il y a une anomalie dans le fonctionnement de l'unité, et il est également utilisé pour surveiller la tension et le courant de la borne de sortie de l'alternateur, et pour contrôler la fréquence du courant.

#### I.4.3 Tableau inverseur de source automatique

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. Lorsqu'une coupure d'électricité a lieu, elle est automatiquement détectée, ce qui enclenche le groupe électrogène [2].

#### I.4.4 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.4.5 Batterie

Une batterie est un composant électrochimique permettant de stocker l'énergie électrique sous une forme chimique, puis de la libérer sous forme de courant continu de manière contrôlée. Dont le rôle est d'alimenter le démarreur du moteur en courant continu et d'exciter l'inducteur de l'alternateur. Il sert aussi à alimenter quelques accessoires comme le moto-ventilateur.

#### I.4.6 Chargeur de batterie

Un chargeur de batterie a pour fonction, de convertir (redressement) une tension alternative venant du groupe électrogène, en tension continue qui permet de charger la batterie avec du courant redressé à la bonne tension.



Fig.I.19 - Chargeur de batterie

### I.5 Système de contrôle de tension et de fréquence pour les groupes électrogènes

Il existe deux façons d'utiliser les groupes électrogènes, ils peuvent être utilisés connecter directement au réseau ou bien dans un mode autonome. Dans un système dans lequel les générateurs sont directement reliés au réseau interconnecté, la vitesse des générateurs est fixée par la fréquence du réseau et la tension du système est relativement constante. Tandis que, dans un système autonome, la tension aux bornes tend à varier avec le changement de charge.

Les groupes électrogènes primaires sont équipés de régulateurs mécaniques (masselotte) pour maintenir la vitesse fixe, intégrés dans le volant moteur et actionne sur la pompe à injection du moteur thermique pour obtenir une fréquence de sortie imposée.

Le bon fonctionnement d'un groupe électrogène est déterminé dans une large mesure par deux composants principaux, le régulateur de vitesse et le régulateur de tension. Les performances de ces composants sont vitales pour le fonctionnement et l'utilisation des groupes électrogènes, leur but étant de maintenir précisément les paramètres imposés de l'énergie électrique (tension et fréquence). Le régulateur de vitesse est conçu pour maintenir constant le régime du moteur à combustion interne en modifiant la quantité de carburant consommée par le moteur. Le résultat direct de cette régulation de vitesse est une fréquence stable de la tension aux bornes du générateur (puisque la fréquence est proportionnelle à la vitesse du générateur) [11].

Une fréquence constante exige une bonne précision et un temps de réponse court de la part du régulateur de vitesse. Il existe de nombreux systèmes de régulation de la vitesse, depuis les systèmes à ressort les plus simples jusqu'aux systèmes hydrauliques et électroniques (Actuateur) complexes capables de réguler dynamiquement la soupape d'admission de carburant pour maintenir la vitesse constante [11].

Le rôle principal du régulateur de tension est de contrôler la tension aux bornes du générateur et de la maintenir constante en limitant le plus rapidement possible les pics de tension et les surtensions qui se produisent en raison des variations de charge. La quantité sur laquelle agit le régulateur de tension (AVR) est le courant d'excitation qui modifie l'amplitude de la tension aux bornes du générateur.

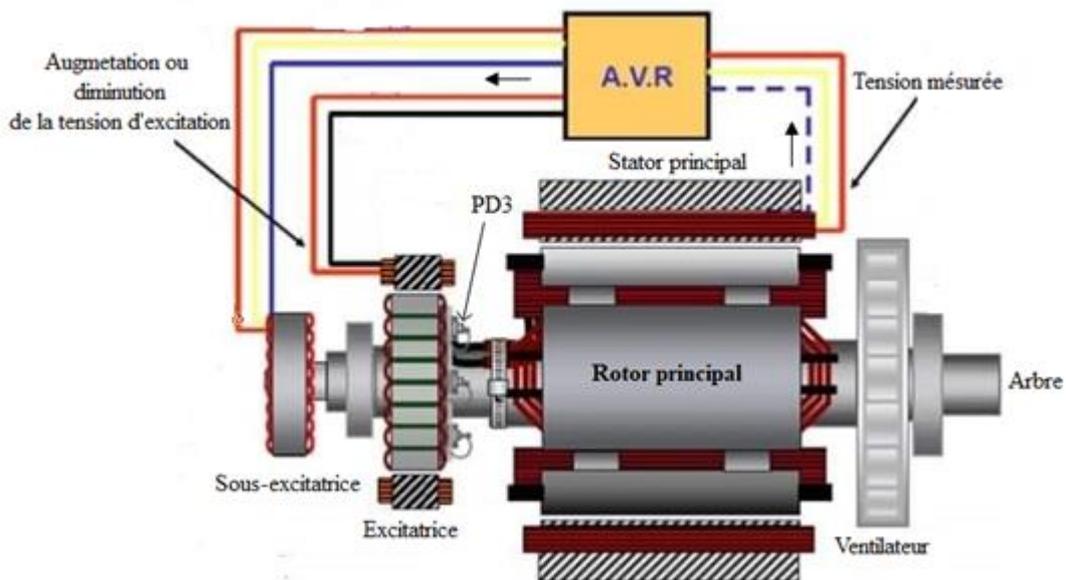


Fig.I.20 - Système de régulation de la tension par AVR

**I.6 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté la constitution détaillée du groupe électrogène, où nous avons défini les différents éléments qui le constituent, avec une brève présentation de leurs fonctionnements.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons la modélisation des différentes parties du groupe électrogène. Dans un premier lieu, on donnera le modèle mathématique de la GAS (Equations électriques, magnétiques et mécaniques) dans le repère abc. Puis, on réduira l'ordre du système par une transformation de PARK.

Et pour finir, nous présenterons le modèle simplifié du moteur thermique.

# **Chapitre II**

**Modélisation des différentes  
parties du groupe électrogène à  
étudier**

## II Modélisation des différentes parties du groupe électrogène à étudier

### II.1 Introduction

Dans ce chapitre, il sera question de modéliser les différents éléments constituant le groupe électrogène. Pour commencer, on donnera de manière explicite le modèle mathématique de la MAS (Equations électriques, magnétiques et mécaniques) dans son référentiel triphasé (abc). Puis, on réduira l'ordre du système par une transformation dite PARK. En partant sur le modèle de la MAS, puis cela nous permettra d'élaborer le modèle mathématique de la génératrice en régimes linéaire et non-linéaire.

En dernier lieu, nous présenterons un modèle simplifié du moteur thermique.

### II.2 Modélisation de la machine asynchrone

La machine électrique triphasée est constituée d'un stator et d'un rotor mobile. Le stator possède un enroulement de trois phases couplées en étoile ou en triangle, qui sont alimentés par un système triphasé de tensions. Il en résulte la création d'un champ magnétique dans l'entrefer de la machine.

La machine électrique généralisée triphasée est une machine bipolaire triphasée idéale, avec deux enroulements statorique et rotorique (fig. II.1).

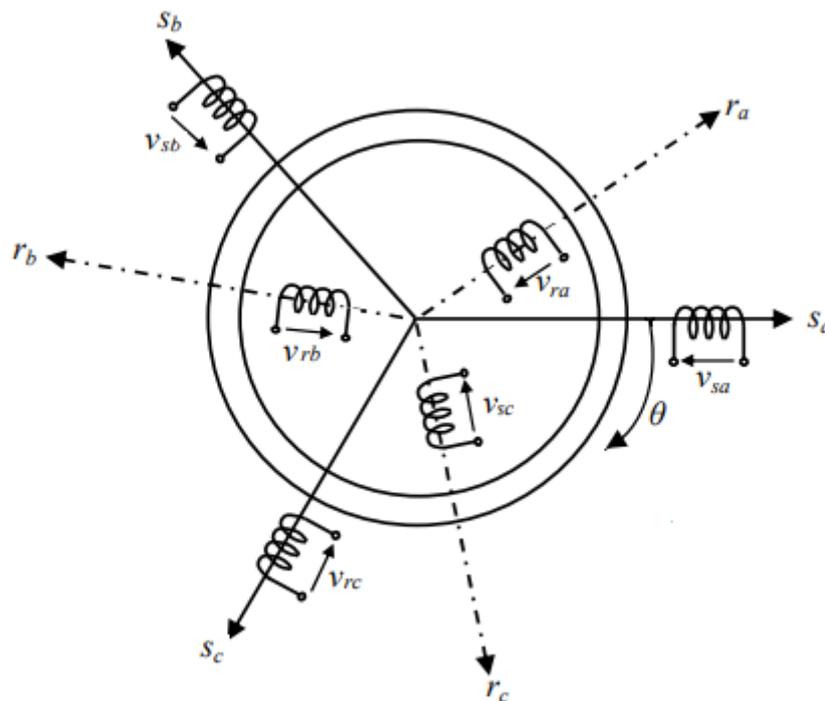


Fig.II.1 - Représentation d'une machine électrique généralisée triphasée

En général, l'équation II.1 exprime la relation entre la tension aux bornes d'une bobine parcourue par un courant  $i$  de résistance  $R$  et d'une variation du flux.

$$v = Ri + \frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{II.1})$$

Afin de modéliser une MAS, on doit d'abord citer certaines hypothèses simplificatrices :

- L'entrefer est constant ;
- L'effet de l'encochage est négligeable ;
- Les circuits magnétiques sont symétriques ;
- La répartition de l'induction dans l'entrefer est sinusoïdale ;
- L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement sur les caractéristiques n'est pas prise en compte ;
- On néglige les phénomènes de saturation, ce qui permet de considérer le flux magnétique comme fonction linéaire des courants.

Ces hypothèses ont des conséquences importantes tel que :

- L'additivité du flux.
- La constance des inductances propres.
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statorique et rotorique en fonction de l'angle électrique entre leurs axes magnétiques.

D'après les hypothèses simplificatrices, tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements.

### II.2.1 Equations électriques

Pour ce modèle, on écrira les équations des tensions représentant pour chaque enroulement la somme de la chute ohmique et la chute inductive liée au flux.

$$\begin{cases} v_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d}{dt} \Phi_{sa} \\ v_{sb} = R_s i_{sb} + \frac{d}{dt} \Phi_{sb} \\ v_{sc} = R_s i_{sc} + \frac{d}{dt} \Phi_{sc} \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

$$\begin{cases} v_{ra} = R_r i_{ra} + \frac{d}{dt} \Phi_{ra} \\ v_{rb} = R_r i_{rb} + \frac{d}{dt} \Phi_{rb} \\ v_{rc} = R_r i_{rc} + \frac{d}{dt} \Phi_{rc} \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

A savoir que :  $v_{sa} \ v_{sb} \ v_{sc}$  : Tensions appliquées aux trois phases statoriques ;  $i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc}$  : Courants qui traversent les trois phases statoriques ;  $\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}$  : Flux totaux à travers ces enroulements ;  $v_{ra} \ v_{rb} \ v_{rc}$  : Tensions rotoriques ;  $i_{ra} \ i_{rb} \ i_{rc}$  : Courants rotoriques ;  $\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc}$  : Flux rotoriques ;  $R_s$  : Résistance d'une phase statorique ;  $R_r$  : Résistance d'une phase rotorique.

Les systèmes d'équations II.2 et II.3 peuvent être écrits sous les formes matricielles suivantes :

Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

Ainsi que sous la forme condensée tel que :

$$[v_{s(abc)}] = [R_s][i_{s(abc)}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{s(abc)}] \quad (\text{II.5})$$

Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

Ainsi que sous la forme condensée tel que :

$$[v_{r(abc)}] = [R_r][i_{r(abc)}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{r(abc)}] \quad (\text{II.7})$$

## II.2.2 Equations magnétiques

Les hypothèses simplificatrices citées au paravent conduisent à des équations linéaires entre le flux et les courants de la MAS et elles seront écrites sous forme matricielle comme suite :

Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} = [L_s] \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} = [L_r] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + [M_{rs}] \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Tel que :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T$$

A savoir que :

$[L_s]$  et  $[L_r]$  : Matrices des inductances statoriques et rotoriques, respectivement ;  $[M_{sr}]$  : Matrice des inductances mutuelles statoriques/rotoriques.

Où :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_{ms} + l_{fs} & -\frac{l_m}{2} & -\frac{l_m}{2} \\ -\frac{l_m}{2} & l_{ms} + l_{fs} & -\frac{l_m}{2} \\ -\frac{l_m}{2} & -\frac{l_m}{2} & l_{ms} + l_{fs} \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} l_{mr} + l_{fr} & -\frac{l_m}{2} & -\frac{l_m}{2} \\ -\frac{l_m}{2} & l_{mr} + l_{fr} & -\frac{l_m}{2} \\ -\frac{l_m}{2} & -\frac{l_m}{2} & l_{mr} + l_{fr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

Ainsi :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = l_m \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Avec :  $l_{ms}$ : Inductance de magnétisation au stator ;  $l_{mr}$ : Inductance de magnétisation au rotor ;  $l_{fs}$ : Inductance de fuite statorique ;  $l_{fr}$ : Inductance de fuite rotorique ;  $l_m$ : Maximum de l'inductance mutuelle entre phase du stator et celle du rotor ;  $\theta_r$ : Angle électrique entre les axes statorique et rotorique.

On pose :  $l_m = l_{ms} = l_{mr}$  : Maximum de l'inductance mutuelle entre phase du stator et la phase correspondant du rotor.

En introduisant les expressions des flux II.8 et II.9 dans les équations des tensions du stator et du rotor II.5 et II.7, on obtient :

$$\begin{cases} [v_{s(abc)}] = [R_s][i_{s(abc)}] + \frac{d}{dt}([L_s] \cdot [i_{s(abc)}] + [M_{sr}] \cdot [i_{r(abc)}]) \\ [v_{r(abc)}] = [R_r][i_{r(abc)}] + \frac{d}{dt}([L_r] \cdot [i_{r(abc)}] + [M_{rs}] \cdot [i_{s(abc)}]) \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

On réécrit le système II.13 sous la forme suivante :

$$\begin{cases} [v_{s(abc)}] = [R_s][i_{s(abc)}] + [L_s] \frac{d}{dt} [i_{s(abc)}] + [M_{sr}] \frac{d[i_{r(abc)}]}{dt} + \frac{d[M_{sr}]}{dt} [i_{r(abc)}] \\ [v_{r(abc)}] = [R_r][i_{r(abc)}] + [L_r] \frac{d}{dt} [i_{r(abc)}] + [M_{rs}] \frac{d[i_{s(abc)}]}{dt} + \frac{d[M_{rs}]}{dt} [i_{s(abc)}] \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

Comme les inductances mutuelles stator/rotor ne dépendent pas du temps mais de  $\theta_r$ , on établit un changement de variable, d'où l'équation II.14 devient :

$$\begin{cases} [v_{s(abc)}] = [R_s][i_{s(abc)}] + [L_s] \frac{d}{dt} [i_{s(abc)}] + [M_{sr}] \frac{d[i_{r(abc)}]}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \frac{d[M_{sr}]}{d\theta_r} [i_{r(abc)}] \\ [v_{r(abc)}] = [R_r][i_{r(abc)}] + [L_r] \frac{d}{dt} [i_{r(abc)}] + [M_{rs}] \frac{d[i_{s(abc)}]}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \frac{d[M_{rs}]}{d\theta_r} [i_{s(abc)}] \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

$$\text{Où : } \frac{d[M_{sr}]}{dt} = \frac{d\theta_r}{dt} \frac{d[M_{sr}]}{d\theta_r} = \omega_r \frac{d[M_{sr}]}{d\theta_r}.$$

Le système d'équations II.15 devient :

$$\begin{cases} [v_{s(abc)}] = [R_s][i_{s(abc)}] + [L_s] \frac{d}{dt} [i_{s(abc)}] + [M_{sr}] \frac{d[i_{r(abc)}]}{dt} + \omega_r \frac{d[M_{sr}]}{d\theta_r} [i_{r(abc)}] \\ [v_{r(abc)}] = [R_r][i_{r(abc)}] + [L_r] \frac{d}{dt} [i_{r(abc)}] + [M_{rs}] \frac{d[i_{s(abc)}]}{dt} + \omega_r \frac{d[M_{rs}]}{d\theta_r} [i_{s(abc)}] \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

On réécrit le système d'équations II.16 sous la forme d'un système d'équations différentielles :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} [i_{s(abc)}] = [L_s]^{-1} \left( [v_{s(abc)}] - [R_s][i_{s(abc)}] - [M_{sr}] \frac{d[i_{r(abc)}]}{dt} - \omega_r \frac{d[M_{sr}]}{d\theta_r} [i_{r(abc)}] \right) \\ \frac{d}{dt} [i_{r(abc)}] = [L_r]^{-1} \left( [v_{r(abc)}] - [R_r][i_{r(abc)}] - [M_{rs}] \frac{d[i_{s(abc)}]}{dt} - \omega_r \frac{d[M_{rs}]}{d\theta_r} [i_{s(abc)}] \right) \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

Les dérivées des inductances mutuelles entre le stator et le rotor sont :

$$\frac{d[M_{sr}]}{d\theta_r} = \frac{d[M_{rs}]^t}{d\theta_r} = -l_m \begin{bmatrix} \sin(\theta_r) & \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin(\theta_r) & \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

### II.2.3 Equations mécanique et de couple électromagnétique

Les paramètres mécaniques (couple, vitesse) font partie des variations nécessaires pour l'étude des caractéristiques d'une MAS :

$$C_e = p [i_{s(abc)}]^T \frac{d}{d\theta_r} [M_{sr}] [i_{r(abc)}] \quad (\text{II.19})$$

L'équation du mouvement de la machine est nécessaire pour avoir un modèle complet de la MAS et elle s'écrit comme suite :

$$J \frac{d}{dt} \Omega_r = C_e - C_r - f \Omega_r \quad (\text{II.20})$$

Le modèle du MAS dans le repère réel (abc) sous la forme d'un système d'équations différentielles (sous la forme Cauchy) à implémenter sous MATLAB/Simulink est le suivant :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} [i_{s(abc)}] = [L_s]^{-1} \left( [v_{s(abc)}] - [R_s][i_{s(abc)}] - [M_{sr}] \frac{d[i_{r(abc)}]}{dt} - p \cdot \Omega_r \frac{d[M_{sr}]}{d\theta_r} [i_{r(abc)}] \right) \\ \frac{d}{dt} [i_{r(abc)}] = [L_r]^{-1} \left( [v_{r(abc)}] - [R_r][i_{r(abc)}] - [M_{rs}] \frac{d[i_{s(abc)}]}{dt} - p \cdot \Omega_r \frac{d[M_{rs}]}{d\theta_r} [i_{s(abc)}] \right) \\ \frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{J} \left( p [i_{s(abc)}]^T \left\{ \frac{d}{d\theta_r} [M_{sr}] \right\} [i_{r(abc)}] - C_r - f \cdot \Omega_r \right) \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

Chaque terme de la matrice d'inductance est dépendant de l'angle électrique  $\theta_r$ . Par conséquent, son inverse doit être calculé à chaque pas de simulation pour résoudre le système d'équation électrique de la machine. Ceci représente l'inconvénient majeur de ce modèle pour la simulation, car c'est un modèle qui demande une grande puissance de calcul et un temps de simulation relativement long [12].

Par contre, l'apparition des ordinateurs puissants et des solveurs très précis, nous permettent de résoudre le problème du temps de simulation et les difficultés de calculs. Ce modèle idéal pour l'étude du comportement de la machine, même si dans un état non sain ou

déséquilibré, car il peut être modélisé facilement pour décrire le défaut souhaité, sans avoir à effectuer d'autres calculs ou transformation.

Afin de faciliter l'étude de cette machine lors d'un fonctionnement sain, des modèles simplifiés sont proposés dans la littérature en utilisant des transformations depuis le repère naturel  $abc$  vers un repère biphasé tournant à une vitesse  $\omega_{coord}$  par rapport au plan original [13].

### II.3 Transformation de Park

La transformation de Park consiste à une transformation triphasée vers biphasé suivie d'une rotation. Ce qui nous permet de passer du repère  $abc$  vers le repère  $\alpha\beta 0$  ensuite vers le repère  $dq$ . Étant donné que le repère  $dqo$  est mobile et le repère  $\alpha\beta 0$  est fixe par rapport au repère  $abc$  donc il forme un angle  $\theta_{coord}$  appelé angle de Park.

#### II.3.1 Différents repères

Pour simplifier les expressions analytiques, on utilise les trois référentiels suivants :

- 1) Référentiel immobile par rapport au stator :  $(\alpha - \beta) : \omega_{coord} = 0$ .
- 2) Référentiel immobile par rapport au rotor :  $(x - y) : \omega_{coord} = \omega_r$ .
- 3) Référentiel immobile par rapport au champ tournant :  $(d - q) : \omega_{coord} = \omega_s$ .

Le référentiel immobile par rapport au champ tournant est pris pour la suite de travail.

#### II.3.2 Modélisation de la MAS dans le plan biphasé $dqo$

La transformation de Park nous permet de transformer les grandeurs de la machine triphasée à des grandeurs de la machine biphasée selon les axes  $d$  et  $q$ , suite à cette transformation on obtient les vecteurs de Park. A savoir : le vecteur de tension, de courant et de flux.

La figure II.2 représente la transformation des enroulements réels  $abc$  en enroulements orthogonaux  $d-q$  :

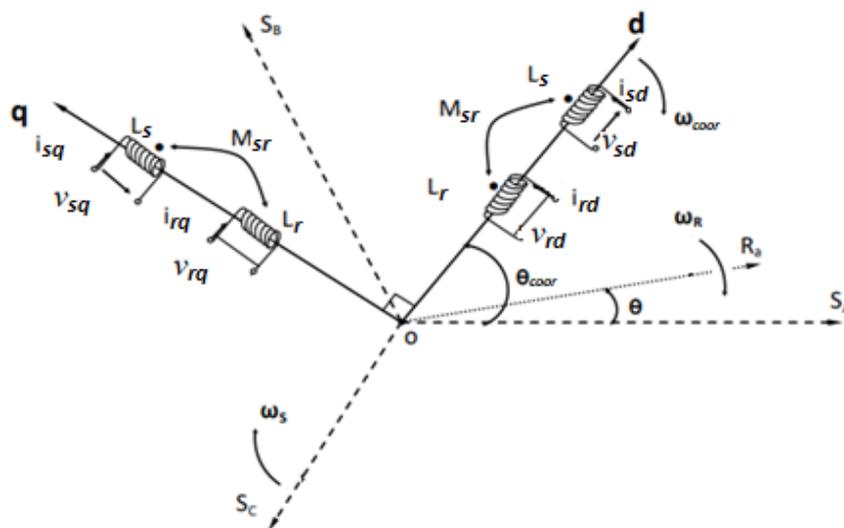


Fig.II.2 - Référentiel tournant d'axe ( $d$  et  $q$ )

Où :  $\theta_{coord} = \int \omega_{coord} dt$

Pour le passage du système triphasé au système biphasé, on a les équivalents suivants :

- L'équivalent de tension :  $[v_{dq0}] = [P(\theta_{coor})][v_{abc}]$
- L'équivalent de courant :  $[i_{dq0}] = [P(\theta_{coor})][i_{abc}]$
- L'équivalent de flux :  $[\Phi_{dq0}] = [P(\theta_{coor})][\Phi_{abc}]$

$$(II.22)$$

Où :  $[P(\theta_{coor})]$  : Matrice de Park.

Dans le cas d'un passage inverse, on a :

$$\begin{cases} [v_{abc}] = [P(\theta_{coor})]^{-1}[v_{dq0}] \\ [i_{abc}] = [P(\theta_{coor})]^{-1}[i_{dq0}] \\ [\Phi_{abc}] = [P(\theta_{coor})]^{-1}[\Phi_{dq0}] \end{cases} \quad (II.23)$$

Les matrices de transformation de Park modifiée directe et inverse s'écrivent alors :

$$[P(\theta_{coor})] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{coor}) & \cos\left(\theta_{coor} - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_{coor} + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_{coor}) & -\sin\left(\theta_{coor} - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_{coor} + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (II.24)$$

$$[P(\theta_{coor})]^{-1} = [P(\theta_{coor})]^t = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{coor}) & -\sin\left(\theta_{coor} - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta_{coor} - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_{coor} - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta_{coor} + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_{coor} + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (II.25)$$

### II.3.3 Equations des tensions

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{coor} \\ \omega_{coor} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \end{bmatrix} \quad (II.26)$$

$$\begin{bmatrix} v_{rd} \\ v_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -(\omega_{coor} - \omega_r) \\ (\omega_{coor} - \omega_r) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (II.27)$$

### II.3.4 Equations magnétiques

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (II.28)$$

Avec :

$$L_s = (l_{fs} + L_m) ; L_r = (l_{fr} + L_m) ; L_m = \frac{3}{2} l_m$$

En remplaçant les équations II.28 dans II.26 et II.27, on obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} L_s \frac{di_{sd}}{dt} = -R_s i_{sd} + \omega_{coor} L_s i_{sq} - L_m \frac{di_{rd}}{dt} + \omega_{coor} L_m i_{rq} + v_{sd} \\ L_s \frac{di_{sq}}{dt} = -R_s i_{sq} - \omega_{coor} L_s i_{sd} - L_m \frac{di_{rq}}{dt} - \omega_{coor} L_m i_{rd} + v_{sq} \\ L_r \frac{di_{rd}}{dt} = -R_r i_{rd} + (\omega_{coor} - \omega_r) L_r i_{rq} + (\omega_{coor} - \omega_r) L_m i_{sq} - L_m \frac{di_{sd}}{dt} \\ L_r \frac{di_{rq}}{dt} = -R_r i_{rq} - (\omega_{coor} - \omega_r) L_r i_{rd} - (\omega_{coor} - \omega_r) L_m i_{sd} - L_m \frac{di_{sq}}{dt} \end{array} \right. \quad (II.29)$$

### II.3.5 Equations de couple électromagnétique

Le couple électromécanique représenté dans l'équation II.19 devient comme suit :

$$C_e = p L_m (i_{rd} i_{sq} - i_{sd} i_{rq}) \quad (II.30)$$

### II.3.6 Equation d'auto-amorçage

Les équations d'auto excitation de la MAS correspondent en réalité aux équations électriques régissant le fonctionnement des condensateurs :

$[i_c] = \frac{d[Q_c]}{dt}$  : Courant qui traverse les trois condensateurs.

$[Q_c]$  : Charge des trois condensateurs.

Dans le repère de Park :

$$[P(\theta_{coor})] \cdot [i_c] = [P(\theta_{coor})] \frac{d[Q_c]}{dt} \quad (II.31)$$

$$\begin{aligned} [i_{cp}] &= [P(\theta_{coor})] \frac{d[P(\theta_{coor})]^{-1} [Q_{cp}]}{dt} = [P(\theta_{coor})] \left( \frac{d[P(\theta_{coor})]^{-1}}{dt} \right) [Q_{cp}] + \frac{d[Q_{cp}]}{dt} \\ &= \frac{d[\theta_{coor}]}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [Q_{cp}] + \frac{d[Q_{cp}]}{dt} \end{aligned}$$

Sachant que :  $[Q_{cp}] = C [v_{cp}]$

$$\begin{aligned} [i_{cp}] &= C \cdot \omega_{coor} \begin{bmatrix} -v_{cq} \\ v_{cd} \\ 0 \end{bmatrix} + C \frac{d[v_{cp}]}{dt} \\ \frac{d[v_{cp}]}{dt} &= \frac{[i_{cp}]}{C} - \omega_{coor} \begin{bmatrix} -v_{cq} \\ v_{cd} \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Donc :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dv_{cd}}{dt} = \frac{i_{cd}}{C} + \omega_{coor} v_{cq} \\ \frac{dv_{cq}}{dt} = \frac{i_{cq}}{C} - \omega_{coor} v_{cd} \end{array} \right. \quad (II.32)$$

### **II.3.7 Limite de modèle linéaire**

En analyse transitoire (démarrage, choc de charge, etc.), le modèle linéaire développé précédemment de la machine à induction est suffisant dans la plupart des cas pour obtenir de bons résultats. Comme le modèle utilise une inductance magnétisante constante  $L_m$ , cela signifie que le matériau magnétique utilisé pour la conception de la machine est linéaire. Ce modèle n'est donc pas réel et le bon fonctionnement de la génératrice est dû à la prise en compte de la saturation du circuit magnétique de la machine.

La simulation du phénomène d'auto excitation de la MAS par un banc de capacités ne peut se satisfaire de ce modèle puisque c'est la saturation elle-même qui fixe le point de fonctionnement en régime permanent. En effet, lorsque la machine est entraînée par un dispositif externe, la présence d'un champ rémanent dans le circuit magnétique de la machine crée un couple électromagnétique engendrant une force électromotrice sur l'enroulement statorique.

La connexion de capacités sur les phases du stator entraîne alors la création d'un courant réactif qui augmente le champ magnétique de la machine et par conséquent les forces électromotrices [14].

C'est cette réaction cyclique qui permet à la machine d'arriver à un régime permanent situé dans la zone saturée.

### **II.3.8 Modélisation de la génératrice asynchrone en régime non-linéaire (saturé)**

Dans cette partie, nous introduiront le phénomène de saturation du circuit magnétique dans le modèle linéaire établi dans la partie précédente. Ensuite, nous étudierons le comportement dynamique de la GAS avec un mode de fonctionnement autonome à vide.

Dans le modèle linéaire l'inductance magnétisante sera considérée comme constante, ce qui n'est pas le cas dans la réalité, car le matériau magnétique utilisé dans la génératrice pour la construction n'est pas parfaitement linéaire. Cependant dans certaines utilisations de la MAS (alimentation avec onduleur, génératrice auto-excitée, éoliennes), il sera indispensable de tenir compte de l'effet de la saturation du circuit magnétique et donc de la variation de l'inductance magnétisante.

En réalité, les inductances peuvent varier largement selon l'état du flux dans les différentes parties internes de la génératrice. Ainsi, il est plus indiqué qu'elle soit reconsidérée différemment par un système d'équations différentielles avec des paramètres non linéaires caractérisant les modes saturés. En outre, il faudrait alors trouver un modèle qui permet de décrire la variation de ces inductances en fonction du courant magnétisant [15]. Afin de tenir compte de la saturation du circuit magnétique de la machine, il est nécessaire de modéliser la courbe de magnétisation. Plusieurs fonctions sont utilisées ; mais il n'existe aucune fonction qui couvre tous les points de la courbe, pour cela la modélisation reste approximative avec un minimum d'erreur.

### **II.3.9 Phénomène d'effet croisée**

L'effet de la saturation entraîne également un autre phénomène secondaire dit « l'effet croisé », qui peut être considéré comme un couplage magnétique entre les enroulements d'axe d et q de la machine biphasée, ces deux bobinages sont spécialement en quadrature, ce qui veut

dire qu'elles ne devraient avoir aucune interaction mutuelle en régime non saturé [17]. L'effet croisé de la saturation est un phénomène analogue à celui de la réaction d'induit de la machine à courant continu ainsi que la MS à pôles saillants [15] [16].

### II.3.10 Mise en œuvre du modèle saturé dans le référentiel de Park

Réécrivons le système d'équations en tensions (Convention génératrice) :

$$\begin{cases} -v_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_{coor} \cdot \Phi_{sq} \\ -v_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_{coor} \cdot \Phi_{sd} \\ 0 = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - (\omega_{coor} - \omega_r) \cdot \Phi_{rq} \\ 0 = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + (\omega_{coor} - \omega_r) \cdot \Phi_{rd} \end{cases} \quad (II.33)$$

Les flux suivant chaque axe dans le stator et le rotor est la somme d'un flux mutuel et d'un flux de fuites.

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = l_{fs} \cdot i_{sd} + \Phi_{md} \\ \Phi_{sq} = l_{fs} \cdot i_{sq} + \Phi_{mq} \\ \Phi_{rd} = l_{fr} \cdot i_{rd} + \Phi_{md} \\ \Phi_{rq} = l_{fr} \cdot i_{rq} + \Phi_{mq} \end{cases} \quad (II.34)$$

Les composantes d'axes d et q du flux et du courant magnétisants :

$$\begin{cases} \Phi_{md} = L_m \cdot i_{md} \\ \Phi_{mq} = L_m \cdot i_{mq} \end{cases} \quad (II.35)$$

$$\begin{cases} i_{rd} = i_{md} - i_{sd} \\ i_{rq} = i_{mq} - i_{sq} \end{cases} \quad (II.36)$$

En remplaçant les équations II.35 dans II.34, on obtient :

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = l_{fs} \cdot i_{sd} + L_m \cdot i_{md} \\ \Phi_{sq} = l_{fs} \cdot i_{sq} + L_m \cdot i_{mq} \end{cases} \quad (II.37)$$

$$\begin{cases} \Phi_{rd} = l_{fr} \cdot i_{rd} + L_m \cdot i_{md} \\ \Phi_{rq} = l_{fr} \cdot i_{rq} + L_m \cdot i_{mq} \end{cases} \quad (II.38)$$

En remplaçant les équations II.36 dans II.38, on obtient :

$$\begin{cases} \Phi_{rd} = -l_{fr} \cdot i_{sd} + (L_m + l_{fr}) \cdot i_{md} \\ \Phi_{rq} = -l_{fr} \cdot i_{sq} + (L_m + l_{fr}) \cdot i_{mq} \end{cases} \quad (II.39)$$

On considèrera le courant magnétisant circulant dans la branche magnétisante du modèle de la machine comme suit :

$$|i_m| = \sqrt{i_{md}^2 + i_{mq}^2}$$

Les équations des tensions du modèle de Park II.33 de la machine font apparaitre les dérivées des flux par rapport au temps, en les substituant par leurs expressions (équations II.37 et II.39), nous aurons :

$$\left\{ \begin{array}{l} -v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} (l_{fs} i_{sd} + L_m i_{md}) - \omega_{coor} \Phi_{sq} \\ -v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} (l_{fs} i_{sq} + L_m i_{mq}) + \omega_{coor} \Phi_{sd} \\ 0 = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} (-l_{fr} i_{sd} + (l_{fr} + L_m) i_{md}) - (\omega_{coor} - \omega_r) \Phi_{rq} \\ 0 = R_r i_{rq} + \frac{d}{dt} [-l_{fr} i_{sq} + (l_{fr} + L_m) i_{mq}] + (\omega_{coor} - \omega_r) \Phi_{rd} \end{array} \right. \quad (II.40)$$

Développons les termes en dérivées dans les équations statorique II.40 :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Phi_{sd}}{dt} = l_{fs} \cdot \frac{di_{sd}}{dt} + L_m \cdot \frac{di_{md}}{dt} + i_{md} \cdot \frac{dL_m}{dt} \\ \frac{d\Phi_{sq}}{dt} = l_{fs} \cdot \frac{di_{sq}}{dt} + L_m \cdot \frac{di_{mq}}{dt} + i_{mq} \cdot \frac{dL_m}{dt} \end{array} \right. \quad (II.41)$$

Les inductances de fuite sont considérées constantes et l'inductance  $L_m$  est en fonction de  $|i_m|$  nous pouvons écrire donc :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Phi_{sd}}{dt} = l_{fs} \cdot \frac{di_{sd}}{dt} + L_m \cdot \frac{di_{md}}{dt} + i_{md} \cdot \frac{dL_m}{d|i_m|} \cdot \frac{d|i_m|}{dt} \\ \frac{d\Phi_{sq}}{dt} = l_{fs} \cdot \frac{di_{sq}}{dt} + L_m \cdot \frac{di_{mq}}{dt} + i_{mq} \cdot \frac{dL_m}{d|i_m|} \cdot \frac{d|i_m|}{dt} \end{array} \right. \quad (II.42)$$

Soit :

$$L'_m = \frac{dL_m}{d|i_m|}$$

Et la dérivée du courant magnétisant est :

$$\frac{d|i_m|}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \sqrt{i_{md}^2 + i_{mq}^2} \right) = \frac{i_{md}}{|i_m|} \cdot \frac{di_{md}}{dt} + \frac{i_{mq}}{|i_m|} \cdot \frac{di_{mq}}{dt} \quad (II.43)$$

En remplaçant la dérivée du courant magnétisant II.43 dans II.42, on obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Phi_{sd}}{dt} = l_{fs} \cdot \frac{di_{sd}}{dt} + \left[ L_m + L'_m \cdot \frac{i_{md}^2}{|i_m|} \right] \cdot \frac{di_{md}}{dt} + L'_m \cdot \frac{i_{md} \cdot i_{mq}}{|i_m|} \cdot \frac{di_{mq}}{dt} \\ \frac{d\Phi_{sq}}{dt} = l_{fs} \cdot \frac{di_{sq}}{dt} + \left[ L_m + L'_m \cdot \frac{i_{mq}^2}{|i_m|} \right] \cdot \frac{di_{mq}}{dt} + L'_m \cdot \frac{i_{md} \cdot i_{mq}}{|i_m|} \cdot \frac{di_{md}}{dt} \end{array} \right. \quad (II.44)$$

Les termes  $\left[ L_m + L'_m \cdot \frac{i_{md}^2}{|i_m|} \right] \cdot \frac{di_{md}}{dt}$  et  $\left[ L_m + L'_m \cdot \frac{i_{mq}^2}{|i_m|} \right] \cdot \frac{di_{mq}}{dt}$  : expriment respectivement l'effet dû à la saturation suivant les axes direct et en quadrature.

Les dérivées des flux rotoriques s'obtiennent en suivant la même démarche :

$$\begin{cases} \frac{d\phi_{rd}}{dt} = -l_{fr} \cdot \frac{di_{sd}}{dt} + \left[ l_{fr} + L_m + L'_m \cdot \frac{i_{md}^2}{|i_m|} \right] \cdot \frac{di_{md}}{dt} + L'_m \cdot \frac{i_{md} \cdot i_{mq}}{|i_m|} \cdot \frac{di_{mq}}{dt} \\ \frac{d\phi_{rq}}{dt} = -l_{fr} \cdot \frac{di_{sq}}{dt} + \left[ l_{fr} + L_m + L'_m \cdot \frac{i_{mq}^2}{|i_m|} \right] \cdot \frac{di_{mq}}{dt} + L'_m \cdot \frac{i_{md} \cdot i_{mq}}{|i_m|} \cdot \frac{di_{md}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.45})$$

Pour alléger le modèle, on pose :

$$L_d = L_m + L'_m \cdot \frac{i_{md}^2}{|i_m|} : \text{Inductance magnétisante statique suivant l'axe d ;}$$

$$L_q = L_m + L'_m \cdot \frac{i_{mq}^2}{|i_m|} : \text{Inductance magnétisante dynamique suivant l'axe q ;}$$

$$L_{dq} = L'_m \cdot \frac{i_{md} i_{mq}}{|i_m|} : \text{Représente inductance magnétisante d'effet croisé.}$$

D'où on aura le d'équations des dérivées des flux :

$$\begin{cases} \frac{d\phi_{sd}}{dt} = l_{fs} \frac{di_{sd}}{dt} + L_d \frac{di_{md}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{mq}}{dt} \\ \frac{d\phi_{sq}}{dt} = l_{fs} \frac{di_{sq}}{dt} + L_q \frac{di_{mq}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{md}}{dt} \\ \frac{d\phi_{rd}}{dt} = -l_{fr} \frac{di_{sd}}{dt} + (l_{fr} + L_d) \frac{di_{md}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{mq}}{dt} \\ \frac{d\phi_{rq}}{dt} = -l_{fr} \frac{di_{sq}}{dt} + (l_{fr} + L_q) \frac{di_{mq}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{md}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.46})$$

Le modèle saturé de la GAS est finalement obtenu en introduisant l'équation II.46 dans le modèle de Park établi précédemment.

$$\begin{cases} -v_{sd} = R_s i_{sd} + l_{fs} \frac{di_{sd}}{dt} + L_d \frac{di_{md}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{mq}}{dt} - \omega_{coor} (l_{fs} i_{sq} + L_m i_{mq}) \\ -v_{sq} = R_s i_{sq} + l_{fs} \frac{di_{sq}}{dt} + L_q \frac{di_{mq}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{md}}{dt} + \omega_{coor} (l_{fs} i_{sd} + L_m i_{md}) \\ 0 = R_r (i_{md} - i_{sd}) - l_{fr} \frac{di_{sd}}{dt} + (l_{fr} + L_d) \frac{di_{md}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{mq}}{dt} - (\omega_{coor} - \omega_r) (-l_{fr} i_{sq} + (l_{fr} + L_m) i_{mq}) \\ 0 = R_r (i_{mq} - i_{sq}) - l_{fr} \frac{di_{sq}}{dt} + (l_{fr} + L_q) \frac{di_{mq}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{md}}{dt} + (\omega_{coor} - \omega_r) (-l_{fr} i_{sd} + (l_{fr} + L_m) i_{md}) \end{cases} \quad (\text{II.47})$$

#### II.4 Modélisation du moteur thermique

La modélisation du moteur thermique doit prendre en considération les pièces du moteur en mouvement, la puissance fournie  $P_i$  et la somme des puissances dissipées  $P_{diss}$ . Le moteur fonctionne à régime constant pour une charge donnée afin de maintenir constante la tension et

la fréquence du courant fourni par la génératrice. Le principe de la conversion d'énergie s'écrit alors comme suit [16] :

$$P_i - P_{diss} = 0 \quad (\text{II.48})$$

La puissance fournie peut être représentée par l'expression suivante [18] :

$$P_i = P_{ci} \cdot n_i \cdot m_f \quad (\text{II.49})$$

Avec :  $P_{ci}$  : Pouvoir calorifique inférieur du carburant ;  $n_i$  : Rendement indiqué du moteur ;  $m_f$  : Débit de carburant injecté dans la chambre de combustion.

La puissance dissipée totale, inclut d'une part l'effet de frottement des pièces mécaniques en mouvement comme (bielles, pistons, vilebrequin) et d'autre part celui de la charge appliquée sur le moteur.

### **II.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons établi un modèle mathématique de la MAS en partant des équations des tensions, exprimées dans les axes réels puis développées vers un système d'équations différentielles. Pour cela nous avons utilisé la transformation triphasé-biphasé qui permet de rendre constants les coefficients variables. En partant des équations de base de la MAS nous avons établi le modèle mathématique linéaire de la GAS.

Lors de cette étude, nous avons négligé l'effet de la saturation du circuit magnétique.

En deuxième lieu nous avons introduit le phénomène de saturation du circuit magnétique, dans le modèle établi par la variation de l'inductance magnétisante considérée constante dans le modèle linéaire. L'objectif de l'élaboration du modèle analytique, tout en tenant compte de la saturation, est de pouvoir étudier le fonctionnement générateur autonome de la MAS dans les différents cas. Ceci sera traité au troisième chapitre.

La dernière partie de ce chapitre est consacrée pour la modélisation du moteur thermique, où nous avons donné son modèle simplifié.

# **Chapitre III**

**Identification et simulation de la  
génératrice asynchrone**

### III Identification et simulation de la génératrice asynchrone

#### III.1 Introduction

La première partie de ce chapitre sera dédiée à l'identification des paramètres de la GAS à travers des essais classiques tels que l'essai à vide, l'essai au synchronisme et l'essai à rotor bloqué.

La deuxième partie de ce chapitre sera consacrée à la validation du modèle en fonctionnement moteur alimenté par une source triphasée de tensions.

Dans la troisième partie, des simulations du fonctionnement à vide de la GAS seront effectuées, en utilisant tout d'abord le modèle linéaire afin de déterminer les problèmes liés à l'utilisation de ce modèle pour étudier un tel fonctionnement.

Ensuite, en utilisant le modèle non linéaire, nous illustreront l'influence des variations de la charge sur les grandeurs de la GAS auto-excitée. Une étude sera effectuée à vide puis en charge en alimentant des charges équilibrées et déséquilibrées, connectées directement au bobinage statorique de la machine avec une comparaison des résultats de simulation dans les deux repères  $abc$  et  $dq0$ .

#### III.2 Identification des paramètres de la génératrice asynchrone

Dans cette partie, on propose une méthodologie classique à suivre pour identifier les paramètres de la GAS. Il s'agit d'une étape préliminaire importante en vue d'étude du comportement de la GAS. L'identification de ces paramètres électriques et mécaniques constitue, donc une étape essentielle pour les travaux à venir. Pour cela nous avons utilisé des tests à l'arrêt et en rotation.

Les résultats obtenus sont injectés dans les programmes de simulation de la machine.

La comparaison entre les résultats simulés et mesurés, permet de valider notre identification.

##### III.2.1 Banc d'essai expérimental

La machine de test est une MAS à cage d'écureuil de 1.1 kW, 1 paire de pôles, 220/380V, 50Hz, 2850 tr/min, de laboratoire de machines électriques de l'université Abderrahmane Mira - Bejaia.

Outre la MAS, le banc d'essais est doté de :

- Machine synchrone à pôles lisses, pour l'entraînement de la génératrice, cela permet de garantir la vitesse de rotation fixe des deux machines à 3000 tr/min ;
- Un banc de capacité variable ;
- Files de raccordement ;
- Source d'alimentation variable ;
- Autotransformateur ;
- Tachymètre ;
- Ampèremètre analogique, Voltmètre, Pince multimètre numérique ;
- Oscilloscope numérique.



Fig.III.1 - Appareils de mesure utilisée



Fig.III.2 - Oscilloscope numérique (Siglent Shs806)

Une photo du banc d'essai expérimental prise au laboratoire est donnée sur la figure III.3 :

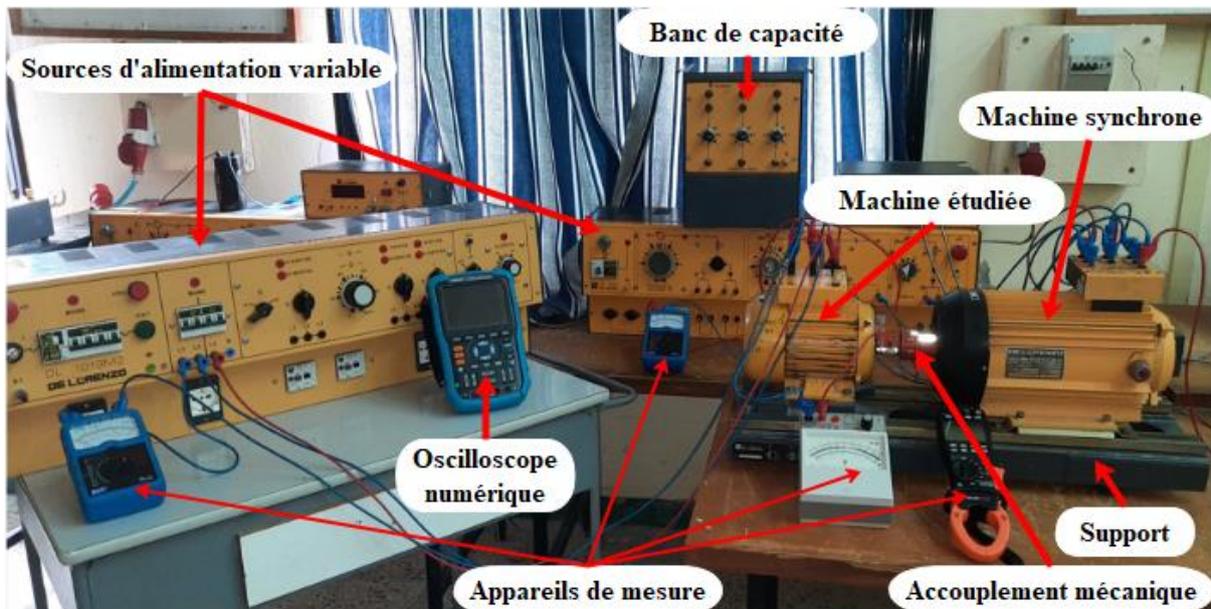


Fig.III.3 - Banc d'essai expérimental

**III.2.2 Essai Volt-Ampèremétriques**

Pour déterminer la résistance d’enroulement statorique, on procède à l’essai volt-ampèremétrique, c'est-à-dire d’alimenter le bobinage statorique par des tensions continue et on mesure à chaque fois le courant, la mesure doit être effectuée à chaud.

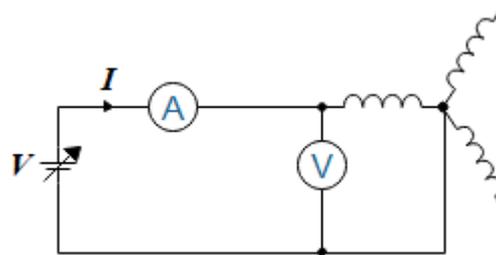


Fig.III.4 – Schéma de montage

Tableau III.1 - Valeurs mesurées de la tension et du courant et calculées de la résistance statorique dans les trois phases

N° de la phase	Valeurs mesurées				Valeurs calculées
					$R_{moy} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{V_i}{I_i}$
Phase A	$V_a (V)$	3.31	6.5	12.9	$R_{moy\_a} = 6.74 (\Omega)$
	$I_a (A)$	0.5	1	2	
Phase B	$V_b (V)$	3.51	6.67	13.1	$R_{moy\_b} = 6.52 (\Omega)$
	$I_b (A)$	0.5	1	2	
Phase C	$V_c (V)$	3.34	6.7	13.1	$R_{moy\_c} = 6.64 (\Omega)$
	$I_c (A)$	0.5	1	2	

$$V = R \cdot I \tag{III.1}$$

$$R = \frac{V}{I} \tag{III.2}$$

$$R_{smoy} = \frac{R_{moy\_a} + R_{moy\_b} + R_{moy\_c}}{3} = 6.6378 (\Omega)$$

Alors la valeur de  $R_s$  moyenne est de : 6.6378 ( $\Omega$ )

**III.2.3 Détermination des pertes mécaniques**

Afin de déterminer les pertes mécaniques, nous avons recouru à la méthode de couplage et découplage des deux machines, pour cela on entraîne la génératrice à l’aide de la MS tout en mesurant la puissance consommée par cette dernière (couplé), puis en mesurent la puissance

consommée de la MS à vide (découplé) tout en gardant la même tension et le même courant d'excitation.

Les pertes mécaniques de la GAS seront la soustraction de la puissance absorbée de la MS couplée avec la GAS, de la puissance absorbée de la MS à vide.

Tableau III.2 - Valeurs mesurées de la puissance absorbée de la MS et calculées des pertes mécaniques de la GAS

Valeurs mesurées		Valeurs calculées
$P_{couplé} (W)$	$P_{découplé} (W)$	$p_{mec} = P_{découplé} - P_{couplé} (W)$
231.42	270	38.58

Alors les pertes mécaniques de la génératrice sont de l'ordre 38.58 W.

### III.2.4 Détermination de la résistance de magnétisation

La machine à vide est alimentée à sa tension nominale (glissement  $\approx 0$ ), dans ce cas, la résistance  $\frac{R_r}{g}$  devient très grande, ceci entraîne un courant presque nul dans la branche rotorique.

Les grandeurs de la génératrice (tension ; courant ; puissance active ; puissance réactive ; facteur de puissance) sont mesurées à l'aide d'une pince multimètre numérique.

Le bilan de puissance de l'essai à vide sous tension nominale permet de déterminer :

- Les pertes à effet Joule à vide ( $R_s$  a été mesurée précédemment) ;
- Les pertes fer.

$$\begin{cases} P_{s0} = p_j + p_f + p_{mec} \\ p_j = 3R_s I_{s0}^2 \\ p_f = P_{s0} - p_j - p_{mec} \end{cases} \quad (III.3)$$

$$R_m = \frac{p_f}{3I_{s0}^2} \quad (III.4)$$

A l'aide de la pince multimètre numérique, on a mesuré les puissances par chaque phase, les résultats obtenus sont classés dans le tableau III.3.

Tableau III.3 - Valeurs mesurées et calculées par l'essai à vide

Valeurs mesurées			Valeurs calculées		
$V_{s0} (V)$	$I_{s0} (A)$	$P_{s0} (W)$	$p_j (W)$	$p_f (W)$	$R_m (\Omega)$
210,9	0,880952	70	15,45433	15,96567	6,857423
217,1	0,933333	77,14286	17,34678	21,21607	8,118395
220,8	0,957143	88,57143	18,24311	31,74832	11,5517

$$R_{m\_moy} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 R_{m\_i} = 8.84251 \Omega$$

### III.2.5 Détermination de l'inductance propre cyclique statorique et de la résistance magnétisante (Essai au synchronisme)

Pour déterminer la réactance de magnétisation  $X_m$  et la réactance de fuite  $X_s$ , on entraîne la génératrice à sa vitesse de synchronisme (3000 tr/min) à l'aide d'une MS puis on alimente la GAS à des valeurs différentes de la tension et on relève les valeurs des puissances active et réactive et du courant absorbé.

Afin de vérifier la valeur de la résistance de magnétisation calculée dans l'essai à vide, on recalcule cette dernière dans l'essai au synchronisme.

Au synchronisme, le glissement est nul, le schéma équivalent est représenté de la manière suivante :

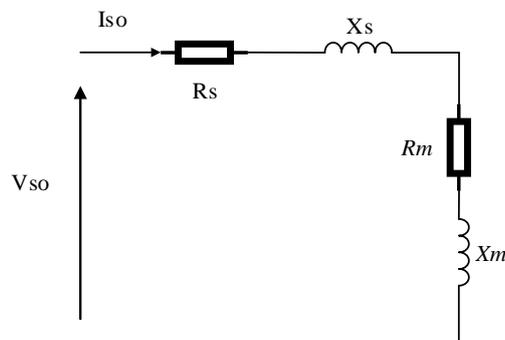


Fig.III.5 - Schéma équivalent par phase, l'essai au synchronisme

La mesure de différentes grandeurs a été faite par deux méthodes, la première consiste à utiliser une pince multimètre numérique pour relever les différentes grandeurs, la deuxième consiste à utiliser un oscilloscope numérique.

#### a) Méthode 1

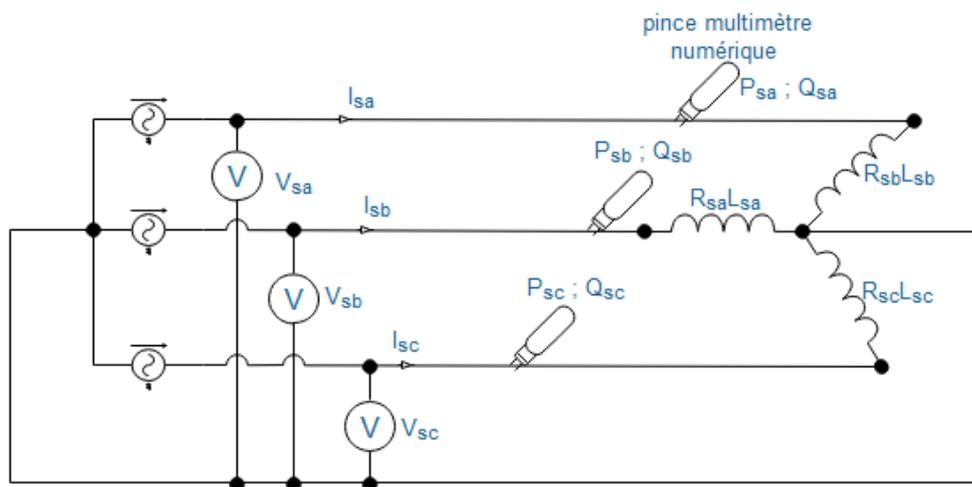


Fig.III.6 – Schéma de montage de l'essai au synchronisme

Les résultats de mesures sont représentés dans tableau III.4.

Sachant que :

$$V_s = \frac{1}{3}(V_{sa} + V_{sb} + V_{sc}) ; I_s = \frac{1}{3}(I_{sa} + I_{sb} + I_{sc})$$

$$Q_s = Q_{sa} + Q_{sb} + Q_{sc} ; P_s = P_{sa} + P_{sb} + P_{sc}$$

Tableau III.4 - Valeurs mesurées et calculées par l'essai au synchronisme

Valeurs mesurées				Valeurs calculées		
$V_s$ (V)	$I_s$ (A)	$P_s$ (W)	$Q_s$ (VAr)	$X_m+X_s$	$R_m$ ( $\Omega$ )	$L_m+l_{fs}$ (H)
192,9	0,795238	35,78571	442,8571	233,4254	12,22448	0,743393
201,2	0,828571	38,64286	498,5714	242,0729	12,12459	0,770933
206,0333	0,847619	42,92857	524,2857	243,2458	13,27919	0,774668
210,9333	0,9	42,92857	567,1429	233,3921	11,02828	0,743287
216,7	0,947619	45,78571	608,5714	225,9034	10,35798	0,719438
223,0333	0,995238	47,21429	661,4286	222,5911	9,251259	0,708889
230,8333	1,038095	45,78571	714,2857	220,941	7,524518	0,703634
241,7667	1,157143	50,07143	837,1429	208,4032	5,827271	0,663704
252,3	1,280952	52,92857	971,4286	197,3439	4,114539	0,628484
261,7667	1,438095	64,35714	1121,429	180,7487	3,7351	0,575633
271,8333	1,647619	70,07143	1334,286	163,8377	1,966313	0,521776

$$\begin{cases} P_s = 3(R_s + R_m)I_s^2 \\ (R_s + R_m) = \frac{P_s}{3I_s^2} \end{cases} \quad (III.5)$$

$$R_m = \frac{P_s}{3I_s^2} - R_s \quad (III.6)$$

$$\begin{cases} Q_s = 3(X_s + X_m)I_s^2 \\ (X_s + X_m) = \frac{Q_s}{3I_s^2} \end{cases} \quad (III.7)$$

$$(l_{fs} + L_m) = L_s = \frac{(X_s + X_m)}{\omega_s} \quad (III.8)$$

Donc :

$$(l_{fs} + L_m)_{moy} = L_{s\_moy} = \frac{1}{11} \sum_{i=1}^{11} L_{s,i} = 0.68671 H$$

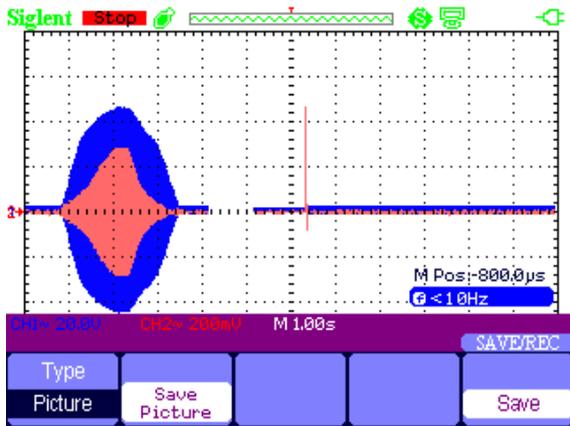
$$R_{m\_moy} = \frac{1}{11} \sum_{i=1}^{11} R_{m,i} = 8.312138 (\Omega)$$

**b) Méthode 2**

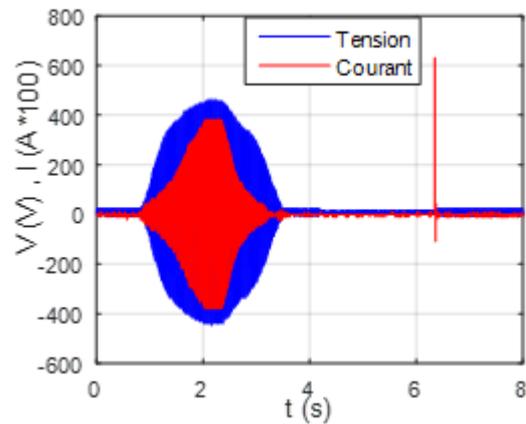
Pour plus de précision dans les valeurs trouvées dans la première méthode, on a eu recours à une autre méthode (étude comparative) qui consiste à remplacer la pince multimètre numérique par un oscilloscope numérique permettant de capter l'évolution de la tension et du courant lors de l'essai au synchronisme.

Les données récupérées par l'oscilloscope ont été traitées par logiciel MATLAB/Simulink, afin de déterminer les puissances active et réactive et celle du déphasage.

Les résultats de mesure sont illustrés dans la figure III.7



a) Données de l'oscilloscope



b) Données traitées avec MATLAB/Simulink

Fig.III.7 - Evolution de la tension et du courant lors de l'essai au synchronisme

Avant de procéder au calcul des réactances, il est nécessaire de calculer les puissances active et réactive, pour cela il faut d'abord trouver les valeurs efficaces de la tension et du courant (valeurs données par l'oscilloscope sont des valeurs maximales) ainsi que le déphasage entre eux.

Les résultats obtenus :

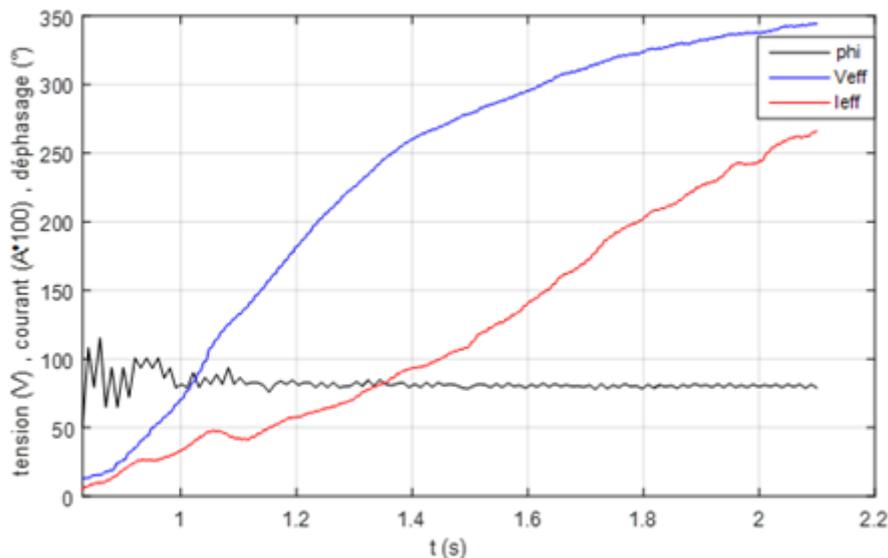


Fig.III.8 - Allures de la tension efficace, du courant efficace et du déphasage

En se basant sur les relations III.9 et III.10, nous avons déterminé sous MATLAB/Simulink les puissances active et réactive d'une phase :

$$P = V . I . \cos(\varphi) \tag{III.9}$$

$$Q = V . I . \sin(\varphi) \tag{III.10}$$

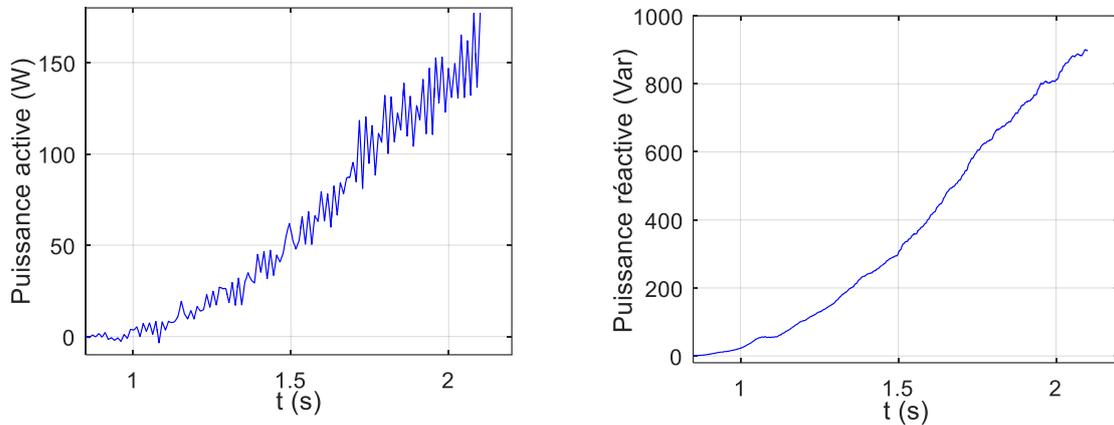


Fig.III.9 - Evolution des puissances active et réactive par phase lors de l'essai au synchronisme

En se basant sur les relations III.7 et III.8, on détermine sous MATLAB/Simulink l'évolution de  $L_s$  illustrée dans la figure III.10, les résultats de simulation nous donne 12024 valeurs différentes de  $L_s$ , on utilise l'instruction « MEAN » qui permet de déterminer la valeur moyenne de  $L_s$ .

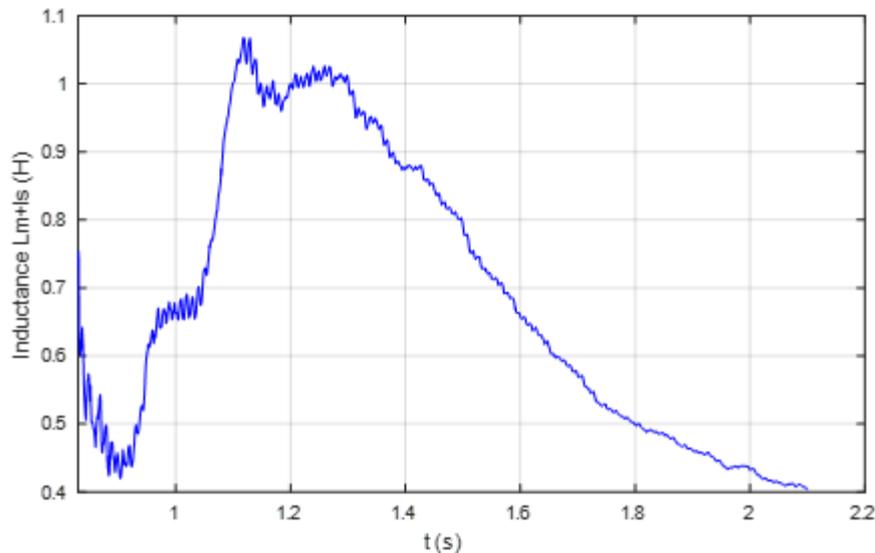


Fig.III.10 - Evolution de l'inductance cyclique  $L_s$

Finalement la valeur moyenne de  $L_{s\_moy}$  est de 0.6832 H.

III.2.6 Détermination de  $l_{fs}$ ,  $l'_{fr}$ ,  $L_m$  et  $R'_r$  (Essai à rotor bloqué)

A l'aide d'un dispositif de blocage, on a bloqué le rotor de la génératrice et on a alimenté le stator sous une tension réduite  $V_{cc}$  (jusqu'à 41 V) progressivement jusqu'à  $I_{cc} \leq I_n$ . Les grandeurs ont été mesurées en utilisant les deux méthodes utilisées dans l'essai précédant.

A rotor calé, le glissement est égal à l'unité et la branche magnétisante sera négligée donc le schéma équivalent devient :

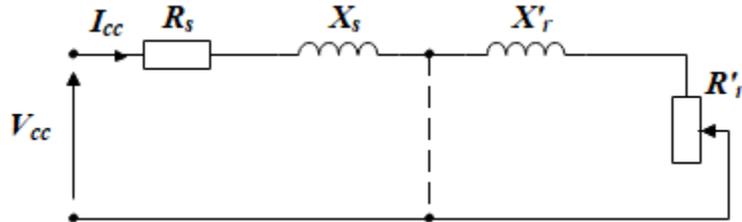


Fig.III.11 - Schéma équivalent par phase ramené au stator l'essai à rotor bloqué

L'impédance vue de bornes de tension d'alimentation est :

$$\underline{Z}_{cc} = \underline{Z}_s + \underline{Z}_r \tag{III.11}$$

Tel que :

$$\begin{cases} \underline{Z}_s = R_s + jX_s \\ \underline{Z}_r = R'_r + jX'_r \end{cases} \tag{III.12}$$

D'où

$$P_{cc} = 3(R_s + R'_r)I_{cc}^2 \tag{III.13}$$

$$R'_r = \frac{P_{cc}}{3I_{cc}^2} - R_s \tag{III.14}$$

Et

$$Q_{cc} = 3(X_s + X'_r)I_{cc}^2 \tag{III.15}$$

En admettant que  $X_s = X'_r$

D'où

$$\begin{cases} X_s = \frac{Q_{cc}}{6I_{cc}^2} \\ l_{fs} = l'_{fr} = \frac{X_s}{\omega_s} \end{cases} \tag{III.16}$$

**a) Méthode 1**

Le schéma de montage est celui de la figure III.6.

Les résultats obtenus sont classés dans le tableau III.5 :

Tableau III.5 - Valeurs mesurées et calculées par l'essai à rotor bloqué

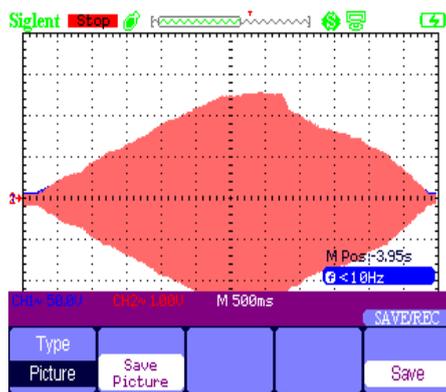
Valeurs mesurées				Valeurs calculées		
$V_{cc}$	$I_{cc}$	$P_{cc}$	$Q_{cc}$	$X_s=X'_r$	$l_{fs}=l'_{fr}$	$R'_r$
20,43333	1,006667	40	45,8055	7,533469	0,023992	6,519518
30,93333	1,533333	96	103,2705	7,320685	0,023314	6,972786
41,36667	2,033333	172	183,1968	7,384983	0,023519	7,22944

On aura :  $l_{fs\_moy} = 0.02361 H$  ;  $R'_r\_moy = 6.90725 \Omega$  ;  $L_{m\_moy} = 0.6631 H$

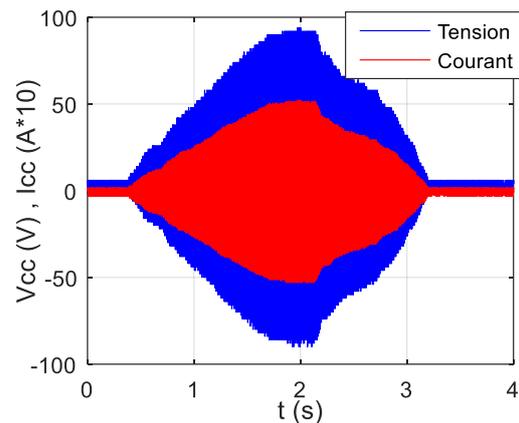
Tel que :  $L_{m\_moy} = L_{s\_moy} - l_{fs\_moy}$

**b) Méthode 2**

La même procédure a été suivie (méthode 2 essai au synchronisme) pour déterminer les puissances active et réactive, ainsi que le déphasage.



a) Données de l'oscilloscope



b) Données traité avec Matlab Simulink

Fig.III.12 - Evolution de la tension et du courant lors de l'essai à rotor bloqué

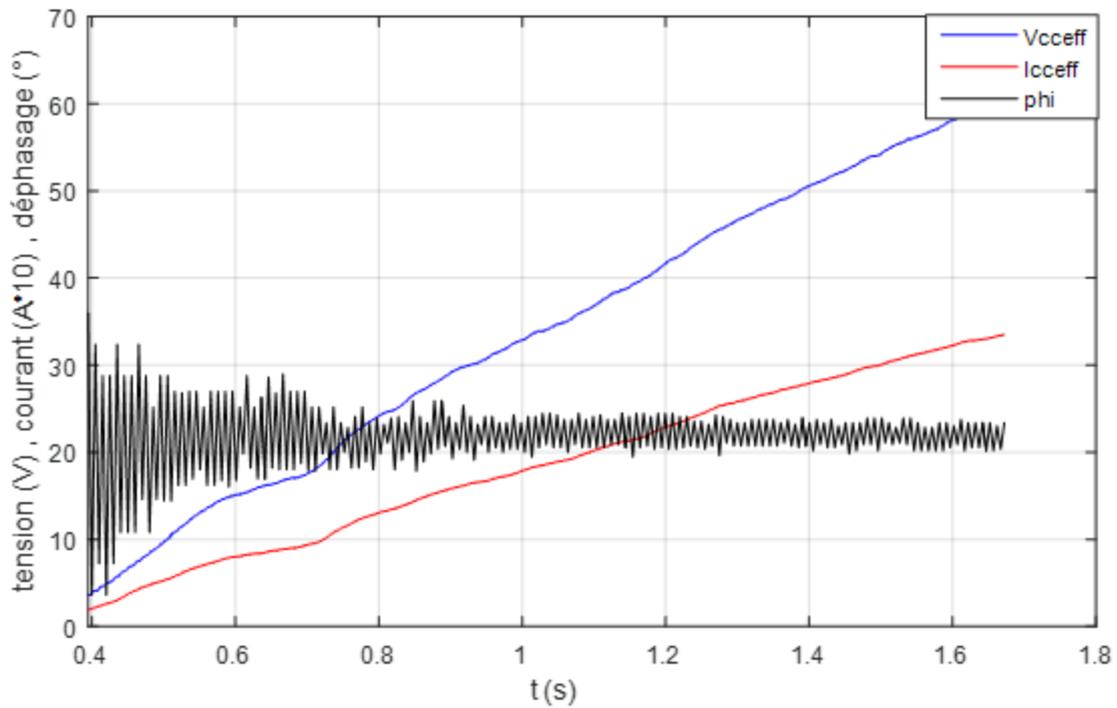


Fig.III.13 - Allures de la tension efficace, du courant efficace et du déphasage (à rotor bloqué)

En se basant sur les relations III.9 et III.10, on a déterminé sous MATLAB/Simulink les puissances consommées active et réactive :

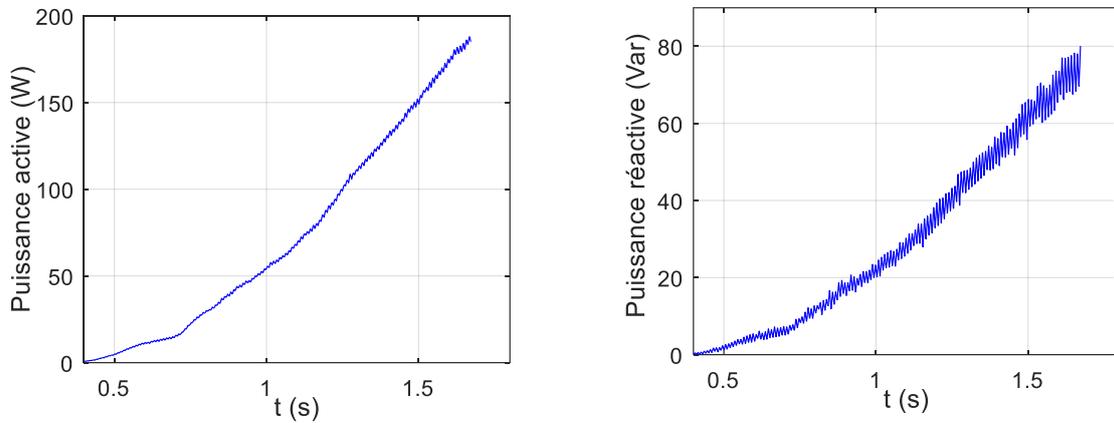


Fig.III.14 - Evolution des puissances active et réactive lors de l'essai à rotor bloqué

En se basant sur les relations III.14 et III.16, on a déterminé sous MATLAB /Simulink l'évolution de  $l_{fs}$  et de  $R_{eq}$  illustrée dans les figures III.15 et III.16. Les résultats de simulation nous donnent 12024 valeurs différentes de  $l_{fs}$  et de  $R_{eq}$ , on a utilisé l'instruction « MEAN » qui permet de déterminer leurs valeurs moyennes.

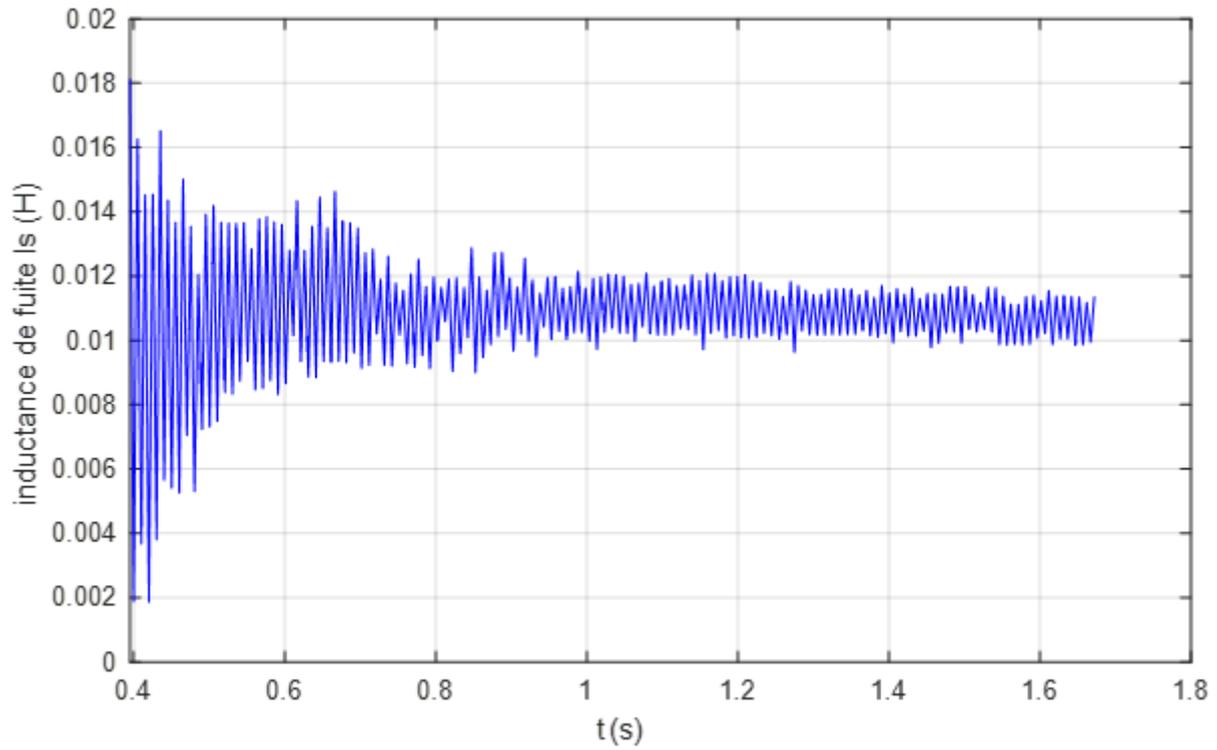


Fig.III.15 – Evolution de l’inductance de fuite  $l_{fs}$

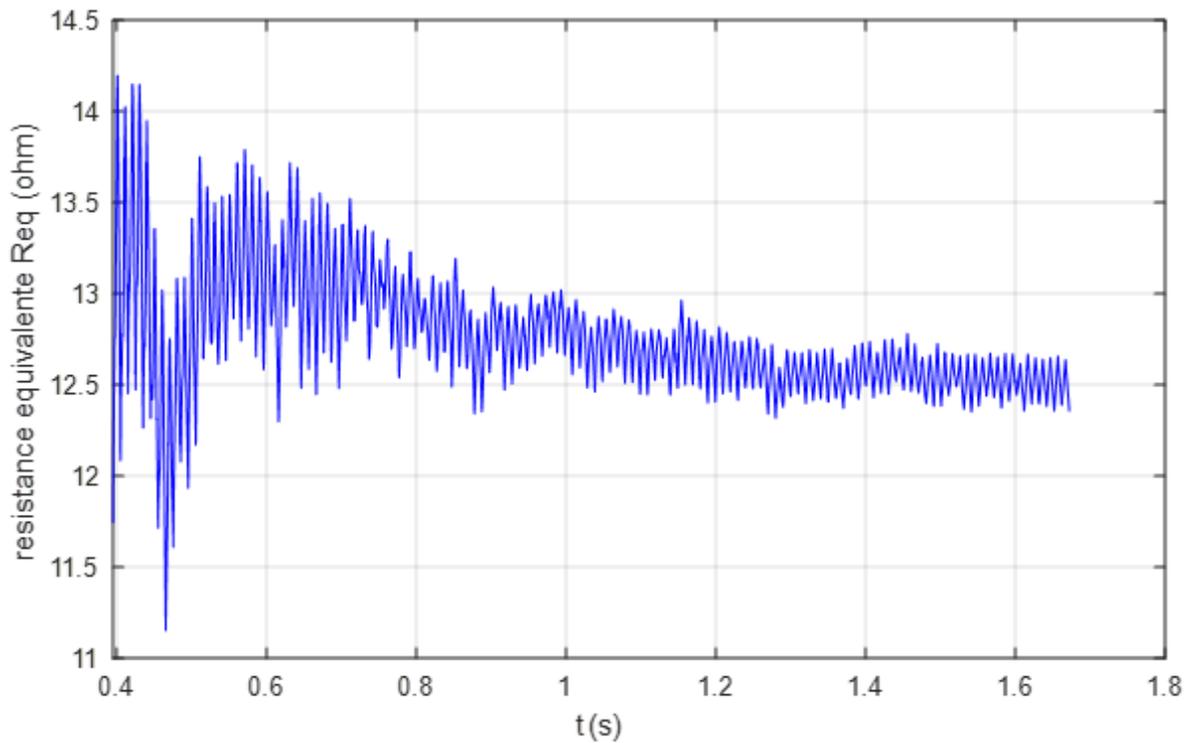


Fig.III.16 - Evolution de la résistance équivalent  $R_{eq}$

$$l_{fs} = 0.0108 \text{ H} ; R_{eq} = 12.7543 \text{ } \Omega$$

$$R_{eq} = R_s + R'_r$$

$$R'_r = 6.1165 \text{ } \Omega$$

$$L_m = L_s - l_{fs} = 0.6832 - 0.0108 = 0.6724 \text{ H}$$

### III.2.7 Détermination des paramètres mécaniques

#### a) Mesure du coefficient de frottement

La mesure du coefficient de frottement est basée sur la mesure de la puissance mécanique (déterminer précédemment), d'après l'expression du couple résistant (III.17), le coefficient de frottement est calculé par :

Admettant que :

$$C_r = f \cdot \Omega \tag{III.17}$$

On aura :

$$f = \frac{P_{mec}}{\Omega^2} \tag{III.18}$$

$$f = \frac{38.58}{(313.64)^2} = 0.0003922 \text{ N.m.s/rad}$$

#### b) Mesure du moment d'inertie (essai en ralentissement)

Le principe de la méthode de ralentissement utilisée consiste à lancer la machine à sa vitesse nominale puis à couper l'alimentation et à laisser la machine ralentir sous l'effet de frottement. L'évolution de la vitesse (décroissante) est captée par un tachymètre et d'un chronomètre ce qui nous permet de tracer la courbe de ralentissement illustrée sur la figure III.17.

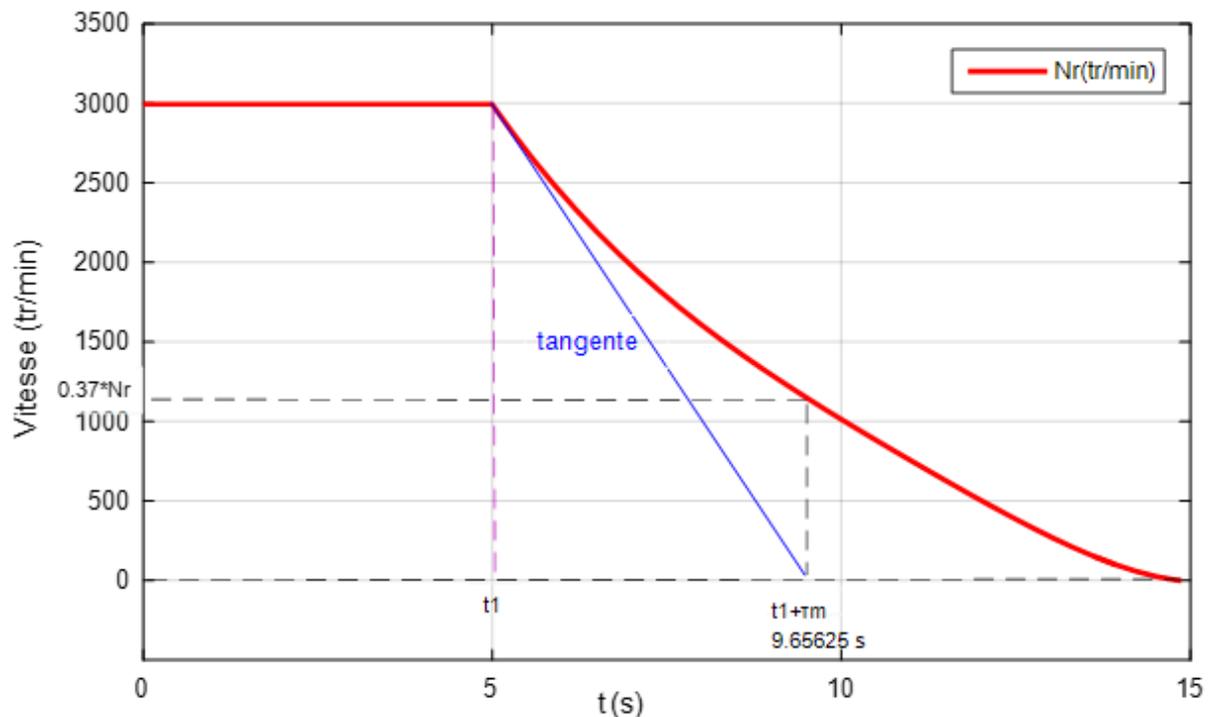


Fig.III.17 - Essai au ralentissement

En résolvant l'équation III.19 :

$$J \frac{d}{dt} \Omega_r = C_e - C_r - f \Omega_r \quad (III.19)$$

On obtient :

$$\Omega_r(t) = \Omega_0 e^{(-\frac{t}{\tau_m})} - \frac{C_r}{f} \quad (III.20)$$

Le couple résistant égale à zéro et  $N_r = 2995 \text{ tr/min}$

On trouve la constante du temps mécanique  $\tau_m$  avec deux méthodes :

Soit :

➤ La méthode de 0.37% tel que

$$\Omega_r(\tau_m) = 0.37 \Omega_0$$

➤ La méthode de la tangente a l'origine

$$\tau_m = 9.65625 - 5 = 4.65625 \text{ s}$$

$$\tau_m = \frac{J}{f} \quad (III.21)$$

On aura alors :

$$J = f \cdot \tau_m \quad (III.22)$$

$$J = 0.00182618 \text{ kg.m}^2$$

### III.2.8 Identification et approximation de l'inductance de magnétisation $L_m$

Connaissant les valeurs de la résistance statorique et de l'inductance de fuite identifiées précédemment, on déduit la valeur de l'inductance magnétisante en fonction du courant efficace de magnétisation de la machine. On obtient alors la caractéristique de  $L_m$  en fonction du courant efficace. La caractéristique  $L_m = f(|i_m|)$  se déduit de la manière suivante :

Au synchronisme les courants rotoriques étant nuls, les composantes directe et en quadrature des courants statoriques dans le repère de Park s'expriment alors, en fonction du courant efficace de phase, par les relations suivantes :

Sachant que :

$$|i_{eff}| = \sqrt{\frac{1}{3}} \sqrt{i_{md}^2 + i_{mq}^2} \quad (III.23)$$

On aboutit à la caractéristique  $L_m = f(|i_m|)$

$$|i_m| = \sqrt{3} \cdot i_{eff} \quad (III.24)$$

Dans cette approche, nous avons choisi d'approximer l'évolution de l'inductance de magnétisation en fonction du courant de magnétisation par une expression polynômiale en utilisant l'instruction « Polyfit » sous Matlab, basée sur la méthode des moindres carrées les résultats sont illustrés dans la Fig.III.18.

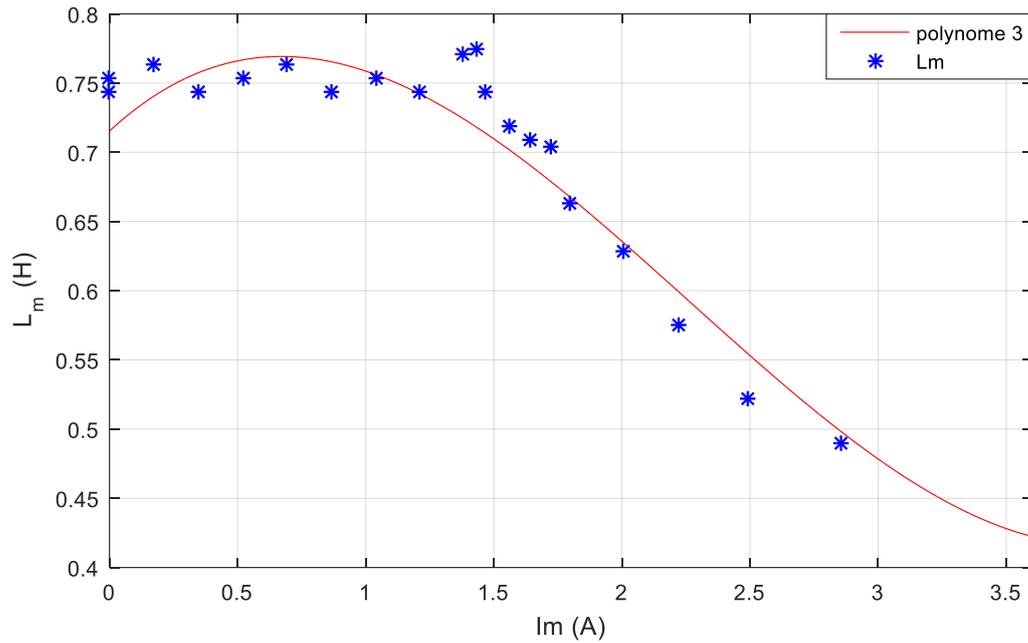


Fig.III.18 – Evolution de l'inductance magnétisante en fonction du courant magnétisant et son polynôme d'ordre 3

$$L_m = 0,021985 \cdot I_m^3 - 0,14908 \cdot I_m^2 + 0,17039 \cdot I_m + 0,71538$$

### III.3 Simulation de la machine asynchrone en fonctionnement moteur

Afin de valider les paramètres déterminés de la machine dans la partie précédente ainsi que le modèle mathématique élaboré dans le deuxième chapitre, nous étudierons le fonctionnement moteur, et plus précisément celui du démarrage de la machine à vide et en charge lorsqu'elle est directement connectée à l'alimentation. Le modèle fut implanté sous MATLAB/Simulink.

La figure III.19 représente le schéma bloc de simulation.

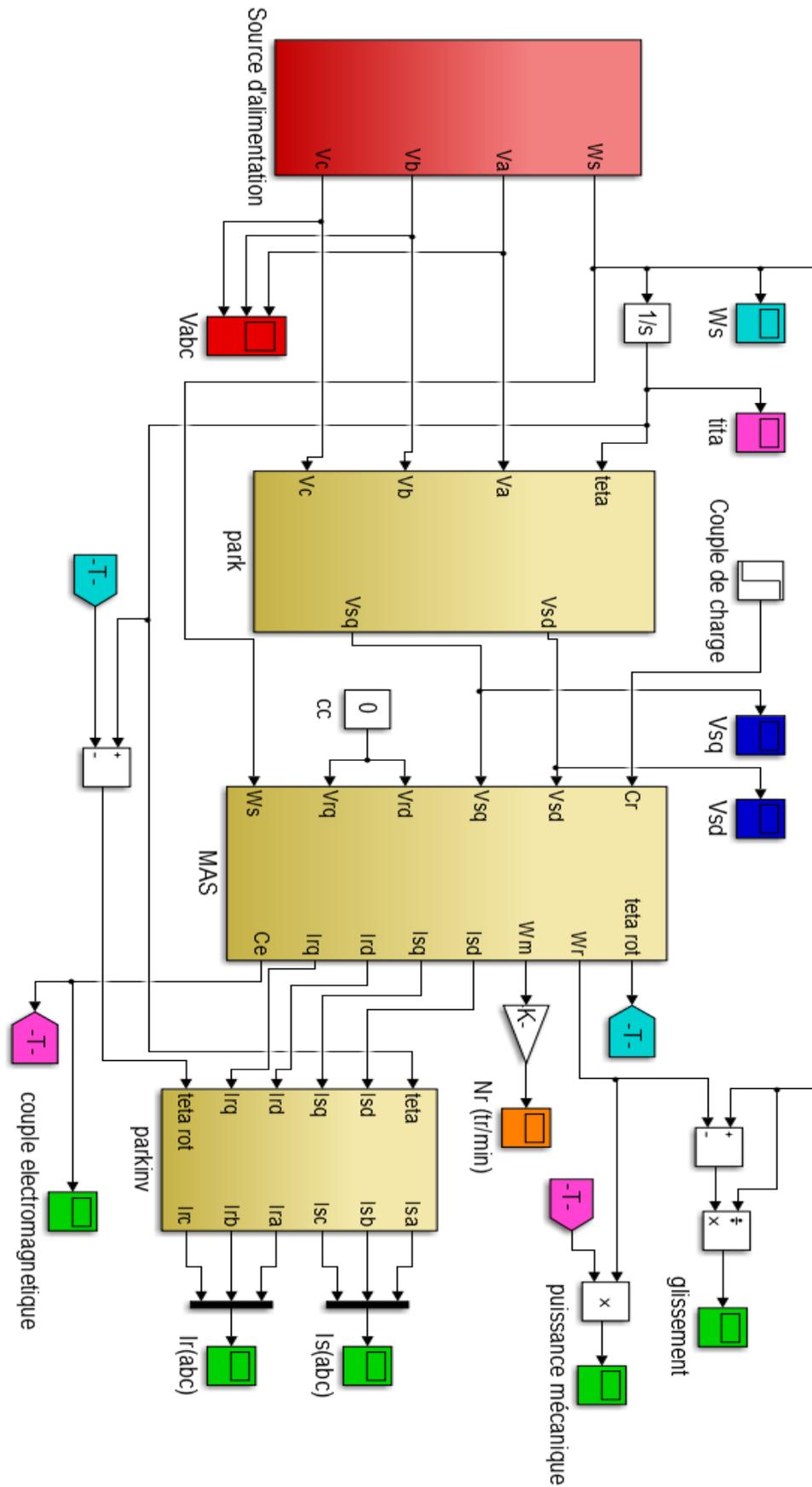


Fig.III.19 - Schéma bloc de la MAS fonctionnement moteur dans le repère  $dq0$

Les résultats des différentes grandeurs de la MAS obtenus par simulation sont illustrés dans la figure III.20.

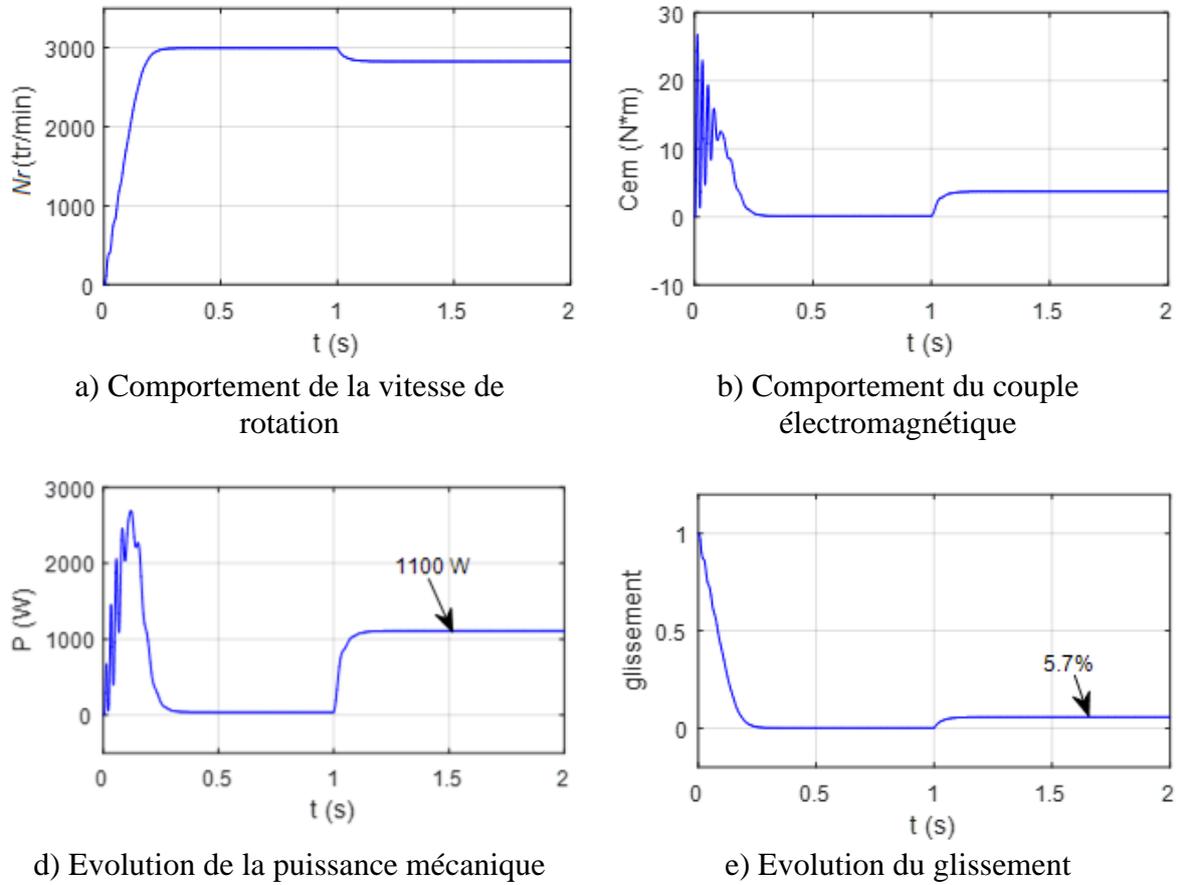


Fig.III.20 - Résultats de la simulation de démarrage à vide du moteur asynchrone suivi de l'application de la charge nominale

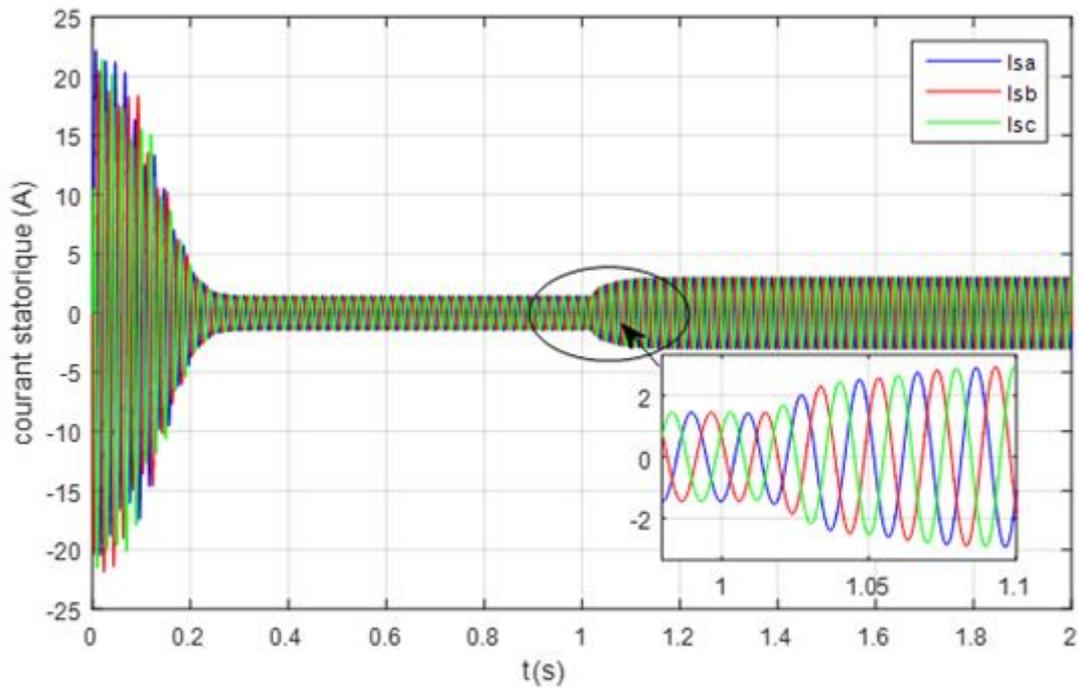


Fig.III.21 – Allure des courants statoriques

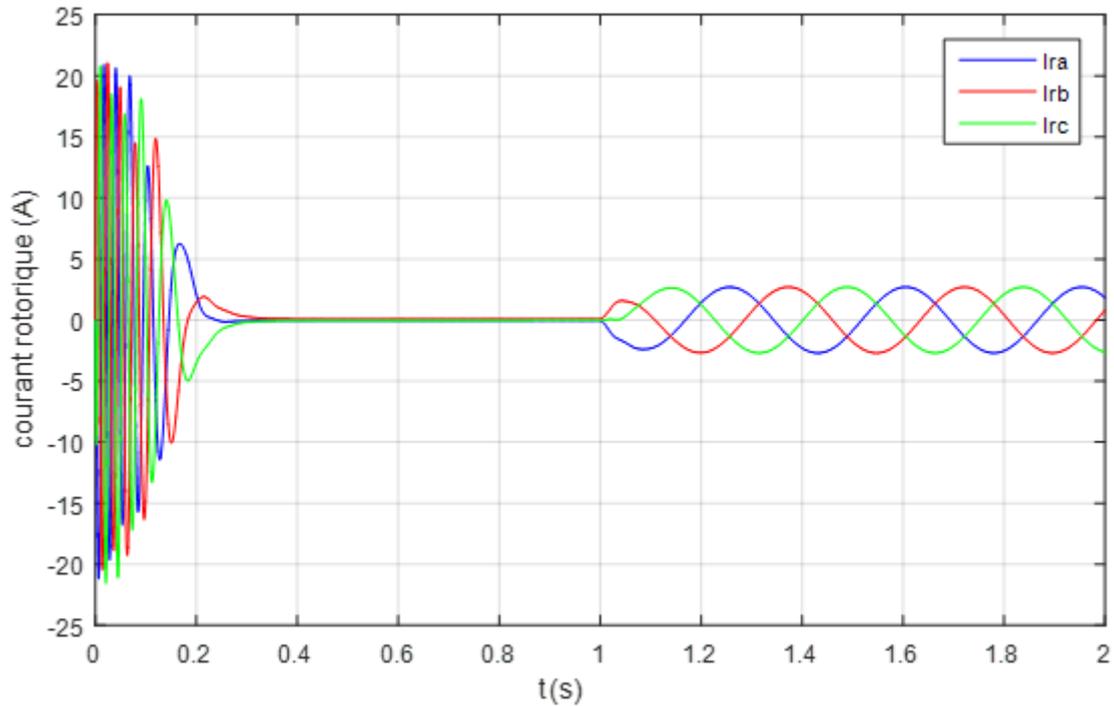


Fig.III.22 – Allure des courants rotoriques

Les figures III.20 - III.22 montrent les résultats de la simulation du processus de démarrage à vide du moteur asynchrone suivi de l'application du couple nominale 3.63 N.m à l'instant 1(s).

On remarque que :

Lorsqu'on applique le couple nominal à la machine, on obtient des résultats similaires aux valeurs indiqués sur la plaque signalétique, tel que la puissance mécanique égale à 1101W en simulation, tandis que la puissance nominale de notre machine d'expérimentation égale à 1.1 kW, avec un glissement qui ne dépasse pas 5.7%.

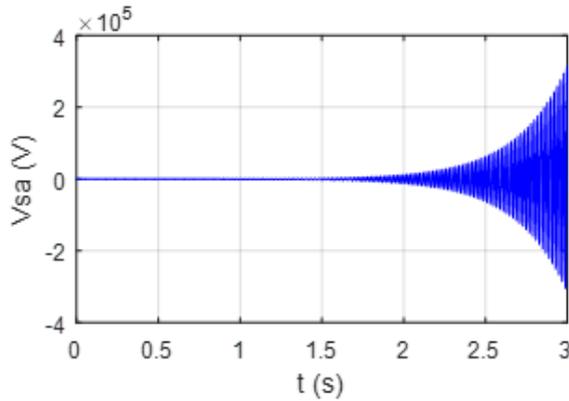
D'après les résultats de simulation, on conclut que le modèle mathématique ainsi que les paramètres utilisés sont très fiables, ce qui nous a permis d'étudier le fonctionnement de la génératrice auto-excitée dans la partie suivante de ce chapitre.

#### III.4 Simulation de la génératrice asynchrone en régime linéaire

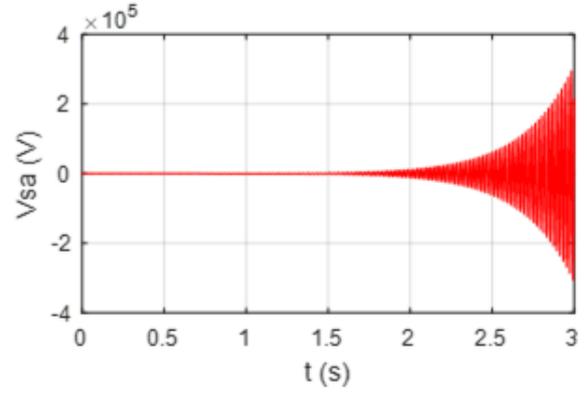
Cette partie est consacrée à l'analyse du fonctionnement de la génératrice connectée à un banc de capacités à vide lorsque en utilisant le modèle linéaire dans deux repères différents  $abc$  et  $dqo$ . Deux programmes de simulation sous Matlab/Simulink, dont les schémas blocs sont donnés dans l'annexe 2.

Le fonctionnement étudié est celui pour lequel les bobinages statoriques sont connectés à un banc de capacités de 20  $\mu\text{F}$  par phase et la machine est entraînée à 3000 tr/min. Aucune charge n'est connectée et les f.e.m rémanentes sont prises en compte de valeur efficace de 12V.

Les évolutions de la tension d'une phase et du courant statorique correspondant dans les deux repères sont présentées sur les figures III.23 et III.24 tel que les résultats en couleur bleu correspondent aux résultats dans le repère  $abc$  et en couleur rouge correspond à celle du repère  $dqo$ .

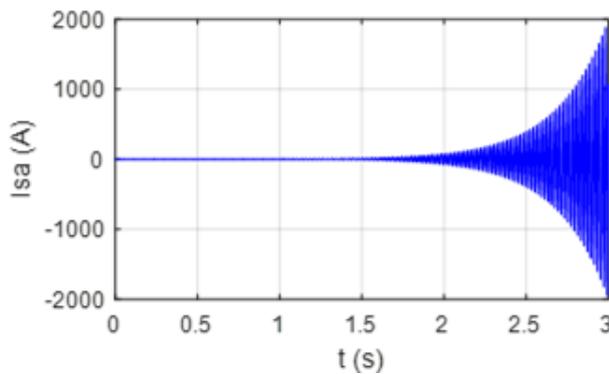


a) Allure de la tension dans le repère *abc*

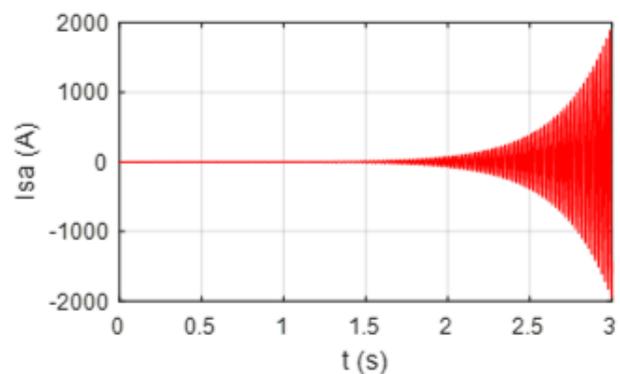


b) Allure de la tension dans le repère *dqo*

Fig.III.23 - Allures de la tension statorique de la phase « a »



a) Allure du courant dans le repère *abc*



b) Allure du courant dans le repère *dqo*

Fig.III.24 - Allures du courant statorique de la phase « a »

On constate que les deux grandeurs croissent indéfiniment, d'une façon exponentielle et atteignent rapidement des valeurs extrêmement élevées (pratiquement irréalisable). Le phénomène de saturation étant négligé, en effet la tension statorique atteint quelques milliers de Volts après le début de l'autoamorçage. Même constat pour le courant, il atteint 2000 A au bout de 3 s, le point de fonctionnement en régime permanent ne peut être atteint. Les résultats de simulation dans les deux repères sont identiques.

Ces résultats sont dus au fait d'avoir utilisé le modèle linéaire. En effet, quand la caractéristique de magnétisation est linéaire, en régime permanent, le point de fonctionnement ne peut pas être atteint, l'auto amorçage est donc possible mais la tension statorique augmente alors jusqu'à atteindre une valeur théoriquement infinie ainsi que le courant atteint rapidement des valeurs irréalistes. Ces résultats sont purement théoriques, la tension aux bornes de la machine est en réalité limitée par le phénomène de non linéarité du circuit magnétique dont il faudra nécessairement tenir compte.

Ces résultats montrent les limites d'utilisation du modèle linéaire pour l'étude de fonctionnement de la GAS débitant sur un banc de capacités.

### III.5 Simulation de la génératrice asynchrone en régime non linéaire

Nous introduirons dans cette partie le phénomène de la saturation du circuit magnétique, dans le modèle établi par la variation de l'inductance magnétisante considérée constante dans le modèle linéaire de la machine, ensuite nous comparerons les résultats de simulation dans les deux repères.

Le même fonctionnement que précédemment ( $C=20 \mu\text{F}$ ,  $V_{rem}=12\text{V}$ ,  $Nr=3000 \text{ tr/min}$ ) est étudié en utilisant le modèle analytique non linéaire. Les évolutions de la tension d'une phase et du courant statorique de la phase « a » correspondant sont présentées sur les figures III.25 et III.26.

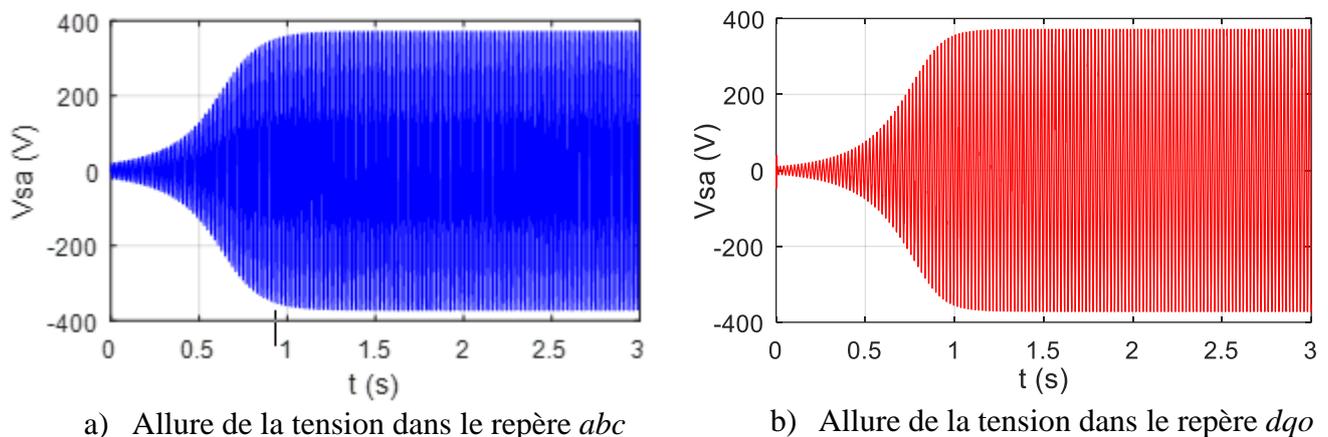


Fig.III.25 - Allures de la tension statorique de la phase « a »

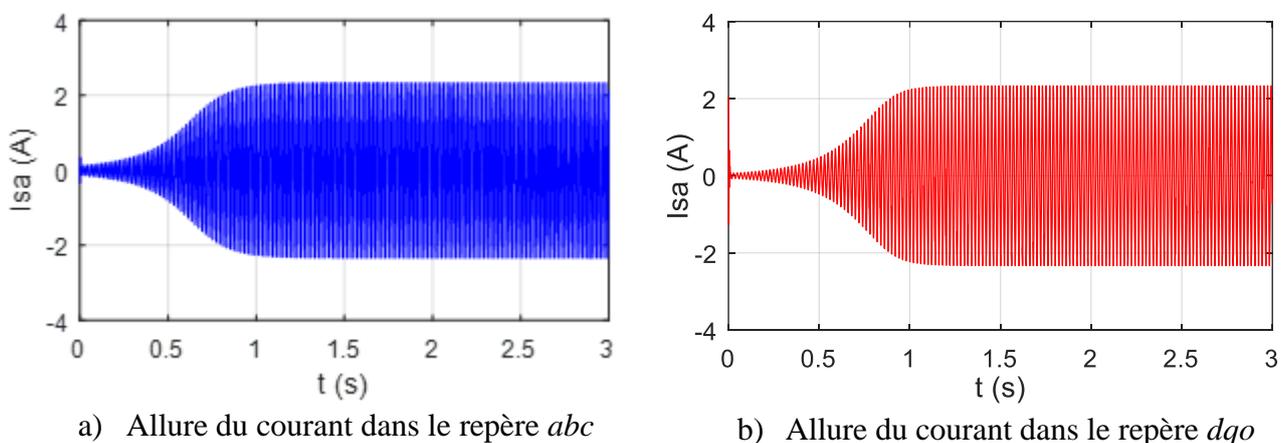


Fig.III.26 - Allures de courant statorique de la phase « a »

D'après ces résultats, on constate que, pour les mêmes conditions de simulation, la tension induite est croissante qui se stabilise à une valeur fixe correspondant au point de fonctionnement en régime permanent fixé par la saturation du circuit magnétique. Tandis que le courant statorique suit la même forme que la tension induite. Les résultats de simulation dans les deux repères sont similaires avec une petite différence dans le régime transitoire du fait qu'on ait négligé la dérivée de l'inductance magnétisant  $L_m$  dans le repère  $dqo$ .

Les résultats de simulations utilisant à la fois des modèles linéaires et saturé montrent que la prise en compte du phénomène de saturation est une phase primordiale pour aboutir à des simulations réalistes.

Dans la suite de ce chapitre, nous utiliserons le modèle analytique non-linéaire dans le repère  $abc$  pour étudier le fonctionnement de la génératrice autonome pour les différents cas (à vide, charges équilibrées et déséquilibrées).

### III.6 Etude de la génératrice asynchrone auto-excitée

Dans cette partie du chapitre, nous nous intéresserons au fonctionnement de la GAS de notre groupe électrogène pour les différents cas, le système est en boucle ouverte (absence de régulation).

#### III.6.1 Essai à vide

En utilisant le modèle analytique non linéaire, nous avons simulé l'amorçage de la génératrice d'étude dans les mêmes conditions précédentes (3000 tr/mn et 20  $\mu$ F par phase, ( $V_{rem}=12V$ )). Les résultats expérimentaux et de simulation de l'évolution de la tension induite et du courant statorique de la phase « a » sont présentés respectivement sur les figures III.27 et III.30, ainsi que l'erreur relative entre les résultats de simulation et expérimentaux sont illustré dans les figures III.29 et III.32.

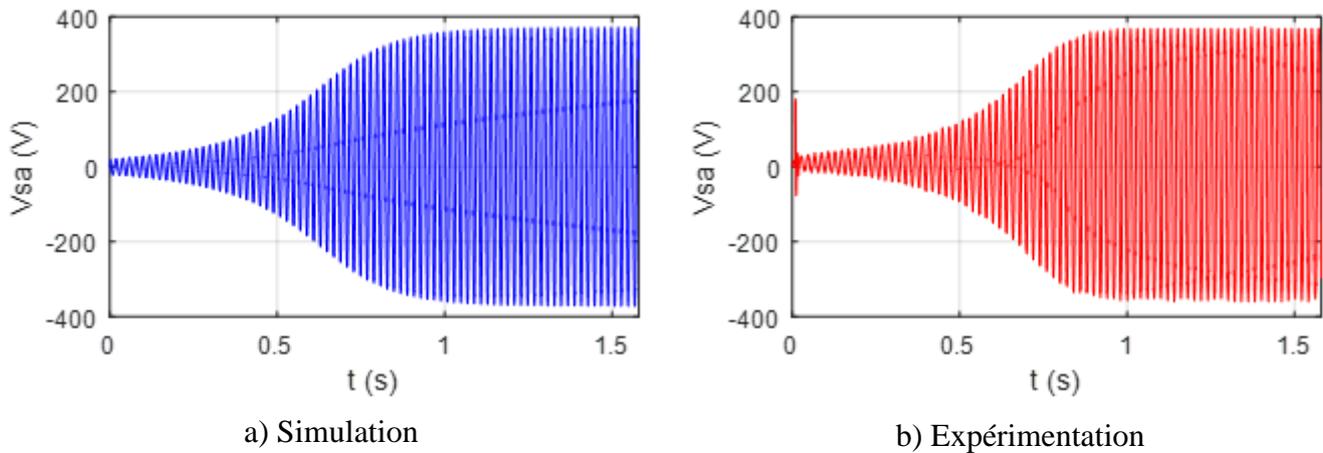


Fig.III.27 - Allures de la tension de la phase « a »

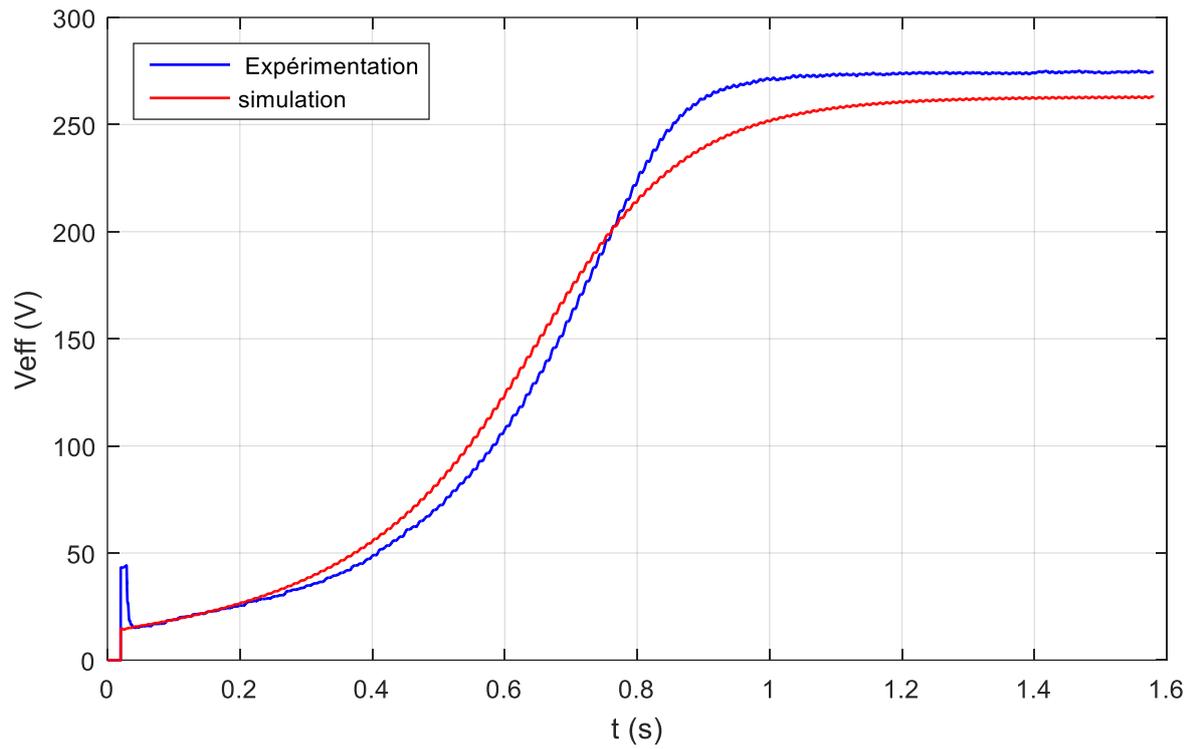


Fig.III.28 - Allures des valeurs efficaces obtenus de la tension d'induit par la simulation et l'expérimentation

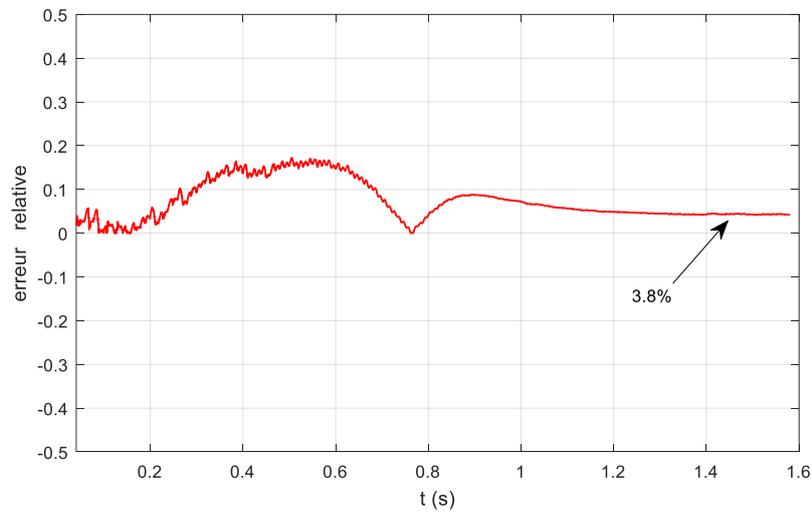


Fig.III.29 – Evolution d'erreur relative entre les résultats de simulation et l'expérimentation (tension statorique)

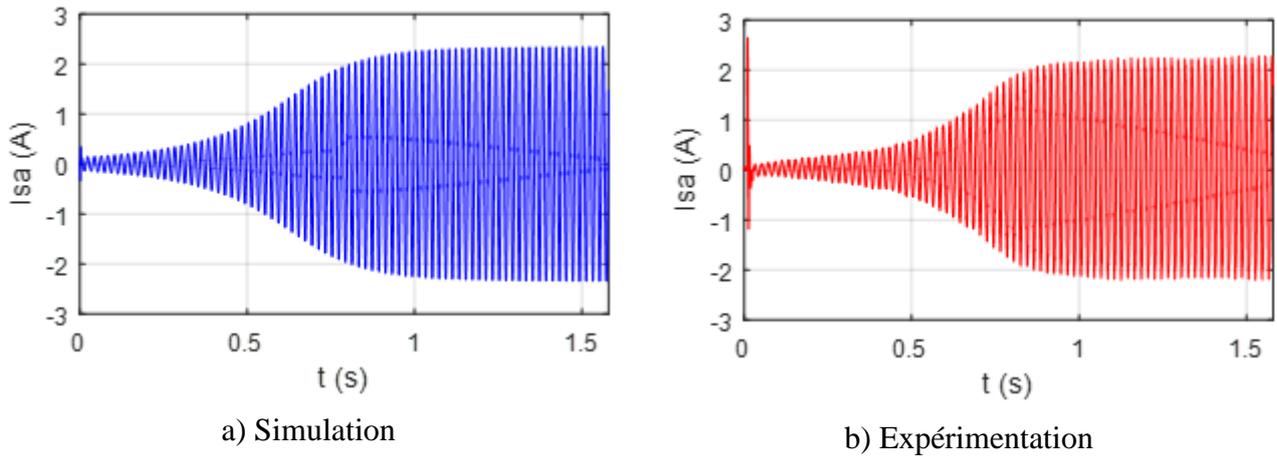


Fig.III.30 - Allures du courant de la phase « a »

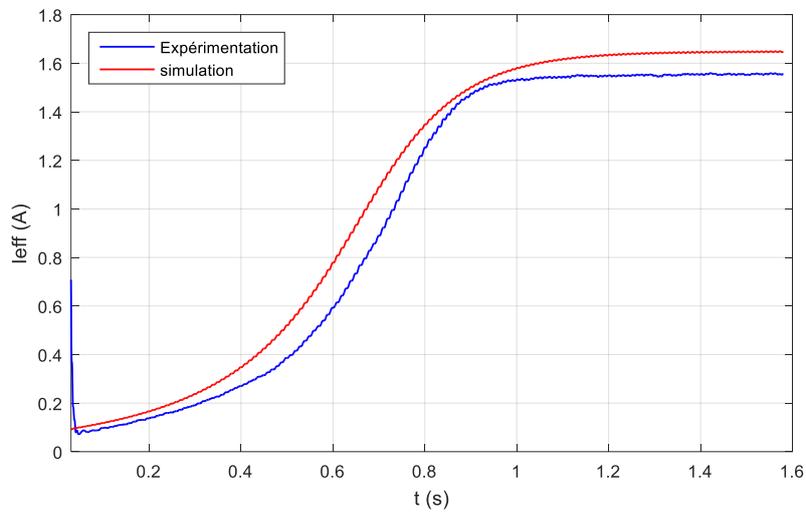


Fig.III.31 - Allures des valeurs efficaces du courant statorique par la simulation et par l'expérimentation

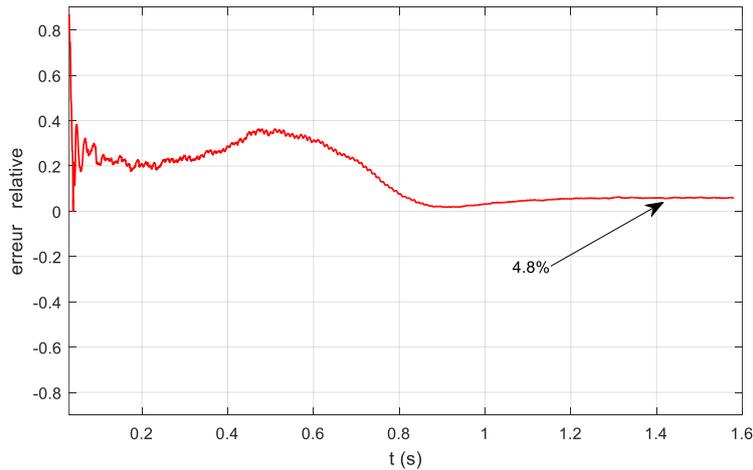


Fig.III.32 – Evolution d'erreur relative entre les résultats de simulation et l'expérimentation (courant statorique)

D'après les résultats de simulation (figures III.28 et III.31), on constate que les évolutions de la tension et du courant de phase en simulation et expérimentation sont très similaires et les

régimes permanents sont très proches avec une erreur relative de 3.8% pour la tension, et de 4.8% pour le courant.

Les allures de la tension et du courant statoriques croissent d'une façon exponentielle puis elles convergent vers des valeurs fixes. La figure III.33 représente l'allure de l'inductance de magnétisation qui varie dans le temps en fonction de l'amplitude des courants statoriques.

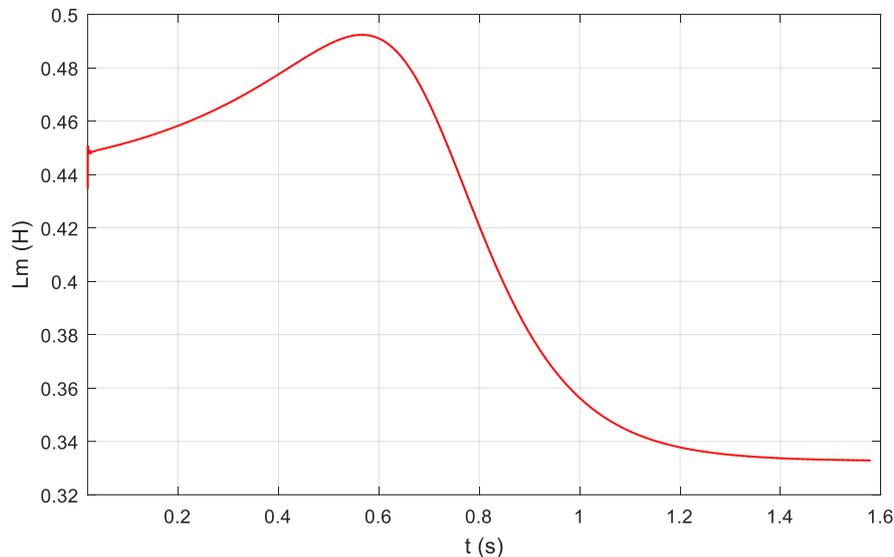


Fig.III.33 - Evolution de l'inductance mutuelle en fonction du temps

### III.6.2 Essai en charges équilibrées

Suite à la validation du modèle analytique non linéaire pour l'étude de la GAS, à vide, débitant sur un banc de capacités, le même modèle fut utilisé pour étudier le fonctionnement du groupe électrogène sur des charges triphasées équilibrées ( $R$ ,  $RL$  et  $RLC$ ).

#### a) Charge résistive

En partant sur les équations II.21 et III.25, nous avons simulé le fonctionnement de la génératrice entraînée à 3000 tr/mn avec un banc de capacités de valeur  $20 \mu\text{F}$  par phase couplé en étoile. La génératrice est amorcée à vide, puis elle est connectée à une charge résistive de différentes valeurs tel que :

A  $t=2\text{s}$  on applique une résistance  $R=300\Omega$  ;

A  $t=3.5\text{s}$  on applique une résistance  $R=250\Omega$  ;

A  $t=5\text{s}$  on applique une résistance  $R=200\Omega$ .

Les allures de l'évolution de différentes grandeurs de la génératrice sont illustrées dans les figures III.35 - III.38.

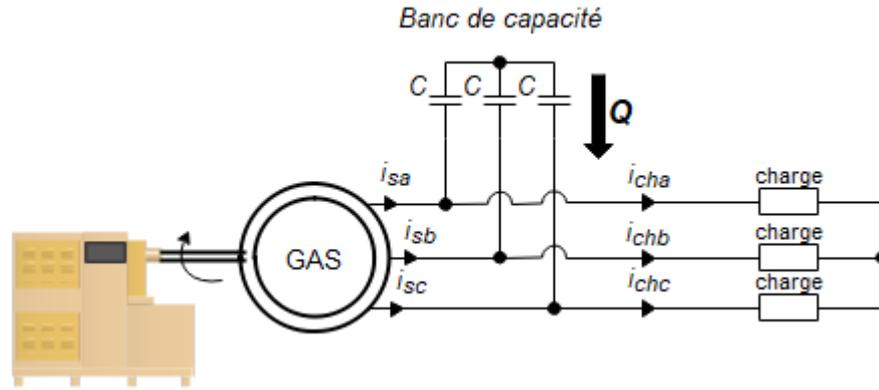


Fig.III.34 - Génératrice asynchrone auto – excitée avec un banc de capacité alimentant une charge autonome

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -i_{sa} - i_{cha} \\ -i_{sb} - i_{chb} \\ -i_{sc} - i_{chc} \end{bmatrix} \quad (III.25)$$

Avec :

$$\begin{cases} v_{sa} = R i_{cha} \\ v_{sb} = R i_{chb} \\ v_{sc} = R i_{chc} \end{cases} \quad (III.26)$$

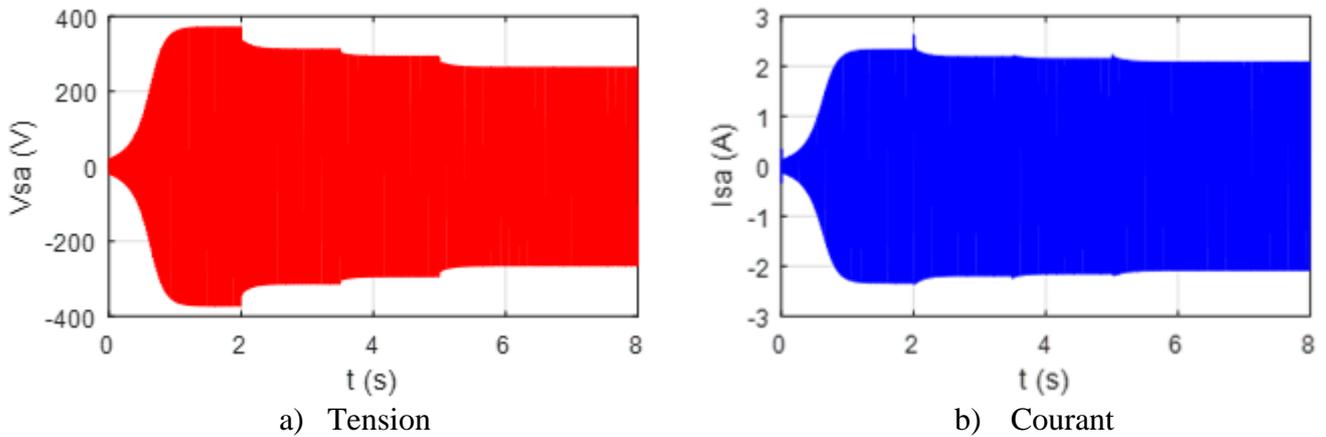


Fig.III.35 - Allures de la tension et du courant de la phase « a » lors de la variation de la charge

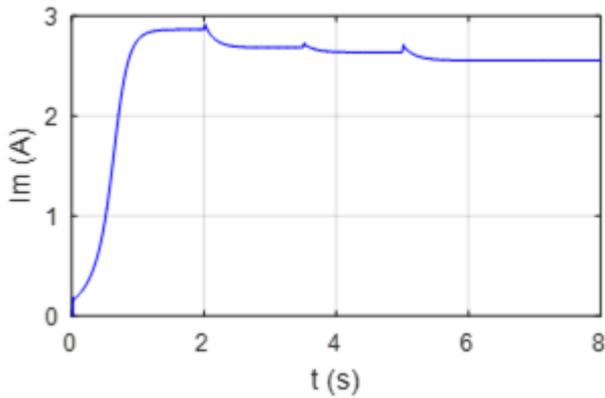


Fig.III.36 - Evolution du courant magnétisant

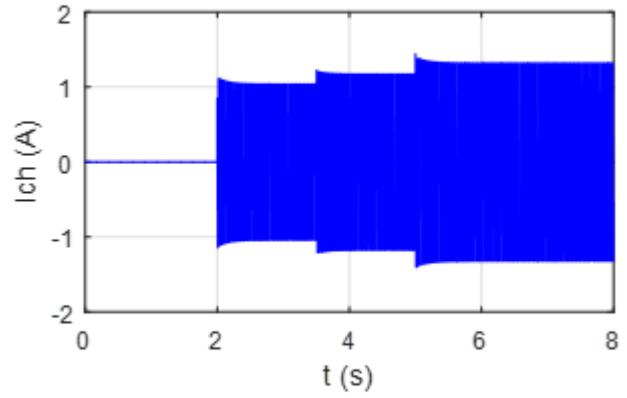


Fig.III.37 - Evolution du courant de charge connectée à la phase « a »

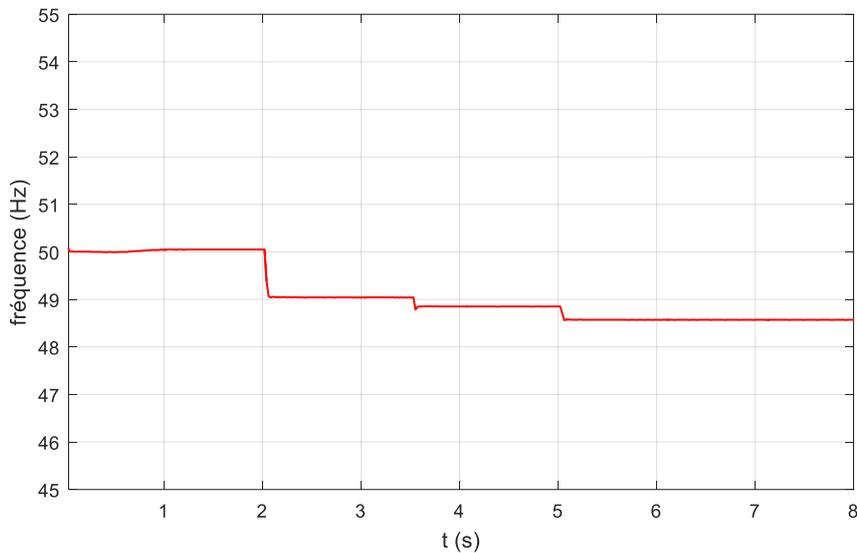


Fig.III.38 – Allure de la fréquence statorique en fonction du temps

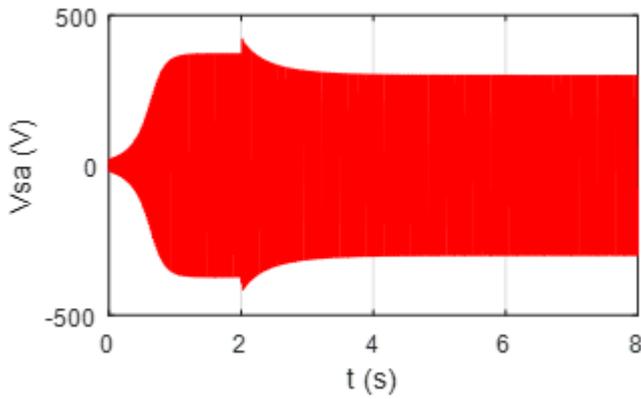
D’après les résultats obtenus, on remarque que :

L’insertion d’une charge résistive engendre une diminution aux niveaux de l’ensemble des caractéristiques de la GAS par rapport à celles observées dans l’essai à vide, qui sont de 29.08% au niveau de la tension statorique, de 10.89 % du courant statorique, de 10.78 % du courant de magnétisation et de 2.6% de la fréquence. Cela est dû à la démagnétisation de la génératrice, la chute de tension dans l’impédance statorique et d’un autre point de vue dû au manque d’énergie réactive nécessaire.

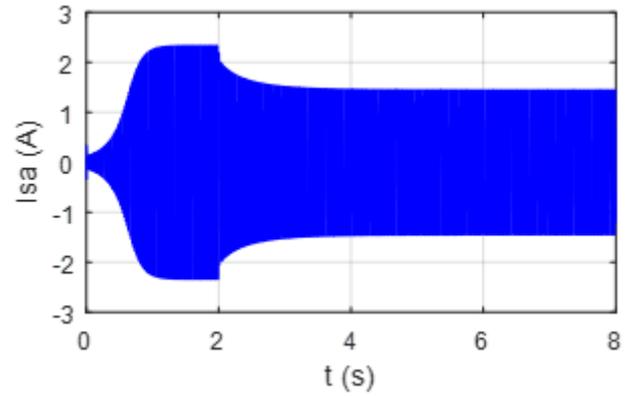
**b) Charge inductive (RL)**

En partant sur les équations II.21 et III.27, nous avons simulé le fonctionnement de la génératrice entraînée à 3000 tr/mn avec un banc de capacités de valeur 20  $\mu$ F par phase couplé en étoile. La génératrice est amorcée à vide, puis elle est connectée à une charge inductive constituée d’une résistance de 300  $\Omega$  en série avec une inductance de 1H par phase, les allures de l’évolution de différentes grandeurs de la génératrice sont illustrées dans les figures III.39 - III.42.

$$\begin{cases} v_{sa} = Ri_{cha} + L \frac{di_{cha}}{dt} \\ v_{sb} = Ri_{chb} + L \frac{di_{chb}}{dt} \\ v_{sc} = Ri_{chc} + L \frac{di_{chc}}{dt} \end{cases} \quad (III.27)$$



a) Tension



b) Courant

Fig.III.39 - Allures de la tension et du courant de la phase « a » lors de la connexion de la charge RL

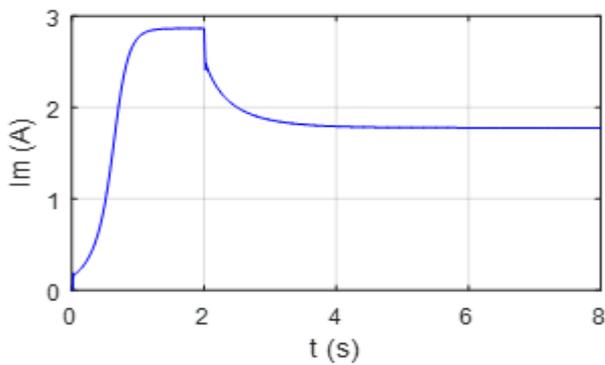


Fig.III.40 - Evolution du courant magnétisant

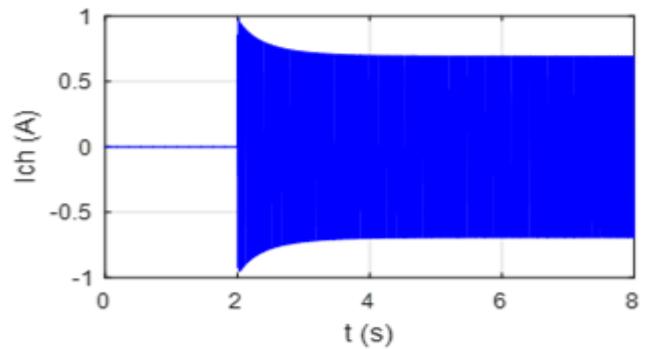


Fig.III.41 - Evolution du courant de charge connectée à la phase « a »

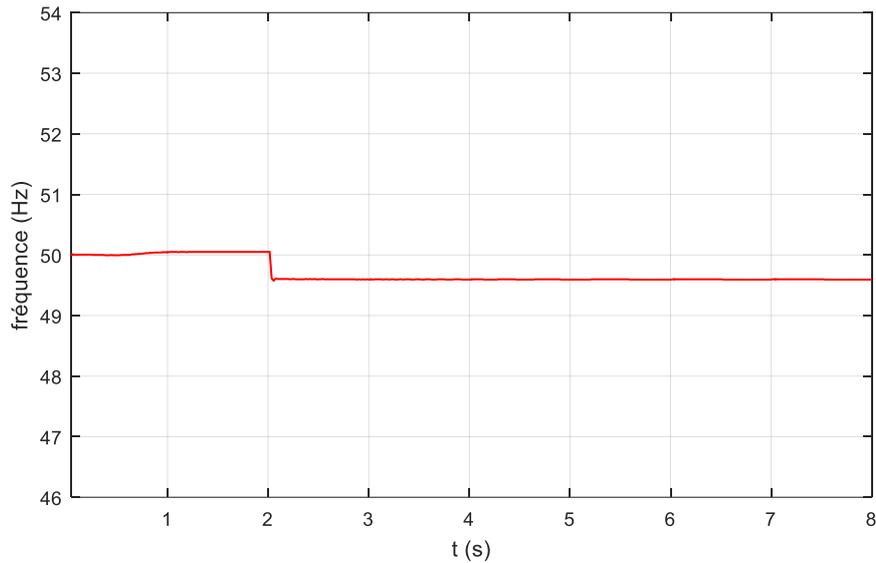


Fig.III.42 - Allure de la fréquence statorique en fonction du temps

Comme dans le cas de la charge résistive, l'introduction d'une charge  $RL$  induit une chute de tension. Toutefois, celle-ci est nettement plus prononcée dans le cas d'une charge ( $RL$ ) qui est de 19.62 % de la tension statorique, de 38.03 % du courant statorique et de 37.87 % du courant de magnétisation. Cela est dû essentiellement à la démagnétisation de la machine et au manque d'énergie réactive nécessaire, d'une part pour la magnétisation de la machine et d'autre part pour l'alimentation de la charge, en particulier celle inductive qui est consommatrice de l'énergie réactive.

L'insertion d'une charge inductive entraîne une surconsommation de l'énergie réactive, et c'est le rôle des condensateurs d'excitation de satisfaire et de partager l'énergie qu'ils produisent entre les deux consommatrices de la puissance réactive.

### c) Charge $RLC$

Dans les deux cas de figure,  $R$  et  $RL$ , la charge induit une diminution significative de l'amplitude et de la fréquence des tensions statoriques. Une des possibilités de réduction de cette chute consiste à introduire un autre banc de capacité  $C_p$  en parallèle avec la charge, ou d'insérer des capacités en série avec la charge, cette dernière dit compound.

- **Compensation parallèle**

En se basant sur les équations II.21 et III.28, nous avons simulé le fonctionnement de la génératrice entraînée à 3000 tr/mn avec un banc de capacités de valeur 20  $\mu\text{F}$  par phase couplé en étoile. La génératrice est amorcée à vide, puis elle est connectée à une charge constituée d'une résistance de 300  $\Omega$  en série avec une inductance de 1H par phase et l'instant  $t=5$  s on connecte un banc de capacité de 3  $\mu\text{F}$  par phase en parallèle à cette charge, les allures de l'évolution de différentes grandeurs de la génératrice sont illustrées dans les figures III.44 - III.47.

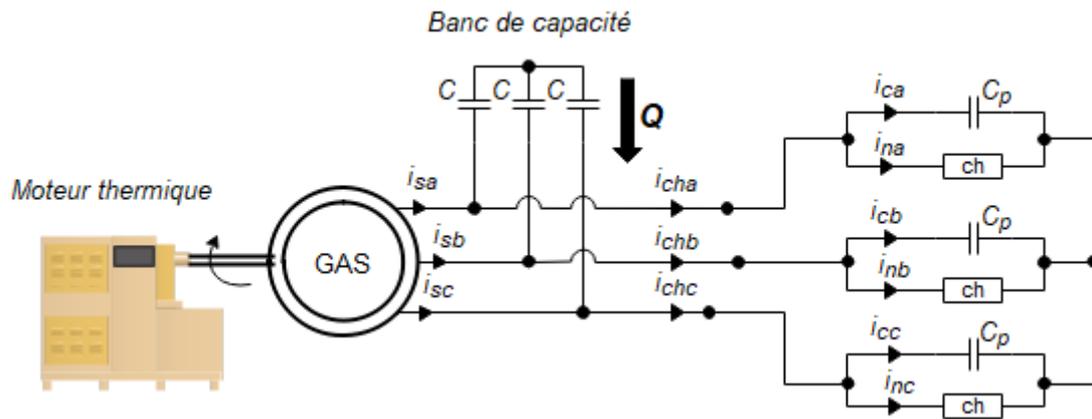


Fig.III.43 - Génératrice asynchrone auto – excitée avec compensation parallèle

$$\begin{cases} v_{sa} = Ri_{na} + L \frac{di_{na}}{dt} = \frac{1}{C_p} \int i_{ca} dt \\ v_{sb} = Ri_{nb} + L \frac{di_{nb}}{dt} = \frac{1}{C_p} \int i_{cb} dt \\ v_{sc} = Ri_{nc} + L \frac{di_{nc}}{dt} = \frac{1}{C_p} \int i_{cc} dt \end{cases} \quad (III.28)$$

Tel que :

$$\begin{cases} i_{cha} = i_{na} + i_{ca} \\ i_{chb} = i_{nb} + i_{cb} \\ i_{chc} = i_{nc} + i_{cc} \end{cases} \quad (III.29)$$

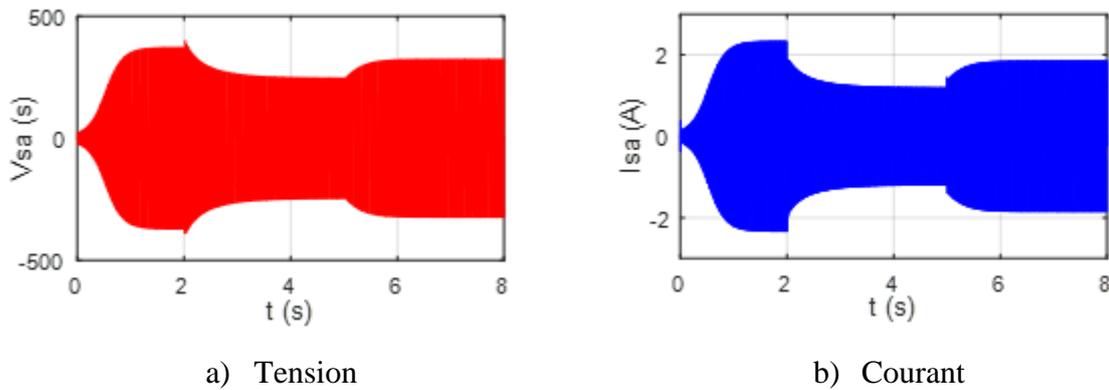


Fig.III.44 - Allures de la tension et du courant de la phase « a » lors de l'insertion d'une charge RLC (compensation parallèle)

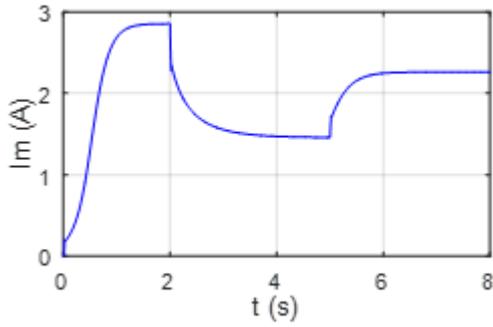


Fig.III.45 - Evolution du courant magnétisant

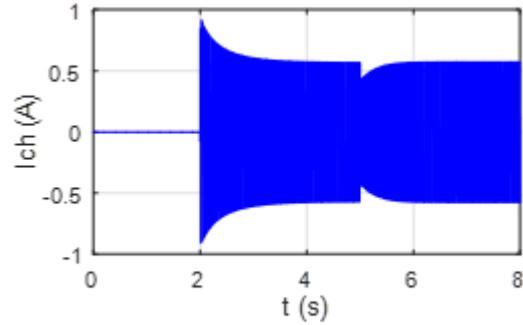


Fig.III.46 - Evolution du courant de charge connectée à la phase « a »

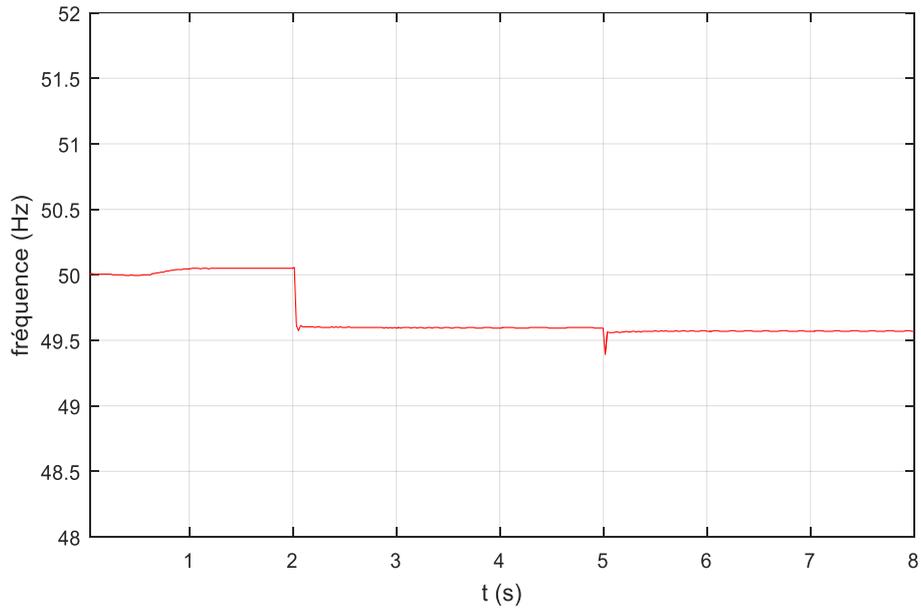


Fig.III.47 - Allure de la fréquence statorique en fonction du temps

- **Compensation série (système compound)**

Dans ce point de fonctionnement, le système est constitué d'une résistance de 300 Ω en série avec une inductance de 1H, et à t=5 s on insert une capacité de 3 μF (figure III.48)

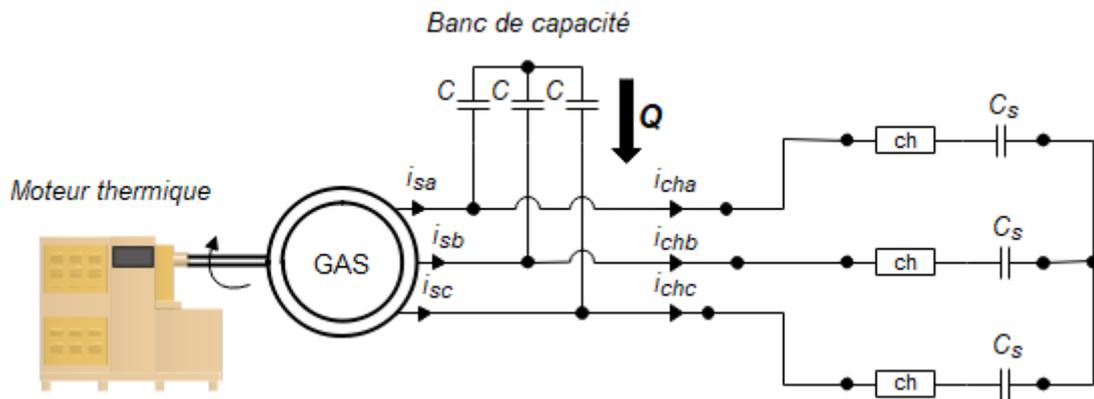


Fig.III.48 - Génératrice asynchrone auto – excitée avec compensation série

En se basant sur les équations II.21 et III.30 on obtient :

$$\begin{cases} v_{sa} = Ri_{cha} + L \frac{di_{cha}}{dt} + \frac{1}{C_s} \int i_{cha} dt \\ v_{sb} = Ri_{chb} + L \frac{di_{chb}}{dt} + \frac{1}{C_s} \int i_{chb} dt \\ v_{sc} = Ri_{chc} + L \frac{di_{chc}}{dt} + \frac{1}{C_s} \int i_{chc} dt \end{cases} \quad (III. 30)$$

L'évolution de différentes grandeurs de la génératrice sont illustrées dans les figures III.49 - III.51.

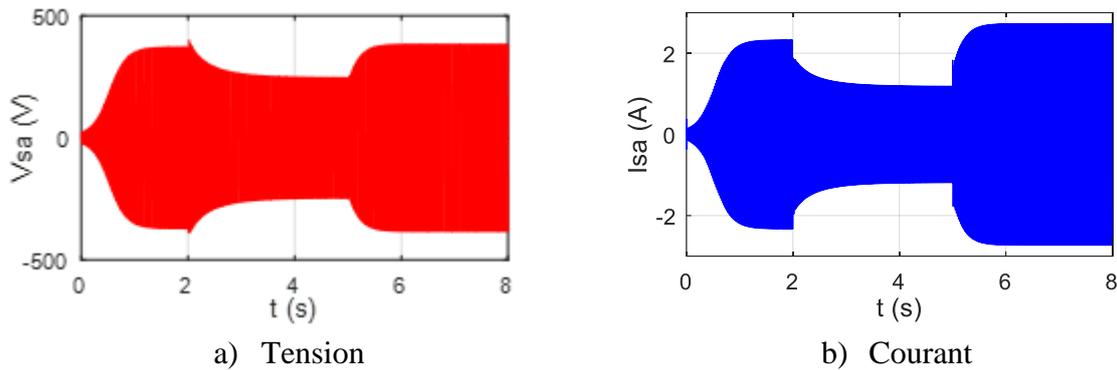


Fig.III.49 - Allures de la tension et du courant de la phase « a » lors de l'insertion d'une charge RLC (compensation série)

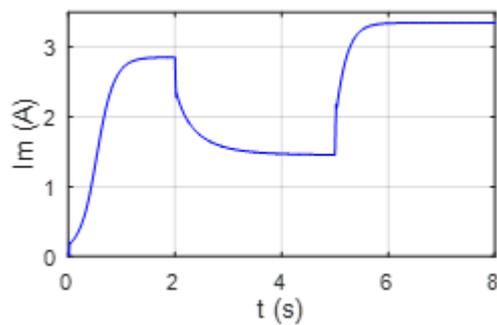


Fig.III.50 - Evolution du courant magnétisant

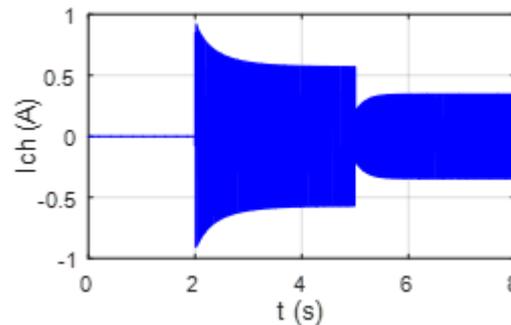


Fig.III.51 - Evolution du courant de charge connectée à la phase « a »

Les mêmes remarques que le cas d'une charge *RL*, la différence réside dans l'amélioration de l'ensemble des grandeurs de la GAS, lors de l'insertion d'une capacité soit en parallèle ou en série avec la charge (à  $t=5$  s).

La chute de tension peut être compensée en insérant une capacité en parallèles ou bien en série avec la charge, tel que système compound est mieux adapté pour la compensation de chute de tension.

Avec des valeurs correctes, il est possible de maintenir un niveau d'aimantation quasi constant dans la machine, et donc une tension constante. Cependant, cela ne résout qu'une part

du problème, car il est difficile de paralléliser la valeur de la capacité à chaque instant de l'évolution de la charge.

Les différentes études menées précédemment utilisent l'équilibrage de charge, ce n'est pas toujours le cas. Cependant, dans les systèmes autonomes où la charge peut être constituée de différents dipôles, cela nous mène donc à étudier la situation de déséquilibre de charge pour compléter l'analyse des performances de la GAS en fonctionnement autonome.

### III.6.3 Charges déséquilibrées

En se basant sur les équations (II.21) et (III.31), nous avons simulé le fonctionnement de la génératrice entraînée à 3000 tr/mn avec un banc de capacités de valeur 20 μF par phase couplé en étoile. La génératrice est amorcée à vide, puis elle est connectée à une charge inductive déséquilibrée comme suit :

$$\begin{cases} v_{sa} = R_{cha}i_{cha} \\ v_{sb} = R_{chb}i_{chb} + L_{chb} \frac{di_{chb}}{dt} \\ v_{sc} = R_{chc}i_{chc} + L_{chc} \frac{di_{chc}}{dt} \end{cases} \quad (III.31)$$

- Phase a : une résistance  $R_{cha} = 200 \Omega$  ;
- Phase b : une résistance  $R_{chb} = 250\Omega$  et une inductance  $L_{chb} = 0.5H$  ;
- Phase c : une résistance  $R_{chc} = 300\Omega$  et une inductance  $L_{chc} = 1H$ .

Les allures de l'évolution de différentes grandeurs de la génératrice sont illustrées dans les figures III.52 - III.55.

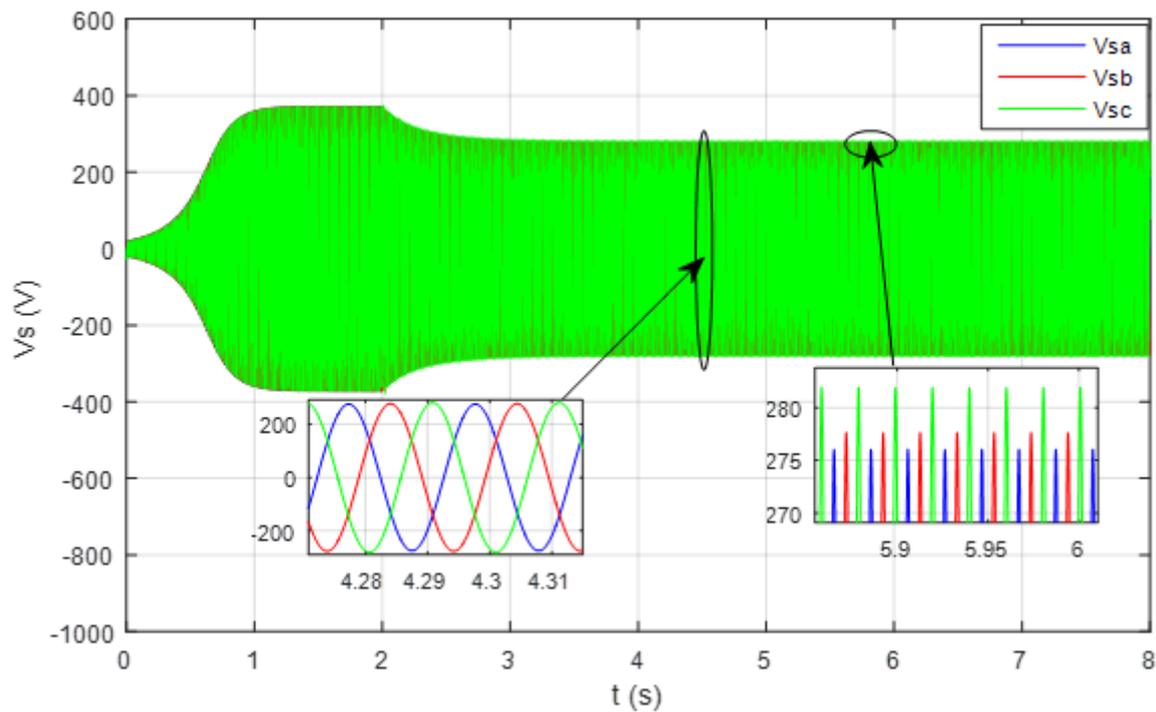


Fig.III.52 - Allure des tensions statoriques lors de l'insertion d'une charge  $RL$  déséquilibré

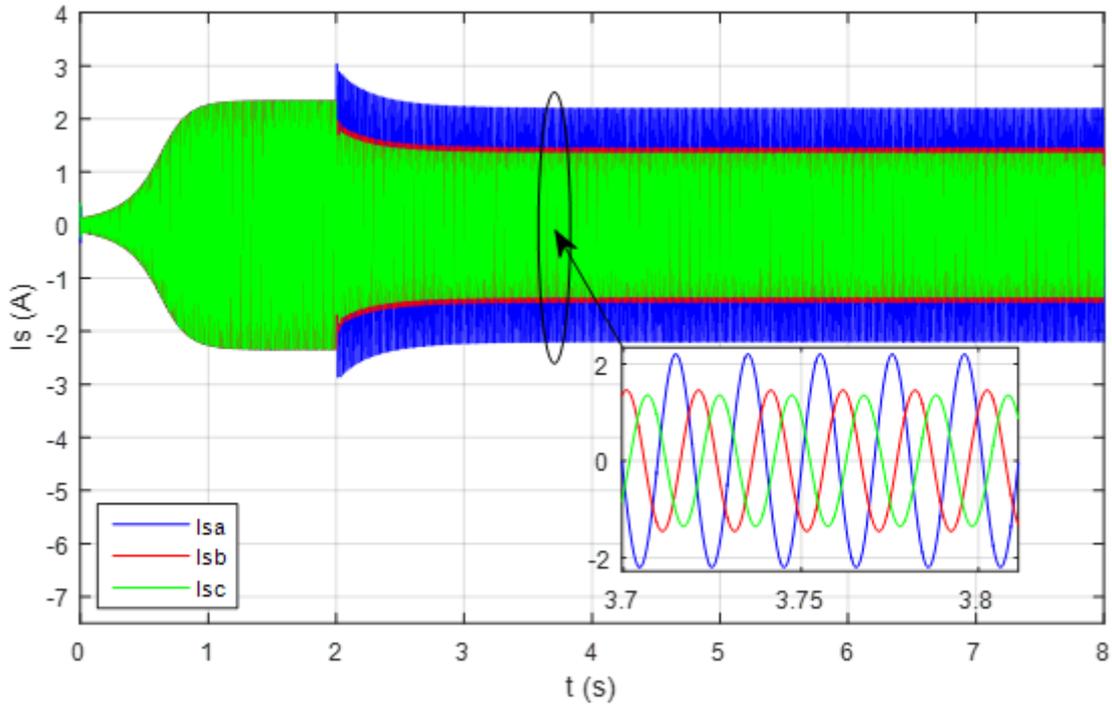


Fig.III.53 - Allure des courants statoriques lors de l'insertion d'une charge  $RL$  déséquilibré

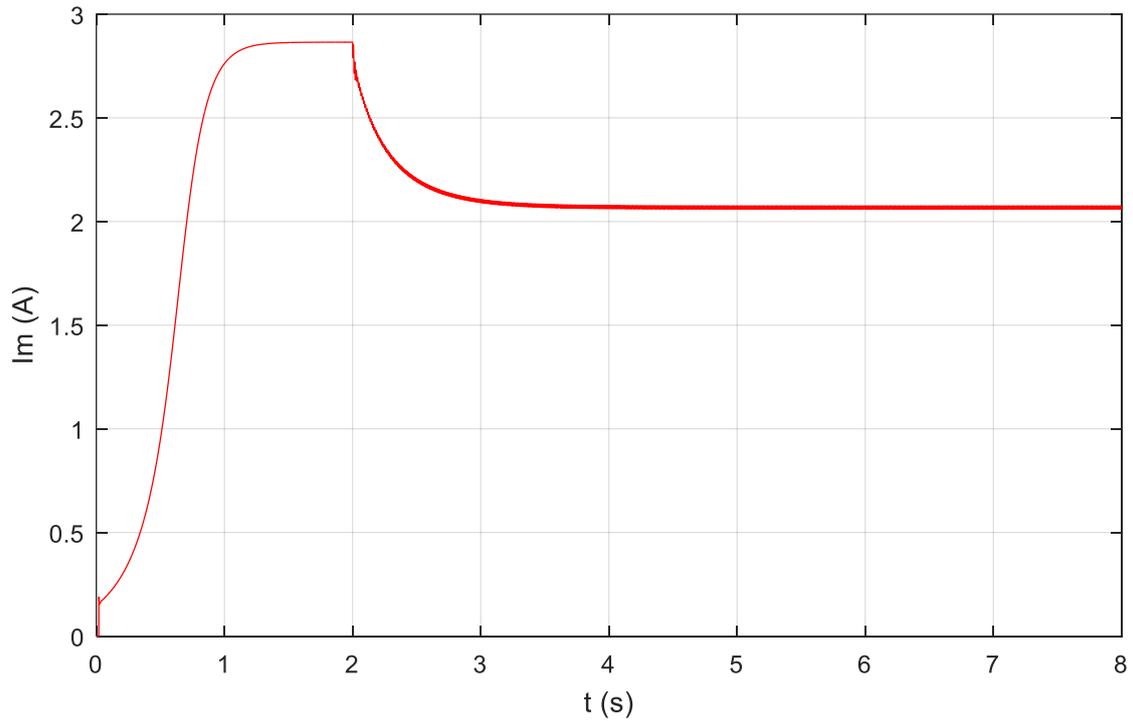


Fig.III.54 - Evolution du courant magnétisant

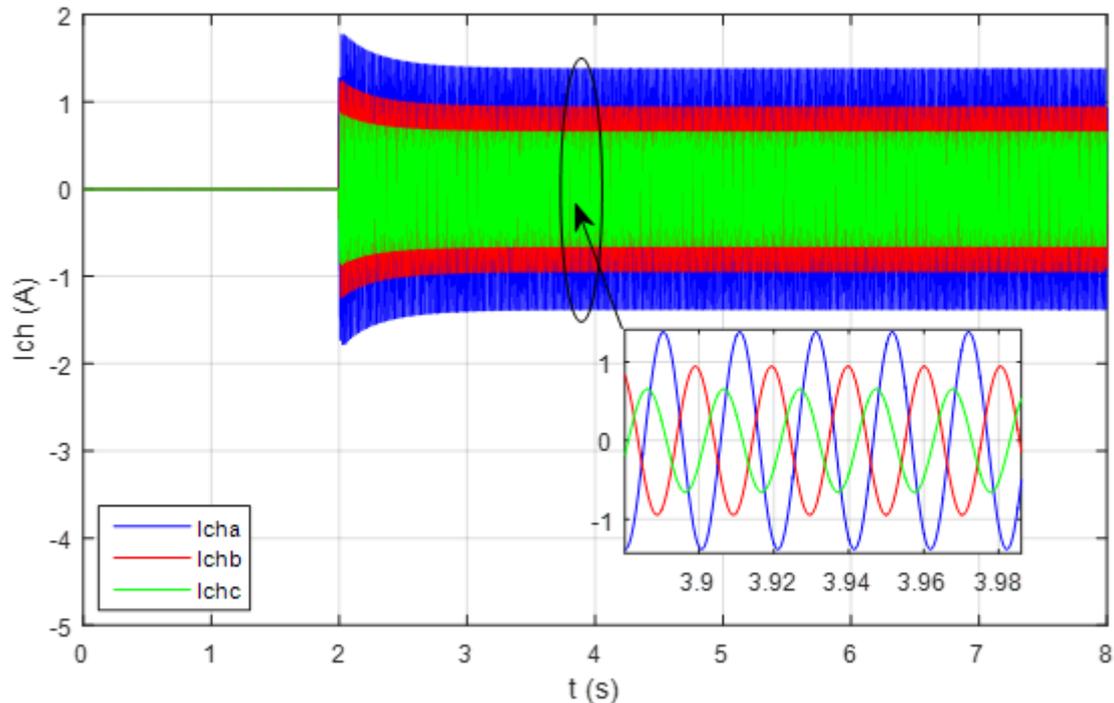


Fig.III.55 - Evolution des trois courants de la charge

Dans le cas d'une charge déséquilibrée, l'ensemble des grandeurs de la GAS diminue d'une façon aléatoire selon chaque phase, ce phénomène est dû à la nature de la charge connectée à chaque phase.

### III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons utilisé les modèles mathématiques développés dans le chapitre II pour étudier les performances de la GAS du groupe électrogène.

La première partie de ce chapitre est consacrée à l'identification des paramètres de la GAS à travers des essais classiques pour pouvoir les exploiter dans les programmes de simulation.

La deuxième partie consiste à valider les modèles mathématiques développés dans le deuxième chapitre ainsi que les paramètres identifiés dans la première partie par une étude de fonctionnement de la machine en mode moteur.

La troisième partie consiste à l'étude du phénomène de l'auto-amorçage de la GAS débitant sur un banc de capacité, où nous avons utilisé deux modèles linéaires et non-linéaire. Les résultats de simulation montrent les limites du modèle linéaire pour étudier un tel fonctionnement puisque c'est la saturation elle-même qui fixe le point de fonctionnement en régime permanent. Ce qui nous a mené à utiliser le modèle non-linéaire pour effectuer des tests sur les performances de la GAS auto-excitée connectée à des différentes charges équilibrés et déséquilibrés. Dans ce modèle, il faut préciser que les inductances cycliques ne sont pas considérées comme constantes mais plutôt variables, nous avons pris en considération la variation de l'inductance mutuelle à travers la variation de l'inductance magnétisante notée  $L_m$ .

## Conclusion générale

L'objectif de ce mémoire est d'étudier les groupes électrogènes de petite puissance à base d'une GAS en fonctionnement autonome, dans le cas de l'alimentation des sites isolés ou des micro-réseaux autonomes.

Dans le premier chapitre, nous avons donné une description générale du groupe électrogène et les différentes parties relatives à son fonctionnement, nous avons présenté les types de génératrice utilisées dans les groupes électrogènes.

Enfin, pour des raisons de robustesse et de prix de revient, nous avons retenu le groupe électrogène de petite puissance utilisant la MAS pour effectuer son étude.

Le deuxième chapitre a été dédié à établir les modèles mathématiques de différentes parties du groupe électrogène. Dans un premier lieu, nous avons donné le modèle mathématique de la MAS (Equations électriques, magnétiques et mécaniques) dans son référentiel triphasé ( $abc$ ). Puis, nous avons réduit l'ordre du système par une transformation de PARK. En partant du modèle de la MAS, nous avons élaboré le modèle mathématique de la génératrice en régime linéaire et non-linéaire. En dernier lieu, nous avons présenté le modèle simplifié du moteur thermique.

Nous avons consacré le troisième chapitre à la simulation et l'identification des paramètres de la GAS. Dans ce cadre, nous avons procédé en premier lieu à l'identification des paramètres de la machine de test à travers des essais classiques en utilisant deux méthodes de mesure différentes qui ont abouti à des résultats approximativement identiques. Dans la deuxième partie, nous avons validé les paramètres identifiés et le modèle mathématique par une simulation numérique du fonctionnement de la machine en mode moteur. Ensuite, nous avons étudié le phénomène de l'auto-amorçage de la GAS débitant sur un banc capacitif, où nous avons utilisé deux modèles linéaires et non-linéaire. Les résultats de la simulation montrent bien que le modèle linéaire n'est pas adapté pour l'auto-amorçage. Ce qui nous a mené à utiliser le modèle non-linéaire basé sur la saturation du circuit magnétique pour effectuer des tests sur les performances de la GAS auto-excitée connectée à des différentes charges équilibrées et déséquilibrées. Les résultats des tests ont mis en évidence l'influence de la charge sur la valeur de la fréquence et de la tension de la génératrice.

L'utilisation de la MAS auto-excitée dans un groupe électrogène doit prendre en considération les limites de fonctionnement observées. Celles-ci concernent notamment les variations des tensions et de la fréquence lors des impacts de charge, d'où la nécessité d'une commande afin de maintenir constantes la tension et la fréquence. Les risques de démagnétisation en cas de surcharge de la machine sont également à prendre en compte car ils nécessitent une intervention externe, ou une phase de fonctionnement spécifique afin de remagnétiser la machine.

Pour la suite de ce travail, plusieurs pistes peuvent être envisagées et qui peuvent faire l'objet d'un projet futur de recherche.

Il peut s'agir, par exemple de :

- L'étude en boucle fermée pour travailler à fréquence et tension constantes ;
- L'étude complète de ce groupe électrogène.

## Références bibliographiques

- [1] A. Palamar et E.Pettai, “Control système for a diesel generator and UPS based microgrid”, Scientific journal of Rigas Tehniskas Universitates Zinatniskie Raksti, 2010, pp.47.
- [2] C. Aliane et A. Zerioul, “Etude d’un groupe électrogène par simulation numérique” mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2016.
- [3] T. Hazel, " Génération électrique intégrée aux sites industriels et bâtiments commerciaux" Cahier technique Schneider N° 196.
- [4] B. Colin, "Groupes électrogènes de secours", Techniques de l’ingénieur, 2008.
- [5] B. Tounsi, "Etude comparative des groupes électrogènes embarqués à large gamme de vitesse variable associant machines à aimants permanent et convertisseur statique", Thèse de Doctorat à l’institut polytechnique de Toulouse, 2007.
- [6] M. Desbazeille, "Diagnostic de groupes électrogènes diesel par analyse de vitesse de vilebrequin", Thèse de Doctorat à l’université de Jean Monnet, 2011.
- [7] Dossier groupe électrogène contexte et problématique, Disponible sur “[https://www.f2a.fr/wp-content/uploads/2018/08/Groupes\\_Electroge%CC%80nes.pdf](https://www.f2a.fr/wp-content/uploads/2018/08/Groupes_Electroge%CC%80nes.pdf)”, (visité le 24/06 /2022).
- [8] Generatrice-asynchrone, Disponible sur : <https://www.usinenouvelle.com/expo/guides-d-achat/generatrice-asynchrone-503>, (visité le 15/06 /2022).
- [9] K. Idjdarene, “ Contribution à l’Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones a Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes ”, Thèse de Doctorat, Université Abderrahmane Mira Béjaia, 2010.
- [10] FG,Wilson, “Groupe électrogène Manuel d’utilisation et de maintenance”.
- [11] T. Tudorache et C. Roman, “The numerical modeling of transient regimes of diesel generator sets”, Journal of Acta Polytechnica Hungarica, 2010. pp 39-53
- [12] E. Amirouche, “Modélisation dynamique et commande d’une génératrice hydrolienne polyphasée en fonctionnement non conventionnel”, Thèse Doctorat, Université A.MIRA-Bejaia, février 2022.
- [13] H. Knudsen, “Extended Park’s transformation for 2×3-phase synchronous machine and converter phasor model with representation of AC harmonics” IEEE Power Engineering Review,1995 pp. 57.
- [14] W. Redjai et H. Bensabra, “Commande d’une génératrice asynchrone auto-excite application éoliennes ”, Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2012.

[15] M. Oubidar et S. Bendaoud, “ Machines synchrone / asynchrone”, Mémoire de Master, Université du Québec, 2010.

[16] M. Imadouchene, “ Modélisation et régulation d’un générateur asynchrone autonome”, Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique Alger, Département de génie électrique, 2005.

[17] A. Nesba, “ Caractérisation du phénomène de la saturation magnétique de la machine asynchrone”, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique Alger, 2007.

[18] F. Omar, “Contribution à l’étude des systèmes hybrides de génération : Application aux énergies renouvelables”, Mémoire de Magister, Université Mohamed Chérif Messaadia Souk-Ahras, 2014.

## Annex 1

### Paramètres de la machine asynchrone modélisée

Les caractéristiques électriques :

Résistance statorique (Ohm)	$R_s = 6.6378$
Résistance rotorique (Ohm)	$R_r = 6.1165$
Résistance magnétisante (Ohm)	$R_m = 8.84251$
Inductance mutuel cyclique (H)	$L_m = 0.6724$
Inductance de fuite statorique (H)	$l_{fs} = 0.0108$
Inductance de fuite rotorique (H)	$l_{fr} = 0.0108$

Les paramètres mécaniques de la machine asynchrone :

Moment d'inertie des masses tournantes. (kg.m <sup>2</sup> )	$J = 0.00182618$
Coefficient de frottement visqueux (N.m.s/rad)	$f = 0.0003922$



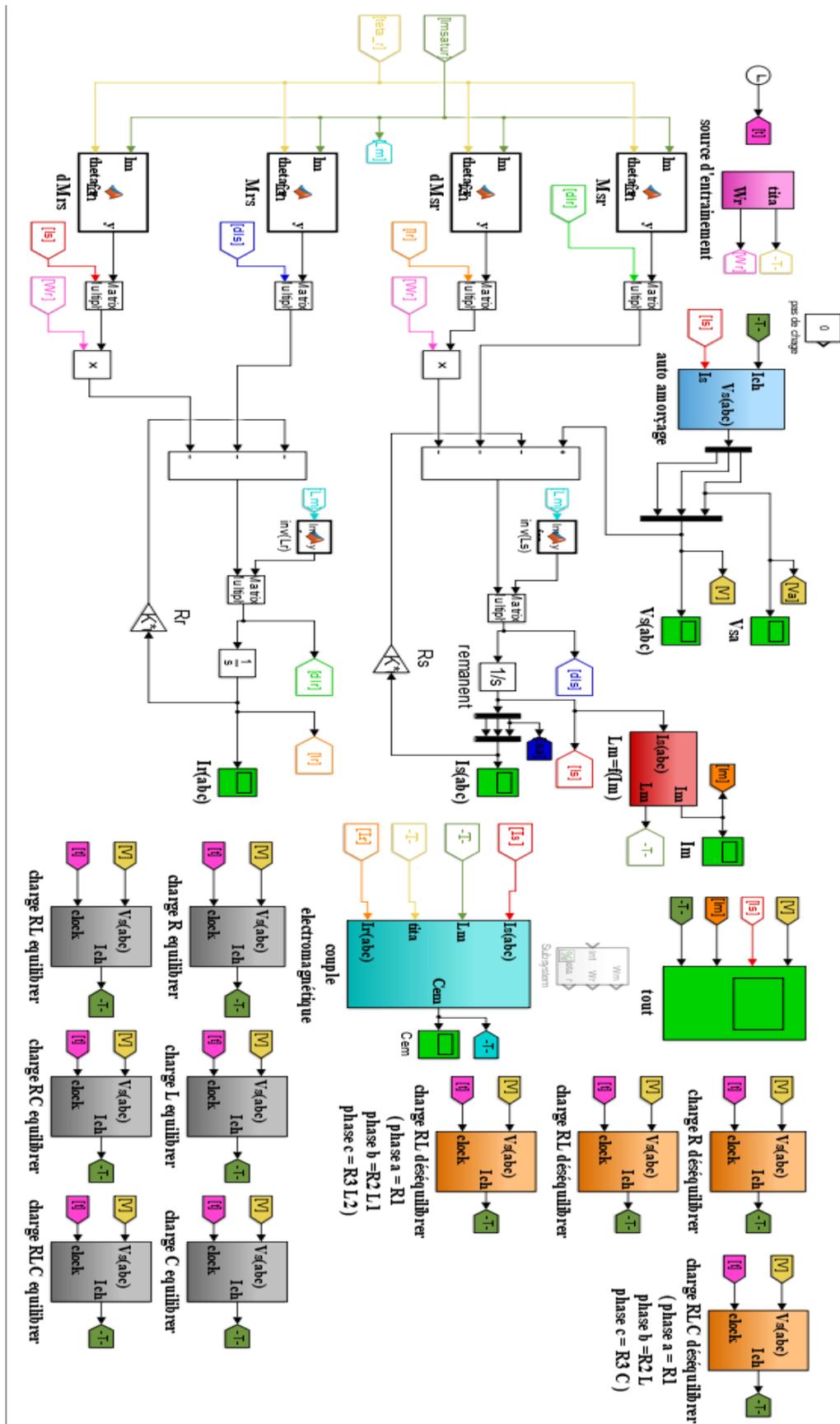
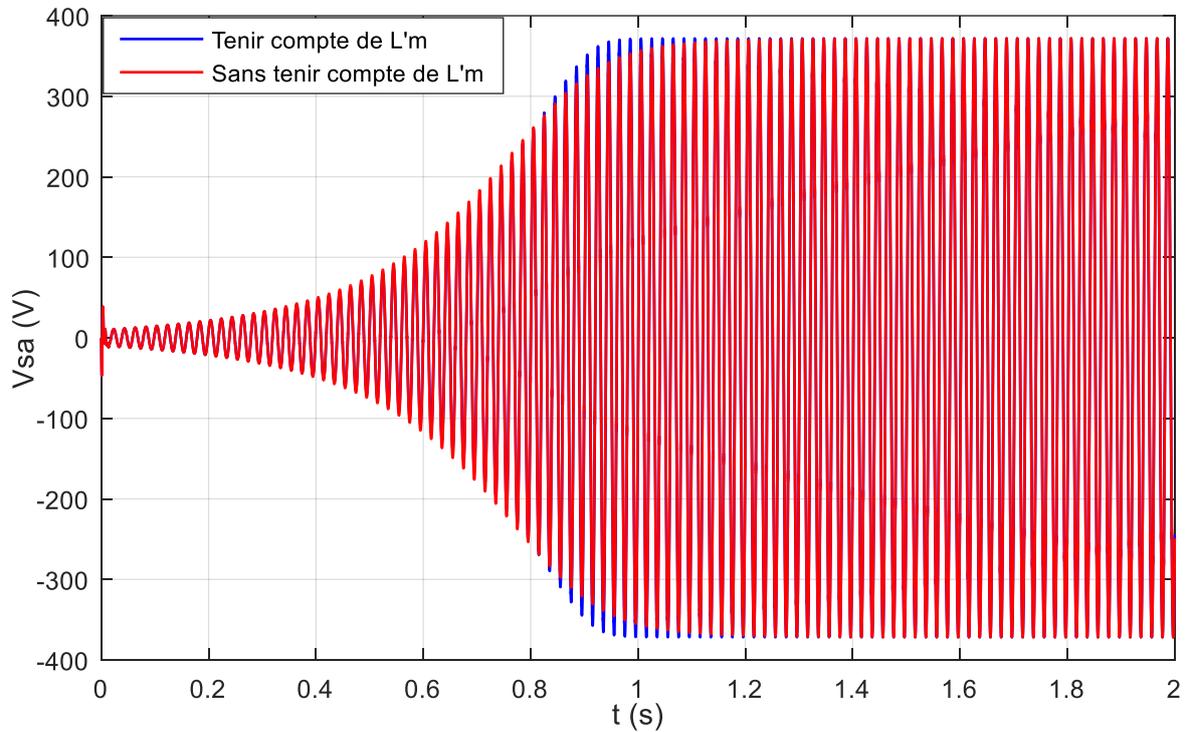


Schéma bloc de la GAS en régime saturée dans le repère *abc*

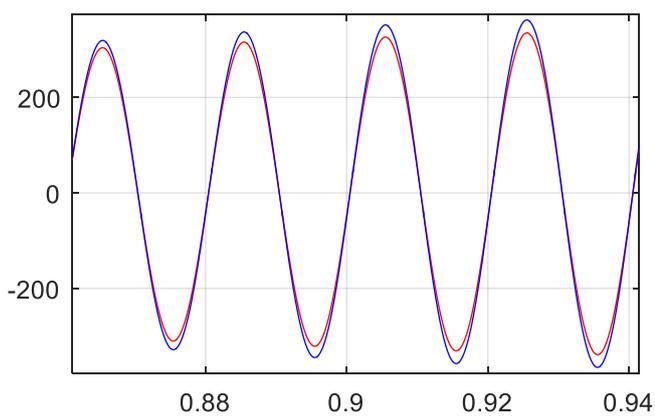
### Tension aux bornes de la GAS en tenant compte de $L_m'$ et sans tenir compte de $L_m'$

On montre les deux résultats obtenus de l'essai à vide dans le repère biphasé, en tenant compte de  $L_m'$  et sans tenir compte de  $L_m'$  ( $L_m'=0$ ). Ainsi qu'une vue agrandie des deux résultats est également présentée ci-dessous.

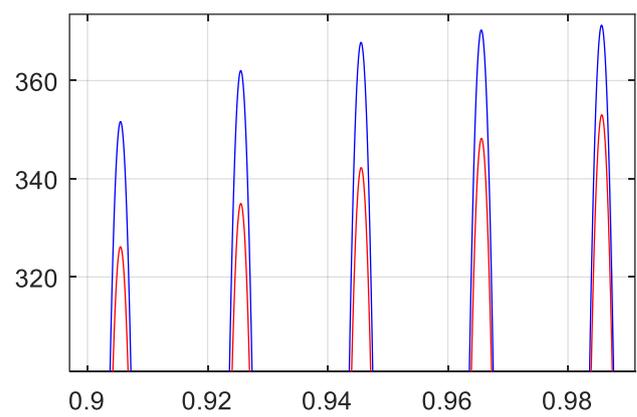
$$L'_m = 0.065955 I_m^2 - 0.29816 I_m + 0.17039$$



Evolution de la tension statorique de la phase « a »



Zoom 1



Zoom 2