







Université du Québec  
à Rimouski

## **Modélisation d'un générateur diesel avec stator rotatif**

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie  
en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences

PAR

© **RAISA DIAS BARBOSA**

**Juillet 2021**



**Composition du jury :**

**Mohamed Yasser Hayyani, président du jury, UQAR**

**Adrian Ilinca, directeur de recherche, UQAR**

**Mohamad Issa, examinateur externe, Institut Maritime du Québec**

Dépôt initial le 13 juillet 2021

Dépôt final le 27 juillet 2021



UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI  
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.





À mes enfants : Joao, Gabriel et  
Samuel.



## REMERCIEMENTS

J'adresse mes vifs remerciements à mon directeur Adrian Ilinca, professeur à l'UQAR et directeur du LREE, pour la confiance qu'il m'a placée, ainsi que pour sa patience et ses conseils tout au long de l'élaboration de ce travail.

J'exprime également ma reconnaissance au professeur Sidelmo Magalhaes Silva, professeur à l'Université de l'État de Minas Gerais, au Brésil, pour son soutien tout au long de ce travail, pour la transmission de ses connaissances sur les machines électriques ainsi que pour les discussions enrichissantes et ses remarques constructives.

J'adresse mes remerciements aussi à l'ensemble du département des Mathématiques, Informatiques et Génie de l'UQAR pour cours offerts que leurs contributions à la mise en service des outils informatiques nécessaires.

À mon mari, Pedro, pour m'encourager à chaque jour, pour sa compréhension et son amour pour moi et notre famille. À mes parents, Luiz et Shirlene, pour leur soutien tout au long de ma vie universitaire. À ma voisine, Lise Peletier, notre mamie au Canada, pour tout son soutien et surtout pour toute sa patience de nous aider avec l'adaptation au Québec et principalement pour son aide avec mon français.

Enfin, que toutes les personnes qui ont contribué à l'élaboration de ce projet, trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.



## RÉSUMÉ

Malgré le grand développement des technologies des énergies renouvelables pour la production d'électricité, les générateurs à combustibles fossiles sont toujours indispensables en tant que sources autonomes d'approvisionnement en énergie primaire ou de réserve des régions éloignées et isolées dans le monde.

Les groupes électrogènes diesel (Genset) sont largement utilisés dans ces régions, car ils se caractérisent par une fiabilité élevée, une stabilité, une longue durée de vie et une facilité de production. Cependant, la consommation élevée de carburant dans les GED est un inconvénient, car cette consommation représente une émission élevée de gaz à effet de serre. Un autre inconvénient des systèmes GED est la fluctuation des prix des carburants et les coûts élevés de leur transport vers les régions isolées, ce qui augmente le coût de l'électricité.

Les groupes électrogènes conventionnels, alimentés par des moteurs diesel, fonctionnent généralement à une vitesse fixe pour fournir une vitesse synchrone fiable aux générateurs électriques. Le fonctionnement à faible charge augmente la consommation de carburant du système, augmentant ainsi les coûts de carburant, les émissions de gaz à effet de serre et la fréquence d'entretien des machines. Pour contourner ce problème, des technologies de production d'électricité à vitesse variable ont été développées. Le fonctionnement à vitesse variable permet de trouver les conditions de fonctionnement qui favorisent l'efficacité maximale du système de production d'électricité.

Ce mémoire présente la modélisation d'une nouvelle technologie de générateur à vitesse variable, à double rotor, brevetée au Canada, aux États-Unis et en Australie connue sous le nom de Genset-Synchro. La modélisation du générateur à double rotor et la simulation des essais dynamiques ont été mises en œuvre dans l'environnement virtuel Matlab/Simulink.

La technologie Genset-Synchro offre la possibilité de contrôler la vitesse statorique de l'alternateur en fonction des charges appliquées, permettant au groupe électrogène diesel de fonctionner à vitesse variable et d'assurer des économies en carburant de l'ordre de 5 à 15%.

Mots clés : Groupes électrogènes diesel, efficacité énergétique, régime à faible charge, optimisation du carburant, site isolé, alternateur Genset-Synchro



## ABSTRACT

Despite the significant development of renewable energy technologies for power generation, fossil fuel generators are still indispensable as a stand-alone source of primary or backup power supply in remote and isolated areas of the world.

Diesel generators (Genset) are widely used in these regions, as they are characterized by high reliability, stability, long service life and ease of production. However, the high fuel consumption in DGs is a disadvantage, as this consumption represents a high emission of greenhouse gases. Another disadvantage of DG systems is the fluctuating fuel prices and the high costs of transporting them to remote areas, which increases the cost of electricity.

Conventional gensets, powered by diesel engines, typically operate at a fixed speed to provide reliable synchronous speed to the electrical generators. Low-load operation increases the fuel consumption of the system, thereby increasing fuel costs, greenhouse gas emissions, and machine maintenance frequency. To circumvent this problem, variable speed power generation technologies have been developed. Variable speed operation provides the ability to find operating conditions that promote the maximum efficiency of the power generation system.

This dissertation presents the modelling of a new variable speed, dual-rotor generator technology patented in Canada, the United States and Australia, known as Genset-Synchro. The dual-rotor generator modelling and dynamic test simulation were implemented in the Matlab/Simulink virtual environment.

The Genset-Synchro technology provides the ability to control the stator speed of the alternator based on the applied loads, allowing the diesel generator set to operate at variable speed and providing fuel savings in the range of 5-15%.

*Keywords:* Diesel generator sets, energy efficiency, low load operation, fuel optimization, remote site, Genset-Synchro alternator





## TABLE DE MATIÈRE

REMERCIEMENTS.....	ix
RÉSUMÉ.....	xi
ABSTRACT.....	xiii
TABLE DE MATIÈRE.....	xv
Liste des tableaux.....	xvii
Liste des figures.....	xix
Liste des abréviations, des sigles et des acronymes.....	xxi
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
PROBLÉMATIQUE.....	2
OBJECTIF DU PROJET.....	4
MÉTHODOLOGIE DU PROJET.....	5
STRUCTURE DU MÉMOIRE.....	6
CONCLUSION.....	7
CHAPITRE 1 Technologies de générateur diesel à vitesse variable.....	9
1.1 INTRODUCTION.....	9
1.2 SYSTÈMES DE CONVERSION DE PUISSANCE À VITESSE FIXE ET VARIABLE.....	10
1.2.1 Générateur diesel à vitesse fixe (Fixed Speed Diesel Generator - FSDG).....	10
1.2.2 Générateur diesel à vitesse variable (Variable Speed Diesel Generator - VSDG).....	12
1.3 LES PRINCIPALES TECHNOLOGIES DE GÉNÉRATEUR DIESEL À VITESSE VARIABLE.....	14
1.3.1 Solutions basées sur l'électronique de puissance.....	14
1.3.2 Transmission à variation continue (Continuously Variable Transmission - CVT).....	22
1.3.3 Comparaison des technologies VSDG selon les applications possibles.....	23
1.3.4 Conclusion.....	27
CHAPITRE 2 Le Générateur Diesel à Stator Rotatif : le genset-Synchro.....	29
2.1 INTRODUCTION.....	29
2.2 CONCEPTION MÉCANIQUE ET ÉLECTRIQUE DU GENSET-SYNCHRO.....	30
2.3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU GENSET-SYNCHRO.....	31
2.4 SYSTÈMES DE CONTRÔLE DE VITESSE DU GENSET-SYNCHRO.....	34
2.4.1 Carte DSP TMS320F28335.....	35
2.4.2 Carte DSP TMS320F28335.....	37
2.5 EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE ET ENVIRONNEMENTALE.....	41

2.6	CONCLUSION .....	45
CHAPITRE 3 Modèle Mathématique De L'Alternateur du Genset-Synchro.....		47
3.1	INTRODUCTION .....	47
3.2	DESCRIPTION DE LA MACHINE SYNCHRONE À AIMANTS PERMANENTS.....	47
3.3	MODÈLE MATHÉMATIQUE DU PMSG AU REPÈRE ABC .....	49
	3.3.1 Inductances .....	52
	3.3.2 Équation du Mouvement.....	54
3.4	MODÈLE MATHÉMATIQUE DU PMSG AU REPÈRE DQ0 .....	55
	3.4.1 Tensions, courants et flux au repère dq0 .....	58
	3.4.2 Obtention de constantes de <b><i>Labc</i></b> à partir de <b><i>Ldq0</i></b> .....	61
	3.4.3 Équation du Mouvement.....	63
3.5	ADAPTATION DU MODÈLE DU PMSG CONVENTIONNEL À LA TECHNOLOGIE GENSET-SYNCHRO .....	65
3.6	CONCLUSION .....	67
CHAPITRE 4 Modèle Numérique du Genset-Synchro et Analyses des impacts sur la production d'Électricité.....		68
4.1	INTRODUCTION .....	68
4.2	DESCRIPTION DU MODÈLE NUMÉRIQUE DÉVELOPPÉ.....	68
	4.2.1 Modélisation du PMSG.....	69
	4.2.2 Modélisation du moteur compensateur (CM) .....	74
4.3	ANALYSE DES TENSIONS ET COURANTS FOURNIS PAR LE MODÈLE NUMÉRIQUE DÉVELOPPÉ .....	77
4.4	CONCLUSION .....	84
CONCLUSION GÉNÉRALE .....		85
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....		88

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Scénario d'application le plus approprié, avantages et inconvénients des technologies sélectionnées. ....	27
Tableau 2 - Moyenne globale de la réduction des GES avec une vitesse de stator de 415 tr/min (Issa 2019). ....	44
Tableau 3 - Paramètres du PMSG.....	71
Tableau 4 – Scénarios étudiés pour l’analyse du comportement du PMSG avec les deux entrées mécaniques différentes.....	72
Tableau 5 – Valeurs de fréquences des tensions et courants aux bornes du PMSG avec deux entrées mécaniques indépendantes.....	74
Tableau 6 - Paramètres du CM. ....	76
Tableau 7 - Variation des vitesses du rotor et du stator.....	78



## LISTE DES FIGURES

Figure 1 - Schéma du générateur diesel à vitesse fixe.....	11
Figure 2 - Schéma du générateur diesel à vitesse variable. ....	12
Figure 3 - Amélioration des émissions de GES à différents niveaux de charge (Issa 2018).....	13
Figure 4 - Générateur d'induction à rotor bobiné (adaptée de (Kawabata, Morine et al. 2001)). ....	16
Figure 5 - Schéma du générateur à induction à double alimentation.....	18
Figure 6 - Schéma de la technologie avec le générateur synchrone à aimant permanent (adaptée de (Tibola 2017)) .....	20
Figure 7 - Schéma du groupe motopropulseur utilisant la technologie CVT. ....	23
Figure 8 - Classification des références utilisées dans ce chapitre selon la source primaire d'énergie. ....	26
Figure 9 - Principaux composants de la technologie Genset-Synchro (Issa and Ilinca 2017).....	30
Figure 10 – Prototype de l'alternateur Genset-Synchro couplé à un moteur diesel (Issa and Ilinca 2017).....	33
Figure 11 – Schéma du générateur diesel avec le Genset-Synchro .....	34
Figure 12 - Schéma de commande de vitesse en boucle fermée (Issa, Lepage et al. 2019).....	36
Figure 13 - Le modèle développé par Simulink (Issa, Lepage et al. 2019). ....	37
Figure 14 - Configuration du générateur diesel à vitesse variable avec système de contrôle automatisé par la carte DSP FDRM-KL25Z (Mobarra, Tremblay et al. 2020).....	39
Figure 15 - Banc d'essai (Mobarra, Tremblay et al. 2020). ....	40
Figure 16 - Exemple de variation de la consommation de carburant diesel en fonction de la charge (Ibrahim and Ilinca 2012). ....	42
Figure 17 - Illustration de l'unité Genset-Synchro GS500X avec les principaux composants (Issa 2019) .....	43
Figure 18 - Comparaison de la consommation de carburant avec différentes vitesses de stator Vs stator fixe à charges faibles et moyennes (Issa 2019). ....	44
Figure 19 - Schéma d'une machine synchrone à aimant permanent (Bendaha 2015).....	48
Figure 20 - Circuit équivalent pour les enroulements du stator (Mathworks 2020).....	50
Figure 21 - Variation de l'inductance des enroulements stator en fonction de la position du rotor (angle électrique – $\theta_r$ ) (Kundur, Balu et al. 1994) .....	52

Figure 22 -Variation d'inductance mutuelle entre les enroulements du stator en fonction de la position du rotor (angle électrique - $\theta_r$ ) (Kundur, Balu et al. 1994).....	54
Figure 23 - Schéma du PMSG avec les axes $d$ et $q$ . (Mathworks 2020).....	56
Figure 24 - Circuits équivalents du PMSG au repère $dq$ .....	61
Figure 25 - Schéma du modèle numérique développé dans le logiciel Matlab/Simulink. ....	69
Figure 26 - Bloc de la PMSM disponible à la bibliothèque Matlab/Simulink. ....	70
Figure 27 - Paramètres d'entrée pour la PMSM du logiciel Matlab/Simulink. ....	71
Figure 28 – Schéma pour l'analyse de comportement du PMSG avec deux entrées mécaniques indépendantes.....	72
Figure 29 - Tension de sortie dans les trois phases pour les scénarios 1 et 4. ....	73
Figure 30 - Bloc de la machine à cage d'écureuil disponible à la bibliothèque Matlab/Simulink (Mathworks 2020). ....	74
Figure 31 - Données principales pour la machine à cage d'écureuil (Mathworks 2020). ....	75
Figure 32 - Données principales pour la machine à cage d'écureuil (Mathworks 2020). ....	76
Figure 33 - Tension et courant avec une fréquence de 60 Hz. ....	78
Figure 34 – Delai de transition dans la vitesse de rotation $\omega_{CM}$ . ....	79
Figure 35 - Comportement de la tension et du courant face au delai de transition dû au changement de vitesse de la machine à l'instant 100s.....	80
Figure 36 - Comportement de la tension et du courant face au delai de transition dû au changement de vitesse de la machine à l'instant 200s.....	81
Figure 37 - Comportement du courant et de la tension avant et après la première transition (100s).....	82
Figure 38 - Comportement du courant et de la tension avant et après la seconde transition (200s).....	83

## LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

<b>CA</b>	Courant alternative
<b>CC</b>	Courant continu
<b>CM</b>	Compensatory Motor – Moteur compensateur
<b>CVT</b>	Continuous Variable Transmission – Transmission à variation continue
<b>DFIG</b>	Doubly-Fed Induction Generator - Générateur à induction à double alimentation
<b>FPC</b>	Full power converter - Convertisseur de pleine puissance
<b>FSDG</b>	Fixed Speed Diesel Generator – Générateur diesel à vitesse fixe
<b>GED</b>	Groupe électrogène diesel
<b>GES</b>	Gaz à effet de serre
<b>HFO</b>	Heavy fuel oil - Carburant lourd
<b>IGBT</b>	Insulated Gate Bipolar Transistors
<b>L</b>	Inductance
<b>OMI</b>	Organisation maritime internationale
<b>PMSG</b>	Permanent magnet synchronous generator – Générateur synchrone à aimants permanents
<b>PMSM</b>	Permanent magnet synchronous motor – Moteur synchrone à aimants permanents
<b>pu</b>	Par unité
<b>PWM</b>	Pulse Width Modulation - Modulation de largeur d'impulsion
<b>R</b>	Résistance
<b>RL</b>	Résistance et inductance
<b>RTF</b>	Ride-through fault capability
<b>SI</b>	Système International d'unités
<b>VSDG</b>	Variable Speed Diesel Generator – Générateur diesel à vitesse variable





## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les préoccupations environnementales et la recherche de réduction des émissions de gaz à effet de serre ont favorisé le développement rapide des technologies d'énergies renouvelables pour la production d'électricité. Cependant, les générateurs de combustibles fossiles sont toujours indispensables en tant que sources autonomes d'approvisionnement en énergie primaire ou de réserve pour les navires et les installations à terre (Issa 2018).

Les groupes électrogènes diesel sont largement utilisés dans les régions isolées, car ils se caractérisent par une fiabilité élevée, une stabilité, une longue durée de vie et une facilité de production (Chen and Hu 2003). Ces avantages justifient la préférence pour cette source d'énergie par rapport aux énergies renouvelables qui, malgré les avancées technologiques, sont imprévisibles, intermittentes et ont une capacité de stockage limitée (Chen and Hu 2003). Cependant, la consommation élevée de carburant dans les GED est un inconvénient, car cette consommation représente une émission élevée de gaz à effet de serre. De nombreuses études sont réalisées afin de réduire la consommation de carburant et d'augmenter l'efficacité du système de génération (Espadafor, Villanueva et al. 2009, Dengler, Geimer et al. 2011, Van Maerhem, Bram et al. 2014). Cependant, le comportement dynamique de la charge, qui a des régimes différents, rend difficile la maîtrise de la consommation de carburant et, par conséquent, du coût de l'électricité et du gaz et des émissions de particules (Al-suod, Alexander et al. 2015).

Dans ce chapitre, je présenterai : la problématique qui a motivé le développement de ce travail de recherche, les objectifs à atteindre et la méthodologie de travail utilisée dans ce projet.

## PROBLÉMATIQUE

Au Canada, plus de 200 000 personnes vivent dans des communautés éloignées qui ne sont pas raccordées au réseau électrique national pour l'approvisionnement en électricité (Issa and Ilinca 2020). Ces communautés utilisent principalement des générateurs à combustibles fossiles, surtout le moteur diesel, pour produire de l'énergie électrique. Parmi les difficultés pour la production d'électricité dans ces communautés isolées, on retrouve :

- les groupes électrogènes classiques alimentés par des GEDs qui fonctionnent normalement à vitesse fixe pour fournir une vitesse synchrone fiable et générer une tension à fréquence fixe. Ils sont conçus pour répondre à la demande de pointe des régions autonomes. Dans de nombreux cas, ces générateurs fonctionnent la plupart du temps à des charges partielles au-delà de leur capacité nominale, ce qui pose des problèmes techniques, tels que le glaçage des cylindres, la perte d'adhérence de l'huile entre le cylindre et les segments et une usure des pièces (Saad, Abboudi et al. 2016). Ce fonctionnement à faibles charges réduit la durée de vie des moteurs diesel, nécessitant une maintenance constante par des professionnels qualifiés qui ne sont pas toujours disponibles dans ces régions éloignées, ce qui augmente le coût de production d'énergie (Rafic, Tammam et al. 2012), en plus de diminuer l'efficacité énergétique des groupes électrogènes et d'augmenter la consommation de carburant.
- Le coût de la production d'énergie à l'aide de générateurs diesel dans les régions isolées est considérablement plus élevé que le coût de l'énergie pour les communautés raccordées au système électrique national (Rafic, Tammam et al. 2012). Ce fait est dû au coût de transport du carburant, qui est très élevé, surtout pour les régions que ne sont accessibles en hiver que par voie maritime ou aérienne. À cela s'ajoute la fluctuation du prix du gazole qui peut également changer brusquement et soudainement le prix de l'électricité (Karimi and Kazerani 2017). En plus les coûts de stockage en toute sécurité de grandes quantités de diesel sont également très élevés (Nejabatkhah, Li et al. 2018).

- La combustion incomplète du diesel est responsable de l'émission des gaz dangereux et destructeurs pour l'environnement, en plus de l'émission de particules qui contribuent à la pollution atmosphérique (Hamilton, Negnevitsky et al. 2015). Ces émissions ont un impact négatif important sur la qualité de l'air et la santé humaine. Les impacts d'éventuels accidents survenant lors du transport ou du stockage de grandes quantités de gazole doivent également être pris en considération. Les fuites de diesel peuvent contaminer le sol et l'eau d'une région. Ces accidents nécessitent une intervention urgente, qui présente généralement une haute complexité technique et un coût élevé (Hamilton, Negnevitsky et al. 2015).

L'industrie maritime utilise largement les générateurs diesel pour produire de l'électricité à bord des navires. Afin de réduire la quantité de gaz polluants émis par les navires, l'Organisation maritime internationale (OMI) a adopté des mesures obligatoires relatives à l'efficacité énergétique de ces générateurs. L'objectif est de réduire d'ici 2050 au moins 50 % des émissions de gaz à effet de serre par rapport à la quantité émise en 2008 (Azzara 2014). Parmi les problématiques pour la production d'électricité dans les bateaux, on observe :

- En 2012, même si les navires émettent moins de gaz à effet de serre que les autres modes de transport utilisant des combustibles fossiles, ils étaient responsables de 2,2% des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> (Committee 2008). Le type de carburant utilisé a une grande influence sur la quantité d'émission de gaz polluants. L'utilisation de carburant lourd (Heavy fuel oil - HFO), qui coûte un tiers du diesel propre, représente une économie de plusieurs millions de dollars par année (Committee 2008). Mais ces économies à court terme sont dangereuses pour l'environnement, car le HFO est riche en soufre et augmente considérablement les émissions de polluants dans l'atmosphère (Issa and Ilinca 2020).

- Dans certaines situations particulières, pour des raisons de sécurité, il est nécessaire d'utiliser un deuxième générateur connecté à faible charge ou à vide, simplement en cas de panne du générateur principal (Issa and Ilinca 2020). Cette opération, à faible charge, se produit généralement lorsque le navire navigue dans des régions restreintes, souvent pour une longue durée ce qui représente une usure élevée pour le moteur diesel (Issa and Ilinca 2020).

À la lumière de ces scénarios, de nombreuses études ont été développées afin d'augmenter l'efficacité énergétique des groupes électrogènes diesel, de réduire la consommation de carburant et par conséquent de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Parmi les solutions étudiées, le générateur diesel à double rotor (Genset-Synchro) a été présenté comme une alternative intéressante pour les régions isolées en tenant compte de ses performances économiques et environnementales (Issa and Ilinca 2020).

## **OBJECTIF DU PROJET**

L'objectif global de ce projet de recherche est la modélisation et simulation numérique de la génératrice Genset-Synchro. Cette génératrice est un concept innovateur d'alternateur pour la production d'électricité tout en apportant des modifications à la structure d'une machine synchrone traditionnelle en relation au stator de cette machine.

La modélisation de la génératrice servira à la compréhension adéquate de son fonctionnement en étudiant l'impact de la rotation du stator sur la qualité de l'énergie fournie pour le générateur diesel tout en analysant les variables électriques. Les résultats seront comparés à ceux de la machine synchrone conventionnelle, de même qu'aux résultats de la machine synchrone contrôlée par l'électronique de puissance. À cela s'ajoute l'avantage de développer un modèle mathématique correspondant à la génératrice Genset-Synchro, ce qui permettra l'utilisation de ce modèle pour d'autres travaux de recherche comme l'application et les avantages de l'utilisation de cette technologie pour générer de l'électricité dans les différents Gensets. En outre, avec la réalisation du projet, on espère arriver à améliorer la connaissance des règles d'opération en général dans les génératrices diesel.

Afin de pouvoir valoriser l'intérêt de ce projet, d'autres objectifs secondaires sont nécessaires comme:

- une revue de littérature des différentes technologies des générateurs diesel à vitesse variable, afin de bien comprendre les caractéristiques, les avantages, et les inconvénients de chacune.
- l'étude des modèles des machines synchrones et asynchrones déjà présentes sur la plateforme Matlab/Simulink, de même que les équations mathématiques que décrivent chaque modèle.
- la modélisation mathématique de la génératrice Genset-Synchro et simulation sur le logiciel Matlab/Simulink. Nous avons considéré une machine synchrone à aimant permanent selon les dernières études publiées sur le sujet.
- la validation par des simulations du modèle développé sur la plateforme Matlab/Simulink et l'analyse des impacts du stator rotatif sur la qualité de l'énergie électrique produite par la génératrice Genset-Synchro.

## **MÉTHODOLOGIE DU PROJET**

La méthodologie suivie dans cette recherche, pour la réalisation des objectifs définis, se diviser en six parties :

- faire une revue de littérature traitant l'opération des génératrices diesel à vitesse fixe et à vitesse variable en comparant à des fins de comparaison au niveau opérationnel et de performance ces deux types d'opérations. Bien comme faire une revue de littérature des principales technologies étudiées sur les génératrices diesel opérant à vitesse variable afin de bien comprendre le fonctionnement de chacune d'elles et des possibles applications.
- faire une revue de littérature concernant les machines synchrone et asynchrone en identifiant aussi les modèles mathématiques déjà consolidés dans la

littérature pour ces deux machines afin de bien comprendre le fonctionnement de chacune d'elles et de leurs différences.

- faire une étude des modèles mathématiques déjà existants sur le logiciel Matlab/Simulink des machines synchrone et asynchrone afin de bien comprendre les équations et les circuits équivalents utilisés et de les adapter à la technologie Genset-Synchro.
- comprendre le principe de fonctionnement de la génératrice Genset-Synchro afin de la modéliser sur Matlab/Simulink à partir de modèles déjà existants et étudiés auparavant.
- étudier les impacts de la nouvelle technologie sur la qualité de l'électricité fournie par la génératrice Genset-Synchro.

## **STRUCTURE DU MÉMOIRE**

Le premier chapitre de ce mémoire présente une introduction de ce projet de recherche, ainsi que la problématique, les objectifs et la méthodologie utilisées. Le second chapitre présente une revue de la littérature sur les technologies de générateurs diesel à vitesse variable en mettant en évidence les avantages et les inconvénients de chacune de ces technologies. Le troisième chapitre présente une description détaillée du concept Genset-Synchro, son rendement et les stratégies de contrôle développées dans les études auparavant. Le quatrième chapitre portera sur le modèle mathématique d'un générateur synchrone à aimants permanents et l'adaptation nécessaire de ce générateur pour la technologie Genset-Synchro. Le cinquième chapitre présentera le modèle numérique, développé avec le logiciel MatLab/Simulink et la validation de ce modèle à partir des résultats expérimentaux présentés dans les études déjà publiées, ainsi que les impacts de la nouvelle technologie sur la qualité de l'électricité fournie par le GED. Pour finir, le chapitre six présente la conclusion de ce travail.

## CONCLUSION

La fiabilité et la stabilité du diesel comme source d'énergie favorisent la production d'électricité à partir de GED de façon prioritaire dans la plupart des régions éloignées et isolées dans le monde. Malgré ces avantages, les GED présentent plusieurs inconvénients et leur usage pose de sérieux problèmes environnementaux, comme l'émission de gaz à effet de serre pose aussi des problèmes économiques en fonction du prix élevé du carburant, et finalement pose des problèmes techniques, parce que les moteurs nécessitent plus d'entretien quand ils sont opérés à faibles charges.

Dans ce contexte, le projet peut apporter des bénéfices aux populations des régions éloignées dans le monde, de même qu'à l'industrie dans les secteurs des transports ferroviaire et maritime qui utilisent, par exemple, le GED comme source principale d'électricité, en favorisant la diminution des coûts de production d'énergie électrique.

Le projet apporte aussi des bénéfices à l'environnement, puisqu'il contribue à la diminution des émissions de gaz à effet serre.





# **CHAPITRE 1**

## **TECHNOLOGIES DE GÉNÉRATEUR DIESEL À VITESSE VARIABLE**

### **1.1 INTRODUCTION**

Les préoccupations environnementales et la recherche de réduction des émissions de gaz à effet de serre ont accéléré le développement rapide des technologies d'énergie renouvelable pour la production d'électricité. Cependant, les générateurs de combustibles fossiles sont toujours indispensables en tant que sources autonomes d'alimentation électrique primaire ou de réserve pour les navires et les installations à terre (Issa 2018).

Les groupes électrogènes diesel (Genset) sont largement utilisés dans les régions isolées, car ils ont une fiabilité élevée, une stabilité, une longue durée de vie et une facilité de production (Chen and Hu 2003). Ces avantages justifient la préférence pour cette source d'énergie aux énergies renouvelables qui, malgré les avancées technologiques, sont imprévisibles, intermittentes et ont une capacité de stockage limitée (Chen and Hu 2003). Cependant, la consommation élevée de carburant dans les GEDs est un inconvénient, car cette consommation représente une émission élevée de gaz à effet de serre. La combustion incomplète du diesel est responsable de l'émission des gaz dangereux et destructeurs pour l'environnement, en plus de l'émission de particules qui contribuent à la pollution de l'air (Issa 2019). Un autre inconvénient des systèmes GED est la fluctuation du prix du carburant et les coûts élevés de transport vers les régions isolées, ce qui augmente le coût de l'électricité. De nombreuses études sont menées pour réduire la consommation de carburant et augmenter l'efficacité du système de génération (Espadafor, Villanueva et al. 2009, Dengler, Geimer et al. 2011, Van Maerhem, Bram et al. 2014). Cependant, le comportement dynamique de la charge, qui a des régimes différents, rend difficile la maîtrise de la consommation de carburant, du coût de l'électricité et des émissions de gaz et de particules (Al-suod, Alexander et al. 2015).

Les groupes électrogènes traditionnels alimentés par des moteurs diesel fonctionnent généralement à vitesse fixe pour fournir une vitesse synchrone fiable aux générateurs

d'énergie électrique. Par conséquent, les GEDs sont dimensionnés pour fournir la pointe de la demande de charge locale, présentant une puissance nominale due à cette demande de pointe. Bien que le GED ait une efficacité maximale lorsqu'il fonctionne à puissance nominale, son efficacité diminue considérablement lorsqu'il fonctionne dans des régimes de faible charge (Al-suod, Alexander et al. 2015). Ainsi, l'efficacité est compromise dans les régions où les groupes électrogènes fonctionnent en continu et il existe une différence significative entre la faible charge, avec une durée élevée, et la charge de pointe, qui se produit généralement sur une courte période de temps. Le fonctionnement à faible charge augmente la consommation de carburant du système, augmentant également les coûts de carburant et la fréquence d'entretien de la machine qui s'use plus rapidement lorsqu'elle ne fonctionne pas à la puissance nominale (Nayar 2012).

Ce chapitre vise à faire une étude des principales technologies des générateurs diesel fonctionnant à vitesse variable, en mettant en évidence les avantages et les inconvénients de chacune d'entre elles. Une comparaison entre les technologies étudiées sera également présentée en fonction des applications possibles.

La section 1.2 présente les caractéristiques des technologies de production d'électricité à vitesse fixe et à vitesse variable. La section 1.3 présente une description des technologies de générateur diesel à vitesse variable comme discuté dans les études sur le sujet. La section 1.4 présente une comparaison de ces technologies en relation avec l'efficacité du système, avec la consommation de carburant et avec les émissions de gaz et de particules dans l'atmosphère. Enfin, la section 1.5 présente la conclusion de ce chapitre.

## **1.2 SYSTÈMES DE CONVERSION DE PUISSANCE À VITESSE FIXE ET VARIABLE**

### **1.2.1 Générateur diesel à vitesse fixe (Fixed Speed Diesel Generator - FSDG)**

Dans les GEDs fonctionnant à vitesse fixe, le moteur diesel tourne à une vitesse constante pour fournir un couple mécanique spécifique pour un générateur d'énergie électrique sans surveiller la variation de la charge électrique ou le rendement du moteur

(Nayar 2012). Les avantages de cette topologie sont la robustesse et la simplicité de construction et d'exploitation (ce qui implique un coût réduit). Dans un FSDG, pour maintenir la vitesse fixe requise par une fréquence et une amplitude de tension fixes, l'inconvénient est qu'à mesure que la charge diminue, le rotor va fonctionner avec un couple mécanique élevé sans en avoir besoin (Barakat, Tnani et al. 2010). Le moteur diesel, qui est directement connecté à l'arbre du rotor du générateur, doit fournir un couple mécanique approprié au niveau de charge pour maintenir une production d'énergie de qualité (Hamilton, Negnevitsky et al. 2019). En d'autres termes, à mesure que la charge diminue, dans un FSDG, le GED fonctionnera moins efficacement pour maintenir une vitesse fixe, ce qui implique une consommation de carburant plus élevée pour un régime de faible charge, soit entre 30 et 40 % de la charge nominale (Shirneshan, Almassi et al. 2013). Le fonctionnement à vitesse fixe génère des efforts mécaniques plus importants sur le système, augmentant le risque d'indisponibilité du générateur. De plus, le taux de maintenance élevé affecte le système lors des opérations à faible charge en raison du vitrage des cylindres ou, dans le pire des cas, du blocage des pistons (Hamilton, Negnevitsky et al. 2015). La Figure 1 ci-dessous montre une représentation schématique de cette technologie.

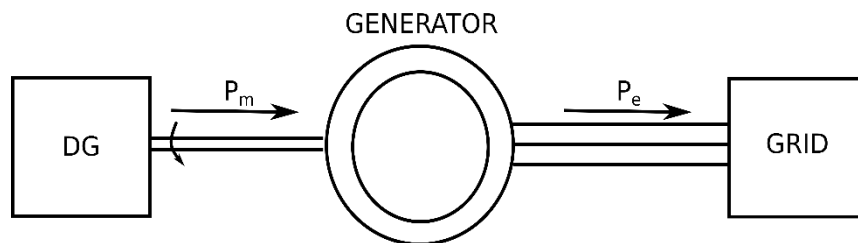


Figure 1 - Schéma du générateur diesel à vitesse fixe.

Afin d'optimiser leur efficacité, ces systèmes sont conçus pour une variation limitée de la plage de vitesse, présentant typiquement deux vitesses de rotation. Ceci est possible en utilisant deux générateurs avec de quantité de pôles différents et avec de puissances nominales différentes (Guo, Fu et al. 2012, Ayodele, Ogunjuyigbe et al. 2017), ou en utilisant un seul générateur avec la possibilité de faire varier le nombre de pôles. Dans les deux cas, l'utilisation de deux vitesses de rotation permet une petite augmentation de l'efficacité. Les

vitesse de rotation nominales sont choisies pour optimiser la satisfaction de la demande locale en raison de la courbe de charge caractéristique du système.

### 1.2.2 Générateur diesel à vitesse variable (Variable Speed Diesel Generator - VSDG)

Le fonctionnement à vitesse variable permet de rechercher des conditions de fonctionnement qui favorisent une efficacité maximale du système de production d'électricité. En effet, la vitesse de rotation affecte la consommation du moteur lorsque la charge mécanique diminue en fonction de la charge électrique. Dans le VSDG, le couple mécanique fourni par le moteur est ajusté en fonction de la demande de la charge. Lorsque le système fonctionne à faible charge, le moteur ralentit, évitant la production inutile de couple mécanique. La Figure 2 indique le schéma du GED développé avec un système de générateur diesel à vitesse variable.

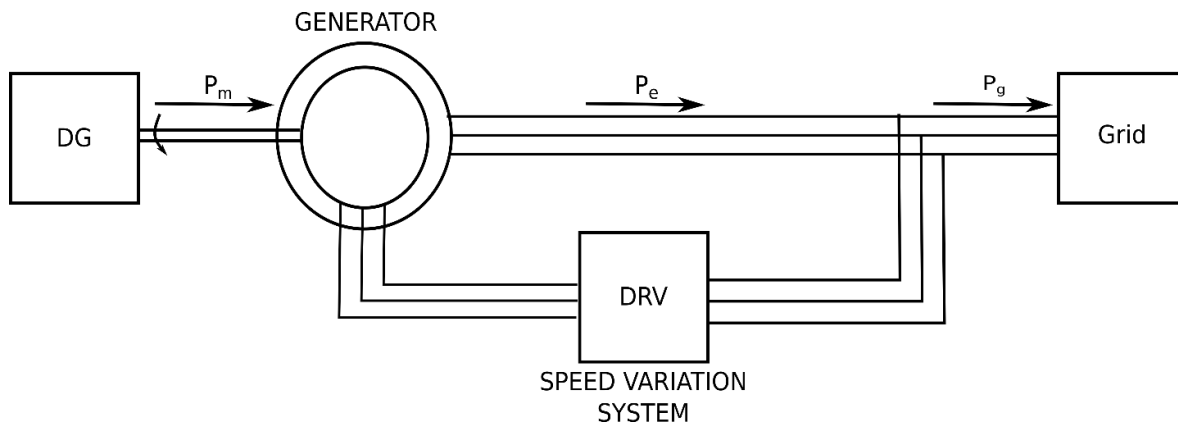


Figure 2 - Schéma du générateur diesel à vitesse variable.

Les systèmes de génération fonctionnant à vitesse variable présentent de nombreux avantages par rapport aux systèmes fonctionnant à vitesse fixe (Manwell, Stein et al. 1992). Bien que ces systèmes aient un investissement initial plus élevé que les systèmes FSDG, ce coût est justifiable lorsque l'on considère l'amélioration du rendement énergétique (Greig and Wang 2017) et la réduction des émissions de gaz à effet de serre (Issa and Ilinca 2020). Une comparaison entre la quantité de gaz émis en fonction du niveau de charge dans un FSDG et

un VSDG est présentée en (Issa 2018). La Figure 3 illustre le graphique avec les comparaisons de cette étude.

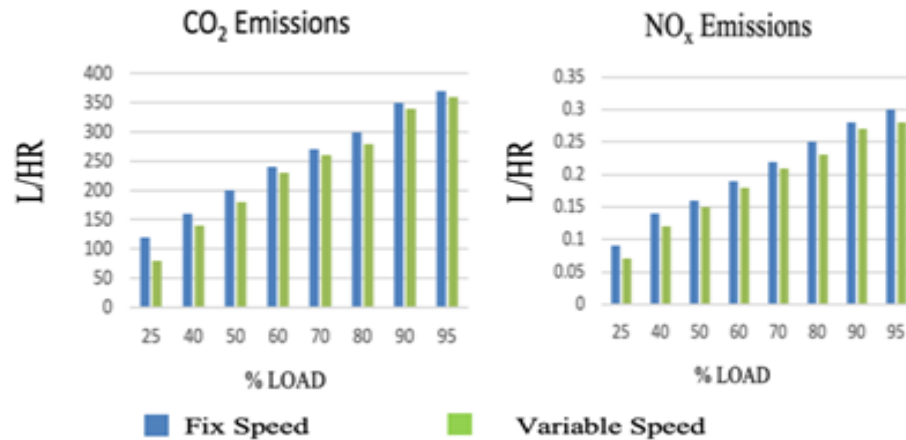


Figure 3 - Amélioration des émissions de GES à différents niveaux de charge (Issa 2018).

Les systèmes VSDG utilisant l'électronique de puissance ont la possibilité de contrôler la puissance active et réactive fournie au réseau électrique (Tang and Xu 1995). Un autre avantage est la réduction des contraintes dynamiques des pièces mécaniques, ce qui implique moins d'entretien et une durée de vie accrue du moteur (Greig and Wang 2017). Les VSDG peuvent fonctionner pendant une longue période à faible vitesse de rotation pour supporter des charges plus faibles (Wang, Nayar et al. 2010).

Les VSDG s'adaptent plus facilement aux conditions variables du réseau électrique, offrant une meilleure contrôlabilité, un amortissement efficace des fluctuations de puissance active et une minimisation de l'injection d'harmoniques, facilitant leur intégration dans les réseaux faibles (Oliveira 2009).

De nombreuses études sont menées afin d'améliorer l'efficacité des groupes électrogènes fonctionnant à vitesse variable. Plusieurs solutions sont proposées pour mettre en relation la rotation du moteur diesel avec le couple mécanique requis par la génératrice. Certaines méthodes sont axées sur le traitement de la sortie électrique, tandis que d'autres

sont basées sur une conversion mécanique pour adapter la vitesse du moteur au profil de charge électrique variable.

### **1.3 LES PRINCIPALES TECHNOLOGIES DE GÉNÉRATEUR DIESEL À VITESSE VARIABLE**

Les VSDG présentent de nombreux avantages par rapport aux systèmes FSDG, comme discuté dans la section précédente. Parmi ces avantages, il faut souligner la plus grande flexibilité opérationnelle de ces systèmes qui adaptent la rotation du moteur diesel en fonction du régime de la charge électrique et, par conséquent, l'économie de la consommation du carburant. Cette caractéristique rend les VSDG largement utilisés dans les régions où le réseau électrique est faible ou dans les régions isolées, sans connexion au réseau électrique national, en particulier dans les systèmes hybrides, combinant la production à partir de la DG avec des systèmes de production éolienne ou solaire, par exemple (Benhamed, Ibrahim et al. 2016, Maritz 2019). Cette section présente les caractéristiques des technologies les plus récentes et les plus pertinentes utilisées par les VSDG, en particulier les approches électriques et mécaniques qui permettent le fonctionnement du GED à vitesse variable en fonction de la variation de charge.

Parmi les technologies présentées, les plus traditionnelles utilisent l'électronique de puissance pour corriger la fréquence et réguler la tension de sortie. Une solution électromécanique et une solution mécanique pour la variation de la vitesse de rotation du GED en fonction de la variation de charge sont également présentées.

#### **1.3.1 Solutions basées sur l'électronique de puissance**

Dans les systèmes à vitesse variable basés sur l'électronique de puissance, le générateur est connecté au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur ca/cc/ca (courant alterné / courant continu / courant alterné), également appelé convertisseur de fréquence, qui découple la fréquence du réseau et la fréquence du générateur, permettant le contrôle de la vitesse de rotation du générateur dans une plage de variation plus large afin d'augmenter l'efficacité du système (Wang, Nayar et al. 2010). La connexion statique des générateurs au réseau

électrique permet : le contrôle découplé de la puissance active et réactive, l'amortissement efficace des fluctuations de puissance, le fonctionnement avec une efficacité énergétique maximale et la minimisation des problèmes de qualité de l'énergie (dépendant de la technologie de générateur à être utilisé), facilitant son intégration dans des réseaux faibles.

Ces systèmes à vitesse variable peuvent être équipés de générateurs à induction à rotor bobiné ou de générateurs synchrones.

#### 1.3.1.1 Générateur d'induction à rotor bobiné

Les générateurs les plus couramment utilisés dans les assemblages de GED sont les générateurs à induction à rotor bobiné. La machine à induction a une symétrie structurelle avec des enroulements triphasés dans le stator et le rotor. Dans les générateurs à rotor bobiné, les enroulements du rotor sont constitués de fils de cuivre, similaires à l'enroulement du stator. Cette construction permet la connexion des bornes du rotor par des éléments passifs ou par des sources externes, ce qui nécessite la construction d'un ensemble de trois bagues collectrices et balais qui permettent la connexion électrique entre le bobinage tournant et les connexions des bornes statiques (Krause, Wasynczuk et al. 1995).

Dans les applications à vitesse variable, il est nécessaire de surveiller l'amplitude de la tension et l'écart de fréquence. Pour les installations connectées au réseau, le stator de la machine peut être directement connecté au réseau qui dicte les valeurs de fréquence et de tension (Peña, Cárdenas et al. 2005). Pour les installations isolées, sans raccordement au réseau électrique national, des stratégies de contrôle doivent être utilisées pour maintenir ces paramètres dans les limites opérationnelles requises afin d'assurer la qualité de l'électricité fournie. La stratégie de contrôle doit être mise en œuvre en tenant compte de la variation de la vitesse du rotor et les fluctuations de la charge (Kawabata, Oka et al. 2004, Forchetti, Solsona et al. 2007).

Les systèmes de génération utilisant le moteur diesel et le générateur d'induction à rotor bobiné ont un système d'excitation séparé pour le contrôle de la tension et un régulateur de

vitesse pour le contrôle de la fréquence. Le générateur à double excitation permet le contrôle des valeurs de fréquence et de tension qui sont maintenues constantes malgré les fluctuations de charge dues au réglage des paramètres du contrôleur de courant (Greig and Wang 2017).

Dans les systèmes isolés du réseau électrique, le rotor du générateur à induction peut être connecté à un onduleur avec des batteries et son stator est connecté à une charge et à un condensateur. Le condensateur est utilisé pour neutraliser le courant de l'onduleur et réduire les ondulations de tension de sortie de cet équipement électronique. Il fournit également un courant de magnétisation pour le générateur à induction en plus de permettre le contrôle de l'amplitude de la tension de sortie (Kawabata, Morine et al. 2001, Kawabata, Oka et al. 2004).

Le contrôle de la tension et de la fréquence est mis en œuvre par l'onduleur connecté au rotor du générateur à induction. Cet équipement est chargé de stabiliser la tension lorsque la vitesse du rotor varie en fonction de la fluctuation de la charge, et de réguler la fréquence, en contrôlant l'angle électrique du rotor. L'onduleur et les batteries sont également utilisés pour démarrer le moteur (Kawabata, Morine et al. 2001, Kawabata, Oka et al. 2004). La Figure 4 montre le schéma de cette technologie.

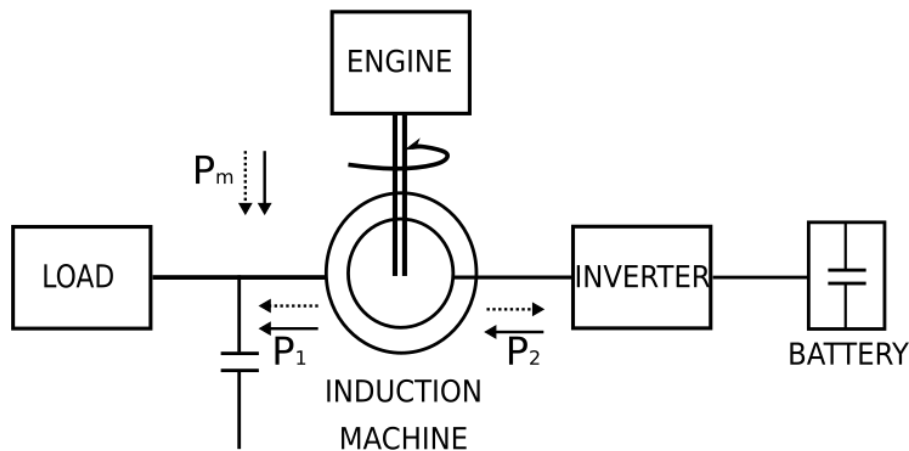


Figure 4 - Générateur d'induction à rotor bobiné (adaptée de (Kawabata, Morine et al. 2001)).



Un inconvénient de cette configuration est sa réponse dynamique lente qui ne supporte pas les changements brusques majeurs du système électrique. Il est plus efficace lorsqu'il est associé à d'autres sources d'énergie renouvelable, telle que les systèmes hybrides qui combinent l'éolien et le photovoltaïque (Peña, Cárdenas et al. 2005).

Lorsque le générateur à induction à rotor bobiné est solidement connecté au réseau électrique, nous avons le générateur à induction à double alimentation (Doubly-Fed Induction Generator - DFIG), qui est l'une des technologies les plus compétitives pour les systèmes de génération fonctionnant à vitesse variable. La technologie DFIG fait l'objet de nombreuses études en raison de son expansion rapide et aussi parce que ce système est fortement affecté par les perturbations du réseau électrique (Morren and Haan 2005). Les détails sur cette technologie de génération sont largement expliqués et publiés, d'où les nombreuses études traitant de la modélisation du système au développement de stratégies de contrôle complexes.

#### 1.3.1.2 Générateur à induction à double alimentation (DFIG)

Le générateur à induction à double alimentation est une application particulière du générateur à induction à rotor bobiné ayant une alimentation indépendante sur les enroulements du stator et du rotor.

La configuration standard du système de génération électrique utilisant une machine à induction à double alimentation est illustrée à la Figure 5. Dans ce système, le stator de la machine est connecté directement au réseau électrique et le circuit du rotor est alimenté par deux convertisseurs PWM et un transformateur responsable de l'adéquation du niveau de tension.

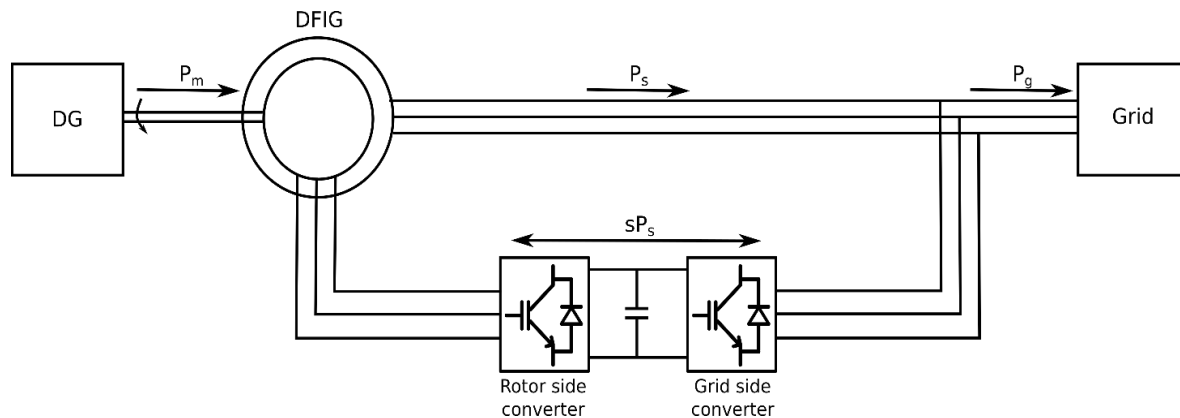


Figure 5 - Schéma du générateur à induction à double alimentation.

Ce réglage permet au générateur à induction à double alimentation de fonctionner en faisant varier la vitesse dans les limites de fonctionnement, en fonction de la fluctuation de la charge, c'est-à-dire en rotation sous-synchrone et super-synchrone. Cette technologie permet d'alimenter la charge, la machine travaillant en dessous, au-dessus et même à vitesse synchrone (Pena, Cardenas et al. 2009). Le flux de puissance peut être établi soit du rotor du générateur à induction vers le réseau électrique, soit en sens inverse. Pour le transfert de puissance électrique du circuit rotorique vers l'alimentation, il est nécessaire que les convertisseurs fonctionnent respectivement en redressement et en inversion. Lorsque les convertisseurs sont inversés dans leurs fonctions, le flux de puissance change également de direction (Pena, Cardenas et al. 2009).

Une stratégie de contrôle vectoriel est adoptée pour gérer l'injection/consommation d'énergie par le rotor, générant des impulsions PWM indépendantes pour les IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors). Le convertisseur du côté de réseau, contrôle la tension sur le bus CC et fournit la puissance réactive au rotor. Par contre, le convertisseur côté de rotor, contrôle la puissance active du rotor et la puissance réactive du stator, en utilisant une stratégie d'orientation des grandeurs en fonction du flux statorique, assurant un découplage quasi optimal entre les voies de contrôle de puissance active et réactive (Manwell, Stein et al. 1992).

Ce réglage permet d'utiliser des convertisseurs de puissance avec une puissance apparente égale à une fraction de la puissance du générateur. Cette caractéristique permet aux systèmes d'avoir un coût inférieur, mais limite en même temps la plage de vitesse du générateur en fonction de la puissance nominale du convertisseur (Pena, Cardenas et al. 2009). Le dimensionnement des convertisseurs doit être fait en tenant compte du besoin de variation de vitesse en fonction de la variation de la charge du système. Traditionnellement, la puissance du convertisseur est choisie autour de 30% de la puissance nominale du générateur. Le fonctionnement du système de génération, au-dessus ou en dessous des limites, implique la présence d'harmoniques indésirables dans le système (Manwell, Stein et al. 1992).

Un autre inconvénient de cette configuration est sa grande sensibilité aux variations de tension du réseau électrique, telles que les creux de tension par exemple (Morren and Haan 2005). Une façon d'améliorer la supportabilité aux creux de tension et de protéger le DFIG, très discutée dans les études est l'utilisation du dispositif à crowbar (Morren and Haan 2005, Anaya-Lara 2009). Ce dispositif est un circuit conçu pour protéger le convertisseur du rotor contre les surintensités qui se produisent à partir des transitoires de tension dans le stator (Morren and Haan 2005). Il peut être constitué d'un banc de résistances triphasé ou d'un pont redresseur à thyristors et d'une résistance de charge (Seman, Niiranen et al. 2006, Zhou and He 2007).

#### 1.3.1.3 Générateur synchrone à aimant permanent (Permanent Magnet Synchronous Generator - PMSG)

Les générateurs synchrones sont également utilisés dans les systèmes VSDG. La plupart des applications de ces générateurs avec moteur diesel utilisent un générateur synchrone à aimant permanent (PMSG). Ces générateurs sont plus performants que les machines synchrones classiques et plus simples, car ils ne nécessitent pas d'excitation extérieure (Sandra 2019). Son rotor à aimants permanents élimine les pertes Joule sur le rotor, atteignant ainsi des niveaux de rendement plus élevés (Kuchenbecker and Teixeira 2015).

De nombreuses études proposant différentes stratégies de contrôle de ces groupes électrogènes ont été menées afin d'améliorer l'efficacité du système (Bolognani, Venturato et al. 2000, Leuchter, Bauer et al. 2007, Koczara, Chlodnicki et al. 2008, Diaz, Silva et al. 2009, Lee, Lee et al. 2009, Chan, Wang et al. 2010, Iwanski 2011, Tibola, Hausen et al. 2015, Tibola, Lanzanova et al. 2015, Farhan, Wang et al. 2016, Gajewski and PifDkowski 2016, Tibola 2017). Dans ces études, le flux de puissance extrait du moteur à travers le générateur est contrôlé par le convertisseur électronique de puissance.

Dans l'étude (Bolognani, Venturato et al. 2000), le convertisseur de puissance est construit sur la base de la tension intermédiaire du circuit CC. La tension du générateur à fréquence et amplitude variables est redressée puis convertie en tension alternative. Ce concept est réalisé en appliquant plusieurs topologies différentes de redresseur et d'onduleur. Le convertisseur de puissance contrôle le courant redressé et ajuste ainsi le couple résistant produit par le générateur.

Dans l'étude (Tibola, Hausen et al. 2015), le GED se compose d'un moteur à combustion interne, d'un générateur synchrone à aimants permanents, d'un banc de batteries et des convertisseurs statiques, illustrés à la Figure 6.

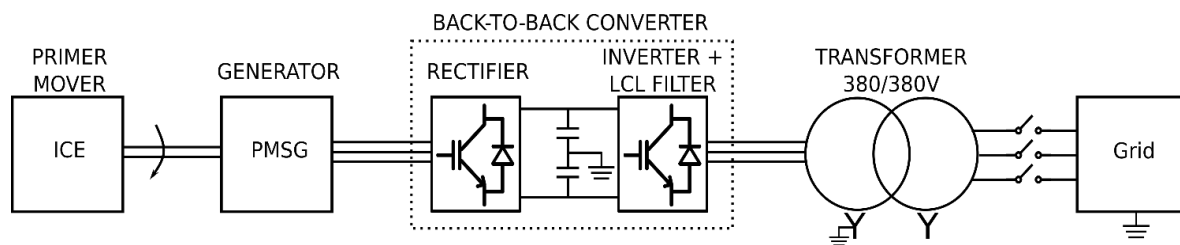


Figure 6 - Schéma de la technologie avec le générateur synchrone à aimant permanent (adaptée de (Tibola 2017))

Les courants des générateurs synchrones sont contrôlés par le redresseur. Toute l'électricité générée est transférée au bus CC, où sa tension est régulée par le convertisseur buck-boost, stockant ou supprimant l'énergie du groupe de batteries. L'énergie présente dans le bus CC est utilisée par l'onduleur pour répondre à la demande d'énergie de la charge. Le

convertisseur buck-boost est chargé de contrôler le courant de charge/décharge du groupe de batteries et également de réguler la tension du bus CC à partir du courant du groupe de batteries. Avec cet agencement, les batteries fonctionnent comme un tampon d'énergie entre le générateur et la charge de sortie. Ainsi, les transitoires de couple/vitesse inutiles sont évités au moteur, ce qui impliquerait généralement une plus grande consommation de carburant (Tibola, Hausen et al. 2015, Tibola 2017). La rotation du moteur à combustion interne, qui est directement couplé à la génératrice synchrone, est contrôlée par un système d'injection en boucle fermée afin de suivre une référence de vitesse optimale (Tibola, Lanzanova et al. 2015).

Dans l'étude (Farhan, Wang et al. 2016), le problème de ralentissement du comportement dynamique du moteur, face aux variations brutales de puissance, est compensé par l'inclusion de supercondensateurs dans le bus CC, réduisant également les émissions de polluants et la consommation de carburant.

Étant donné que toute l'énergie électrique dans les PMSG est générée à une fréquence variable, proportionnelle à la vitesse mécanique du moteur diesel, un convertisseur de pleine puissance (full power converter - FPC) est requis. Bien que ces composants soient plus chers et présentent des pertes électriques plus importantes que les convertisseurs partiels utilisés dans un DFIG, il est à noter que l'utilisation d'un FPC permet un découplage complet par rapport au réseau, assurant une moindre sensibilité du système de génération à perturbations dans le réseau externe au système. Un inconvénient des systèmes de génération basés sur PMSG est le coût de fabrication de la machine synchrone. Ce coût est élevé en raison de la complexité de construction de la machine qui doit maintenir l'entrefer entre le stator et le rotor petit, même avec des machines de plusieurs mètres de diamètre, également parce que les aimants en terres rares ont une grande volatilité des prix, et certains éléments sont très sensibles à la corrosion ou sensibles à la chaleur, avec possibilité de perte permanente de champ magnétique ou d'inversion de polarité (Tibola 2017).

### **1.3.2 Transmission à variation continue (Continuously Variable Transmission - CVT)**

L'application de la CVT aux générateurs à vitesse variable apparaît comme une alternative économique aux systèmes d'alimentation électronique pour les équipements de petite et moyenne taille (Issa and Ilinca 2020). La possibilité d'incorporer des générateurs à induction à cage d'écuréuil, connus pour leur faible coût et leur grande fiabilité, rend cette configuration encore plus attractive économiquement (Chen and Sung 2000).

Dans le système de transmission à variation continue CVT, un nombre infini d'interfaces de transmission est possible (Chen and Sung 2000). Cette technologie a été initialement appliquée aux systèmes de transmission automobile apportant comme avantage la transition en douceur entre les relations et en réduisant la fatigue des composants mécaniques et l'augmentation des performances du moteur. En raison du type d'application, de l'amplitude du couple et de la vitesse impliquée, il existe des configurations variées de la CVT. Elles sont généralement classées selon les éléments de transmission utilisés comme tores, sphères, courroies et chaînes (Chen and Sung 2000).

L'application de la CVT dans les systèmes de production d'énergie électrique est essentiellement motivée par l'augmentation de la plage de rotation du rotor, permettant de fonctionner à une vitesse de plus grande efficacité pour le GED en raison de la variation de la charge, sans changer la vitesse synchrone du générateur. Les groupes électrogènes connectés au réseau qui utilisent la CVT peuvent avoir une économie de carburant jusqu'à 27 % (Meiners 2013). Cette caractéristique améliore l'application de la CVT dans les générateurs à haute fiabilité tels que les générateurs synchrones à aimant permanent et asynchrones à induction, avec rotor à cage, présentant des avantages tels que des coûts de maintenance réduits et l'absence de l'électronique de puissance (Cotrell 2005). La Figure 7 indique le schéma du GED développé avec un système CVT proposé. La variation de la vitesse du moteur diesel dans ce GED dépend de la flexibilité de la CVT et de la demande électrique.

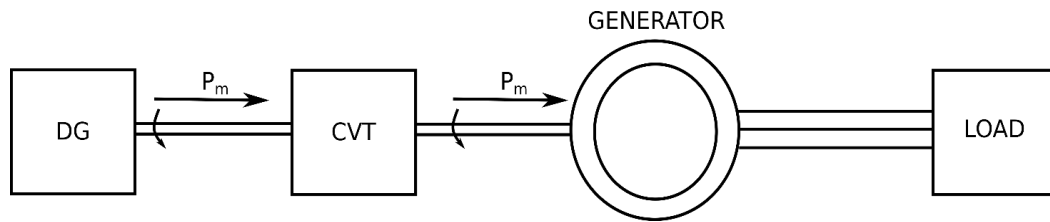


Figure 7 - Schéma du groupe motopropulseur utilisant la technologie CVT.

S'agissant d'une solution mécanique, cette technologie ne comporte pas de stratégies de contrôle qui contribuent à l'amélioration de la qualité de l'électricité produite. Cependant, comme il n'utilise pas d'électronique de puissance, il n'injecte pas non plus d'harmoniques dans le système.

Parmi les avantages de cette technologie figure une faible complexité du système de contrôle (CVTCORP). Cette caractéristique rend cette technologie idéale pour les systèmes isolés qui alimentent de petites communautés ou lorsque le temps de fonctionnement à faible charge représente une grande partie du temps de fonctionnement de la machine. Elle est également utilisée dans les applications connectées au réseau électrique dont le but est de réguler la fréquence et d'augmenter la stabilité (Meiners 2013).

### 1.3.3 Comparaison des technologies VSDG selon les applications possibles

Comme discuté dans la section précédente, les principales technologies étudiées présentent chacune, ses avantages et ses inconvénients. On ne peut pas généraliser en choisissant l'un d'eux comme la meilleure technologie de groupe électrogène diesel fonctionnant à vitesse variable. Les différentes applications qui utilisent VSDG doivent être considérées en fonction des caractéristiques de chaque système spécifique.

Parmi les principales caractéristiques à considérer pour la sélection de la technologie VSDG la plus appropriée, il est nécessaire d'analyser si le GED est connecté au réseau électrique, s'il fonctionne de façon isolée ou s'il fait partie d'un système de génération hybride, combiné avec des sources d'énergie renouvelables. Il est également important de connaître

les caractéristiques de la charge, telles que la variation de vitesse, les niveaux de fonctionnement, les périodes de pointe et de faible charge, par exemple.

La qualité de l'alimentation fournie au consommateur est une caractéristique importante qui est étroitement surveillée par les gestionnaires d'un système électrique. Des limites sur les valeurs de tension et de fréquence sont imposées afin d'assurer le bon fonctionnement du système et la qualité de la puissance fournie. Un système de conversion d'énergie utilisant un GED peut à la fois être générateur de perturbations dans le réseau électrique, provoquant des phénomènes de qualité de l'énergie tels que des fluctuations de tension (flicker), des distorsions harmoniques, entre autres, et il peut également subir l'effet de perturbations existant dans le réseau électrique. L'effet des creux de tension momentanés dans les systèmes de production se distingue selon les différents phénomènes produits (Morren and Haan 2005).

Les distorsions harmoniques sont un problème pour les technologies qui utilisent des convertisseurs de fréquence dans leur opération de commutation. Pour les DFIG, qui utilisent des convertisseurs alimentant le circuit rotorique, seule une petite partie de la puissance (environ 1/3 de la puissance totale du Genset) passe par les convertisseurs (Morren and Haan 2005, Anaya-Lara 2009), tandis que dans les PMSG, qui utilisent des convertisseurs statoriques, toute la puissance passe par les convertisseurs (Tibola 2017). Ainsi, dans la technologie qui utilise des convertisseurs à pleine puissance, l'impact causé par les distorsions harmoniques est plus important, par rapport à la technologie du DFIG, pour la même puissance générée.

La commande de l'onduleur utilisant la modulation de largeur d'impulsion a pour objectif principal de minimiser les distorsions aux basses fréquences. L'utilisation du PWM fait que les fréquences de distorsion les plus importantes se situent dans la région des multiples de la fréquence de commutation, minimisant ainsi les coûts avec les filtres, qui peuvent avoir des fréquences de coupe plus élevées. Normalement, sont utilisés des filtres série L, des filtres série-parallèle LC ou LCL ou des filtres accordés sur des fréquences proches de la fréquence de commutation. Ces filtres sont indispensables pour minimiser la



pénétration des harmoniques de l'ordre de la fréquence de découpage et de ses multiples dans le réseau électrique aux valeurs admises pour l'alimentation. Malgré cette caractéristique, les technologies VSDG, qui utilisent des convertisseurs de puissance, sont aujourd'hui les solutions les plus répandues. Elles sont présentes dans des applications connectées au réseau (Morren and Haan 2005, Anaya-Lara 2009) ou dans des régions isolées (Kawabata, Morine et al. 2001, Peña, Cárdenas et al. 2005, Leuchter, Bauer et al. 2007, Lee, Lee et al. 2009, Farhan, Wang et al. 2016). Ces technologies sont largement étudiées et de nombreux projets développent des stratégies de contrôle afin d'assurer la meilleure efficacité de ces systèmes, et en ayant la plus faible consommation de carburant.

Un creux de tension momentanée peut être causé par des courts-circuits, des surcharges et le démarrage de gros moteurs. Comme critère de raccordement d'un système de production face à un défaut dans le système de transmission, les exploitants de systèmes électriques utilisent le RTF (ride-through fault capability), c'est-à-dire la capacité du générateur de rester connecté au réseau lors des baisses de tension momentanées au point de raccordement. Les DFIG sont très sensibles aux perturbations du réseau électrique. Ainsi, de nombreuses études sont menées afin de définir des stratégies de contrôle pour résoudre ce problème (Morren and Haan 2005).

Pour les petites communautés situées dans des régions isolées, où la fluctuation de charge est faible, la solution la plus réalisable serait l'utilisation d'un système de production qui fournit de l'électricité de manière fiable avec la plus faible complexité de contrôle et à un faible coût initial. Dans ce cas, la CVT se présente comme étant une bonne solution. L'inconvénient de cette technologie, par rapport à d'autres qui utilisent l'électronique de puissance, est qu'elle ne peut pas être appliquée sur les systèmes de plus de 200 kW et doit être remplacé en cas de panne (Cotrell 2005).

Pour les systèmes, qui fonctionnent de façon isolée avec de grandes fluctuations des charges électriques, il est nécessaire d'utiliser un système de compensation capable d'éviter la pollution harmonique. Dans de tels cas, l'utilisation du PMSG, équipé de supercondensateurs comme décrits dans (Lee, Lee et al. 2009), est indiquée. Ce système

nécessite cependant un investissement initial élevé (Lee, Lee et al. 2009). Les générateurs à induction à rotor bobiné ne sont pas recommandés dans ces systèmes s'ils présentent une grande fluctuation de la charge électrique. Puisque le système d'excitation est directement contrôlé par l'onduleur qui a une capacité limitée, des changements soudains aux bornes du stator peuvent ruiner l'enroulement du rotor (Kawabata, Morine et al. 2001, Kawabata, Oka et al. 2004). Ces générateurs sont davantage recommandés pour les systèmes à faible variation de charge ou dans les applications où ils sont combinés avec d'autres sources d'énergie renouvelables (Kawabata, Morine et al. 2001, Kawabata, Oka et al. 2004). Le schéma ci-dessous, Figure 8, montre la quantité des références utilisées dans l'élaboration de cette étude selon la principale source d'énergie utilisée pour produire de l'électricité. Comme ce travail traite des technologies appliquées au moteur diesel, la plupart des références utilisent le diesel comme source principale, mais actuellement les systèmes de génération hybrides ont été une alternative largement utilisée pour combiner la fiabilité et la stabilité élevées du diesel avec des sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie éolienne et photovoltaïque.

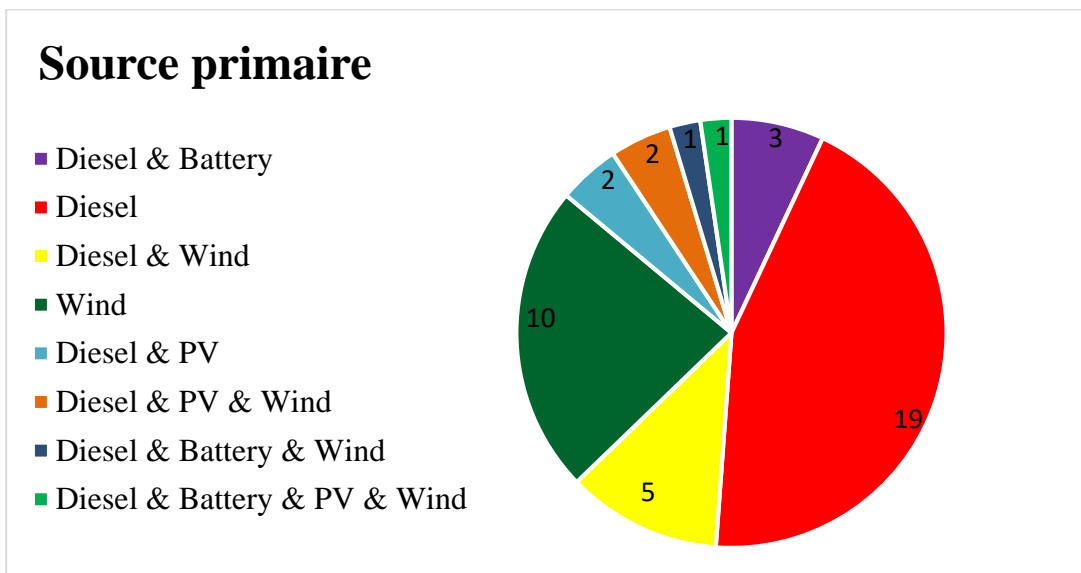


Figure 8 - Classification des références utilisées dans ce chapitre selon la source primaire d'énergie.

Le Tableau 1 ci-dessous résume les principaux aspects abordés dans cette session, mettant en évidence les études de technologies, le scénario d'application le plus approprié, les avantages et les inconvénients de chacune d'entre elles.

Tableau 1 - Scénario d'application le plus approprié, avantages et inconvénients des technologies sélectionnées.

<b>Technologies</b>	<b>Scénario d'application le plus approprié</b>	<b>Avantages</b>	<b>Limitations</b>
<b>Générateur d'induction à rotor bobiné</b>	Pour les systèmes qui fonctionnent isolés avec une faible variation de charge.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Technologie très étudiée et bien consolidée sur le marché.</li> <li>- Nécessite un convertisseur de faible puissance.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réponse dynamique lente qui ne peut pas résister aux changements brusques du système électrique.</li> <li>- Distorsion harmonique.</li> </ul>
<b>Générateur à induction à double alimentation (DFIG)</b>	Pour les systèmes connectés au réseau électrique.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Technologie très étudiée et bien consolidée sur le marché.</li> <li>- Nécessite un convertisseur de faible puissance.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les DFIGs sont très sensibles aux perturbations du réseau électrique.</li> <li>- Distorsion harmonique.</li> </ul>
<b>Générateur synchrone à aimant permanent</b>	Pour les systèmes qui fonctionnent isolés avec de grandes fluctuations des charges électriques.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Technologie très étudiée et bien consolidée sur le marché.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'impact causé par les distorsions harmoniques est plus important pour la même puissance générée en DFIG.</li> </ul>
<b>Transmission à variation continue (CVT)</b>	Pour les petites communautés situées dans des régions isolées, où la fluctuation de charge est faible.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fournit un rapport de démultiplication illimité.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ne peut pas être appliqué sur les systèmes de plus de 200 kW.</li> <li>- Doit être remplacé en cas de panne</li> </ul>

### 1.3.4 Conclusion

Les systèmes de production d'électricité fonctionnant à vitesse variable présentent de nombreux avantages par rapport aux systèmes fonctionnant à vitesse fixe. Le plus grand avantage est l'opération avec une meilleure efficacité, ce qui conduit à la réduction de la consommation de carburant et par conséquent à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et de particules polluantes.

Différentes technologies permettent au groupe électrogène diesel de fonctionner à vitesse variable en fonction de la variation de la charge électrique. Les technologies les plus populaires utilisent l'électronique de puissance pour contrôler la vitesse. Une autre technologie propose une solution mécanique pour faire varier la vitesse de rotation du moteur diesel.

Chacune de ces technologies a ses avantages et ses inconvénients. Or, aucune de ses technologies puisse se distinguer favorablement. Le choix dépend entre autres des facteurs tels que le coût de l'investissement initial, des fluctuations de la charge (lentes, rapides, soudaines, petites et/ou grandes), et de la procédure adoptée pour l'exploitation du système (connecté au réseau ou site isolé), ainsi de la complexité du système de contrôle et de la fréquence de maintenance des machines.

Le prochain chapitre présente une nouvelle technologie de générateur fonctionnant à vitesse variable, connu sous le nom de Genset-Synchro. Il s'agit d'une solution électromécanique originale basée sur la rotation du stator dans le sens inverse du rotor en fonction de la demande de charge appliquée.

## **CHAPITRE 2**

### **LE GÉNÉRATEUR DIESEL À STATOR ROTATIF : LE GENSET-SYNCHRO**

#### **2.1 INTRODUCTION**

La technologie Genset-Synchro introduit un nouveau concept de générateur électrique fonctionnant à vitesse variable et à fréquence fixe. Des travaux récents, (Mobarra, Issa et al. 2019, Issa and Ilinca 2020, Mobarra, Tremblay et al. 2020), ont montré que cette technologie apporte des avantages importants en terme de la réduction du carburant et des GES, une fois jumelée à un moteur diesel et alimentant des systèmes hors réseau..

Le Genset-Synchro est un alternateur à double rotor qui pourra être appliqué dans les régions isolées sur la génératrice existante sans recours à la modification du bloc moteur diesel. La principale différence de cette technologie est le fait qu'elle permet le fonctionnement optimal du moteur diesel en fonction de la valeur de la charge connectée, sans utiliser l'électronique de puissance sophistiquée ou la transmission variable compliquée [référence : patente]. L'alternateur Genset-Synchro assure une économie allant jusqu'à 15% lorsque la charge appliquée est au-dessous de 40% de la capacité nominale du générateur (Mobarra, Issa et al. 2019, Issa and Ilinca 2020, Mobarra, Tremblay et al. 2020) et une réduction moyenne de 7% pour les émissions polluantes (Issa and Ilinca 2020). Malgré son avantage, la présence des balais dans l'alternateur nécessite une maintenance fréquente et sa puissance maximale est limitée à 85%, due à l'alimentation du moteur de compensation entraînant le stator (Mobarra, Issa et al. 2019, Issa and Ilinca 2020, Mobarra, Tremblay et al. 2020).

L'objectif de ce chapitre est de décrire la nouvelle technologie électrique Genset-Synchro, de présenter sa conception mécanique et électrique, son principe de fonctionnement, les systèmes de contrôle déjà développés pour la variation de la vitesse et son impact sur la consommation du carburant lorsqu'elle est intégrée sur un GED.

## 2.2 CONCEPTION MÉCANIQUE ET ÉLECTRIQUE DU GENSET-SYNCHRO

Développé par l'entreprise Fiset Inc à Lévis, Québec, Canada, la technologie Genset-Synchro présente, comme principaux composants, un alternateur synchrone, un moteur compensateur (machine asynchrone) et un système de transmission mécanique comme montré dans la Figure 9.

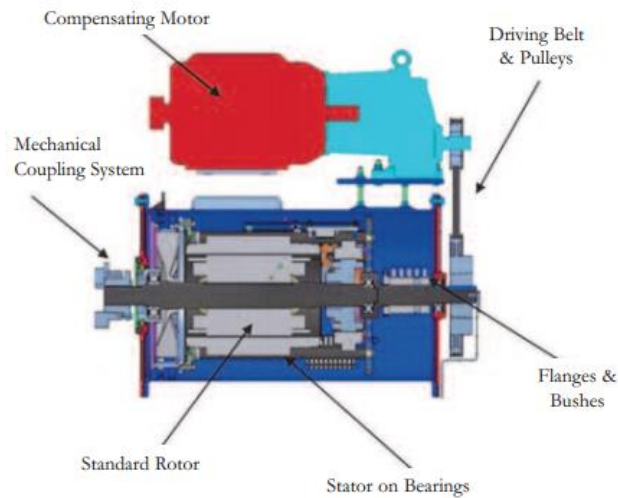


Figure 9 - Principaux composants de la technologie Genset-Synchro (Issa and Ilinca 2017).

L'alternateur synchrone est la machine chargée de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique. Contrairement à la machine synchrone classique, l'alternateur Genset-Synchro possède un stator mobile et ses enroulements peuvent tourner autour du même axe que le rotor. Ceci est possible, car l'alternateur a été modifié et plusieurs rangées de roulements sont installées entre le stator et la carcasse extérieure de la génératrice pour permettre sa rotation indépendante. Ces roulements ont un frottement minimal entre les deux parties mobiles. Il est important de mentionner que les enroulements, les connexions du rotor et du stator restent les mêmes que dans un générateur conventionnel (Fiset 2010).

Le moteur compensateur (anglais : compensating motor - CM) est fixé sur le dessus du boîtier de l'alternateur à l'aide de moyens d'assemblage constitués d'équerres et de boulons de sorte que l'arbre de sortie du CM soit aligné parallèlement à l'arbre du stator de

l'alternateur synchrone. L'arbre de sortie du CM et l'arbre du stator sont reliés au système de transmission mécanique. Ce système se compose d'une poulie, d'une courroie de distribution et d'une petite boîte de vitesses mécanique. La boîte de vitesses permet de relier facilement l'arbre CM à la courroie de distribution et d'ajuster la vitesse du stator à la valeur souhaitée (Fiset 2010).

### **2.3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU GENSET-SYNCHRO**

Les génératrices d'énergie électrique doivent fournir une tension à fréquence fixe, normalement 50 Hz ou 60 Hz. Dans un groupe électrogène diesel conventionnel, le rotor de la machine synchrone est directement connecté au vilebrequin du moteur diesel qui, lui doit tourner à une vitesse constante pour fournir une fréquence constante. La vitesse rotationnelle est une fonction du nombre de pôles de la machine synchrone et de la fréquence désirée. Généralement, pour une machine de 2 paires de pôles, on a 1500 tr/min pour 50 Hz ou 1800 tr/min pour 60 Hz, quelle que soit la puissance demandée.

$$n = \frac{f * 60}{p} \quad (3.1)$$

n est la vitesse de rotation du rotor, f est la fréquence de la tension fournie et p est le nombre de paires de pôles.

Le générateur synchrone doit tourner à sa vitesse synchrone pour produire la qualité de puissance requise lorsqu'il fonctionne à faible ou à pleine charge. L'utilisation continue d'un moteur fonctionnant à vitesse fixe à faible charge peut entraîner une diminution de ses performances, une plus grande émission de polluants, une consommation de carburant excessive et même occasionner des dommages importants, réduisant la durée de vie des moteurs. L'oscillation de la demande de charge électrique affecte aussi la qualité de l'énergie et augmente la consommation de carburant, car le GED n'est pas en mesure de suivre ces oscillations (Rogers 1996).

La caractéristique distinctive de la technologie Genset-Synchro est que la vitesse synchrone de l'alternateur peut être obtenue à partir d'une combinaison de la vitesse du rotor et de la vitesse du stator. En effet, le stator de cette génératrice n'est pas fixe, il peut tourner librement autour du même axe que le rotor. Le stator peut tourner dans le même sens ou dans le sens opposé au rotor. La vitesse synchrone sera la vitesse relative entre les deux composants (Issa and Ilinca 2017). Ainsi, lorsque la charge diminue, le moteur diesel décélère pour fonctionner au meilleur rendement énergétique, ralentissant ainsi le rotor de l'alternateur. La vitesse synchrone peut être atteinte avec juste un mouvement du rotor, juste un mouvement du stator ou en ajoutant le mouvement du stator à la vitesse du rotor, comme décrit dans l'équation suivante :

$$n_{synchrone} = n_{rotor} + n_{stator} \quad (3.2)$$

Le moteur compensateur est responsable du contrôle de la vitesse du stator (Issa and Ilinca 2017). Grâce aux poulies et à la courroie de distribution, le CM applique une force dynamique pour faire tourner le stator dans la direction et la vitesse souhaitées. La boîte de vitesses mécanique qui relie le CM au stator de l'alternateur peut être ajustée en fonction de l'efficacité de vitesse optimale du moteur diesel. Le CM est alimenté par l'alternateur lors de la connexion à faible charge. Ainsi, la petite fraction d'énergie produite par le Genset-Synchro est consommée par lui-même. Enfin, cette technologie permet au moteur diesel de réduire la vitesse à son régime idéal, tandis que la vitesse globale de l'alternateur est maintenue constante à l'aide du CM.

Cette idée intéressante diminue les frais de maintenance et réduit les contraintes mécaniques sur le système de vilebrequin du moteur diesel, prolongeant ainsi sa durée de vie, et, en plus, réduit la consommation de carburant et par conséquent l'émission de gaz à l'effet de serre (Issa 2019). Cependant, l'alternateur, une génératrice synchrone à aimants permanents, possède des balais sur le rotor, ce qui demande un entretien constant (Sandra 2019).



La Figure 10 illustre le prototype du générateur Genset-Synchro connecté à un moteur diesel.

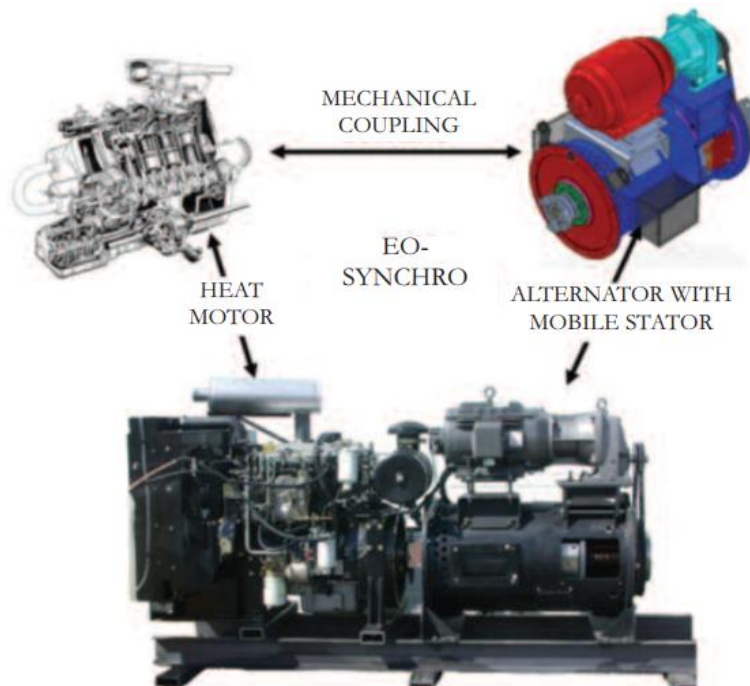


Figure 10 – Prototype de l’alternateur Genset-Synchro couplé à un moteur diesel (Issa and Ilinca 2017)

Un avantage de l’application Genset-Synchro est qu’elle est entièrement indépendante du mécanisme d’entraînement. Elle s’adapte à tout type de contrôle de vitesse de rotor et s’intègre à tout type d’unité de production d’énergie (moteur à combustion, éolien, turbine hydraulique, turbine à gaz, etc.) (Issa and Ilinca 2020).

Un inconvénient est que la puissance fournie est limitée à 85 % de la puissance nominale du générateur synchrone, car une partie de l’énergie générée est utilisée pour alimenter le CM (Issa 2018).

La Figure 11 illustre le schéma de la technologie étudiée.

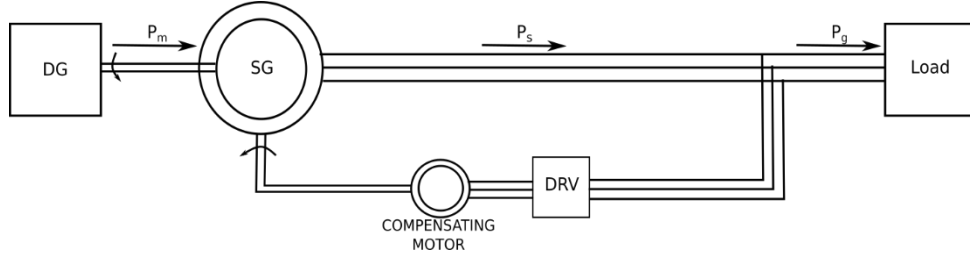


Figure 11 – Schéma du générateur diesel avec le Genset-Synchro

En considérant deux niveaux de charge fixes et en utilisant une vitesse différente pour chacun de ces niveaux, les premières études réalisées sur ce générateur ont prouvé son efficacité en termes de consommation de carburant (Issa and Ilinca 2017, Issa 2018). Pour réaliser une économie de carburant en utilisant la technologie Genset-Synchro, les travaux développés antérieurement (Issa 2018, Issa 2019), suggèrent la réduction du régime du moteur diesel de 1800 à 1500 tr/min en opération à faible charge. La vitesse synchrone est atteinte par la rotation du stator dans le sens inverse du rotor (300 tr/min) afin de maintenir une fréquence fixe de 60 Hz.

Pour automatiser le contrôle de la vitesse du stator et optimiser l'efficacité énergétique du système, d'autres études ont développé un système de contrôle pour faire varier la vitesse du CM en fonction de la charge (Issa, Lepage et al. 2019, Mobarra, Tremblay et al. 2020). La section suivante présente les systèmes proposés.

## 2.4 SYSTÈMES DE CONTRÔLE DE VITESSE DU GENSET-SYNCHRO

Généralement, comme le montre le chapitre 2 de ce travail, les générateurs qui fonctionnent à vitesse variable utilisent une électronique de puissance ou un système de transmission en continu afin de faire varier la vitesse de rotation du moteur diesel en fonction de la demande de charge, permettre le système de production d'électricité d'opérer dans son point d'efficacité maximale.

L'un des avantages du Genset-Synchro, mis en évidence dans des travaux antérieurs (Mobarra, Tremblay et al. 2020), est que pour générer de l'énergie à vitesse variable, il n'utilise pas d'électronique de puissance ni de système de transmission mécanique complexe,

et à un prix élevé. De même le réglage de la vitesse se fait manuellement au démarrage du générateur. Cependant, pour un GED fonctionnant de manière autonome, la présence d'un système de contrôle automatique de la vitesse, en fonction de la demande de charge, est importante afin d'assurer un meilleur rendement énergétique, puisque la charge a un comportement dynamique.

#### **2.4.1 Carte DSP TMS320F28335**

Un système de contrôle basé sur l'utilisation d'un variateur de fréquence pour entraîner le CM est proposé en (Issa, Lepage et al. 2019). Ce CM, comme détaillé dans la section précédente, est responsable de la rotation du stator de l'alternateur. L'algorithme de commande est inséré dans une carte DSP (anglais : Digital Signal Processor) TMS320F28335 fabriqué par Texas Instrument. Un processeur de signaux numériques (DSP) a été choisi, car il offre une vitesse élevée, une haute résolution et un meilleur contrôle des moteurs à induction dans différentes conditions de charge.

Pour mesurer la vitesse du moteur, un capteur magnétique est utilisé pour produire une forme d'onde de tension sinusoïdale. Ceci est converti en une onde carrée par un circuit de déclenchement de Schmitt tamponné. Une fonction de calcul de la période de ce signal carré est intégrée au compteur DSP. Le régime moteur mesuré est utilisé pour déterminer l'erreur de la valeur du régime moteur et le taux de variation de cette erreur.

Pour contrôler la vitesse de rotation du CM, l'algorithme de contrôle utilise l'erreur dans la valeur de vitesse de rotation du moteur en relation à une vitesse de référence prédéterminée, la variation de l'erreur de vitesse de rotation du moteur et la valeur moyenne de la tension triphasée redressée aux bornes du générateur. La figure 4 montre une représentation de cette stratégie de contrôle.

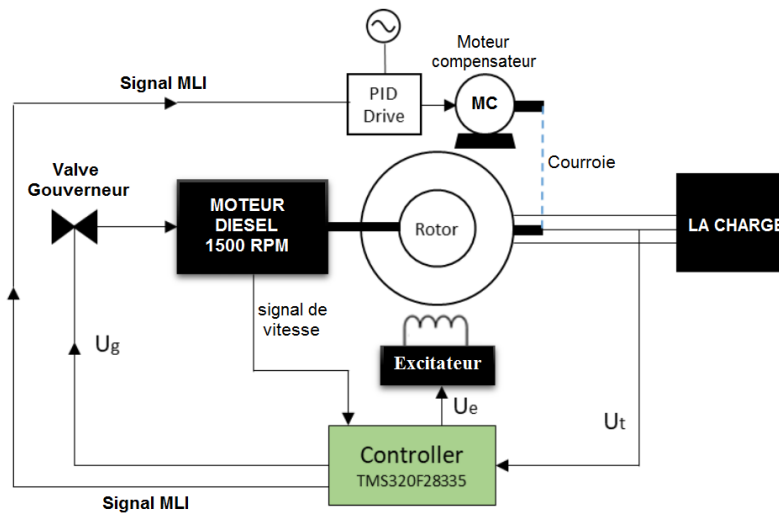


Figure 12 - Schéma de commande de vitesse en boucle fermée (Issa, Lepage et al. 2019)

L'utilisation de convertisseurs statiques permet l'automatisation du contrôle de la vitesse, améliorant l'efficacité énergétique, mais ajoute également quelques inconvénients au système de génération à vitesse variable. Comme évoqué au CHAPITRE 1 de ce travail, la présence de convertisseurs électroniques est associée à la présence d'harmoniques dans la tension fournie par le générateur, lesquelles sont causées par la commutation dans le convertisseur. Les dispositifs électroniques détériorent la qualité de puissance avec la présence des harmoniques élevées (Munir, Ghannam et al. 2019). Ces harmoniques peuvent perturber la mesure des variables d'état et occasionner également un effet sur l'échauffement du moteur (Issa and Ilinca 2020).

L'avantage de Genset-Synchro par rapport aux autres technologies qui utilisent des convertisseurs de puissance est que ces convertisseurs sont dimensionnés pour contrôler le CM, qui a une puissance égale à une fraction de la puissance nominale de l'alternateur. Comme la quantité d'harmoniques est proportionnelle à la puissance des convertisseurs, dans ce cas l'impact sera plus faible.

Le schéma du modèle développé, dans (Issa, Lepage et al. 2019), par Matlab/Simulink est illustré dans la Figure 13. Ce modèle consiste à simuler le temps nécessaire au CM pour assurer une vitesse de rotation du stator de 300 tr/min au démarrage avec une charge résistive

égale à 50 % de la puissance nominale du générateur et de 350 tr/min lorsque la demande de charge est supérieure à 50 % de la puissance nominale.

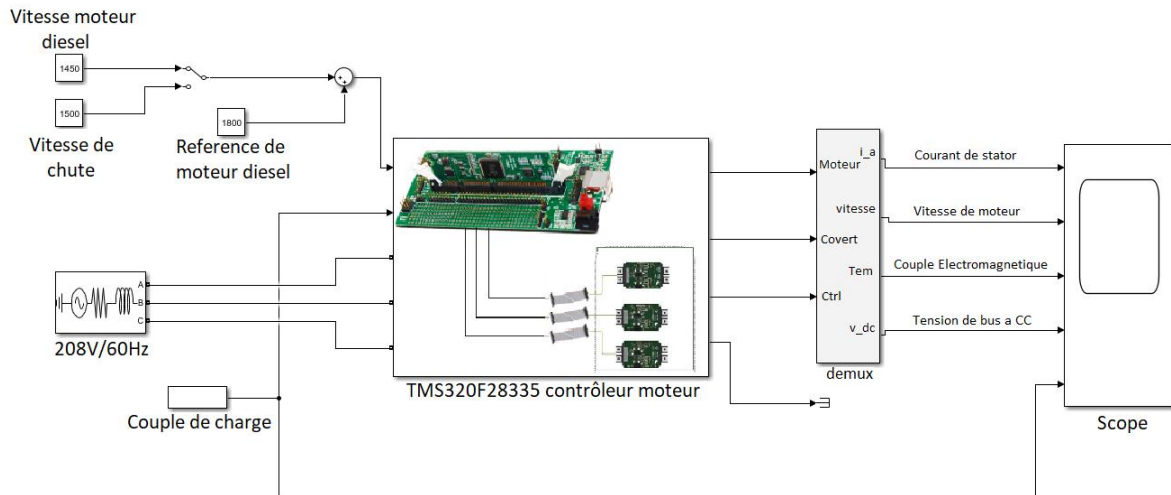


Figure 13 - Le modèle développé par Simulink (Issa, Lepage et al. 2019).

L'efficacité du système de commande basé sur l'utilisation de la carte DSP a été démontrée avec des résultats de simulations et des tests expérimentaux. La carte est utilisée avec une fréquence d'échantillonnage élevée pour permettre d'obtenir une bonne dynamique de réponse du système en fonction de la variation de la demande de charge (Issa, Lepage et al. 2019). Même si les résultats présentés démontrent que la stratégie de contrôle exposée satisfait la demande du générateur Genset-Synchro, des études plus récentes proposent une stratégie de contrôle utilisant également un variateur de fréquence, et une autre carte processeur de signal, le DSP FDRM-KL25Z. La section suivante décrit cette stratégie.

#### 2.4.2 Carte DSP TMS320F28335

En (Mobarra, Tremblay et al. 2020), le contrôle du moteur compensateur entraînant le stator du générateur est réalisé à l'aide d'un variateur de fréquence qui adapte la vitesse à sa valeur optimale en fonction de la demande de charge. La performance de la stratégie de contrôle proposée a été testée à l'aide d'une carte à microcontrôleur Freescale programmée en code C pour déterminer la tension appropriée pour le variateur de fréquence. L'algorithme

de contrôle utilise une application en temps réel implémentée sur une carte DSP FDRM-KL25Z.

Le projet, présenté dans (Mobarra, Tremblay et al. 2020), développe une méthode fiable et robuste pour contrôler la vitesse du CM. La variation de vitesse, en maintenant la fréquence constante, permet au moteur diesel de décélérer en période de faible charge, évitant ainsi la production de couple mécanique inutile. Les bornes du moteur ont été connectées au microcontrôleur à l'aide du VFD (anglais : Variable Frequency Drive). Un onduleur est utilisé pour envoyer les signaux de commande de la carte à microprocesseur au CM.

Comme déjà mentionné dans la section précédente, l'avantage de cette application, par rapport aux autres technologies qui utilisent des convertisseurs de puissance, est que le convertisseur contrôle le CM qui a une puissance inférieure à la puissance de l'alternateur. Par conséquent, l'impact de la présence de ces équipements électroniques sur la qualité de l'énergie, notamment en ce qui concerne la génération d'harmoniques, sera également plus faible. Il est également important de noter que la capacité réduite du convertisseur de puissance, dans cette application, ne limite pas la variation de vitesse comme c'est le cas pour DFIG (Morren and Haan 2005), car il contrôle le CM et non l'alternateur. La Figure 14 illustre la configuration du générateur diesel à vitesse variable avec système de contrôle automatisé par la carte DSP FDRM-KL25Z (Mobarra, Tremblay et al. 2020).

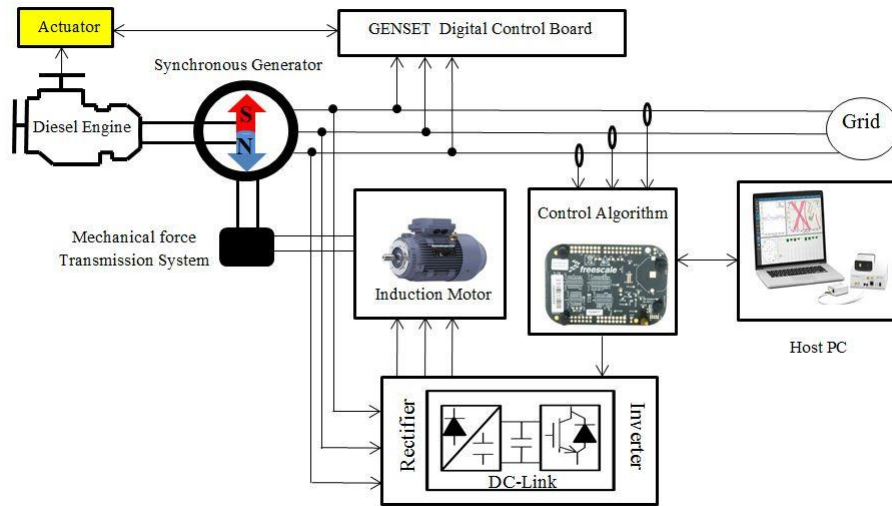


Figure 14 - Configuration du générateur diesel à vitesse variable avec système de contrôle automatisé par la carte DSP FDRM-KL25Z (Mobarra, Tremblay et al. 2020).

Comme souligné dans le schéma ci-dessus, la carte de commande a, comme données d'entrée, les valeurs de tension et de courant fournies par les capteurs installés dans la sortie de l'alternateur et est également connectée à un ordinateur hôte. Les signaux d'entrée sont transformés en signaux de tension avant d'être traités par l'algorithme. La puissance instantanée de la charge est calculée à partir des valeurs de tension et de courant fournies par les capteurs. L'ordinateur hôte envoie des commandes de contrôle à la carte du microcontrôleur. L'algorithme de contrôle traite les signaux d'entrée et produit des signaux appropriés pour le convertisseur de puissance, en fonction de la consommation instantanée du réseau électrique. Enfin, le convertisseur envoie le signal de puissance au CM, contrôlant ainsi sa vitesse de rotation en fonction de la valeur de puissance instantanée de la charge. Un avantage d'un tel contrôleur est la réponse rapide du moteur et la sortie de couple électrique élevée.

Trois niveaux de puissance de charge différents ont été établis et, pour chacun d'eux, la vitesse de fonctionnement idéale a été définie. Ainsi, l'algorithme développé permet le fonctionnement avec le moteur diesel à 1200 tr/min, 1500 tr/min ou 1800 tr/min, selon la valeur de demande de charge. Le CM compense la vitesse du moteur diesel afin que le générateur fonctionne toujours à une vitesse synchrone.

Un banc d'essai a été développé dans (Mobarra, Tremblay et al. 2020) pour valider l'algorithme présenté. La Figure 15 illustre ce banc d'essai. Pour les essais expérimentaux, une génératrice synchrone a été connectée, en tant que charge mécanique, à un moteur à induction (CM), remplaçant le stator rotatif. En modifiant la charge électrique connectée à la génératrice synchrone, la charge mécanique appliquée à l'arbre CM variait. Le CM était équipé d'un enroulement de rotor amortisseur pour limiter la tension induite et augmenter le couple du moteur. Dans cette expérience, les charges électriques ont été modifiées manuellement pour voir la réaction des différents composants et surveiller simultanément le comportement du moteur et l'algorithme de régulation.

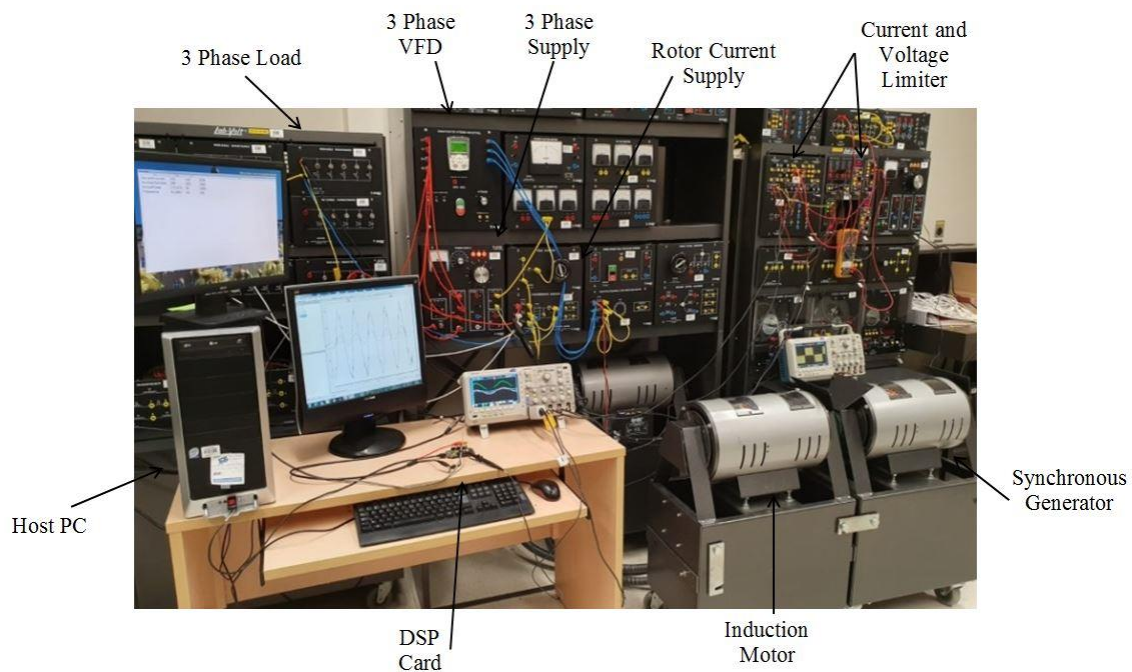


Figure 15 - Banc d'essai (Mobarra, Tremblay et al. 2020).

L'algorithme de contrôle présenté est efficace pour la variation de vitesse, présentant un temps de réponse rapide, bien adapté à la variation de la demande de charge, garantissant la qualité du courant sans l'utilisation d'une électronique de puissance complexe. Les principaux avantages de l'introduction d'une approche de contrôle avec la technologie Genset-Synchro sont le fonctionnement automatique du moteur diesel avec une plus grande



efficacité et la réduction de la consommation de carburant, réduisant ainsi les émissions de gaz à effet de serre. La section suivante présente cet aspect.

## **2.5 EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE ET ENVIRONNEMENTALE**

Les groupes électrogènes diesel sont conçus pour fonctionner avec une efficacité maximale pour répondre à des charges proches de leur puissance nominale. Lorsque la charge connectée au système est inférieure à 40 % de sa capacité nominale, on considère que le système fonctionne en régime de faible charge (Tufté 2014).

En général, les groupes électrogènes diesel, de secours et de démarrage, sont conçus pour fonctionner à une charge comprise entre 50 et 85 %, tandis que les groupes électrogènes diesel continus fonctionnent mieux à une charge comprise entre 70 et 100 % (Tufté 2014). Le fonctionnement prolongé des GED à faibles charges est un facteur majeur du vieillissement et de l'usure du système de combustion. Cela s'explique par le fait que dans un régime de faible charge, les résidus de combustion se condensent sur les parois des cylindres, ce qui, avec le temps, augmente les frottements, diminue le rendement du moteur, augmente la consommation de carburant et les émissions de polluants produites par kilowatt/heure (Tufté 2014, Issa, Ibrahim et al. 2020). En effet, le moteur diesel doit atteindre une température minimale pour fonctionner correctement, laquelle n'est pas atteinte avec une charge inférieure à celle spécifiée. Le graphique de la Figure 16 illustre la relation entre la consommation de carburant et la charge appliquée au GED (Ibrahim and Ilinca 2012).

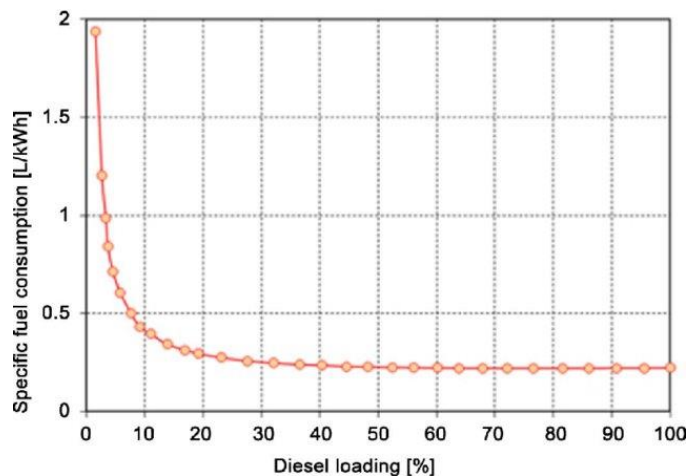


Figure 16 - Exemple de variation de la consommation de carburant diesel en fonction de la charge (Ibrahim and Ilinca 2012).

Le fonctionnement du GED à vitesse variable optimise les performances du système, en réduisant la vitesse de rotation du moteur diesel à sa vitesse nominale, en fonction de la variation de la demande de charge. En contrôlant la vitesse de rotation, la puissance au vilebrequin du moteur diesel est contrôlée, l'empêchant ainsi de produire un couple inutile à faible charge (Tufté 2014). Différentes études ont démontré l'efficacité du Genset-Synchro pour opérer le GED à vitesse variable (Mobarra, Issa et al. 2019, Issa and Ilinca 2020, Mobarra, Tremblay et al. 2020).

Parmi les avantages de l'application de la technologie Genset-Synchro dans les GED, la réduction de la consommation de carburant et la réduction des émissions de gaz à effet de serre se démarquent. La réduction de la consommation de carburant implique des économies considérables, diminuant le coût de l'électricité. Il est également important de réduire les émissions de gaz des moteurs diesel qui sont la cause du développement de diverses maladies cardiovasculaires et respiratoires, et qui contribuent davantage à la pollution de l'eau et des sols, en plus d'avoir un impact considérable sur le changement climatique mondial. Les résultats d'essais expérimentaux avec des GED de différentes puissances (75kW, 500kW, 600kW, etc.) ont montré que l'utilisation de Genset-Synchro entraîne une réduction potentielle en termes de consommation de carburant (Mobarra, Issa et al. 2019, Issa and Ilinca 2020).

C'est possible d'obtenir des économies de carburant jusqu'à 12%, pour un GED de 75kW, lorsque la charge appliquée est inférieure ou égale à 40% de la puissance nominale, tandis que cette économie est de 2 à 5% lorsque la charge appliquée est de 80% (Issa and Ilinca 2017), avec une réduction moyenne des émissions de gaz à effet de serre de 7,2 % (Issa 2018).

Dans (Issa 2019), une étude de cas sur l'application du Genset-Synchro, dans les communautés éloignées de la Baie James, dans le nord-ouest du Québec, montre une économie de 7 à 9 % sur la consommation de carburant et de gaz à effet de serre (GES), sous des températures ambiantes hivernales basses. La Figure 17 montre un banc d'essai pour une unité Genset-Synchro de 500 kW.

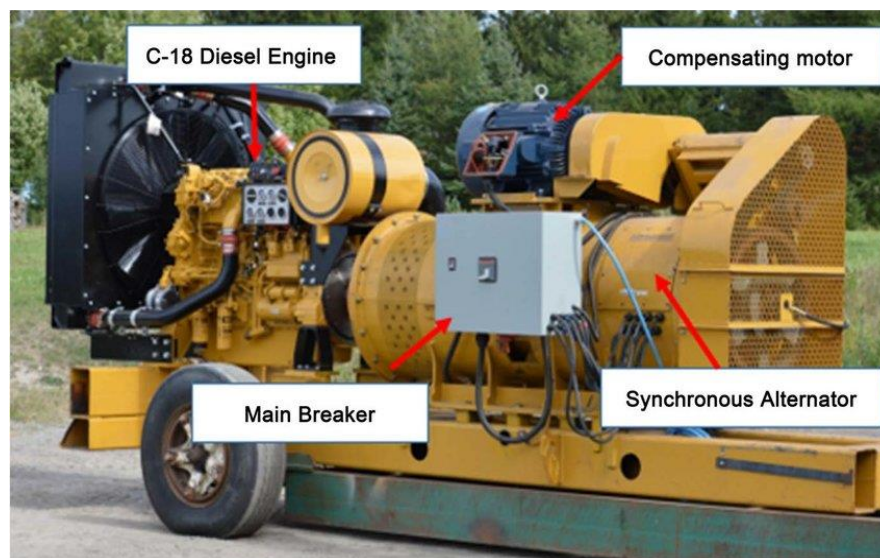


Figure 17 - Illustration de l'unité Genset-Synchro GS500X avec les principaux composants (Issa 2019)

Les tests ont été effectués pour différentes valeurs de charge électrique (25 %, 32 %, 40 % et 50 % de la capacité nominale), avec le stator tournant à différentes vitesses (280 tr/min, 340 tr/min et 415 tr/min). La Figure 18 montre les résultats de la comparaison de la consommation de carburant en fonction de la charge pour chacun des régimes étudiés et également avec le stator fixe. Notez que la meilleure économie de carburant se produit lorsque le stator tourne à 415 tr/min, avec une réduction moyenne de 22,2 grammes/kWh.

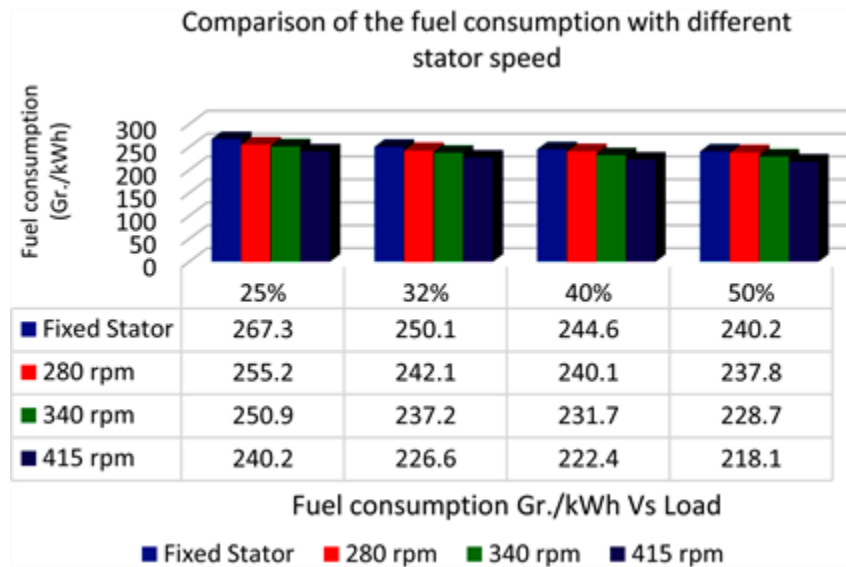


Figure 18 - Comparaison de la consommation de carburant avec différentes vitesses de stator Vs stator fixe à charges faibles et moyennes (Issa 2019).

L'étude (Issa 2019) évalue également les émissions de GES avec le stator fixe et le concept Genset-Synchro. L'analyseur de combustion (Testo 350) est utilisé pour évaluer le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), l'oxyde de soufre (SO<sub>x</sub>), l'oxyde d'azote (NO<sub>x</sub>) et les particules (PM). Le Tableau 2 montre la moyenne générale de réduction des GES lorsque le stator est utilisé à 415 tr/min par rapport au fonctionnement du stator fixe.

Tableau 2 - Moyenne globale de la réduction des GES avec une vitesse de stator de 415 tr/min (Issa 2019).

Charge (kW)	Différence de réduction d'émissions (%)			
	CO <sub>2</sub>	SO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	PM
<b>164</b>	10.08%	10.04%	10.18%	10.2%
<b>189</b>	6.98%	6.75%	7.37%	7.27%
<b>232</b>	8.97%	8.96%	9.02%	9.23%
<b>278</b>	9.86%	10.03%	9.69%	6.66%
<b>Moyenne</b>	8.97%	8.94%	9.065%	8.34%

D'autres études (Mobarra, Issa et al. 2019, Issa and Ilinca 2020) renforcent l'économie de carburant et la réduction des émissions de gaz à effet de serre liées à l'utilisation du Genset-Synchro. Une caractéristique observée montre que l'économie de carburant et la réduction

des émissions de gaz avec l'utilisation de Gesent-Synchro est plus faible à basse température (Issa and Ilinca 2020). En général, la consommation de carburant est plus élevée à basse température (Issa 2019). Des tests expérimentaux (Issa 2019) montrent qu'en utilisant le Gesent-Synchro même dans les régions extrêmement froides (-30 °C) comme dans la communauté isolée de la Baie James, l'économie sur la consommation de carburant est d'environ 12 500 litres pendant les 3 000 heures enregistrées dans l'étude, ce que représente 18 000 \$ CA d'économie sur la même période de l'année 2017-2018 (Issa 2019).

## 2.6 CONCLUSION

La technologie Gesent-Synchro a été développée dans le but de permettre aux groupes électrogènes de fonctionner à vitesse variable en fonction de la demande appliquée, et de travailler au meilleur rendement énergétique. L'innovation de cette technologie réside dans le fait que le stator de la machine synchrone est mobile, pouvant tourner autour du même axe du rotor de cette machine. Le sens et la vitesse de rotation du stator sont contrôlés par un moteur de compensation, qui est fixé à la partie supérieure du bâti de la génératrice synchrone.

Afin d'automatiser le contrôle de la vitesse du moteur diesel et du stator de l'alternateur, des algorithmes de contrôle ont été développés. Ce chapitre a présenté deux algorithmes qui utilisent deux cartes SPD différentes. Les deux utilisent des convertisseurs de puissance pour contrôler le CM. Comme ces convertisseurs ont une puissance équivalente au CM, les harmoniques introduites dans le système, en raison de la présence d'équipements électroniques, sont plus faibles par rapport aux autres technologies utilisant des convertisseurs de puissance. Comme les convertisseurs contrôlent le CM, un autre avantage est qu'en aient moins de puissance ne limite pas la plage de vitesse du moteur diesel. Les deux algorithmes présentés sont efficaces et robustes pour le contrôle de vitesse de Gesent-Synchro.

De nombreux travaux cités dans ce chapitre ont effectué des tests expérimentaux du Gesent-Synchro pour calculer la consommation de carburant et les émissions de GES. Il a

été démontré que l'utilisation de la technologie Genset-Synchro permet des économies de consommation de carburant allant jusqu'à 12% et une réduction des émissions de GES d'environ 7%. Cette caractéristique fait que la nouvelle technologie offre un retour économique important sur l'investissement initial pour sa mise en œuvre, lui permettant de concurrencer avec d'autres technologies conventionnelles telles que celles présentées dans (Issa 2019).

Malgré les différentes études réalisées sur la technologie Genset-Synchro, un modèle numérique complet de cette machine n'a pas encore été développé. Le développement de ce modèle permettrait une meilleure précision des impacts du mouvement du stator sur la qualité de l'énergie produite par le GED. Il permettrait également d'étudier l'application de cette technologie dans différents systèmes autonomes, comme les navires et les trains par exemple. Le chapitre suivant présentera la modélisation de la technologie Genset-Synchro sous Matlab/Simulink.

## **CHAPITRE 3**

### **MODÈLE MATHÉMATIQUE DE L'ALTERNATEUR DU GENSET-SYNCHRO**

#### **3.1 INTRODUCTION**

La technologie Genset-Synchro, considérée dans cette section, est composée de deux machines, une machine synchrone à aimants permanents chargée de transformer l'énergie mécanique fournie par le moteur diesel en énergie électrique, et une machine asynchrone, appelée moteur de compensation (CM). Ce CM est chargé de contrôler la vitesse du stator de la machine synchrone.

Le différentiel de la technologie Genset-Synchro est le stator rotatif du PMSG. Ce chapitre vise à développer le modèle PMSG considérant le mouvement du stator autour de l'axe du rotor. Dans un premier temps, le modèle mathématique du PMSG est présenté suivi par l'adaptation de ce modèle pour la génératrice Genset-Synchro.

#### **3.2 DESCRIPTION DE LA MACHINE SYNCHRONE À AIMANTS PERMANENTS**

La grande majorité des machines synchrones sont triphasées, c'est-à-dire qu'elles ont trois enroulements équilibrés et répartis symétriquement. Ces enroulements sont généralement situés dans le stator. Celui-ci est généralement constitué d'acier laminé afin de réduire les pertes dues à l'hystérésis et aux courants de Foucault, et comporte plusieurs rainures où les enroulements statoriques sont placés. La conception du stator vise à produire un flux magnétique avec une distribution spatiale aussi proche que possible de la sinusoïdale, afin d'obtenir des tensions pratiquement sinusoïdales dans le temps (Fitzgerald, Kingsley et al. 1990).

Les machines synchrones aux aimants permanents n'ont pas d'enroulements de rotor, mais des aimants sont placés sur le rotor et tournent avec lui (Sandra 2019). Ainsi, ces machines s'apparentent aux machines synchrones traditionnelles, à l'exception des enroulements rotoriques qui sont remplacés par des aimants permanents. Le rotor est

généralement en pôles lisses ou en pôles saillants. La Figure 19 montre le schéma d'une machine synchrone à aimant permanent.

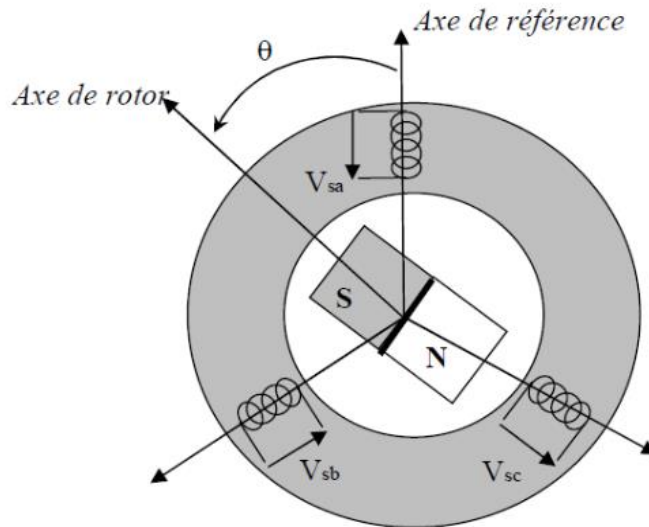


Figure 19 - Schéma d'une machine synchrone à aimant permanent (Bendaha 2015).

Les aimants permanents sont également connus sous le nom de matériaux magnétiques durs et se caractérisent par une induction résiduelle élevée et, par conséquent, par des valeurs de champ coercitif intrinsèques élevées. Les aimants les plus utilisés dans la fabrication des machines à induction à aimants permanents sont la Ferrite et, plus récemment, les aimants à haute énergie, également appelés aimants de terres rares, tels que le Samarium-Cobalt (SmCo) et le Néodyme-Fer-Bore (NdFeB) (Ferreira and Costa 2011).

En ce qui concerne la forme d'onde générée, les machines synchrones à aimants permanents sont classées en machines à ondes sinusoïdales et machines à ondes carrées (Fitzgerald, Kingsley et al. 1990).

Les machines à ondes sinusoïdales se caractérisent par des enroulements de stator répartis. La configuration du rotor est conçue de telle manière que le flux des aimants établit une densité de flux approximativement sinusoïdale. Par conséquent, contrairement aux moteurs à onde carrée, la tension induite dans chaque phase varie de manière sinusoïdale avec la position du rotor. Les modèles les plus utilisés sont de type aimant en surface ou



aimant totalement noyé dans le rotor. Son principe de fonctionnement est basé sur l'excitation simultanée des phases pour obtenir le champ tournant, ce qui fait que ce type de machine peut être analysé comme une machine synchrone à champ tournant classique (Sandra 2019).

Dans la machine à ondes carrées, les aimants sont en forme d'arc et couvrent  $180^\circ$  ou  $120^\circ$  électriques de l'entrefer, en étant fixés à la surface du rotor. Le bobinage statorique peut être du type réparti ou concentré. Idéalement, la distribution de densité de flux imposée par les aimants est rectangulaire. En pratique, cependant, cette répartition a tendance à être approximativement trapézoïdale en raison de l'effet d'étalement du flux qui se produit aux extrémités des aimants. Pour une machine en étoile, seules deux phases sont alimentées simultanément et, comme la force magnétomotrice (fmm) générée par ces deux phases est constante, il faut une alternance des phases alimentées afin d'obtenir le déplacement de la fmm à chaque déplacement électrique de  $60^\circ$  du rotor. Par conséquent, contrairement aux machines traditionnelles où la fmm se déplace en continu, dans les machines trapézoïdales, le déplacement se produit à intervalles, soit à tous les  $60^\circ$  degrés électriques du rotor (Sandra 2019).

Dans ce travail on étudiera une machine synchrone à aimants permanents triphasés sinusoïdal. Cette machine peut fonctionner soit en mode moteur soit en mode générateur. Pour la réalisation de ce projet, le modèle sera développé pour le mode générateur, donc pour un PMSG (générateur synchrone à aimant permanent).

### **3.3 MODÈLE MATHÉMATIQUE DU PMSG AU REPÈRE ABC**

Pour l'élaboration du modèle mathématique du générateur synchrone à aimant permanent (PMSG), les prémisses suivantes sont adoptées (Krause, Wasynczuk et al. 1995):

Les enroulements du stator sont répartis sinusoïdalement en ce qui concerne leurs effets mutuels par rapport au rotor, c'est-à-dire qu'ils sont physiquement répartis selon un angle de  $120^\circ$  les uns par rapport aux autres.

Les rainures du stator ne provoquent pas de variations considérables des inductances du rotor lorsque la position du rotor varie.

La saturation et l'hystérésis magnétique sont négligées.

La Figure 20 montre le circuit équivalent pour les enroulements du stator :

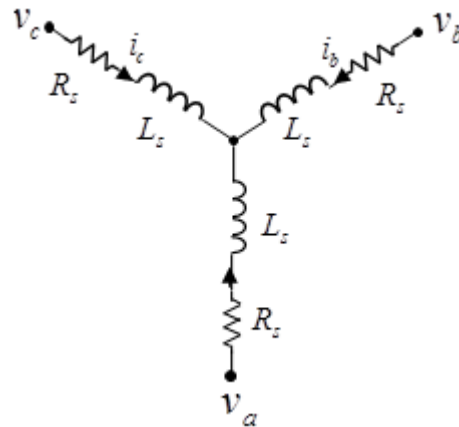


Figure 20 - Circuit équivalent pour les enroulements du stator (Mathworks 2020)

La tension électrique induite aux bornes du stator est définie par :

$$\mathbf{V}_s = \mathbf{e} - \mathbf{R}_s \mathbf{i}_s \quad (4.1)$$

$\mathbf{V}_s$  est la matrice de tension aux bornes du stator,  $\mathbf{e}$  est la matrice des tensions internes du stator induites par les flux magnétiques concaténés,  $\mathbf{R}_s$  est la matrice diagonale des résistances des enroulements du stator et  $\mathbf{i}_s$  est la matrice des courants circulant dans ces enroulements.

D'après la loi de Faraday-Lenz (Kundur, Balu et al. 1994), les contraintes internes sont égales à l'opposé de variation dans le temps des flux concaténés, à partir de laquelle les équations (4.2) et (4.3) sont obtenues (Carvalho 2006, Machowski, Bialek et al. 2008).

$$\mathbf{V}_s = -\mathbf{R}_s \mathbf{i}_s - \frac{d}{dt} \boldsymbol{\psi}_s \quad (4.2)$$

$$\boldsymbol{\psi}_{ss} = \mathbf{L}_s \cdot \mathbf{i}_s \quad (4.3)$$

$\boldsymbol{\psi}_{ss}$  est la matrice des flux concaténés dans les enroulements du stator et  $\mathbf{L}_s$  est la matrice des inductances propres et mutuelles de ces enroulements.

$$\mathbf{L}_s = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$L_{ii}$  ( $i = a, b, c$ ) : inductances des enroulements du stator,  $L_{ij}$  ( $i = a, b, c ; j = a, b, c ; i \neq j$ ) : inductances mutuelles entre les enroulements.

Le flux total produit ( $\boldsymbol{\psi}_s$ ) est la somme du flux concaténé créé dans le stator par les courants traversant ses enroulements ( $\boldsymbol{\psi}_{ss}$ ) et le flux produit par les aimants permanents du rotor.  $\boldsymbol{\psi}_{sf}$  est le vecteur flux de l'aimant permanent projeté sur les trois enroulements statoriques.

$$\boldsymbol{\psi}_{sf} = \psi_{MP} \begin{bmatrix} \cos \theta_r \\ \cos(\theta_r - 2\pi/3) \\ \cos(\theta_r + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$\psi_{MP}$  est l'amplitude du vecteur flux de l'aimant permanent. La différence angulaire de la position du rotor par rapport au stator est définie par l'angle  $\theta_r$ .

$$\boldsymbol{\psi}_s = \boldsymbol{\psi}_{ss} + \boldsymbol{\psi}_{sf} = \mathbf{L}_s \cdot \mathbf{i}_s + \boldsymbol{\psi}_{sf} \quad (4.6)$$

En développant les matrices, on obtient la formulation constante dans les équations (4.7) et (4.8) (Machowski, Bialek et al. 2008).

$$\begin{bmatrix} \lambda_{as} \\ \lambda_{bs} \\ \lambda_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & \cos \theta_r \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & \cos(\theta_r - 2\pi/3) \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & \cos(\theta_r + 2\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ \psi_{MP} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & \cos \theta_r \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & \cos(\theta_r - 2\pi/3) \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & \cos(\theta_r + 2\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ \psi_{MP} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

$R_s$  est la résistance statorique.

### 3.3.1 Inductances

- Les inductances propres du stator

Pour déterminer les équations des inductances statoriques, on considère que la perméabilité du circuit magnétique varie avec la position du rotor et l'inductance est directement proportionnelle à la perméabilité du circuit magnétique (Kundur, Balu et al. 1994, Machowski, Bialek et al. 2008). L'inductance propre  $L_{aa}$  présentera un maximum lorsque  $\theta_r = 0^\circ$ , et  $180^\circ$ , ainsi qu'un minimum quand  $\theta_r = 90^\circ$ .

La Figure 21 montre le graphique de l'inductance propre du stator en fonction de la position du rotor.

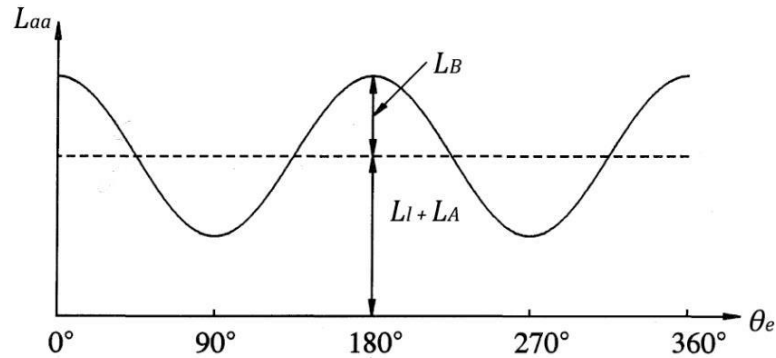


Figure 21 - Variation de l'inductance des enroulements stator en fonction de la position du rotor (angle électrique –  $\theta_r$ ) (Kundur, Balu et al. 1994)

Puisque les enroulements de phase  $b$  et  $c$  sont identiques à ceux de la phase  $a$ , mais décalées spatialement respectivement à  $120^\circ$  et  $-120^\circ$ , les inductances du stator sont

représentées par (Kundur, Balu et al. 1994, Krause, Wasynczuk et al. 1995, Haque and Rahman 1999, Carvalho 2006).

$$\begin{cases} L_{aa} = L_l + L_A + L_B \cos[2\theta_r] \\ L_{bb} = L_l + L_A + L_B \cos[2(\theta_r - 2\pi/3)] \\ L_{cc} = L_l + L_A + L_B \cos[2(\theta_r + 2\pi/3)] \end{cases} \quad (4.9)$$

$L_l$  est l'inductance de fuite qui représente le flux de fuite qui ne traverse pas l'entrefer (air gap).  $L_A$  est la partie constante des inductances propres du stator,  $L_B$  est la partie variable des inductances propres du stator,  $\theta_r$  est l'angle électrique entre l'axe de phase du stator et l'axe du rotor.

- Inductances mutuelles du stator

Les inductances mutuelles sont toujours négatives. Elles présentent une valeur absolue supérieure lorsque les pôles sud et nord du rotor sont équidistants du centre de l'enroulement analysé, comme suit (Kundur, Balu et al. 1994, Machowski, Bialek et al. 2008):

- Pour  $L_{ab}$ , la valeur absolue sera maximale lorsque  $\theta_r = -30^\circ$  ou  $150^\circ$ .
- Pour  $L_{bc}$ , la valeur absolue sera maximale lorsque  $\theta_r = -90^\circ$  ou  $90^\circ$ .
- Pour  $L_{ca}$ , la valeur absolue sera maximale lorsque  $\theta_r = 30^\circ$  ou  $-150^\circ$ .

La Figure 22 montre le graphique de l'inductance mutuelle du stator en fonction de la position du rotor.

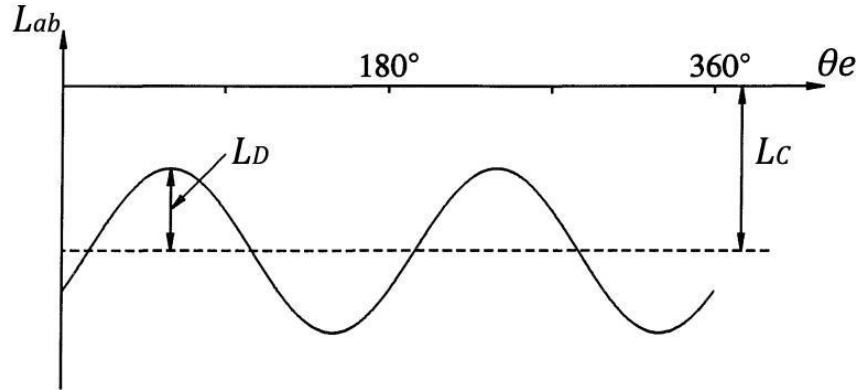


Figure 22 -Variation d'inductance mutuelle entre les enroulements du stator en fonction de la position du rotor (angle électrique -  $\theta_r$ ) (Kundur, Balu et al. 1994)

Mathématiquement, les inductances mutuelles sont données par (Kundur, Balu et al. 1994, Krause, Wasynczuk et al. 1995, Haque and Rahman 1999, Carvalho 2006) :

$$\begin{cases} L_{ab} = L_{ba} = -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos(2\theta_r + \pi/3) \\ L_{bc} = L_{cb} = -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos(2\theta_r - \pi) \\ L_{ca} = L_{ac} = -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos(2\theta_r - \pi/3) \end{cases} \quad (4.10)$$

La puissance active triphasée instantanée en sortie du stator est donnée par (Kundur, Balu et al. 1994, Krause, Wasynczuk et al. 1995) :

$$p_i = V_{as}i_{as} + V_{bs}i_{bs} + V_{cs}i_{cs} \quad (4.11)$$

Il est important de souligner que ces variables de courant et de tension sont grandeurs instantanées (Krause, Wasynczuk et al. 1995).

### 3.3.2 Équation du Mouvement

Enfin, la relation entre le couple électromagnétique, le couple mécanique résultant de la machine primaire, la vitesse (et position angulaire) et le moment d'inertie du rotor, est

traditionnellement représentée par l'équation d'équilibre suivante (Krause, Wasynczuk et al. 1995):

$$T = T_m - T_e = J \frac{d\omega_m}{dt} = J \frac{d^2\theta_m}{dt^2} \quad (4.12)$$

Considérant  $\omega_m = \omega_r / (p/2)$  :

$$T = J \frac{2}{p} \frac{d\omega_r}{dt} = J \frac{2}{p} \frac{d^2\theta_r}{dt^2} \quad (4.13)$$

$T$  est le couple résultant (ou total), en N.m,  $T_m$  est le couple mécanique fourni par la machine primaire en Nm,  $T_e$  est le couple électromagnétique en Nm,  $J$  est le moment d'inertie en kg.m<sup>2</sup>,  $\omega_m$  est la vitesse angulaire mécanique du rotor, en rad/s,  $\omega_r$  est la vitesse angulaire électrique en rad/s,  $\theta_m$  est l'angle mécanique entre l'axe de la phase du stator et un point de référence rotorique, en radians,  $\theta_r$  est l'angle électrique de la tension de phase du stator, en radians,  $p$  est le nombre de pôles de la machine (pas de paires de pôles).

### 3.4 MODÈLE MATHÉMATIQUE DU PMSG AU REPÈRE DQ0

Comme le montre la section 4.3.1, plusieurs inductances dépendent de l'angle électrique ( $\theta_r$ ) entre la phase a et l'axe du rotor qui, à son tour, varie dans le temps en fonction du mouvement du rotor. En conséquence, les équations de tension et de courant présentées dans la section 4.3 deviennent des équations différentielles à coefficients périodiques sans solution analytique (Krause, Wasynczuk et al. 1995), introduisant une complexité considérable dans l'analyse des machines électriques et des systèmes d'alimentation (Kundur, Balu et al. 1994). Ainsi, il est courant de trouver dans la littérature des équations qui n'utilisent pas le stator comme référence de position, en le remplaçant par les axes directs  $d$  et en quadrature  $q$  du rotor, éliminant l'existence d'un angle et simplifiant le modèle mathématique. Un autre avantage de représenter les quantités sur les axes  $d$  et  $q$  est qu'elles

sont orthogonales l'une à l'autre, éliminant les coefficients d'inductance mutuelle (Krause, Wasynczuk et al. 1995).

La transformée, qui permet de représenter à l'origine des quantités à référence fixe dans deux axes magnétiques tournants orthogonaux l'un à l'autre, est la transformée de Park. Comme les grandeurs d'origine sont triphasées, pour donner au système un degré de liberté complet, il est nécessaire de créer une troisième composante, en plus des axes  $d$  et  $q$ . Comme les courants  $i_d$  et  $i_q$  produisent déjà un champ magnétique identique à l'ensemble original des courants de phase, le troisième composant ne doit pas produire de champ dans l'entrefer (air gap). Ainsi, une troisième variable commode est le courant homopolaire lequel est associé aux composantes symétriques, tandis que, dans les systèmes équilibrés, le courant homopolaire a une valeur nulle (Kundur, Balu et al. 1994). Elle est exprimée dans l'équation (4.14).

$$i_0 = \frac{1}{3}(i_a + i_b + i_c) \quad (4.14)$$

La Figure 23 montre le schéma du PMSG avec les axes  $d$  et  $q$  :

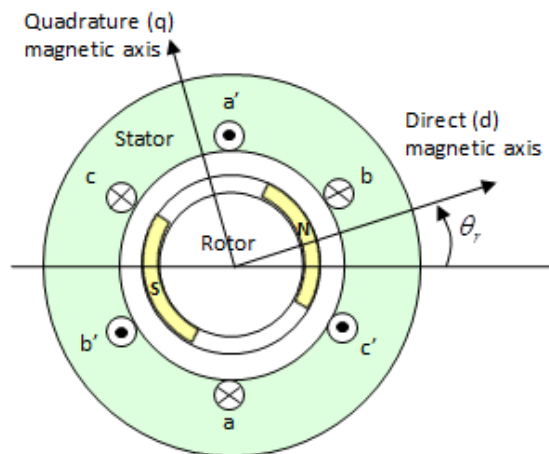


Figure 23 - Schéma du PMSG avec les axes  $d$  et  $q$ . (Mathworks 2020)

La transformation des variables de phase en variables  $dq0$  peut être écrite en utilisant la forme matricielle présentée dans les équations suivantes (Park 1929, Kundur, Balu et al. 1994, Mathworks 2020).



$$i_{dq0} = P \cdot i_{abc} \quad (4.15)$$

$$P = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta_r & -\sin \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta_r & -\sin \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

La transformée inverse est donnée par les équations (4.18) à (4.20) (Park 1929, Kundur, Balu et al. 1994, Mathworks 2020).

$$i_{abc} = P^{-1} \cdot i_{dq0} \quad (4.18)$$

$$P^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & -\sin \theta_r & 1 \\ \cos \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \\ \cos \left( \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & -\sin \theta_r & 1 \\ \cos \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \\ \cos \left( \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

La constante 2/3 qui apparaît en (4.16) est arbitraire et différentes valeurs peuvent être utilisées en fonction de l'objectif de l'analyse et de la simplification numérique recherchée

(Kundur, Balu et al. 1994). Dans ce travail, on utilisera la valeur de  $2/3$ , qui est une valeur courante dans la littérature et qui, dans des conditions sinusoïdales équilibrées, fait que les pics des courants  $i_d$  et  $i_q$  ont la même valeur que les pics des courants de phase  $i_a$ ,  $i_b$  et  $i_c$  (Kundur, Balu et al. 1994, Krause, Wasynczuk et al. 1995, Machowski, Bialek et al. 2008).

Cette transformée, bien qu'exemplifiée uniquement pour les courants, s'applique également aux tensions et flux concaténés du stator (Park 1929, Mathworks 2020).

En effectuant la transformée de Park, le flux magnétique résultant est exprimé à la suite de deux courants fictifs circulant dans deux enroulements également fictifs, l'une sur l'axe  $d$  et l'autre sur l'axe  $q$ .

### 3.4.1 Tensions, courants et flux au repère $dq0$

À partir de la transformée présentée ci-dessus, les équations des tensions, courants et les flux magnétiques peuvent être réécrits. Il est important de se souvenir que la transformée de Park ne s'applique pas aux grandeurs rotoriques. L'équation (4.2), transcrite ci-dessous, pour plus de commodité, devient (4.21).

$$\mathbf{V}_{abc} = -\mathbf{R}_{abc}\mathbf{i}_{abc} - \frac{d}{dt}\boldsymbol{\psi}_{abc} \quad (4.2)$$

$$\mathbf{V}_{dq0} = -\mathbf{R}_{abc}\mathbf{i}_{dq0} - \frac{d}{dt}\boldsymbol{\psi}_{dq0} + \boldsymbol{\Omega}\boldsymbol{\psi}_{dq0} \quad (4.21)$$

$\boldsymbol{\Omega}$  est la matrice de rotation :  $\boldsymbol{\Omega} = \omega_r \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$  et  $\omega_e$  est la vitesse angulaire

électrique, en rad/s.

En retirant (4.21) de la forme matricielle, on obtient les équations (4.22) :

$$\begin{cases} V_d = -R_s i_d - \frac{d}{dt} \psi_d + \omega_r \psi_q \\ V_q = -R_s i_q - \frac{d}{dt} \psi_q - \omega_r \psi_d \\ V_0 = -R_s i_0 - \frac{d}{dt} \psi_0 \end{cases} \quad (4.22)$$

- Inductances à la référence  $dq0$

Les flux concaténés dans la référence  $dq0$  sont calculés en remplaçant l'équation (4.18) dans (4.3) conduit à (4.23) :

$$\boldsymbol{\psi}_{abc} = \mathbf{L}_s \mathbf{i}_{abc} \quad (4.3)$$

$$\boldsymbol{\psi}_{abc} = \mathbf{L}_s \mathbf{P}^{-1} \mathbf{i}_{dq0} \quad (4.23)$$

En multipliant les deux membres de l'équation (4.23) à gauche par  $\mathbf{P}$ :

$$\mathbf{P} \boldsymbol{\psi}_{abc} = \mathbf{P} \mathbf{L}_s \mathbf{P}^{-1} \mathbf{i}_{dq0} \quad (4.24)$$

$$\boldsymbol{\psi}_{dq0} = \mathbf{P} \mathbf{L}_s \mathbf{P}^{-1} \mathbf{i}_{dq0} \quad (4.25)$$

Pour la matrice d'inductance statorique  $\mathbf{L}_s$ , l'opération  $\mathbf{P} \mathbf{L}_s \mathbf{P}^{-1}$  provoque une diagonalisation de la matrice d'inductance, dans laquelle de nouvelles inductances peuvent être définies dans la référence  $dq0$ , selon l'équation (4.26).

$$\mathbf{P} \mathbf{L}_s \mathbf{P}^{-1} = \mathbf{P} \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \mathbf{P}^{-1} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 \\ 0 & L_q & 0 \\ 0 & 0 & L_0 \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

Effectuant des multiplications matricielles et remplaçant les inductances dans le repère  $abc$  par les expressions obtenues en (4.6) et (4.7) et en simplifiant les termes trigonométriques, on arrive à l'équivalence :

$$\begin{cases} L_d = \frac{3}{2}(L_A + L_B) + L_l \\ L_q = \frac{3}{2}(L_A - L_B) + L_l \\ L_0 = L_l \end{cases} \quad (4.27)$$

Les inductances  $L_d$  et  $L_q$  peuvent être divisées en deux parties, comme on le trouve dans (Anderson and Fouad 1994, Kundur, Balu et al. 1994, Krause, Wasynczuk et al. 1995, Kuchenbecker and Teixeira 2012, Kuchenbecker and Teixeira 2015):

$$\begin{cases} L_d = L_{md} + L_l \\ L_q = L_{mq} + L_l \end{cases}, \text{ ou nous avons } \begin{cases} L_{md} = \frac{3}{2}(L_A + L_B) \\ L_{mq} = \frac{3}{2}(L_A - L_B) \end{cases} \quad (4.28)$$

$L_{md}$  et  $L_{mq}$  sont les inductances magnétisantes, causées par le flux qui enchaîne les circuits  $d$  et  $q$  du rotor.  $L_l$  est l'inductance de fuite, causée par le flux qui n'enchaîne aucun circuit.

Les flux concaténés sont définis intuitivement, en considérant l'équation (4.3), puisque les deux flux  $d$  et  $q$  ont des composantes résultant des courants traversant les enroulements fictifs  $d$  et  $q$ . Comme juste le flux sur l'axe  $d$  a une contribution provenant des aimants permanents, le flux généré par ceux-ci doit être inclus dans la définition de  $\psi_d$ . L'axe  $q$ , étant orthogonal à l'axe des aimants permanents, n'enchaîne pas le flux magnétique qui vient de cet axe. Ainsi, les flux  $\psi_d$  et  $\psi_q$  sont définis par :

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d - \psi_{MP} \\ \psi_q = L_q i_q \\ \psi_0 = L_0 i_0 \end{cases} \quad (4.29)$$

En substituant l'équation (4.29) dans les équations de  $V_d$  et  $V_q$  définies en (4.22) et en prenant la dérivée de  $\psi_{MP}$  pour constante, on arrive à (Muk, Marek et al. 2013) :

$$\begin{cases} V_d = -R_s i_d - \frac{d}{dt}(L_d i_d - \psi_{MP}) + \omega_r L_q i_q \\ V_q = -R_s i_q - \frac{d}{dt} L_q i_q - \omega_r (L_d i_d - \psi_{MP}) \\ V_0 = -R_0 i_0 - \frac{d}{dt} L_0 i_0 \end{cases} \quad (4.30)$$

$$\begin{cases} V_d = -R_s i_d - L_d \frac{d}{dt} i_d + \omega_r L_q i_q \\ V_q = -R_s i_q - L_q \frac{d}{dt} i_q - \omega_r (L_d i_d - \psi_{MP}) \\ V_0 = -R_0 i_0 - L_0 \frac{d}{dt} i_0 \end{cases} \quad (4.31)$$

Étant donné que l'axe 0 est orthogonal à la fois à l'axe  $d$  et à l'axe  $q$ , étant le long de l'axe de rotation du rotor, il s'agit d'un enroulement découplé magnétiquement des autres. De plus, dans des situations de système équilibré, la connexion des enroulements de stator en triangle et/ou en étoile isolée (non-mise à la terre), le courant circulant dans l'enroulement 0 sera nul ( $i_0 = i_a + i_b + i_c = 0$ ). En conséquence, son flux magnétique sera également nul ( $\lambda_0 = L_0 i_0$ ).

Sur la base des équations (4.22) et (4.31), il est possible de tracer les circuits équivalents de la machine à aimants permanents au repère  $dq0$ , la Figure 24 illustre ces circuits.

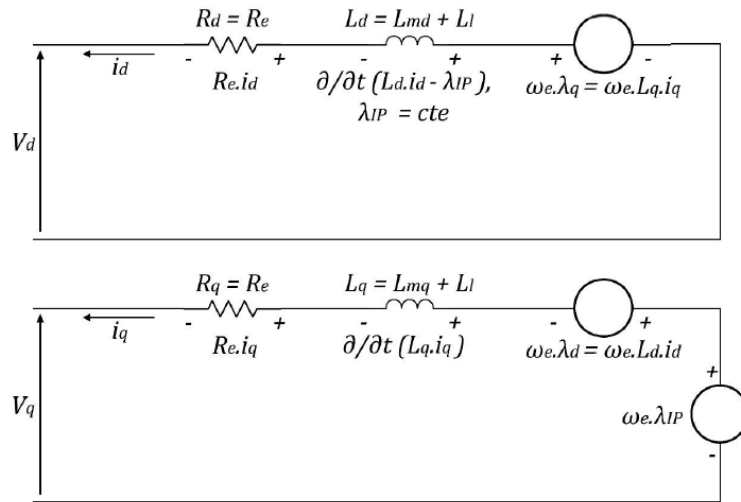


Figure 24 - Circuits équivalents du PMSG au repère  $dq$ .

### 3.4.2 Obtention de constantes de $L_{abc}$ à partir de $L_{dq0}$

Après avoir déterminé les inductances dans les deux références  $abc$  et  $dq0$ , il est nécessaire de mentionner qu'il est courant dans la littérature, comme exemples de (Haque

and Rahman 1999, Dutta and Rahman 2005, Carvalho 2006), de calculer les constantes  $L_A$  et  $L_B$  des inductances  $abc$  à partir des valeurs des inductances  $dq0$ . Ainsi, les équations communément trouvées dans la littérature (Haque and Rahman 1999, Carvalho 2006) peuvent être déduites en faisant  $L_d + L_q$ , d'où vient l'équation  $L_A$  :

$$\begin{aligned} L_d + L_q &= 3L_A + 2L_l & (4.32) \\ L_A &= \frac{1}{3}(L_d + L_q - 2L_l) \end{aligned}$$

L'équation de  $L_B$  peut être déduite en faisant  $L_d - L_q$  :

$$\begin{aligned} L_d - L_q &= 3L_B & (4.33) \\ L_B &= \frac{1}{3}(L_d - L_q) \end{aligned}$$

À son tour, il est également possible de trouver des références d'où dérivent les constantes  $L_A$  et  $L_B$  en faisant  $L_{md} + L_{mq}$ , comme (Krause, Wasynczuk et al. 1995).

$$\begin{aligned} L_{md} + L_{mq} &= 3L_A & (4.34) \\ L_A &= \frac{1}{3}(L_{md} + L_{mq}) \end{aligned}$$

L'expression de  $L_B$  peut être déduite en faisant  $L_{md} - L_{mq}$  :

$$\begin{aligned} L_{md} - L_{mq} &= 3L_B & (4.35) \\ L_B &= \frac{1}{3}(L_{md} - L_{mq}) \end{aligned}$$

Il est important de noter que l'équation pour calculer  $L_B$  ne change pas, que vous choisissiez d'utiliser  $L_d$  et  $L_q$  ou  $L_{md}$  et  $L_{mq}$ . Ce fait est justifié puisque la différence entre  $L_{md}$  et  $L_d$  est la même qu'entre  $L_{mq}$  et  $L_q$ , étant égale à l'impédance de dispersion  $L_l$ . Ainsi, la soustraction dans (2.45) élimine ce terme.

$$\begin{aligned} L_d - L_q &= (L_{md} + L_l) - (L_{mq} + L_l) & (4.36) \\ &= L_{md} + L_l - L_{mq} - L_l \end{aligned}$$

$$= L_{md} - L_{mq}$$

Différemment, en comparant (4.31) et (4.29), on voit qu'il y a une différence de 2.  $L_l$  dans le calcul de  $L_A$ , selon le choix d'utiliser  $L_d$  et  $L_q$  ou  $L_{md}$  ou  $L_{mq}$ .

L'observation de tels détails devient très pertinente lorsque les paramètres réels d'un générateur sont insérés dans le modèle de calcul. Que ce soit au travers des valeurs fournies par le constructeur, ou au travers de tests effectués directement sur la machine, il est important de savoir clairement quelles données sont utilisées, que ce soient celles qui incluent déjà l'inductance de fuite ( $L_d$  et  $L_q$ ) ou celles qui représentent purement les inductances magnétisantes ( $L_{md}$  et  $L_{mq}$ ), afin que la représentation du générateur soit cohérente avec l'équipement réel.

### 3.4.3 Équation du Mouvement

La puissance active triphasée instantanée en sortie du stator au repère  $abc$  est donnée par l'équation (4.11) (Kundur, Balu et al. 1994):

$$p_i = V_{as}i_{as} + V_{bs}i_{bs} + V_{cs}i_{cs} \quad (4.11)$$

$$p_i = \mathbf{V}_{abcs}^T \mathbf{I}_{abcs} \quad (4.37)$$

$\mathbf{p}_i$  est le vecteur de puissance instantanée. Appliquant la transformée de Park :

$$\mathbf{V}_{abcs} = \mathbf{P}^{-1} \mathbf{V}_{dq0} \quad (4.38)$$

$$\mathbf{I}_{abcs} = \mathbf{P}^{-1} \mathbf{I}_{dq0} \quad (4.39)$$

$$\mathbf{p}_i = \mathbf{V}_{abcs}^T (\mathbf{P}^{-1})^T (\mathbf{P}^{-1}) \mathbf{I}_{abcs} \quad (4.40)$$

Développant l'équation ci-dessus nous avons :

$$p_i = \frac{3}{2} [(V_d i_d + V_q i_q) + 2V_0 i_0] \quad (4.41)$$

Pour une machine triphasée, en condition d'équilibre, le courant homopolaire est nul.

$$p_i = \frac{3}{2}(V_d i_d + V_q i_q) \quad (4.42)$$

$$p_i = \frac{3}{2} \left( \left( -R_s i_d - L_d \frac{d}{dt} i_d + \omega_r L_q i_q \right) i_d + \left( -R_s i_q - L_q \frac{d}{dt} i_q - \omega_r (L_d i_d - \psi_{MP}) \right) i_q \right)$$

$$p_i = \frac{3}{2} \left( -R_s (i_d^2 + i_q^2) - \left( L_d i_d \frac{d}{dt} i_d + L_q i_q \frac{d}{dt} i_q \right) + \omega_r (\psi_{MP} + (L_d - L_q) i_d) i_q \right) \quad (4.43)$$

La puissance instantanée est composée de trois termes (Machowski, Bialek et al. 2008):

- Le premier représente la puissance perdue dans les enroulements du stator :

$$p_j = -\frac{3}{2} R_s (i_d^2 + i_q^2) \quad (4.44)$$

- Le deuxième, la variation de l'énergie magnétique emmagasinée dans les enroulements du stator :

$$p_{magnetique} = -\frac{3}{2} \left( L_d i_d \frac{d}{dt} i_d + L_q i_q \frac{d}{dt} i_q \right) \quad (4.45)$$

- Le troisième terme, la puissance électromagnétique transmise dans l'entrefer de la machine :

$$p_{transferée} = \frac{3}{2} \omega_r (\psi_{MP} + (L_d - L_q) i_d) i_q \quad (4.46)$$

Dans la littérature, il est beaucoup plus courant de trouver des équations pour le couple électromagnétique au repère  $dq0$  qu'au repère  $abc$ .

Le couple électromagnétique peut être déterminé en considérant que les forces agissant sur les conducteurs sont le produit des courants et des flux magnétiques. Alternativement, il peut être obtenu en développant l'expression de la puissance transférée à travers l'entrefer (équation (4.46)) et en le divisant par la suite par la vitesse du rotor ( $\omega_m$ ) (Kundur, Balu et al. 1994).



$$T_e = \frac{3}{2} \frac{\omega_r}{\omega_m} (\psi_{MP} + (L_d - L_q)i_d)i_q \quad (4.47)$$

D'après l'équation (4.47), il révèle que le couple est produit par deux mécanismes distincts. Le premier terme correspond au "couple de réaction mutuelle", se produisant entre  $i_q$  et les aimants permanents. Le deuxième terme est lié au "couple de réluctance", en raison de la différence entre la réluctance (ou inductance) existant sur l'axe  $d$  et sur l'axe  $q$  (Ohm 1977). Développant cette équation, nous avons :

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{\omega_r}{(\omega_r/(p/2))} (\psi_{MP}i_d i_q + L_d i_d i_q - L_q i_q i_d)$$

$$T_e = \frac{3p}{2} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (4.48)$$

$T_e$  est le couple électromagnétique en N.m,  $\omega_r$  est la vitesse angulaire électrique en rad/s,  $\omega_m$  est la vitesse angulaire mécanique du rotor en rad/s,  $p$  est le nombre de pôles sur la machine (pas de paires de pôles).

### 3.5 ADAPTATION DU MODÈLE DU PMSG CONVENTIONNEL À LA TECHNOLOGIE GENSET-SYNCHRO

Comme décrit au CHAPITRE 2 de ce mémoire, le Genset-Synchro dispose d'un alternateur synchrone pour produire de l'énergie électrique. C'est une génératrice synchrone à aimant permanent où le stator n'est pas fixe et qui tourne autour du même axe que le rotor. Les enroulements du stator sont les mêmes qu'un PMSG conventionnel (Issa and Ilinca 2017). Le générateur, comme toute machine synchrone, fonctionne avec une vitesse de rotation constante synchronisée avec la fréquence de la tension électrique appliquée à ses bornes.

La technologie Genset-Synchro vise à atteindre cette vitesse synchrone en combinant la vitesse du rotor et du stator, qui peuvent tourner dans le même sens ou dans des sens opposés (Mobarra, Issa et al. 2019). De cette façon, la vitesse du rotor une fois entraîné par

le moteur diesel, varie en fonction de la demande de charge. Cette variation permet au moteur diesel de toujours fonctionner assurant la meilleure efficacité énergétique (Tufté 2014). Pour atteindre une vitesse synchrone, le stator tourne pour compenser la vitesse du rotor. Si le GED fournit une charge proche de la valeur nominale du générateur diesel, le stator peut être fixe, et ainsi le rotor tourne à vitesse synchrone. Lorsque la vitesse du moteur diesel diminue, le stator tourne dans le sens opposé au rotor. Si le moteur diesel tourne à une vitesse supérieure à la vitesse synchrone, le stator tourne dans le même sens que le rotor. Ainsi, la vitesse angulaire du PMSG, pour la technologie Genset-Synchro, peut être décrite par l'équation (4.49) (Mobarra, Issa et al. 2019):

$$\omega_{rt} = \omega_{rr} + \omega_{rs} \quad (4.49)$$

$\omega_{rt}$  est la vitesse de rotation résultante en rad/s,  $\omega_{rr}$  est la vitesse de rotation du rotor en rad/s et  $\omega_{rs}$  est la vitesse de rotation du stator en rad/s.  $\omega_{rs}$  a une valeur positive si le stator tourne dans le sens contraire du rotor et une valeur négative s'il tourne dans le même sens que le rotor.

Les enroulements du stator étant identiques à un PMSG classique, les équations développées dans ce chapitre restent valables pour le Genset-Synchro. La seule différence est que la nouvelle technologie comporte deux entrées mécaniques indépendantes, de sorte que la vitesse de rotation sera la vitesse résultant de la combinaison des vitesses du rotor et du stator.

$$\begin{cases} V_d = -R_s i_d - L_d \frac{d}{dt} i_d + \omega_{rt} L_q i_q \\ V_q = -R_s i_q - L_q \frac{d}{dt} i_q - \omega_{rt} (L_d i_d - \psi_{MP}) \\ V_0 = -R_0 i_0 - L_0 \frac{d}{dt} i_0 \end{cases} \quad (4.50)$$

### 3.6 CONCLUSION

Ce chapitre a présenté le modèle mathématique d'un PMSG dans les repères abc et dq0. Une analyse des équations mathématiques, qui décrivent le comportement électrique et mécanique de la machine, montre que la seule différence, avec la technologie Genset-Synchro, est que la vitesse de rotation sera le résultat de la combinaison de la vitesse du rotor et de la vitesse du stator.

Il est important de respecter le sens de rotation du stator pour le calcul de la vitesse de rotation résultante. La vitesse de rotation du stator a une valeur positive lorsqu'il tourne dans le sens opposé au rotor et une valeur négative lorsqu'il tourne dans le même sens que le rotor.

Le chapitre suivant présente un modèle numérique de la technologie Genset-Synchro utilisant le logiciel Matlab/Simulink. Sur la base de l'analyse de ce chapitre, comme les équations électriques et mécaniques qui décrivent une machine conventionnelle sont valables pour Genset-Synchro, il est possible d'adapter un modèle déjà existant dans le logiciel pour développer le modèle de la nouvelle technologie.

## **CHAPITRE 4**

### **MODÈLE NUMÉRIQUE DU GENSET-SYNCHRO ET ANALYSES DES IMPACTS SUR LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ**

#### **4.1 INTRODUCTION**

Afin de valider le modèle mathématique Genset-Synchro décrit au chapitre 4, un modèle numérique a été créé sous Matlab/Simulink. Ce modèle vise à simuler le comportement d'un système électrique avec un générateur de stator rotatif quand on varie la valeur de la charge. L'objectif est de vérifier la variation de la vitesse rotorique en fonction de la fluctuation de charge et le comportement de la vitesse statorique pour permettre à la génératrice de fonctionner en vitesse synchrone.

Pour les études de simulation, un modèle PMSG existant à la bibliothèque Matlab/Simulink a été utilisé. Ce modèle dispose de deux entrées mécaniques indépendantes. Un algorithme de contrôle a été développé juste pour faire varier la vitesse du rotor en fonction de la demande de charge et pour activer le moteur compensateur qui entraîne le stator, de sorte que la machine fonctionne toujours à vitesse synchrone.

Enfin, les tensions et courants générés par le modèle Genset-Synchro sont analysés pour déterminer l'impact du mouvement du stator sur la qualité de l'énergie électrique produite.

#### **4.2 DESCRIPTION DU MODÈLE NUMÉRIQUE DÉVELOPPÉ**

Pour le développement du modèle du Genset-Synchro, les modèles de machines synchrones et asynchrones déjà disponibles dans le logiciel Matlab/Simulink ont été étudiés. Cette étude était importante afin d'évaluer la possibilité d'adapter un modèle de machine existant dans ce logiciel pour le développement du modèle désiré. La Figure 25 montre le schéma du modèle du Genset-Synchro développé dans Matlab/Simulink.

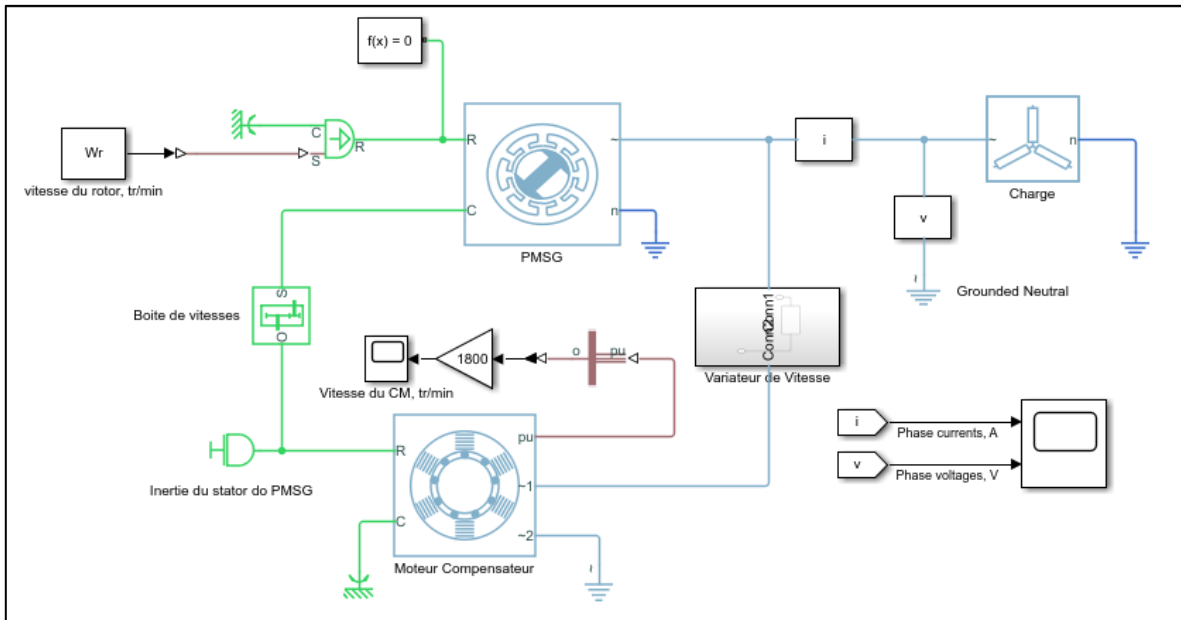


Figure 25 - Schéma du modèle numérique développé dans le logiciel Matlab/Simulink.

Dans ce modèle, le PMSG dispose de deux entrées mécaniques indépendantes, ce qui a permis d'utiliser deux vitesses qui se combinent pour permettre à la machine de tourner à la vitesse synchrone. Un modèle de machine asynchrone, disponible à la bibliothèque Matlab/Simulink, a été utilisé pour représenter le moteur compensateur qui est alimenté par le PMSG. Pour modifier la vitesse de ce moteur, un variateur de fréquence a été utilisé tel que suggéré dans les études (Issa, Lepage et al. 2019, Mobarra, Tremblay et al. 2020). Le rotor du moteur compensateur a le stator du PMSG comme charge mécanique. De cette manière, une machine à inertie a été utilisée pour représenter l'inertie du stator au moment du démarrage du CM ou quand la vitesse de rotation varie en fonction de la variation de la charge. Les sections suivantes décrivent les principaux éléments du modèle développé.

#### 4.2.1 Modélisation du PMSG

Le logiciel Matlab/Simulink dispose de deux bibliothèques de machines. Chacune de ces bibliothèques présente un modèle de machine synchrone à aimants permanents (PMSM). Pour l'élaboration de ce travail, le modèle PMSM, représenté sur la Figure 26, a été choisi,

car ce modèle possède deux entrées mécaniques indépendantes, les portes R et C. R est la porte d'entrée de la rotation mécanique du rotor et C est la porte d'entrée de la rotation mécanique du carter générateur.

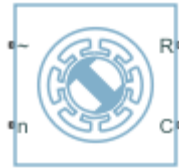


Figure 26 - Bloc de la PMSM disponible à la bibliothèque Matlab/Simulink.

Ce modèle présente une modélisation mathématique égale à la modélisation développée dans le chapitre 3 de ce travail. C'est une machine synchrone à aimants permanents réversible, c'est-à-dire que, selon les entrées qui lui sont connectées, elle peut fonctionner en mode moteur ou en mode générateur (Mathworks 2020). Cette machine génère une tension triphasée sinusoïdale. Le modèle est donc compatible avec la machine que nous avons l'intention de modéliser.

Dans ce travail, nous allons simuler un générateur synchrone avec une puissance nominale égale à 500 kW.

Concernant les données d'entrée pour le bloc PMSM, les paramètres internes de la machine sont requis, tels que la façon de connexion des enroulements du stator, la quantité de paires de pôles, le flux d'aimant permanent ( $\psi_{MP}$ ), l'inductance d'axe direct ( $L_d$ ), l'inductance d'axe en quadrature ( $L_q$ ), l'inductance de séquence zéro ( $L_0$ ) et la résistance des enroulements du stator ( $R_s$ ). La Figure 27 présente la fenêtre de saisie des données pour ce modèle.

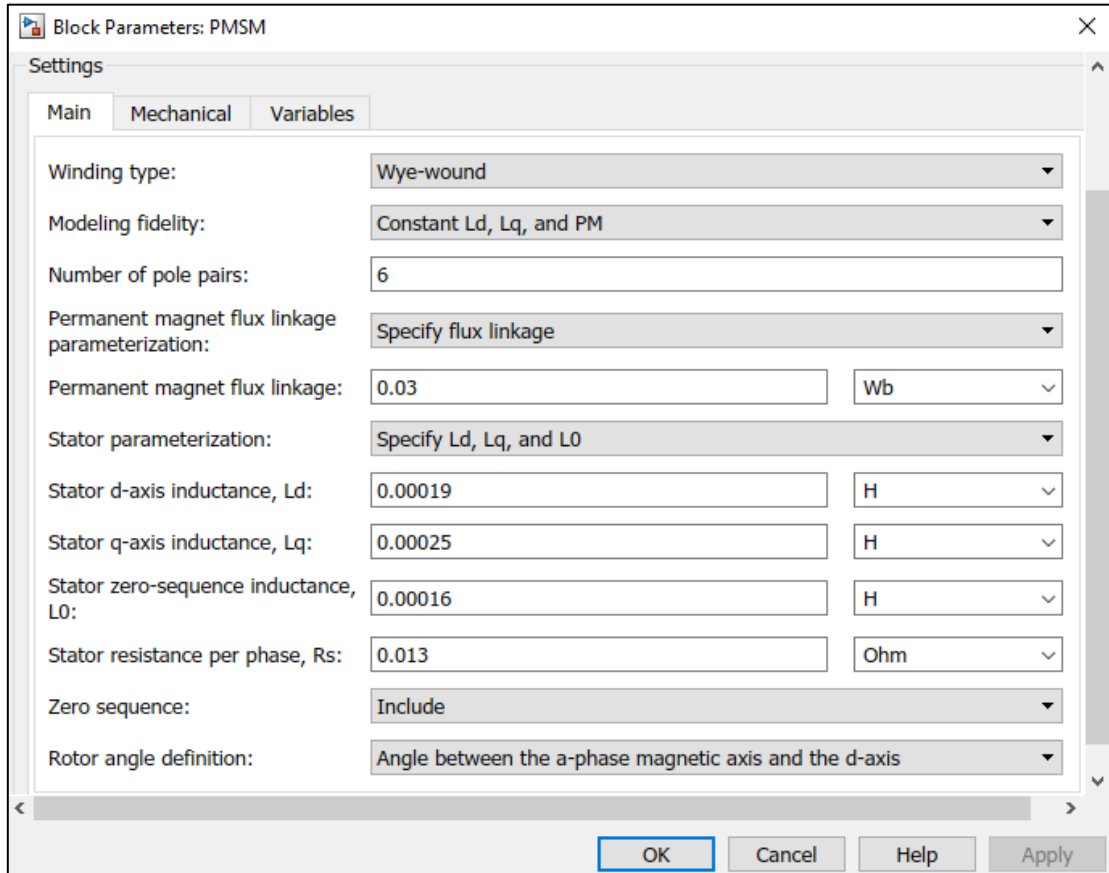


Figure 27 - Paramètres d'entrée pour la PMSM du logiciel Matlab/Simulink.

Comme paramètres internes de la machine, on a utilisé les données de plaque, présentées en (Mobarra, Issa et al. 2019) pour calculer les impédances et les valeurs trouvées dans un exemple de machine synchrone à aimants permanents du logiciel Matlab/Simulink. Ces valeurs sont présentées dans le Tableau 3.

Tableau 3 - Paramètres du PMSG

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
Puissance Nominale ( $P_{nom}$ )	500 kW	Résistance du stator ( $R_s$ )	0,01 $\Omega$
Couple Nominal ( $T_{nom}$ )	1591,5 N*m	Inductance de l'axe droit ( $L_d$ )	0,04748 H
Nombre de pair pôles ( $p$ )	2	Inductance de l'axe en quadrature ( $L_q$ )	0,04536 H
Vitesse nominale ( $\omega$ )	1500 tr/min	Inductance homopolaire ( $L_0$ )	0,016 H
Inertie du rotor (J)	60,0 Kg*m <sup>2</sup>	Flux magnétique ( $\psi_{MP}$ )	2,0 Wb

Une première analyse a montré que la machine fonctionne correctement avec deux entrées mécaniques indépendantes qui sont combinées pour que la machine tourne à vitesse synchrone. La Figure 28 montre le schéma du modèle uniquement avec le PMSG, qui a deux entrées mécaniques indépendantes, et schéma de la figure montre aussi la charge électrique.

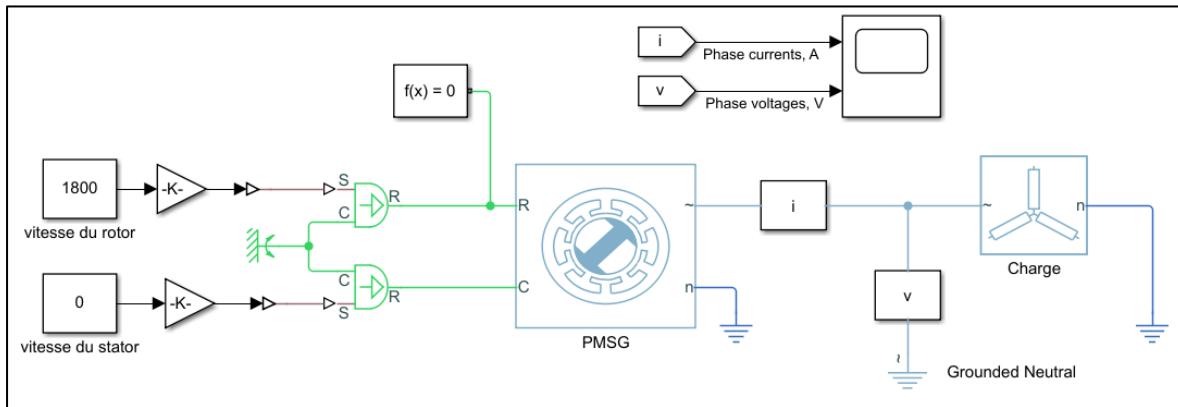


Figure 28 – Schéma pour l'analyse de comportement du PMSG avec deux entrées mécaniques indépendantes.

Dans cette analyse le PMSG est utilisé avec les paramètres indiqués dans le tableau ci-dessus et connecté à une charge résistive de 200 kW. De même la vitesse du rotor (port R) est de 1800 tr/min (vitesse nominale) et le stator est fixe, comme dans un générateur classique. Ensuite, la vitesse du rotor est modifiée ainsi que la vitesse du stator (port C) de façon que la combinaison de ces deux vitesses donne toujours la vitesse synchrone, c'est-à-dire 1800 tr/min. Le Tableau 4 résume les scénarios étudiés.

Tableau 4 – Scénarios étudiés pour l'analyse du comportement du PMSG avec les deux entrées mécaniques différentes.

Scénario étudié	1	2	3	4	5
Vitesse du rotor ( $\omega_{rotor}$ )	2300 tr/min	2100 tr/min	1800 tr/min	1500 tr/min	13000 tr/min
Vitesse du stator ( $\omega_{stator}$ )	500 tr/min	300 tr/min	0 tr/min	-300 tr/min	-500 tr/min

La Figure 29 montre la tension de sortie du générateur pour le deuxième scénario et le quatrième scénario simulés, c'est-à-dire, pour le rotor tournant à 2100 tr/min et le stator



tournant à 300 tr/min et pour le rotor tournant à 1500 tr/min et le stator tournant à -300 tr/min. Pour les autres scénarios, la forme d'onde est semblable. Le Tableau 5 résume les données de cette première analyse.

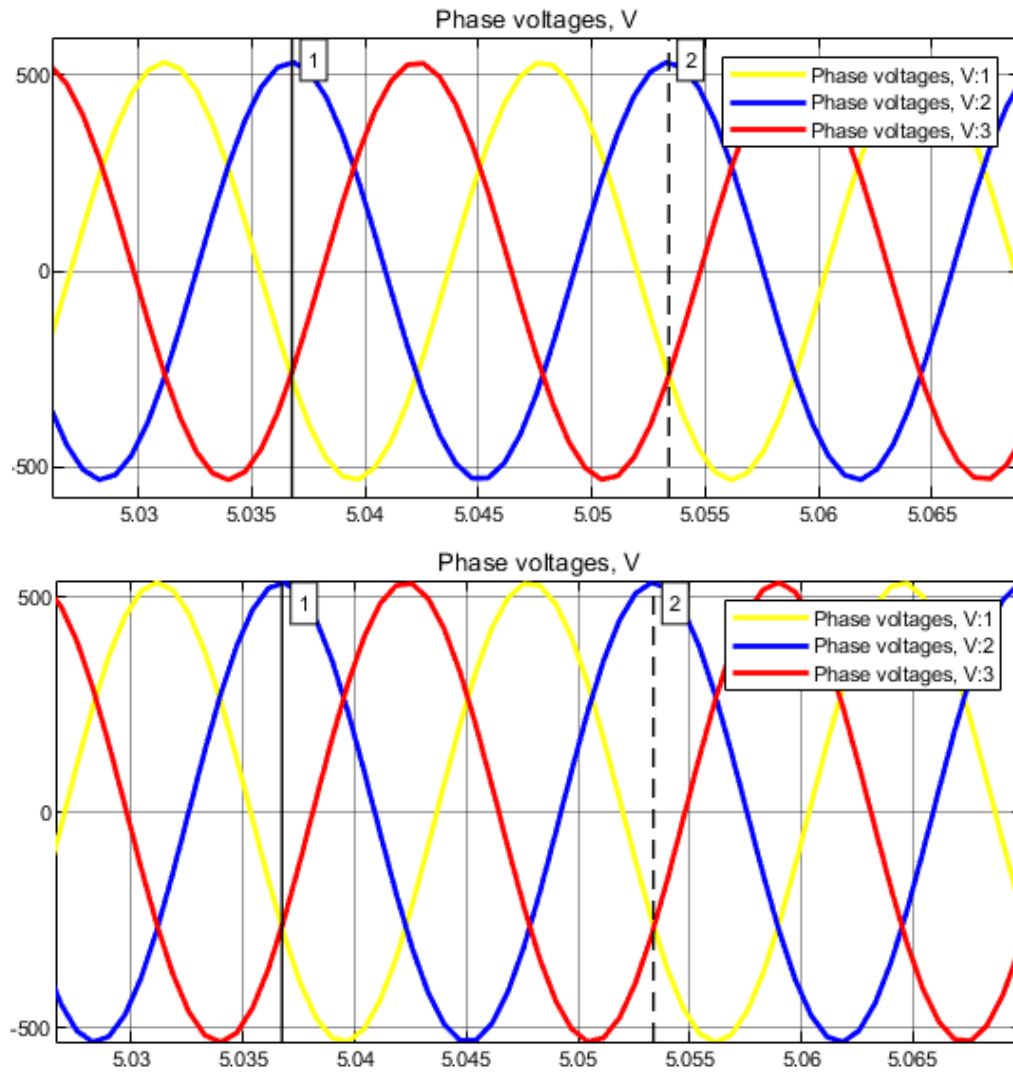


Figure 29 - Tension de sortie dans les trois phases pour les scénarios 1 et 4.

Tableau 5 – Valeurs de fréquences des tensions et courants aux bornes du PMSG avec deux entrées mécaniques indépendantes.

Scénarios étudiés	1	2	3	4	5
Fréquence de la tension	60,11 Hz	59,95 Hz	60,13 Hz	50,91 Hz	59,88 Hz

Les analyses saisies montrent que le modèle PMSM existant à la bibliothèque Matlab/Simulink peut être utilisé comme modèle du PMSG pour Genset-Synchro, car il répond à la caractéristique principale de cette nouvelle technologie. Ce modèle fonctionne efficacement avec deux entrées mécaniques indépendantes. L'important est de toujours faire attention au sens de rotation souhaitée pour le stator, la vitesse doit être positive lorsqu'il tourne dans le même sens que le rotor et négative lorsqu'il tourne dans le sens inverse du rotor. La section suivante décrit le modèle du moteur compensateur.

#### 4.2.2 Modélisation du moteur compensateur (CM)

Le moteur compensateur est une machine asynchrone à la cage d'écureuil. Les modèles de machines asynchrones appartenant à la même bibliothèque Matlab/Simulink à partir de laquelle nous avons choisi le modèle PMSG ont été analysés. Ce choix est important, car la connexion des deux éléments est plus simple lorsqu'ils appartiennent à la même bibliothèque. Pour le développement de ce projet, le modèle de machine à cage d'écureuil représenté sur la Figure 30 a été utilisé.

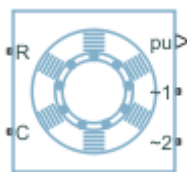


Figure 30 - Bloc de la machine à cage d'écureuil disponible à la bibliothèque Matlab/Simulink (Mathworks 2020).

Le moteur compensateur étant une machine asynchrone classique, il n'y a pas de différence dans la modélisation mathématique de cette machine. Selon (Fiset 2010) le CM a une puissance nominale au tour de 15% de la puissance nominale du PMSG. Sur la base de cette information et en fonction de la valeur de puissance nominale du PMSG considérée

dans la section précédente, la puissance nominale du CM sera de 65 kW. Les paramètres fondamentaux peuvent être exprimés en unités (pu) ou dans le système international d'unités (SI). Comme données d'entrée pour le bloc de cette machine, cela requiert : la puissance apparente, la tension et la fréquence nominales et la quantité de paires de pôles. La Figure 31 présente la fenêtre de saisie des données principales pour ce bloc.

The image shows a software dialog box titled "Induction Machine Squirrel Cage". It contains a description: "Induction machine with a squirrel cage rotor parameterized using fundamental parameters." and a note: "Right-click on the block and select Simscape block choices to access variant implementations of this block." Below this is a "Settings" section with four tabs: "Main", "Impedances", "Saturation", and "Variables". The "Main" tab is active and contains the following parameters:

Rated apparent power:	15e3	V*A
Rated voltage:	220	V
Rated electrical frequency:	60	Hz
Number of pole pairs:	1	
Parameterization unit:	SI	
Squirrel cage:	Single squirrel cage	
Zero sequence:	Include	
Initialization option:	Set targets for flux variables	

At the bottom of the dialog are four buttons: "OK", "Cancel", "Help", and "Apply".

Figure 31 - Données principales pour la machine à cage d'écureuil (Mathworks 2020).

Il est également nécessaire de fournir les données d'impédance comme: la résistance par phase statorique, la réactance de fuite totalisée au stator, la réactance magnétisante, la résistance proportionnelle à celle des phases rotoriques référées au stator, la réactance de fuite totalisée au rotor référée au stator et la réactance homopolaire du stator. Ces paramètres ont été obtenus à partir d'un modèle de machine à cage d'écureuil, également disponibles sous Matlab/Simulink. Ce modèle a une puissance nominale proche de la puissance souhaitée, une fréquence égale à 60 Hz et 2 paires de pôles. La Figure 32 présente la fenêtre de saisie des

données des impédances pour ce bloc. Le Tableau 6 résume les paramètres de la machine utilisée comme CM.

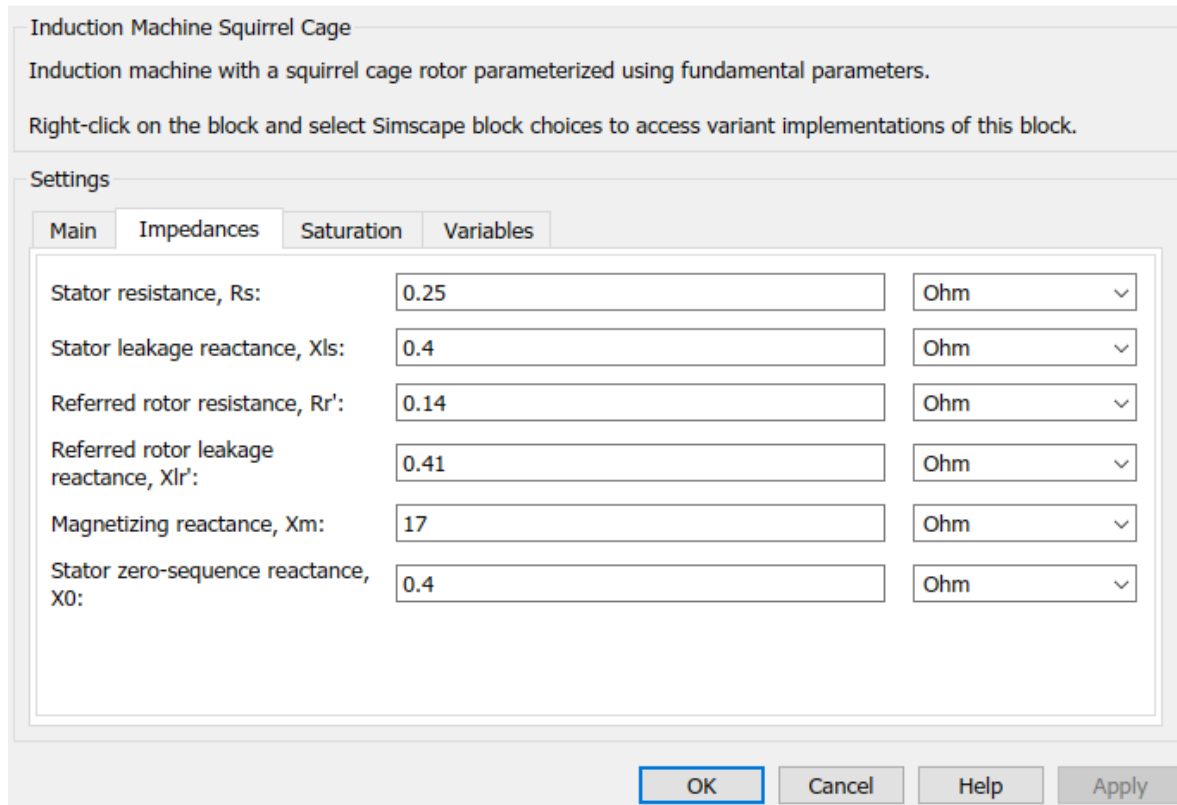


Figure 32 - Données principales pour la machine à cage d'écureuil (Mathworks 2020).

Tableau 6 - Paramètres du CM.

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
Puissance Nominale ( $S_{nom}$ )	65 kW	Résistance du stator ( $R_s$ )	0,454 $\Omega$
Tension Nominale ( $V_{nom}$ )	575 V	Réactance de fuite du stator ( $X_{ls}$ )	1,0989 $\Omega$
Fréquence Électrique ( $F_{nom}$ )	60 Hz	Résistance du rotor ( $R_r'$ )	0,2938 $\Omega$
Nombre de paires de pôles (p)	2	Réactance de fuite du stator ( $X_{lr}'$ )	1,0989 $\Omega$
Réactance de magnétisation ( $X_m$ )	6,462 $\Omega$	Réactance homopolaire du stator ( $X_0$ )	0,4 $\Omega$

La charge mécanique du CM est le stator du PMSG. Dans le modèle développé dans ce travail, le CM est directement connecté au stator PMSG, mais ce générateur n'a pas l'inertie statorique comme donnée, donc une machine à inertie avec une constante H égale à 5,0

s\*W/V/A connectée à la sortie CM a été utilisée pour représenter l'inertie du stator. Ce paramètre est important pour analyser le comportement de transition de la vitesse CM, dans des situations de démarrage du moteur ou de changement de charge. La vitesse CM est égale à la vitesse du stator qui est combinée à la vitesse du rotor pour faire tourner le PMSG à vitesse synchrone. Comme le générateur doit fonctionner à vitesse synchrone pour fournir une fréquence constante à la charge, les variations de vitesse de rotation impliquent des variations de la fréquence de sortie du générateur et par conséquent de la qualité de la puissance fournie.

Pour inverser le sens de rotation de la machine à induction, il est nécessaire d'inverser les phases d'alimentation, en échangeant la phase b avec la phase c, par exemple. Les analyses réalisées, avec le bloc machine asynchrone de la bibliothèque du Matlab/Simulink, montrent que forcer la machine à tourner en sens inverse augmente le temps de transition du système. De cette façon, le système prend plus de temps pour entrer en régime permanent dans des situations telles que le démarrage du CM ou les changements de charge, qui impliquent de changements de vitesse. Afin de diminuer ce temps transition, dans ce travail, nous utilisons le CM avec la séquence de phases classique, et pour inverser le sens de rotation, nous utilisons une boîte de vitesses avec une relation d'engrenages égale à -1.

Pour contrôler la variation de vitesse du CM en fonction de la variation de la charge, on peut utiliser un des systèmes de contrôle proposés dans (Mobarra, Tremblay et al. 2020) et (Issa, Lepage et al. 2019), qui se sont avérés efficaces pour varier la vitesse du CM. La section suivante montre une analyse sur la qualité de l'énergie en fonction de la variation de vitesse du Genset-Synchro.

#### **4.3 ANALYSE DES TENSIONS ET COURANTS FOURNIS PAR LE MODÈLE NUMÉRIQUE DÉVELOPPÉ**

Cette section présente l'analyse du comportement des tensions et des courants générés par le Genset-Synchro en fonction de la variation des vitesses du rotor et du stator. La charge électrique appliquée est égale à 200 kW. Tableau 7 résume les scénarios analysés dans cette section.

Tableau 7 - Variation des vitesses du rotor et du stator.

Temps de simulation	Vitesse du rotor (tr/min)	Vitesse du stator (tr/min)
t = 0s	1800	0
t = 100s	1500	-300
t = 200s	1200	-600

La figure ci-dessous montre la tension et le courant mesurés à la sortie du PMSG. On peut noter que la fréquence est égale à 60 Hz au début de la simulation.

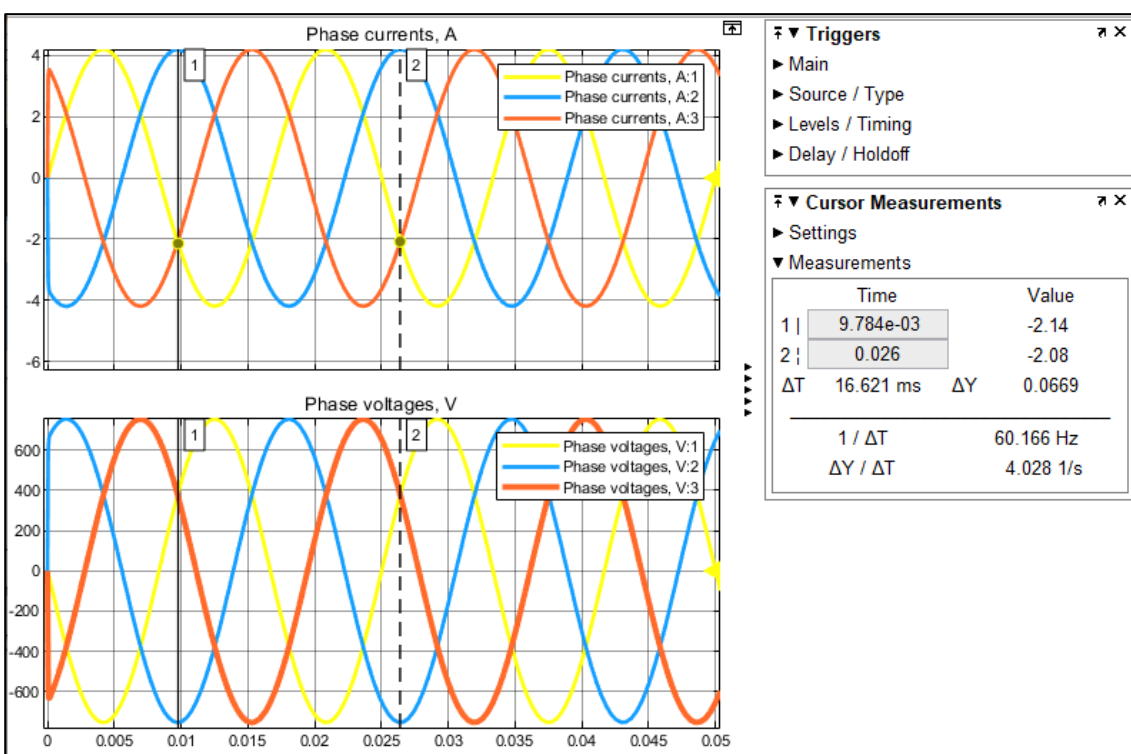


Figure 33 - Tension et courant avec une fréquence de 60 Hz.

Un algorithme a été créé pour faire varier la charge dans le temps, selon le tableau 7, les vitesses du rotor et du stator sont modifiées. La Figure 34 montre la transition dans la vitesse du CM. Ce délai de transition est dû en raison du temps que le CM prend pour atteindre la vitesse souhaitée, car cette machine doit vaincre l'inertie du stator. Selon la Figure 34 il faut un peu moins de 800 ms pour que la machine atteigne les vitesses désirées (300 tr/min et 500 tr/min).

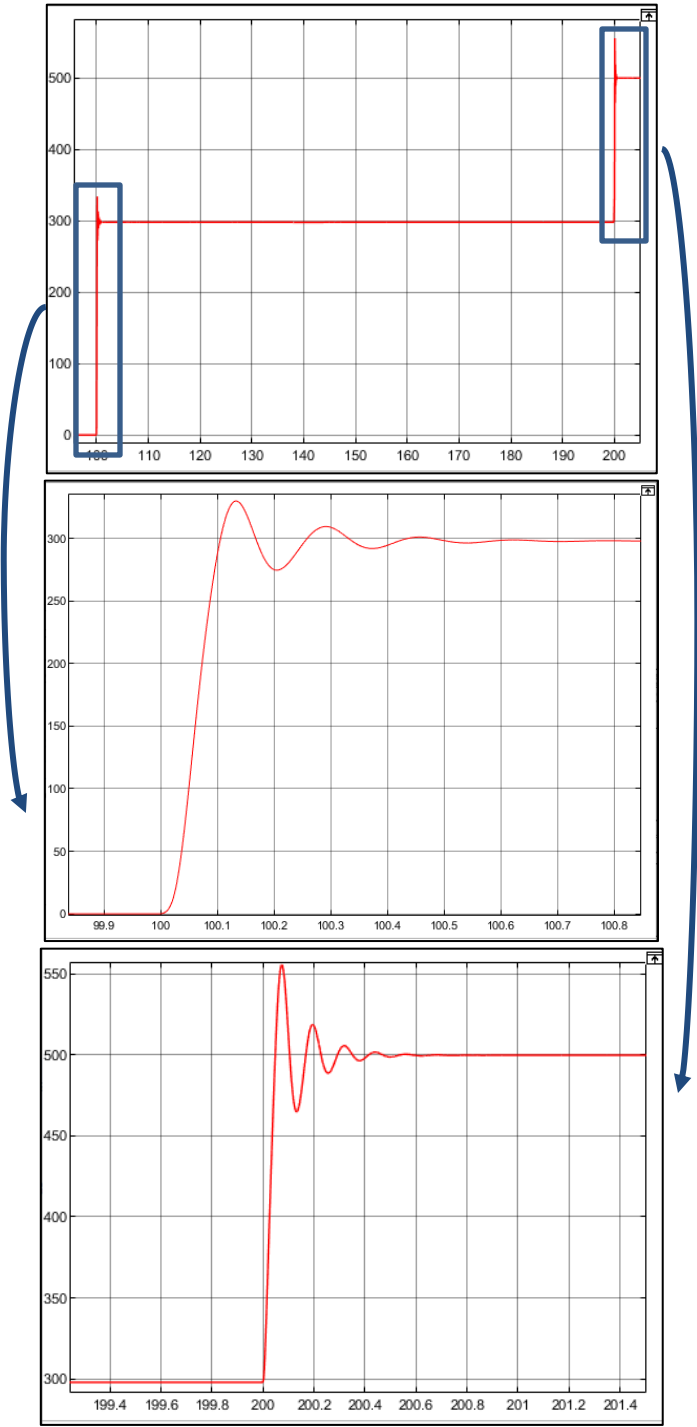


Figure 34 – Delai de transition dans la vitesse de rotation do CM.

Sur les Figure 35 et 36, on voit qu'aux instants 100 et 200s il y a une transition dans le comportement de la tension et du courant. Cette transition se produit au cause du temps

nécessaire au CM pour atteindre la vitesse requise en raison de la diminution de la charge appliquée. Lorsque la charge appliquée diminue, dans les instants 100 et 200s, la vitesse du moteur diesel doit être réduite et, par conséquent, la vitesse du rotor de la machine synchrone diminue. Pour maintenir une vitesse synchrone, le stator doit tourner dans le sens opposé au rotor. Comme le CM est responsable du mouvement du stator, il doit vaincre son inertie pour faire varier sa vitesse. L'amplitude et la fréquence de la tension et du courant, à la sortie du PMSG, varient pendant la transition.

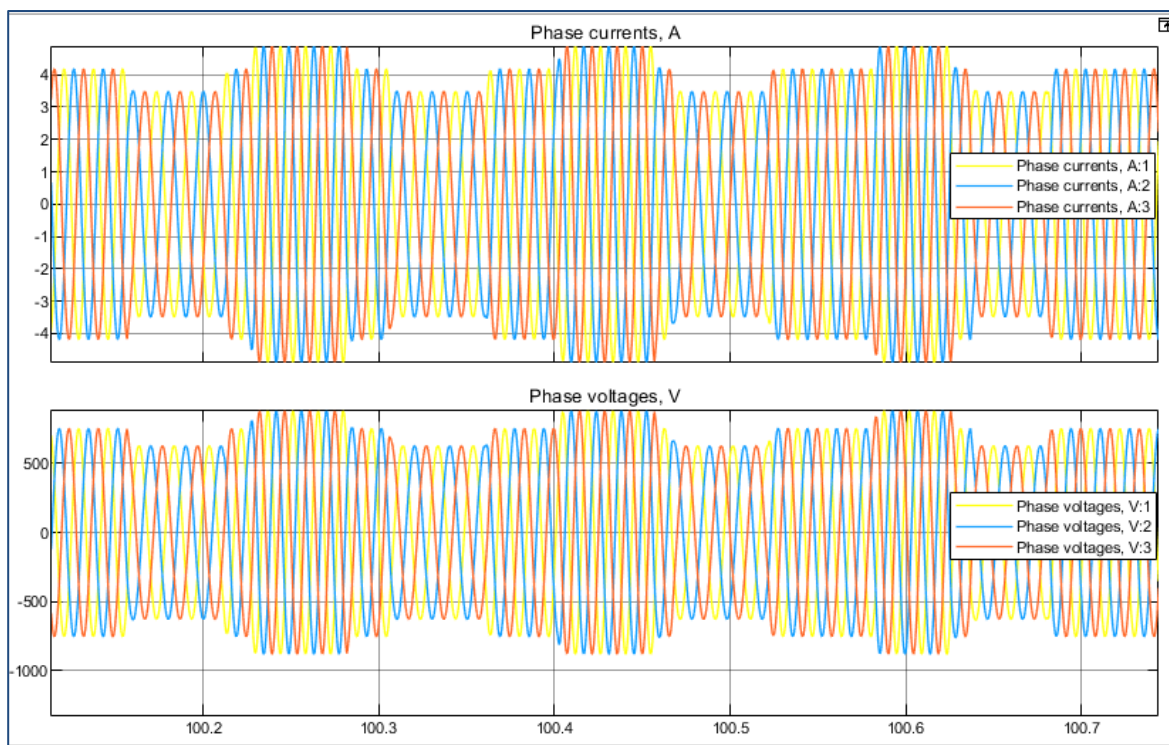


Figure 35 - Comportement de la tension et du courant face au délai de transition dû au changement de vitesse de la machine à l'instant 100s.



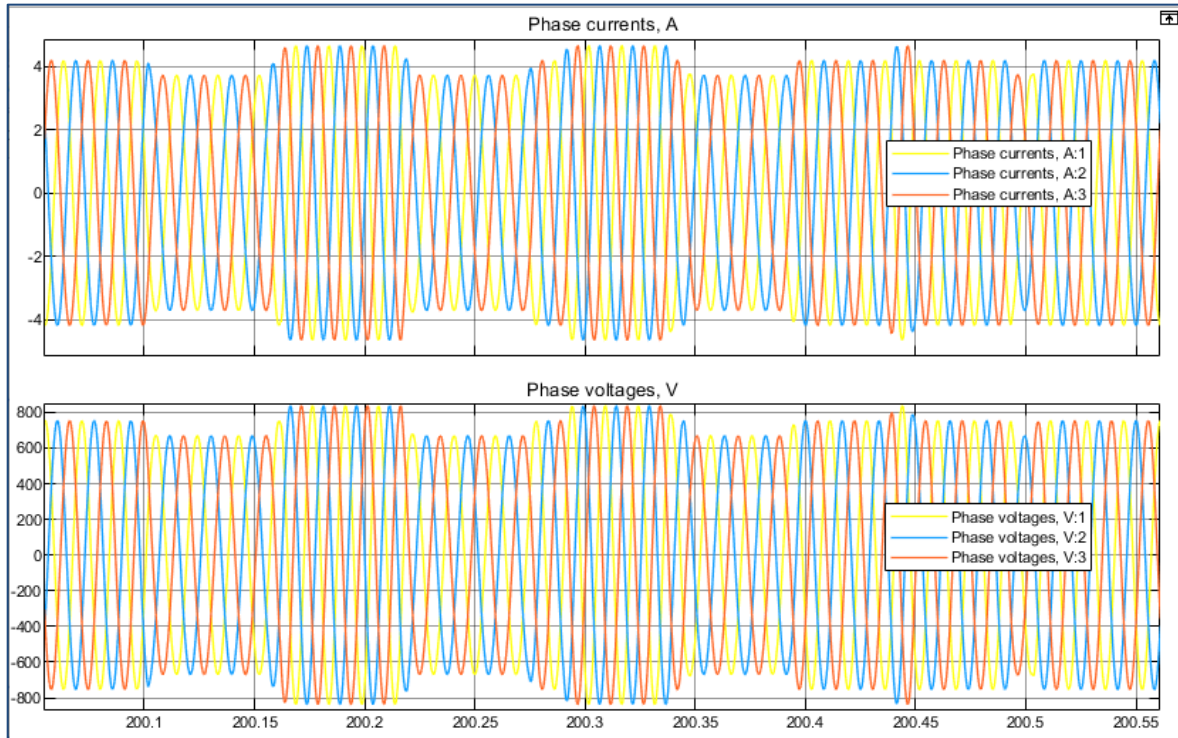


Figure 36 - Comportement de la tension et du courant face au delai de transition dû au changement de vitesse de la machine à l'instant 200s.

Malgré le delai de la transition observé à la Figure 35 le générateur revient à fonctionner à la vitesse synchrone. Les figures 37 et 38 montrent que l'amplitude et la fréquence de la tension et du courant sont constants avant et après la transition, c'est-à-dire quand la génératrice opere à la vitesse synchrone.

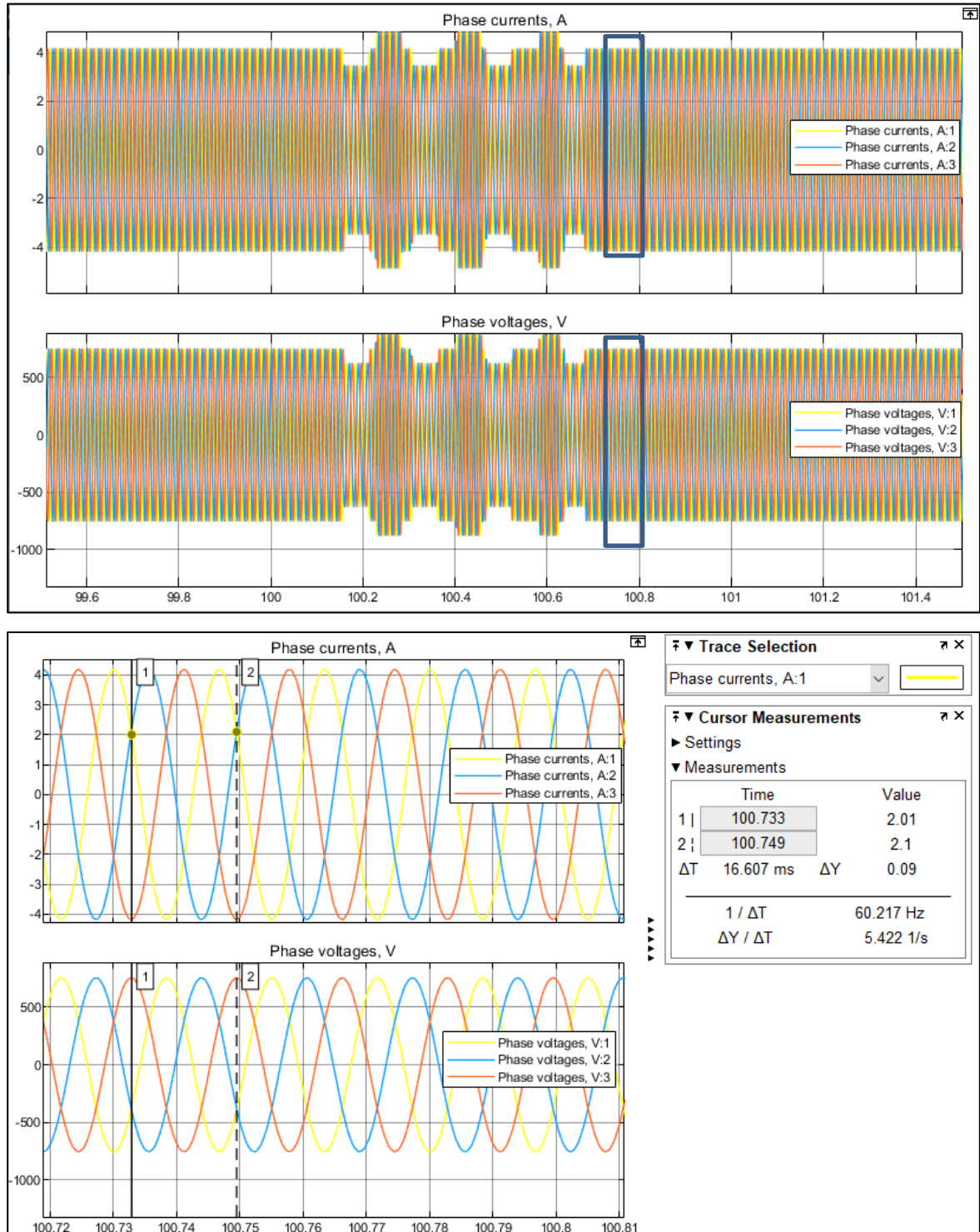


Figure 37 - Comportement du courant et de la tension avant et après la première transition (100s).

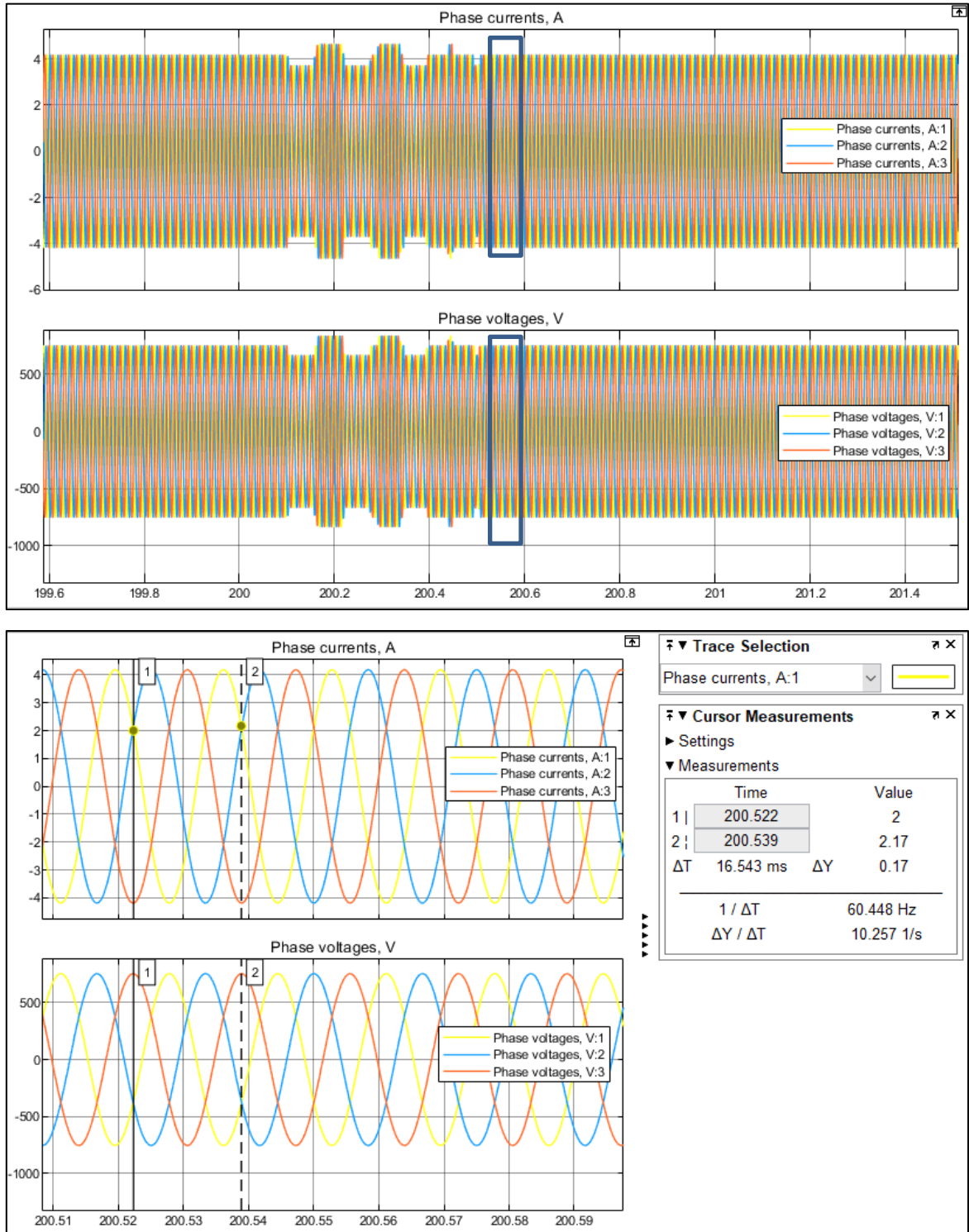


Figure 38 - Comportement du courant et de la tension avant et après la seconde transition (200s).

Ce modèle montre que le Genset-Synchro atteint son objectif principal, de faire varier la vitesse de rotation en fonction de la demande de charge, mais permettant au générateur de toujours fonctionner à vitesse synchrone.

Plus la puissance du moteur compensateur est grande par rapport à la puissance nominale du générateur synchrone, plus le temps de transition sera court. En effet, le couple exercé par le moteur augmente en fonction de la valeur de sa puissance donc en augmentant le couple, il sera plus facile pour le moteur de compensation de vaincre l'inertie du stator PMSG. Cependant, comme le CM est alimenté par le GED lui-même, l'augmentation de sa puissance augmente la quantité d'énergie nécessaire pour l'alimenter, diminuant la capacité du système en général. Si l'on considère que le contrôle de ce moteur se fait avec des convertisseurs électroniques, leur puissance sera également plus importante. Les études expérimentales réalisées précédemment utilisent un CM dont la puissance est comprise entre 15 et 20 % de la puissance nominale du GED.

#### **4.4 CONCLUSION**

Ce chapitre a présenté le modèle numérique de Genset-Synchro développé dans le logiciel Matlab/Simulink. Les analyses montrent que le modèle atteint l'objectif principal de ce projet de recherche, en faisant fonctionner le PMSG avec deux entrées mécaniques indépendantes. Ces entrées représentent la vitesse de rotation du rotor et du stator qui se combinent, en fonction de la demande de charge, pour former la vitesse synchrone dont le générateur a besoin pour fournir une fréquence constante.

Les algorithmes de contrôle développés dans (Issa, Lepage et al. 2019, Mobarra, Tremblay et al. 2020) peuvent être implémentés dans ce modèle pour automatiser la variation de vitesse en fonction de la variation de charge.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif principal de cette étude est de proposer un modèle mathématique et numérique d'un GED avec un stator tournant appelé Genset-Synchro. Le principal défi de ce projet est de modéliser la génératrice synchrone à aimants permanents qui, contrairement aux génératrices conventionnelles, comporte deux parties tournantes, le rotor et le stator.

L'étude est divisée en six parties. Dans un premier temps, une introduction générale est présentée avec les justifications qui ont motivé le développement de ce travail. Le premier chapitre présente une revue de la littérature sur les différentes technologies GED fonctionnant à vitesse variable. Le deuxième chapitre décrit le générateur Genset-Synchro et présente les résultats des études déjà réalisées sur cette nouvelle technologie, en soulignant ses avantages et ses inconvénients. Le troisième chapitre présente la modélisation mathématique d'un PMSG conventionnel et l'adaptation de cette modélisation à la technologie Genset-Synchro. Le quatrième chapitre présente la modélisation numérique du Genset-Synchro dans l'environnement Matlab/Simulink, ainsi que quelques analyses de ce modèle. Enfin, cette conclusion générale est tirée du projet développé au cours du programme de maîtrise.

De nombreuses études ont prouvé les avantages du fonctionnement du GED à vitesse variable, en relation au GED à vitesse fixe, comme le montre le chapitre 1 de cet ouvrage. La variation de la vitesse de fonctionnement du moteur diesel à faibles charges présente de nombreux avantages pour l'ensemble du système de production d'électricité. Parmi les problèmes de fonctionnement du moteur diesel à vitesse constante figurent la diminution de la durée de vie utile du moteur, l'augmentation de la consommation de carburant et l'émission de gaz à effet de serre.

Les technologies les plus populaires utilisent des convertisseurs de puissance pour contrôler la vitesse de rotation de la machine en fonction de la demande de charge. Chacune des technologies présentées au chapitre 1 a ses avantages et ses inconvénients. On ne peut pas affirmer qu'il existe une technologie plus adaptée en général, car différents facteurs doivent être pris en compte, et, pour chaque type d'application, une technologie s'est avérée

plus adaptée. Parmi ces technologies pour un GED fonctionnant à vitesse variable, la technologie Genset-Synchro propose une solution innovante qui permet au GED de faire varier la vitesse en fonction de la demande de charge sans utiliser une électronique de puissance sophistiquée. Genset-Synchro peut fonctionner à une vitesse synchrone en utilisant uniquement la vitesse du rotor ou uniquement la vitesse du stator et/ou une combinaison des deux. Un moteur compensateur est utilisé pour faire tourner le stator de la machine à la vitesse et dans la direction souhaitées. La vitesse du rotor, qui est directement relié à l'arbre du moteur diesel, varie pour permettre à ce moteur de fonctionner avec une efficacité maximale en fonction de la demande de charge. Le stator tourne pour compenser la vitesse du rotor.

De nombreuses études ont été réalisées afin de connaître les avantages et les limites de ce nouveau concept de GED à vitesse variable. Genset-synchro s'est avéré efficace pour réduire la consommation de carburant et les émissions de gaz à effet de serre. Et comme il peut être installé sans modifier le bloc moteur des systèmes déjà existants, il s'est avéré être une alternative efficace pour générer de l'énergie dans les régions isolées qui utilisent le diesel comme carburant.

Malgré les avantages en termes d'économie de carburant et de réduction des émissions de gaz à effet de serre, le système ne disposait toujours pas d'un contrôle de vitesse automatisé. Deux autres études ont été menées afin de proposer un contrôle basé sur l'utilisation d'un variateur de fréquence. Dans les deux études, des convertisseurs de puissance sont utilisés pour contrôler le moteur compensateur Genset-Synchro. Comme ce moteur a une puissance égale à une petite fraction de la PMSG, les coûts avec l'électronique de puissance sont moindres, de même que les impacts négatifs des convertisseurs de puissance pour le système, comme la présence d'harmoniques dues à la commutation des thyristors.

Comme inconvénients, le Genset-Synchro a une puissance de sortie limitée à 85% de la puissance nominale installée, car une partie de la puissance générée est utilisée pour

alimenter le moteur compensateur. La présence de PMSG implique également des coûts de maintenance plus élevés, dus aux balais du générateur synchrone.

Le développement d'un modèle permettant au PMSG de fonctionner avec deux entrées mécaniques indépendantes est une étape importante dans les études de cette nouvelle technologie. Ce modèle permettra d'étudier l'application du Genset-Synchro dans différents systèmes autonomes de production et d'énergie, tels que dans les communautés isolées et dans les systèmes de transport maritime et ferroviaire.

Le modèle mathématique décrit dans ce travail a permis une compréhension approfondie du fonctionnement du PMSG du Genset-Synchro et a permis le développement d'un modèle numérique utilisant le logiciel Matlab/Simulink. L'analyse des modèles déjà disponibles dans ce logiciel a permis l'adaptation d'un bloc PMSM disponible pour le développement d'un PMSG avec deux entrées mécaniques indépendantes pour le Genset-Synchro.

Les systèmes de contrôle proposés dans les travaux précédents peuvent être utilisés pour faire varier la vitesse CM dans le modèle présenté dans ce projet de recherche.

Le modèle numérique, présenté dans ce travail, peut également être utilisé pour analyser les impacts de la modification des générateurs de différents GED existants pour l'utilisation de Genset-Synchro. Des travaux futurs pourront approfondir l'évaluation du coût de ces changements en termes de bénéfices apportés par l'utilisation de la nouvelle technologie, compte tenu également des limitations qu'elle peut apporter au système fonctionnant à vitesse variable.

L'objectif du projet de recherche a été bien réussi. Les modèles mathématiques et numériques du Genset-Synchro présentés ont montré des résultats satisfaisants dans l'analyse des impacts de cette nouvelle technologie pour le fonctionnement du GED à vitesse variable.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Al-suod, M., et al. (2015). "Optimization of the structure of diesel-generator units of ship power system." *International Journal of Advanced Computer Research* 5: 2249-7277.
- Anaya-Lara, O. (2009). *Wind energy generation : modelling and control*. Chichester, U.K., J. Wiley & Sons.
- Anderson, P. M. and A. A. Fouad (1994). *Power system control and stability*. New York, Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Ayodele, T. R., et al. (2017). "n-split generator model: An approach to reducing fuel consumption, LCC, CO2 emission and dump energy in a captive power environment." *Sustainable Production and Consumption* 12: 193-205.
- Azzara, A., Rutherford, D., & Wang, H. (2014). "Feasibility of imo annex vi tier iii implementation using selective catalytic reduction." *The International Council on Clean Transportation* 4.
- Barakat, A., et al. (2010). "Analysis of synchronous machine modeling for simulation and industrial applications." *Simulation Modelling Practice and Theory* 18(9): 1382-1396.
- Bendaha, M. B. (2015). Identification des paramètres d'une machine synchrone à aimant permanent en vue d'une intégration dans des simulateurs en temps réel.
- Benhamed, S., et al. (2016). Dynamic modeling of diesel generator based on electrical and mechanical aspects. 2016 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC). Ottawa, O. N. Canada, IEEE: 1-6.
- Bolognani, S., et al. (2000). "Novel control technique for high-performance diesel-driven AC generator-sets." *IEE CONFERENCE PUBLICATION(475)*: 518-523.
- Carvalho, B. C. (2006). Desenvolvimento de modelo computacional de sistemas eólicos utilizando geradores síncronos para estudos de desempenho no contexto da qualidade da energia elétrica.
- Chan, T. F., et al. (2010). "Permanent-magnet synchronous generator supplying an isolated load." *IEEE Transactions on Magnetics* 46(8): 3353-3356.
- Chen, T. and C.-K. Sung (2000). "Design considerations for improving transmission efficiency of the rubber V-belt CVT." *International Journal of Vehicle Design - INT J VEH DES* 24.
- Chen, Z. and Y. Hu (2003). A hybrid generation system using variable speed wind turbines and diesel units. *IECON'03. 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IEEE Cat. No.03CH37468)*, IEEE: 2729-2734.
- Committee, M. E. P. (2008). *Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships. Resolution MEPC. 176 (58). Revised Marpol Annex. I. M. Organization.*
- Cotrell, J. (2005). *Assessing the Potential of a Mechanical Continuously Variable Transmission for Wind Turbines.*



- CVTCORP. Retrieved 04 January 2021, 2021, from <https://www.cvtcorp.com/>.
- Dengler, P., et al. (2011) Potential of Reduced Fuel Consumption of Diesel-Electric APUs at Variable Speed in Mobile Applications. SAE Technical Paper DOI: 10.4271/2011-24-0075
- Diaz, S. A., et al. (2009). Indirect sensorless speed control of a PMSG for wind application. 2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEEE: 1844-1850.
- Dutta, R. and M. F. Rahman (2005). Analysis and Comparison of Methods for Determining d- and q-axes Inductances of IPM Machines. IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 2005.
- Espadafor, F. J., et al. (2009). "Analysis of a diesel generator crankshaft failure." *Engineering Failure Analysis* 16(7): 2333-2341.
- Farhan, B., et al. (2016). "Control of Variable Speed Diesel Generator using FOC in Hybrid System." *International Journal of Control and Automation* 9: 111-122.
- Ferreira, Â. P. and A. Costa (2011). "Projeto e seleção de materiais magnéticos permanentes." *Engineering and Technology Journal* 2: 1-21.
- Fiset, J. (2010). Canadian Intellectual property Office-Patent no.2697420: Mechanical Regulation of Electrical Frequency In An Electrical Generation System. W. I. P. Organization.
- Fitzgerald, A. E. n., et al. (1990). *Electric machinery*. New York, McGraw-Hill.
- Forchetti, D. G., et al. (2007). "A control strategy for stand-alone wound rotor induction machine." *Electric Power Systems Research* 77(2): 163-169.
- Gajewski, P. and K. PifDKowski (2016). "Performance of Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Generator in Wind Turbine System." *Power Electronics and Drives* 1: 165 - 174.
- Greig, M. and J. Wang (2017). "Fuel consumption minimization of variable-speed wound rotor diesel generators." *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*: 8572-8577.
- Guo, L., et al. (2012). Coordinated control of battery storage system and diesel generators in AC island microgrid. *Proceedings of The 7th International Power Electronics and Motion Control Conference*, IEEE: 112-117.
- Hamilton, J., et al. (2015). "Low load diesel perceptions and practices within remote area power systems." *2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST)*: 121-126.
- Hamilton, J., et al. (2019). "The potential of variable speed diesel application in increasing renewable energy source penetration." *Energy Procedia* 160: 558-565.
- Haque, M. E. and M. Rahman (1999). "Dynamic Model and Parameter Measurement of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor."
- Ibrahim, H. and A. Ilinca (2012). Contribution of the Compressed Air Energy Storage in the Reduction of GHG - Case Study: Application on the Remote Area Power Supply System.
- Issa, M., Fiset, J. , Ibrahim, H. and Ilinca, A. (2019). "Eco-Friendly Selection of Diesel Generator Based on Genset-Synchro Technology for Off-Grid Remote Area Application in the North of Quebec." *Energy and Power Engineering* 11: 232-247.

- Issa, M. et A. Ilinca (2017). "Modeling and Optimization of the Energy Production Based on Eo-Synchro Application." *Power Engineer*.
- Issa, M. et A. Ilinca (2020). Optimisation opérationnelle, écologique et énergétique des groupes électrogènes diesel. Rimouski, Université du Québec à Rimouski.
- Issa, M., Ibrahim, H., Hosni, H., Ilinca, A., & Rezkallah, M. (2020). Effects of Low Charge and Environmental Conditions on Diesel Generators Operation. *Eng*, 1(2), 137-152. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2673-4117/1/2/9>
- Issa, M., Ilinca, A., Ibrahim, H. (2018). "Optimizing the Performance of a 500KW Diesel Generator: Impact of the Eo-Synchro Concept on Fuel Consumption and Greenhouse Gases." *Power Engineer*: 22-31.
- Issa, M., et al. (2019). "Integrated A Variable Frequency Drive For A Diesel-Generating Set Using The Genset-Synchro Concept." *International Journal of Engineering and Technical Research* 8: 232-239.
- Iwanski, G. (2011). "Adjustable speed hybrid wind-diesel generation system." *COMPEL: Int J for Computation and Maths. in Electrical and Electronic Eng.* 30: 186-200.
- Karimi, E. and M. Kazerani (2017). Impact of renewable energy deployment in Canada's remote communities on diesel generation carbon footprint reduction. 2017 IEEE 30th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE).
- Kawabata, Y., et al. (2001). New stand-alone power generating system using wound-rotor induction machine. 4th IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems. IEEE PEDS 2001 - Indonesia. Proceedings (Cat. No.01TH8594).
- Kawabata, Y., et al. (2004). Variable speed constant frequency stand-alone power generator using wound-rotor induction machine. The 4th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2004. IPEMC 2004. China Aug Aug, IEEE: 1778-1784.
- Koczara, W., et al. (2008). "Theory of the adjustable speed generation systems." *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering* 27(5): 1162-1177.
- Krause, P. C., et al. (1995). *Analysis of electric machinery*. New York, Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Kuchenbecker, W. and J. Teixeira (2015). "Procedure to Determine Inductances of Permanent Magnet Generators." *IEEE Latin America Transactions* 13: 2646-2652.
- Kuchenbecker, W. E. and J. C. Teixeira (2012). Development of a battery step voltage to determine parameters of large PMG. 6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2012).
- Kundur, P., et al. (1994). *Power system stability and control*. New York ;, McGraw-Hill.
- Lee, J.-H., et al. (2009). "Variable-Speed Engine Generator With Supercapacitor: Isolated Power Generation System and Fuel Efficiency." *IEEE transactions on industry applications*. 71(6): 2130.
- Leuchter, J., et al. (2007). System Variation of Electrical GEN-SET with Energy Buffer. 2007 Power Conversion Conference - Nagoya.
- Machowski, J., et al. (2008). *Power system dynamics : stability and control*. Chichester, U.K., Wiley.
- Manwell, J. F., et al. (1992). "An investigation of variable speed operation of diesel generators in hybrid energy systems." *Renewable Energy* 2(6): 563-571.

- Maritz, J. (2019) Optimized Energy Management Strategies for Campus Hybrid PV-Diesel Systems during Utility Load Shedding Events. *Processes* 7, DOI: 10.3390/pr7070430
- Mathworks (2020) User's Guide (r2020a).
- Meiners, D. (2013). Application of Variable Speed Diesel Generator Set for Village Power and Wind-Diesel Applications. A. E. Authority. Anchorage: 1-4.
- Mobarra, M., et al. (2019). "Performance Optimization of Diesel Generators Using Permanent Magnet Synchronous Generator with Rotating Stator." *Energy and Power Engineering* 11(07): 259-282.
- Mobarra, M., et al. (2020). "Advanced Control of a Compensator Motor Driving a Variable Speed Diesel Generator with Rotating Stator." *Energies* 13(9): 2224.
- Morren, J. and S. W. H. d. Haan (2005). "Ridethrough of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip." *IEEE Transactions on Energy Conversion* 20: 435-441.
- Muk, et al. (2013). "Novel methods for parameters investigation of PM synchronous motors." *Acta Technica Corvinensis - Bulletin of Engineering* 6(1): 51-56.
- Munir, H., et al. (2019). "Control of Distributed Generators and Direct Harmonic Voltage Controlled Active Power Filters for Accurate Current Sharing and Power Quality Improvement in Islanded Microgrids." *Inventions* 4: 27.
- Nayar, V. (2012). High Renewable Energy Penetration Diesel Generator Systems.
- Nejabatkhah, F., et al. (2018). "Optimal design and operation of a remote hybrid microgrid." *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications* 3(1): 3-13.
- Ohm, D. (1977). "DYNAMIC MODEL OF PM SYNCHRONOUS MOTORS."
- Oliveira, R. G. d. (2009). Contribuição ao controle de um sistema de geração a velocidade variável utilizando gerador de indução duplamente excitado. Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais: 242.
- Park, R. H. (1929). "Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis-part I." *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers* 48(3): 716-727.
- Peña, R., et al. (2005). "A hybrid topology for a variable speed wind-diesel generation system using wound rotor induction machines." 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2005. *IECON 2005.*: 6 pp.-.
- Pena, R. n., et al. (2009). "Control strategy for a Doubly-Fed Induction Generator feeding an unbalanced grid or stand-alone load." *Electric Power Systems Research* 79(2): 355-364.
- Rafic, Y., et al. (2012). Optimal Design of an Hybrid Wind-Diesel System with Compressed Air Energy Storage for Canadian Remote Areas. *Modeling and Optimization of Renewable Energy Systems, InTech.*
- Rogers, A. L. (1996). Variable speed diesel power generation design issues.
- Saad, Y., et al. (2016). "Progress in energy generation for Canadian remote sites." *AIP Conference Proceedings* 1758.
- Sandra, E. (2019) Permanent Magnet Synchronous Machines. *Energies* 12, DOI: 10.3390/en12142830

- Seman, S., et al. (2006). "Performance Study of a Doubly Fed Wind-Power Induction Generator Under Network Disturbances." IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION EC 21(4): 883-890.
- Shirnesan, A., et al. (2013). Brake Specific Fuel Consumption of Diesel Engine by Using Biodiesel from Waste Cooking Oil.
- Tang, Y. and L. Xu (1995). "A Flexible Active and Reactive Power Control Strategy for a Variable Speed Constant Frequency Generating System." IEEE transactions on power electronics. 10(4): 472.
- Tibola, J. (2017). Controle e supervisão de fonte ininterrupta de energia híbrida. Technology Center. Brazil, Universidade Federal De Santa Maria.
- Tibola, J. R., et al. (2015). Variable speed and stop-start techniques for engine-generators. 2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), IEEE: 1-5.
- Tibola, J. R., et al. (2015). "Modeling and speed control design of an ethanol engine for variable speed gensets." Control Engineering Practice 35: 54-66.
- Tufte, E. D. (2014). Impacts of Low Load Operation of Modern Four-Stroke Diesel Engines in Generator Configuration.
- Van Maerhem, T., et al. (2014). Variable speed genset with full rated power converter using readily available industrial products. 2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications, IEEE: 1-7.
- Wang, D. H., et al. (2010). Modeling of stand-alone variable speed diesel generator using doubly-fed induction generator. The 2nd International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems. Hefei, China: 1-6.
- Zhou, P. and Y. He (2007). Control strategy of an active crowbar for DFIG based wind turbine under grid voltage dips. 2007 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), IEEE: 259-264.