

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A.MIRA-BEJAIA
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique



Mémoire

Présenté par

BERABEZ Kahina

Pour l'obtention du diplôme de Magister

Filière :Génie électrique

Option : Electrotechnique

Thème

**Effets des dispositifs FACTS sur l'amélioration
de la qualité d'énergie produite par un
générateur asynchrone auto-excité**

Soutenu le : 17/12/ 2015

Devant le Jury composé de :

Mr T. REKIOUA

Prof Univ.de Béjaia

Président.

Mr K. IDJDARENE

MCA Univ. de Béjaia

Rapporteur.

Mr D. AOUZELLAG

Prof Univ. de Béjaia

Examineur.

Mr N. TAIB

MCA Univ. de Béjaia

Examineur.

Année Universitaire : 2014/2015

Remerciements

Remerciements

Je remercie **ALLAH**, le tout puissant, le miséricordieux, de m'avoir appris ce que j'ignorais, de m'avoir donné la santé et tous ce dont j'avais besoin pour réaliser le travail imposé et rédiger ce mémoire.

Je tiens tout particulièrement à exprimer mes sincères remerciements à **Monsieur, Kassa IDJDARENE**, pour le sujet qu'il m'a proposé, ses conseils et sa disponibilité. Je le remercie aussi pour ses encouragements, sa gentillesse et sa sympathie tout au long de la période de travail.

Je remercierai bien sur les membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'examiner ce travail, à savoir le Professeur : **T. REKIOUA**, président du jury,

Mes remerciements vont également à Mr DJ. AOUZELLAG, Professeur à l'université Bejaia et Mr N. TAIB Maître de Conférences à l'université de Bejaia pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'examiner et de juger ce travail.

Je saisis cette occasion pour remercier tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation tout le long de ces années d'études et m'ont initié à assurer ma future tâche.

Je terminerai par remercier, ma famille et toutes mes amies pour leur encouragements et soutien tout au long de ces années, pour leur confiance sans failles dans ce travail et pour tous les très bons moments partagés.

Sommaire

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur les éoliens et les systèmes FACTS

1. Introduction	4
2. Stratégies de fonctionnement d'une éolienne	4
2.1 Descriptif	4
2.2 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.....	4
3. Différents types d'aérogénérateurs.....	6
3.1 Eoliennes à axe vertical.....	6
3.1.1 Rotor de Savonius.....	7
3.1.2 Rotor de Darrieus	7
3.2 Eoliennes à axe horizontal.....	8
4. Composition d'une éolienne.....	9
4.1 Ailes ou pâles d'une éolienne.....	10
4.2 Tour ou le mât d'une éolienne	10
4.3 Partie électrique d'une éolienne.....	10
4.4 Nacelle.....	10
5. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne	10
6. Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne.....	11
6.1 Eoliennes connectées au réseau électrique	12
6.1.1 Eoliennes à vitesse fixe.....	12
6.1.2 Eoliennes à vitesse variable	13
6.1.2.1 Machine asynchrone à cage.....	14
6.1.2.2 Machine asynchrone à double alimentation.....	15
6.1.2.3 Machine synchrone.....	16
7. Eoliennes en fonctionnement isolé et autonome.....	17
7.1 Machine synchrone.....	17
7.1.1 Machine synchrone à rotor bobiné.....	17
7.1.2 Machines synchrones à aimants permanents.	17
7.1.3 Machines à reluctance variable	18

Sommaire

7.2 Générateur asynchrone à cage d'écureuil.....	18
7.2.1 Machine asynchrone auto-excitée par condensateurs fixes.....	19
7.2.1.1 Machine asynchrone auto excitée par un seul condensateur.....	19
7.2.1.2 Machine asynchrone auto-excitée par une batterie de condensateurs...20	
8. Qualité de l'énergie électrique produite par l'éolienne	20
9. Compensation de la puissance réactive.....	21
9.1 Différents types des systèmes FACTS.....	21
9.1.1 FACTS de type série.....	23
9.1.1.1 Compensateurs séries à base de thyristor.....	23
a) Capacité série commande par thyristor (TCSC)	23
b) Thyristor Switched Series Capacitor TSSC.....	23
c) Réactance Série Contrôlée par Thyristor TCSR.....	23
9.1.1.2 Compensateurs séries à base de GTO.....	24
9.1.2 FACTS de type parallèle.....	24
9.1.2.1 SVC (Static Var Compensator)	24
9.1.2.2 STATCOM (Static Compensator)	25
9.1.3 Compensateurs hybrides série-shunt	
9.1.3.1 Contrôleur unifié de l'écoulement de puissance (UPFC)	26
9.1.3.2 IPFC (Interline Power Flow Controller)	26
9.1.3.3 Régulateur d'angle de phase contrôlé par thyristor (TCPAR)	26
9.2 Application des FACTS	27
10. Les systèmes FACTS dans le fonctionnement autonome.....	28
10.1 SVC (Static Var Compensation).....	29
10.2 STATCOM	30
11. Conclusion.....	31

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone à cage

1. Introduction	32
2. Présentation générale de la machine asynchrone	32
3. Modélisation de la machine asynchrone.....	32
3.1 Modèle linéaire.....	33
3.1.1 Equations générales de la machine asynchrone	33

Sommaire

3.1.2	Modèle diphasé de la machine asynchrone en fonctionnement linéaire	34
3.1.2.1	Transformation de Park	35
3.2	Modèle saturé	38
3.2.1	Description du phénomène	38
3.2.2	Répartition spatiale du flux	40
4.	Résultat de simulation en fonctionnement moteur avec le modèle non linéaire	46
5.	conclusion	48

Chapitre III : Simulation de la génératrice asynchrone auto-excitée

1.	Introduction	49
2.	Modélisation de l'auto-amorçage	49
2.1	Modélisation de l'auto-amorçage à vide	50
2.2.1	Cas linéaire	50
2.2.2	Cas non linéaire	50
2.2	Modélisation de l'auto-amorçage en charge	51
3.	Résultats de simulation et interprétations	52
3.1	Eude de l'auto amorçage à vide	52
3.1.1	Effet de la vitesse d'entraînement	54
3.1.2	Effet de la capacité d'excitation	55
3.1.3	Evolution de la capacité minimale en fonction de la vitesse	55
3.2	Fonctionnement en charge	56
3.2.1	Fonctionnement et Caractéristique de la charge R	58
3.2.2	Fonctionnement de la charge RL	61
3.2.3	Fonctionnement et Caractéristique de la charge RCs	62
3.2.4	Fonctionnement et Caractéristique de la charge RLCs	64
4.	Conclusion	66

Chapitre IV : Contrôle de la tension de la génératrice par un STATCOM

1.	Introduction	67
2.	Description du système	67
2.1	Modélisation de la charge	68
2.2	SATCOM	71
2.3	Mise en équation	72
2.4	Commande du Statcom	74

Sommaire

2.3.1	Contrôle des courants par hystérésis.....	74
2.3.2	Principe de la commande	75
3.	Résultats de simulation et interprétation.....	78
3.1	Test de poursuite	78
3.2	Test avec variation de la vitesse d'entraînement.....	80
3.3	Test avec variation de la charge.....	83
3.3.1	Charge équilibrée	83
3.3.2	Charge déséquilibrée.....	85
3.4	Test avec variation de la vitesse et de la charge.....	86
3.5	Test avec variation de la capacité d'auto –amorçage.....	89
4	Conclusion.....	91
	Conclusion Générale.....	92

Abréviations
Et
Nomenclatures

Nomenclature

Notations utilisées

Eolienne

E_c : énergie cinétique du vent.

v : vitesse de vent.

ρ : Masse volumique de l'air.

S_t : Surface balayée par la turbine éolienne.

P_t : Puissance de la turbine éolienne.

C_p : Coefficient de puissance.

C_m : Coefficient de couple.

T_t : Couple de la turbine éolienne.

Ω_t : vitesse de la turbine éolienne.

R_t : Rayon de la turbine.

λ : Rapport de la vitesse en bout des pales.

v_n : Vitesse nominale de vent.

v_d : Vitesse démarrage du vent.

v_{max} : Vitesse maximale.

P_n : Puissance nominale.

Génératrice

$[V_{sabc}]$: Matrice des tensions statoriques.

$[V_{rabc}]$: Matrice des tensions rotoriques.

$[i_{sabc}]$: Matrice des courants statoriques.

$[i_{rabc}]$: Matrice des courants rotoriques.

$[\varphi_{sabc}]$: Matrice des flux statoriques.

$[\varphi_{rabc}]$: Matrice des flux rotoriques.

$[R_s]$: Matrice des résistances statoriques.

$[R_r]$: Matrice des résistances rotoriques.

$[V_{sdqo}]$: Matrice des tensions statoriques dans les axes « d, q, o » du modèle.

$[i_{sdqo}]$: Matrice des courants statoriques dans les axes « d, q, o » du modèle.

$[\varphi_{sdqo}]$: Matrice des flux statoriques dans les axes « d, q, o » du modèle.

$[V_{rdqo}]$: Matrice des tensions rotoriques dans les axes « d, q, o » du modèle.

$[i_{rdqo}]$: Matrice des courants rotoriques dans les axes « d, q, o » du modèle.

$[\varphi_{rdqo}]$: Matrice des flux rotoriques dans les axes « d, q, o » du modèle.

T_{em} : Couple électromagnétique.

g : Glissement.

M : Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

ω_s : Pulsation des signaux statoriques.

ω_r : Pulsation du champ rotorique.

i_m : Courant magnétisant total.

i_{md}, i_{mq} : Courants magnétisants totaux dans les axes « d, q ».

i_{sd}, i_{sq} : Courants magnétisants statoriques dans les axes « d, q ».

i_{rd}, i_{rq} : Courants magnétisants rotoriques dans les axes « d, q ».

i_{chd}, i_{chq} : Courants de charges dans les axes « d, q ».

$\varphi_{md}, \varphi_{mq}$: Flux magnétisants dans les axes « d, q ».

L_m : Inductance magnétisante statique.

L_m' : Dérivée de l'inductance magnétisante.

L_{md}, L_{mq} : Inductance magnétisante dynamique sur l'axe « d, q ».

L_{dq} : Inductance de couplage croisé entre les axes « d, q ».

STATCOM

S_a, S_b, S_c : Fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur.

e_a, e_b, e_c : Tensions aux bornes alternatives de l'onduleur.

V_{dc} : Tension du bus continu.

i_{dc} : Courant du côté continu.

$U_{sab}, U_{sbc}, U_{sca}$: Tensions d'entrée entre phases du Statcom.

Le filtre

L_f : Inductance du filtrage.

R_f : Résistance du filtrage.

Le bus continu

C_{dc} : Capacité de filtrage du bus continu.

Grandeurs liés à la commande

V_t : Amplitude de tensions alternative statoriques.

$u_{a,b,c}$: Vecteurs des tensions unitaires en phase avec les tensions statoriques.

$w_{a,b,c}$: Vecteurs des tensions unitaires en quadrature avec les tensions statoriques.

$V_{t_réf}$: Amplitude de référence des tensions alternatives statoriques.

$V_{dc_réf}$: Tension continue de référence.

$I_{sad}^*, I_{sbd}^*, I_{scd}^*$: Courants de références en phase.

$I_{saq}^*, I_{sbq}^*, I_{scq}^*$: Courants de références en quadrature.

$I_{sq}^*, I_{sq}^*, I_{sq}^*$: Courants de références finales.

K_{id}, K_{pd} : Constantes de gain proportionnel et intégral respectivement de contrôleur PI de la tension du bus continu.

K_{iq}, K_{pq} : Constantes de gain proportionnel et intégral de contrôleur PI de la tension alternative.

La charge

R : Résistance de la charge.

L: Inductance de la charge.

Cs : Capacité de la charge.

Abbreviations

FACTS: Flexible Alternative Current Transmission System.

TCSC: Thyristors Controlled Série Compensator.

TSSC: Thyristor Switched Series Capacitor.

TCSR: Thyristor Switched Serie Reactor.

SSSC: Static Synchronous Series Compensator.

STATCOM: Static Synchronous Compensator.

SVC: Static Var Compensator.

B_{SVC} : Susceptance totale de SVC.

RCT: Réactances Commandées par Thyristor.

TCR: Thyristor controlled Reactor.

TSC: Thyristor Switched Capacitor.

TSR: Thyristor Switched Reactor.

UPFC: Unified Power Flow Controller.

IPFC: Interline Power Flow Controller.

TCPAR: Thyristor Controlled Phase Angle Regulator.

MLI : Modulation par largeur d'impulsion.

PWM: Pulse Width Modulation.

IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistors.

GTO: Gate Turn Off.

SEIG: Self Excited Induction Generator.

EPRI : Electric Power Research Institute.

Liste des figures

Liste des figures

Figure	Titre	page
Figure I.1	Principe de conversion de l'énergie dans une éolienne	5
Figure I.2	Eoliennes à axe vertical	7
Figure I.3	Éoliennes à axe horizontal	8
Figure I.4	Turbines éoliennes en amont et en aval	8
Figure I.5	Éléments constituant une éolienne	9
Figure I.6	Caractéristique puissance /vitesse d'une éolienne.	11
Figure I.7	Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à vitesse fixe	13
Figure I.8	Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à fréquence variable	14
Figure I.9	Système éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation à fréquence variable.	15
Figure I.10	Système éolien basé sur une machine synchrone à aimants permanents à fréquence variable	16
Figure I.11	Machine synchrone à reluctance variable connectée à un banc de capacités	18
Figure I.12	Machine asynchrone auto-excitée avec un seul condensateur	20
Figure I.13	Machine asynchrone auto – excitée avec une batterie de condensateurs	20
Figure I.14	Différentes systèmes de compensation de l'énergie réactive	22
Figure I.15	Schéma de principe a) TCSC ;b) TSSC; c) TCSR	23
Figure I.16	Schéma de principe du SSSC	24
Figure I.17	Structure d'un SVC, schéma équivalent	24
Figure I.18	STATCOM (Static Synchronous Compensator)	25
Figure I.19	Schéma de deux réseaux connectés	27
Figure I.20	Diagramme schématique pour l'application des FACTS	27

Liste des figures

Figure I.21	Schéma synoptique d'un système éolien avec un SVC	29
Figure I.22	STATCOM connectée à une charge autonome	
Figure II.1	Représentation des enroulements de la machine asynchrone triphasée et sa machine biphasée équivalente issue de la transformation de Park	35
Figure II.2	Disposition des enroulements suivant les axes d, q	37
Figure II.3	Phénomène d'auto-amorçage	39
Figure II.4	Représentation vecteurs courant et flux magnétisants	40
Figure II.5	Schéma bloc de simulation du démarrage du moteur sur réseau	46
Figure II.6	Allure du courant statorique de phase	46
Figure II.7	Evolution du couple électromagnétique	47
Figure II.8	Evolution de la vitesse	47
Figure III.1	Modèle diphasé de la génératrice auto-amorcée alimentant une charge	49
Figure III.2	Schéma équivalent lors de l'auto-amorçage à vide	51
Figure III.3	Génératrice auto-amorcée alimentant une charge autonome	52
Figure III.4	Evolution de la tension	52
Figure III.5	Simulation de l'évolution du courant statorique	53
Figure III.6	Courant de magnétisation à vide	53
Figure III.7	Simulation de l'évolution de l'inductance mutuelle	54
Figure III.8	Influence de la vitesse sur la tension d'auto amorçage	54
Figure III.9	Influence de la capacité sur la tension d'auto amorçage	55
Figure III.10	Simulation de l'évolution de la capacité en fonction de la vitesse pour une tension fixe	56
Figure III.11	Evolution de la tension de ligne statorique en charge R	56
Figure III.12	Evolution du Courant de ligne statorique en charge R	57

Liste des figures

Figure III.13	Courant de magnétisation en charge	57
Figure III.14	Evolution du Courant de charge	58
Figure III.15	Simulation de l'évolution de la tension efficace en fonction de la valeur de la résistance (pour $C=100\mu\text{F}$	58
Figure III.16	Simulation de l'évolution de la tension efficace en fonction de la valeur de la résistance (pour $C=110\mu\text{F}$).	59
Figure III.17	Evolution de la fréquence en fonction du courant de charge	59
Figure III.18	Evolution de la tension efficace en fonction du courant de charge	60
Figure III.19	Simulation de l'évolution de la tension efficace en fonction de la Puissance	60
Figure III.20	Evolution de la tension de ligne statorique en charge RL	61
Figure III.21	Evolution du courant de ligne statorique en charge RL	62
Figure III.22	Evolution du courant de magnétisation en charge RL	62
Figure III.23	Evolution de la tension de ligne statorique en charge RCs	63
Figure III.24	Evolution du courant de ligne statorique en charge RCs	63
Figure III.25	Evolution du courant de magnétisation en charge RCs	64
Figure III.26	Evolution de la tension de ligne statorique en charge RLCs	64
Figure III.27	Evolution du courant de ligne statorique en charge RLCs	65
Figure III.28	Evolution du courant de magnétisation en charge RLCs	65
Figure IV.1	Schéma global du système étudié	68
Figure IV.2	Transformation étoile-triangle de la charge et des condensateurs d'amorçage	68
Figure IV.3	Schéma équivalent des impédances	69
Figure IV.4	Schéma de principe d'un STATCOM	71
Figure IV.5	Cellule de commutation	72
Figure IV.6	Schéma de principe de la bande d'hystérésis	74

Liste des figures

Figure IV.7	Schéma de principe de la commande à hystérésis	75
Figure IV.8	Description du système plus principe de la commande	76
Figure IV.9	Module de la tension statorique et sa référence	79
Figure IV.10	Tension continue et sa référence	79
Figure IV.11	Allure des tensions statoriques	80
Figure IV.12	Profil de la vitesse	80
Figure IV.13	Tension du bus continu	81
Figure IV.14	Module de la tension statorique	81
Figure IV.15	Evolution des tensions statorique	82
Figure IV.16	Evolution des courants statorique	82
Figure IV.17	Evolution du courant de l'ensemble charge-condensateur.	82
Figure IV.18	Profile de charge appliquée	83
Figure IV.19	Réponse de la tension du bus continu	83
Figure IV.20	Réponse du module de la tension statorique.	84
Figure IV.21	Tensions statoriques	84
Figure IV.22	Courants statoriques	85
Figure IV.23	Allure du module de la tension statorique	85
Figure IV.24	Allure de la tension du bus continu.	86
Figure IV.25	Allure des tensions statoriques	86
Figure IV.26	Variation de la vitesse	87
Figure IV.27	Tension du bus continu V_{dc} .	87
Figure IV.28	Module de la tension alternative V_s .	87
Figure IV.29	Tension statorique triphasée	88
Figure IV.30	Courants statoriques	88
Figure IV.31	Profile de variation de la capacité	89

Liste des figures

Figure IV.32	Représentation de la tension du bus continu	89
Figure IV. 33	Représentation du module de la tension alternative	89
Figure IV.32	Tension statorique en triphasée	90
Figure IV.33	Courants statoriques triphasée	90

Introduction Générale

Introduction générale

Depuis la révolution industrielle la consommation totale d'énergie électrique dans le monde entier est augmentée, elle a plus que doublé en 40 ans (de 1973 à 2013). La grande partie de l'énergie électrique utilisée par l'humanité provient des énergies fossiles. Selon l'agence internationale de l'énergie, ses ressources conventionnelles représentent 80,4 % de production d'énergie globale, elles sont à l'origine de 40 % des émissions mondiales de CO2 **[Lop 08]**

Dans le cadre du développement durable, face au double enjeu planétaire posé les risques de pénurie les matières fossiles et leurs effets sur le changement climatique, les gouvernements engagés dans le Protocole de Kyoto doivent donc multiplier leurs actions dans le secteur de la production d'énergie électrique afin de développer des sources d'Energies Renouvelables, propres et inépuisables, ces dernières représentent un gisement considérable au niveau mondial **[Che 08]**

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici et au future, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables, pour cela plusieurs travaux de recherches ont été lancés dans plusieurs laboratoires de recherche dans le domaine de développement durable, pour but de satisfaire la demande de consommation énergétique d'une part et d'autre part pour réduire les effets négatives des ressources d'origine fossile sur l'environnement moins couteuses. La solution s'avère donc dans l'utilisation des énergies renouvelables parmi celles-ci, l'énergie éolienne apparaît clairement en bonne place comme énergie complémentaire à l'énergie utilisée **[Ben 13] [Vik 14]**.

Dans ce cadre, l'exploitation de l'énergie éolienne pour la génération de l'énergie électrique connaît un grand essor. L'aspect le plus visible de cette évolution est, sans conteste, celui de l'utilisation des grandes centrales de production de masse, reliées au réseau, et dont la puissance unitaire ne cesse de croître. Un autre aspect, moins visible mais qui a tout autant d'importance, est celui des petites unités de production. En effet, ces dernières sont de plus en plus prisées pour des fonctionnements autonomes pour assurer l'alimentation de sites isolés et/ou autonomes ou encore, avec l'apparition de nouvelles architectures à axe vertical, pour être exploitées dans un environnement urbain.

Dans le cas de l'utilisation en centrales autonomes, différentes machines électriques peuvent assurer la conversion électromécanique en tant que génératrice **[Idj 10]**.

Introduction Générale

La plupart des génératrices utilisées par les éoliennes sont des génératrices asynchrones triphasées. Celles-ci ont plusieurs avantages : elles sont robustes, leur coût est faible. Par ailleurs, leurs inconvénients se trouvent au niveau de la consommation d'énergie réactive, qu'elles tirent soit du réseau, soit elles sont compensées par une batterie de condensateurs d'où la possibilité de fonctionnement autonome.

Les génératrice asynchrone auto-excitée sont considérés de plus en plus dans les applications autonomes des systèmes éoliens cette dernière est située entre deux grandeurs aléatoires et fluctuantes qui sont le vent et la charge électrique [Mek 04]. Ces derniers posent un certain nombre de problèmes (contrôle de la tension, de la fréquence, auto-amorçage,...).

Toutefois, en fonctionnement autonome, la vitesse de rotation et la charge n'étant pas fixes, la tension statorique de la génératrice peut varier dans de grandes proportions. Il devient alors nécessaire d'utiliser un système de régulation approprié afin de contrôler et améliorer cette tension [Mat 14].

En effet, l'objectif de ce travail est de la préoccupation principale de ce fonctionnement est le maintien la tension générée à des valeurs constantes quelles que soient la vitesse de rotation de l'éolienne et la puissance demandée. Des travaux dans ce domaine ont déjà été initiés dans des laboratoires internationaux [Ben 13][Bhi 06] [Bhi14] [Bou 13][Idj 10][VIK 14].

Il faudra vraisemblablement, dans l'avenir, compléter leur action en mettant en œuvre des dispositifs électroniques de puissance à grande vitesse de réponse, récemment développés et connus sous l'appellation FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System) pour la compensation d'énergie réactive [Mok 12]. L'évolution des topologies de l'électronique de puissance et leurs intégrations dans les systèmes de conversion électromécaniques a engendré des améliorations majeures sur ces derniers, telles que (la compensation flexible de l'énergie réactive, le contrôle continu, l'amélioration du facteur de puissance etc...).

Le travail de recherche de ce mémoire est motivé par le souci d'améliorer les performances du système de contrôle de la tension d'une génératrice asynchrone au moyen des dispositifs FACTS [Ali 99] [Bel 12] [Mok 12]. Nous nous intéressons dans ce travail à la modélisation et l'intégration de dispositif, FACTS du types shunt (STATCOM) tout en améliorant la qualité de la tension produite par une génératrice asynchrone auto-excitée.

Le premier chapitre est consacré dans sa première partie à présenté une description d'une manière générale d'un système éolien et des différentes chaînes de conversion de

Introduction Générale

l'énergie éolienne en énergie électrique. On exposera les différentes associations machines électriques – convertisseurs pouvant être accouplées à une éolienne. Dans la deuxième partie, on présentera l'étude théorique des différents systèmes FACTS en générale à savoir leur principe de fonctionnement et une classification des différents types qu'ils existent dans la littérature comme le SVC, STATCOM, SSSC, TCSC et UPFC...etc. Enfin, nous choisissons la structure de types shunt qui fera l'objet de notre étude en fonctionnement isolé et autonome.

Le deuxième chapitre traite de la modélisation de la machine asynchrone à cage d'écurie. Le modèle est établi en utilisant la transformation de Park en régime linéaire puis en régime saturé. La prise en compte de la saturation et l'effet croisé impose de définir précisément toutes les inductances qui interviennent dans le modèle équivalent. Un essai de démarrage de la machine en fonctionnement moteur en régime non linéaire sera étudié par simulation.

Dans le troisième chapitre est basée sur l'étude de l'auto-amorçage de la génératrice asynchrone à cage avec l'usage des condensateurs dans les deux cas de modèle : linéaire et non linéaire. Nous présentons par la suite une étude par simulation sur l'influence des changements de la vitesse du rotor, des capacités d'excitation, et des charges aux bornes de la génératrice auto-excitée sur la tension et le courant produits par le générateur asynchrone.

Afin de valider le modèle proposé pour cette chaîne de conversion, le quatrième chapitre présente le rôle principal du STATCOM sur le contrôle de la tension en boucle fermée de la SEIG afin de garantir une tension générée constante. Cela étant réalisé par la commande des compensateurs statiques (STATCOM) à base de l'onduleur de tension ayant le rôle de compenser les éventuelles perturbations de la fourniture d'énergie électrique causées par deux grandeurs aléatoires et fluctuantes qui sont le vent et la charge. Des simulations seront alors réalisées dans les différents tests sous l'environnement Matlab/Simulink.

On terminera par une conclusion générale et quelques perspectives et une bibliographie indiquant quelques sources d'informations utilisées.

Chapitre I
Généralités sur les Systèmes
Eoliens et les Dispositifs
FACTS

1. Introduction

Depuis l'avènement des moulins à vent jusqu'aux premiers aérogénérateurs, la technologie des aéromoteurs (ou capteurs éoliens) a connu une évolution fulgurante surtout ces dernières décennies; notamment dans le domaine de la production d'énergie électrique. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et leurs structures sont de plus en plus performantes [Har 03] [Mek04].

De nombreux dispositifs de production de l'énergie éolienne existent, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones sous leurs diverses formes. En fonctionnement autonome la machine asynchrone à cage d'écureuil reste celle qui prime sur les autres vu ses nombreux avantages (robustesse, standardisation, faible maintenance, ...). Toute fois, la vitesse de rotation et la charge n'étant pas fixes, la puissance de sortie peut varier dans des grandes proportions. Il devient alors nécessaire d'utiliser un système de régulation approprié afin de maintenir cette puissance à une valeur constante [Idj 05] [Lou 10].

2. Principe de fonctionnement d'une éolienne

2.1. Descriptif

Un système éolien où avec un autre terme un aérogénérateur où encore une éolienne peut être défini comme étant :

Un système composé d'éléments aptes à transformer une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'un convertisseur électromécanique [Mok 12][Poi 03].

2.2. Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique

L'énergie cinétique du vent est captée par les pâles afin de la transformer en énergie mécanique. La transformation de cette dernière en énergie électrique est assurée par un générateur électrique de type synchrone ou asynchrone. La figure (I.1) représente le principe de conversion de l'énergie dans une éolienne à base d'une génératrice asynchrone à cage d'écureuil [Bou 12].

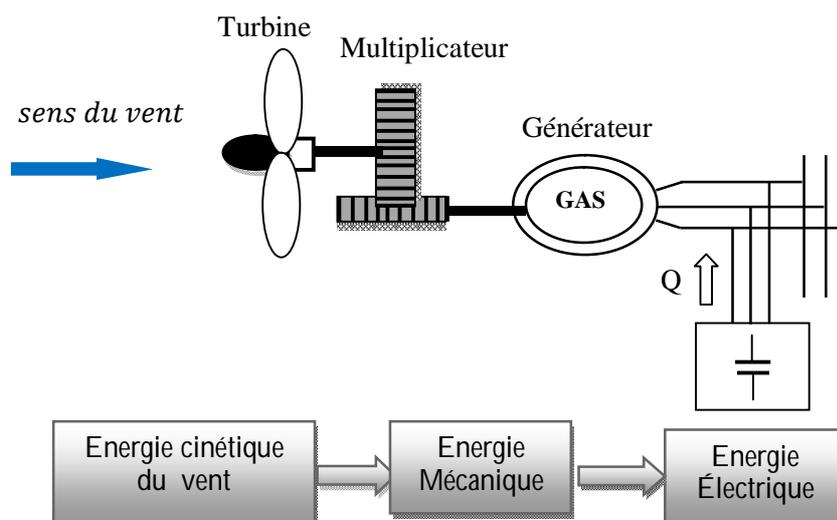


Figure I.1: Principe de conversion de l'énergie dans une éolienne

Le vent est caractérisé par trois grandeurs variables pendant le temps: Sa direction, sa vitesse et son intensité. L'appareil qui mesure le vent et le plus utilisé aujourd'hui est l'anémomètre à coupelle.

L'énergie éolienne provient de l'énergie cinétique du vent, elle est fonction de la masse et de la vitesse du volume d'air. Dans l'hypothèse que la masse volumique de l'air est constante on peut dire que :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (\text{I.1})$$

Si, pendant l'unité de temps, cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'une hélice qui balaie une surface S , située perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent v , la puissance instantanée fournie serait, alors [Mek04].

$$P_v = \frac{1}{2}\rho S_t v^3 \quad (\text{I.2})$$

Avec : ρ : Densité de l'air $1.225 \text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$;

P_v : Puissance incidente sur le rotor ;

S_t : Représente la surface des pâles balayée par la masse d'air en mouvement.

Cette puissance ne peut être intégralement extraite et convertie car cela supposerait une vitesse de vent nulle après l'organe capteur, ce qui est physiquement impossible. La puissance P_t captée par la turbine éolienne est alors liée à la puissance P_v par un coefficient, appelé coefficient de puissance, dont l'expression est donnée sous la forme suivante :

$$C_p = \frac{P_t}{P_v} = \frac{P_t}{\frac{1}{2}\rho\pi R_t^2 v^3} \quad (\text{I.3})$$

Où R_t représente le rayon de la turbine.

Ce coefficient de puissance est intrinsèque à la turbine. Il est fonction de plusieurs paramètres (profil des pâles, matériaux.. etc) et admet une valeur maximale théorique, appelée limite de Betz, [Bou 13], qui est de $\frac{16}{27} \approx 0.5926$.

On définit également le coefficient de couple C_m , plus pratique pour élaborer les stratégies de commande d'une éolienne, par l'expression suivante :

$$C_m = \frac{T_t}{\frac{1}{2}\pi S_t R_t^3 v^2} \quad (\text{I.4})$$

Où T_t est le couple de la turbine éolienne de vitesse Ω_t .

Sachant que $P_t = T_t \Omega_t$, les coefficients C_m et C_p sont liés par la relation suivante : $C_p = \lambda C_m$ où λ appelée vitesse réduite, est définie comme étant le rapport de la vitesse linéaire des extrémités des pales ($\Omega_t R_t$) sur la vitesse instantanée du vent (v) Soit :

$$\lambda = \frac{R_t \Omega_t}{v} \quad (\text{I.5})$$

3. Différents types d'aérogénérateurs

Selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice, on classe les éoliennes en deux types :

3.1 Eoliennes à axe vertical

Ce type d'aérogénérateurs ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal [Poi 03]. Cette technologie d'éoliennes est bien adaptée aux zones de vents perturbés par des habitations et le relief de la végétation. Elles peuvent aisément s'intégrer à l'architecture des bâtiments et sont d'une conception très simple (roue montée sur un axe qui entraîne directement une génératrice).

Il existe principalement trois technologies VAWT (Vertical Axis Wind turbine): la turbine de type Savonius, dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres, les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur

entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur [Ham 08].



Figure I.2: Eoliennes à axe vertical

3.1.1. Rotor de Savonius

Il est constitué de deux demi-cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. L'écoulement interne favorise les caractéristiques de performance de la machine. Le coefficient C_p maximal atteint 0,3. Le rotor de Savonius est caractérisé par un grand couple de démarrage. A titre d'exemple, des machines de plusieurs kilowatts ont été réalisées pour assurer le pompage de l'eau dans les pays du Sahel; elles démarrent à des vitesses de vent faibles, voisines de 2 à 3 m/s. Ces systèmes présentent cependant beaucoup plus d'inconvénients que d'avantages dans les réalisations actuelles, en particulier ils nécessitent comme les systèmes à axe horizontal parallèle « au vent » un dispositif d'orientation. La récupération de l'énergie produite est en général beaucoup plus compliquée et se traduit souvent par une perte sensible du rendement global.

3.1.2. Rotor de Darrieus

Inventé par l'académicien français Darrieus au cours des années 1920-1935 repose sur l'effet de portance d'un profil soumis à l'action d'un vent relatif. Il existe quatre sortes de rotors de Darrieus: le rotor cylindrique, le rotor tronconique, le rotor à variation cyclique et le rotor parabolique [Khe 07].

3.2 Eoliennes à axe horizontal

C'est la structure la plus répandue dans les installations éoliennes, à cause de sa faible emprise au sol et son efficacité énergétique voir la Figure (I.3). Ces éoliennes captent le vent en hauteur et loin du sol [Boy 06] [Ham 08].



Figure I.3: Eoliennes à axe horizontal

La plupart des éoliennes modernes vendues sur le marché sont de conception tripale. La sélection du nombre de pâles dépend du profil du vent, du potentiel éolien du site et du fonctionnement de la machine électrique. Une éolienne à deux pâles a l'avantage d'économiser le coût d'une pale et de son poids équivalent, cependant, la vitesse de rotation nécessaire pour produire en sortie la même énergie est plus élevée. Ceci est un inconvénient, à la fois en ce qui concerne le rendement, mais aussi pour le bruit et la pollution visuelle.

Suivant leur orientation en fonction du vent, les HAWT sont dites en « amont » (up-wind) ou en « aval » (down-wind). La (figure I.4) montre les deux types mentionnés. Les premières ont le rotor face au vent; puisque le flux d'air atteint le rotor sans obstacle, le problème de « l'ombre de la tour » (tower shadow) est bien moindre. Néanmoins, un mécanisme d'orientation est essentiel pour maintenir en permanence le rotor face au vent. Les éoliennes à rotor en aval n'ont pas besoin de ce mécanisme d'orientation mais le rotor est placé de l'autre côté de la tour: il peut donc y avoir une charge inégale sur les pales quand elles passent dans l'ombre de la tour. De ces deux types d'éoliennes, celle en amont est largement prédominante [Kai 13] [Lop 08].

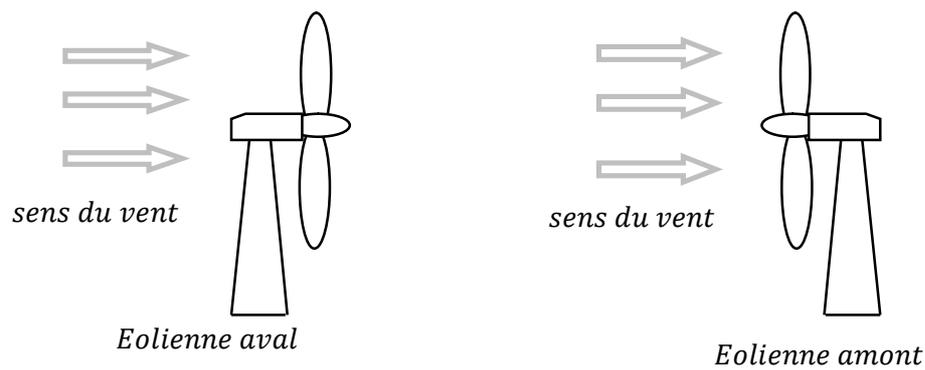


Figure I.4: Turbines éoliennes en amont et en aval

4. Composition d'une éolienne

Les principales composantes d'un système ordinaire de conversion de l'énergie éolienne sont une turbine, une génératrice triphasée, un multiplicateur de vitesse et un système de contrôle. Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de quatre éléments principaux [Mok 12][Mes 09] [Lav 05].

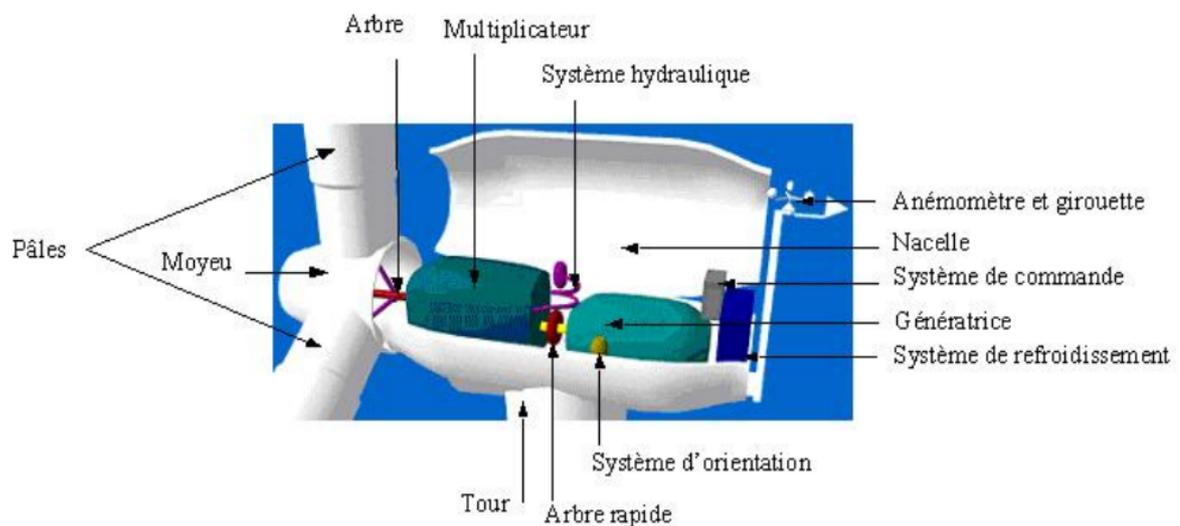


Figure I.5:Éléments constituant une éolienne.

4.1. Ailes ou pâles d'une éolienne : Les éoliennes modernes sont composées de deux à trois ailes, tournant autour d'un rotor à axe horizontal. Les pales de l'hélice d'une éolienne peuvent être en bois lamellé-collé, en plastique renforcé de fibre de verre, ou en métal... Le diamètre qu'elles balaient varie de 40 m à 120m. Elles ont pour rôle de capter l'énergie du vent et de la transférer ensuite au rotor.

4.2. Tour ou le mât d'une éolienne : Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique qui supporte la nacelle est le rotor de la turbine Il est important qu'il soit assez élevé (40 à 60 m de hauteur pour une éolienne de 500 kW) pour exploiter les vents les plus forts en altitude. la taille du mât est prise très légèrement supérieure au diamètre des pâles.

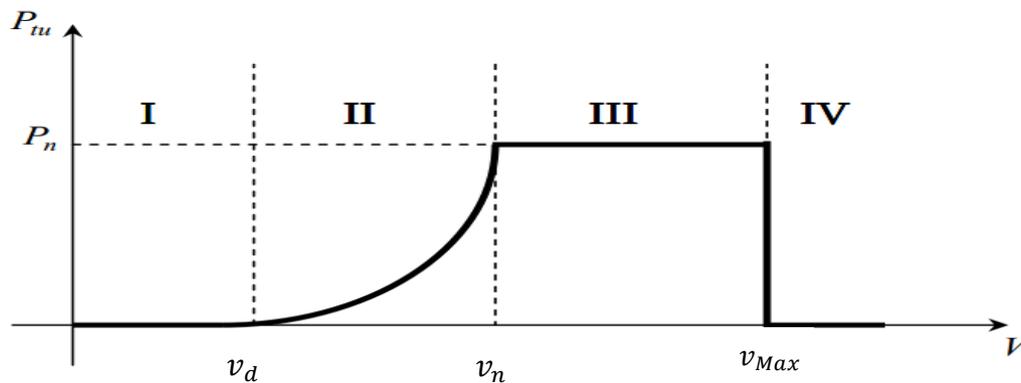
4.3. Partie électrique d'une éolienne: Dans les éoliennes destinées à produire de l'électricité, l'hélice fait tourner un générateur électrique situé en haut de la tour, dans le prolongement de l'axe de l'hélice de l'éolienne. Entre l'hélice et le générateur électrique de l'éolienne se trouve en général un multiplicateur de vitesse, car l'hélice de l'éolienne tourne à des vitesses d'environ 10 à 60 tours /min alors qu'un générateur électrique doit être entraîné à environ 1000 à 1500 tours / min [**Mok 12**].

4.4. Nacelle: Elle rassemble tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres, multiplicateur, roulement, le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge, le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone, les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent).

5. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

L'objectif de cette régulation est double, d'une part de protéger l'éolienne contre le vent fort et d'autre part de délimiter la puissance p_n . En effet, la turbine éolienne est dimensionnée pour fournir une puissance nominale à une vitesse de vent nominale v_n Pour des vitesses de vents supérieures à v_n , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques (turbines, mat et structure), de sorte que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas la puissance nominale pour laquelle l'éolienne a été conçue. Il y a d'autres grandeurs dimensionnant : v_d la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie et v_{max} la vitesse maximale de vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être stoppée pour des raisons de sûreté de fonctionnement [**Ben 12**] [**Mek 04**].

On peut définir quatre zones de fonctionnement, figure (I.6):



- ✚ La zone I: La vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible.
- ✚ La zone II: Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent.
- ✚ La zone III: La puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de p_n .
- ✚ La zone IV: La vitesse du vent devient trop forte. La turbine est arrêtée et la puissance extraite est nulle.

Il existe deux techniques principales pour cette régulation de puissance : le calage variable (les pales peuvent pivoter autour de leur axe longitudinal afin de réduire la portance et donc le couple moteur), dénommé en anglais "pitch control", et le décrochage aérodynamique (la conception des pales induit ce phénomène qui limite l'action du vent quand la vitesse de celui-ci dépasse sa valeur nominale), dénommé en anglais "stall control" [Lav 05][Mek 04].

6. Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne

Différents types de génératrices électriques peuvent être utilisés pour convertir l'énergie mécanique produite par le mouvement de l'arbre éolien en énergie électrique, en d'autres mots, pour la génération de l'énergie éolienne. Des facteurs techniques et économiques déterminent le type de la machine employée pour chaque application [Lou 10][Mek 12].

On peut regrouper les générateurs éoliens selon différentes catégories. Ils peuvent être classés selon:

- ✚ La nature du convertisseur électromécanique (machine synchrone, asynchrone, etc...)
- ✚ La nature de l'accouplement mécanique (présence de multiplicateur de vitesse ou attaque directe).
- ✚ Le type de fonctionnement (vitesse fixe ou variable).

6.1. Eoliennes connectées au réseau électrique

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement. Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration. Les deux types de machines électriques les plus utilisés dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes. On donne par la suite les principales caractéristiques de chaque type de ces machines [Ben 12] [Lav 05].

6.1.1. Eoliennes à vitesse fixe

Ce mode de fonctionnement concerne principalement les éoliennes dont la vitesse de rotation est régulée par orientation des pâles (pitch control). Généralement, ces éoliennes reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écurie directement reliée à un réseau d'énergie puissant qui impose sa fréquence (50Hz) aux grandeurs statoriques. Pour assurer un fonctionnement en générateur, il est nécessaire que la vitesse de rotation de la MAS soit au-delà du synchronisme (glissement négatif) [Idj 10].

Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé. La demande de puissance réactive est compensée par la connexion d'un groupe de condensateurs en parallèle avec le générateur, ou par la mise en œuvre d'un convertisseur statique de puissance.

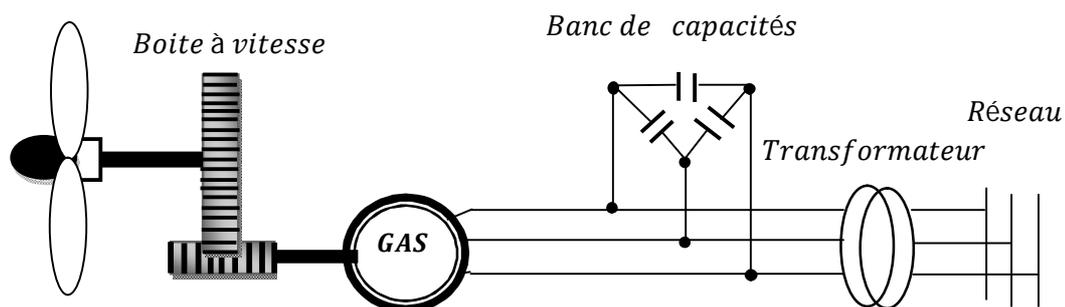


Figure I.7: Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à vitesse fixe

✚ Les avantages principaux

- ✓ Système électrique plus simple,
- ✓ Plus grande fiabilité,
- ✓ Pas de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne,
- ✓ Pas besoin de système électronique de commande,
- ✓ Moins cher.

✚ Leurs inconvénients majeurs résident en :

- ✓ Une puissance extraite non optimale : Ce type d'éoliennes n'offre quasiment pas de possibilité de réglage de la puissance générée.
- ✓ L'absence de gestion de l'énergie réactive par le générateur asynchrone : La connexion directe au réseau d'une génératrice asynchrone nécessite l'ajout de bancs de condensateurs afin de limiter la puissance réactive appelée à ce réseau [Ben 12] [Idj 10].

6.1.2. Eoliennes à vitesse variable

L'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique par l'éolienne. Ensuite, la vitesse de rotation de l'éolienne (de 10 à 200tr/min) est adaptée à celle de la génératrice classique (typiquement de 750 à 3000 tr/min) avec un multiplicateur de vitesse. La génératrice a pour rôle de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique. Le générateur peut ensuite être lié directement ou indirectement au réseau. S'il est lié directement au réseau, alors tourne à vitesse «fixe» ou très faiblement variable en jouant sur le glissement de la machine asynchrone. Si le générateur est lié indirectement au réseau, L'introduction de convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine électrique. Ce

convertisseur autorise le fonctionnement à vitesse variable de ce type de chaîne permettant d'utiliser une machine synchrone, asynchrone ou encore machine spéciale. Ceci entraîne une amélioration du rendement énergétique du système.

La vitesse variable permet également d'améliorer la qualité de la puissance électrique produite, en introduisant de la souplesse dans la réaction du système face aux fluctuations brusques de la vitesse du vent [Mek 04].

Cette dernière est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue.

✚ Les avantages de cette configuration sont les suivants :

- ✓ Augmentation du rendement énergétique,
- ✓ Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance,
- ✓ Réduction des efforts subis par le train de puissance,
- ✓ Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

✚ L'utilisation de convertisseurs de puissance « complexes » demeure son principal inconvénient [Idj 10].

Contrairement aux dispositifs à vitesse fixe qui utilisent presque exclusivement des génératrices asynchrones à cage, les aérogénérateurs à vitesse variable peuvent mettre en œuvre d'autres convertisseurs électromécaniques.

6.1.2.1 Machine asynchrone à cage

La machine asynchrone à cage peut être utilisée en fonctionnement à vitesse variable en introduisant un variateur de fréquence comme il est montré sur la figure (I.8) suivante :

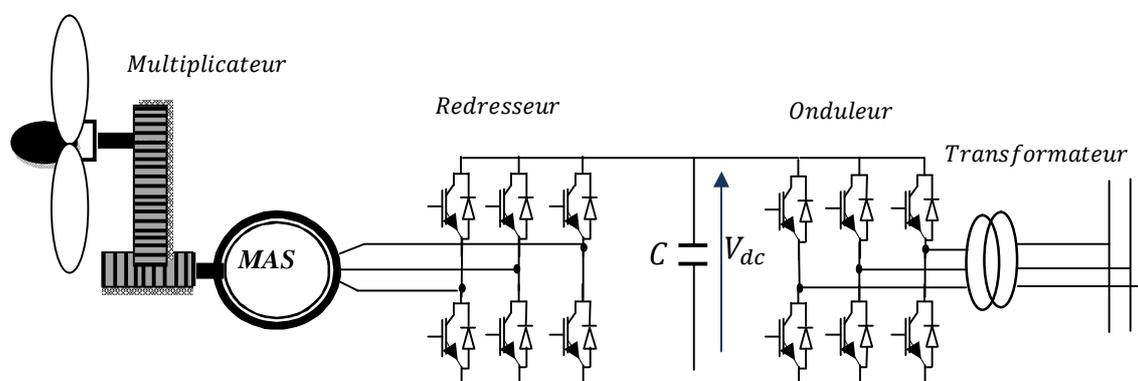


Figure I.8: Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à fréquence variable.

Cette configuration autorise un fonctionnement à vitesse variable, sans limite physique théorique, mais elle est globalement coûteuse. En effet, le dimensionnement du variateur de fréquence doit être à 100% de la puissance nominale du stator de la machine électrique, donc très rarement exploitée [Idj 10].

6.1.2.2 Machine asynchrone à double alimentation

Les générateurs les plus utilisés pour les éoliennes à vitesse variable de forte puissance sont les machines asynchrones à double alimentation (MADA) car leurs caractéristiques permettent d'accueillir une force mécanique variable [Bou 11] [Ken 11].

Le stator de la génératrice est directement couplé au réseau, le plus souvent par un transformateur. A la place du rotor à cage d'écurueil, ces machines asynchrones ont un rotor bobiné dont le réglage électronique assure la variation du glissement [Bou 09] [Ben 12].

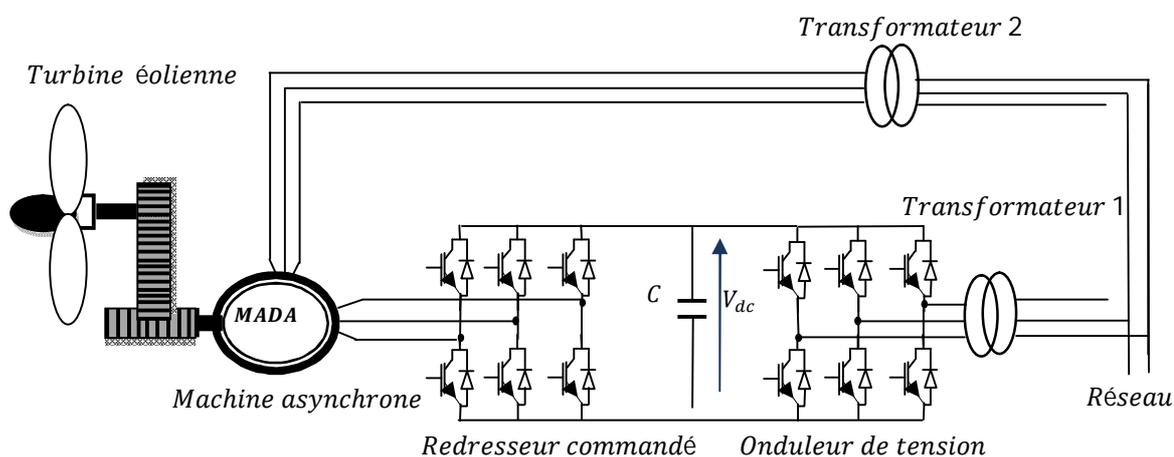


Figure I.9: Système éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation à fréquence variable.

Le surcoût engendré par la présence de bobinages au rotor est compensé par l'économie réalisée sur les convertisseurs (deux convertisseurs à MLI). En général, le dimensionnement de la chaîne se limite à 25% de la puissance nominale du stator de la machine électrique, ce qui suffit à assurer une variation sur 30% de la plage de vitesse. C'est là son principal avantage tandis que son inconvénient majeur est lié aux interactions avec le réseau, en particulier les surintensités engendrées par des creux de tension du réseau [Bou 13] [Boy 09].

6.1.2.3 Machine synchrone

L'inconvénient des éoliennes basées sur une génératrice asynchrone à rotor bobiné est de nécessiter un système de bagues et de balais et un multiplicateur, induisant des coûts de maintenance en particulier pour les projets off-shore situés en milieu salin. Pour limiter ces inconvénients, certains constructeurs ont développé des éoliennes basées sur des machines synchrones à grand nombre de paires de pôles et couplées directement à la turbine, évitant ainsi le multiplicateur. Si de plus la génératrice est équipée d'aimants permanents, le système de bagues et de balais est éliminé [Bou 11].

Les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes [Mek 04].

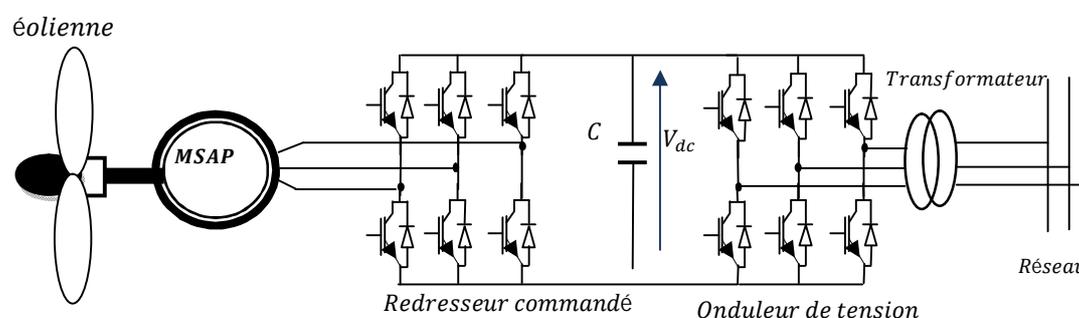


Figure I.10: Système éolien basé sur une machine synchrone à aimants permanents à fréquence variable

Comme dans le cas des machines asynchrones à cage, l'interface entre la génératrice et le réseau est généralement constituée d'un redresseur et un onduleur. De plus, le redresseur peut être non commandé (à diodes) ou commandé. La solution la plus intéressante consiste à coupler le stator de la génératrice synchrone à aimants permanents à travers deux onduleurs à MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en mode onduleur réseau. Dans ce cas, l'interfaçage avec le réseau peut être entièrement contrôlé via le convertisseur connecté à ce réseau, tandis que le convertisseur connecté à la génératrice permet de contrôler la puissance générée par celle-ci. De plus, ce type de configuration permet d'assurer un découplage entre le comportement du générateur éolien et le comportement du réseau. Toutefois, les deux convertisseurs doivent être dimensionnés pour la puissance nominale de la génératrice, ce qui constitue le principal inconvénient de cette configuration [Bou 13].

7. Eoliennes en fonctionnement isolé et autonome

Le terme « Systèmes autonomes » regroupe tous les systèmes qui produisent leur propre électricité à partir de sources d'énergies renouvelables. L'autonomie énergétique garantit l'alimentation du système en période d'exploitation sans raccordement au réseau électrique public. Les systèmes éoliens dans les applications isolées et autonomes sont généralement conçus pour répondre à un besoin énergétique allant du simple éclairage à l'électrification complète de villages.

Dans cette partie, nous présenterons les différentes solutions de conversion d'énergie éolienne utilisées dans les deux systèmes isolés et autonomes.

7.1 Machine synchrone

7.1.1. Machine synchrone à rotor bobiné

Font appel, le plus souvent, à une excitatrice associée à un redresseur tournant, pour éliminer tout contact glissant. Par conséquent, les sites isolés ne sont adaptés à ces génératrices qu'en présence d'une batterie ou d'une source de tension indépendante. Le rotor peut être à pôles lisses ou saillants et est généralement équipé de circuits amortisseurs.

7.1.2 Machines synchrones à aimants permanents

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables [Mek 04] [Haq 08]. La machine synchrone à aimants permanents est une solution très intéressante dans les applications éoliennes isolées et autonomes vu ses avantages (un bon rendement et un bon couple massique) et la non nécessité d'une source d'alimentation pour le circuit d'excitation. Ces qualités sont contrebalancées par un coût plus élevé que les machines asynchrones. Toutefois, différentes structures de machines synchrones à aimants permanents alimentant des charges autonomes à travers des dispositifs d'électronique de puissance existent [Bel 10] [Idj 10]:

- ✓ Structure avec redresseur à diode ;
- ✓ Structure avec redresseur à diodes et hacheur dévolteur ou en pont ;
- ✓ Structure avec redresseur à MLI.

7.1.3 Machines à reluctance variable

Parmi les génératrices à l'étude, plus particulièrement pour les entraînements directs, figurent les machines à réluctance variable. Cette structure a un stator dont la structure et le bobinage sont similaires à ceux d'une machine asynchrone. Son rotor est saillant et peut être muni d'une cage d'écurueil qui permet d'assurer le démarrage direct sur le réseau et d'améliorer la stabilité de fonctionnement au synchronisme. Comme la machine asynchrone, cette structure absorbe de la puissance réactive pour sa magnétisation et dans sa version classique, son facteur de puissance est relativement faible qui limite son domaine d'application à quelques dizaines de kilowatts. Néanmoins, la cage d'amortisseurs n'étant pas obligatoire, son coût de fabrication peut être très attractif dans une utilisation en éolienne autonome [Mes 09].

Le fonctionnement générateur de cette structure est très proche de celui d'une machine asynchrone à cage. Par conséquent, elle peut être utilisée en autonome débitant sur un banc de capacités en parallèle à la charge figure (I.11) ou encore sur un redresseur à MLI.

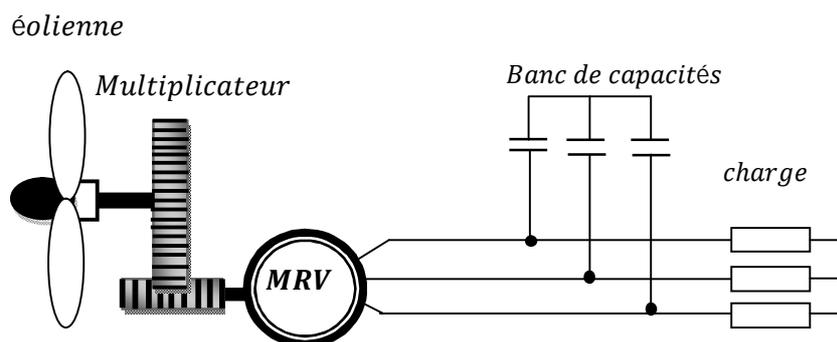


Figure I.11: Machine synchrone à reluctance variable connectée à un banc de capacités.

7.2 Générateur asynchrone à cage d'écurueil

Jusqu'à présent le Générateur Asynchrone à Cage correspond au choix prépondérant de par sa simplicité, et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs. Son bon rendement et une maintenance réduite. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances [Lop 08] [Mok 12].

La machine asynchrone à cage reste sans conteste celle qui est la plus largement répandue pour des applications en conversion éolienne autonome ou isolée et ce pour des raisons de robustesse et de prix.

Le revers de la médaille est constitué d'une tension dont l'amplitude et la fréquence sont, dans le cas d'un fonctionnement autonome, très sensibles aux variations de vitesses et de charges. Par ailleurs, comme mentionné précédemment, la génératrice asynchrone fournit de la puissance active mais absorbe de la puissance réactive nécessaire à sa magnétisation, ce qui constitue son principal inconvénient [Idj 10]. Dans ce qui suit, nous donnons une synthèse de quelques systèmes permettant de fournir l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la génératrice asynchrone et de stabiliser sa tension statorique.

7.2.1 Machine asynchrone auto-excitée par condensateurs fixes

Parmi les problèmes rencontrés dans l'étude de la génératrice asynchrone auto excitée est le choix adéquat des capacités d'auto amorçage.

Il existe plusieurs configurations dans la littérature pour connecter les capacités aux bornes de la machine.

7.2.1.1 Machine asynchrone auto excitée par un seul condensateur

Généralement lorsqu'on alimente des charges monophasées, une seule capacité est suffisante pour que la génératrice asynchrone à cage d'écureuil puisse produire la puissance demandée par la charge, ce qui permet de réduire le cout total du système. Cependant, en cas de défaut, soit dans la phase ou le condensateur est connecté, ou dans le lui-même, la machine risque de se démagnétiser, vu l'absence d'une autre source d'énergie réactive.

Des travaux ont été effectués sur ce sujet traitant des cas où le bobinage de la machine est connecté en étoile ou en triangle. Dans le cas où la machine est connectée en étoile, la capacité d'excitation peut être branchée entre deux phases comme elle peut être branchée entre une phase et le neutre.

Dans le cas où la machine est connectée en triangle, les structures de la figure (I.12) La capacité d'excitation est branchée entre deux bornes du triangle. La charge est monophasée et elle peut être branchée en parallèle avec la capacité (figure (I.12-a)) ou entre l'une des deux bornes où la capacité est branchée et la borne restante du triangle (figure (I.12-b)).

Dans le cas où la machine est connectée en triangle, la charge est monophasée et la capacité d'excitation est branchée entre deux bornes du triangle [Bou13][Idj 10].

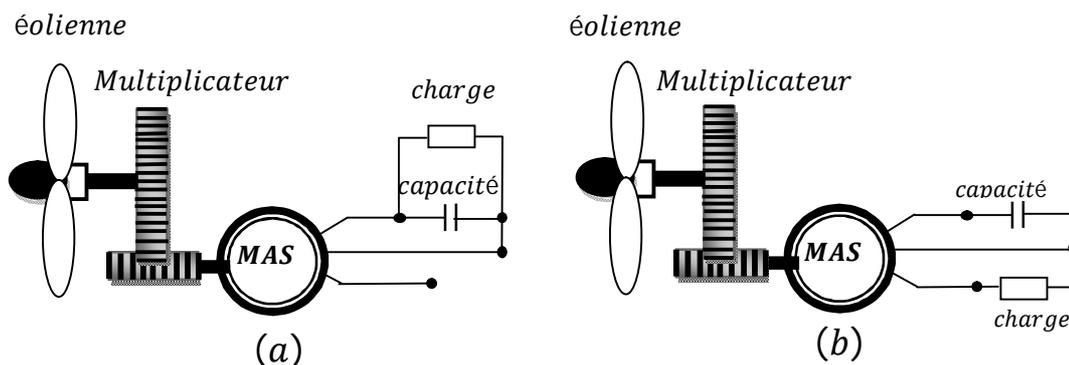


Figure I.12 : Machine asynchrone auto-excitée avec un seul condensateur

7.2.1.2 Machine asynchrone auto-excitée par une batterie de condensateurs

Dans le cas de charge triphasée a solution la plus convenable et celle de l'utilisation d'un banc de capacités qui constitué de trois condensateurs connectés soit en étoile ou en triangle aux bornes de la génératrice.

Dans cette configuration, les bobinages statoriques de la machine asynchrone sont connectés à un banc de capacités en parallèle à la charge.

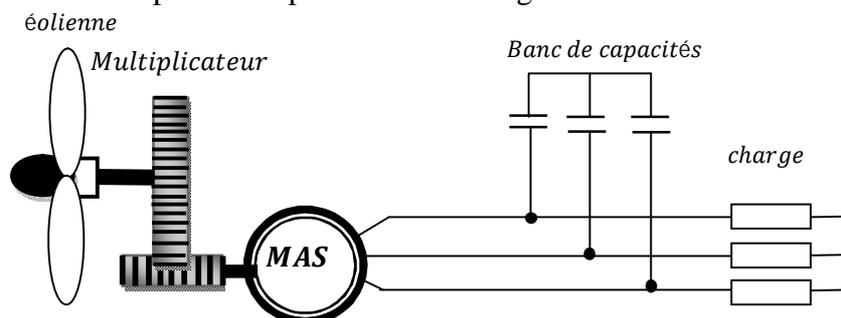


Figure I.13 : Machine asynchrone auto – excitée avec une batterie de condensateurs

8. Qualité de l'énergie électrique produite par l'éolienne

Le terme « qualité de l'énergie électrique » fait référence à la stabilité de la tension, à la stabilité de la fréquence du réseau et à l'absence, dans le réseau électrique, de différents phénomènes électriques [Vec 10].

Plusieurs études ont été réalisées sur la qualité de l'énergie électrique des systèmes isolés comportant des sources d'énergie éolienne. L'inconvénient majeur de l'utilisation de la génératrice asynchrone auto-excitée dans un système éolien est que ces grandeurs statoriques sont directement influencées par la variation de la charge, de la vitesse et les capacités d'excitation. Bien qu'il n'y ait pas de normes internationales spécifiques pour les systèmes de génération en site isolé, les caractéristiques du réseau isolé doivent être semblables aux

caractéristiques des grands réseaux interconnectés. Les consommateurs qui sont connectés aux réseaux isolés, tout comme ceux connectés aux grands réseaux interconnectés, utilisent les mêmes appareils. Par conséquent, les exigences de qualité de l'énergie sont généralement les mêmes. La notion de la qualité de produit "électricité" est attachée au niveau de satisfaction de l'utilisateur. Les performances de ses équipements sont directement liées à la qualité de la tension d'alimentation. Les caractéristiques de la tension sont définies et décrites selon les aspects :

- ✚ Amplitude ;
- ✚ Fréquence ;
- ✚ Symétrie du système triphasé ;
- ✚ Distorsions harmoniques ;

9. Compensation de la puissance réactive

Un système est dit bien conçu s'il peut délivrer une énergie d'alimentation fiable et de bonne qualité par bonne qualité on entend un niveau de tension dans des limites acceptables. Chaque fois que le niveau de tension en un point du système est soumis à des variations cela est dû à un déséquilibre entre la puissance fournie et consommée [Mam 12].

Dans les cas des systèmes connectent au réseau l'amélioration de la qualité de l'énergie, l'augmentation de la capacité transitée et le contrôle des réseaux existants peut être obtenue grâce à la mise en place de nouvelles technologies. La compagnie américaine EPRI (Electric Power Research Institute) a lancé, en 1988, un projet d'étude des systèmes FACTS afin de mieux maîtriser le transit de puissance sur les lignes électriques [Aya 13] [Huy 11].

Les systèmes (FACTS) traduisent un concept qui regroupe tous les dispositifs à base d'électronique de puissance qui permettent d'améliorer l'exploitation du réseau électrique. La technologie de ces systèmes (interrupteur statique) leur assure une vitesse beaucoup plus que celle des systèmes électromécaniques classiques. L'intérêt de ces systèmes est non seulement de pouvoir contrôler l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques, mais aussi d'augmenter la capacité effective de transport jusqu'à leur limite thermique maximale tout en maintenant, voire en améliorant la stabilité des réseaux électriques [Mou 12].

9.1 Différents types des systèmes FACTS

La technologie des systèmes FACTS n'est pas limitée par un seul dispositif mais elle regroupe une collection de dispositifs à base de l'électronique de puissance implantés dans les réseaux électriques afin de mieux contrôler le flux de puissance et augmenter la capacité de

transit de leurs lignes. Par action de contrôle rapide de ces systèmes sur l'ensemble de paramètres du réseau: tension, impédance, déphasage ...etc. ils permettent d'améliorer les marges de stabilité et assurer une meilleure flexibilité du transfert d'énergie [Ali 09] [Ber 09] [Huy 11].

La figure suivante représente les grandes catégories des dispositifs de compensation de la puissance réactive; la première colonne contient les systèmes conventionnels constitués de composant de base R L C et transformateurs de valeurs fixes (compensation fixe) ou variable commandés par des interrupteur mécaniques. Les dispositifs FACTS contiennent également les mêmes composants mais rapidement commander avec des interrupteurs statiques et convertisseurs de l'électronique de puissance.

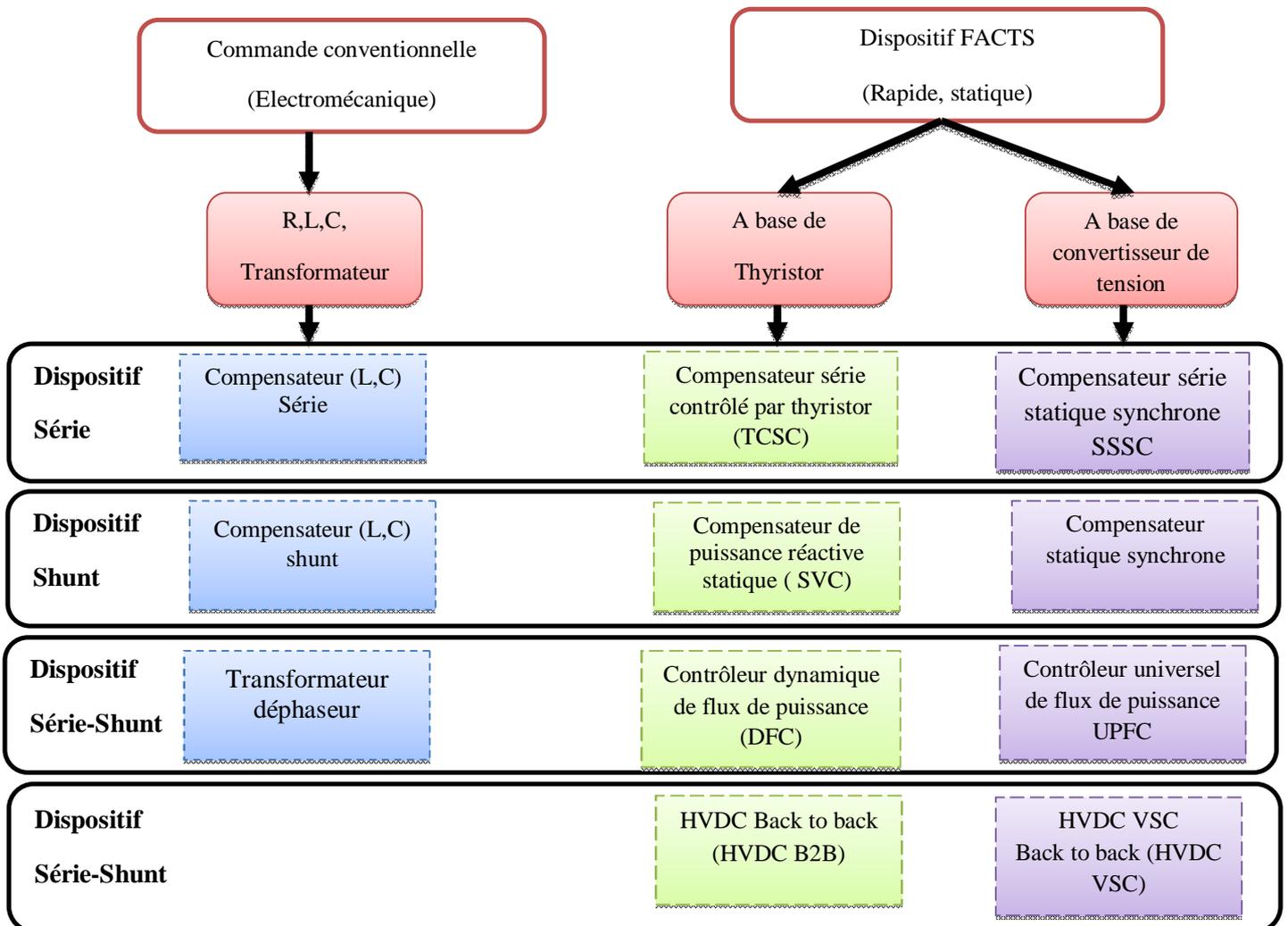


Figure I.14 : Différentes systèmes de compensation de l'énergie réactive [Cha 12].

La colonne gauche des systèmes FACTS présente les contrôleurs à base des thyristors ou bien à des convertisseurs à thyristor tel que le SVC et le TCSC qui sont connu de puis

plusieurs dizaines d'années à titre de compensateurs shunt et série respectivement et qui ont prouvé leur fiabilité dans le contrôle des réseaux [Cha 12].

Les dispositifs dans la colonne de droite sont la technologie la plus avancée des FACTS avec des convertisseurs de sources de tension à base des interrupteurs statiques IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) tel que le STATCOM, le SSSC et l'UPFC. Ces convertisseurs de source de tension fournissent ou injectent une tension totalement contrôlable en amplitude et en phase en série ou en parallèle dans le système étudié selon les exigences de contrôle [Ali 09][Man 12][Tou 12].

9.1.1 FACTS de type série

Ces types de FACTS connectés en série avec le réseau peuvent être utilisés comme une impédance variable (inductive, capacitive) ou une source de tension variable. En général, ces compensateurs modifient l'impédance des lignes de transport en insérant des éléments en série avec celles-ci ; Et injectent une tension en série avec la ligne de transmission [Ali 09][Bel 12] [Man 12].

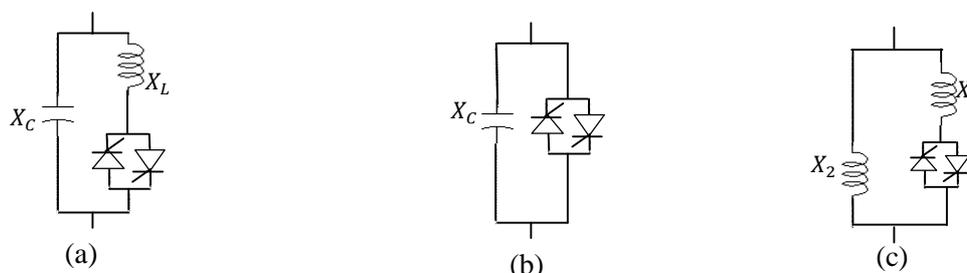
9.1.1.1 Compensateurs séries à base de thyristor

Parmi ces compensateurs on trouve trois configurations distinguées :

a) Capacité série commandée par thyristor (TCSC) : Thyristors Controlled Series Compensator) ce type utilise l'électronique de puissance comme élément de base. Le TCSC est composé d'une inductance en série avec un gradateur à thyristor, le tout en parallèle avec un condensateur figure (I.16. a) [Man 12].

b) Thyristor Switched Series Capacitor TSSC: La différence entre ce système figure (I.16. b) et le TCSC est que l'angle d'amorçage est soit de 90 degrés soit de 180 degrés [Bel 12]

c) Réactance Série Contrôlée par Thyristor TCSR: est un compensateur inductif qui se compose d'une inductance en parallèle avec une autre inductance commandée par thyristors afin de fournir une réactance inductive série variable figure (I.16.c) [Bel 12] [Mou 12].



9.1.1.2 Compensateurs séries à base de GTO

Il s'agit de : Compensateur Série Synchrones Statique (SSSC), Ce type de compensateur série (Compensateur Synchrones Statique Série) est le plus important dispositif de cette famille. Il est constitué d'un onduleur triphasé couplé en série avec la ligne électrique à l'aide d'un transformateur comme montre la figure (I.16).

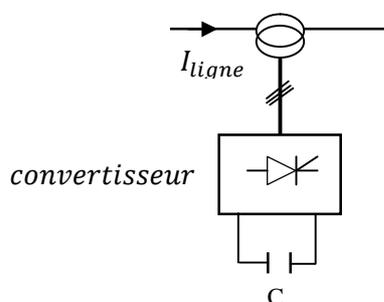


Figure I.16 : Schéma de principe du SSSC

Le SSSC injecte en série une tension alternative en quadrature avec le courant de ligne I_{ligne} à l'aide d'un transformateur série. Le SSSC peut produire ou absorber la puissance réactive Q suivant la commande du convertisseur statique [Mou 13].

9.1.2 FACTS de type parallèle

Ils consistent en une impédance variable, source variable ou une combinaison des deux. Ils injectent un courant dans le réseau à travers le point de connexion. Ils sont principalement pour la compensation de la puissance réactive et par conséquent contrôler de tension des nœuds [Ali 09] [Bel 12] [Man 12].

9.1.2.1 SVC (Static Var Compensator)

Le SVC ou le CSPR (Compensateur Statique de Puissance Réactive) est une association des dispositifs est un équipement de compensation parallèle à base d'électronique de puissance (Thyristor) capable de réagir en quelques cycles aux modifications du réseau (Figure I.20). Un SVC est généralement constitué d'un ou plusieurs batteries de condensateurs fixes (FC) commutables soit par disjoncteur, ou bien par thyristors (Thyristor Switched Capacitor, TSC) et d'un banc de réactances contrôlable (Thyristor controlled Reactor TCR) et par des réactances commutables (Thyristor Switched Reactor TSR), et d'autre part on trouve des filtres d'harmoniques.

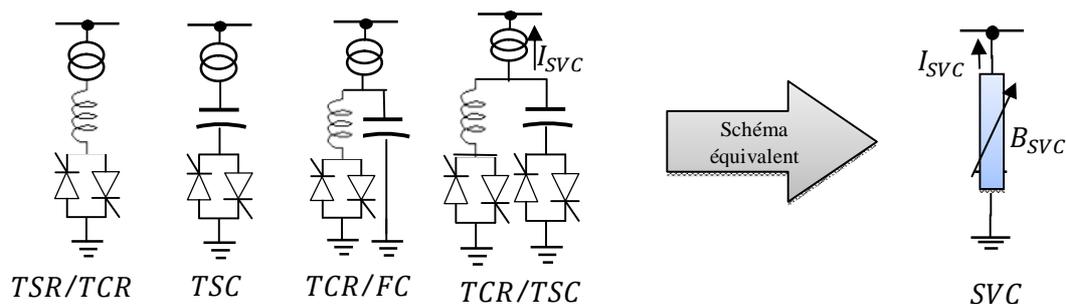


Figure I.17 : Structure d'un SVC, schéma équivalent [Ali 09].

Ce dispositif est associé à des filtres LC accordés pour éliminer les harmoniques de ces dispositifs TCR, TSC, bancs des capacités fixes et filtres d'harmoniques constitue le compensateur hybride, plus connu sous le nom de SVC dont le premier dispositif a été installé en 1979 en Afrique du Sud [Ali 09] [Bou 08][Men 12].

Le SVC est un dispositif qui permet lorsque le plan de tension est soumis à des variations inacceptables induites elles mêmes par des variations de charge, de délivrer ou absorber de la puissance réactive de manière à réduire les chutes de tensions réactives sur les lignes. De plus, le SVC est capable de réduire les oscillations de puissance à travers une modulation de l'amplitude de la tension à son point de connexion [Bou 08] [Erw 07].

9.1.2.2 STATCOM (Static Compensator)

Le STATCOM (Statique Compensateur) a connu jusqu'à maintenant différentes appellations, CSERA (Compensateur statique d'énergie réactive de type avancé). A SVC (Advanced Static Var Compensator). SVG (Static Var Generator) et STATCON (Static Condenser). Un STACOM est un système d'électronique de puissance connecté en parallèle, qui injecte dans le réseau un courant alternatif contrôlé en phase et en amplitude. Leur topologie est basée sur des convertisseurs de tension. Le schéma de STATCOM est donné par la figure (I.18) [Men 12] [Erw 07].

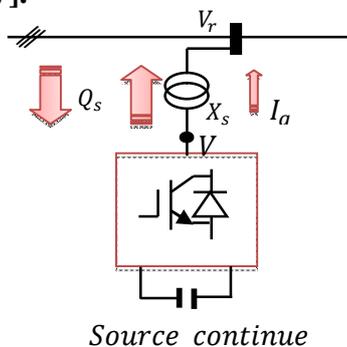


Figure I.18: STATCOM (Static Synchronous Compensator).

Les cellules de commutation sont bidirectionnelles, formées de (GTO, IGBT) et de diode en antiparallèle. Le rôle du STATCOM est d'échanger de l'énergie réactive avec le réseau. Pour ce faire, l'onduleur est couplé au réseau par l'intermédiaire d'une inductance, qui est en général l'inductance de fuite du transformateur de couplage [Ali 09].

9.1.3 Compensateurs hybrides série-shunt

C'est une combinaison des dispositifs séries et shunts commandé d'une manière coordonné afin d'accomplir un contrôle prédéfini. Ils permettent un contrôle multi variables, ils servent à contrôler le flux de puissance active et réactive, la tension et l'angle de transport de l'énergie [Ali 09][Bel 12] [Man 12].

9.1.3.1 Contrôleur unifié de l'écoulement de puissance (UPFC)

UPFC est constitué de deux transformateurs, l'un est connecté en série et l'autre en shunt avec la ligne de transmission. Chaque transformateur est connecté à un onduleur à base des thyristors GTO. Ces derniers sont couplés à travers une liaison continue DC [Gho 03]. Autrement dit, l'UPFC est la combinaison d'un STATCOM et un SSSC couplés à travers une liaison DC commune, pour permettre l'écoulement bidirectionnelle de la puissance active en effet, l'énergie active peut circuler librement dans les deux directions entre les extrémités AC des deux convertisseurs et chaque convertisseur peut générer ou absorber l'énergie réactive indépendamment [Ber 09] [Mou 12].

9.1.3.2 IPFC (Interline Power Flow Controller)

Le contrôleur de transit de puissance entre ligne IPFC (Interline Power Flow Controller) est utilisé dans le cas d'un système de lignes multiples reliées à un même poste [Aya 13]. Avec L'IPFC, la puissance active peut être transférée entre les différentes lignes. Par conséquent, il est possible de :

- ✓ Améliorer l'efficacité des systèmes électriques en régime dynamique ;
- ✓ Augmenter la puissance maximale transmise à travers les lignes de transport ;
- ✓ Egaliser les puissances active et réactive entre les lignes de transport.

9.1.3.3 Régulateur d'angle de phase contrôlé par thyristor (TCPAR)

Le TCPAR (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator) est un transformateur à base de thyristors. Ce dispositif a été créé pour remplacer les déphaseurs à transformateurs à régleur en charge (LTC; Load Tap Changer) qui sont commandés mécaniquement. Le TCPAR n'est pas capable d'absorber ou de fournir de la puissance réactive, il est capable juste de varier la puissance active. Le TCPAR est composé d'un transformateur branché en série

avec le réseau, est un deuxième transformateur connecté en parallèle appelé transformateur d'excitation, ces deux transformateurs sont connectés à travers un convertisseur à thyristors.

9.2 Application des FACTS

Les FACTS permettent de contrôler dynamiquement l'écoulement de puissance moyennant l'utilisation des divers composants de l'électronique de puissance [Kar 06].

$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (\text{I.6})$$

L'équation de (I.6) définit la puissance transmise entre les deux systèmes. V_1 et V_2 sont les tensions aux extrémités de la ligne, X représente l'impédance série de la ligne, $(\delta_1 - \delta_2)$ est l'angle de phase entre les deux systèmes. Il est clair que les trois paramètres tension, impédance, et angle de phase influencent sur la puissance transmise entre les deux systèmes. Comme il est illustré sur la figure (I.21), Chaque dispositif FACTS peut influencer un des trois paramètres, et par conséquent le contrôle de l'écoulement de puissance [Aya 13].

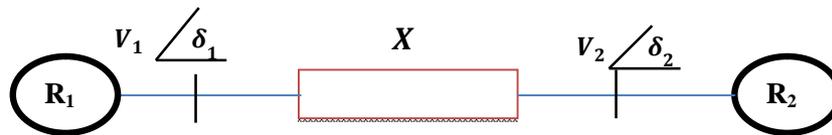


Figure I.19 : Schéma de deux réseaux connectés.

Selon la configuration du système, les tâches des FACTS peuvent être résumées comme suit:

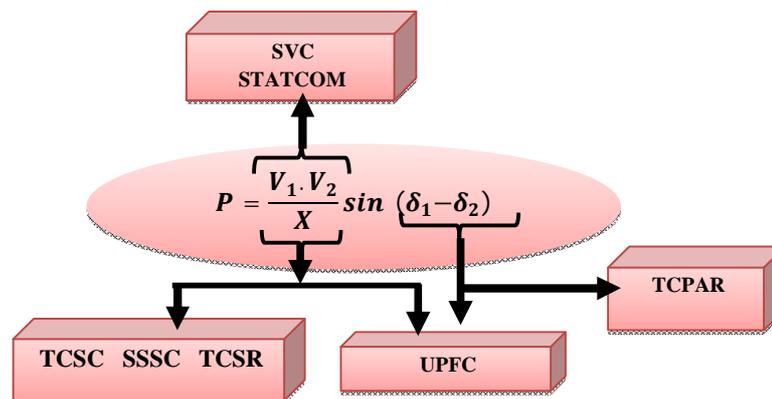


Figure I.20 : Diagramme schématique pour l'application des FACTS

Tableau I.1. La contribution des systèmes FACTS dans les réseaux électriques

Problème	Actions de correction	FACTS
Chute de tension pour une charge élevée	Injecter une puissance réactive	SVC, STATCOM
	Réduire la réactance de la ligne	TCSC
Surtension pour une charge basse	Absorber la puissance réactive	SVC, STATCOM
Surtension due à une panne	Absorber la puissance réactive Empêcher les surcharges	SVC, STATCOM
Chute de tension due à une panne	Injecter une puissance réactive Empêcher la surcharge	SVC, STATCOM
Surcharge du circuit de Transmission	Augmenter la capacité de transmission	TCSC, SSSC, UPFC
Distribution de la puissance sur les lignes parallèles	Ajuster la réactance de la ligne	TCSC, SSSC, UPFC
	Ajuster l'angle de phase	UPFC, SSSC, TCPAR
Inversion de l'écoulement de puissance	Ajuster l'angle de phase	UPFC, SSSC, TCPAR
Un fort Courant de court-circuit	Limitation du courant de court Circuit	TCSC, UPFC
Puissance transitée limitée	Diminuer la réactance de la ligne	TCSC, SSSC

Pour résumer l'utilisation des FACTS dans les différents problèmes rencontrés dans les réseaux électriques on donne le Tableau I.1 :

10. Systèmes FACTS dans le fonctionnement autonome

L'influence de la variation de la charge, de la vitesse d'entraînement et de la capacité d'excitation sur la tension statorique de la génératrice asynchrone à cage restent toujours un inconvénient majeur de l'utilisation de cette dernière dans le fonctionnement autonome [Bhi 06] [Der 13]. En effet, la préoccupation principale de ce fonctionnement est le maintien de l'amplitude et la fréquence de la tension générée à des valeurs constantes quelles que soient

la vitesse de rotation de l'éolienne et la puissance demandée dans une certaine plage [Vik 14] [Bhi 06].

Plusieurs solutions ont été proposées dans la littérature. Elles consistent en des dispositifs passifs à base capacités et des dispositifs actifs utilisant des convertisseurs d'électroniques de puissance ; Les dispositifs FACTS apportent une solution efficace et fiable pour faire face à cette situation [Ola 12].

Les FACTS shunt tel que le STATCOM et le SVC ont été identifiés comme des solutions les plus efficaces et les plus utilisés pour résoudre les problèmes de la compensation de l'énergie réactive et la régulation de la tension de la génératrice ainsi que d'améliorer la qualité de l'énergie produite par une éolienne [Bhi 06] [Ven 06] [Vik 14]

10.1 SVC (Static Var Compensation)

Le SVC est un dispositif FACT de type parallèle qui a pour rôle de l'injection de la puissance réactive dans la barre où il est branché de manière à satisfaire la demande de puissance réactive de la machine asynchrone et de la charge [Ouc 11]. Dans le cas pratique le SVC est caractérisé par une large variation de l'énergie réactive capacitive qui peut être assurée par des banc de condensateur contrôlés par des interrupteurs statiques. En générale les éléments du SVC opérant principalement comme des Susceptance ajustables bien qu'elles soient inductive ou capacitive [Mam 12] [Tar 04].

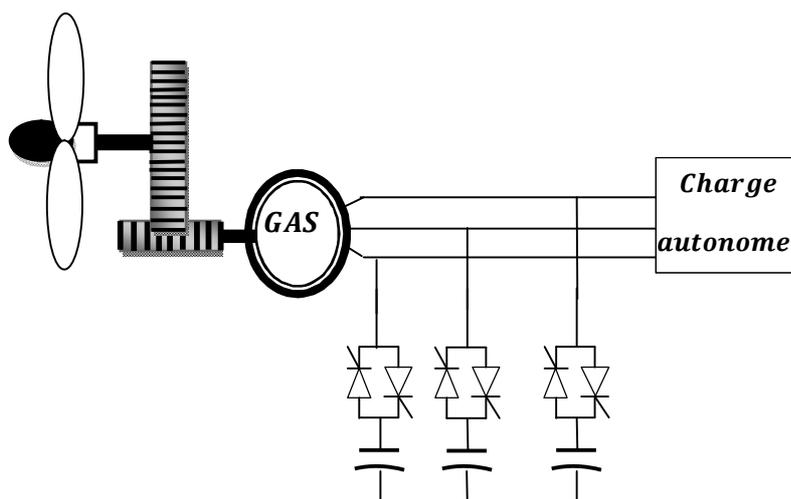


Figure I.21 : Schéma synoptique d'un système éolien avec un SVC

Le (SVC) connecté en parallèle avec le stator de la machine qui débite sur une charge. Le compensateur statique est composé d'un banc de capacités commutées par thyristors

(TSC), en parallèle avec des réactances commandés par thyristors (TCR), de façon à créer une source d'énergie réactive variable [Mek 04] [VIK 14].

10.2 STATCOM

Le STATCOM permet le même contrôle qu'un SVC mais avec plus de robustesse, le compensateur statique est un convertisseur (onduleur de tension à base de GTO ou des IGBT) [Bel 12] [Man 12].

Le compensateur statique d'énergie réactive est un élément principal de la famille des systèmes FACTS et la structure la plus utilisée. Le cœur du STATCOM est un convertisseur de tension continu triphasé avec une capacité connectée du côté continu. La capacité chargée de bus continue fournit une tension continue au convertisseur. Celui-ci produit une tension triphasée contrôlée en amplitude, En faisant varier l'amplitude de cette tension, on arrive à varier l'échange d'énergie réactive. Si la tension est supérieure à celle de la génératrice un courant injecté et le STATCOM fonctionne comme une capacité [Bhi 06][Der 13] [Ven 06]. Si la tension est inférieure à la tension induite par la génératrice il fonctionne comme une inductance et si elles sont égales aucun échange n'est fait. Le STATCOM fournit de la puissance réactive pour la charge et le générateur [Bhi 06] [Bhi 14] [VIK 14]. En pratique, un convertisseur n'étant pas idéal, une partie de puissance active est alors absorbée comme pertes actives dans les différents éléments constituant le convertisseur.

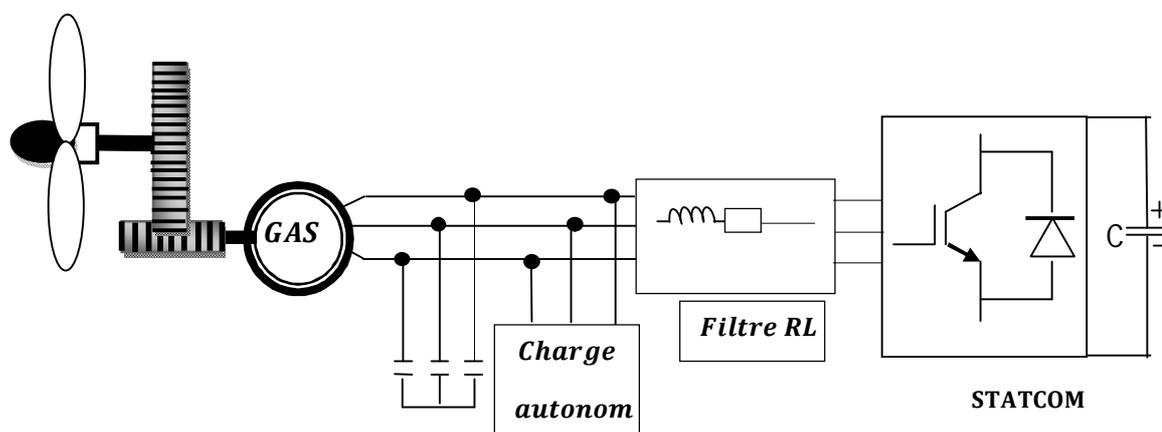


Figure I.22 : STATCOM connectée à une charge autonome

11. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné une vue d'ensemble des différentes éoliennes utilisées dans l'industrie moderne pour la production d'énergie électrique d'une part. Après un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Et d'une autre partie de ce chapitre on a donné une vue globale sur les dispositifs de compensation de la puissance réactive. Aujourd'hui cette technologie FACTS occupe une place privilégiée pour la gestion de systèmes énergétiques vis-à-vis ces atouts qu'elle offre tout en augmentant la capacité de transport, renforcement de stabilité de tension et le maintien d'une qualité meilleure de l'énergie produite tous ces avantages ne peut être prend lieu que par un réglage adéquat des paramètres de ces dispositifs qui sera l'objectif et le sujet des chapitres qui suivent.

La dernière partie de ce chapitre présente les systèmes FACTS dans le fonctionnement autonome à un système éolien.

Chapitre II

Modélisation de la Machine

Asynchrone à Cage

d'écureuil

1. Introduction

L'étude de tout système physique nécessite une modélisation. Celle-ci nous permet de simuler le comportement de ce système. Ce qui donne des modèles simples à traiter qui permettent de caractériser aisément le comportement général du système.

Une démarche d'étude des machines électriques est basée sur la modélisation analytique qui donne les expressions des tensions et du couple en fonction des courants de la machine.

Ce chapitre est donc consacré à la modélisation analytique de la machine asynchrone à cage d'écureuil. Le modèle sera établi en utilisant la transformation de Park en régime modèle linéaire et saturé.

2. Présentation générale de la machine asynchrone

Une machine asynchrone à cage est constituée de deux parties : le stator et le rotor. Le stator, représente la partie statique de la machine. Il est constitué d'un circuit magnétique comportant de multiples encoches à l'intérieur desquelles sont placées trois bobinages formant l'enroulement triphasé du stator. Le rotor, partie mobile, est formé d'un circuit magnétique où est logé des barres généralement en cuivre ou en aluminium coulé. Ces barres sont reliées entre elles à chaque extrémité par un anneau de court-circuit. Les barreaux visibles sont les branches des boucles qui se déplacent à l'intérieur du champ magnétique tournant du stator.

Dans une vraie génératrice asynchrone (GAS), les barreaux de la cage ne sont pas apparents, car ils sont habillés d'un matériau magnétique qui favorise la formation de pôles magnétiques sur la surface du rotor [Mek 04].

3. Modélisation de la machine asynchrone

De façon à représenter au mieux le comportement d'une machine asynchrone en simulation, il est nécessaire de faire appel à un modèle précis mais suffisamment simple pour que les temps de calcul du simulateur ne soient pas prohibitifs. Le modèle diphasé de la machine asynchrone présente un bon compromis entre ces contraintes.

3.1 Modèle linéaire

Le modèle linéaire de la machine asynchrone est établi en considérant les hypothèses simplificatrices suivantes :

- ✓ L'entrefer est supposé à épaisseur constante ;
- ✓ L'effet des encoches est négligé ;
- ✓ L'induction dans l'entrefer est supposée à répartition sinusoïdale ;
- ✓ La distribution spatiale des forces magnétomotrices d'entrefer est supposée sinusoïdale ;
- ✓ Les pertes ferromagnétiques sont négligées (pas de courants de FOUCAULT ni d'hystérésis) ;
- ✓ Les pertes mécaniques sont négligées ;
- ✓ L'influence de l'effet de peau est négligée ;
- ✓ Les variations des caractéristiques dues à l'échauffement ne sont pas prises en compte ;
- ✓ La cage d'écureuil est remplacée par un bobinage triphasé rotorique équivalent
- ✓ La saturation des circuits magnétiques est négligé [Idj 10].

3.1.1 Equations générales de la machine asynchrone

Les équations générales de la machine asynchrone à cage d'écureuil dans un repère triphasé s'écrivent sous forme matricielle pour les grandeurs statoriques et rotorique :

$$[V_{sabc}] = [R_s] \cdot [i_{sabc}] + \frac{d[\varphi_{sabc}]}{dt} \quad (\text{II.1})$$

$$[V_{rabc}] = [0] = [R_r] \cdot [i_{rabc}] + \frac{d[\varphi_{rabc}]}{dt} \quad (\text{II.2})$$

Le rotor de la machine étant en court-circuit.

On spécifie respectivement les vecteurs ou paramètres statoriques par l'indice s et rotoriques par l'indice r . Les indices abc indiquent le triphasé. Les paramètres R_s et R_r représentent respectivement les résistances statoriques et rotoriques par phase.

Les vecteurs $[V]$, $[i]$ et $[\varphi]$ sont les vecteurs tensions, courants et flux de chacune des armatures.

Avec :

$$[V_{sabc}] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}$$

$$[V_{rabc}] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}$$

$$[i_{sabc}] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}$$

$$[i_{rabc}] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Sachant que les différents flux de la machine s'expriment en fonction des inductances de la manière suivante:

$$[\varphi_{rabc}] = [L_r] \cdot [i_{rabc}] + [M_{sr}(\theta)] \cdot [i_{sabc}] \quad (\text{II.3})$$

$$[\varphi_{sabc}] = [L_s] \cdot [i_{sabc}] + [M_{rs}(\theta)] \cdot [i_{rabc}] \quad (\text{II.4})$$

L_s, L_r : Inductance propre statorique, et rotorique.

M_{sr}, M_{rs} : Inductance mutuelle entre phases statoriques, et rotoriques

θ : étant l'angle électrique, position de la phase (a) du rotor par rapport à la phase (a) du stator.

La matrice des inductances mutuelles stator - rotor est définie par :

$$[M_{sr}(\theta)] = [M_{rs}(\theta)]^t = L_m \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

L'expression du couple se réécrit sous la forme suivante :

$$T_{em} = [i_{sabc}]^t \cdot \left(\frac{d[M_{sr}]}{d\theta} \right) [i_{sabc}] \cdot \quad (\text{II.6})$$

3.1.2 Modèle diphasé de la machine asynchrone en fonctionnement linéaire

La modélisation de la MAS passe par la transformation d'un système triphasé au système biphasé et inversement.

Et pour des raisons de simplicité, il est classique d'exprimer les différentes équations triphasées de la machine asynchrone dans un repère diphasé tournant « dqo ».

Dans ce cas, on utilise la transformation de Park. Cette dernière, normée, assure l'invariance de la puissance instantanée entre les repères triphasés et « dqo ».

En choisissant un repère « dqo » diphasé, l'axe d peut être repéré par :

θ_s : l'angle électrique par rapport à l'axe de la phase « a » du stator;
 θ_r : l'angle électrique par rapport à l'axe de la phase « a » du rotor ;
 θ : l'angle électrique entre l'axe rotorique et l'axe statorique.

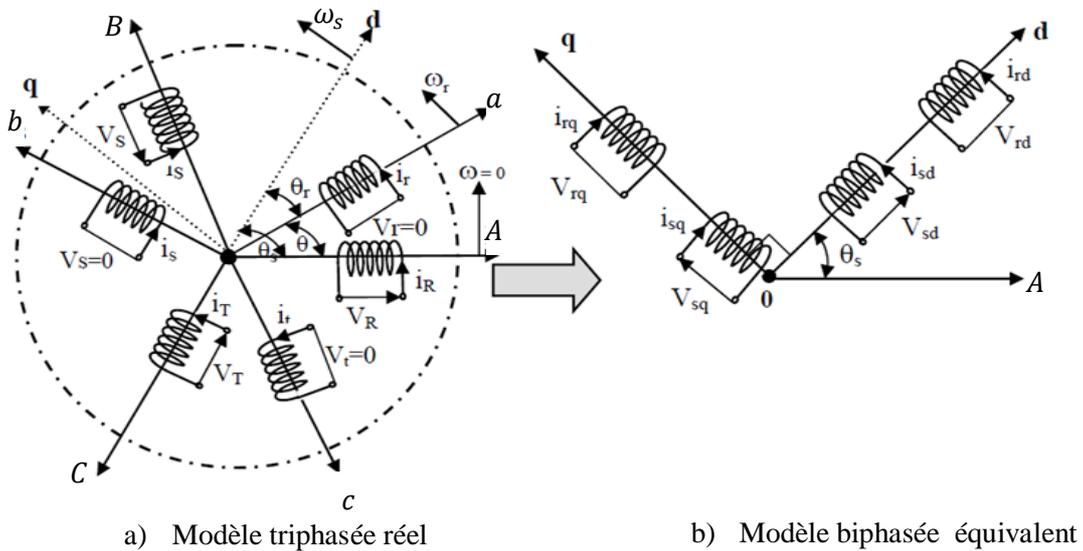


Figure II.1 : Représentation des enroulements de la machine asynchrone triphasée et sa machine biphasée équivalente issue de la transformation de Park.

Les deux angles sont liés par la relation suivante :

$$\theta = \theta_s - \theta_r = p \cdot \Theta \tag{II.7}$$

Où Θ : est la position mécanique de l'axe rotorique par rapport à l'axe statorique,
 p : nombre de paires de pôles :

3.1.2.1 La transformation de Park

La transformation directe de Park, est définie par la matrice $P(\theta)$. Aux vecteurs originaux, la transformation de Park, fait correspondre les vecteurs

$$[V_{abc}]; [i_{abc}]; [\varphi_{abc}]$$

$$[V_{dqo}]; [i_{dqo}]; [\varphi_{dqo}]$$

La transformation de Park, est appliquée de manière identique au vecteur de tensions, de courants et de flux.

Le vecteur x_0 représente la composante homopolaire, normale au plan formé par les vecteurs x_a, x_b et x_c , les vecteurs x_d et x_q représentent les vecteurs diphasés qui correspondent aux vecteurs x_a, x_b et x_c . La transformation de Park, est définie par :

$$[x_{abc}] = [P(\theta)][x_{dqo}]$$

$$[x_{dqo}] = [P(\theta)]^{-1}[x_{abc}]$$

Tel que :

$[P(\theta)]$ et $[P(\theta)]^{-1}$: sont les matrices de passage direct et inverse, elles sont données par :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Les grandeurs (courants, tensions et flux) transformées, du système diphasé sont égales à la matrice de Park multipliée par les grandeurs du système triphasé :

$$V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} - \frac{d\theta_s}{dt} \varphi_{sq} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} \quad (\text{II.10})$$

$$V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\theta_s}{dt} \varphi_{sd} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} \quad (\text{II.11})$$

$$V_{s0} = R_s \cdot i_{s0} + \frac{d\varphi_{s0}}{dt} \quad (\text{II.12})$$

De même, en l'appliquant aux équations rotoriques avec un angle de θ_r , on obtient les équations rotoriques dans le repère dq:

$$V_{rd} = 0 = R_r \cdot i_{rd} - \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{rq} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} \quad (\text{II.13})$$

$$V_{rq} = 0 = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{rd} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} \quad (\text{II.14})$$

$$V_{r0} = R_r \cdot i_{r0} + \frac{d\varphi_{r0}}{dt} \quad (\text{II.15})$$

En supposant le système parfaitement équilibré, les équations (II.12) et (II.15) qui correspondent aux composantes homopolaires, sont identiquement nulles.

Suite à l'hypothèse de linéarité des matériaux, les flux statoriques et rotoriques s'expriment dans le repère de PARK, en fonction des courants, par la relation matricielle suivante **[Idj 10]**

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \\ \varphi_{rd} \\ \varphi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

Avec :

$L_s = l_s + M$: Inductance cyclique statorique.

$L_r = l_r + M$: Inductance cyclique rotorique.

l_s : Inductance de fuite statorique.

l_r : Inductance de fuite rotorique.

M : Inductance mutuelle

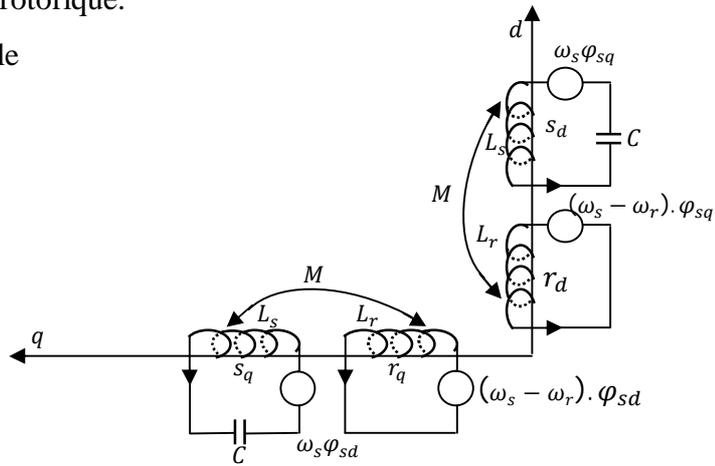


Figure II.2 : Disposition des enroulements suivant les axes d, q

Plusieurs solutions pour orienter le repère « dq » par rapport aux repères triphasés sont possibles. Dans notre cas, on se fixe les axes d et q solidaires du champ tournant de la machine. En régime permanent, cette solution fait correspondre des grandeurs continues aux grandeurs sinusoïdales [Idj 10].

Dans cette configuration, en régime sinusoïdal permanent, on a :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \quad \text{: (la vitesse angulaire des axes d,q est égale à la pulsation statorique)}$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \quad \text{: (la vitesse angulaire des axes d,q est égale à la pulsation rotorique)}$$

Ces deux pulsation sont reliées à la vitesse mécanique du rotor (Ω) par l'équation suivant :

$$\omega_s - \omega_r = p \cdot \Omega = \omega \quad (\text{II.17})$$

Ainsi, en partant des équations (II.9), (II.10), (II.12), (II.13), et en utilisant la relation

(II.15) qui lie les flux aux courants, on obtient l'équation matricielle suivante qui en globe les différentes équations électriques de la machine exprimées dans le repère d,q :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s \cdot L_s & 0 & -\omega_s \cdot M \\ \omega_s \cdot L_s & R_s & \omega_s \cdot M & 0 \\ 0 & -\omega_r \cdot M & R_r & -\omega_r \cdot L_r \\ \omega_r \cdot M & 0 & \omega_r \cdot L_r & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \\ \frac{di_{rd}}{dt} \\ \frac{di_{rq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 18})$$

Cette relation représente les équations de la machine asynchrone non saturée, dans le repère de PARK solidaire du champ tournant, en régime permanent sinusoïdal.

L'expression du couple électromagnétique dans le repère de PARK :

$$T_{em} = P \cdot M (i_{rd} \cdot i_{sq} - i_{rq} \cdot i_{sd}) \quad (\text{II.19})$$

3.2 Modèle saturé

3.2.1 Description du phénomène

Le modèle de la machine asynchrone établi précédemment est, dans la plupart des cas, suffisant pour obtenir de bons résultats dans l'analyse des régimes transitoires (démarrage, impact de charge...). Néanmoins, ce modèle utilise une inductance magnétisante M constante, ce qui sous-entend que le matériau magnétique utilisé pour la conception de la machine est linéaire [Poi 03].

Dans un fonctionnement autonome, on connecte aux bornes du stator un banc de condensateurs correctement dimensionnés et on fait tourner le rotor de la machine à la vitesse nécessaire. La présence d'un flux magnétique rémanent dans le fer du rotor est indispensable pour l'auto-amorçage de la génératrice. Le condensateur fournit le courant d'excitation requis par la génératrice et la génératrice charge le condensateur pour augmenter la tension de sortie. C'est cette réaction cyclique qui permet à la génératrice d'arriver à un régime permanent situé dans la zone de saturation [Lou 10] [Mek 04][Poi 03].

La Figure (II.3) représente l'évolution de la force électromotrice statorique $E = f(|i_m|)$ ainsi que la caractéristique externe du condensateur ($V_c = \frac{1}{C\omega_s} |i_m|$ où ω_s est la pulsation des signaux statoriques) en fonction du courant de magnétisation i_m , pour un fonctionnement à vide de la machine.

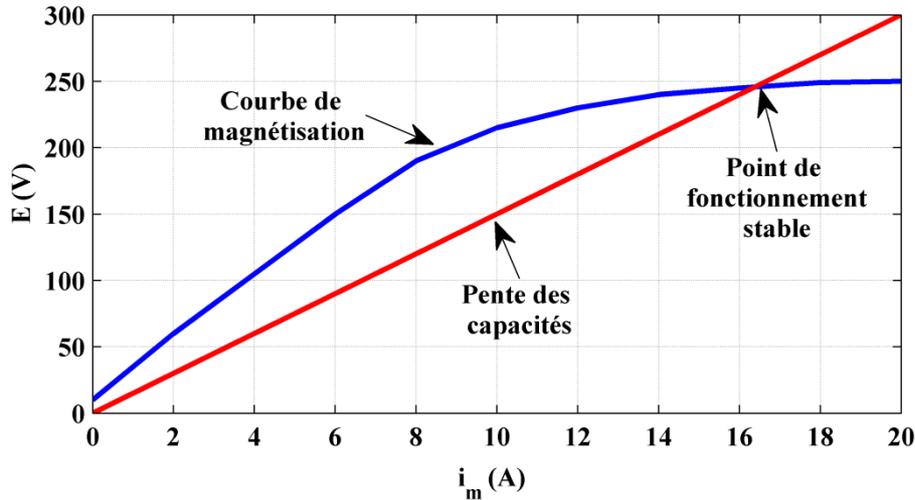


Figure II.3 : Phénomène d'auto-amorçage

Cette courbe se compose en plus de la partie linéaire, d'une partie dite coude et autre dite de saturation, c'est cette partie qui va limiter les grandeurs de la génératrice.

L'observation de ces courbes montre aisément que deux phénomènes peuvent modifier l'emplacement du point de fonctionnement sur caractéristique de magnétisation

- ✚ La variation de la capacité d'auto-amorçage qui entraîne une modification de la pente de la droite de charge de la capacité ;
- ✚ La variation de la charge connectée sur la machine qui provoque une variation du glissement. Ceci rend la résistance $\frac{R_r'}{g}$ non négligeable et le courant est alors partagé entre l'inductance magnétisante et la résistance rotorique.

L'interaction des deux phénomènes entraîne l'amorçage de la machine jusqu'au point de fonctionnement en régime permanent [Mek 04]. Lorsque le point de fonctionnement est atteint, la machine délivre une tension au stator dont la valeur efficace est constante, si l'inductance magnétisante est considérée comme constante est égale à sa valeur en régime non saturé la caractéristique de magnétisation ne présentent alors pas de coude de saturation et il n'y a pas d'intersection avec la caractéristique externe du condensateur. L'auto amorçage est alors possible mais la tension statorique augmente alors jusqu'à atteindre une valeur théoriquement infinie.

Le calcul de la capacité nécessaire pour générer une tension donnée peut s'effectuer à partir du schéma électrique équivalent de la machine débitant sur un banc de capacités.

L'égalisation des parties réel et imaginaire de l'impédance résultant du schéma équivalent d'aboutir à l'expression suivante de la capacité minimale d'auto-excitation C_{min} [Ben13] [Idj 10] [Mek 04].

$$C_{min} = \frac{1}{L_{ml}(P\Omega)^2} \quad (\text{II.20})$$

Où : L_{ml} est l'inductance magnétisante de la zone linéaire.

Il est donc nécessaire de prendre en compte l'effet de saturation pour étudier la machine asynchrone en génératrice autonome. En outre, cet effet entraîne également un phénomène secondaire dit effet croisé qui peut être considéré comme un couplage magnétique entre les enroulements des axes d et q. Ce dernier joue un rôle non négligeable lors des régimes transitoires. Ces deux phénomènes conjugués doivent donc être pris en compte par le modèle équivalent afin d'aboutir à des résultats précis dans le cas du fonctionnement générateur d'une machine asynchrone [Idj 10].

3.2.1 Répartition spatiale du flux

Suivant les deux axes d et q, on définit les deux composantes des vecteurs spatiaux (flux et courant); en considérant par hypothèse que le phénomène d'hystérésis est négligeable, le flux et le courant sont en phase. Le flux suivant chaque axe et à travers chaque bobine est la somme d'un flux mutuel et d'un flux de fuite, et on admet que cette dernière composante est indépendante de la saturation et est proportionnelle au courant correspondant figure (II.4).

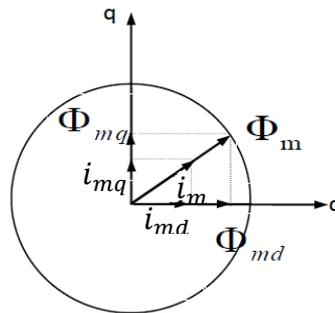


Figure II.4 : Représentation vecteurs courant et flux magnétisants

Dans le repère de PARK, chacun des flux peut-être décomposé en un flux magnétisant et un flux de fuite [Idj 10].

$$\varphi_{sd} = l_s \cdot i_{sd} + \varphi_{md} \quad (\text{II.21})$$

$$\varphi_{sq} = l_s \cdot i_{sq} + \varphi_{mq} \quad (\text{II.22})$$

$$\varphi_{rd} = l_r \cdot i_{rd} + \varphi_{md} \quad (\text{II.23})$$

$$\varphi_{rq} = l_r \cdot i_{rq} + \varphi_{mq} \quad (\text{II.24})$$

Les expressions des courants magnétisants de la machine à partir des composantes des courants statoriques et rotoriques suivant les deux axes d et q :

$$i_{md} = i_{sd} + i_{rd} \quad (\text{II.25})$$

$$i_{mq} = i_{sq} + i_{rq} \quad (\text{II.26})$$

Le module du courant magnétisant global s'écrit alors **[Idj 05]**.

$$|i_m| = \sqrt{i_{md}^2 + i_{mq}^2} \quad (\text{II.27})$$

L'expression des flux magnétisants est donner par :

$$\varphi_{md} = L_m \cdot i_{md} \quad (\text{II.28})$$

$$\varphi_{mq} = L_m \cdot i_{mq} \quad (\text{II.29})$$

L_m est appelée « inductance magnétisante statique ». L'épaisseur de l'entrefer étant supposée constante, L_m , en fonction du courant, est identique suivant les deux axes d et q.

En partant des relations (II.21), (II.22), (II.23) et (II.24) et en utilisant les relations (II.25), (II.26), (II.28) et (II.29), on obtient, pour les flux statoriques et rotoriques suivant les deux axes, les expressions suivantes :

$$\varphi_{sd} = l_s \cdot i_{sd} + L_m \cdot i_{md} \quad (\text{II.30})$$

$$\varphi_{sq} = l_s \cdot i_{sq} + L_m \cdot i_{mq} \quad (\text{II.31})$$

$$\varphi_{rd} = -l_r \cdot i_{sd} + (l_r + L_m) \cdot i_{md} \quad (\text{II.32})$$

$$\varphi_{rq} = -l_r \cdot i_{sq} + (l_r + L_m) \cdot i_{mq} \quad (\text{II.33})$$

Dans ce cas, L_m qui caractérise la magnétisation de la machine, peut être exprimée comme étant le rapport de $|\varphi_m|$, flux total magnétisant de la machine par $|i_m|$:

$$L_m = \frac{|\varphi_m|}{|i_m|} \quad (\text{II.34})$$

Cette inductance de magnétisation est, bien évidemment, fonction du courant $L_m = f(|i_m|)$

Pour une machine donnée, son identification s'obtient expérimentalement au travers de la caractéristique interne de la machine. Dans le cas d'un prototype virtuel, il est possible d'obtenir cette caractéristique à partir d'une modélisation numérique tenant compte du non linéarité des matériaux constituant la machine.

L'approximation de l'évolution de l'inductance de magnétisation en fonction de courant magnétique s'effectue en utilisant différentes approches plus au moins complexes dans notre approche, nous avons choisi d'approximer cette inductance par une expression polynomiale cette approche est simple et suffisamment précise. Cette approximation polynomiale de l'évolution de l'inductance magnétique $L_m = f(|i_m|)$ est donnée par l'équation (II.35). Par ailleurs la fonction d'approximation est dérivable, ce qui permet d'aboutir facilement à celle de L'_m l'expression de $L'_m = f'(|i_m|)$ s'écrit sous la forme équation (II.36) **[Idj 10]**:

$$\left\{ \begin{array}{l} L_m = f(|i_m|) = \sum_{j=0}^n a_j \cdot |i_m|^j \\ L'_m = f'(|i_m|) = \sum_{j=0}^n j \cdot a_j \cdot |i_m|^{j-1} \end{array} \right. \quad (\text{II.35})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} L_m = f(|i_m|) = \sum_{j=0}^n a_j \cdot |i_m|^j \\ L'_m = f'(|i_m|) = \sum_{j=0}^n j \cdot a_j \cdot |i_m|^{j-1} \end{array} \right. \quad (\text{II.36})$$

La précision de l'approximation est évidemment fonction du degré du polynôme utilisé.

Dans ce travail nous avons utilisé un polynôme d'ordre 12 **[Idj 10]**.

Les équations (II.10), (II.11), (II.13) et (II.14) font toutes apparaître une dérivée d'un flux par rapport au temps. Nous allons chercher à exprimer l'une de ces dérivées.

Soit $\frac{d\varphi_{sd}}{dt}$:

D'après l'expression (II.29), cette dérivée s'écrit :

$$\frac{d\varphi_{sd}}{dt} = \frac{d}{dt} (l_s \cdot i_{sd} + L_m \cdot i_{md}) \quad (\text{II.37})$$

Les inductances de fuites étant supposées constantes, on aboutit à :

$$\frac{d\varphi_{sd}}{dt} = l_s \cdot \frac{di_{sd}}{dt} + L_m \cdot \frac{di_{md}}{dt} + i_{md} \cdot \frac{dL_m}{dt} \quad (\text{II.38})$$

Comme L_m varie avec le module de $|i_m|$, l'équation précédente peut se mettre sous la forme suivante :

$$\frac{d\varphi_{sd}}{dt} = l_s \cdot \frac{di_{sd}}{dt} + L_m \cdot \frac{di_{md}}{dt} + i_{md} \cdot L_m' \cdot \frac{d|i_m|}{dt} \quad (\text{II.39})$$

Avec : $L_m' = \frac{dL_m}{d|i_m|}$

Sachant que :

$$\frac{d|i_m|}{dt} = \frac{d}{dt} \sqrt{i_{md}^2 + i_{mq}^2} = \frac{i_{md}}{|i_m|} \cdot \frac{di_{md}}{dt} + \frac{i_{mq}}{|i_m|} \cdot \frac{di_{mq}}{dt} \quad (\text{II.40})$$

La dérivée temporelle du flux φ_{sd} devient alors:

$$\frac{d\varphi_{sd}}{dt} = l_s \cdot \frac{di_{sd}}{dt} + L_m \cdot \frac{di_{md}}{dt} + i_{md} \cdot L_m' \cdot \left(\frac{i_{md}}{|i_m|} \cdot \frac{di_{md}}{dt} + \frac{i_{mq}}{|i_m|} \cdot \frac{di_{mq}}{dt} \right) \quad (\text{II.41})$$

En développant les différents termes, on obtient

$$\frac{d\varphi_{sd}}{dt} = l_s \cdot \frac{di_{sd}}{dt} + \left(L_m + L_m' \cdot \frac{i_{md}^2}{|i_m|} \right) \cdot \frac{di_{md}}{dt} + L_m' \cdot \frac{i_{md} \cdot i_{mq}}{|i_m|} \cdot \frac{di_{mq}}{dt} \quad (\text{II.42})$$

Trois termes peuvent être distingués :

- ✚ le premier $l_s \frac{d}{dt} i_{sd}$ est issu du flux de fuites ;
- ✚ le second $(L_m + L_m' \cdot \frac{i_{md}^2}{|i_m|}) \cdot \frac{di_{md}}{dt}$ est dû à la saturation suivant l'axe direct ;
- ✚ et le troisième $L_m' \cdot \frac{i_{md} \cdot i_{mq}}{|i_m|} \cdot \frac{di_{mq}}{dt}$ reflète l'effet du courant suivant l'axe q sur le flux d'axe direct, C'est l'effet croisé.

Les dérivées temporelles des flux peuvent être exprimées de manière similaire. Ainsi, dans les quatre équations (II.10), (II.11), (II.13) et (II.14) les flux seront fonction des courants et des diverses inductances introduites précédemment. Les équations électriques de la machine asynchrone s'écrivent alors, sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s \cdot l_s & 0 & -\omega_s \cdot L_m \\ \omega_s \cdot l_s & R_s & \omega_s \cdot L_m & 0 \\ -R_r & \omega_r \cdot l_r & R_r & -\omega_r \cdot (l_r + L_m) \\ -\omega_r \cdot l_r & -R_r & \omega_r \cdot (l_r + L_m) & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{md} \\ i_{mq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_s & 0 & L_m + L_m' \cdot \frac{i_{md}^2}{|i_m|} & L_m' \cdot \frac{i_{md} \cdot i_{mq}}{|i_m|} \\ 0 & l_s & L_m' \cdot \frac{i_{md} \cdot i_{mq}}{|i_m|} & L_m + L_m' \cdot \frac{i_{mq}^2}{|i_m|} \\ -l_r & 0 & l_r + L_m + L_m' \cdot \frac{i_{md}^2}{|i_m|} & L_m' \cdot \frac{i_{md} \cdot i_{mq}}{|i_m|} \\ 0 & -l_r & L_m' \cdot \frac{i_{md} \cdot i_{mq}}{|i_m|} & l_r + L_m + L_m' \cdot \frac{i_{mq}^2}{|i_m|} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \\ \frac{di_{md}}{dt} \\ \frac{di_{mq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{II.43})$$

On pose :

$$L_{md} = L_m + L_m' \cdot \frac{i_{md}^2}{|i_m|} \quad (\text{II.44})$$

$$L_{mq} = L_m + L_m' \cdot \frac{i_{mq}^2}{|i_m|} \quad (\text{II.45})$$

$$L_{dq} = L_m' \cdot \frac{i_{md} \cdot i_{mq}}{|i_m|} \quad (\text{II.46})$$

En conclusion, la connaissance des évolutions de permet de calculer toutes les inductances qui interviennent dans le modèle en présence de $l_m = f(|i_m|)$ et de $l'_m = f(|i_m|)$ permet de calculer toutes les inductances qui interviennent dans le modèle en présence de la saturation. C'est ce principe de base qui est appliqué dans le modèle analytique élaboré.

La relation matricielle (II.43) devient alors:

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s \cdot l_s & 0 & -\omega_s \cdot L_m \\ \omega_s \cdot l_s & R_s & \omega_s \cdot L_m & 0 \\ -R_r & \omega_r \cdot l_r & R_r & -\omega_r \cdot (l_r + L_m) \\ -\omega_r \cdot l_r & -R_r & \omega_r \cdot (l_r + L_m) & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{md} \\ i_{mq} \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} l_s & 0 & L_{md} & L_{dq} \\ 0 & l_s & L_{dq} & L_{mq} \\ -l_r & 0 & l_r + L_{md} & L_{mq} \\ 0 & -l_r & L_{dq} & l_r + L_{mq} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \\ \frac{di_{md}}{dt} \\ \frac{di_{mq}}{dt} \end{bmatrix} \tag{II.45}$$

Dans le modèle développé ci-dessus, les courants rotoriques ne sont plus explicites mais sont 'inclus' implicitement dans les expressions des courants magnétisants i_{md} et i_{mq}

En reprenant à relation (II.6) et en appliquant la transformation de Park aux différents flux et courants, on aboutit à l'expression suivante du couple électromagnétique :

$$T_{em} = P \cdot L_m (i_{md} i_{sq} + i_{mq} i_{sd}) \tag{II.46}$$

4. Résultat de simulation en fonctionnement moteur avec le modèle non linéaire

Dans cette partie, nous étudions le fonctionnement (démarrage) de la machine en régime moteur à vide connecté directement au réseau. Le schéma bloc correspondant est schématisé à (la figure II.5). Le moteur est alimenté par un système triphasé équilibré (220/50Hz) Cette simulation est implantée sur l'environnement Matlab /Simulink.

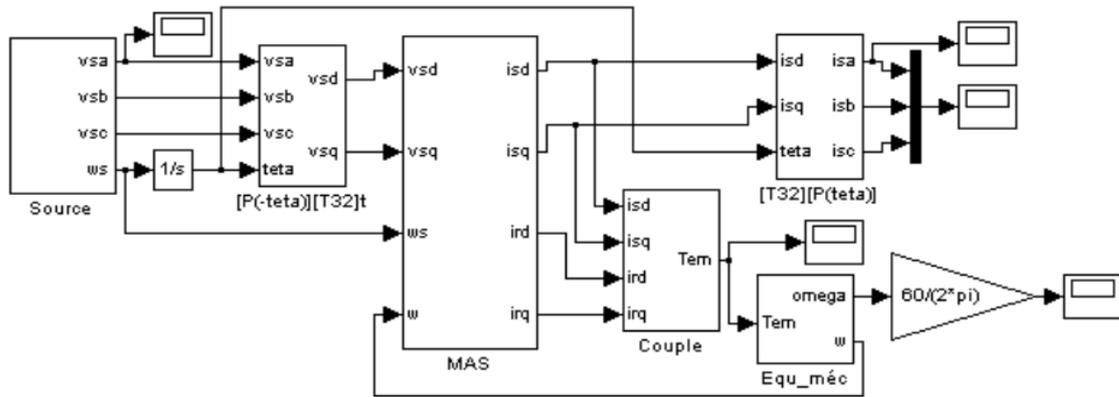


Figure II.5 : Schéma bloc de simulation du démarrage du moteur sur réseau

La figure (II.6) montre l'évolution du courant statorique, on constate que lors de démarrage le courant atteint des valeurs importantes après se stabilise en régime permanent à une valeur constante.

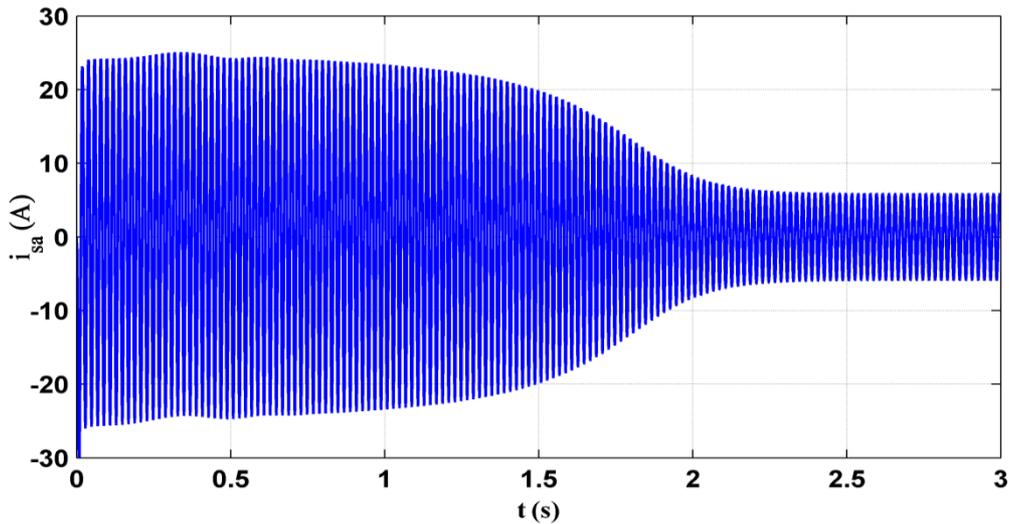


Figure II.6 : Allure du courant statorique de phase

L'évolution du couple est illustrée par la figure (II.7), les oscillations au démarrage, c'est le phénomène qui caractérise le démarrage des machines asynchrone sur réseau. Le couple atteint des valeurs importantes lors du démarrage et tend, en régime permanent, vers une valeur égale au couple de frottements.

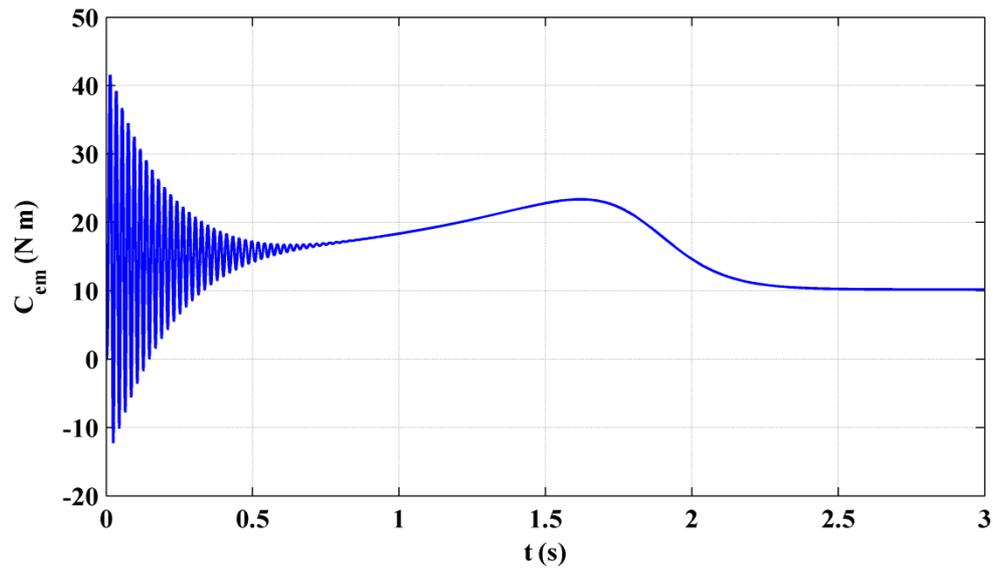


Figure II.7 : Evolution du couple électromagnétique

La figure (II.8) représentant l'évolution de la vitesse, on remarque qu'il y a des légères ondulations au démarrage, elles sont dues aux oscillations du couple. La vitesse se stabilise à une valeur proche de la valeur de synchronisme (750tr/min) car le glissement est très faible à vide.

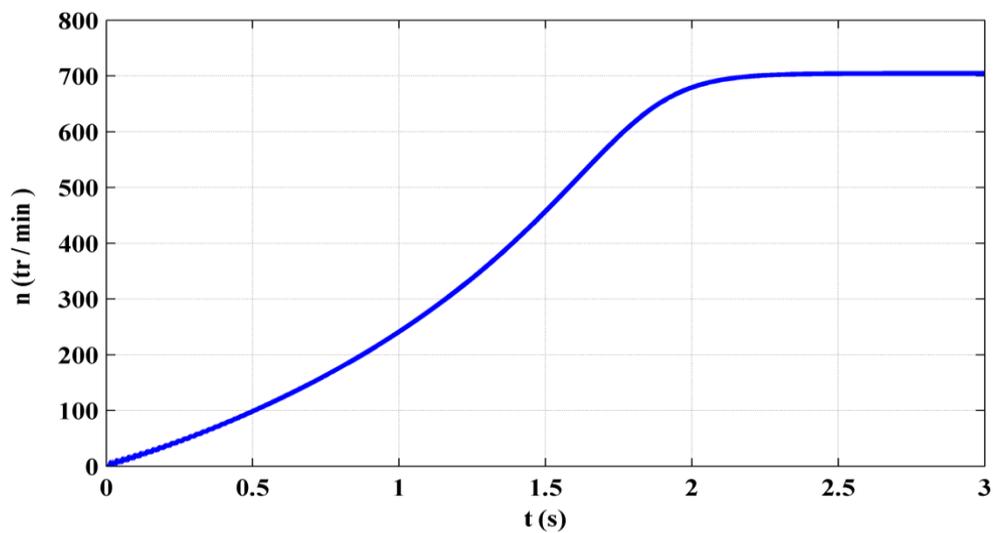


Figure II.8 : Evolution de la vitesse

5. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil en tenant compte de l'effet de la saturation du circuit magnétique. En admettant quelques hypothèses simplificatrices, classiquement adoptées en modélisation analytique.

Nous avons établi dans une première étape, un modèle qui traduit le fonctionnement en régime linéaire de la machine asynchrone à cage. Par la suite, nous avons introduit la prise en compte des effets de saturation et croisé au travers d'inductances variables en fonction du courant magnétisant de la machine. Le modèle saturé de la machine asynchrone a été validé par une simulation en fonctionnement moteur sous l'environnement Matlab/simulink

Chapitre III

Simulation de la Génératrice
Asynchrone Auto-Excité

1. Introduction

En l'absence de réseau pilote, il est possible d'auto-exciter la génératrice asynchrone au moyen de condensateurs, mais l'amorçage et la protection contre les surtensions de résonance nécessitent une étude très soignée de l'installation. Seul un dispositif basé sur une machine asynchrone auto-excitée par des capacités directement connectées sur une charge permet d'obtenir un fonctionnement purement autonome. Le phénomène d'auto-excitation est en revanche difficile à maîtriser car les variations de charge influent directement sur les valeurs de la tension et de la fréquence délivrées. De plus, un dispositif d'orientation des pâles de l'éolienne est nécessaire afin de maintenir une vitesse de rotation et par conséquent une fréquence délivrée fixe. Afin de déterminer les performances et les limites de fonctionnement de ce dispositif, nous avons établi un modèle de la machine dans un repère diphasé dans le chapitre précédent.

De plus, en fonctionnement autonome, le système est destiné à alimenter un consommateur isolé. La tension et la fréquence de la génératrice auto-excitée sont directement influencées par la vitesse du rotor, les capacités d'excitation, et les charges aux bornes. Des simulations sont alors effectuées dans différentes caractéristiques (tension, vitesse, puissance et fréquence) à la variation de configurations de charges équilibrées.

2. Modélisation de l'auto-amorçage

Pour simuler l'auto-amorçage de la génératrice à vide, il suffit de résoudre le système d'équation en tension de la machine en tenant compte de la tension aux bornes des condensateurs. Différents référentiels peuvent être utilisés ; le référentiel tournant d-q solide du rotor est adopté dans ce travail [Idj 10].

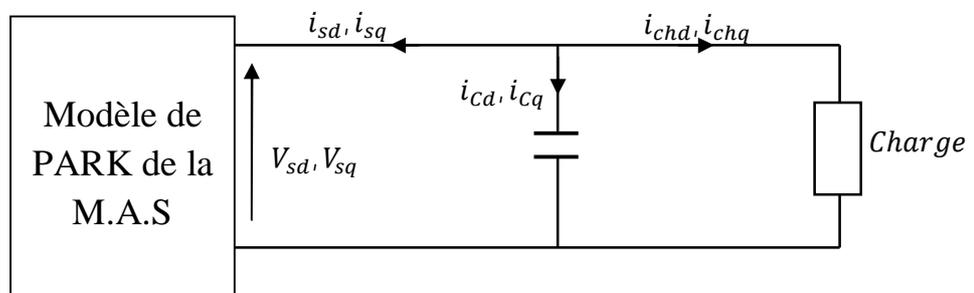


Figure III.1 : Modèle diphasé de la génératrice auto-amorcée alimentant une charge.

2.1 Modélisation de l'auto-amorçage à vide

2.1.1 Cas linéaire

Les équations du modèle linéaire de la machine dans le référentiel d-q sont données par :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -P\Omega \cdot L_s & 0 & -P\Omega \cdot M \\ P\Omega \cdot L_s & R_s & P\Omega \cdot M & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \\ \frac{di_{rd}}{dt} \\ \frac{di_{rq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 1})$$

2.1.2 Cas non linéaire

Le même système d'équations, en tenant compte de la saturation, s'écrira comme suit dans le référentiel (d, q) lié au rotor

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -P\Omega \cdot L_s & 0 & -P\Omega \cdot L_m \\ P\Omega \cdot L_s & R_s & P\Omega \cdot L_m & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & R_r & 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{md} \\ i_{mq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_s & 0 & L_m + L_m' \cdot \frac{i_{md}^2}{|i_m|} & L_m' \cdot \frac{i_{md} \cdot i_{mq}}{|i_m|} \\ 0 & l_s & L_m' \cdot \frac{i_{md} \cdot i_{mq}}{|i_m|} & L_m + L_m' \cdot \frac{i_{mq}^2}{|i_m|} \\ -l_r & 0 & l_r + L_m + L_m' \cdot \frac{i_{md}^2}{|i_m|} & L_m' \cdot \frac{i_{md} \cdot i_{mq}}{|i_m|} \\ 0 & -l_r & L_m' \cdot \frac{i_{md} \cdot i_{mq}}{|i_m|} & l_r + L_m + L_m' \cdot \frac{i_{mq}^2}{|i_m|} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \\ \frac{di_{md}}{dt} \\ \frac{di_{mq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 2})$$

A vide, les tensions statoriques aux bornes des condensateurs constituent également des inconnues. Par conséquent, il faut tenir compte des équations du circuit électrique

extérieur. Ces dernières peuvent s'écrire en fonction des capacités d'excitation sous la forme matricielle suivante [Idj 10].

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{c} & 0 \\ 0 & \frac{1}{c} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -i_{sd} \\ -i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & P\Omega \\ -P\Omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} \quad (\text{III.3})$$

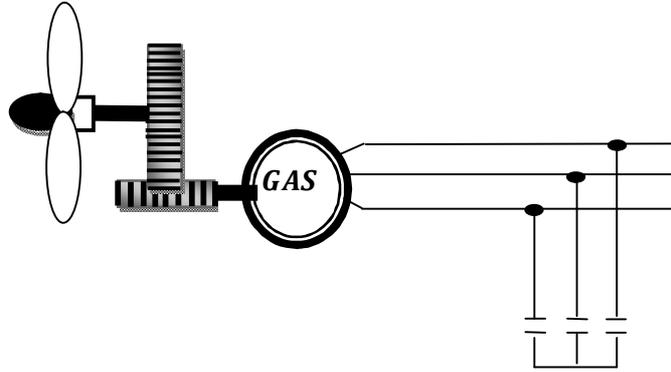


Figure III.2 : Schéma équivalent lors de l'auto-amorçage à vide.

2.2. Modélisation de l'auto-amorçage en charge

Dans le cas de la présence d'une charge équilibrée, cette relation matricielle est modifiée pour tenir compte des courants dans la charge et devient alors :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{c} & 0 \\ 0 & \frac{1}{c} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -i_{sd} & -i_{chd} \\ -i_{sq} & -i_{chq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & P\Omega \\ -P\Omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} \quad (\text{III.4})$$

$$\text{Charge R} \quad \begin{cases} V_{sd} = R \cdot i_{chd} \\ V_{sq} = R \cdot i_{chq} \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

$$\text{Charge RL} \quad \begin{cases} V_{sd} = R \cdot i_{chd} + L \frac{di_{chd}}{dt} \\ V_{sq} = R \cdot i_{chq} + L \frac{di_{chq}}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

$$\text{Charge RLC} \quad \begin{cases} V_{sd} = R \cdot i_{chd} + L \frac{di_{chd}}{dt} + \frac{1}{c_s} \int i_{chd} dt \\ V_{sq} = R \cdot i_{chq} + L \frac{di_{chq}}{dt} + \frac{1}{c_s} \int i_{chq} dt \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

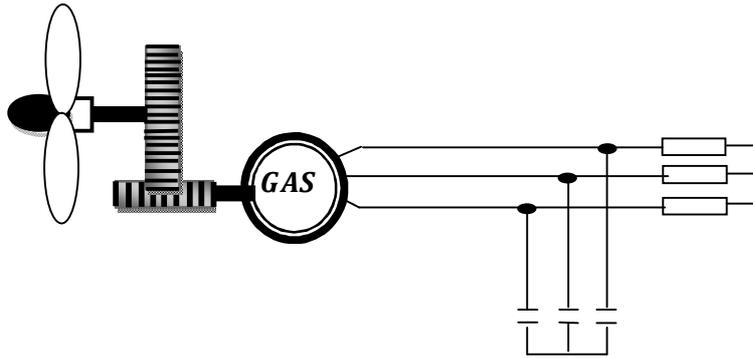


Figure III.3 : Génératrice auto-amorçable alimentant une charge autonome.

Dans le cas où une charge purement résistive R est connectée au stator de la machine, le schéma équivalent par phase de l'ensemble machine + capacité d'auto-excitation + charge peut alors être modifié comme indiqué sur la figure (III.3) de façon à pouvoir exploiter les équations précédentes d'autoamorçage à vide à fin de simplifier les calculs.

1. Résultats de simulation et interprétations

Dans ce qui suit, nous validerons le modèle saturé non linéaire dans différentes configurations de fonctionnement de la génératrice autonome.

3.1 Etude de l'auto-amorçage à vide

Le fonctionnement étudié correspondant à une valeur de capacité d'excitation ($C=100\mu\text{F}$) et le rotor de la machine est entraîné à ($n=780\text{tr}/\text{min}$).

Les figures suivantes ci-dessous montrent les résultats de la simulation du processus de l'auto-amorçage à vide d'une génératrice asynchrone en régime saturée.

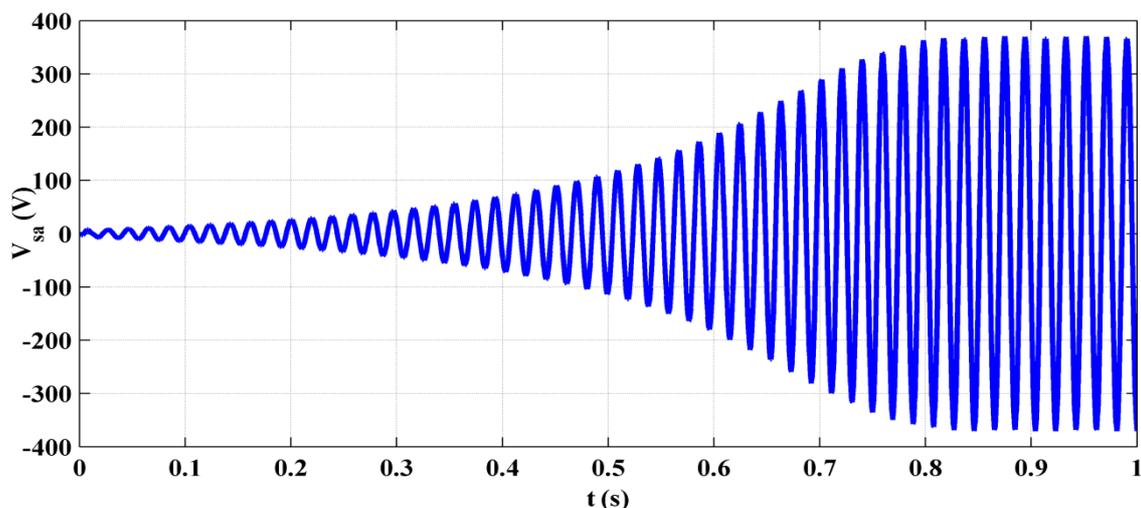


Figure III. 4 : L'évolution de la tension.

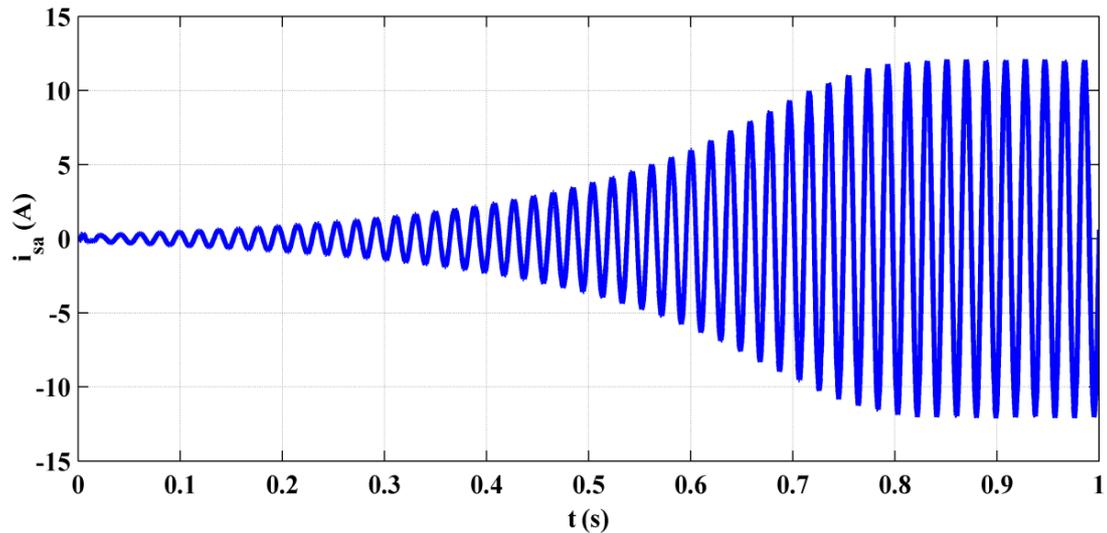


Figure III. 5 : Simulation de l'évolution du courant statorique.

Les figures (III.4) et (III.5) représentent respectivement l'évolution de la tension et du courant statoriques en fonctionnement à vide de la génératrice asynchrone à cage. Au démarrage, la tension et le courant générés croissent d'une façon exponentielle, puis se stabilisent respectivement à 350V et à 11A en régimes totalement établis à $t=0.8s$, et c'est l'instant où le courant de magnétisation atteint son régime saturé figure (III.6).

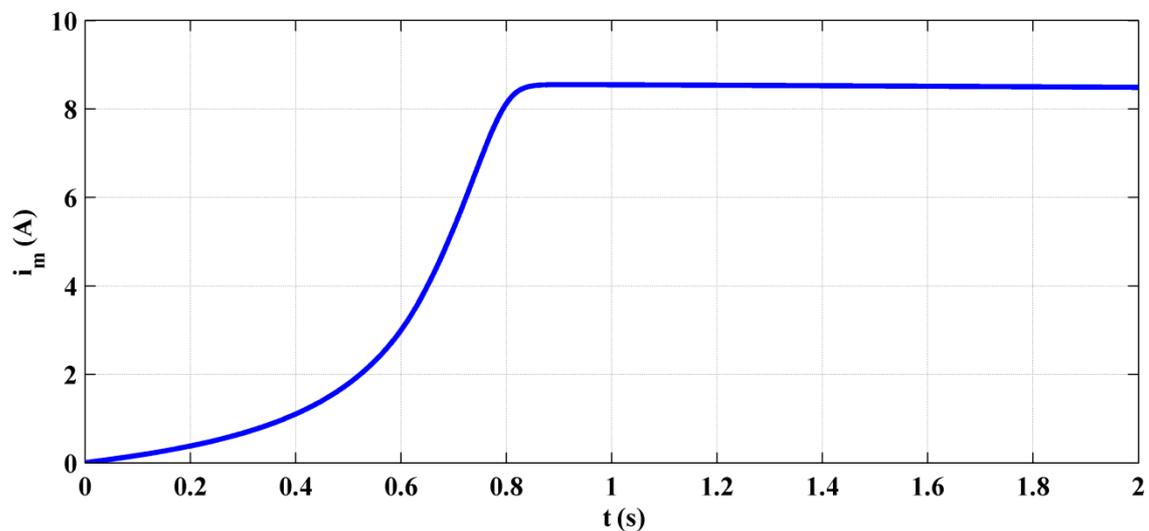


Figure III. 6 : Le courant de magnétisation à vide.

L'allure du courant de magnétisation donnée dans la figure (III.6), montre que la tension et le courant dans leurs évolutions suivent la forme du courant de magnétisation.

La figure (III.7) représente l'allure de l'inductance de magnétisation qui, comme on pouvait le prévoir, varie dans le temps en fonction de l'amplitude des courants.

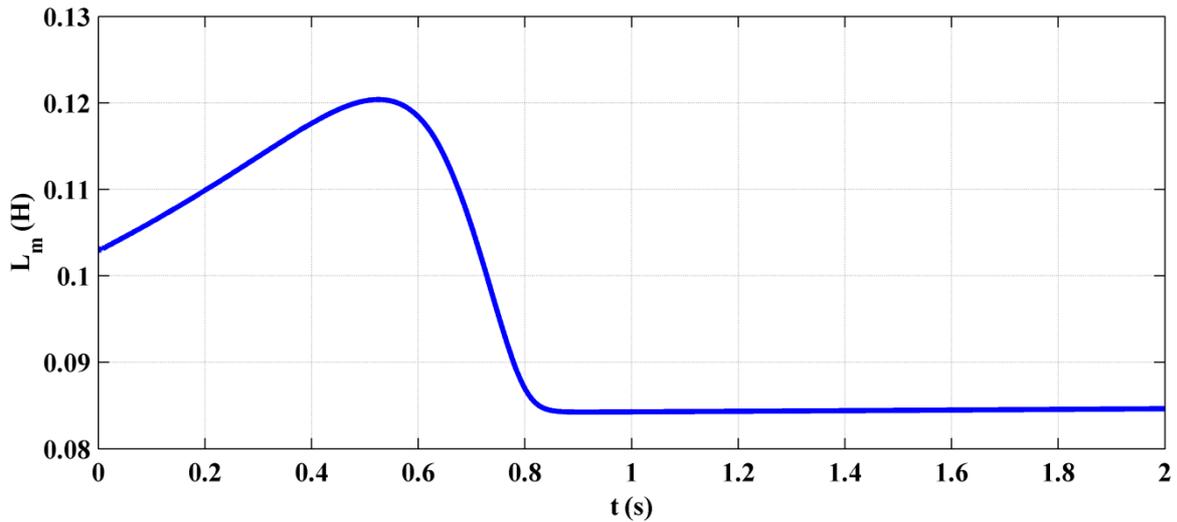


Figure III. 7 : Simulation de l'évolution de l'inductance mutuelle.

3.1.1 Effet de la vitesse d'entraînement

La vitesse de rotation a une influence directe sur la tension pour un même courant magnétisant. Lorsque la vitesse de rotation augmente la tension augmente également et vis-versa; elle n'est pas limitée par la forte saturation comme dans le cas du condensateur.

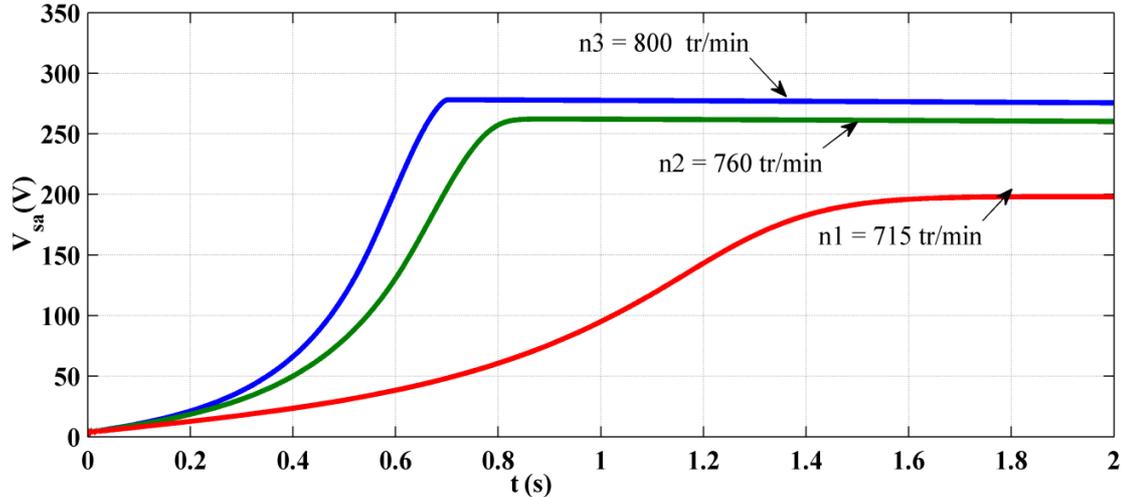


Figure III. 8 : Influence de la vitesse sur la tension d'auto amorçage.

3.1.2 Effet de la capacité d'excitation

Pour mieux voir l'influence de la capacité sur la tension efficace pour une vitesse donnée (ici 780 tr/mn), nous représentons uniquement l'enveloppe de la tension d'auto-amorçage Figure (III. 9). Sur cette figure on constate que l'augmentation de la valeur de la capacité influe sur le régime transitoire de la tension et aussi sa valeur finale dans des rapports différents à cause de la non linéarité de la courbe d'aimantation, comme il existe une valeur de C au-delà de laquelle la tension n'augmente plus en raison de la saturation du circuit magnétique [Lou 10].

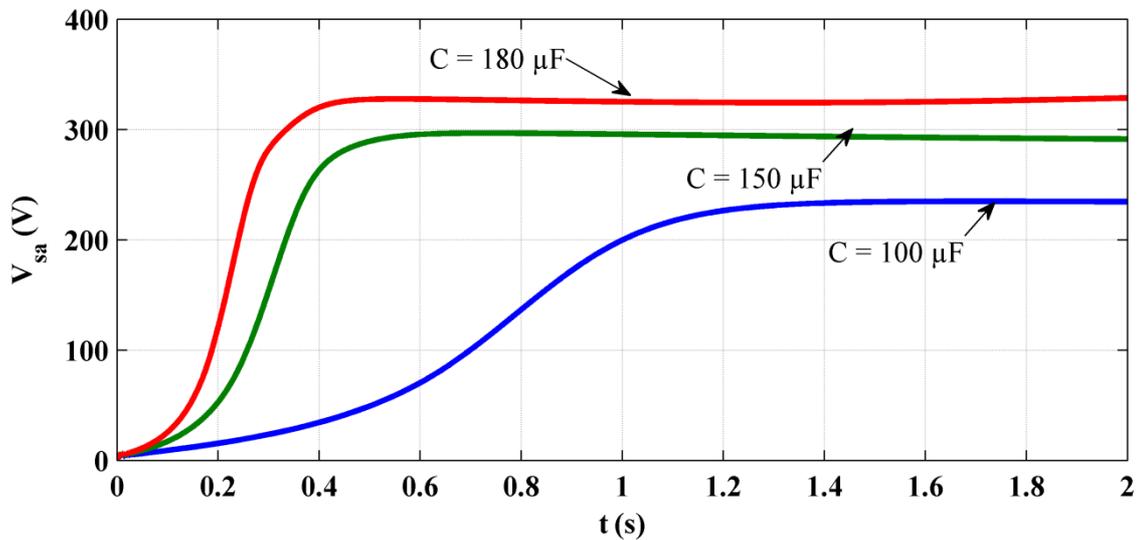


Figure III. 9 : Influence de la capacité sur la tension d'auto amorçage.

3.1.3 L'évolution de la capacité minimale en fonction de la vitesse

La figure (III.10) présente l'allure de la capacité d'auto-excitation en fonction de la vitesse de rotation pour une tension efficace à la sortie de la génératrice constante.

On remarque que pour réguler la tension à la sortie de la génératrice, il faudrait adapter la capacité d'auto-excitation en fonction de la vitesse de rotation.

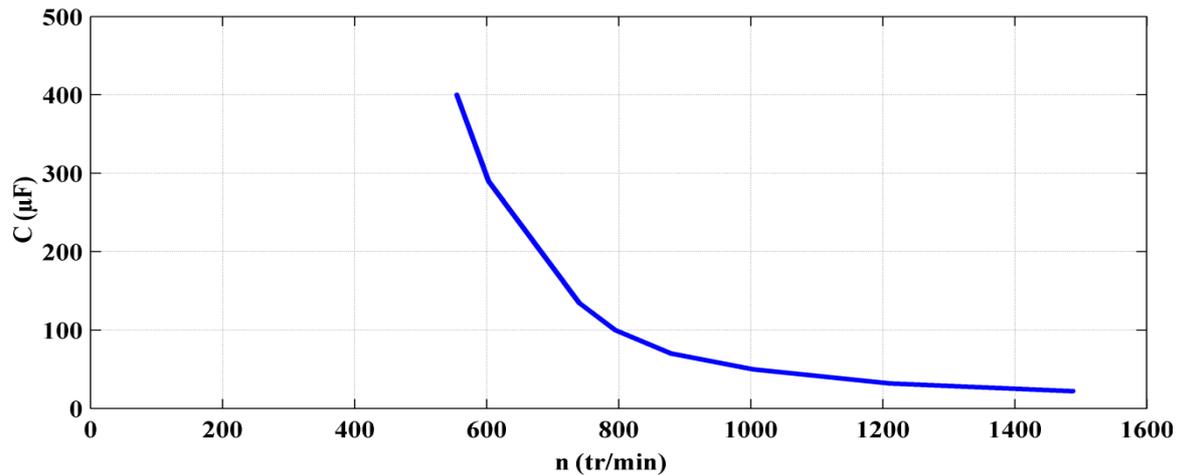


Figure III. 10 : Simulation de l'évolution de la capacité en fonction de la vitesse pour une tension fixe.

3.2 Fonctionnement en charge

Nous avons simulé le fonctionnement de la machine entraînée à 780 tr/mn avec un banc de capacités de valeur $100\mu\text{F}$ par phase couplé en étoile, la génératrice est amorcée à vide. Puis à l'instant donnée $t=2\text{s}$, on branche brusquement une charge résistive aux bornes de la génératrice de valeur $R=50\ \Omega$ par phase en étoile et branchées en parallèle avec le banc de condensateurs (Cette charge est proche de la valeur critique qui induit un désamorçage).

Les résultats de simulation sont illustrés dans les figures (III.11, III.12 et III.13). On constate une diminution de la tension de la génératrice asynchrone à l'instant d'introduction de la charge résistive. Les évolutions de courant statorique et le courant magnétisant sont similaire à celle de la tension.

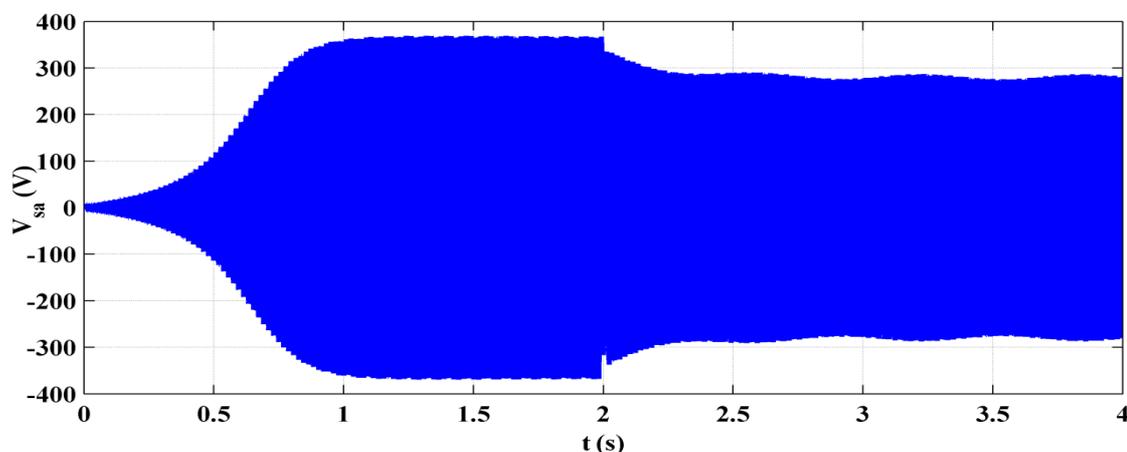


Figure III. 11 : L'évolution de la tension de ligne statorique en charge R.

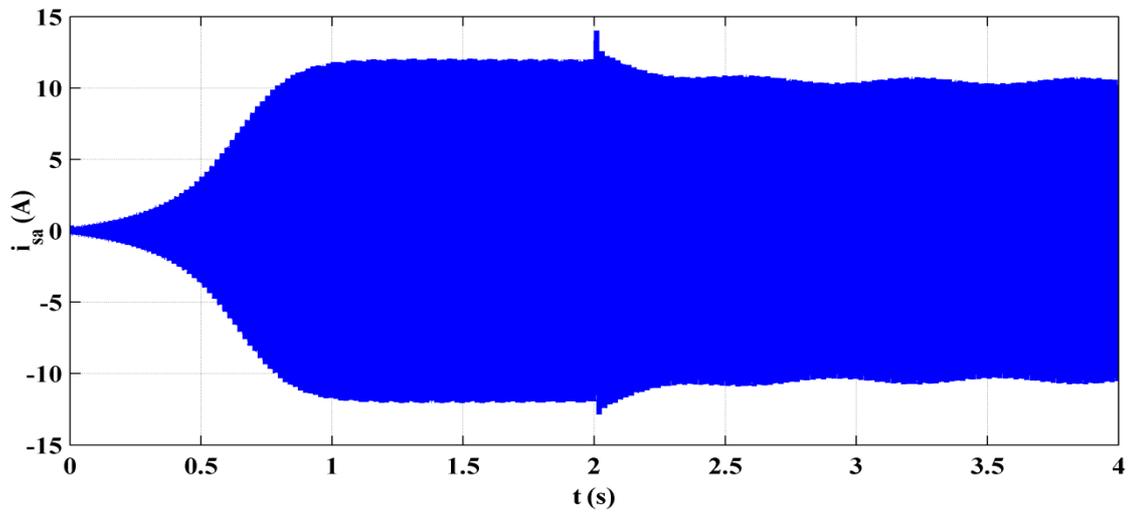


Figure III. 12 : L'évolution du courant de ligne statorique en charge R.

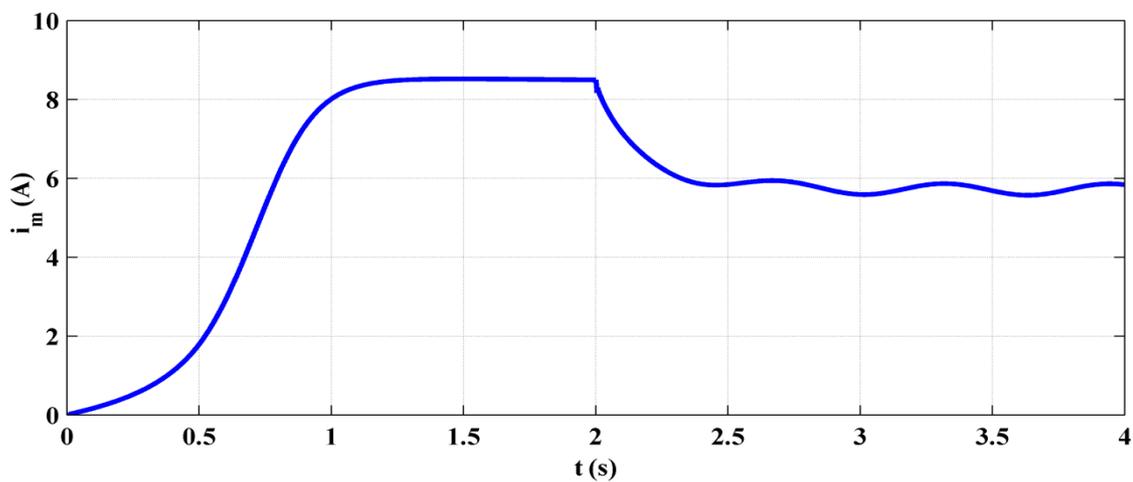


Figure III. 13 : Le courant de magnétisation en charge.

La figure suivante représente l'évolution de courant dans la charge, qui est nul avant l'introduction de la charge, puis s'établit et évolue d'une manière sinusoïdale à partir de 2s.

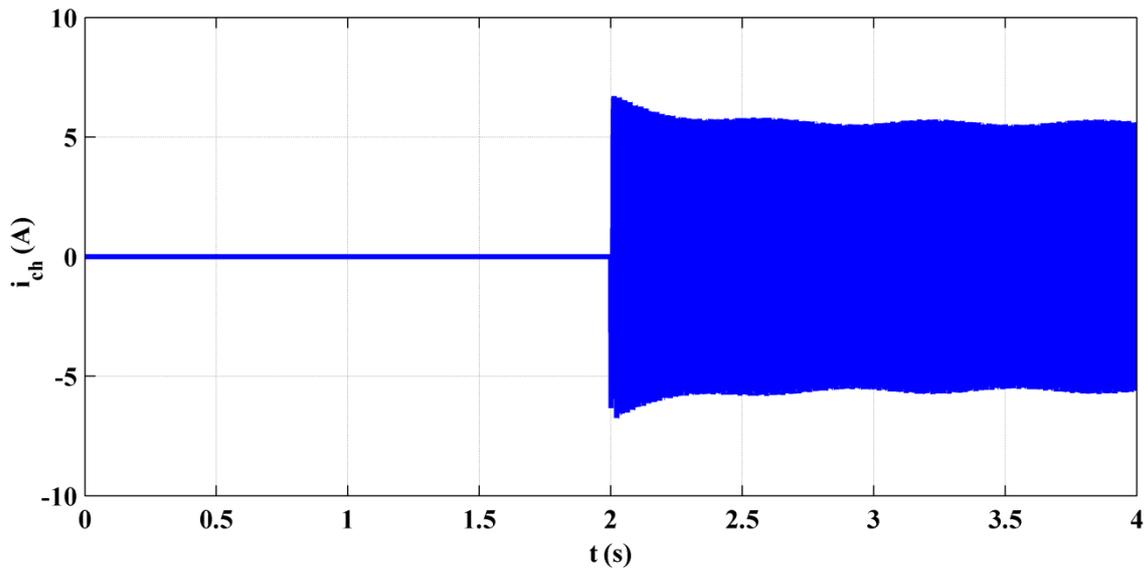


Figure III. 14 : L'évolution du courant de charge.

3.2.1 Fonctionnement et caractéristique de la charge R

Dans cette application on montre l'influence de la capacité et la vitesse sur tension efficace des grandeurs statoriques pour les différentes valeurs de la charge R

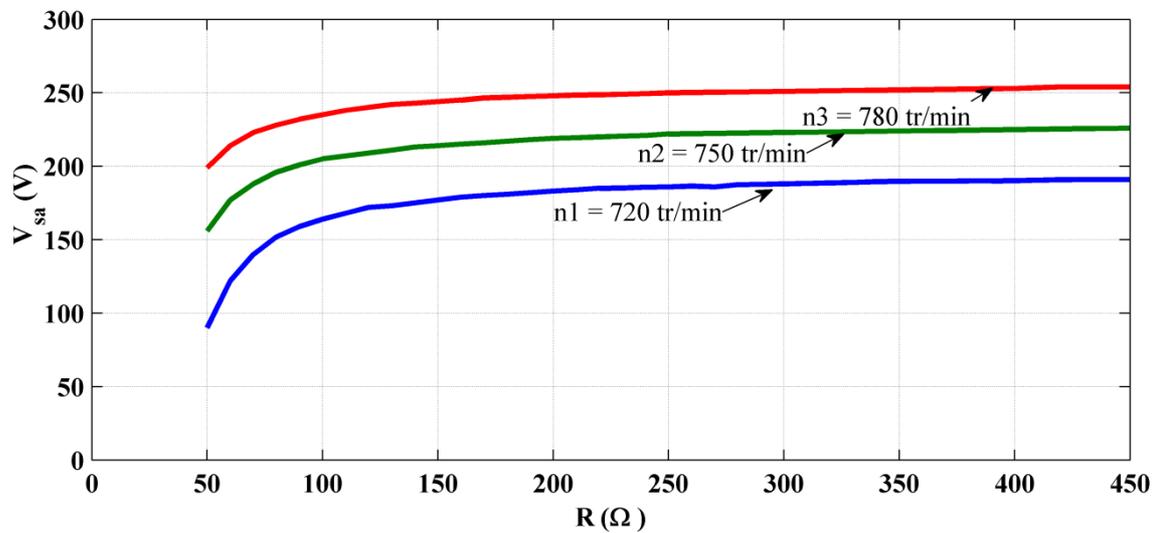


Figure III. 15 : Simulation de l'évolution de la tension efficace en fonction de la valeur de la résistance (pour $C=100\mu\text{F}$).

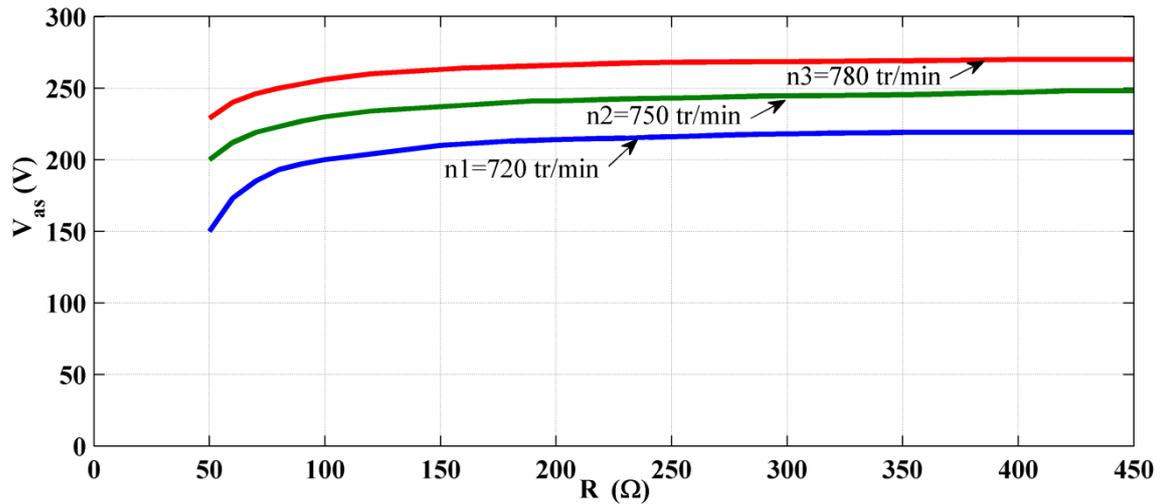


Figure III. 16 : Simulation de l'évolution de la tension efficace en fonction de la valeur de la résistance (pour $C=110\mu\text{F}$).

Nous remarquons que la baisse de la valeur de la vitesse et celle de la capacité entraîne une diminution du niveau de la tension.

Les figures suivantes (III.17 et III.18) illustrent les évolutions de la fréquence et l'amplitude de la tension des grandeurs statoriques en fonction de courant de charge pour la même valeur du banc de capacités d'excitation ($C=100\mu\text{F}$) par phase et des différentes la vitesse de rotation (720, 750, 780tr/min).

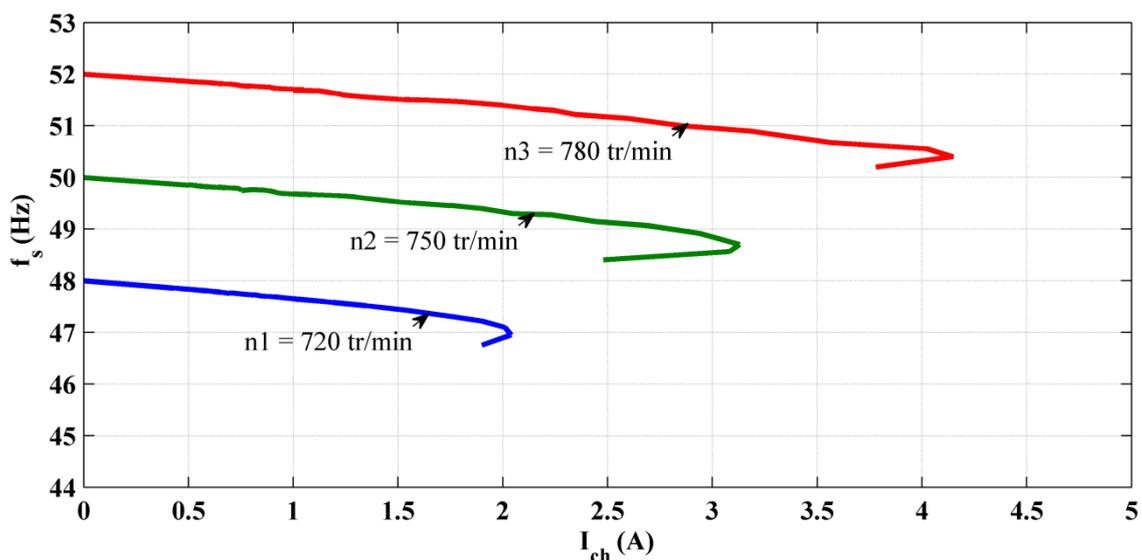


Figure III. 17 : Evolution de la fréquence en fonction du courant de charge.

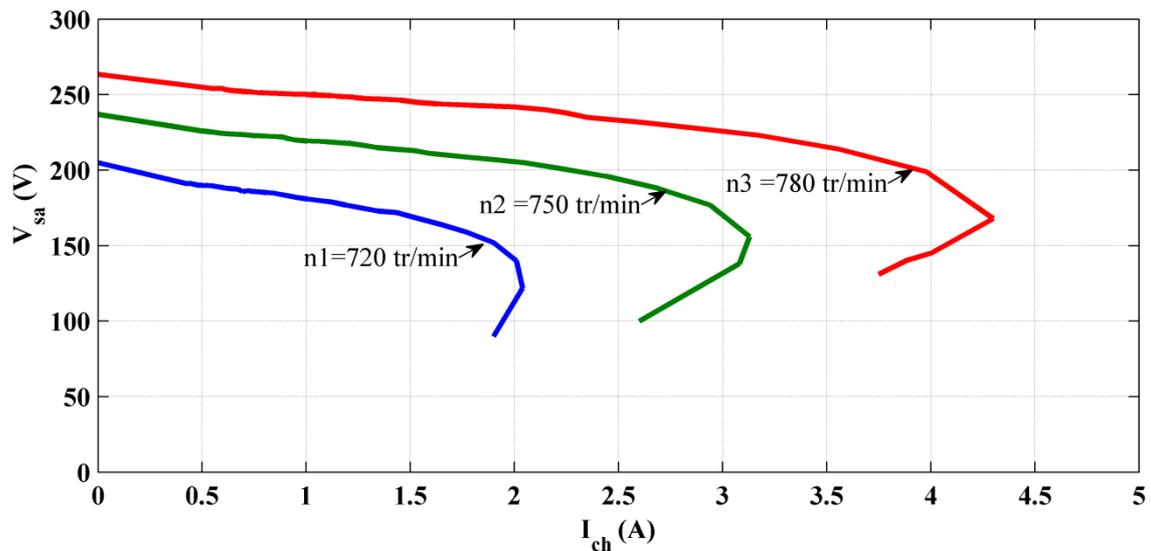


Figure III. 18: Evolution de la tension efficace en fonction du courant de charge

Les courbes de la tension efficace, comme celles de la fréquence, en fonction de la charge (courant de charge) sont similaires. La fréquence maximale est obtenue à vide pour une vitesse de rotation donnée. L'augmentation de la vitesse, n'améliore pas la stabilité de la tension elle ne fait qu'augmenter l'amplitude des tensions délivrées.

Afin de montrer l'influence de la charge sur l'amplitude et la fréquence des tensions produites par la génératrice, nous présentons par la suite les caractéristiques V_{sa} en fonction de la puissance figure (III.19) pour différentes valeurs de capacités.

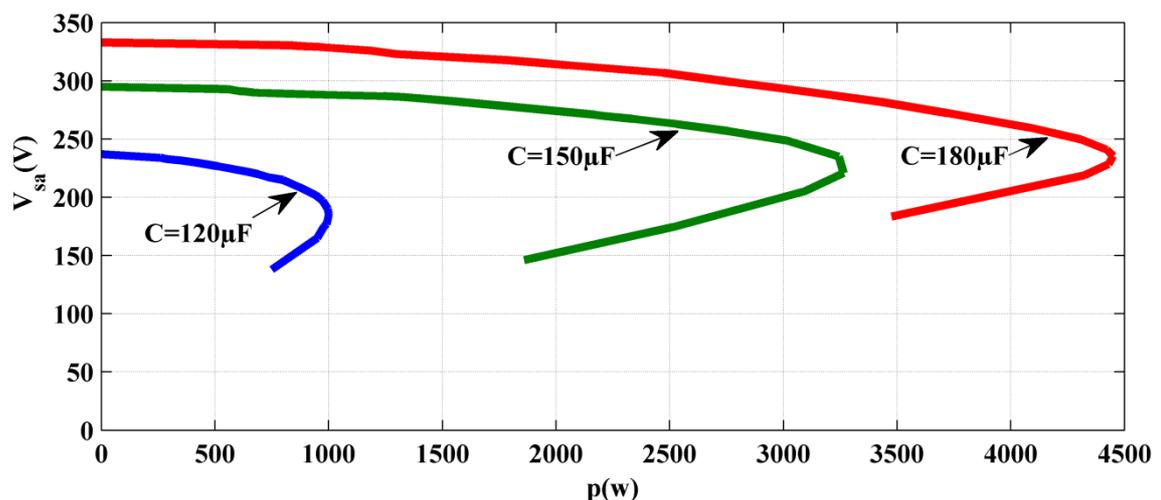


Figure III. 19 : Simulation de l'évolution de la tension efficace en fonction de la puissance.

3.2.2 Fonctionnement en charge RL

Nous avons étudié le fonctionnement de la machine asynchrone débitant sur une charge RL, la génératrice asynchrone est amorcée à une vitesse de 780 tr/min et la valeur de la capacité d'excitation est de $C=100\mu\text{F}$ par phase, puis la connecter sur une charge inductive RL constituée d'une résistance de $R=50\Omega$ en série avec une inductance de $L=30\text{ mH}$ par phase.

Les figures (III.20, III.21 et III.22) représentent la variation de la tension efficace et le courant des grandeurs statoriques et l'évolution du courant aux bornes de la charge RL respectivement. L'insertion de la charge engendre des diminutions aux niveaux de l'ensemble des caractéristiques de la génératrice asynchrone par rapport à celles observées en fonctionnement à vide.

Cela est dû essentiellement à la démagnétisation de la machine et au manque d'énergie réactive nécessaire d'une part pour la magnétisation de la machine et d'autre part pour l'alimentation de la charge, en particulier celle inductive qui est consommatrice de l'énergie réactive, et c'est aux condensateurs d'excitation de satisfaire et de partager l'énergie qu'ils produisent entre les deux consommatrices de la puissance réactive.

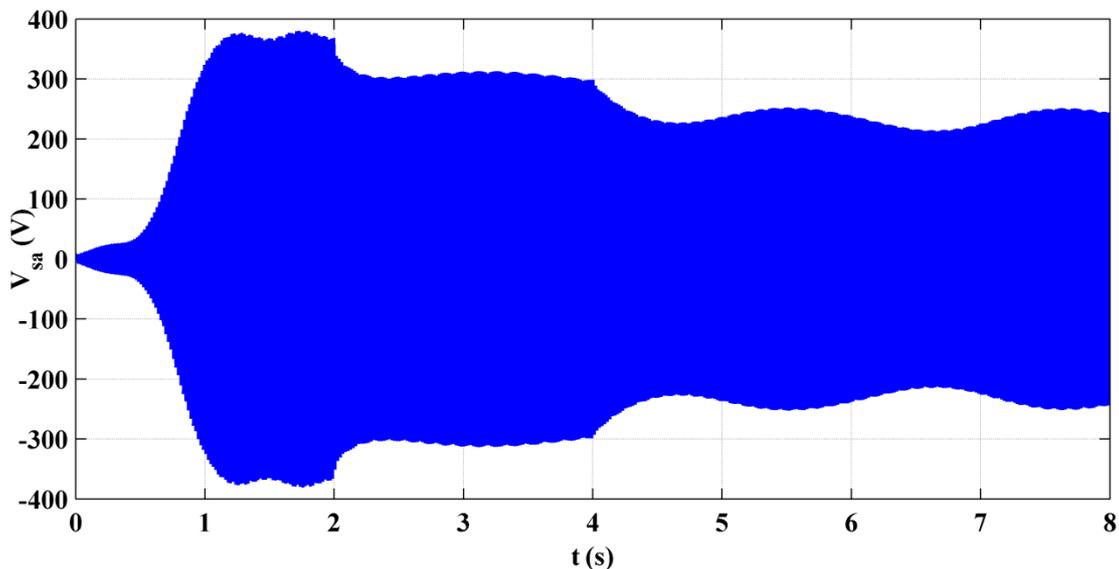


Figure III. 20 : L'évolution de la tension de ligne statorique en charge RL.

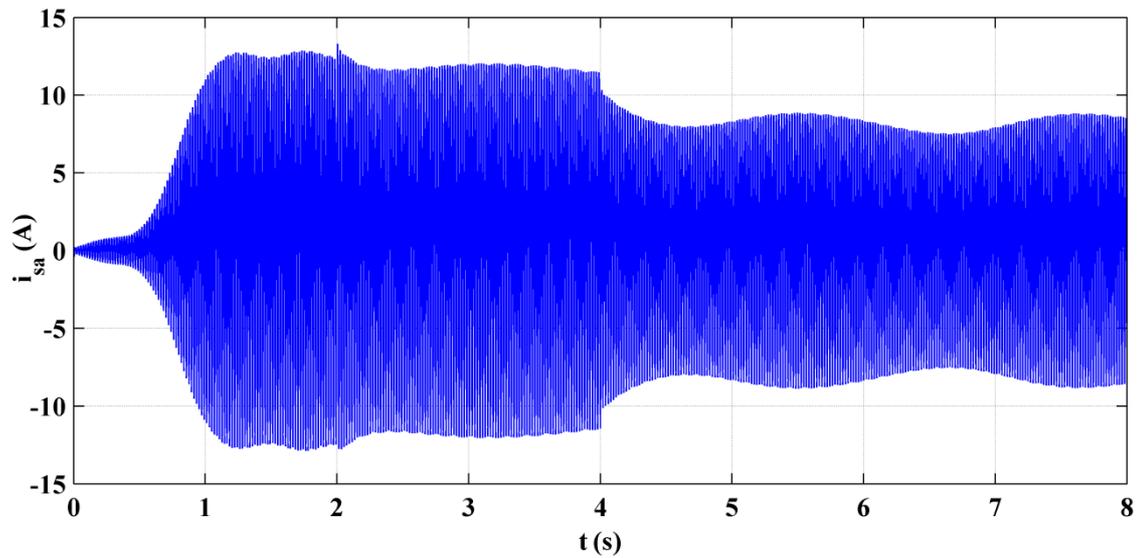


Figure III. 21: Evolution du courant de ligne statorique en charge RL.

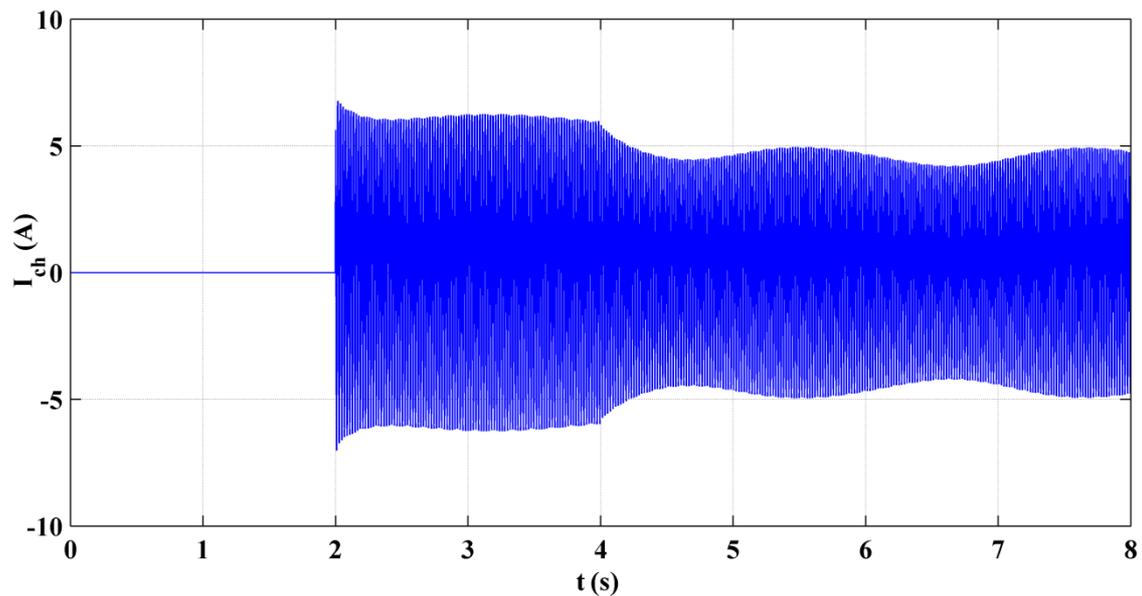


Figure III. 22 : Evolution du courant de magnétisation en charge RL.

3.2.3 Fonctionnement en charge RCs

Dans cette partie nous avons étudié, le cas de la génératrice asynchrone débitant sur une charge RCs. La charge est constituée d'une résistance R en série avec une capacité Cs, montées en parallèle avec le condensateur d'excitation C, Le fonctionnement étudié consiste à amorcer la génératrice à vide à 780tr/min et pour $C=100\mu\text{F}$. A l'instant $t = 2\text{s}$ on insère la charge purement résistive $R=50\Omega$ par la suite on rajoute de capacités $C_s = 400\mu\text{F}$ à $t = 4\text{s}$.

Une augmentation de tension figure (III.23), du courant statorique figure (III.24) de plus le courant de charge figure (III.25). Ce qui implique que la puissance réactive qu'elle génère est élevée. A partir de la figure on constate que la tension chute à l'introduction de la charge résistive $t = 2s$, puis cette chute est compensée partiellement lorsqu'on introduit la capacité C_s en série. Pour que le niveau de tension revienne pratiquement à celui obtenu à vide. Ce qui implique que la puissance réactive qu'elle génère est élevée.

Les courants statoriques figure (III.24) et de charge figure (III.25) ont des évolutions temporelles similaires à celles de la tension.

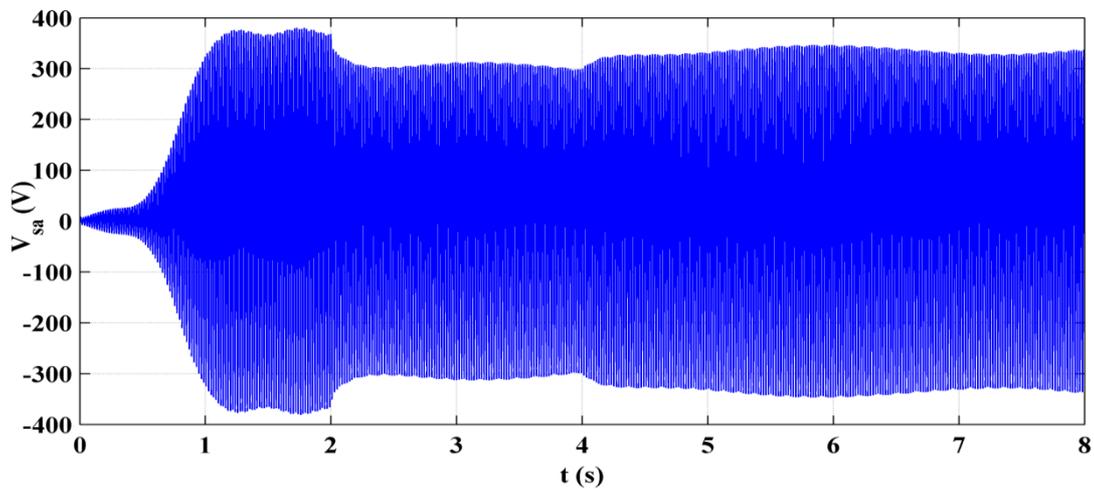


Figure III. 23: L'évolution de la tension de ligne statorique en charge RCs.

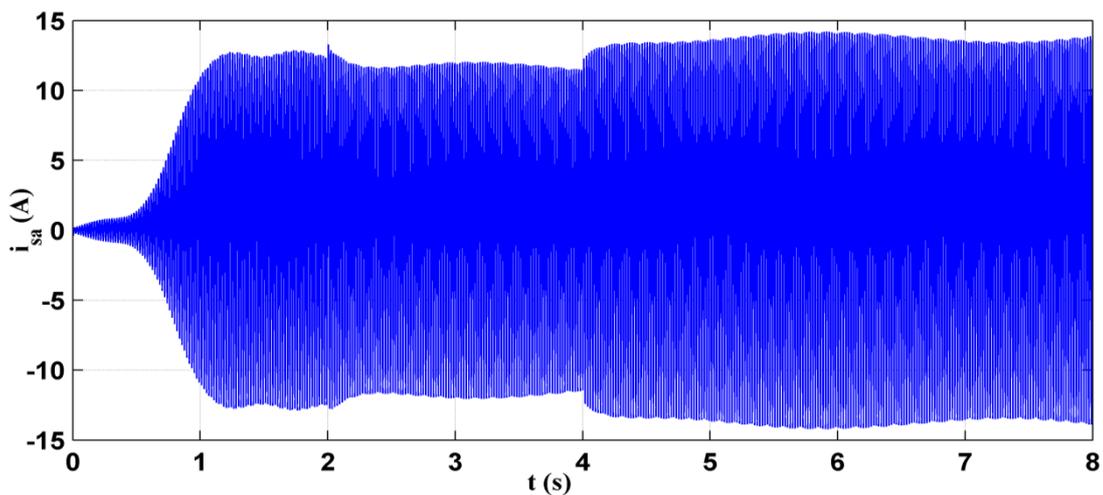


Figure III. 24 : L'évolution du courant de ligne statorique en charge RCs

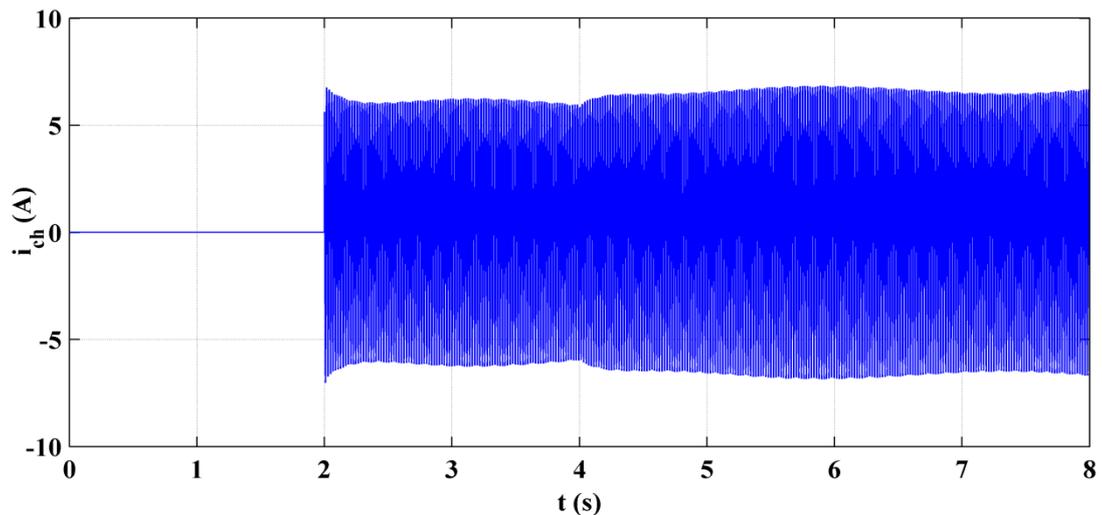


Figure III. 25: Evolution du courant de magnétisation en charge RCs.

3.2.4 Fonctionnement en charge RLCs

Dans le cas de la charge RLCs, les conditions de simulations sont similaires au cas précédent à la différence près de la charge par phase qui est constituée d'une capacité en série Cs avec la charge RL. Les mêmes grandeurs pour la résistance $R=50 \Omega$ est inséré à l'instant $t=2s$ par phase et on ajoute à l'instant $t=4s$ une inductance $L=30 \text{ mH}$ et en fin on à $t=8s$ on insère la capacité de $400\mu\text{F}$ en série. Les évolutions des tensions et courants statoriques ainsi que le courant de charge sont donnés par les figures (III.26, III.27 et III.28) respectivement.

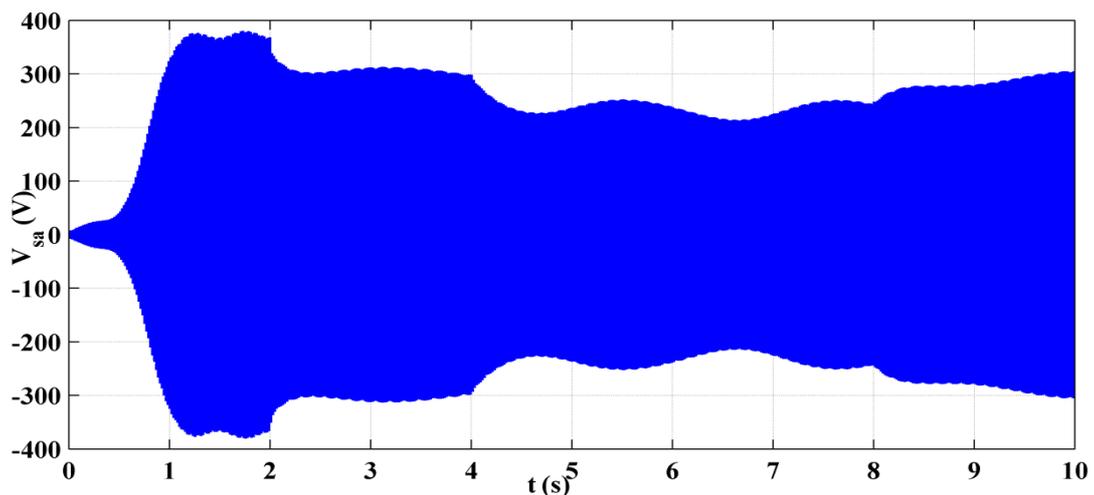


Figure III. 26 : L'évolution de la tension de ligne statorique en charge RLCs.

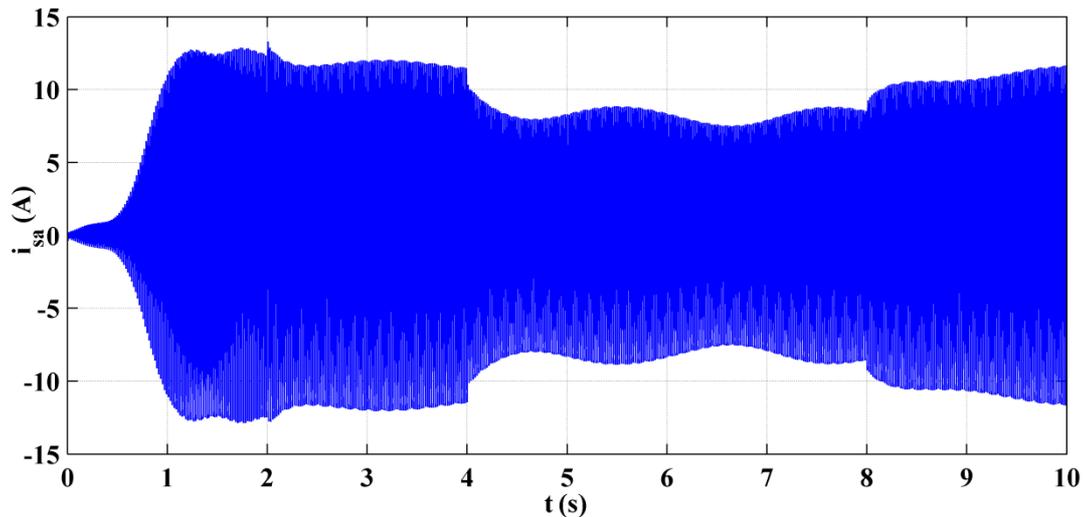


Figure III. 27 : Evolution du courant de ligne statorique en charge RLCs.

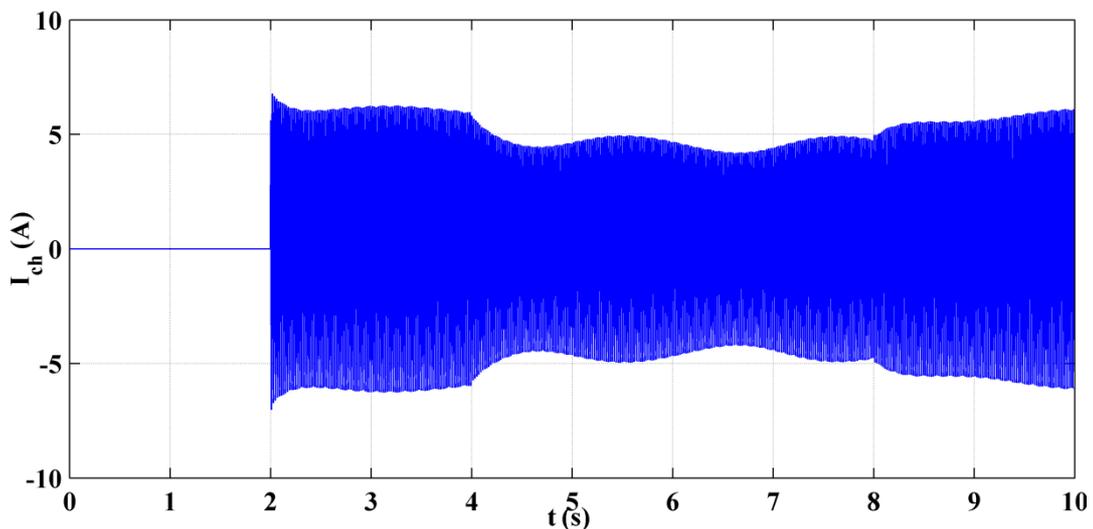


Figure III. 28 : Evolution du courant de magnétisation en charge RLCs.

D'après les figures précédentes on peut constater que à l'insertion de la charge engendre des diminutions aux niveaux des tensions et courants statoriques, les charges inductives consommant beaucoup plus d'énergie réactive vont entraîner des chutes de la tension plus importantes que dans le cas de charges purement résistives. L'insertion de Cs avec la charge (résistive ou inductive) permet de compenser la chute de tension.

L'évolution temporelle du courant de charge figure (III.28) similaire à celle de la tension.

2. Conclusion

Dans ce chapitre, il a été présenté la modélisation et la simulation numérique de la génératrice à cage auto-excitée dans le cas d'un fonctionnement saturé autonome à vide et en charge. D'où les grandeurs statoriques ne sont plus imposées et il faut fournir à la machine la puissance réactive nécessaire à sa magnétisation. Les grandeurs statoriques sont directement influencées par la variation de la vitesse du rotor de l'éolienne, les capacités d'excitation, et les charges connectées à la génératrice.

Les génératrices asynchrones à cage peuvent être une des solutions pour la génération de l'énergie (électricité) en fonctionnement dans des sites isolés. Le fonctionnement de ces génératrices en charge ou à vitesse variable nuit à leurs performances. Une commande sera étudiée dans le chapitre suivant pour pouvoir contrôler la tension des enroulements statoriques.

Chapitre IV

**Contrôle de la Tension de la
Génératrice Asynchrone par
un STATCOM**

1. Introduction

Les dispositifs FACTS (Flexible AC Transmission System) sont des moyens de contrôle rapide et flexibles. L'intérêt de ces systèmes est de satisfaire plusieurs besoins, contrôle de la tension et améliorer la gestion des flux de puissance, tels que la réparation correcte des puissances actives, la compensation de la puissance réactive et le renforcement de la stabilité des systèmes électriques [Mam 12] [Vik 14].

Le concept de base des systèmes FACTS est basé sur l'incorporation des dispositifs à base d'électronique de puissance dans les systèmes électro - énergétiques, afin de les rendre électroniquement contrôlables. L'ère des dispositifs FACTS était déclenchée par le développement de nouveaux dispositifs à semi-conducteurs de commutation électriques [Der 13] [Ham 12].

La technologie FACTS n'est pas limitée en un seul dispositif mais elle regroupe une collection de dispositifs, selon leur type, injecte un courant (ou une tension) ou en absorbent suivant un signal de commande délivré par un contrôleur. Différentes stratégies de commande ont été développées pour ce but. Nous allons présenter dans ce chapitre une étude concernant la modélisation et la commande de contrôleur STATCOM; qui est basé sur la commande de la tension afin de la maintenir constante pour des variations de la charge et de la vitesse [Der 13].

Une simulation du système étudié sera présentée dans ce chapitre. Cette simulation été effectuée dans l'environnement Matlab/Simulink.

2. Description du système étudié

Le système étudié dans notre travail est composé d'un aérogénérateur à vitesse variable utilisant une génératrice à cage d'écureuil auto excité par un banc de capacité ; un STATCOM qu'est l'élément principale et aussi d'une charge triphasé figure (IV.1).

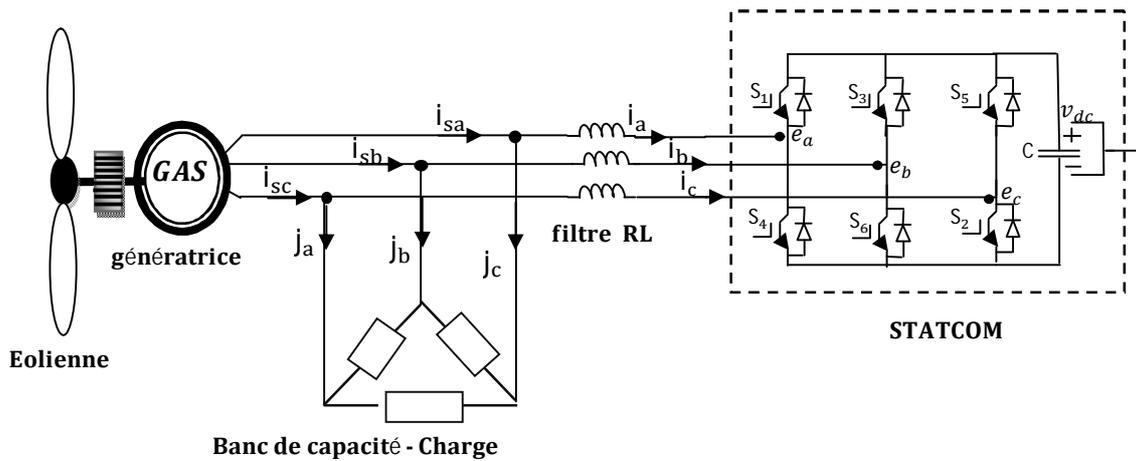


Figure IV.1 : Schéma global du système étudié.

2.1 Modélisation de la charge

Les travaux existents dans la littérature consultés [Bhi 06] [Bhi 10] [Gao12] [VEN 06] [Poi 03] utilisent des modèles du STATCOM connecté au système constitué de la machine, des condensateurs d'auto-amorçage et de la charge couplée en triangle.

Étant donné que le système de fonctionnement de la génératrice en autonome traité dans le chapitre précédent est couplé en étoile, on procède dans ce qui suit à ce basé sur une transformation "étoile/triangle" pour adapter le système étudié au modèle des STATCOM existant dans la littérature. La transformation "étoile/triangle" de l'ensemble charge et capacité de l'auto-amorçage est donnée par la figure (IV.2).

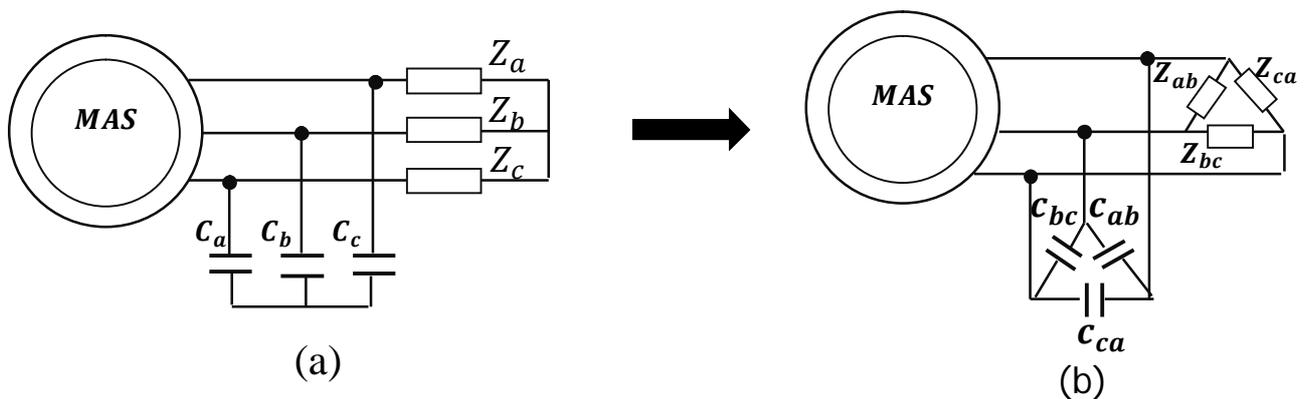


Figure IV.2: Transformation étoile-triangle de la charge et des condensateurs d'amorçage [Poi 03].

Pour déterminer l'expression de chaque élément en couplage triangle en utilise Les relations suivantes pour le passage 'étoile- triangle'

$$C_{ij} = \frac{\overline{C_i C_j}}{\overline{C_i + C_j + C_k}} \quad Z_{ij} = \frac{\overline{Z_i Z_j + Z_i Z_k + Z_j Z_k}}{\overline{Z_k}} \quad (IV.1)$$

Avec : $i \neq j \neq k ; i, j, k = a, b \text{ ou } c$.

L'expression globale de l'impédance X_{ij} résultant de la mise en parallèle des capacités C_{ij} et des charges Z_{ij} s'exprime alors ainsi :

$$\overline{X_{ij}} = \frac{\overline{C_{ij} \cdot Z_{ij}}}{\overline{C_{ij} + Z_{ij}}} \quad (IV.2)$$

Avec

$\overline{C_{ij}}$: Impédance du condensateur placé entre les phases i et j.

Après développement et utilisation de la variable de Laplace p, nous obtenons :

$$\overline{X_{ij}} = \frac{\frac{C_k}{p} \left(\frac{1}{C_i C_j} + \frac{1}{C_i C_k} + \frac{1}{C_j C_k} \right) (\overline{Z_i Z_j + Z_i Z_k + Z_j Z_k})}{\frac{C_k}{p} \left(\frac{1}{C_i C_j} + \frac{1}{C_i C_k} + \frac{1}{C_j C_k} \right) + (\overline{Z_i Z_j + Z_i Z_k + Z_j Z_k})} \quad (IV.3)$$

L'équation différentielle liant les tensions simples aux courants de lignes en fonction de l'expression de la charge. Considérons les différentes tensions et les différents courants comme indiqué sur la figure (IV.3).

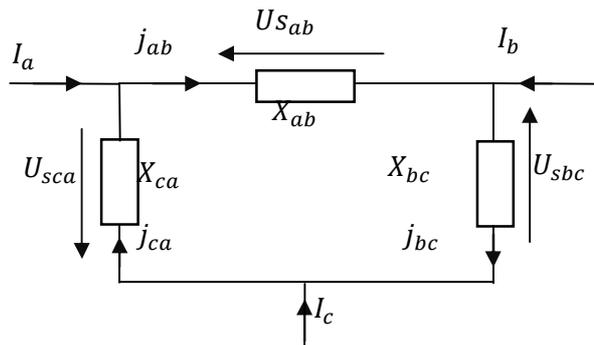


Figure IV.3: Schéma équivalent des impédances.

Dans cette partie on donne une modélisation de la charge et de l'auto-amorçage .

Des relations en fonction des capacités et des charges R-L sont utilisées pour donner les expressions des tensions composées vues par le stator (équation (IV.14)). L'équation (IV.15) permet alors de passer des tensions composées aux tensions simples qui sont rebouclées à

l'entrée du modèle de la machine asynchrone. Les trois courants de phase sont calculés à partir des courants de ligne statoriques et de l'équation (IV.16) [Poi 03].

A partir de l'équation (IV.3), nous avons :

$$\overline{U_{sij}} = \frac{C_k \left(\frac{1}{C_i C_j} + \frac{1}{C_i C_k} + \frac{1}{C_j C_k} \right) \cdot (\overline{Z_i Z_j} + \overline{Z_i Z_k} + \overline{Z_j Z_k})}{\frac{C_k}{p} \left(\frac{1}{C_i C_j} + \frac{1}{C_i C_k} + \frac{1}{C_j C_k} \right) + (\overline{Z_i Z_j} + \overline{Z_i Z_k} + \overline{Z_j Z_k})} \cdot \overline{J_{ij}} \quad (\text{IV.4})$$

Soit :

$$\overline{U_{sij}} \cdot \frac{C_k}{p} \left(\frac{1}{C_i C_j} + \frac{1}{C_i C_k} + \frac{1}{C_j C_k} \right) \cdot (\overline{Z_i Z_j} + \overline{Z_i Z_k} + \overline{Z_j Z_k}) = \frac{C_k}{p} \left(\frac{1}{C_i C_j} + \frac{1}{C_i C_k} + \frac{1}{C_j C_k} \right) + (\overline{Z_i Z_j} + \overline{Z_i Z_k} + \overline{Z_j Z_k}) \cdot \overline{J_{ij}} \quad (\text{IV.5})$$

$$\overline{Z_i} = R_i + L_i p \quad (\text{IV.6})$$

$$\overline{Z_i Z_j} = (R_i + L_i p) \cdot (R_j + L_j p) = R_i R_j + (R_i L_j + R_j L_i) p + L_i L_j p^2 \quad (\text{IV.7})$$

$$\overline{Z_i Z_j} + \overline{Z_i Z_k} + \overline{Z_j Z_k} = R_i R_j + R_i R_k + R_j R_k + (R_i L_j + R_j L_i + R_i L_k + R_k L_i + R_j L_k + R_k L_j) p + (L_i L_j + L_i L_k + L_j L_k) p^2 \quad (\text{IV.8})$$

En posant :

$$RR = R_i R_j + R_i R_k + R_j R_k \quad (\text{IV.9})$$

$$RL = R_i L_j + R_j L_i + R_i L_k + R_k L_i + R_j L_k + R_k L_j \quad (\text{IV.10})$$

$$LL = L_i L_j + L_i L_k + L_j L_k \quad (\text{IV.11})$$

$$\frac{1}{CC} = \frac{1}{C_i C_j} + \frac{1}{C_i C_k} + \frac{1}{C_j C_k} \quad (\text{IV.12})$$

En remplaçant alors l'opérateur de Laplace par des dérivées, nous obtenons :

$$U_{sjk} \cdot R_i C_i \left(\frac{1}{CC} \right) + \frac{dU_{sjk}}{dt} \cdot L_i C_i \left(\frac{1}{CC} \right) + \frac{dU_{sjk}}{dt} \cdot RR + \frac{d^2 U_{sjk}}{dt^2} \cdot RL + \frac{d^3 U_{sjk}}{dt^3} \cdot LL = C_i \left(\frac{1}{CC} \right) \cdot RR \cdot J_{jk} + C_i \left(\frac{1}{CC} \right) RL \cdot \frac{dJ_{jk}}{dt} + C_i \cdot \left(\frac{1}{CC} \right) \cdot LL \cdot \frac{d^2 J_{jk}}{dt^2} \quad (\text{IV.13})$$

L'équation différentielle de la charge est donnée par :

$$\frac{dU_{sij}}{dt} = - \left(\frac{1}{L_k C_k \left(\frac{1}{CC} \right) + RR} \right) \left(R_k C_k \left(\frac{1}{CC} \right) U_{sij} + RL \cdot \frac{d^2 U_{sij}}{dt^2} + LL \cdot \frac{d^3 U_{sij}}{dt^3} \right)$$

$$+ \left(\frac{1}{L_k C_k \left(\frac{1}{CC} + RR \right)} \right) \left(RRC_k \cdot \left(\frac{1}{CC} \right) j_{ij} + RLC_k \cdot \frac{dj_{ij}}{dt} + LL \cdot C_k \cdot \frac{d^2 j_{ij}}{dt^2} \right) \quad (\text{IV.14})$$

Les tensions simples sont liées aux tensions composées par :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \left(\begin{bmatrix} U_{sab} - U_{sca} \\ U_{sbc} - U_{sab} \\ U_{sca} - U_{sbc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_a + V_b + V_c \\ V_a + V_b + V_c \\ V_a + V_b + V_c \end{bmatrix} \right) \quad (\text{IV.15})$$

La relation entre les de ligne les courants de phase :

$$\begin{bmatrix} j_{ab} \\ j_{bc} \\ j_{ca} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \left(\begin{bmatrix} I_a - I_b \\ I_b - I_c \\ I_c - I_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} j_{ab} + j_{bc} + j_{ca} \\ j_{ab} + j_{bc} + j_{ca} \\ j_{ab} + j_{bc} + j_{ca} \end{bmatrix} \right) \quad (\text{IV.16})$$

2.2 Le STATCOM

Le STATCOM est un onduleur de tension comme illustré dans la figure (IV.4) à base de semi-conducteur associé à un condensateur comme source de tension continue et l'ensemble connecté en parallèle avec la génératrice asynchrone. pour diminuer l'ondulation du courant de charge on ajoute un filtre RL placé au plus près du convertisseur.

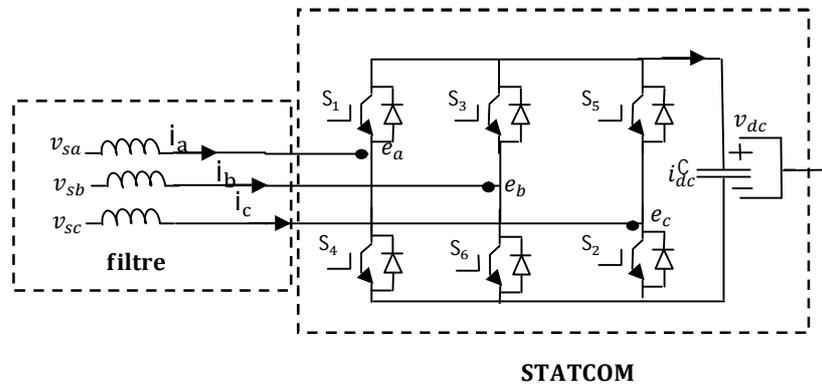


Figure IV.4: Schéma de principe d'un STATCOM.

On modélise le STATCOM par un ensemble d'interrupteurs idéaux: c'est-à-dire résistance nulle à l'état passant, résistance infinie à l'état bloqué, réaction instantanée aux signaux de commande [Bel 10]. Formés de trois bras composés chacun de deux cellules de commutation. Chaque cellule de commutation est composée d'un élément semi-conducteur, commandé à l'allumage et au blocage, et d'une diode antiparallèle (figure IV.5).

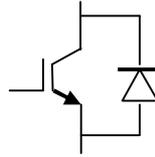


Figure IV.5 : Cellule de commutation.

Pour assurer la continuité des courants de sortie, il faut monter une diode en antiparallèle aux bornes de chaque transistor (IGBT). Cette diode est appelée diode de récupération [Idj 05].

L'état de chaque paire d'interrupteurs, supposés parfait, peut être représenté par trois grandeurs booléennes de commande S_j ($j = a, b, c$) telles que :

$S_j = 1$; si l'interrupteur du haut est fermé et celui du bas ouvert.

$S_j = 0$; si l'interrupteur du haut est ouvert et celui du bas fermé.

2.3 Mise en équation

L'équation de couplage entre côtés alternatif et continu V_{dc} est donnée par:

$$p V_{dc} = \frac{S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c}{C_{dc}} \quad (IV.17)$$

Avec : p : est l'opérateur de Laplace.

Le courant côté continu i_{dc} s'exprime encore par :

$$i_{dc} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c \quad (IV.18)$$

Les équations de tension pour le système triphasé équilibré sans raccordement du neutre peuvent être écrites ainsi :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = R_f \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L_f \cdot \frac{d}{dt} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (IV.19)$$

Les tensions composées sont données par :

$$U_{sab} = (v_{sa} - v_{sb}) \quad U_{sbc} = (v_{sb} - v_{sc}) \quad U_{sca} = (v_{sc} - v_{sa}) \quad (IV.20)$$

Avec:

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{IV.21})$$

Les tensions entre phases du STATCOM peuvent être décrites par:

$$e_{ab} = V_{dc}(S_a - S_b) \quad (\text{IV.22})$$

$$e_{bc} = V_{dc}(S_b - S_c) \quad (\text{IV.23})$$

$$e_{ca} = V_{dc}(S_c - S_a) \quad (\text{IV.24})$$

Telles que :

$$e_{ab} = e_a - e_b \quad (\text{IV.25})$$

$$e_{bc} = e_b - e_c \quad (\text{IV.26})$$

$$e_{ca} = e_c - e_a \quad (\text{IV.27})$$

Après développement du système des équations (IV.21) on trouve :

$$U_{sab} = R_f i_a + L_f P i_a + e_{ab} - R_f i_b - L_f P i_b \quad (\text{IV.28})$$

$$U_{sbc} = R_f i_b + L_f P i_b + e_{bc} - R_f i_c - L_f P i_c \quad (\text{IV.29})$$

$$\text{Avec : } i_a + i_b + i_c = 0 \quad (\text{IV.30})$$

$$\text{D'où : } i_c = -i_a - i_b \quad (\text{IV.31})$$

Et par la suite en remplaçant (IV.31) dans (IV.29) d'où on écrit U_{sbc} en fonction des courants i_a et i_b

$$U_{sbc} = R_f i_b + L_f P i_b + e_{bc} + R_f i_a + L_f P i_a + R_f i_b + L_f P i_b \quad (\text{IV.32})$$

D'après les équations (IV.28) et (IV.32) on trouve :

$$L_f P i_a - L_f P i_b = U_{sab} - e_{ab} - R_f i_a + R_f i_b \quad (\text{IV.33})$$

$$L_f P i_a + 2L_f P i_b = U_{sbc} - e_{bc} - R_f i_a - 2R_f i_b \quad (\text{IV.34})$$

Et en fin les expressions finales des courants donnée comme suit :

$$Pi_a = \{U_{sbc} - e_{bc} + 2(U_{sab} - e_{ab}) - 3R_f i_a\} / 3L_f \quad (IV.35)$$

$$Pi_b = \{U_{sbc} - e_{bc} - (U_{sab} - e_{ab}) - 3R_f i_b\} / 3L_f \quad (IV.36)$$

2.4 Commande du STATCOM

Le principal objectif de la proposition de stratégie de contrôle consiste à réguler la tension aux bornes de la génératrice à cage simultanément contre les variations de la vitesse du vent et de la charge.

Les enroulements statoriques de cette machine sont connectés à un onduleur de tension et le rotor est entraîné par l'éolienne à vitesse variable. On adopte une stratégie de commande, comportant deux contrôleurs de type PI, le premier est désigné pour le réglage de la tension continue et le second pour le réglage de l'amplitude de la tension des enroulements statoriques. La sortie des régulateurs donne lieu des courants (fondamental) direct et en quadratique qui sont respectivement les courants de référence de la commande des interrupteurs de l'onduleur afin de maintenir la tension constante aux bornes de la génératrice asynchrone [Bhi 06] [Der 13] [Mek 04].

2.4.1 Contrôle des courants par hystérésis

Cette commande, basé sur le contrôle directe en courant, est très adaptée pour les organes ayant une action à deux positions comme l'IGBT qui peut être soit ouvert ou bloqué [Bou 04] [Kou 06].

Le comparateur à hystérésis fonctionne selon le principe expliqué dans la figure (IV.6)

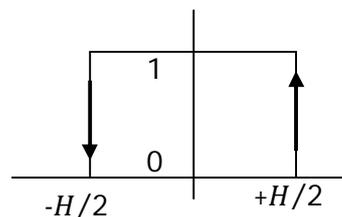


Figure IV.6: Schéma de principe de la bande d'hystérésis.

L'interrupteur s'ouvre si l'erreur devient inférieure à $-H/2$, il se ferme si cette dernière est supérieure à $+H/2$, où H représente la fourchette (ou largeur) d'hystérésis. Si l'erreur est maintenant comprise entre $-H/2$ et $+H/2$ (c.-à-d., qu'elle varie à l'intérieur de la fourchette d'hystérésis), l'interrupteur ne commute pas [Bou 04] [Bou 09] [Mat 14].

Le schéma synoptique de la commande des courants par régulateur à hystérésis est donné par la figure suivante :

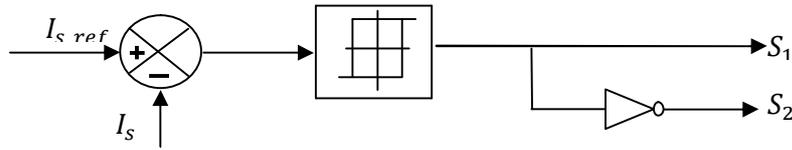


Figure IV.7: Schéma de principe de la commande à hystérésis.

2.3.2 Principe de la commande

La philosophie de commande utilisée pour réguler la tension aux bornes de la génératrice est basée sur le contrôle des courants (qui ont deux composantes en phase et en quadrature avec la tension alternative) en utilisant deux régulateurs PI. Le schéma de principe de la commande plus le système étudié est donné par la figure (IV.8).

Les vecteurs en phase unitaires $u_{a,b,c}$ sont des fonctions sinusoïdales triphasées, calculé en divisant la tension alternative v_{sa}, v_{sb} et v_{sc} par leur amplitude V_t :

$$u_a = \frac{V_{sa}}{V_t} ; \quad u_b = \frac{V_{sb}}{V_t} ; \quad u_c = \frac{V_{sc}}{V_t} \quad \text{(IV.37)}$$

Un autre ensemble de vecteurs unitaires en quadrature $w_{a,b,c}$ est une fonction sinusoïdale obtenue à partir des vecteurs en phase $u_{a,b,c}$ en utilisant une transformation de quadrature tel que :

$$w_a = \frac{-u_b + u_c}{\sqrt{3}} \quad \text{(IV.38)}$$

$$w_b = \frac{\sqrt{3}u_a}{2} + \frac{u_b - u_c}{2\sqrt{3}} \quad \text{(IV.39)}$$

$$w_c = \frac{-\sqrt{3}u_a}{2} + \frac{u_b - u_c}{2\sqrt{3}} \quad \text{(IV.40)}$$

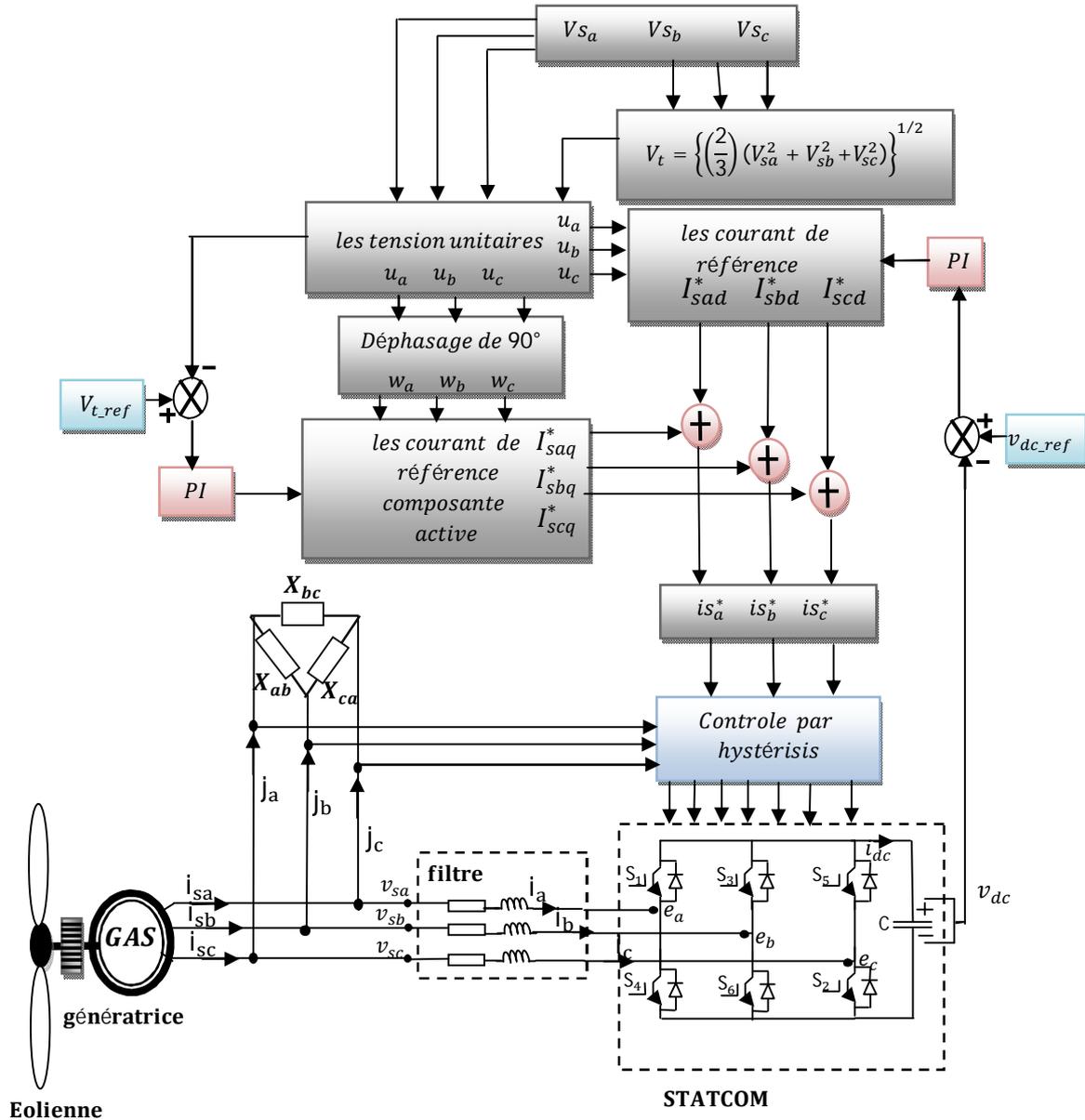


Figure IV.8: Description du système plus principe de la commande.

L'expression de l'amplitude de la tension triphasée à la sortie de GAS est donnée par :

$$V_t = \left\{ \left(\frac{2}{3} \right) (V_{sa}^2 + V_{sb}^2 + V_{sc}^2) \right\}^{1/2} \quad (\text{IV.41})$$

Cette amplitude de la tension alternative v_t est comparée avec l'amplitude de la tension de référence v_{t_ref} et l'erreur de ces tensions est traitée dans le premier régulateur (PI) de la commande.

L'erreur de tension alternative :

$$V_{er(n)} = V_{t_réf} - V_{t(n)} \quad (\text{IV.42})$$

La sortie du premier régulateur de la boucle de commande de tension alternative est multipliée par les vecteurs unitaires des tensions $w_{a,b,c}$ (les composantes en quadrature) pour donner les courants de référence (composantes des courants réactifs) I_{sq}^* qui contrôlent l'amplitude de la puissance réactive générée par le STATCOM.

$$I_{sq(n)}^* = I_{sq(n-1)}^* + K_{pa}\{V_{er(n)} - V_{er(n-1)}\} + K_{ia}V_{er(n)} \quad (\text{IV.43})$$

Où : K_{pa} et K_{ia} sont des constantes du gain proportionnel et intégral du régulateur PI.

$V_{er(n)}$ et $V_{er(n-1)}$ sont les erreurs de tension à l'instant (n)^{ième} et (n-1)^{ième}, et $I_{sq(n-1)}^*$ est l'amplitude de référence courant I_{sq}^* (la composante en quadrature) à l'instant (n-1)^{ième}

Les composantes en quadrature des courants de source de référence sont estimées :

$$I_{saq}^* = I_{sq}^* * w_a \quad ; \quad I_{sbq}^* = I_{sq}^* * w_b \quad ; \quad I_{scq}^* = I_{sq}^* * w_c \quad (\text{IV.44})$$

L'erreur de la tension continue est générée dans le deuxième régulateur PI est multiplié par les vecteurs unitaires $u_{a,b,c}$ (qui en phase avec les tensions alternatives correspondants) pour obtenir les courants de référence (les composantes actifs) I_{sd}^* .

L'erreur en tension au bus continue :

$$V_{dc_er(n)} = V_{dc_réf} - V_{dc(n)} \quad (\text{IV.45})$$

Où : $V_{dc_réf}$ est la tension continue de référence. La sortie du deuxième régulateur PI est exprimée comme :

$$I_{sd(n)}^* = I_{sd(n-1)}^* + K_{pd}\{V_{dc_er(n)} - V_{dc_er(n-1)}\} + K_{id}V_{dc_er(n)} \quad (\text{IV.46})$$

$I_{sd(n)}^*$ est considérée comme l'amplitude de courant actif.

K_{pd} et K_{id} sont des constantes de gain proportionnel et intégral respectivement de deuxième contrôleur PI de la tension du bus continu.

Les composantes en phase des courants de références sont estimées:

$$I_{sad}^* = I_{sd}^* * u_a \quad I_{sbd}^* = I_{sd}^* * u_b \quad I_{scd}^* = I_{sd}^* * u_c \quad (\text{IV.47})$$

La somme des courants de références en phase et en quadrature donne les courants finals de référence :

$$i_{sa}^* = I_{sad}^* + I_{saq}^* \quad (\text{IV.48})$$

$$i_{sb}^* = I_{sbd}^* + I_{sbq}^* \quad (\text{IV.49})$$

$$i_{sc}^* = I_{scd}^* + I_{scq}^* \quad (\text{IV.50})$$

Les courants de source de référence i_{sa}^* , i_{sb}^* , i_{sc}^* sont comparés avec les courants des sources détectées j_a, j_b et j_c respectivement. La sortie des régulateurs par hystérésis donne les signaux de la commande S_a, S_b, S_c du STATCOM.

3. Résultats de simulation et interprétation

Un programme de simulation sous Matlab Simulink a été établi sur la base du schéma globale de la figure (IV.5).

Le système étudié est composé d'une génératrice connectée à un STATCOM commandé suivant la stratégie de commande présentée ci-dessus. Dans ce qui suit, quelques tests de simulations ont été effectués afin d'analyser les performances de la commande. Le premier test est consacré à la vérification des performances de la commande (poursuite) à vitesse et charge constantes, le deuxième test permettra d'étudier l'influence des variations de la vitesse, le troisième sera consacré au comportement de la commande en cas de variation de la charge R/L triphasée, le quatrième sera basé sur la variation de la vitesse d'entraînement ainsi que la charge ce qu'est proche du cas réel et enfin en dernier test on applique des variation au niveaux de la capacité de l'amorçage.

3.1 Test de poursuite

Le premier test a pour objectif de vérifier le comportement de la commande pour une charge et vitesse fixes. Les deux régulateurs PI sont utilisés pour maintenir le module des tensions statoriques V_s et la tension du bus continue V_{dc} à leurs valeurs de référence.

La génératrice entraînée à la vitesse de synchronisme et alimente une charge résistive de 100 Ω . On fixe les références de V_{dc} et V_s à 700 V et 500 V respectivement à $t=2s$, on varie la valeur de V_s de 500 V à 550 V puis à l'instant $t=4s$ la valeur de cette dernière devient 400 V. Par contre la valeur de V_{dc} est varié de 700 V à 600V à l'instant $t=6s$. Comme illustre sur les figures (IV.9 et IV.10):

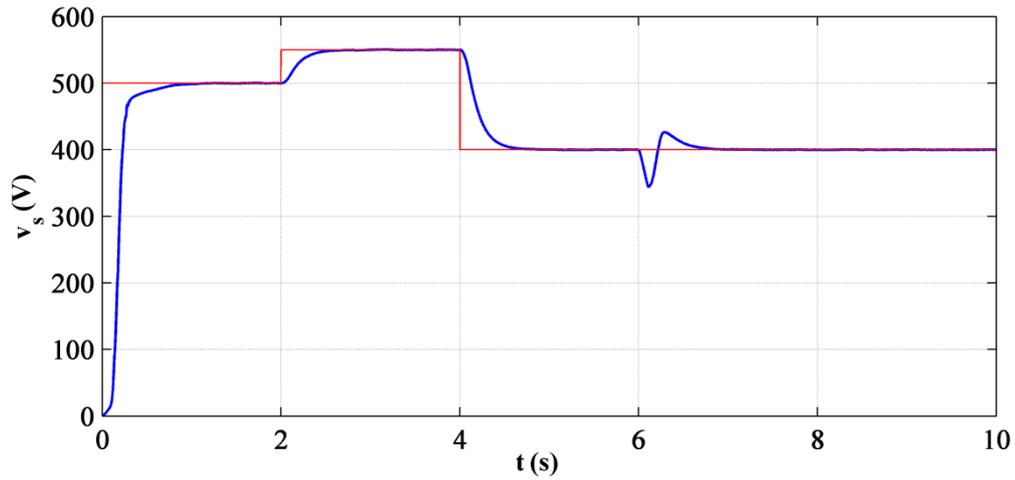


Figure IV. 9: Le module de la tension statorique et sa référence.

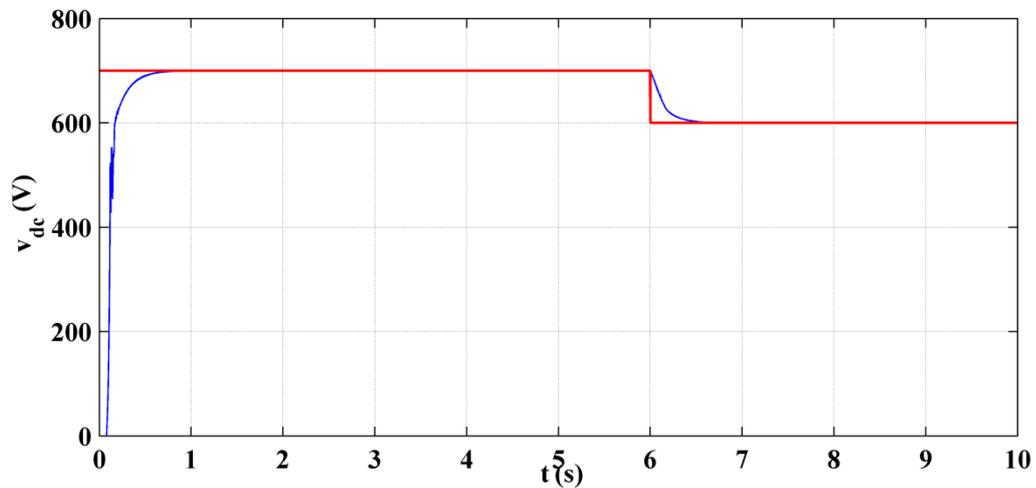


Figure IV. 10 : La tension continue et sa référence.

On constate que la tension V_s est influencée par la variation de V_{dc} à l'instant $t=6s$ avec une variation d'ordre 13.75%. Par contre la tension continue est insensible à la variation de la tension statorique. Cette variation ne dégrade pas les performances de la commande proposée, et ceci apparaît dans la bonne poursuite des deux tensions V_{dc} et V_s à des références imposées.

La figure (IV.11) montre l'allure des tensions statoriques. On constate que son évolution est similaire à celle de la tension V_s .

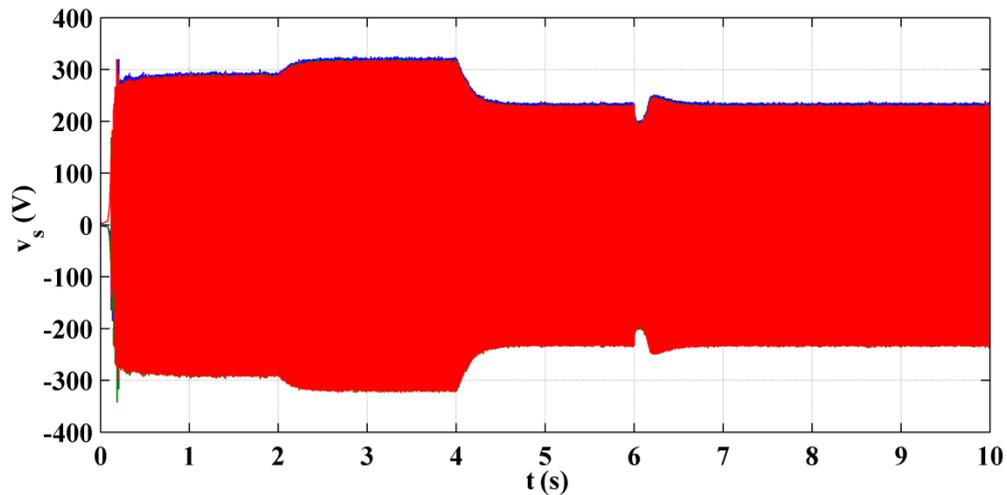


Figure IV. 11 : Allure des tensions statoriques.

3.2 Test avec variation de la vitesse d'entraînement

Dans ce test, on va tester les performances de la commande dans le cas de la variation de la vitesse d'entraînement. Le profil de la vitesse est représenté sur la figure (IV.12)

En premier temps, la génératrice est entraînée à la vitesse de synchronisme alimentant une charge triphasée résistive de $R = 100\Omega$. La valeur de référence de l'amplitude des tensions statoriques est maintenue à 570V, et celle de la tension de bus continue V_{dc} est fixée à la valeur de 700 V. A l'instant $t = 2$ s, la vitesse de rotation est augmentée de 20 % puis une diminution de 20 % à l'instant $t = 4$ s.

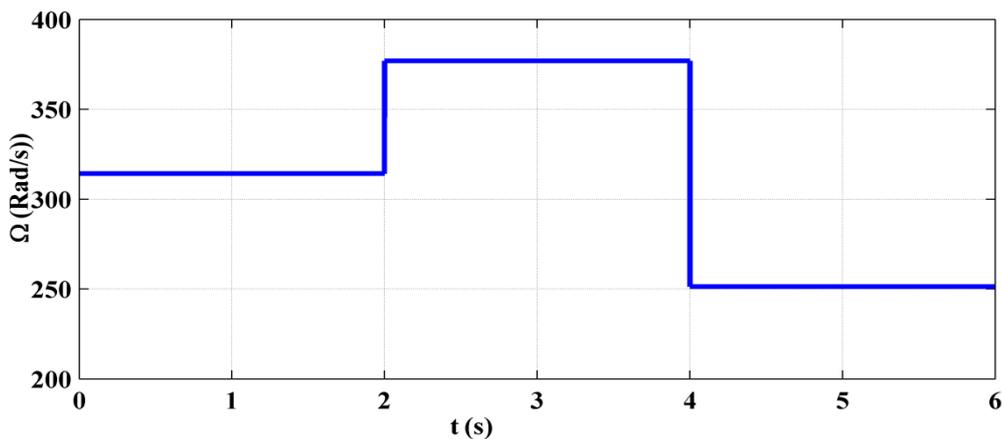


Figure IV. 12: Le profil de la vitesse.

La tension du bus continu et le module de la tension statorique sont représentés sur les figures (IV. 13) et (IV. 14) respectivement.

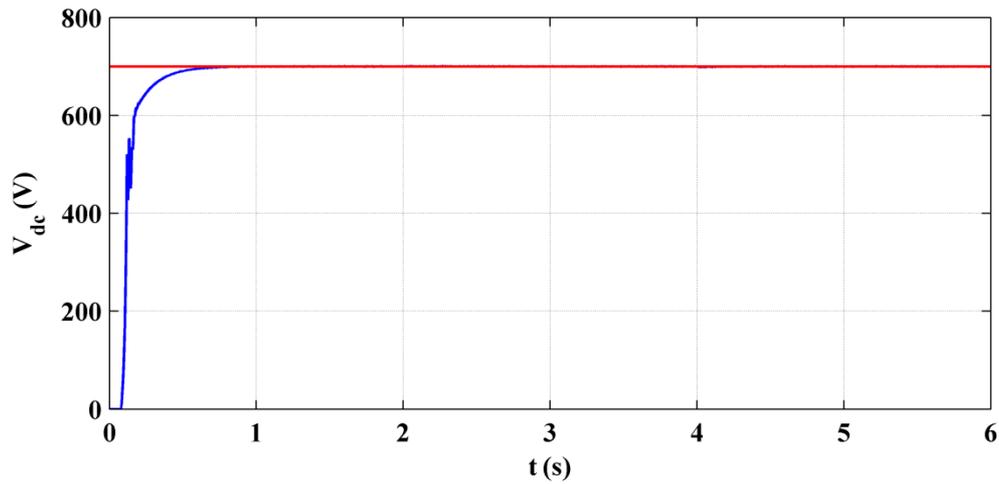


Figure IV. 13: La tension du bus continu.

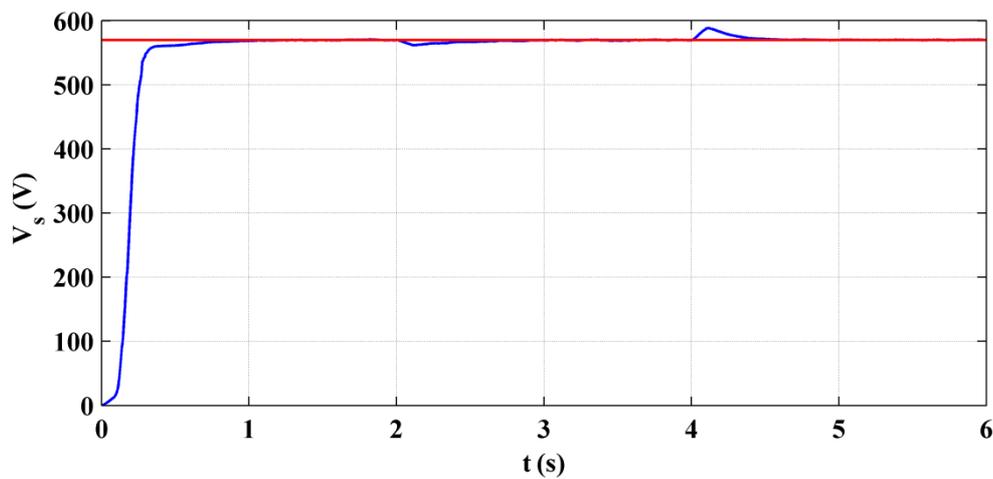


Figure IV. 14: Le module de la tension statorique.

Nous remarquons que ce réglage donne de très bonnes performances de poursuite et sans dépassement pour la tension continue, Ceci n'est pas totalement le cas pour le module de la tension statorique qui s'écarte légèrement de la valeur de référence quand la vitesse varie. Les écarts, restent néanmoins largement en dessous de 4%. On peut dire qu'il est pratiquement insensible à la variation de la vitesse imposé à la machine.

Les évolutions temporelles de la tension statorique ainsi que des courants statoriques, les courants de l'ensemble charge-condensateur de l'auto amorçage, sont présentées sur les figures (IV. 15 - IV. 16 et IV. 17) respectivement. On constate que leurs amplitudes restent constant malgré la variation de la vitesse étant donné la charge est constante.

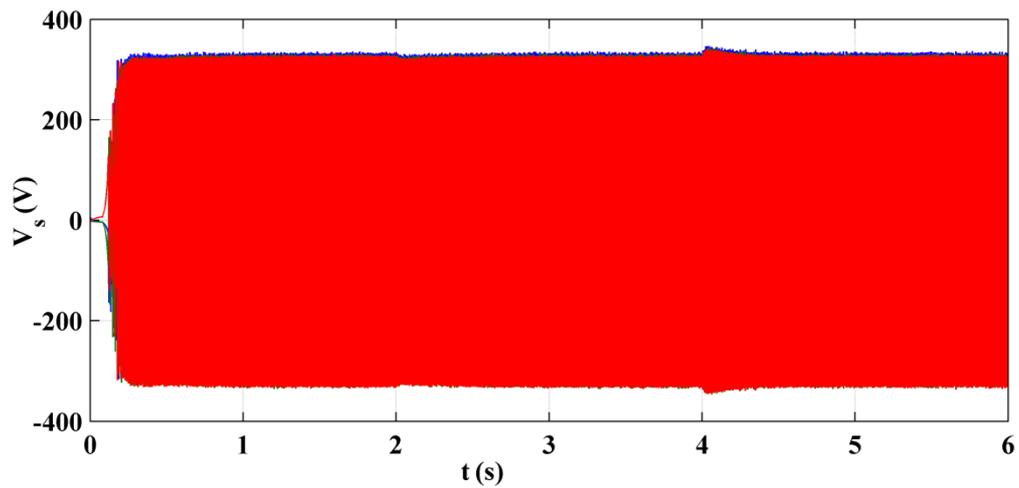


Figure IV. 15 : L'évolution des tensions statorique.

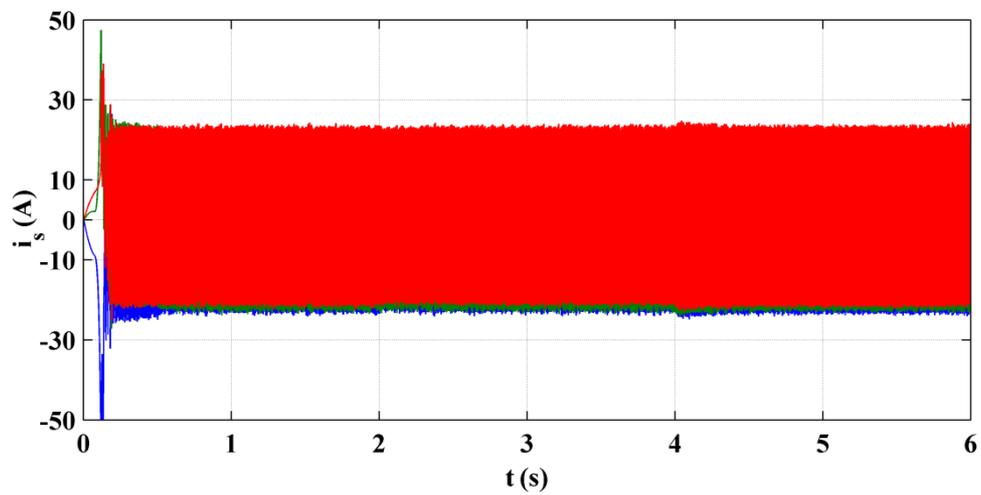


Figure IV. 16 : L'évolution des courants statorique.

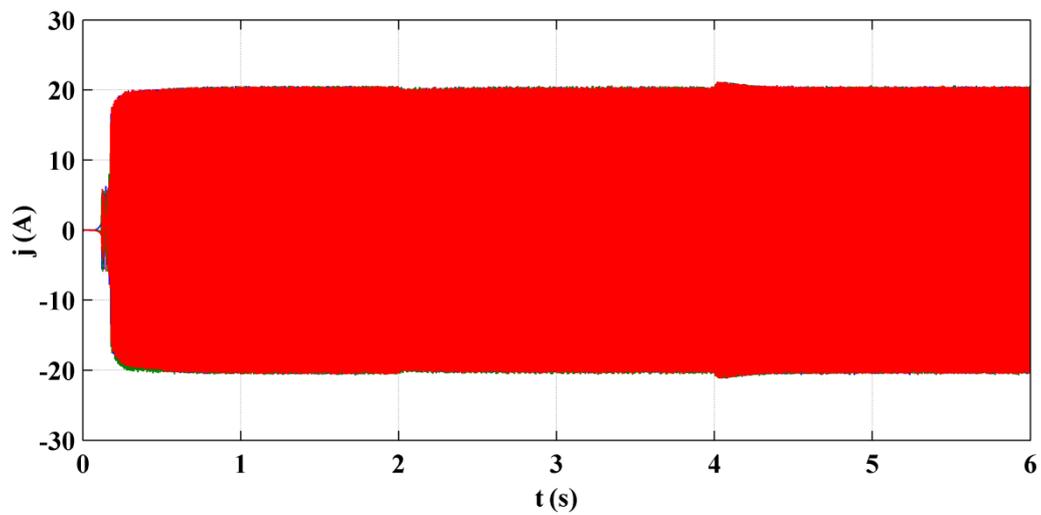


Figure IV. 17 : L'évolution du courant de l'ensemble charge-condensateur.

3.3 Test avec variation de la charge

3.3.1 Test en charge équilibrée

Dans ce test, on s'intéresse aux performances de la commande en présence des variations de la charge. La génératrice est entraînée à la vitesse de synchronisme. Les simulations sont menées pour une charge initiale purement résistive $R = 100\Omega$ à l'instant $t = 2s$, la résistance est augmentée à une valeur de 200Ω , puis à $t = 6s$, la résistance est diminuée à sa valeur initiale. A l'instant $t = 4s$ on insère une inductance de 30 mH et on augmente cette dernière à 60 mH à l'instant $t=6s$. Le profil de la variation de la charge est donné par les deux figures suivantes (IV.18.a) et (IV.18.b)

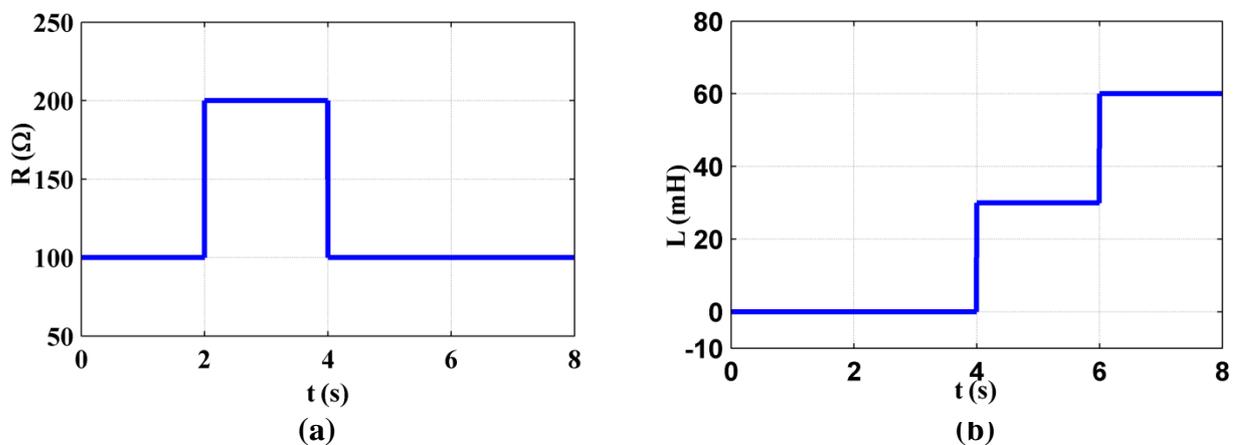


Figure IV. 18 : Profile de charge appliquée.

Les réponses de la tension du bus continu V_{dc} et le module des tensions statoriques V_s sont représentées sur les figures (IV.18) (IV.19)

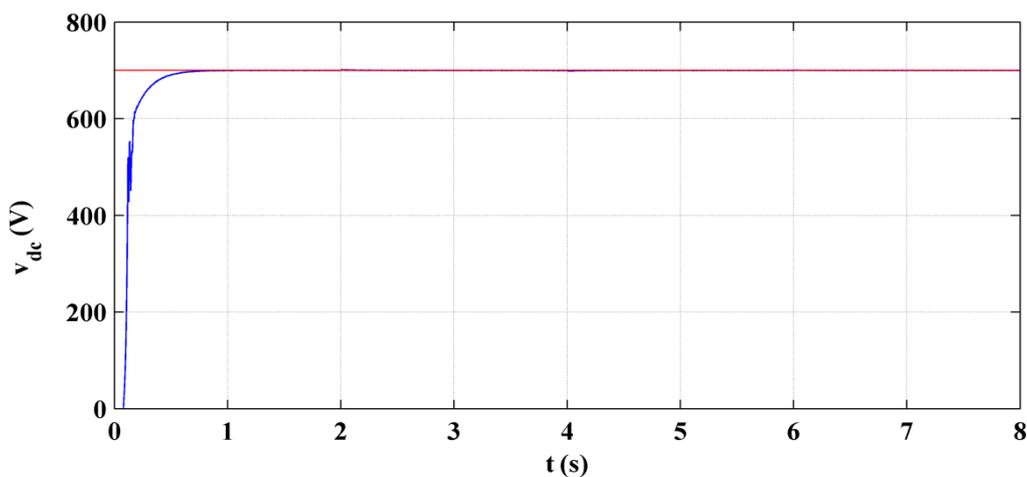


Figure IV. 19 : La réponse de la tension du bus continu.

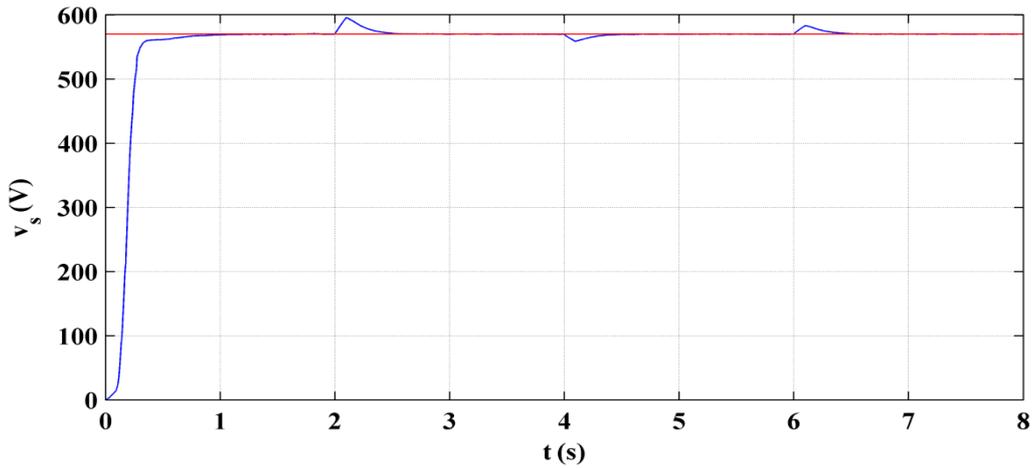


Figure IV. 20 : La réponse du module de la tension statorique.

On constate que la tension du bus continu V_{dc} est bien régulée et totalement insensible à la variation de la charge. La tension V_s est très légèrement sensible à la variation de la charge contrairement à la tension continue. On constate des dépassements avoisinants les 5% lors de la variation de la charge ce qui est acceptable.

Les figures (IV. 21) et (IV. 22) représentent les tensions et courants statoriques. On constate également que ces évolutions sont similaires à la tension V_s .

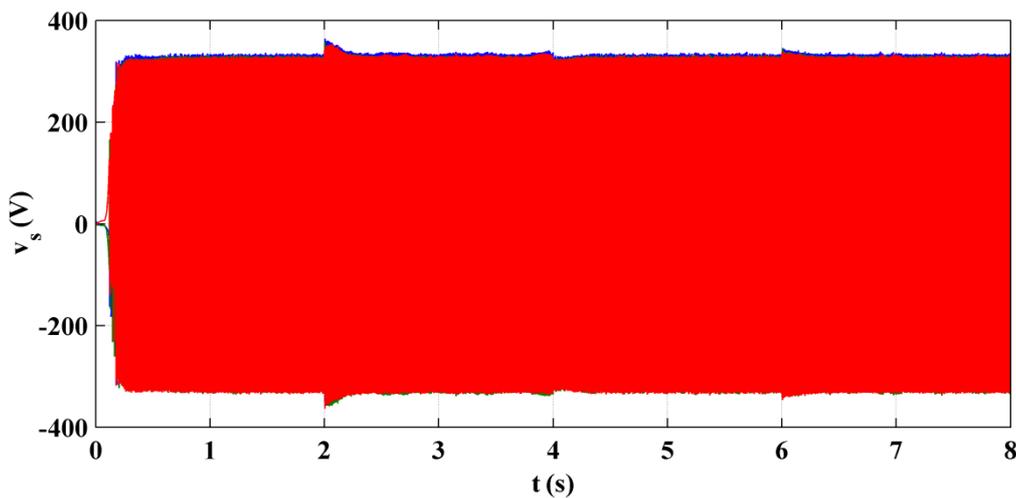


Figure IV. 21 : Les tensions statoriques.

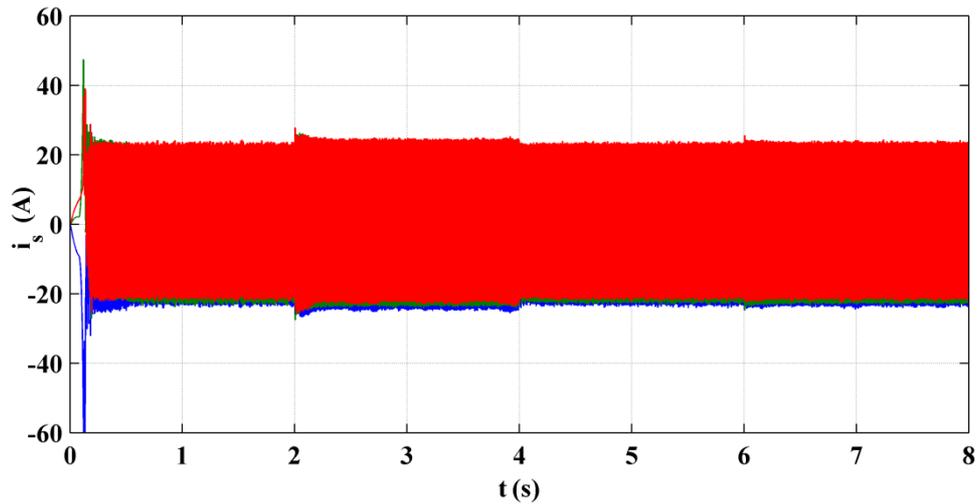


Figure IV. 22 : Les courants statoriques.

3.3.2 Test en charge déséquilibrée

Au démarrage la génératrice est amorcée avec une charge purement résistive équilibrée de valeur $R=100\Omega$ puis à $t=2s$ on applique une charge R déséquilibrée pour chaque phase qu'est répartie comme suit:

- Phase a : une résistance $R_a = 100\Omega$.
- Phase b : une résistance $R_b = 150\Omega$.
- Phase c : une résistance $R_c=200\Omega$.

Et après à ($t=4s$) on insert une inductive ($L=30mH$) qu'est fixe pendant ce test. Les figures (IV.23) (IV.24) représentent les réponses des tensions V_s et V_{dc} respectivement. On constate toujours la bonne poursuite des deux grandeurs régulées (V_s et V_{dc}).

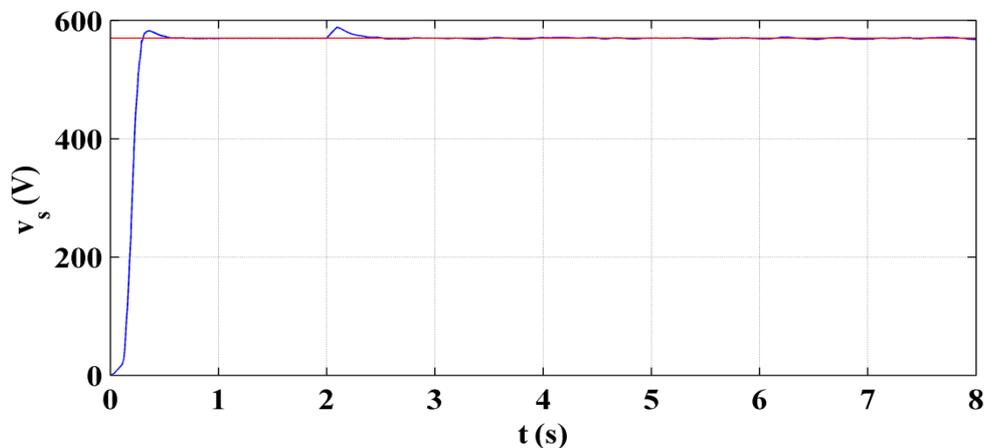


Figure IV. 23 : L'allure du module de la tension statorique.

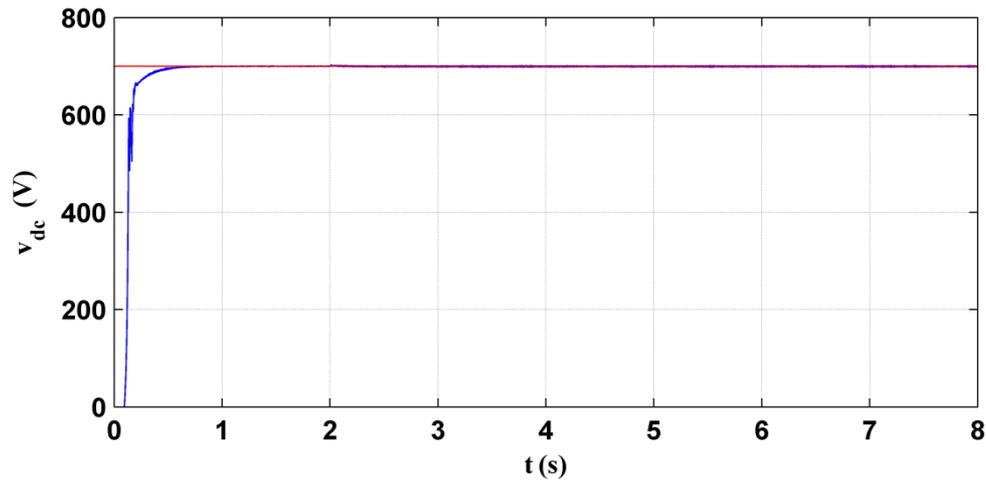


Figure IV. 24 : L'allure de la tension du bus continu.

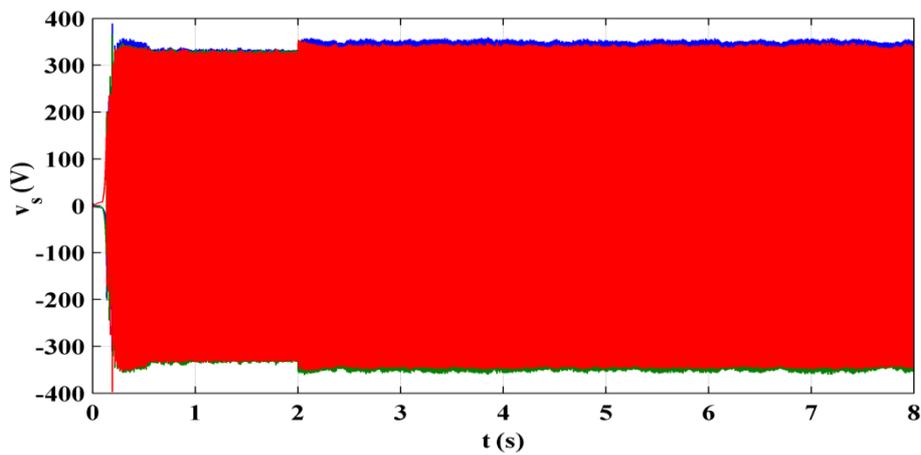


Figure IV. 25: L'allure des tensions statoriques.

3.4 Test avec variation de la vitesse et de la charge

Dans cette partie on fait varier la charge et la vitesse au même temps. Le profil de vitesse est représenté sur figure (IV.26) . les variations de la charge est similaire à celui de profile figure (IV. 18).

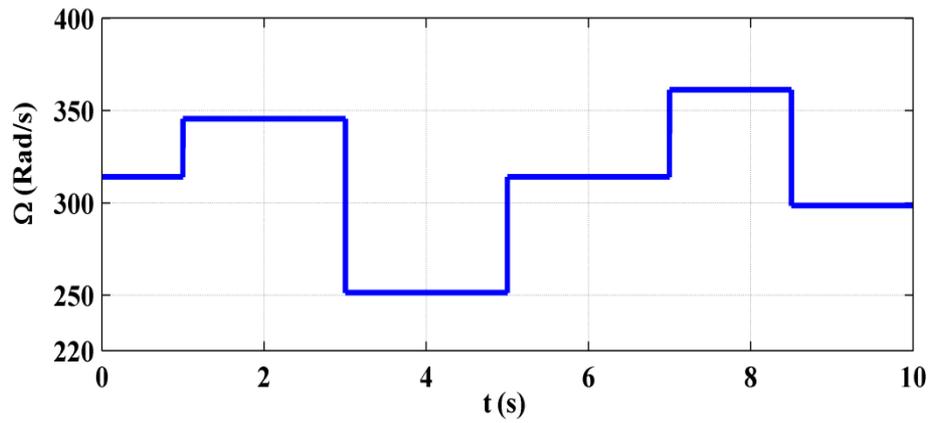


Figure IV. 26 : La variation de la vitesse.

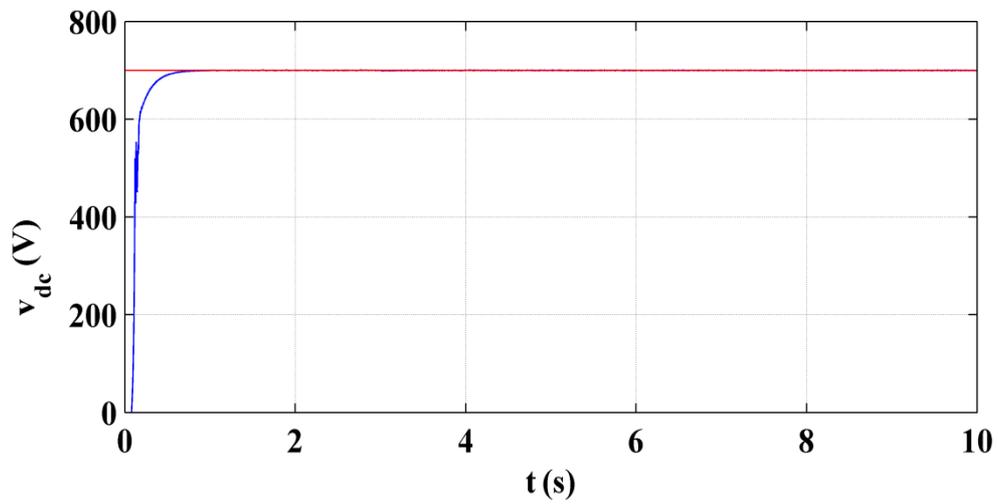


Figure IV. 27 : La tension du bus continu V_{dc} .

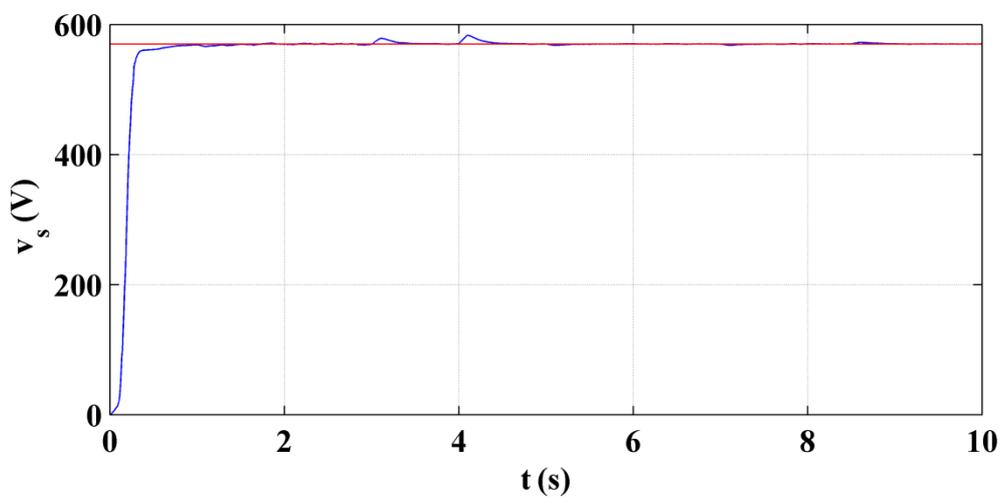


Figure IV. 28: Le module de la tension alternative V_s .

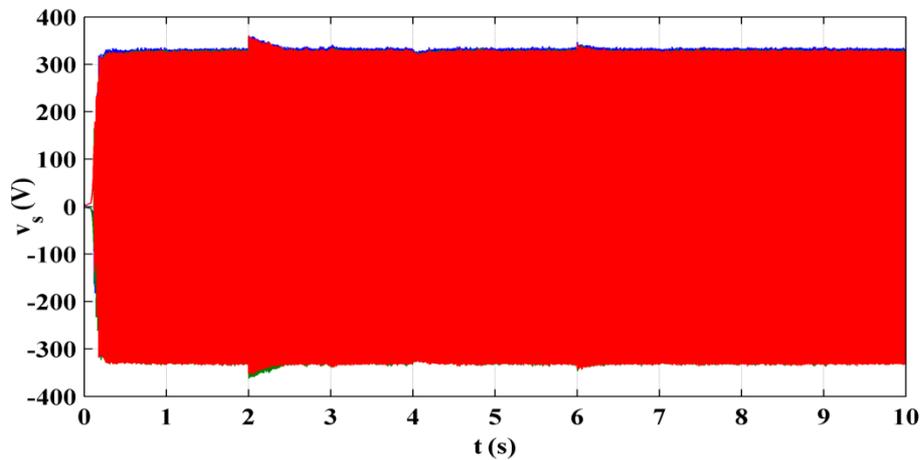


Figure IV. 29: La tension statorique triphasée.

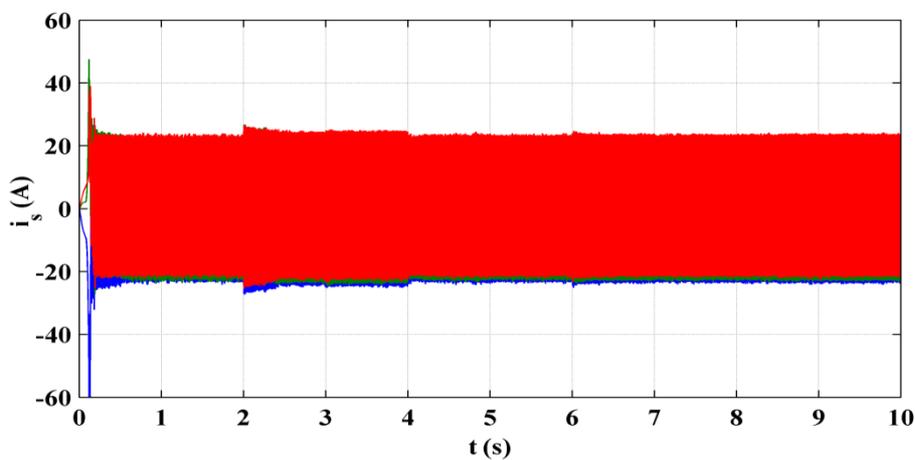


Figure IV.30 : Les courants statoriques.

Les résultats de simulation obtenus au-dessus montrent que la régulation de la tension du bus continu est réalisée avec succès figure (IV.27) et au cours des différentes variations, les régulateurs interviennent pour maintenir le module de la tension statorique figure (IV.28) à sa référence.

3.5 Test avec variation de la capacité d'auto-amorçage

Les performances lors de variations de la capacité de l'auto-amorçage ont également été testées avec la commande. Dans cette application, La génératrice est entraînée à la vitesse de synchronisme et la valeur de la charge R est fixe $R=100\Omega$. La valeur du condensateur de l'auto-amorçage est initialement égale à $C=100\mu\text{F}$ puis une augmentation de 20% $C=120\mu\text{F}$ à $t=2\text{s}$ et à $t=4\text{s}$, la capacité est ramenée à sa valeur initiale $C=100\mu\text{F}$ puis à l'instant $t=6\text{s}$

on applique une diminution de 20% de sa valeur initiale comme illustré dans la figure suivante :

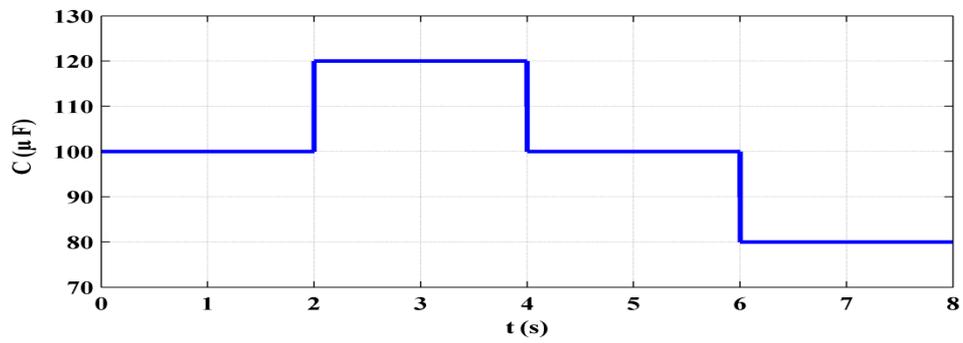


Figure IV. 31 : Profile de variation de la capacité.

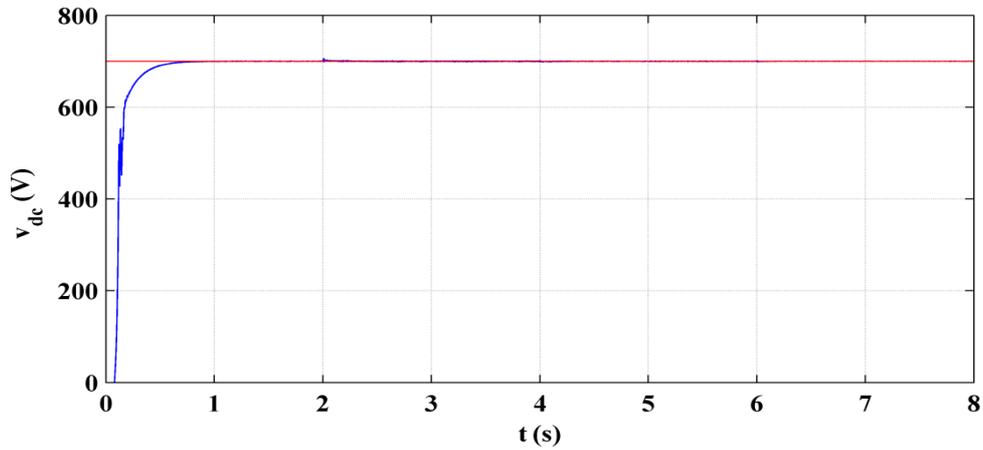


Figure IV. 32: Représentation de la tension du bus continu.

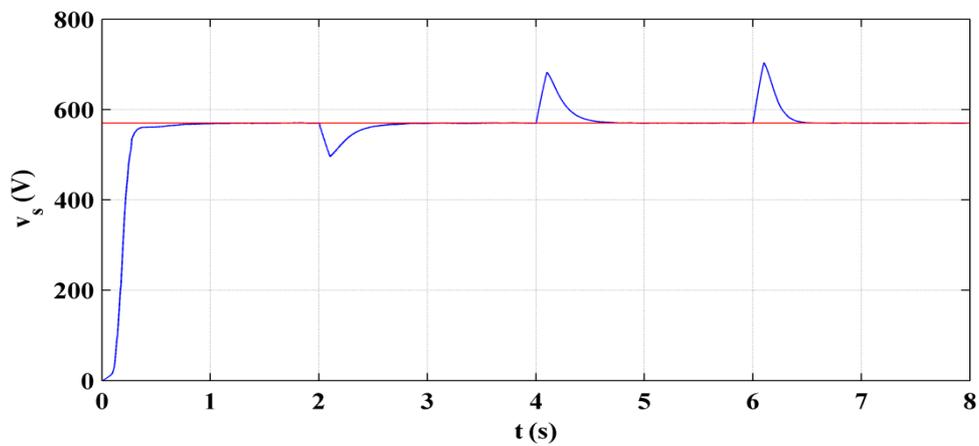


Figure IV. 33: Représentation du module de la tension alternative.

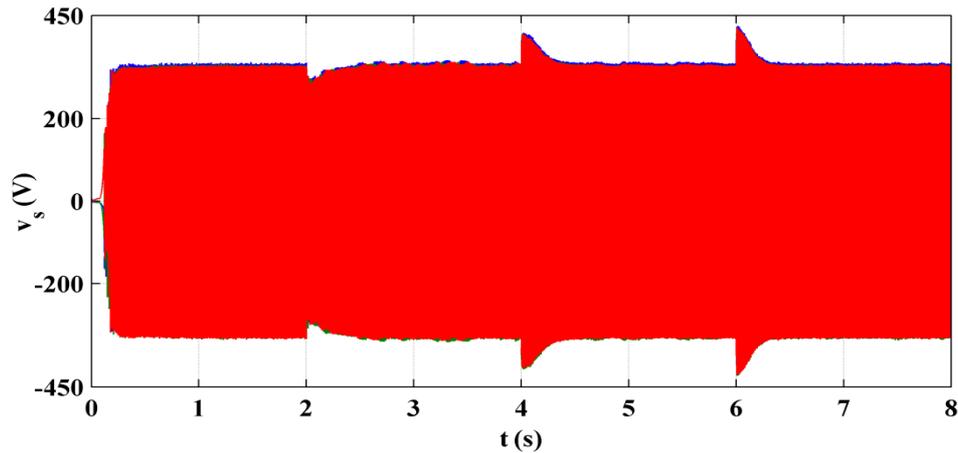


Figure IV. 34: La tension statorique en triphasée.

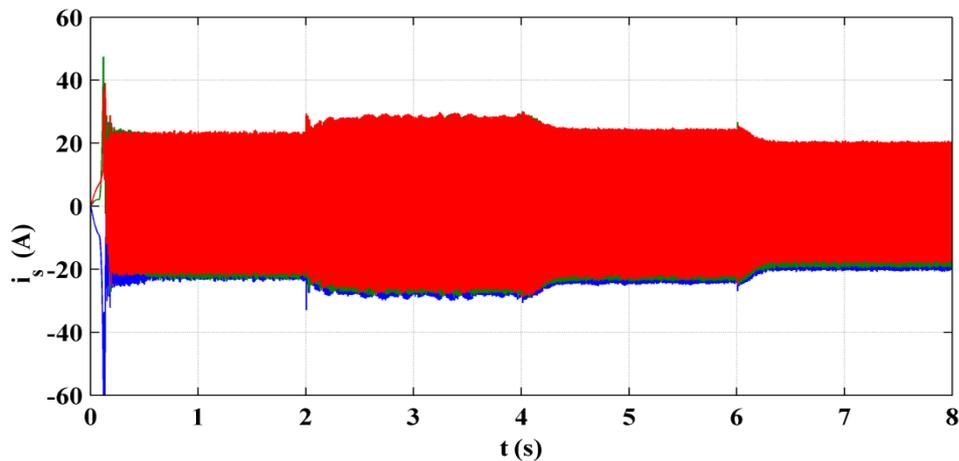


Figure IV. 39 : Les courants statoriques triphasée.

Les régulations de la tension du bus continu V_{dc} et la tension V_s sont présentées par les deux figures suivantes (IV.32) et (IV.33). Les évolutions des tensions et des courants statoriques sont illustrés par les figures (IV.34) et (IV.34)

A partir des figures précédentes, on peut observer que de l'influence de la variation de capacité l'auto-amorçage sur la poursuite des deux tension V_s et V_{dc} est pratiquement nulle La tension du bus continu V_{dc} est bien asservie à sa consigne 700V. Par contre la tension V_s augmente ou diminue lors d'une augmentation ou diminution de la capacité d'où il ya des variations de la tension V_s d'ordre 21.05 % au maximum à l'instant $t=6s.7$

Conclusion

Ce chapitre a mis en évidence l'efficacité de la commande utilisé dont l'objectif est de contrôler la tension statorique de la génératrice asynchrone à base d'un STATCOM par deux régulateurs PI afin de maintenir la tension continue et le module de la tension statorique constante pour des variations de vitesse et/ou de charge.

Les résultats, obtenus avec les différents tests effectuées montrent que la tension du bus continue et le module de la tension statorique sont bien contrôlée d'où le système de régulation de la tension a prouvé son efficacité.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'étude présentée dans ce mémoire a pour objectif d'étudier les performances de la génératrice asynchrone à cage pour la production décentralisée de l'énergie électrique. Ce travail a été focalisé beaucoup plus sur le contrôle de la tension de la génératrice asynchrone avec un dispositif FACTS à base d'onduleur de tension " STATCOM " et leur commande pour d'éventuelles utilisations pour un site isolé.

On a établi, dans le cadre de ce travail, dans un premier temps une description d'une façon générale des systèmes éoliens et les différents concepts fondamentaux de la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique. Le premier chapitre comporte aussi des généralités sur les nouvelles techniques de compensation dynamiques FACTS, des définitions de bases sont expliquées, les différentes classes de la technologie FACTS sont représenté.

Pour des raisons de fiabilité, robustesse et prix de revient, nous avons retenu le système utilisant la machine asynchrone à cage d'écureuil pour effectuer son étude dans d'un système en fonctionnement autonome dédié à un site isolé. Beaucoup d'aspects importants et intéressants sur cette génératrice ont été discuté et présenté.

Au cours du deuxième chapitre une importance particulière fût accordée à la modélisation de la machine asynchrone dans les cas linéaire et non linéaire. La magnétisation de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil lui est fournie par une batterie de condensateurs correctement dimensionnés pour réaliser les conditions de l'auto-amorçage. En outre, il a été montré que le fonctionnement correct de cette génératrice est redevable à la prise en compte de la saturation du circuit magnétique de la machine. Un essai de démarrage en fonctionnement moteur a été simulé dans le cas non linéaire

Dans le troisième chapitre nous avons développé une étude analytique particulière de l'auto-amorçage de la génératrice asynchrone en régime permanent à vide et en charge. On a montré par la suite que les grandeurs statoriques sont directement influencées par la variation de la vitesse de la rotation de l'éolienne, les capacités d'excitation, et les charges connectées à la machine. Afin de résoudre ce problème, une régulation de la tension aux bornes du stator de la génératrice asynchrone s'impose.

Le quatrième chapitre a porté sur la commande du système étudié en vue de réaliser les objectifs escompté, à savoir bien contrôlé la tension de la génératrice en utilisant le compensateur (STATCOM) avec des régulateurs PI en boucle fermée. Dans ce chapitre nous

Conclusion Générale

avons présenté une étude par simulation du système globale avec différent tests (variations de la vitesse, de la charge et la capacité de l'auto-amorçage). Les résultats de simulation, obtenus nous ont permis de montrer l'efficacité de la commande appliquée. Nous avons observé une bonne régulation de la tension alternative statorique ainsi que la tension du bus continu avec une bonne robustesse vis-à-vis de la variation de la vitesse d'entraînement et de la charge ainsi que alimentée par la génératrice et des capacités de l'auto-amorçage.

La perspective intéressante de cette étude consiste à envisager d'autres techniques de commande afin d'améliorer les performances de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil au fonctionnement autonome.

Références bibliographiques

Bibliographie

[Abd 12] L. Abdelhamid "Contribution à l'Amélioration des Performances des Générateurs Eoliens - Evaluation de l'Impact des Energies Renouvelables sur l'Environnement" Thèse de doctorat, l'Université Hadj Lakhdar, Batna, Algérie, 2012.

[Ali 09] A. Abdelaàli " Contrôle des Réseaux Electriques par les Systèmes FACTS: (Flexible AC Transmission Systems) " Mémoire de Magister l'Université Hadj Lakhdar, Batna, Algérie, 2009.

[Ami 08] H. Amimeur " Contribution à la Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile par Mode de Glissement " Mémoire Magister l'Université Hadj Lakhdar, Batna, Algérie, 2008.

[Aya 13] A. Aya " Modélisation et Analyse d'un Compensateur Statique : SVC " Mémoire de Magister l'Université Hadj Lakhdar, Batna, Algérie 2013.

[Bel12] H. Belguidoum " Les Systèmes FACTS Utilisant Les Convertisseurs Entièrement Commandés " Mémoire Magister l'Université Ferhat Abbas, Setif, Algérie, 2012.

[Bel 10] S. Belakehal, A. Bentounsi, M. Merzoug et H. Benalla "Modélisation et commande d'une génératrice Synchrones à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne " Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°1, l'Université Mentouri De Constantine, Algérie, 2010.

[Ben 12] C. Bennour " Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation " Mémoire Magister l'Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie, 2012.

[Ber 09] K. Berrahal " Modélisation et Simulation d'un Système FACTS : UPFC " Mémoire Magister l'Université Hadj Lakhdar, Batna, Algérie, 2009.

[Bhi 06] S. Bhim S. Murthy "STATCOM-Based Voltage Regulator for Self-Excited Induction Generator Feeding Nonlinear Loads" IEEE transactions on industrial electronics, vol. 53, no. 5, October 2006.

[Bhi 10] S. Bhim S. Murthy " A Stand-Alone Generating System Using Self-Excited Induction Generators in the Extraction of Petroleum Products" IEEE transactions on industry applications, vol. 46, no. 1, January/February 2010.

[Bou 04] A. Boulahia " Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l'Energie Electrique " Mémoire Magister l'Université de Constantine, Algérie, 2009

[Bou 08] H. Boudjella, F. Gherbi, F. Lakdja "Modelling and simulation of static var compensator (svc) in power system studies by Matlab" the annals of "dunarea de jos" university of galati fascicle III, 2008, vol.31, no.1, issn 1221-454x.

[Bou 09] F. Boumaraf " Commande Intelligente D'une Association Convertisseur Statique Machine Asynchrone à Double Alimentation " Mémoire Magister l'Université Hadj Lakhdar, Batna, Algérie, 2009.

Bibliographie

[Bou 11] B. Bouhadouza " Amélioration de la Stabilité Transitoire des Fermes Eoliennes par L'utilisation du STATCOM" Mémoire Magister l'Université Ferhat Abbas, Setif, Algérie, 2011.

[Bou 13] Z. Boudries " Etude d'une génératrice asynchrone commandée" thèse doctorat l'Université A.Mira Bejaia 2013.

[Boy 06] A. Boyette " Contrôle – Commande d'un Générateur Asynchrone à Double Alimentation Avec Système De Stockage Pour la Production Eolienne " Thèse de doctorat, l'Université Henri Poincaré Nancy I.

[Cha 12] S. Chaudhary, I. Nayna " Operation and Control Of Wind Power Station Using Facts Devices Controller" International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES) ISSN (Online) 2319-183X, (Print) 2319-1821 Volume 1, Issue 2 PP.17-38, October 2012.

[Che 08] R. Chedid and S. Rahman, "Unit Sizing and Control of Hybrid Wind-Solar Power Systems", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 12, No. 1, March 1997.

[Erw 07] P. Erwan " Outil D'électronique de Puissance Pour Le Maillage / Bouclage des Réseaux de Distribution : Application au Contrôle des Flux de Puissance et La Limitation des Courants de Court-circuit " Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble, 2007.

[Der 13] S. Deraz, F.E. Abdel Kader "A new control strategy for a stand-alone self-excited induction generator driven by a variable speed wind turbine" Renewable Energy 51 263e273, 2013.

[Gho03] E. Gholipour " Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques" Thèse de doctorat, l'Université Henri Poincaré Nancy I.

[Ham 08] N. Hamdi "Modélisation et commande des génératrices éoliennes " Mémoire Magister l'Université Mentouri De Constantine, Algérie, 2008.

[Ham 12] Z. Hamadou " Optimisation des paramètres d'un FACTS shunt pour l'amélioration de la stabilité transitoire d'un système électrique" Mémoire Magister l'Université Ferhat Abbas, Setif, Algérie, 2012.

[Haq 08] M. E. Haque, K. M. Muttaqi, M. Negnevitsky "Control of a Stand Alone Variable Speed Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator " IEEE Power and Energy Society , 2008, pp . 1-8.

[Har 03] C. Haritza "minimisation De L'impact Des Perturbations D'origine Eolienne Dans La Génération D'électricité Par Des Aérogénérateurs a Vitesse Variable " Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux, 2003.

[Huy 11] N. Huy " Amélioration de L'amortissement des Oscillations de Puissance du Réseau Électrique Avec les Dispositifs FACTS et Les Mesures à Distance" Thèse de doctorat, École De Technologie Supérieure l'Université du Québec, 2011.

Bibliographie

- [Idj 05]** K. Idjdarene "Analyse et Contrôle d'une Chaîne de Conversion Electrique par Energie Eolienne " Mémoire Magister l'Université A.Mira, Bejaia, Algérie, 2005.
- [Idj 10]** K. Idjdarene " Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes " Thèse de doctorat en cotutelle, l'Université A. Mira, Bejaia, Algérie et l'Université Lille, France, 2010.
- [Kar 06]** L. Kartobi "Optimisation de la Synthèse des FACTS par les Algorithmes Génétiques et les Essais Particulaires pour le contrôle des Réseaux Electriques " Mémoire Magister Ecole Nationale Polytechnique, 2006.
- [Ken 11]** F. Kendouli, K. Nabti, K. Abed et H. Benalla "Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation "Revue des Energies Renouvelables Vol. 14 N°1 (2011) 109 – 120
- [Khe 07]** L. Khettache" Etude et Commande d'un Système Eolien à Base d'une Machine Electrique Double Alimentée" Mémoire Magister l'Université Hadj Lakhdar, Batna, Algérie, 2007.
- [Khe 10]** S. Khelladi " Analyse Et Approche D'aide A La Décision Pour Le Choix D'un Projet Eolien" Mémoire Magister l'Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2010.
- [Lav 05]** N. Laverdure" Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires " Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble, 2005.
- [Lop 08]** M. Lopez " contribution a l'optimisation d'un système de conversion Eolien pour une unité de production isolée " Thèse de doctorat, l'université Paris-Sud 11, 2008.
- [Mam 12]** O. Mammeri " Différentes Méthodes De Calcul De La Puissance Réactive Dans Une Nœud A Charge Non Linéaire En Présence D'un Système De Compensation De L'énergie " Mémoire Magister l'Université Hadj Lakhdar, Batna, Algérie, 2012.
- [Man 12]** N. Mancer " Contribution à l'optimisation de la puissance réactive en présence de dispositifs de compensation dynamique (FACTS)" Mémoire Magister l'Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie, 2012.
- [Mat 14]** B. Mateo, V. Dinko, P. Miljenko " Analysis of Power Converter Losses In Vector Control System Of A Self-Excited Induction Generator" journal of electrical engineering, vol. 65, no. 2, 2014, 65–74.
- [Mek 04]** N. Mekkaoui "Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée " Mémoire Magister l'Université Hadj Lakhdar, Batna, Algérie, 2004.
- [Mes 09]** F. Messai "Contribution à l'Etude d'une Génératrice à Réductance Variable " Mémoire Magister l'Université de Constantine, Algérie, 2009.

Bibliographie

- [Mez 12]** M.Mezaache " Analyse et traitement de la qualité d'énergie électrique en utilisant des dispositifs de contrôle de réseaux électriques à UPFC dans le cas de la stabilité de la tension " Mémoire Magister l'Université Hadj Lakhdar, Batna, Algérie, 2012.
- [Mir 05]** A. Mirecki " Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance " Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique De Toulouse, 2005.
- [Mok 12]** M. Mokhnache" Etude de la stabilité d'une ferme éolienne connectée à un réseau électrique avec des dispositifs FACTS" Mémoire Magister l'Université Ferhat Abbas, Setif, Algérie, 2012.
- [Ouc 11]** T. Ouchbel, S. Zouggar, M. Seddik, M. Oukili et M. El Hafyani " Régulation de la puissance d'une éolienne asynchrone à vitesse variable à l'aide d'un compensateur statique d'énergie réactive (SVC) " Revue des Energies Renouvelables Vol. 15 N°3 (2012) 439 – 450.
- [Pal 13]** D. K. Palwalia " STATCOM Based Voltage and Frequency Regulator for Self Excited Induction Generator" International Conference on Electrical Electronics and System Engineering, 2013.
- [Poi03]** F. Poitiers " Etude Et Commande De Génératrices Asynchrones Pour L'utilisation De L'énergie Eolienne : Machine asynchrone à cage autonome, Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau" Thèse de doctorat, l'Université De Nantes, Nantes, France, 2003.
- [Tou 12]** M.Touafek " Amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques par un contrôle neuro-flou des systèmes FACTS " Mémoire Magister l'Université Ferhat Abbas, Setif, Algérie, 2012.
- [Vec 05]** I.Vechiu " Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome " Thèse de doctorat, l'Université de Haver, 2005.
- [Ven 06]** B.Venkatesa Perumal, and J.K.Chatterjee, " Analysis of a Self Excited Induction Generator with STATCOM/Battery Energy Storage System" IEEE 2006 pp 0-7803-9525.
- [Vik 14]** R. Vikram , Dr. Debaprasad Kasta "Control of a self-excited squirrel cage induction machine based wind energy conversion system operating in both stand alone and grid connected modes" 4th International Conference on Advances in Energy Research 2013, ICAER 2013
- [Zit 10]** F. Zitouni " Amélioration de la Stabilité Transitoire des Réseaux Electriques par l'utilisation des Systèmes FACTS " Mémoire Magister l'Université Ferhat Abbas, Setif, Algérie, 2010.

Annexe

Paramètres de la machine asynchrone

Les caractéristiques électriques :

- Rotor de type de cage d'écureuil
- 4 paires de pôles
- 230/400 V 23,8/13,7A 5,5 kW 50 Hz 690 tr/mn
- $R_s = 1,07131 \Omega$
- $R_r = 1,29511 \Omega$
- $L_s = 8,9382 \text{ mH}$
- $L_r = 4,8613 \text{ mH}$

Les paramètres mécaniques

- $J = 0,230 \text{ kg.m}^2$
- $f = 0,0025 \text{ N.m/rad.s}^{-1}$

Paramètres de simulation

Les paramètres du bus continu

- Générateur de tension continu de $V_{dc} = 700 \text{ V}$.
- Le module des tensions statoriques $V_s = 570 \text{ V}$.
- Capacité du bus continu $C = 1000 \mu\text{F}$.

Les paramètres du filtre RL

- $R_f = 0.1 \Omega$.
 - $L_f = 80 \text{ mH}$.
-

Résumé

Ce travail présente une étude des performances de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil dédié à la production décentralisée. Après un bref rappel des concepts de la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique et des généralités sur les différents dispositifs FACTS qu'ils existent dans le littérature. Ensuite, une importance particulière fût accordée à la modélisation de la génératrice asynchrone auto-excitée dans les cas linéaire et non linéaire. La magnétisation de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil lui est fournie par une batterie de condensateurs pour réaliser les conditions de l'auto-amorçage. Des simulations du phénomène d'auto-excitation de la machine asynchrone à cage en modèle non linéaire ont été aussi étudiées en cas de fonctionnement à vide et en charge pour montrer que les grandeurs statoriques sont directement influencées par la variation de la vitesse entraînement, les capacités d'excitation, et les charges connectées à la machine. La dernière partie du mémoire est consacrée au contrôle de la tension de la génératrice à base d'un dispositif FACT du type shunt (STATCOM).

Mots Clés : FACT, STATCOM, Eolienne, production décentralisée, Génératrice asynchrone auto-excitée.

Abstract

This work presents a study of the performance of the squirrel cage induction machine dedicated to decentralized production. After a brief review of the concepts of conversion of wind energy into electrical energy and general information on the different FACTS devices that exist in the literary. Then particular importance was given to modeling the self-excited induction generator in the linear and nonlinear cases. The magnetization of the squirrel cage induction machine supplied thereto by a capacitor bank to realize the conditions of self-priming. Simulations of the self-excitation phenomenon of the nonlinear model squirrel cage induction machine were also studied in this work at no-load and load to show that the stator magnitudes are directly influenced by the variation of the drive speed, the excitation capacity and the loads connected to the machine. The last part of the thesis is devoted to the control voltage generator based on a shunt-type device FACT (STATCOM).

Keywords: FACTS, STATCOM, Wind, distributed generation, Self-excited induction generator.

ملخص

يعرض هذا العمل دراسة مميزات و أداء مولد لا متزامن ذو قفص السنجاب مخصص لإنتاج اللامركزي. بعد استعراض موجز لمفاهيم تحويل طاقة الرياح إلى طاقة كهربائية ومعلومات عامة عن مختلف أجهزة FACTS الحقائق الموجودة. ثم أعطيت أهمية خاصة لنمذجة مولد الحث الذاتي متحمس في الحالات الخطية وغير الخطية. مغنطة مولد لا متزامن ذو قفص السنجاب زودت بها من قبل مكثفات لتحقيق شروط فتيلة الذاتي. تم أيضا في هذا العمل دراسة محاكاة ظاهرة الإثارة الذاتية لمولد لا متزامن ذو قفص السنجاب في الحالة غير الخطية في الحالة عدم التحميل وتحميل لإظهار أن المقادير الموالي تتأثر مباشرة من قبل الاختلاف في سرعة محرك ، مكثفة الإثارة وتغيير الشحنة المتصلة بالمولد. الجزء الأخير من الرسالة هو المكرسة لتحكم على فرق الكمون المولد بناء على الجهاز FACT من نوع (STATCOM)

كلمات المفاتيح : توربينات الرياح، الطاقة الموزعة، مولد الحث الذاتي متحمس ، FACT ، STATCOM.