

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique industrielle

Présenté par :

SEBIHI INTISSAR

HAFSI KAOUTAR

Thème:

Etude du générateur asynchrone auto-excité pour l'utilisation dans le système éolienne

Soutenu publiquement

Le :10/06/2014

Devant le jury :

M ^f LOUAZENE Mohamed Lakhdar	MC (A)	Président	UKM Ouargla
M ^f TAIBI Djamel	MA (B)	Encadreur/rapporteur	UKM Ouargla
M ^f DJEDDI Abdelghani	MA (A)	CO- Encadreur	UKM Ouargla
M ^f LAAMAYED Tahar	MA (B)	Examineur	UKM Ouargla
M ^f KHETTACHE Laid	MA (A)	Examineur	UKM Ouargla

Année universitaire 2013/2014

REMERCIEMENTS

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

*Je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à notre encadreur **Mr. TAIBI Djamel** pour avoir d'abord proposé ce thème, pour le suivi continu tout le long de la réalisation de ce travail et qui n'a pas cessé de me donner ses conseils.*

*Je remercie, aussi, **Mr. DJEDDI Abdelghani** pour avoir codirigé ma thèse.*

Je tiens à exprimer mes remerciements aux membres du jury, qui ont accepté d'évaluer ce travail de ce mémoire.

Mes vifs remerciements vont également à l'ensemble des enseignants du département d'électrotechnique de l'université de Ouargla pour la formation qu'ils nous ont assuré au long de notre cursus universitaire

Mes remerciements vont également tous les personnes qui n'est pas citées et qui ont de près ou de loin participé à la réalisation de ce travail

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

*En premier lieu à ma mère et à mon père qui ont
consenti beaucoup de sacrifices pour me
permettre de réaliser mes objectifs*

*Qu'ils trouvent ici toute ma
reconnaissance et ma gratitude.*

A mes frères et mes sœurs

A ma binôme sebihi Intissar

A tous mes collages de travail

A tous mes camarades et mes amis

A tous ma famille sirtou mes grandes paires

*A tous mes enseignants depuis le primaire jusqu'à
maintenant.*

kaoutar

Dédicace

*À ma maman qui ma tant soutenue pendant toutes
ces longue années d'études*

À mon père ;

À mes sœurs ISSMAHAN et SOUAD;

À ma très chère KAOUTAR et sa famille ;

À tous mes amis;

À toute ma famille ;

À tous mes collègues;

*À tous ceux que j'ai connu durent
toutes mes études;*

*À tous ceux pour qui je compte et qui comptent pour moi;
Je dédie ce travail.*

Intissar

Table des matières

Introduction générale	II
Chapitre I	
Etat de l'art sur l'énergie éolienne	
I-1 Introduction	02
I-2 Définition de l'énergie éolienne	02
I-3 Quelques notions sur le vent	03
I-3-1 Direction et vitesse du vent	03
I-3-2 Taille des éoliennes	04
I-4 Les différents types des éoliennes	04
I-4-1 Les éoliennes à axe vertical	04
I-4-2 Les éoliennes à axe Horizontal	05
I-5 Constitution d'une éolienne à axe horizontal	06
I-6 Conclusion	09
Chapitre II	
Modélisation de la génératrice Asynchrone à cage Auto excitée	
II-1 Introduction.	11
II-2 Générateur asynchrone à cage d'écureuil	12
II-3 Modélisation de la machine asynchrone	13
II-4 Modèle Générale de la machine asynchrone	13
II-4-1 Modèle diphasé de la génératrice asynchrone à cage	16
II-4-2 Modèle saturé de la génératrice asynchrone	18
II-4-3 Résultats de simulation	20
II-5 Essai sur charges équilibrées	21
II-5-1 Charge résistive	21

II-5-2 Charge inductive (RL)	23
II-6 Essai sur charges déséquilibrées	24
II-6-1 charge déséquilibrée résistive (R)	25
II-6-2 charge déséquilibrée inductive (RL)	26
IV-7 Conclusion	28
Chapitre III	
Techniques de commande du redresseur MLI associé à la génératrice asynchrone auto-excitée	
III-1 Introduction.	30
III-2 Commande par orientation de la tension VOC	30
III-3 Modélisation du redresseur triphasé à MLI	31
III-3-1 Commande MLI à hystérésis du redresseur	34
III-3-2 Régulation de courant	36
III-4 Régulation de la tension continue	36
III-5 Schéma bloc de la simulation	37
III-5-1 Résultats de simulation:	38
III-5-1-1 Influence de la variation de la vitesse	38
III-5-1-2 Influence de la variation de la charge	40
III-6 Conclusion	43
Chapitre VI	
Modélisation et simulation de la chaîne de production éolienne	
IV-1 Introduction	45
IV-2 Modélisation de la chaîne de production éolienne	45
IV-2-1 Modèle du vent	46
IV-2-2 Modélisation de la turbine	47
IV-2-2-1 Le coefficient de vitesse réduite	47

IV-2-2-2 Le coefficient de puissance.	48
IV-2-3 Modèle du multiplicateur	48
IV-2-4 Modèle mécanique	49
IV-2-5 Modèle global du convertisseur éolien	50
IV-3 Stratégie de maximisation de la puissance (MPPT: Maximal Power Point Tracking)	50
IV-4 Schéma global de simulation	52
IV-4-1: Résultats de simulation	52
IV-5 Conclusion	54
Conclusion générale	V
Annexe	VI
Bibliographie	VIII

Liste des Figures et Tableaux

Liste des Figures :

Chapitre I:

Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent	02
Figure I.2: Taille des hélices en m et puissances en KW	04
Figure I.3: éolienne de Darrieus	05
Figure I. 4 : Photographie d'une éolienne à axe horizontal et d'un moulin à vent	06
Figure I.5 : Constitution d'une éolienne à axe horizontal	07
Figure I.6 : différentes parties d'une éolienne Nordex N60 (1300 kw)	09

Chapitre II:

Figure II.1: La machine asynchrone: (a) constitution; (b) la cage d'écureuil	12
Figure II. 2:Les différents systèmes d'axes utilisés	15
Figure II.3: modèle de MAS à cage dans le repère (α, β) à vide	16
Figure II.4: Phénomène d'auto-amorçage	19
Figure II.5:Variation de l'inductance magnétisante	19
Figure II.6: Schéma bloc de simulation avec un modèle non linéaire	20
Figure II.7: l'Allure de la tension	21
Figure II.8: l'Allure du courant	21
Figure II.9: l'Allure de tension de sortie statorique	22
Figure II.10: l'Allure de courant de sortie statorique	22
Figure II.11: l'Allure de courant de charge	22
Figure II.12: le couple électromagnétique	23
Figure II.13: l'Allure de tension de sortie statorique	23
Figure II.14: l'Allure du courant de sortie statorique	24
Figure II.15: l'Allure de courant de charge	24
Figure II.16: l'Allure de tension de sortie statorique	25

Figure II.17: l'Allure de courant de sortie statorique	25
Figure II.18: l'Allure de courant de charge	26
Figure II.19: l'Allure de tension de sortie statorique	26
Figure II.20: l'Allure de courant de sortie statorique	27
Figure II.21: l'Allure de courant de charge	27

Chapitre III:

Figure III.1: Système global de la commande MLI vectorielle de GAS auto-excitée	30
Figure III.2: Structure du redresseur triphasé.	30
Figure III.3: Modélisation du redresseur dans un repère fixe lié aux axes <i>abc</i>	34
Figure III.4: Synoptique de la commande du redresseur et de la GAS	35
Figure III.5 : Principe d'une commande par hystérésis	35
Figure III.6 : Principe de fonctionnement d'un correcteur à hystérésis	36
Figure III.7 : Modèle de la régulation de courant	36
Figure III.8 : Régulation de la tension continue avec un correcteur PI	37
Figure III.9: Schéma bloc de la simulation	38
Figure III.10 Profil de la vitesse d'entraînement en rad/s	39
Figure III.11 La tension du bus continu	39
Figure III.12 Tensions statorique	40
Figure III.13 Courants statorique	40
Figure III.14 Profils de variation de R_{ac} et R_{dc}	41
Figure III.15: La tension du bus continu	41
Figure III.16 Tensions statorique	42
Figure III.17 Courants statorique	42
Figure III.18 Courants de charge I_{dc}	42

Chapitre IV:

Figure IV.1 Structure du générateur éolien	46
Figure IV.2 Simulation du profil de la vitesse du vent	46
Figure IV.3: Vitesse du vent V et vitesse tangentielle (WR)	47
Figure IV.4: Coefficient de puissance C_p	48
Figure IV. 5 : Schéma de la turbine éolienne	49
Figure IV.6: Configuration d'une éolienne	50
Figure IV.7: Schéma bloc du modèle du convertisseur éolien	50
Figure IV. 8: Points de MPPT d'une éolienne tripale avec la vitesse de vent	51
Figure IV. 9 : Schéma bloc de la commande MPPT	51
Figure IV. 10: Schéma globale de simulation	52
Figure IV. 11 : tension du bus continu V_{dc}	53
Figure IV. 12 : vitesse de rotation optimisée	53
Figure IV. 13: Puissance optimale	54

Liste des Tableaux :

Chapitre I:

Tableau I-1 : échelle Beaufort	03
--------------------------------	----

Chapitre III:

Tableau III-1 : séquences de commande	32
---------------------------------------	----

Glossaire des termes technique

MAS: Machine asynchrone

GAS: Génératrice asynchrone

MLI: Modulation de largeur d'impulsion

VOC: Commande par orientation de tension (Voltage Oriented Control)

FOC: commande par orientation de flux (Flux Oriented Control)

PI: Proportionnelle intégrateur

MPPT: Maximal power point tracking

Notations utilisées :

s, r	Indice relatif au stator et rotor respectivement
α	Indice de l'axe direct
β	Indice de l'axe en quadrature
[Vsabc]	Vecteur tension statorique triphasée
[Vrabc]	Vecteur tension rotorique triphasée
[Isabc]	Vecteur courant statorique triphasée
[Irabc]	Vecteur courant rotorique triphasée
[Φ sabc]	Vecteur flux statorique triphasée
[Φ rabc]	Vecteur flux rotorique triphasée
[Rs]	Matrice résistance statorique
[Rr]	Matrice résistance rotorique
[Ls]	Matrice inductance statorique
[Lr]	Matrice inductance rotorique
[Msr]	Inductance mutuelle maximale
Tem	Couple électromagnétique
$V_{\alpha s}, V_{\beta s}$	Les tensions statorique en composante directs et en quadrature
$V_{\alpha r}, V_{\beta r}$	Les tensions rotorique en composante directs et en quadrature
$i_{\alpha s}, i_{\beta s}$	Les courants statorique en composante directs et en quadrature
$i_{\alpha r}, i_{\beta r}$	Les courants rotorique en composante directs et en quadrature
$\Phi_{\alpha s}, \Phi_{\beta s}$	Les flux statorique en composante directs et en quadrature
$\Phi_{\alpha r}, \Phi_{\beta r}$	Les flux rotorique en composante directs et en quadrature
ω_a	Vitesse de rotation électrique
ω_r	Vitesse de rotation de rotor
Lm	Inductance cyclique mutuelle entre le stator et le rotor
K_{α}	constant de tension induit initiale au long de l'axe α
K_{β}	constant de tension induit initiale au long de l'axe β
$V_{c\alpha 0}$	tension initiale dans le condensateur de l'axe α
$V_{c\beta 0}$	tension initiale dans le condensateur de l'axe β
Ls	Inductance cyclique statorique

Lr	Inductance cyclique rotorique
ls	Inductance de fuite statorique
lr	Inductance de fuite rotorique
Kp	gain proportionnel du correcteur
Ki	gain intégrateur du correcteur
τ	tempe de réponse
Vdc	tension du bus continue
Pm	puissance mènacique
Cp	coefficient de puissance
λ	La vitesse relative
β	L'angle de l'orientation des pales
P	densité de l'air
V	vitesse du vent
R	rayon du rotor Vitesse angulaire de rotation
Ct	coefficient de couple
J	Moment d'inertie des masses tournantes
Cg	Couple de multiplicateur
Cvis	Couple de frottement visqueux
fv	Coefficient de frottement visqueux
Ω_{turbin}	Vitesse de la turbin
$\Omega_{\text{génératrice}}$	Vitesse de génératrice
Ω_{m}	Vitesse mécanique
Cr	Couple de charge

ملخص :

هذا العمل يمثل دراسة و محاكاة المولد المتزامن ذاتي الشحن لتوليد طاقة الرياح في المناطق المعزولة و في هذا الصدد قد تم إنشاء نموذج حول بنيات الرياح بينما المولد المتزامن تحت الصيغة المشحونة بعد استعراض موجز لطرائق تحويل طاقة الرياح إلى طاقة كهربائية هذه الوثيقة تصف لنا حالة الطرق المستعملة في كل من مقدار إنتاج حقل كهربائي و تزويد المناطق المعزولة بنموذج الشحن المغناطيسي قد تم أخذه بعين الاعتبار بوظيفة التمتع لمرحلة تشحيد التيار الكهربائي , حيث طورت أدوات النمذجة "التصميم" المقترحة وقد تم استعمالها في دراسة طرق انجاز مواد الشحن المستقل الموصول ببطاقة الإنتاج والشحن المتوازن و اللامتوازن .

الجزء الثالث من المذكرة قد خصص لكيفية التحكم في المواد المتزامنة, المقوم الذاتي للشحن و الهدف من هذه الطريقة هو إبقاء أو الحفاظ على مستوى التيار الثابت في إنتاج المقوم مهما كانت الشحنة أو السرعة, نتائج المحاكاة أظهرت مدى فعالية هذه الطرق و الفوائد منها و تحديد كل منها.

الجزء الأخير من هذه المذكرة قد خصص لأجل تصميم و محاكاة سلسلة تحويل طاقة الرياح و أيضا إستراتيجية التحكم المطبقة لتحويل أكبر قدر ممكن من الطاقة أو شحنها.

الكلمات المفتاحية :

المولد اللازامني, ذاتي التهيج, حالة الاشباع, الطاقة الهوائية, مولد تزامني مضاعف التغذية, إنشاء نماذج التحكم الشعاعي.

Résumé

Ce travail présente l'étude et la simulation de la génératrice asynchrone auto excitée dans la production de l'énergie éolienne dans des sites isolés. Pour ce faire, un modèle de la turbine éolienne a été établi, puis de la génératrice asynchrone en régime saturé. Après un bref rappel des concepts de la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique, ce document dresse un état de l'art des différentes solutions utilisées tant dans le domaine de production de masse que dans celui de l'alimentation de sites isolés.

Le second chapitre est dédié à la modélisation de la machine asynchrone à cage. Le modèle dans laquelle le phénomène de la saturation est pris en compte par une inductance magnétisante fonction de la tension de phase a été élaboré.

Les outils de modélisation proposés sont ensuite utilisés pour l'étude des performances de la machine asynchrone dans le cas de fonctionnements en génératrice autonome débitant sur des bancs de capacités et des charges équilibrées et déséquilibrées.

La troisième partie du mémoire est consacrée à la technique de commande de la génératrice asynchrone, autonome, débitant sur un redresseur à MLI (commande vectorielle à orientation de tension).

Le but de cette technique est de maintenir une tension constante à la sortie du redresseur pour des charges et des vitesses variables. Les résultats de simulation ont montré l'efficacité de cette technique.

La dernière partie du mémoire est consacrée à la modélisation et la simulation de la chaîne de conversion éolienne, ainsi que la stratégie de commande appliquée pour transférer une puissance maximale à la charge.

Mots clés :

Génératrice Asynchrone, Auto-amorçage, Saturation, éolienne, redresseur à MLI, MPPT Commande vectorielle VOC.

Abstract:

This work presents the study and simulation of the self excited asynchronous generator in the wind power production in isolated sites. With this intention, a model of the wind turbine was established, then asynchronous generator in saturated mode. After a brief review of the concepts of converting wind energy into electrical energy, this document describes the state of the art of different solutions used in both the mass production electrical field than in the supply of isolated sites.

The model of the saturation phenomenon is taken into account by the magnetizing inductance function of the phase voltage, was developed. The proposed modeling tools are then used to study the performance of standalone induction generators connected to capacitive bank and balanced and unbalanced loads.

The third part of the thesis is devoted to control of asynchronous generator, self-feeding a PWM rectifier. The purpose of this technique is to maintain a constant voltage at the output of the rectifier whatever the loads and speeds.

The simulation results showed the effectiveness of these techniques and the interests and limitations of each.

The last part of this thesis is devoted to modeling and simulation of wind energy conversion chain, as well as the control strategy applied to transfer maximum power to the load.

Key Words:

Asynchronous Generator, Self-excited, Saturation, Wind Power, three-phase rectifier, MPPT, vector control VOC

Introduction générale

Introduction générale :

L'intense industrialisation des dernières décennies et la multiplication des appareils domestiques électriques ont conduit à des besoins planétaires en énergie électrique considérables [1]. Cette augmentation se traduit, en réalité, par une augmentation des prix du pétrole qui représente la source la plus importante de l'énergie. La réserve mondiale du pétrole diminue de plus en plus, et dans les années qui suivent il n'y aura pas assez du pétrole pour couvrir la demande. Le climat de la terre évolue vers le mauvais et les sources naturelles d'eau se raréfient. L'énergie nucléaire n'est pas disponible pour tout le monde pour des raisons politiques ou financières, son installation coûte cher et elle peut être dangereuse au niveau écologique [2]. Dans les pays en voie de développement le problème est posé par les régions rurales vivant en dehors des réseaux de distribution d'électricité et leur alimentation en électricité s'avère difficile voir impossible et ne peuvent se fournir en énergie fossile dont les prix sont trop élevés et les moyens d'accès difficiles.

Face à ces problèmes, le monde est massivement tourné vers de nouvelles formes d'énergie dites "renouvelables". Beaucoup plus accessibles et très adaptées à la production décentralisée, les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles et parfois aléatoires [3].

Parmi celles-ci, l'énergie éolienne apparaît clairement en bonne place, non pas en remplacement des sources conventionnelles, mais comme énergie d'appoint complémentaire à l'énergie à gaz. En effet l'énergie potentielle des masses d'air en mouvement représente au niveau mondial un gisement considérable [1].

Dans ce cadre, le présent travail décrit une étude sur l'utilisation des convertisseurs électromécaniques et en particulier la machine asynchrone à cage dans un système éolien pour alimenter un site isolé en courant alternatif et continu. Grâce à ses qualités multiples, cette machine peut être considérée comme la plus prometteuse pour la production décentralisée de l'énergie éolienne.

Pour atteindre notre objectif qui représente la simulation d'une éolienne de faible puissance, nous avons partagé notre mémoire en 4 chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à des rappels sur l'état de l'art des énergies éoliennes et aussi les différents types des éoliennes et leurs avantages et inconvénients.
- Le second chapitre présente une étude sur les performances et les limites de l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écurieil auto-excitée. Pour mener cette étude, la machine est placée dans plusieurs configurations de charges et les régimes équilibré et déséquilibré sont également étudiés.
- La commande vectorielle (VOC) d'un redresseur MLI associé au générateur asynchrone auto-excitée sera présentée dans le troisième chapitre.
- Le quatrième chapitre est consacré à la description et la modélisation d'une chaîne de conversion éolienne à travers les équations et les concepts physiques régissant son fonctionnement. Selon une description générale, vers la chaîne dont la partie commande est basée sur la commande MPPT (maximum power point tracking).

Chapitre I

Etat de l'art sur l'énergie éolienne

Chapitre I

Etat de l'art sur l'énergie éolienne

I-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. Outre leurs caractéristiques mécaniques, nous nous intéressons à l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. En effet, il existe deux types d'éoliennes à savoir les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal. Ainsi dans ce qui suit nous allons énoncer en première partie une généralité sur les différents types d'éoliennes. Ensuite nous allons nous intéresser plus particulièrement aux éoliennes à axe horizontal qui sont non seulement les plus répandues, mais aussi les plus efficaces.

I-2 Définition de l'énergie éolienne :

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un système qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice Figure (I.1).

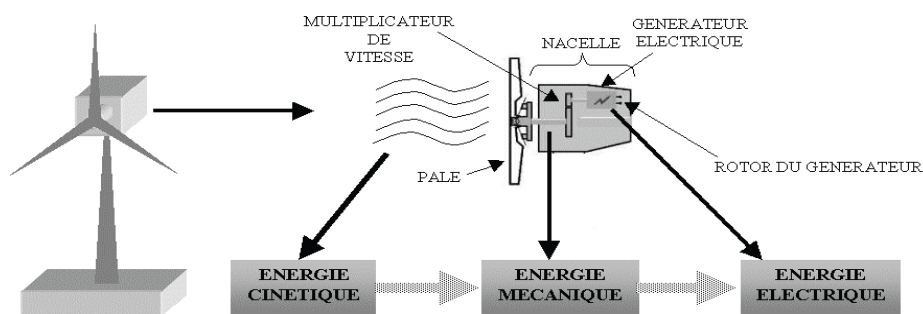


Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

L'énergie éolienne est une énergie " renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [4].

Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale :

- ✓ Eoliennes de petite puissance : inférieure à 40 kW
- ✓ Eoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW.
- ✓ Eoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW.

I-3 Quelques notions sur le vent :

Dans un système éolien, la vitesse du vent varie selon les zones géographiques et les saisons, elle est surtout élevée pendant la période d'hiver et au niveau des mers (offshore). Le vent est défini par sa direction et sa vitesse.

I-3-1 Direction et vitesse du vent :

Le vent souffle en principe des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions. Aux latitudes moyennes et aux grandes latitudes, sa direction est cependant modifiée du fait de la rotation de la terre. Le vent devient alors parallèle aux isobares au lieu de leur être perpendiculaire. Dans l'hémisphère nord, le vent tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre autour des aires cycloniques et dans le sens direct autour des zones anticycloniques. Dans l'hémisphère sud, les sens sont inversés par rapport aux précédents.

La vitesse du vent est mesurée avec des anémomètres. Il en existe plusieurs types classés en deux catégories principales (les anémomètres à rotation et les anémomètres à pression). Une graduation a été établie, selon l'échelle Beaufort qui divise les vents en fonction de leurs vitesses en 17 catégories dont nous citons quelques unes au Tableau (I-1). [5]

Degrés Beaufort	Vitesse du vent (m/s)	Vitesse du vent (km/h)	Description générale	Pression sur surface plane (daN/m ²)
0	0 à 0.4	< 1	Calme	
3	3.5 à 5.5	12 à 19	Petite brise	3.2 (5 m/s)
4	5.5 à 8	20 à 28	Jolie brise	6.4 (7 m/s)
6	11.4 à 13.9	39 à 49	Vent frais	22 (13 m/s)
8	17.4 à 20.4	62 à 74	Coup de vent	52 (20 m/s)
11	28.4 à 32.5	103 à 117	Violente tempête	117 (30 m/s)
17	54.1 à 60	202 à 220	Cyclone	470 (60 m/s)

Tableau I-1 : échelle Beaufort

Les vents les plus intéressants qui donnent finalement le plus d'énergie annuelle, sont les vents réguliers qui ont une vitesse de 8 à 14 m/s. [6]

I-3-2 Taille des éoliennes :

A fin de répondre à la demande croissante de l'énergie électrique, les constructeurs et les chercheurs ont mis le point sur la taille des éoliennes, et cela pour pouvoir utiliser le maximum de la force du vent, tout en cherchant à ce que l'hélice balaie une surface où le vent est maximum. La figure suivante présente la taille des hélices en m et puissance en KW qu'on peut trouver sur le marché des éoliennes. Actuellement les grandes éoliennes commercialisées possèdent une hélice de plus de 100m, donc elle est perchée en haut à plus de 100m de hauteur pour produire 4.5 MW.

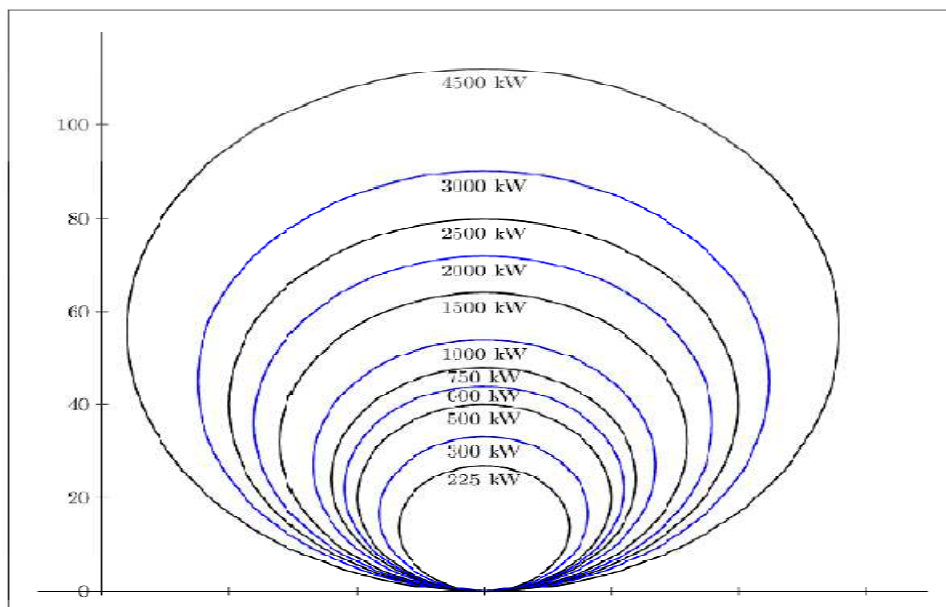


Figure I.2: Taille des hélices en m et puissances en KW [7].

I-4 Les différents types des éoliennes :

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : les éoliennes à axe vertical qui tendent à disparaître, les éoliennes à axe horizontal utilisées surtout pour le pompage et la production d'énergie électrique.

I-4-1 Les éoliennes à axe vertical :

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe

horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles.

Les principaux capteurs à axe vertical sont le rotor de Savonius et le rotor de Darrieus.

- Le rotor de Savonius : (du nom de son inventeur, breveté en 1925) : Le rotor de 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
- Le rotor de Darrieus : inventé par l'académicien français Darrieus au cours des années 1925 – 1935 repose sur l'effet de la portance d'un profil soumis à l'action d'un vent relatif, il existe quatre types de rotors de Darrieus : le rotor cylindrique, le rotor tronconique, le rotor à variation cyclique et le rotor parabolique [8].

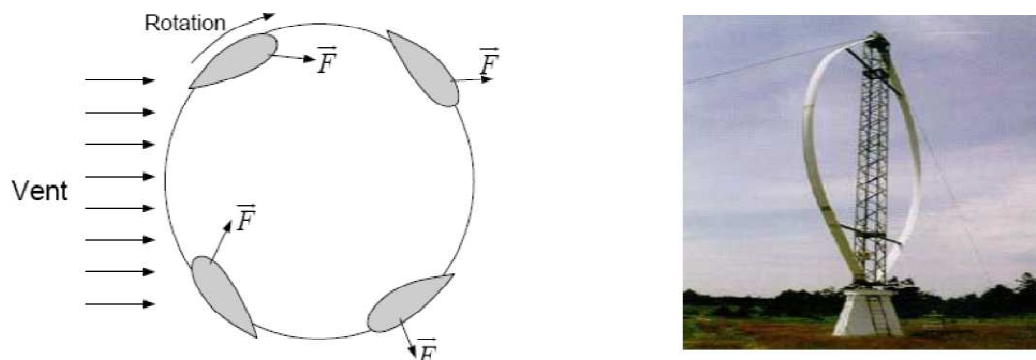


Figure I.3: éolienne de Darrieus.

I-4-2 Les éoliennes à axe horizontal :

Les turbines à axe horizontal sont de loin les plus utilisées. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent des voilures à deux, trois ou plusieurs pales [19]. Toutefois, les structures les plus courantes sont à trois pales. Une éolienne à axe horizontal est constituée donc d'une hélice perpendiculaire au vent montée sur un mat dont les pales sont profilées aérodynamiquement à la manière d'une aile d'avion. Par conséquent, ce type de turbines doit toujours être orienté face au vent [18]. Par comparaison à la turbine à axe vertical, pour la même vitesse de vent, les éoliennes à axe horizontal sont capables de produire plus d'énergie grâce à un meilleur coefficient de puissance. Par ailleurs, elles ont un coût moindre et une efficacité accrue due à leur position à plusieurs dizaines de mètres du sol [17].

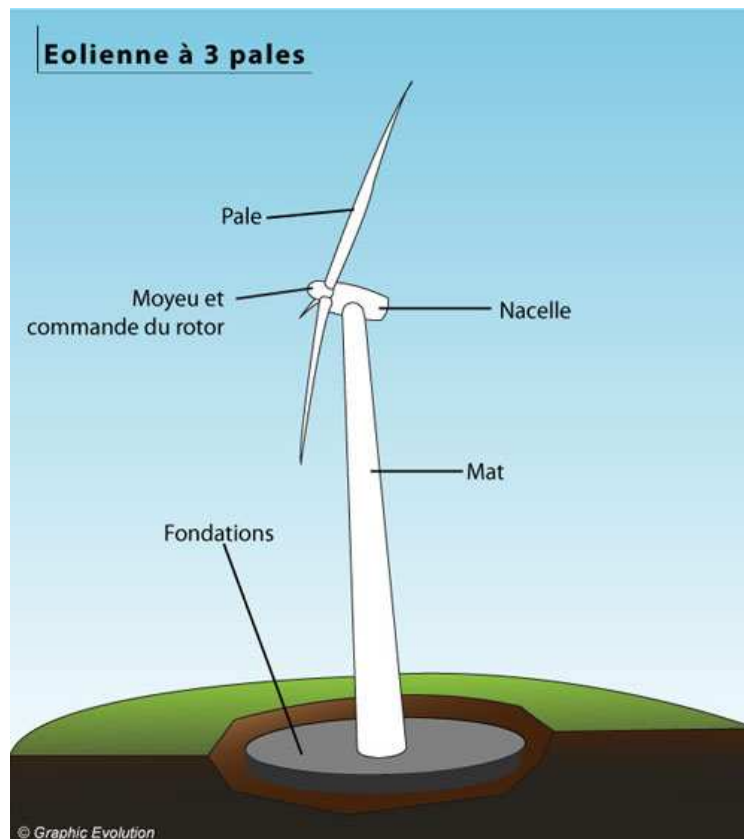


Figure I. 4 : Photographie d'une éolienne à axe horizontal et d'un moulin à vent.

a- Avantages : [20]

- Coût limité,
- Peu de contraintes mécaniques,
- Grande efficacité.

b- Inconvénients : [21]

- Bruit conséquent,
- Vibrations non négligeables,
- Grande sensibilité au flux éolien et sa variation.

I-5 Constitution d'une éolienne à axe horizontal :

Une éolienne est constituée principalement de trois parties : les pales (entre 1 et 3), la nacelle et la tour. Chacune de ces parties doit être minutieusement étudiée de façon à obtenir un meilleur rendement et une bonne fiabilité du système ainsi qu'un faible coût d'investissement.

La Figure (I.5) donne un aperçu des principales parties dans le cas d'une éolienne à axe horizontal pour la production de l'énergie.

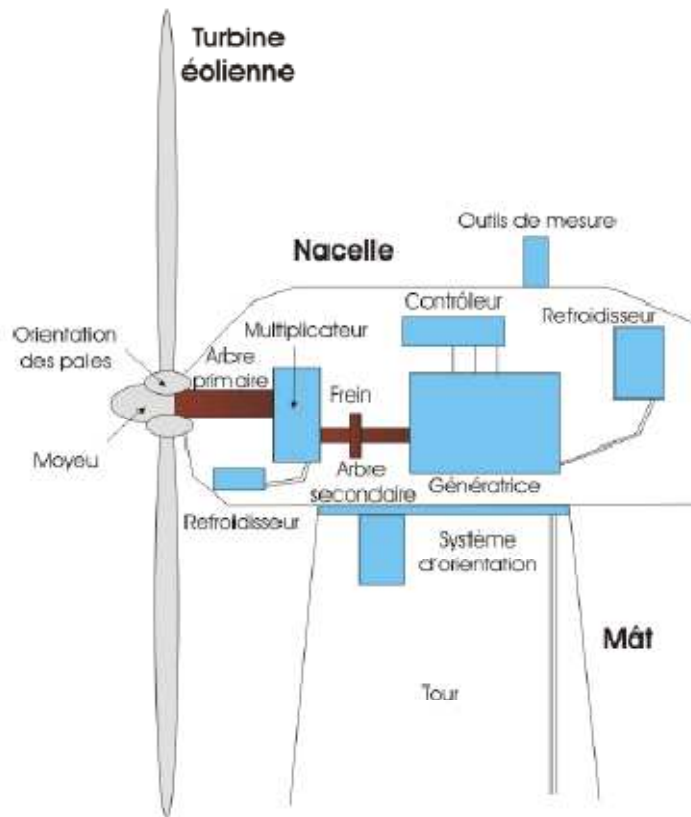


Figure I.5 : Constitution d'une éolienne à axe horizontal .[23]

- La tour est généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, elle doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre une tour (mât) de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW: diamètre de 90m, mât 80m).
- La nacelle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine asynchrone et 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). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.

- Le rotor, formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit. Les rotors à vitesse fixe sont souvent munis d'un système d'orientation de la pale permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce système allie ainsi simplicité et faible coût.

Les rotors à vitesse variable sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié voire supprimé. Toutefois, une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique).

- Une armoire de commande, comportant tous les convertisseurs d'électronique de puissance (onduleur, redresseur), ainsi que les systèmes de régulation de puissance, de courant et de tension et d'orientation des pales et de la nacelle.
- Un multiplicateur de vitesse, un radiateur de refroidissement et un système de freinage.

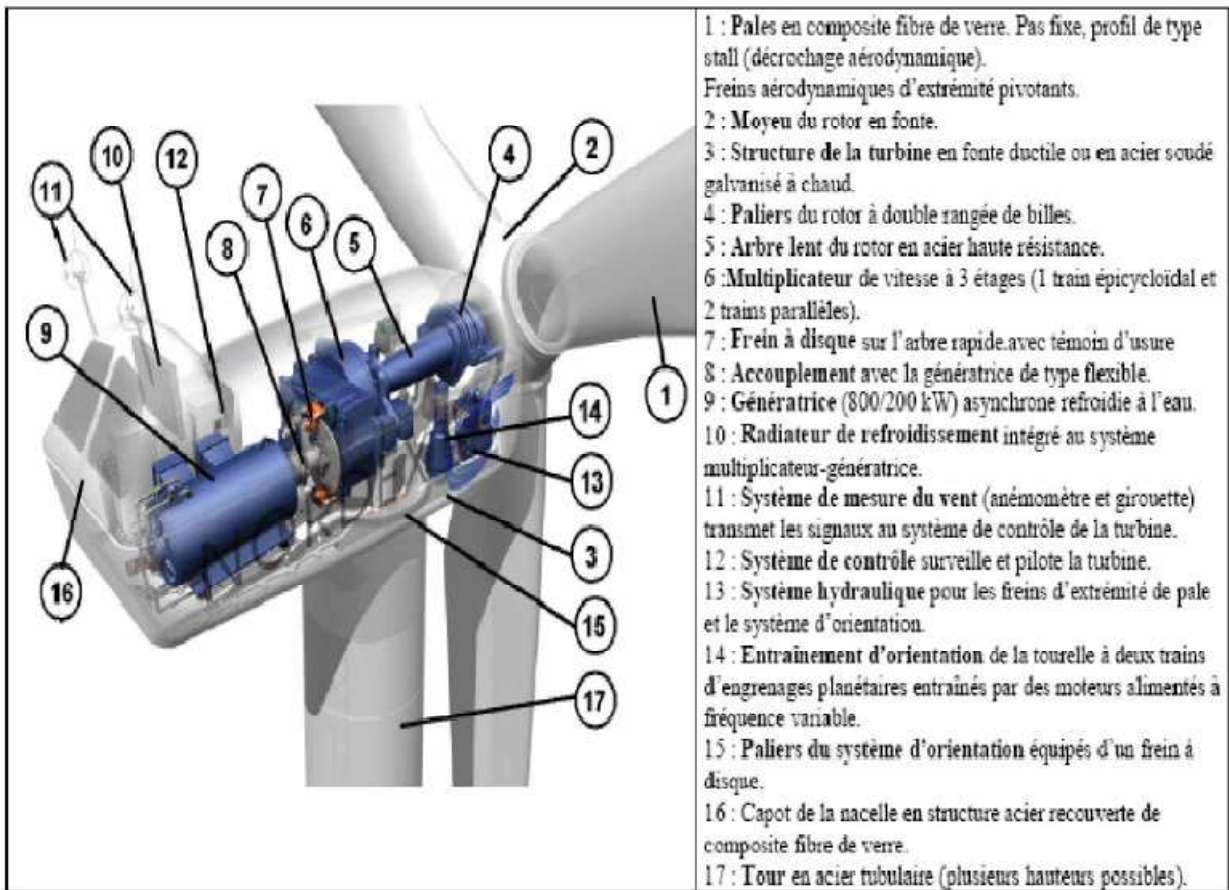


Figure I.6 : différentes parties d'une éolienne Nordex N60 (1300 kw).

I-6 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. Après un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, les différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement ont été décrits.

Dans ce qui suit nous allons étudier les générateurs les plus utilisés dans la conversion de l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique, notamment les génératrices asynchrones.

Chapitre II

Modélisation de la génératrice

Asynchrone à cage d'écureuil

Auto excitée

Chapitre II

Modélisation de la génératrice Asynchrone à cage d'écureuil Auto excitée

II-1 Introduction :

L'énergie éolienne est celle qui a le potentiel énergétique le plus important. La puissance des éoliennes installées dans le monde augmentant de plus en plus tous les ans, ces systèmes ne peuvent plus se comporter comme uniquement des générateurs de puissance active dans les réseaux de distribution ou de transport, Dans ce cadre, le présent mémoire décrit une étude sur l'utilisation des machines de type asynchrone dans un système éolien.

Il existe deux types de machine asynchrone : la machine asynchrone à cage d'écureuil et la machine asynchrone à rotor bobiné.

Dans ce chapitre nous allons nous intéresser à la machine asynchrone à cage d'écureuil, La clé de la plupart des équipements industriels, du fait de sa grande robustesse et son prix de revient est moins cher. Seul un dispositif basé sur une machine asynchrone auto-excitée par un banc de capacités directement connecté 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 la fréquence délivrées.

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 saturé. L'effet de la saturation et l'effet croisé seront pris en compte par le biais d'inductances variables fonctions des amplitudes des tensions. Après l'introduction du modèle général de la machine, nous présenterons son adaptation pour l'étude du fonctionnement générateur à vide et en charge (charges équilibrées et déséquilibrées).

II-2 Génératrice asynchrone à cage d'écureuil :

La machine asynchrone à cage fonctionne sans alimentation au rotor. Sa structure est représentée à la Figure (II.1 (a)). Le rotor de cette machine exploite les courants induits par le champ statorique. Pour cela, la machine asynchrone est aussi appelée machine à induction.

Le stator d'une machine asynchrone est semblable à celui d'une machine synchrone. La différence fondamentale se situe au niveau de la construction du rotor qui est constitué d'un ensemble barres de cuivre, dont les bouts sont court-circuités par des anneaux métalliques formant ainsi une structure semblable à une cage d'écureuil Figure (II.1(b)). Cette cage est généralement construite dans les encoches du circuit magnétique rotorique permettant d'obtenir un entrefer constant. Il existe aussi des rotors de machine asynchrone portant un bobinage triphasé connecté à des bagues collectrices. On parle alors de rotor à bagues, ou rotor bobiné. Les bagues du rotor bobiné sont généralement montées en court-circuit pour les utilisations simples.

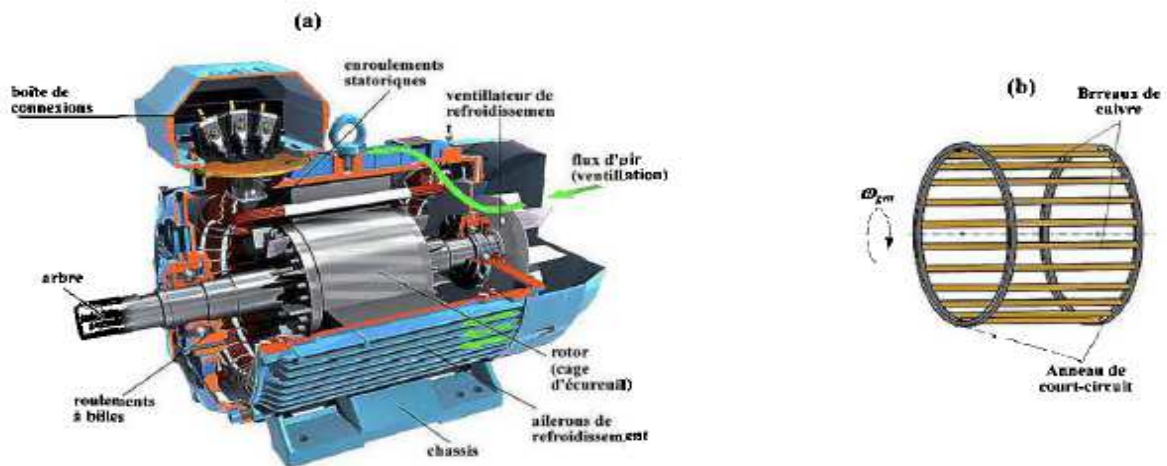


Figure II.1: La machine asynchrone: (a) constitution; (b) la cage d'écureuil.

Les rotors à cage d'écureuil sont de loin, les plus simples à construire et les plus robustes, puisqu'elles sont complètement sans balais. Les rotors bobinés offrent trois bornes de commandes supplémentaires pour le contrôle de la machine, mais restent fragiles et presque aussi coûteux que les machines asynchrones à cage.

En général, tout moteur à induction peut fonctionner en génératrice. Lorsque cette machine est entraînée en rotation, le faible champ rémanent induit au stator une faible force électromotrice triphasée. Cette dernière crée à son tour un champ magnétique tournant dans l'entrefer, et le niveau d'aimantation du rotor augmente. Il s'en suit une plus grande tension statorique, qui se met à croître jusqu'à la stabilisation. Ce processus de démarrage de la génératrice asynchrone est appelée auto excitation.

II-3 Modélisation de la machine asynchrone :

Pour assurer un fonctionnement en générateur, il est nécessaire que la vitesse de rotation de la MAS soit au-delà du synchronisme (glissement négatif). Contrairement à la machine synchrone, la génératrice asynchrone ne possède pas d'inducteur séparé. Par conséquent, elle nécessite un apport de puissance réactive pour sa magnétisation. Lorsqu'elle est reliée au réseau, ce dernier fournit la puissance réactive requise. Par contre, en fonctionnement autonome, il faut lui apporter

cette énergie soit par une batterie de condensateurs, soit par un convertisseur statique commandé [9], [10].

L'étude du fonctionnement de la machine asynchrone, en moteur comme en générateur, nécessite de disposer d'un modèle mathématique. Dans le paragraphe suivant, nous allons présenter une modélisation analytique, en introduisant l'effet de la saturation des matériaux dans le modèle.

La machine asynchrone, avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie, est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte, il est alors nécessaire d'adopter des hypothèses simplificatrices.[22]

- ✓ 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.

II-4 Modèle général de la machine asynchrone :

Les équations générales de la machine asynchrone à cage d'écureuil dans un repère triphasé s'écrivent sous forme matricielle.

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

$$[V_{rabc}] = [R_r].[i_{rabc}] + \frac{d[\Phi_{rabc}]}{dt} \quad \text{II.2}$$

Respectivement les vecteurs des tensions statoriques et rotoriques :

$$[V_{sabc}] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}; \quad [V_{rabc}] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} \quad \text{II.3}$$

Respectivement les vecteurs des courants statoriques et rotoriques :

$$[i_{sabc}] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}; \quad [i_{rabc}] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad \text{II.4}$$

Respectivement les vecteurs des flux statoriques et rotoriques :

$$[\Phi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix}; \quad [\Phi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad \text{II.5}$$

Respectivement les matrices des résistances statoriques et rotoriques:

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad \text{II.6}$$

Le rotor de la machine étant en court-circuit, la relation du rotor devient :

$$[V_{rabc}] = 0 = [R_r] \cdot [i_{rabc}] + \frac{d[\Phi_{rabc}]}{dt} \quad \text{II.7}$$

A ces équations électriques, il faut rajouter celle du couple électromagnétique qui s'écrit :

$$T_{em} = \frac{1}{2} [i_{sabc}, i_{rabc}] \cdot \left(\frac{d}{d\theta} \cdot [\Phi_{sabc}, \Phi_{rabc}] \right) \quad \text{II.8}$$

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

$$[\Phi_{rabc}] = [L_r] \cdot [i_{rabc}] + [M_{sr}(\theta)] \cdot [i_{sabc}] \quad \text{II.9}$$

$$[\Phi_{sabc}] = [L_s] \cdot [i_{sabc}] + [M_{sr}(\theta)] \cdot [i_{rabc}] \quad \text{II.10}$$

où seules les inductances mutuelles entre stator et rotor sont fonction de la position rotorique l'expression du couple se réécrit sous la forme suivante :

$$T_{em} = [i_{sabc}] \cdot \left(\frac{d}{d\theta} \cdot [M_{sr}] \right) \cdot [i_{rabc}] \quad \text{II.11}$$

$$[M_{sr}] = L_m \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad \text{II.12}$$

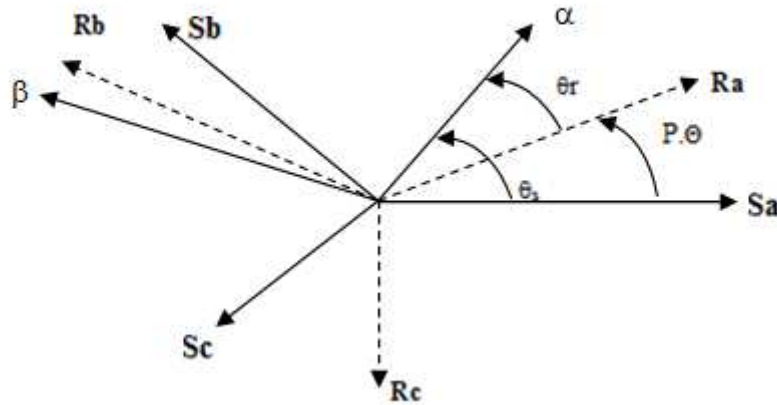


Figure II.2: Les différents systèmes d'axes utilisés.

En appliquant alors la transformation de Park aux équations statoriques et rotoriques on aboutit aux expressions suivantes dans le repère α, β :

$$V_{\alpha s} = R_s \cdot i_{\alpha s} + \frac{d\Phi_{\alpha s}}{dt} - \omega_a \cdot \Phi_{\beta s} \quad \text{II.13}$$

$$V_{\beta s} = R_s \cdot i_{\beta s} + \frac{d\Phi_{\beta s}}{dt} + \omega_a \cdot \Phi_{\alpha s} \quad \text{II.14}$$

$$0 = R_r \cdot i_{\alpha r} + \frac{d\Phi_{\alpha r}}{dt} - (\omega_a - \omega_r) \cdot \Phi_{\beta s} \quad \text{II.15}$$

$$0 = R_r \cdot i_{\beta r} + \frac{d\Phi_{\beta r}}{dt} - (\omega_a - \omega_r) \cdot \Phi_{\alpha s} \quad \text{II.16}$$

En choisissant un référentiel (α, β) lié au stator ($\omega_a = 0$), le système devient :

$$V_{\alpha s} = R_s \cdot i_{\alpha s} + \frac{d}{dt} \Phi_{\alpha s} \quad \text{II.17}$$

$$V_{\beta s} = R_s \cdot i_{\beta s} + \frac{d}{dt} \Phi_{\beta s} \quad \text{II.18}$$

$$0 = R_r \cdot i_{\alpha r} + \frac{d}{dt} \Phi_{\alpha r} + \omega_r \Phi_{\beta r} \quad \text{II.19}$$

$$0 = R_r \cdot i_{\beta r} + \frac{d}{dt} \Phi_{\beta r} - \omega_r \Phi_{\alpha r} \quad \text{II.20}$$

Les flux statoriques et rotoriques s'expriment dans le repère de PARK, en fonction des courants, par la relation matricielle suivante:

$$\begin{bmatrix} \Phi_{s\alpha} \\ \Phi_{s\beta} \\ \Phi_{r\alpha} \\ \Phi_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} \quad \text{II.21}$$

$$\Phi_{\alpha s} = L_s \cdot i_{\alpha s} + L_m \cdot i_{\alpha r} \tag{II.22}$$

$$\Phi_{\beta s} = L_s \cdot i_{\beta s} + L_m \cdot i_{\beta r} \tag{II.23}$$

$$\Phi_{\alpha r} = L_m \cdot i_{\alpha s} + L_r \cdot i_{\alpha r} \tag{II.24}$$

$$\Phi_{\beta r} = L_m \cdot i_{\beta s} + L_r \cdot i_{\beta r} \tag{II.25}$$

Avec [24] :

Ls = ls + Lm: Inductance cyclique statorique.

Lr = lr + Lm: Inductance cyclique rotorique.

ls: Inductance de fuite statorique.

lr: Inductance de fuite rotorique.

Lm : Mutuelle inductance

En remplaçant(II.21) dans (II.17, II.18, II.19 ,II.20) on obtient :

$$V_{\alpha s} = R_s \cdot i_{\alpha s} + L_s \frac{d}{dt} i_{\alpha s} + L_m \frac{d}{dt} i_{\alpha r} \tag{II.26}$$

$$V_{\beta s} = R_s \cdot i_{\beta s} + L_s \frac{d}{dt} i_{\beta s} + L_m \frac{d}{dt} i_{\beta r} \tag{II.27}$$

$$0 = R_r \cdot i_{\alpha r} + L_r \frac{d}{dt} i_{\alpha r} + L_m \frac{d}{dt} i_{\alpha s} + \omega_r (L_r i_{\beta r} + L_m i_{\beta s}) \tag{II.28}$$

$$0 = R_r \cdot i_{\beta r} + L_r \frac{d}{dt} i_{\beta r} + L_m \frac{d}{dt} i_{\beta s} - \omega_r (L_r i_{\alpha r} + L_m i_{\alpha s}) \tag{II.29}$$

II-4-1 Modèle diphasé de la génératrice asynchrone à cage:

Le modèle équivalent de la GAS à vide dans le repère (α,β) conduit au schéma équivalent monophasé de la machine asynchrone Figure (II.3) où Ls et Lr sont les inductances propres d'une phase statorique et rotorique respectivement, Lm l'inductance magnétisante, Rr la résistance rotorique et Rs la résistance starotorique

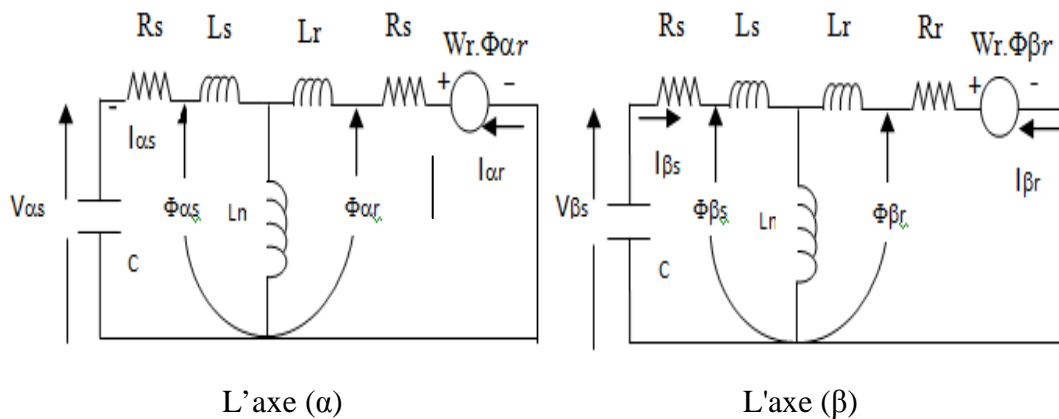


Figure II.3: modèle de MAS à cage dans le repère (α, β).

D'après la Figure II.2 en obtient :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s + 1/pC & 0 & pL_m & 0 \\ 0 & R_s + pL_s + 1/pC & 0 & pL_m \\ pL_m & -\omega_r L_m & R_r + pL_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r L_m & pL_m & \omega_r L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \\ i_{\alpha r} \\ i_{\beta r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{c\alpha 0} \\ V_{c\beta 0} \\ K_\beta \\ K_\alpha \end{bmatrix} \quad \text{II.30}$$

Ou:

K_α et K_β sont les constants qui représentent les tensions induites au long de l'axe α et l'axe β , grâce au flux magnétique rémanent dans le circuit magnétique. $V_{c\alpha 0}$ et $V_{c\beta 0}$ sont les tensions initiales dans le condensateur.

$$L_s = L_{ls} + L_m \text{ et } L_r = L_{lr} + L_m \quad \text{II.31}$$

Dans le repère $\alpha\beta$ l'équation (II.14) peut être écrite comme :

$$V_{\beta s} = R_s i_{\beta s} + 0 \cdot \Phi_{\alpha s} + \frac{d}{dt} \Phi_{\beta s} \quad \text{II.32}$$

En remplaçant l'équation (II.23) dans l'équation (II.32) on obtient :

$$0 = -V_{\beta s} + R_s i_{\beta s} + L_s \frac{d}{dt} i_{\beta s} + L_m \frac{d}{dt} i_{\beta r} \quad \text{II.33}$$

En remplaçant l'équation (II.24) et l'équation (II.25) dans (II.20) on trouve :

$$\frac{d}{dt} i_{\beta r} = \frac{1}{L_r} \left(-R_r i_{\beta r} + \omega_r L_r i_{\alpha r} + \omega_r L_m i_{\alpha s} - L_m \frac{d}{dt} i_{\beta s} \right) \quad \text{II.34}$$

L'expression finale de $i_{\beta s}$ après le remplacement l'équation (II.34) dans l'équation (II.33) comme suit :

$$\frac{d}{dt} i_{\beta s} = \frac{1}{L} \left(-R_s L_r i_{\beta s} - L_m^2 \omega_r i_{\alpha s} + L_m R_r i_{\beta r} - L_m \omega_r L_r i_{\alpha r} + L_m K_\beta - L_r V_{\beta s} \right) \quad \text{II.35}$$

Ou:

$$L = L_s L_r - L_m^2 \quad \text{II.36}$$

De même, les expressions des autres composantes de courant sont obtenues sous la forme matricielle suivante:

$$PI=AI+B \quad \text{II.37}$$

$$I = \begin{bmatrix} i_{\beta s} \\ i_{\alpha s} \\ i_{\beta r} \\ i_{\alpha r} \end{bmatrix} \quad B = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} L_m K_\beta & - & L_r V_{\beta s} \\ L_m K_\alpha & - & L_r V_{\alpha s} \\ L_m V_{\beta s} & - & L_s K_\beta \\ L_m V_{\alpha s} & - & L_s K_\alpha \end{bmatrix}$$

$$A = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} -R_s L_r & -L_m^2 \omega_r & L_m R_r & -L_m \omega_r L_r \\ L_m^2 \omega_r & -R_s L_r & L_m \omega_r L_r & L_m R_r \\ L_m R_s & L_m \omega_r L_s & -R_r L_s & L_r \omega_r L_s \\ -L_m \omega_r L_s & L_m R_s & -L_r \omega_r L_s & -R_r L_s \end{bmatrix}$$

$$V_c \alpha = \frac{1}{C} \int i_{\beta s} dt + V_c \beta_0$$

$$V_c \beta = \frac{1}{C} \int i_{\alpha s} dt + V_c \alpha_0$$

II.38

II-4-2 Modèle saturé de la génératrice asynchrone :

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 au delà de synchronisme. La présence d'un flux magnétique rémanent dans le fer du rotor est indispensable pour l'auto-amorçage de la génératrice [11].

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 [12].

La Figure (II.4) représente l'évolution de la force électromotrice statorique ainsi que la caractéristique externe du condensateur $V_c = \frac{I_s}{C\omega_s}$ (où ω_s est la pulsation des grandeurs statoriques et C est la capacité d'auto-amorçage) en fonction du courant statorique I_s , pour un fonctionnement à vide de la machine. L'interaction des deux phénomènes entraîne l'amorçage de la machine jusqu'au point de fonctionnement en régime permanent [13], [14].

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.[25]

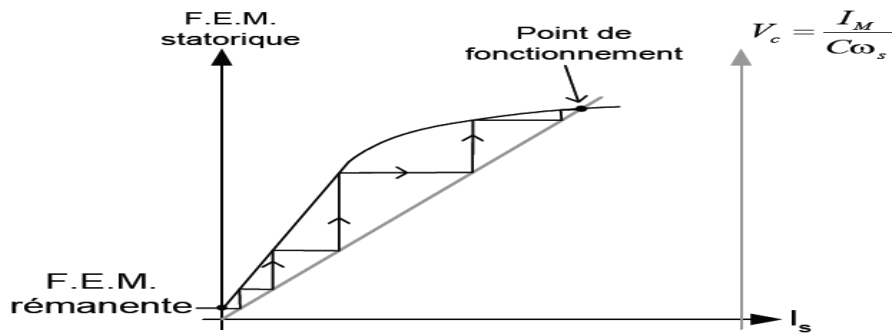


Figure II.4: Phénomène d'auto-amorçage

Comme expliqué dans la section précédente, l’inductance magnétique est la factor principale Pour construire la tension et la stabilisation de tension générée pour les conditions de fonctionnement en charge du générateur d'induction.

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} [16].

$$C_{min} = \frac{1}{L_m (p\Omega)^2}$$

Afin de pouvoir identifier la caractéristique L_m (Vph), nous effectuons une étude de la machine au synchronisme, L'approximation de l'évolution de l'inductance de magnétisation en fonction de la tension de phase peut s'effectuer 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.

Dans le cas général, l'expression de $L_m(Vph)$ s’écrit sous la forme suivant:

$$L_m = 1.56e - 11.Vph^2 + 2.44e - 8.Vph^3 - 1.19e - 5.Vph^2 + 1.42e - 3.Vph + 0.245$$

L'évolution de $L_m(Vph)$, déterminée par le polynôme est présentée sur la Figure (II.5):

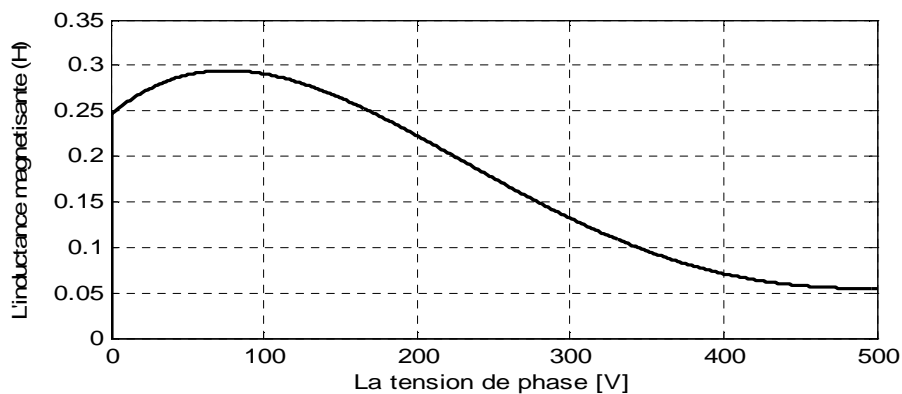


Figure II.5: Variation de l’inductance magnétisante en fonction de la tension de phase

Pour ce faire, le schéma bloc de la GAS dans le cas saturé (non linéaire), est implanté sous Matlab/Simulink par la Figure (II.6) suivante:

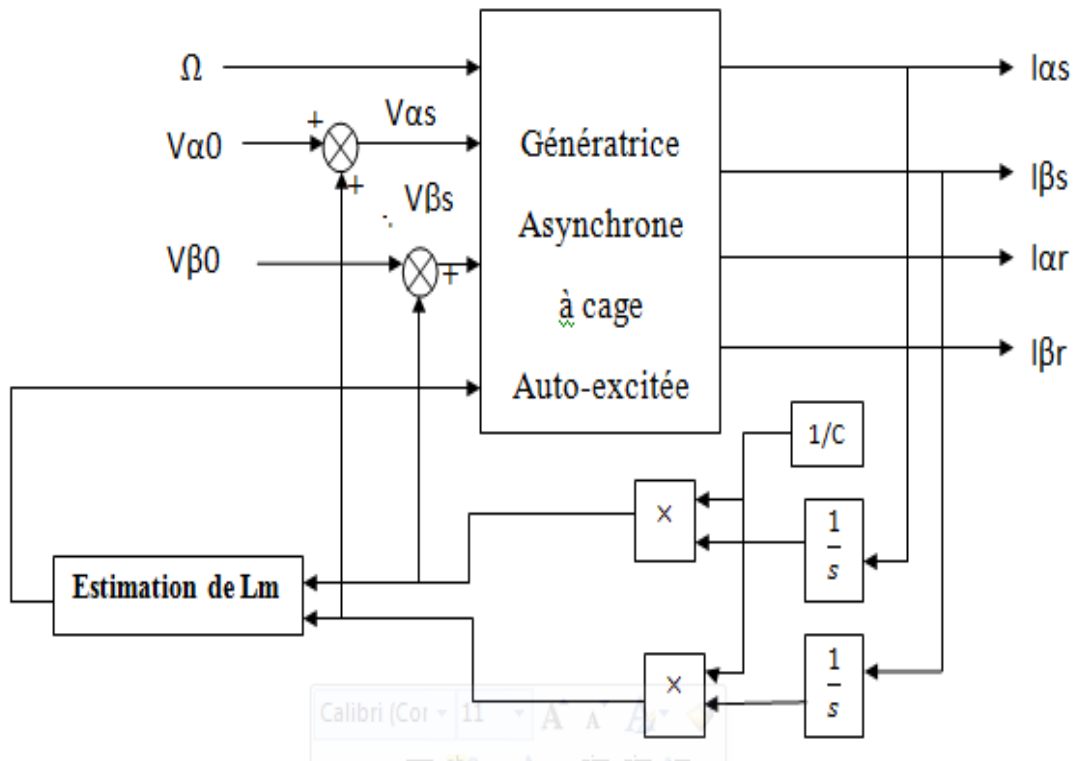


Figure II.6: Schéma bloc de simulation de modèle non linéaire.

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

II-4-3 Résultats de simulation :

les résultats de simulation de l'évolution de la tension et du courant sont présentés respectivement sur les Figures (II.7 , II.8)

nous avons simulé l'amorçage de la génératrice dans les conditions suivantes :

- $f=50\text{Hz}$
- $C=50\mu\text{F}$

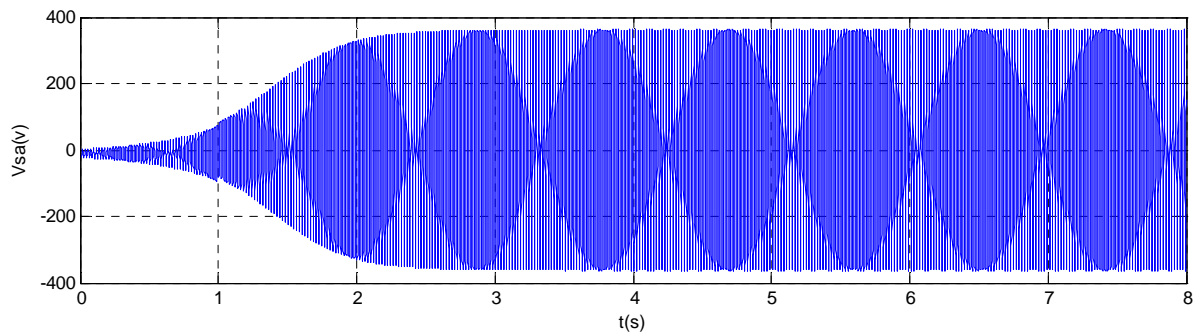


Figure II.7: l'Allure de la tension.

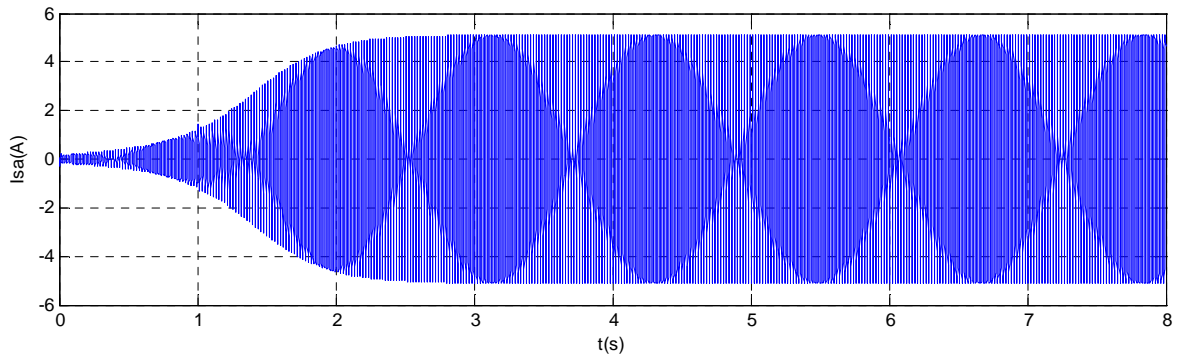


Figure II.8: l'Allure du courant.

D'après ces résultats, on peut constater que la tension et le courant statorique croissent d'une façon exponentielle dans la zone de non saturation puis elles convergent vers des valeurs fixes. Ces dernières sont fonction des valeurs du condensateur et de la vitesse, la Figure (II.7) représente l'allure de la tension et la Figure (II.8) représente l'allure du courant.

II-5 Essai sur charges équilibrées :

nous allons utiliser le modèle de la GAS saturé pour étudier le fonctionnement sur des charges triphasées équilibrées (R et RL) .

II-5-1 Charge résistive R :

Pour étudier le fonctionnement de la machine asynchrone nous avons amorcée cette machine à une vitesse de 157 rad/s avec un banc de capacités de valeur 40 μF , puis elle est connectée à une charge résistive de 220 Ω .

Nous donnons les allures de l'évolution d'une tension de phase à la connexion de la génératrice sur la charge. Les résultats de simulation sont présentés sur les Figures (II.9 , II.10, II.11).

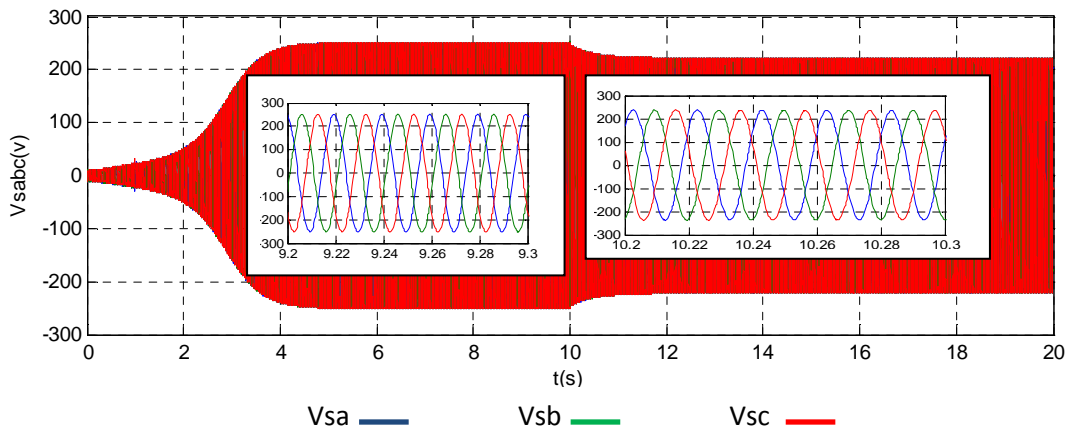


Figure II.9: l'Allure de tension de sortie statorique.

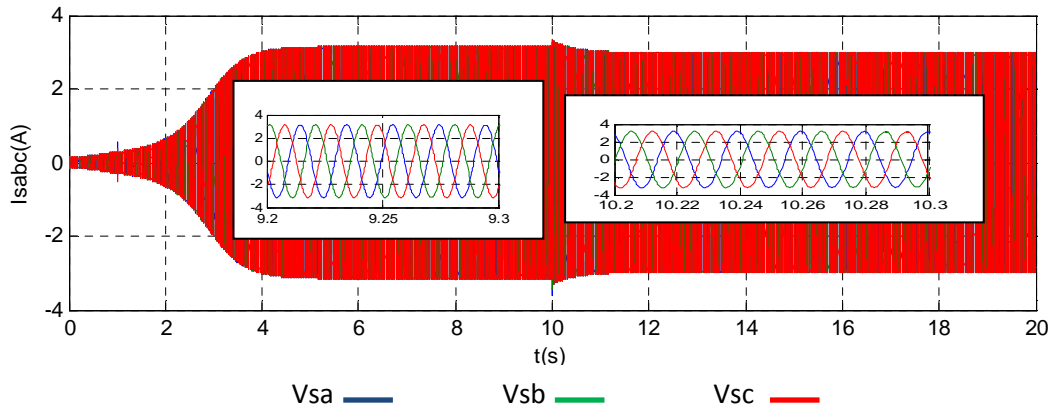


Figure II.10: l'Allure de courant de sortie statorique .

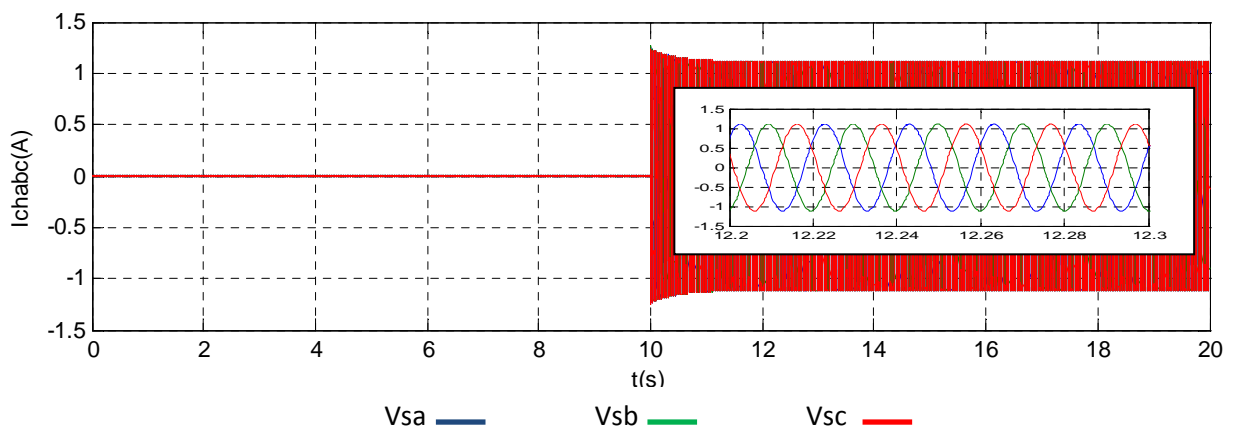


Figure II.11: l'Allure de courant de charge.

Quand on applique la charge dans l'instant ($t=10s$) en remarque une chute de tension de phase dans cette instante , le courant statorique évolue de façon similaire à celle de la tension

Figure (II.9) , par contre le courant dans la charge, nul avant l'introduction de cette dernière et s'instaure d'une manière sinusoïdale à partir de (t=10s).

Le couple électromagnétique transite d'un état stable à vide à un état stable défini par la charge Figure (II.12).

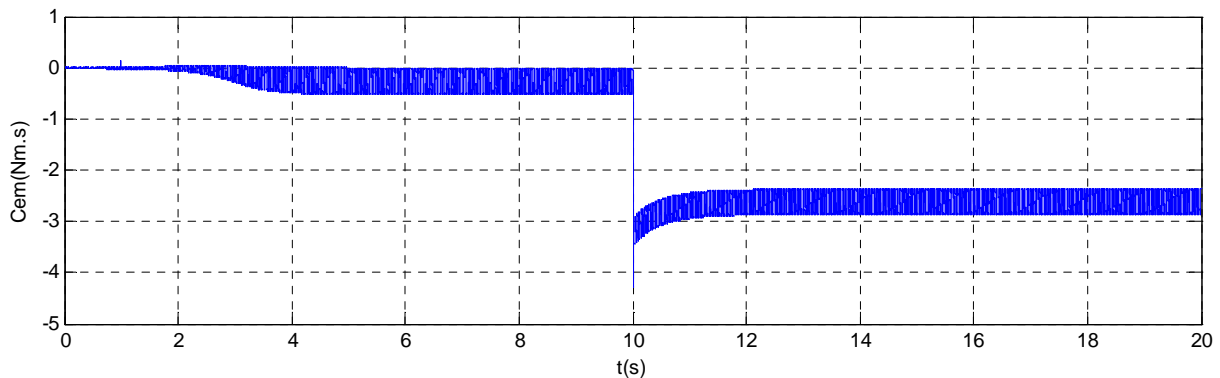


Figure II.12: le couple électromagnétique.

II-5-2 Charge inductive (RL) :

nous avons étudié le fonctionnement de la machine asynchrone débitant sur une charge RL la GAS est amorcer a une vitesse de 157 rad/s et 50 μ F par phase, puis la connecter sur une charge inductive (RL) constituée d'une résistance de 220 Ω en série avec une inductance de 100 mH par phase. Les résultats de simulation obtenus (tensions de phase, courants statoriques et dans la charge) sont présentés ci-dessous.

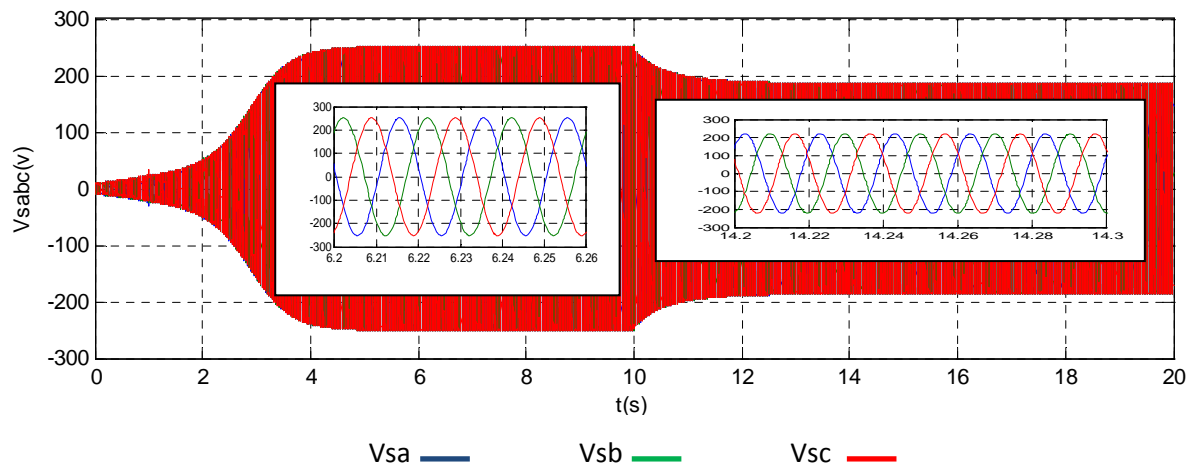


Figure II.13: l'Allure de tension de sortie statorique.

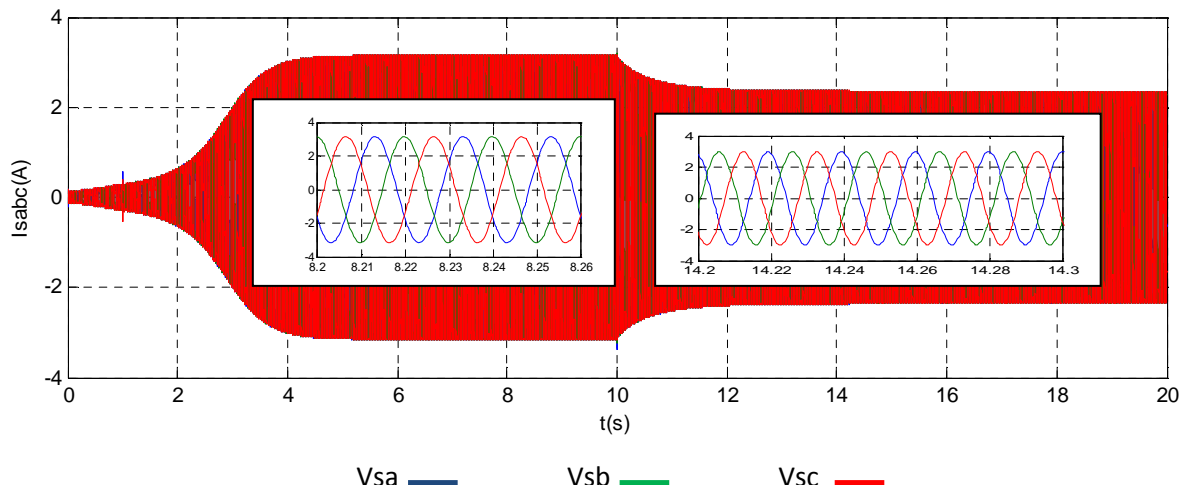


Figure II.14: l'Allur du courant de sortie statorique

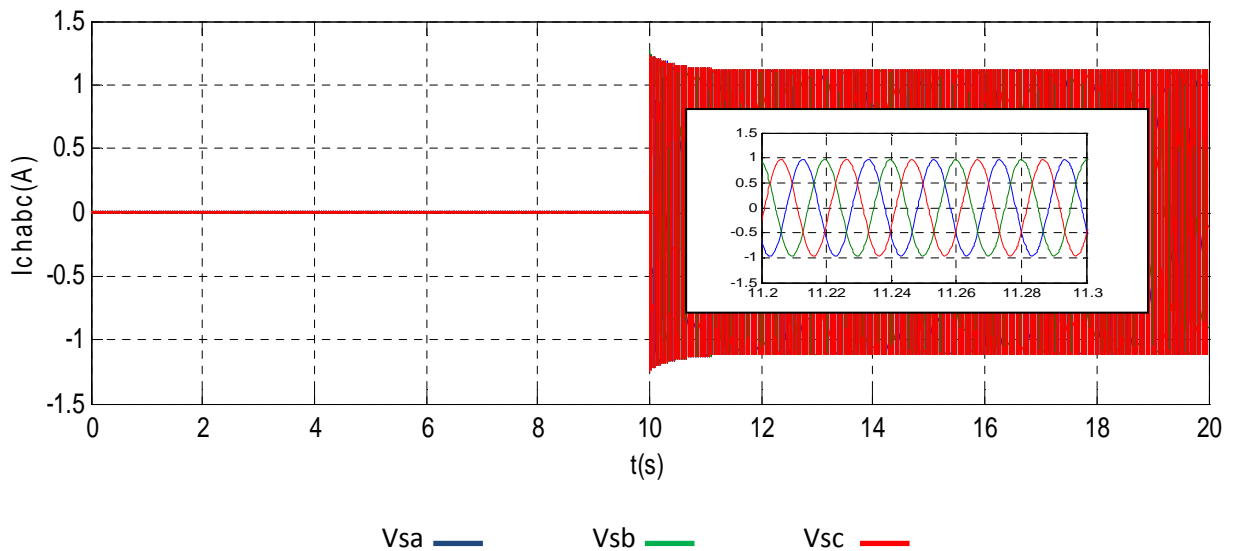


Figure II.15: l'Allure de courant de charge.

Même résultats qui nous avons obtenues dans la charge R, mais en remarque que la chute de tension et de courant de phase de charge RL est plus supérieure par-apporte a la charge R.

On déduire que l'influence de la charge sur le courant est plus sensible par contre la tension

L'introduction d'une charge inductive entraîne une consommation de l'énergie réactive.

II-6 Essai sur charges déséquilibrées :

Afin de compléter l'analyse de performances de la machine asynchrone auto-excitée, nous présenterons les résultats relatifs à deux charges spécifiques. La première est constituée uniquement résistive (R) et la seconde comporte la charge inductive (RL). Dans les deux cas, présentés, la génératrice est entraînée à une vitesse de 157 rad/s et la valeur de chaque capacité d'excitation est fixée à 45 μ F.

II-6-1 charge déséquilibrée résistive(R) :

La première charge triphasée déséquilibrée que nous étudions est constituée de trois charges résistives différentes:

- Phase a : une résistance $R_{cha} = 200\Omega$;
- Phase b : une résistance $R_{chb} = 200\Omega$;
- Phase c : une résistance $R_{chc} = 100\Omega$;

les Figures (II.16), (II.17), et (II.18) représentent Les évolutions temporelles de la tension statorique ainsi que les courants statorique.

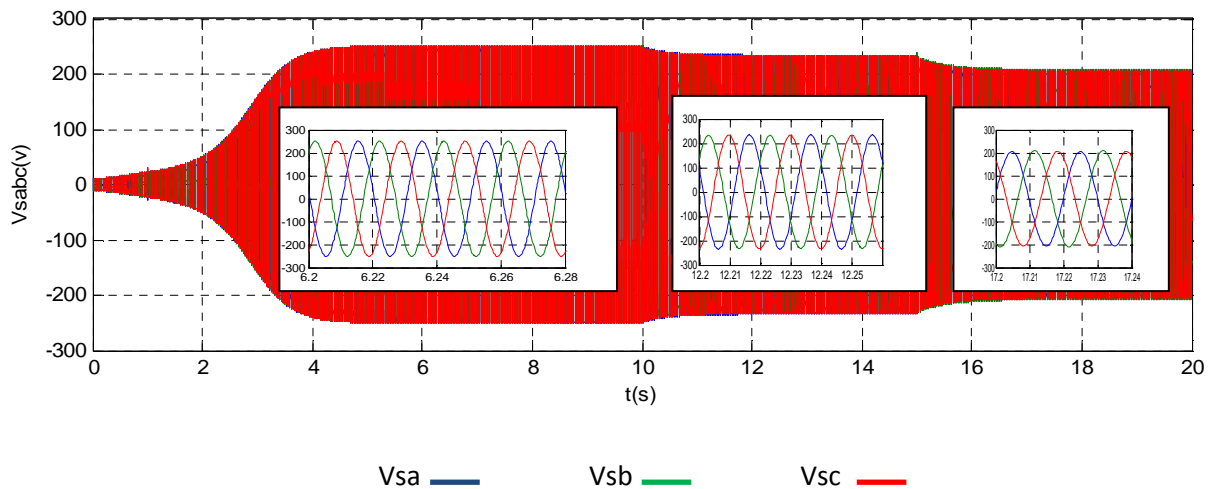


Figure II.16: l'Allure de tension de sortie statorique.

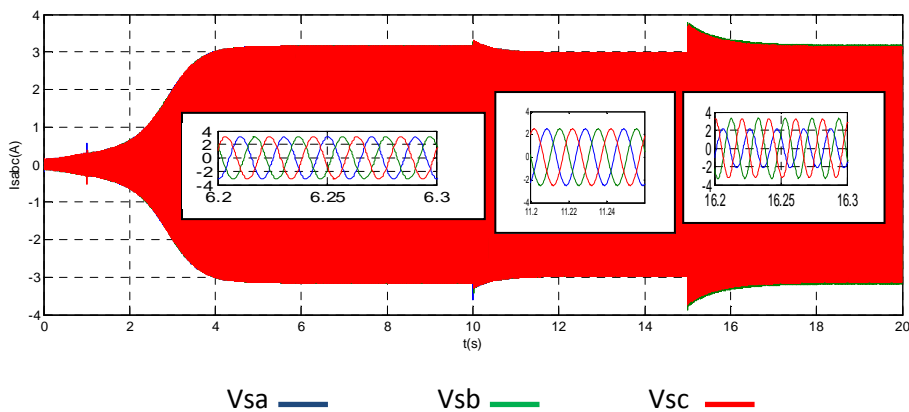


Figure II.17: l'Allure de courant de sortie statorique.

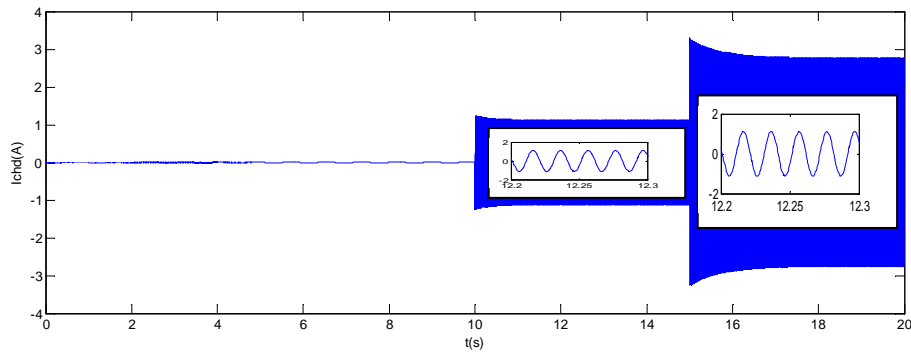


Figure II.18: l'Allure de courant de charge.

II-6-2 charge déséquilibrée inductive(RL) :

La seconde charge triphasée déséquilibrée que nous étudions est constituée de trois charges inductive différentes:

- Phase a : une résistance $R_{cha} = 200\Omega$ et une inductance $L_{chba} = 100\text{ mH}$;
- Phase b : une résistance $R_{chb} = 200\Omega$ et une inductance $L_{chb} = 100\text{ mH}$.
- Phase c : une résistance $R_{chc} = 100\Omega$ et une inductance $L_{chc} = 100\text{mH}$.

Les évolutions temporelles des tensions, des courants statoriques, et de la charge obtenues, par les simulations sont données par les Figures (II-19) , (II-20) , (II-21) respectivement.

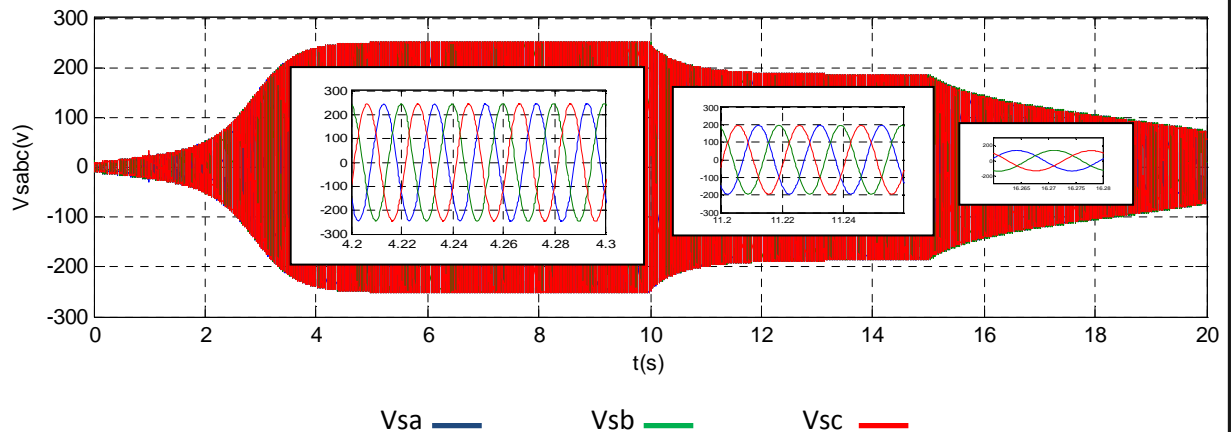


Figure II.19: l'Allure de tension de sortie statorique.

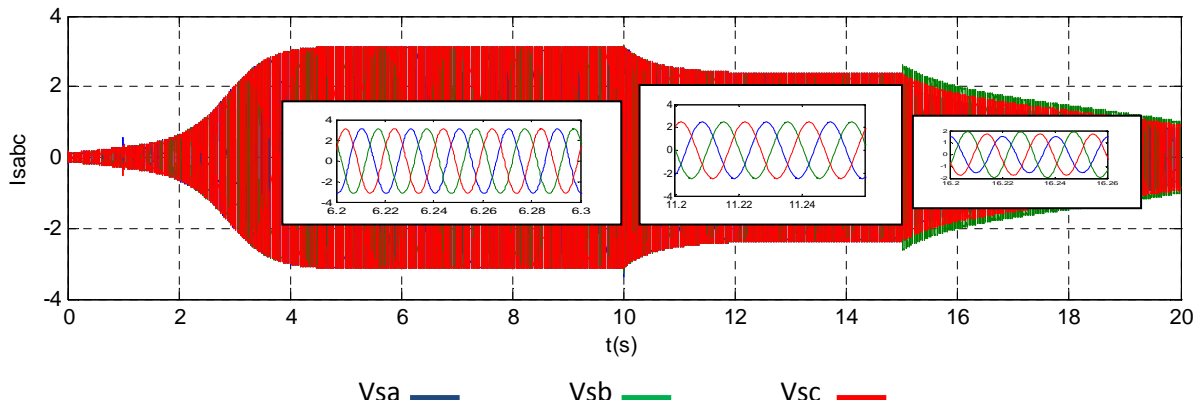


Figure II.20: l'Allure de courant de sortie statorique.

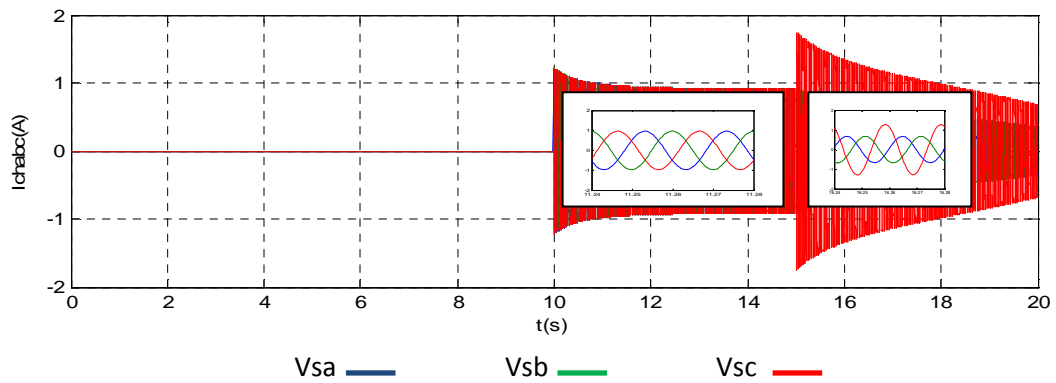


Figure II.21: l'Allure de courant de charge.

A fin de connectées une charge déséquilibrée à la génératrice asynchrone auto-excitée, en remarque une bonne génération de la tension et de courant de sortie, en dit que la déséquilibrée n'est valable que dans une plage de courant de charge ,cette dernière est plus sensible de telles charges dans le cas d'application autonomes.

II-7 Conclusion :

Dans ce chapitre on a expliqué les performances de la génératrice asynchrone auto-excitée en fonctionnement génératrice autonome.

Nous avons utilisé la simulation par logicielle (MATLAB/SIMULINK) pour avoir la variation du comportement de cette génératrice connectée à sa charge équilibrée ou déséquilibrée Avec des capacités d'auto-excitation .

Après ces études on montre que La GAS auto-excitée par des capacités peut être utilisée directement pour l'alimentation des charges autonomes.

Chapitre III

*Technique de commande du
redresseur MLI associé au
génératrice Asynchrone Auto excitée*

Chapitre III

Technique de commande du redresseur MLI associé au génératrice Asynchrone Auto-excitée

III-1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous étudions les performances de la génératrice asynchrone en fonctionnement autonome, débitant sur un redresseur à MLI. L'objectif de cette étude est de montrer la sensibilité de la valeur de la tension redressée aux variations de vitesse et de la charge du redresseur à MLI. Ce dernier fournit l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la machine. Sa commande doit permettre de maintenir constante la tension continue à sa sortie.

Plusieurs stratégies de contrôle ont été proposées dans les travaux récents pour ce type de redresseur *MLI*. Bien que ces stratégies de contrôle puissent atteindre le même but global, tel que un facteur de puissance élevé et un courant de forme proche sinusoïdale, mais leurs principes diffèrent.

Particulièrement, la commande par orientation de la tension *VOC* peut garantir une dynamique élevée et des performances statiques par la boucle interne de contrôle de courant. Cette commande est devenue très connue et par conséquent elle est développée et améliorée. La configuration finale et les performances de la commande *VOC* dépendent largement de la qualité de la stratégie de contrôle du courant [15].

Dans ce chapitre nous nous intéressons à une des solutions qui est le redresseur *MLI* et le choix de sa commande. Pour cette dernière, la commande par orientation de la tension *VOC* est proposée pour un contrôle plus performant du redresseur.

III-2 Commande par orientation de la tension VOC:

Par analogie avec la commande par orientation du flux (*FOC field oriented control*) d'un moteur asynchrone, la commande par orientation de la tension *VOC* (en anglais *Voltage Oriented Control*) est proposée pour la commande du redresseur *MLI*.

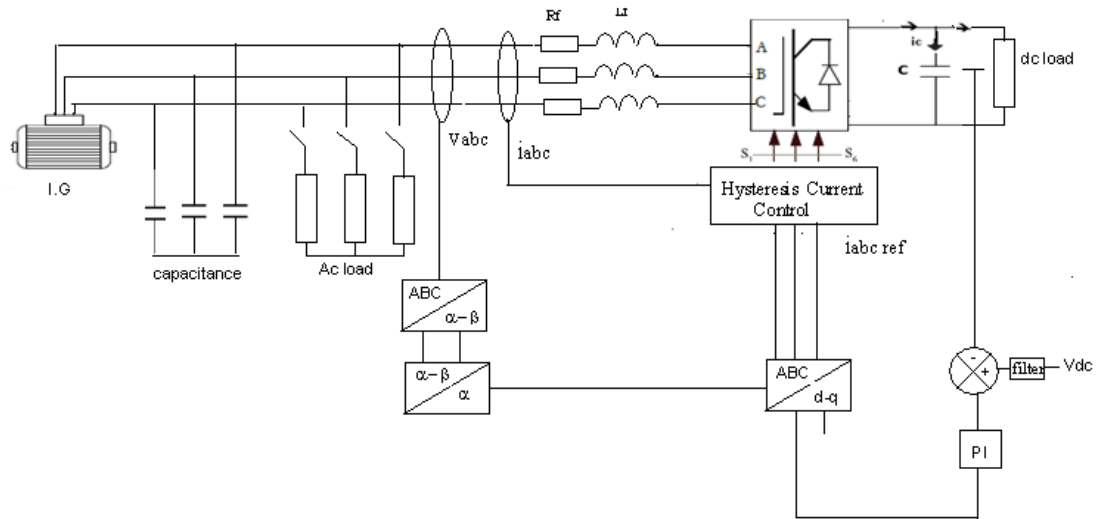


Figure III.1: Système global de la commande *MLI* vectorielle de *GAS* auto-excitée

La Figure (III.1) représente la technique de commande VOC, utilise un seul régulateur PI pour contrôler la composante (d) du courant dans le plan synchrone dq. L'axe réel du repère tournant est typiquement fixé sur le vecteur tension de ligne. En raison des transformations des coordonnées, les composantes de courant à commander deviennent des quantités continues en régime permanent, et l'action intégrale des contrôleurs peut ainsi éliminer les erreurs statiques en régime permanent. En outre, le réglage de la tension continue est typiquement mis en application avec un contrôleur simple de type PI.

La référence de la composante directe du courant id est obtenue par réglage de la tension continue, où on utilise un régulateur PI pour contrôler l'erreur entre la tension captée (continue) et sa référence.

III-3 Modélisation du redresseur triphasé à MLI :

La Figure (III.2) donne le schéma de principe du redresseur de tension triphasé alimentant le bus continu. Ce bus est entièrement géré par le redresseur, la valeur de la capacité de filtrage doit être suffisante afin d'avoir une tension stable et fixe quel que soit le fonctionnement de la génératrice asynchrone.

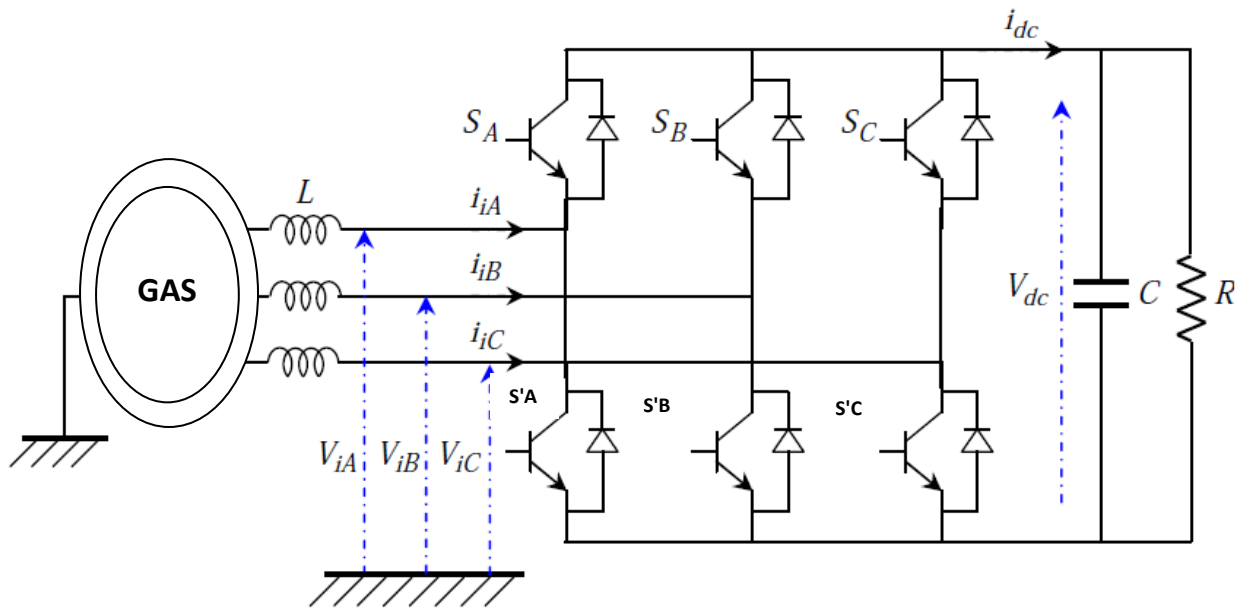


Figure III.2: Structure du redresseur triphasé.

Pour aboutir le modèle dynamique du système Figure (III.2), qui exprimer le fonctionnement de convertisseur en 3 parties;

- partie alternatif
- partie discontinue
- partie continu.

Les interrupteurs $S_a, S_a'; S_b, S_b'; S_c, S_c'$ sont contrôlé de façon complémentaire.

- ❖ $S_i=1$ si l'interrupteur S_a, S_b, S_c est fermé et S_a', S_b', S_c' est ouvert;
- ❖ $S_i=0$ si l'interrupteur S_a, S_b, S_c est ouvert et S_a', S_b', S_c' est fermé;

Avec $i = A; B; C$

Séquence	1	2	3	4	5	6
V_{ano}	$V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$
V_{bno}	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$
V_{cno}	$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$

Tableau III.1 : séquences de commande

on peut écrire les tensions de phases V_a, V_b, V_c en fonction des signaux de commande S_i :

$$V_i = S_i \cdot V_{dc} - \frac{V_{dc}}{2} \tag{III.1}$$

V_{ab}, V_{bc} et V_{ca} sont des tensions composées qui définies par les relations suivantes en tenant compte du point fictif « O »,.

$$\begin{aligned}
 V_{ab} &= V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{bo} \\
 V_{bc} &= V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \\
 V_{ca} &= V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao}
 \end{aligned}
 \tag{III.2}$$

Soit « n » le point neutre du coté alternatif (GAS), alors on a :

$$\begin{aligned}
 V_{ao} &= V_{an} + V_{no} \\
 V_{bo} &= V_{bn} + V_{no} \\
 V_{co} &= V_{cn} + V_{no}
 \end{aligned}
 \tag{III.3}$$

La charge est considérée équilibrer, il l'en résulte :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \tag{III.4}$$

La substitution nous donne :

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \tag{III.5}$$

En remplaçant l'équation (III.5) dans l'équation (III.3) on obtient :

$$\begin{aligned}
 V_{an} &= +\frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\
 V_{bn} &= -\frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\
 V_{cn} &= -\frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co}
 \end{aligned}
 \tag{III.6}$$

l'utilisation de l'expression (III.6) permet d'établir les équations instantanées des tensions simples en fonction des grandeurs de commande:

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} +2 & -1 & -1 \\ -1 & +2 & -1 \\ -1 & -1 & +2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix}
 \tag{III.7}$$

Les trios tensions V_{ao} , V_{bo} , V_{co} sont des d'entrée de redresseur, et V_{an} , V_{bn} , V_{cn} sont les tensions simples de la génératrice , donc le redresseur est modélisé par la matrice de transfert T donnée par :

$$T = \begin{bmatrix} +2 & -1 & -1 \\ -1 & +2 & -1 \\ -1 & -1 & +2 \end{bmatrix} \tag{III.8}$$

On déduit l'équation de couplage des cotés alternatif et continu:

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = (S_a I_{sa} + S_b I_{sb} + S_c I_{sc}) - I_{dc} \tag{III.9}$$

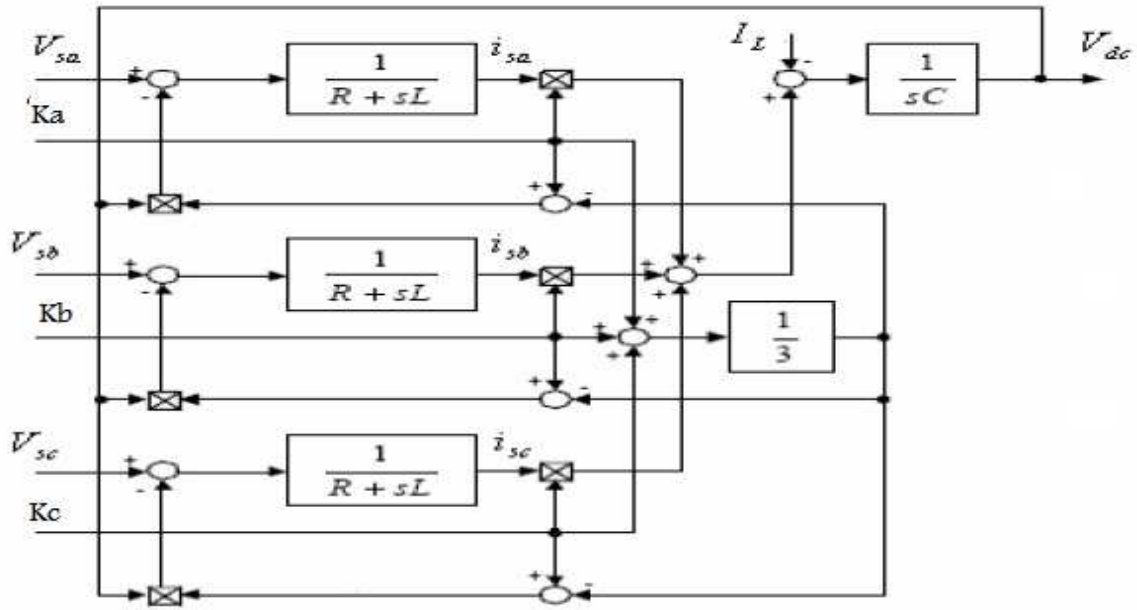


Figure III.3: Modélisation du redresseur dans un repère fixe lié aux axes *abc*

III-3-1 Commande MLI à hystérésis du redresseur:

La Figure (III.4) représenté Le schéma bloc de la commande du GAS associé au redresseur MLI .La commande de redresseur MLI à hystérésis basée sur le contrôle du bus continue à la sortie de redresseur. Ce type de commande Elle possède un bon temps de réponse en régime dynamique. Le seul paramètre de régulation dans cette commande est la largeur de la bande d'hystérésis.

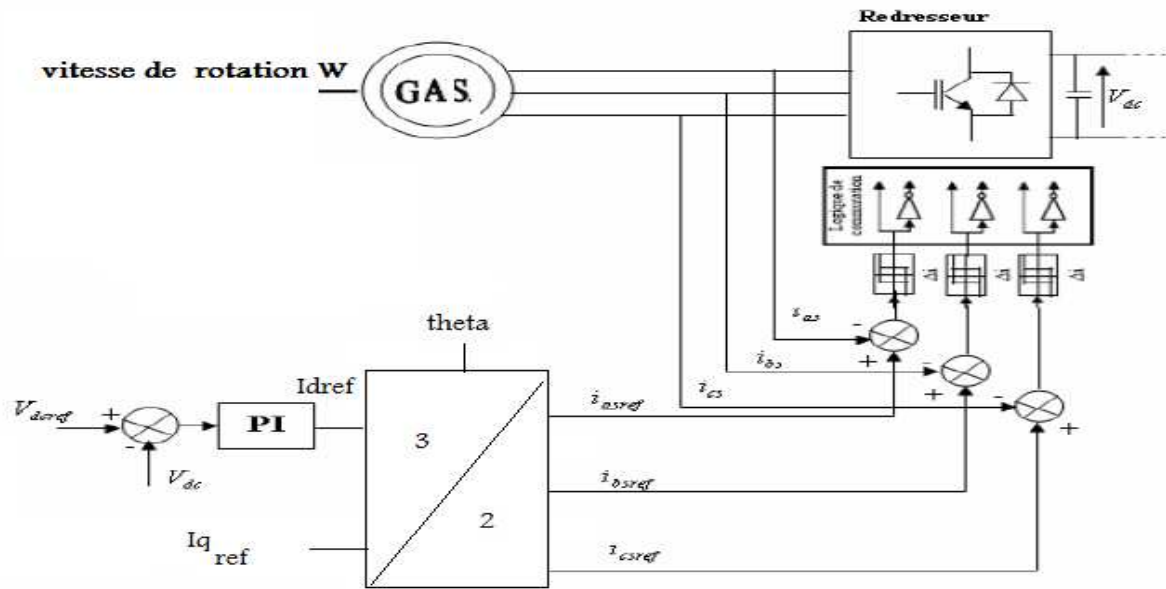


Figure III.4: Synoptique de la commande du redresseur et de la GAS

La Figure (III.4) présente le schéma de principe de la stratégie de contrôle par hystérésis à régulateurs indépendants pour le contrôle du courant d'une GAS. Quand le courant instantané d'une phase s'écarte de sa valeur de référence d'une valeur $\Delta I / 2$, fixée par la bande du correcteur à hystérésis, une commutation est imposée aux interrupteurs du bras du redresseur correspond, de façon à maintenir le courant réel à l'intérieur d'une bande ΔI entourant le courant de référence comme le montre la Figure (III.5). Cette stratégie utilise trois correcteurs à hystérésis indépendants. Les correcteurs à hystérésis utilisés sont des correcteurs à deux niveaux. Le correcteur de chaque phase agit selon la différence entre le courant de référence i_{sgref} et le courant réel i_{sg} circulant dans une phase de la machine. Chaque correcteur génère un signal de commande K_g est donné par la relation suivante:

$$\begin{cases} K_g = 1 \\ K_g = 0 \end{cases} \text{ si } \begin{cases} \Delta i_{sg} = (i_{sgref} - i_{sg}) \geq \Delta I / 2 \\ \Delta i_{sg} = (i_{sgref} - i_{sg}) \leq -\Delta I / 2 \end{cases} \quad (g = a, b, c) \quad \text{III.10}$$

A l'intérieur de la zone d'hystérésis, le signal logique K_g est soit égal à 1, soit égal à 0, selon le basculement précédent

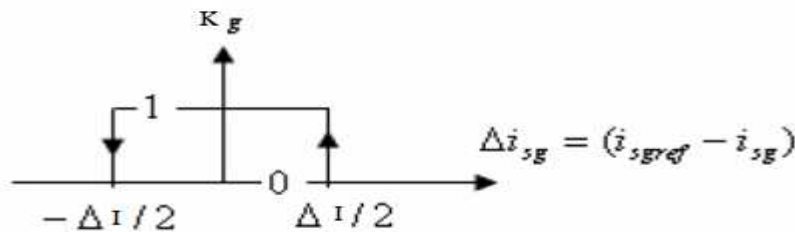


Figure III.5 : Principe d'une commande par hystérésis

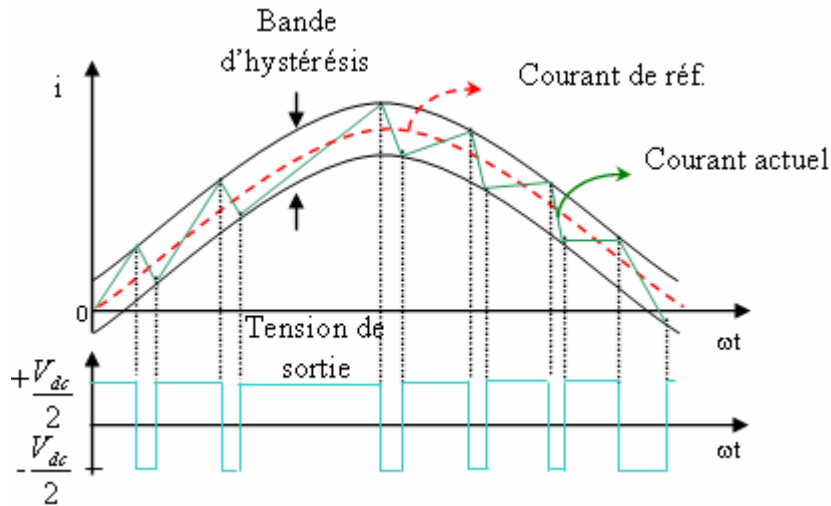


Figure III.6 : Principe de fonctionnement d'un correcteur à hystérésis

III-3-2 Régulation de courant:

La Figure (III.7) représente un bras du redresseur et sa commande en courant. La stratégie de contrôle consiste à introduire l'erreur de courant de phase dans un régulateur à hystérésis, les interrupteurs K_a et $K_{a'}$ sont reliés, l'un à la sortie d'un comparateur à hystérésis, l'autre à cette même sortie via un inverseur.

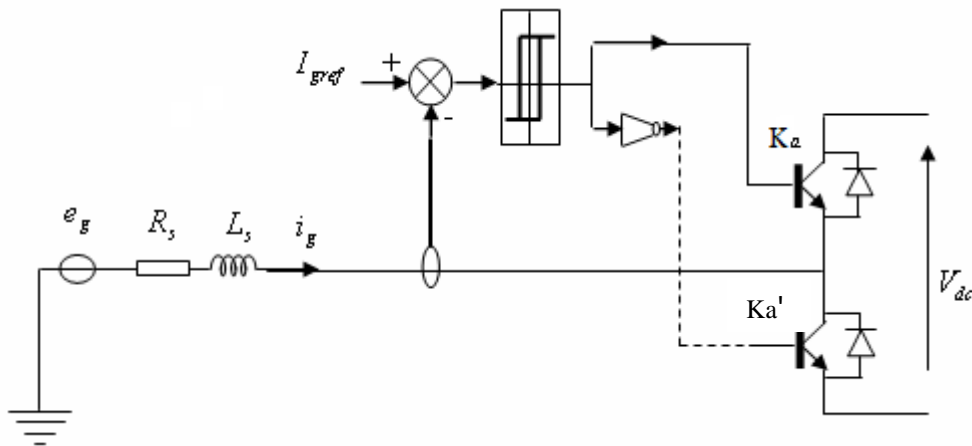


Figure III.7 : Modèle de la régulation de courant

III-4 Régulation de la tension continue :

En utilisant le régulateur PI pour corriger l'erreur entre la tension continue mesurée et sa référence. La sortie de régulateur PI donne le courant de référence (I_d^*) et le courant de référence égale zéro ($I_q^*=0$).

L'équation temporelle de ce correcteur est donnée comme suit :

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

III.11

Où : $e(t)$, $U(t)$, K_p , K_i désignent respectivement l'erreur à l'instant t , la commande générée et les gains du correcteur. La fonction de transfert correspondante est donnée par :

$$R(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad \text{III.12}$$

Où S est l'opérateur de Laplace.

On donne : $K_p=0.0533$, $K_i = 0,4737$.

Le schéma suivant représente la régulation de la tension continue avec un correcteur PI :

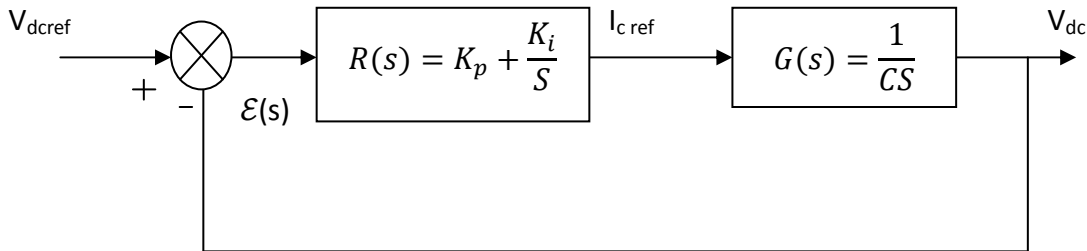


Figure III.8: Régulation de la tension continue avec un correcteur PI

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$H(s) = \frac{R(s).G(s)}{1 + R(s).G(s)} \quad \text{III.13}$$

On obtient :

$$H(s) = \frac{K_p s + K_i}{C. s^2 + K_p s + K_i} \quad \text{III.14}$$

Pour commander le système en boucle fermée, il est nécessaire de bien choisir les coefficients k_p et k_i dans ce cas on utilise la méthode d'imposition des pôles.

La fonction de transfert d'un système du deuxième ordre en boucle fermée est caractérisée par :

$$F(s) = \frac{1}{s^2 + 2 \varepsilon w_n \cdot s + w_n^2} \quad \text{III.15}$$

Par analogie entre les expressions (III.14, III.15) on trouve:

$$K_p = 2. C. \varepsilon w_n$$

$$K_i = C. w_n^2 \quad \text{III.16}$$

III-5 Schéma bloc de la simulation:

Le système composé de la génératrice asynchrone connectée à un redresseur à MLI et commandé suivant la stratégie de commande introduite ci-dessus a été simulé. Le modèle de la machine est celui présenté dans le chapitre II. Il tient compte de la saturation. Dans ce qui suit, deux tests de simulation sont effectués afin de quantifier les performances de la commande.

Le premier permettra de tester l'influence de variations de la vitesse. Le second quantifiera l'impact de variations de charge sur l'évolution de la tension à la sortie du redresseur ; le schéma bloc de simulation sous SIMULINK est donné par la Figure (III.9)

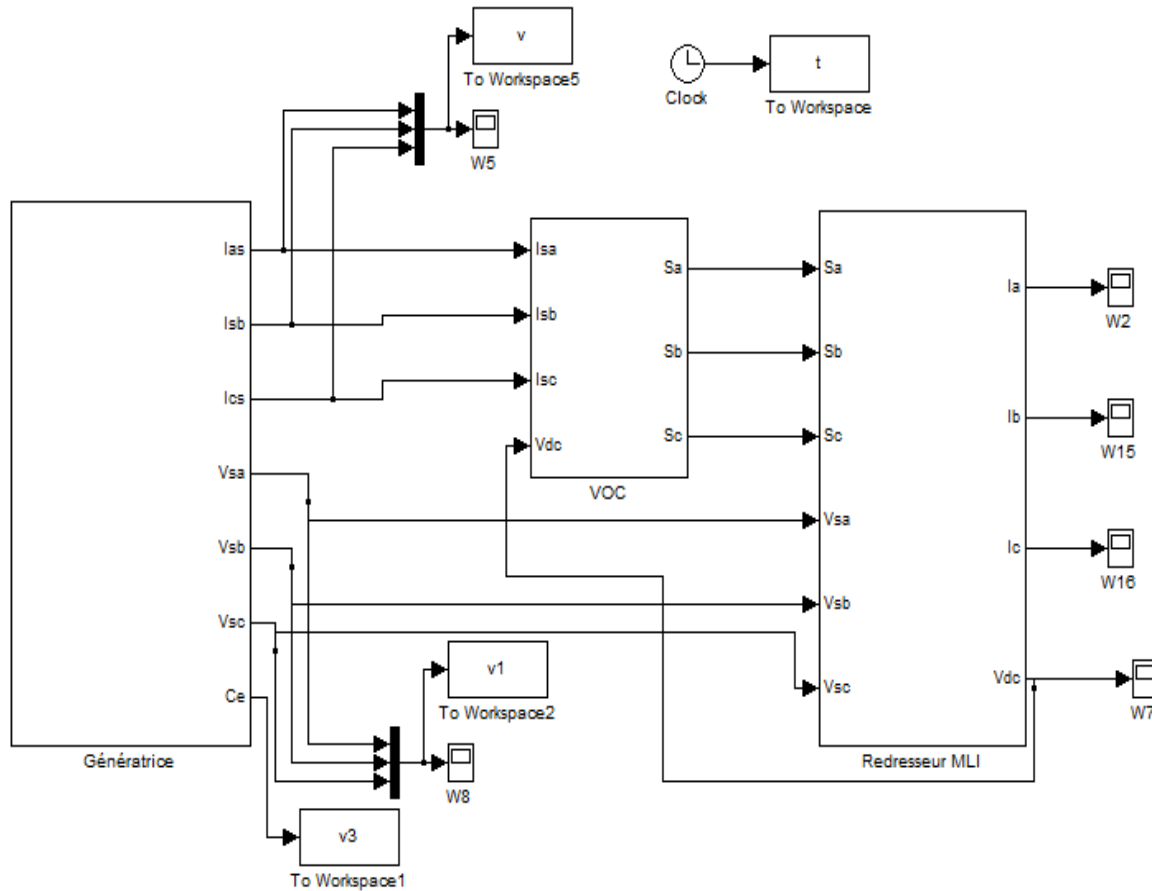


Figure III. 9: Schéma bloc de la simulation.

III-5-1 Résultats de simulation:

III-5-1-1 Influence de la variation de la vitesse:

La valeur de référence de la tension du bus continu à la sortie du redresseur est fixée à $V_{dc}=120$ V. Au cours de simulation

les résultats de simulation obtenus pour une vitesse d'entraînement variable. Dans un premier temps, la génératrice est entraînée à la vitesse de synchronisme (157 rad/sec). A l'instant $t=8$ s, la vitesse est augmentée de +10% puis à l'instant $t=16$ s, la vitesse est diminuée de 10% aussi Figure (III.10).

En appliquant la commande VOC à vide, les résultats de simulation sont présentés sur les Figures ci-dessous, dans ce cas, la tension redressée est bien contrôlée comme le montre la Figure (III.10) avec, la variation de la vitesse d'entraînement Figure (III.9),

Nous constatons un léger dépassement de la tension V_{dc} lors de l'amorçage de la génératrice. La tension V_{dc} est pratiquement présente un léger changement aux variations de la vitesse. Ainsi l'allure de la tension du bus donne deux indices sur le fonctionnement de l'association entre une GAS, un redresseur commandé :

Une augmentation de la vitesse est suivie d'une surtension Figure (III.11) alors qu'une diminution de la vitesse est accompagnée d'une chute de tension. La tension du bus est établie à 120V avec un temps de réponse qui dépend de la commande.

Les Figures (III.12) et (III.13) montrent les allures temporelles de la tension et du courant de phase statorique, on peut noter que une nette augmentation de la tension de phase statorique lors de l'augmentation de 10 % de la vitesse d'entraînement à $t=8s$, et une diminution importante lors de la diminution de 10 % de la vitesse à $t=16s$, le courant statorique évolue de façon similaire à celle de la tension Figure (III.13)

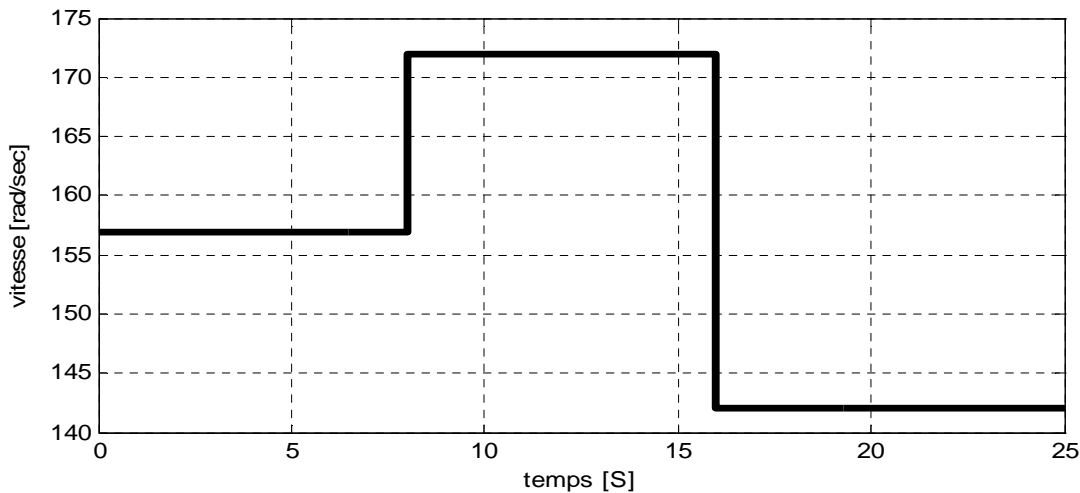


Figure III.10: Profil de la vitesse d'entraînement en rad/s

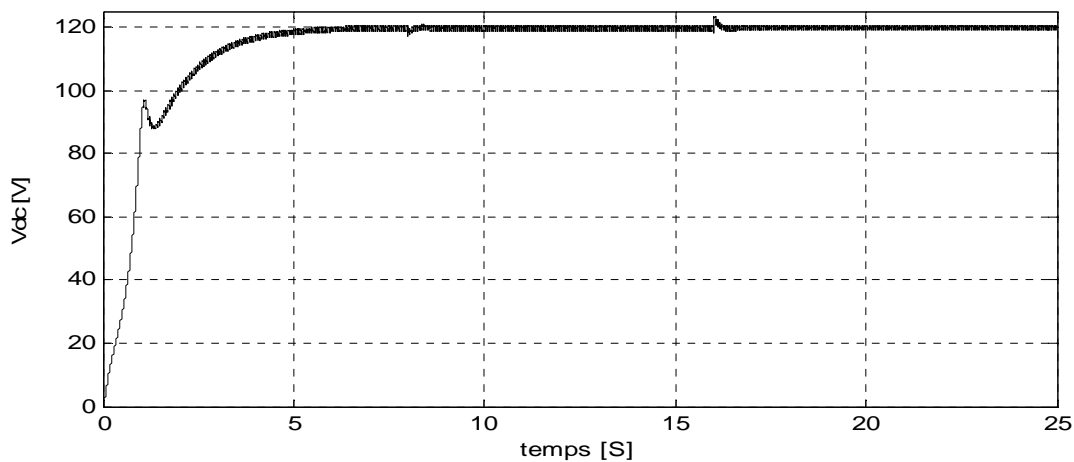


Figure III.11: La tension du bus continu

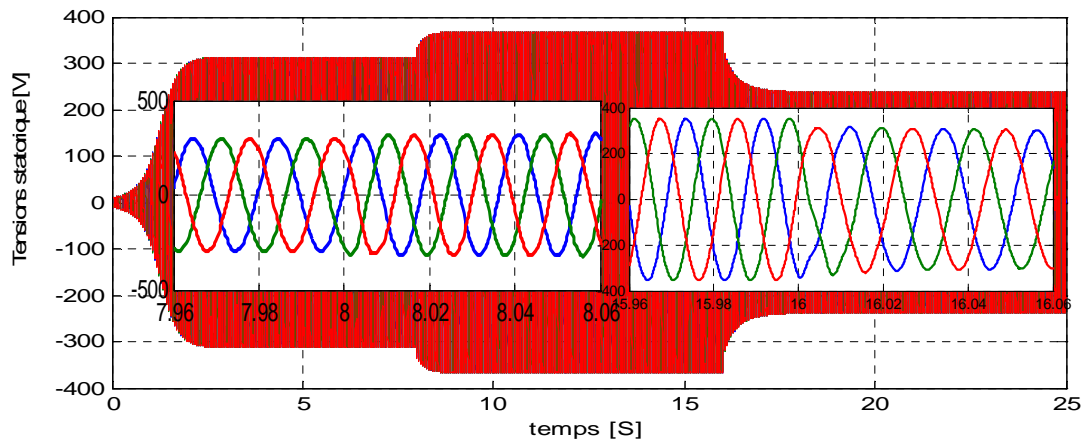


Figure III-12 Tensions statorique

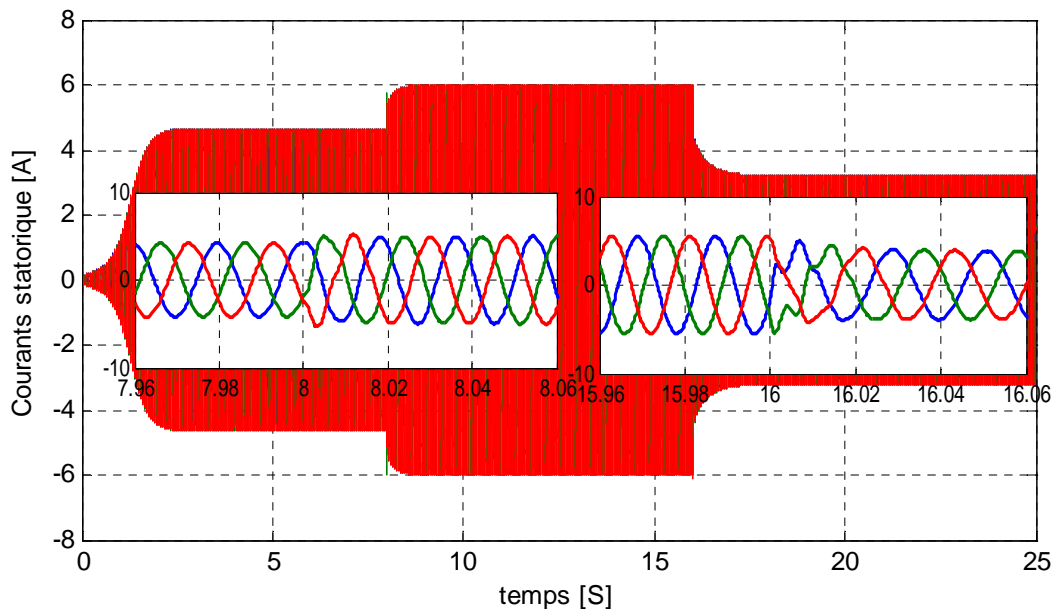


Figure III-13 Courants statorique

III-5-1-2 Influence de la variation de la charge:

Au début, on donne la vitesse de synchronisme de la génératrice de 157rad/s avec une valeur de la tension redressée $V_{dc} = 120\text{V}$. Les simulations sont réalisées pour deux types de charge résistives, l'une est une charge de côté alternatif (R_{ac}) et l'autre est une charge de côté continu (R_{dc}); en fait ces simulations sont pour avoir les performances de la VOC pour des variations de charge. La figure (III-14) représente ces variations.

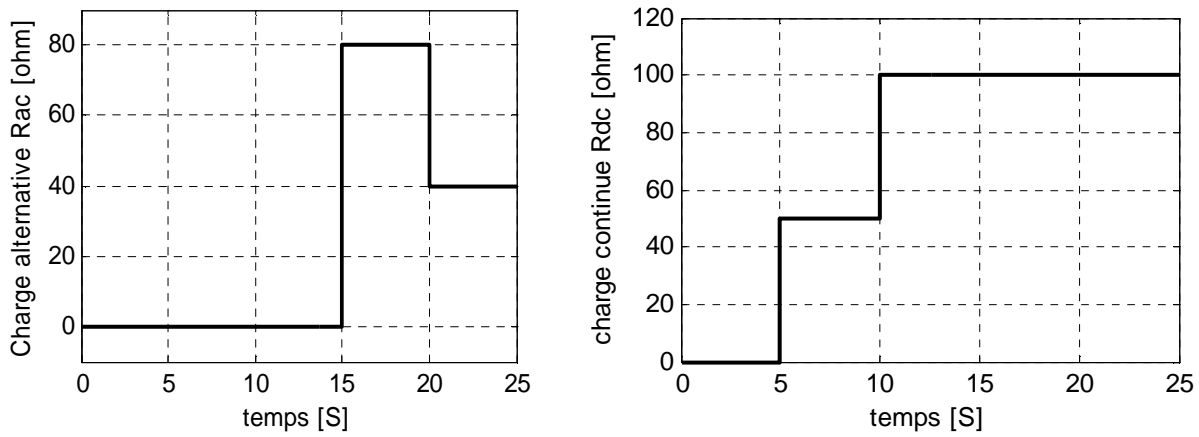


Figure III-14 Profils de variation de Rac et Rdc

Les résultats obtenus sont présentés ci-dessous. La tension du bus continu (Figure (III.14)), est sensible à la variation de la charge quelque soit continue ou alternative.

Les Figures (III.15) et (III-16) montrent qu'en maintenant le courant de la génératrice asynchrone en phase avec sa force électromotrice on arrive à commander la génératrice et atteindre 120V au niveau du bus continu à vitesse d'entraînement de synchronisme. Les courants et les tensions de la génératrice sont sinusoïdaux, avec une importante influence de la charge sur les performances de la génératrice.

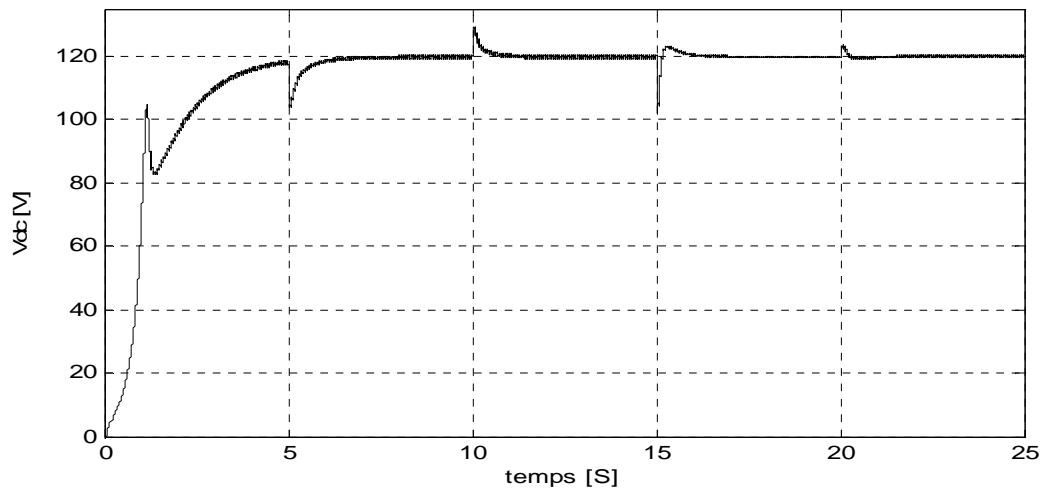


Figure III-15: La tension du bus continu

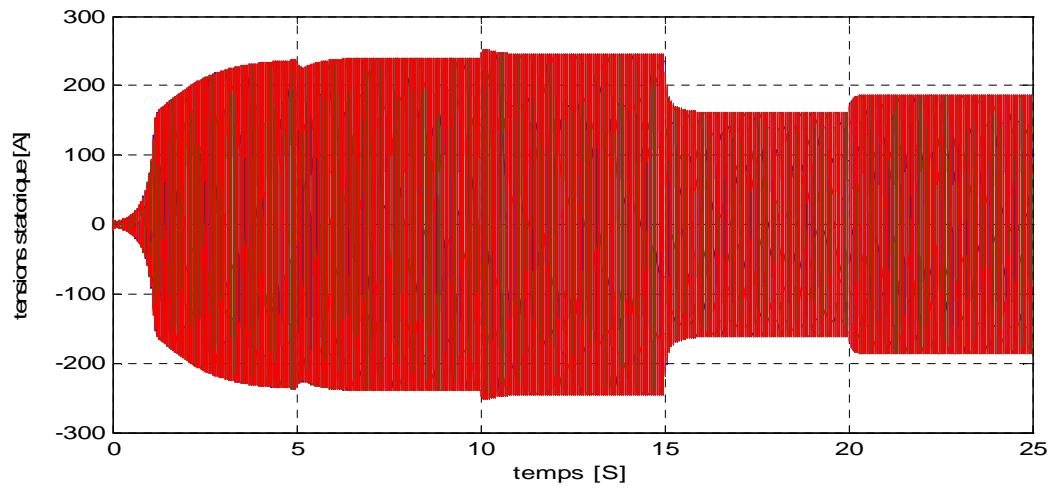


Figure III-16 Tensions statorique

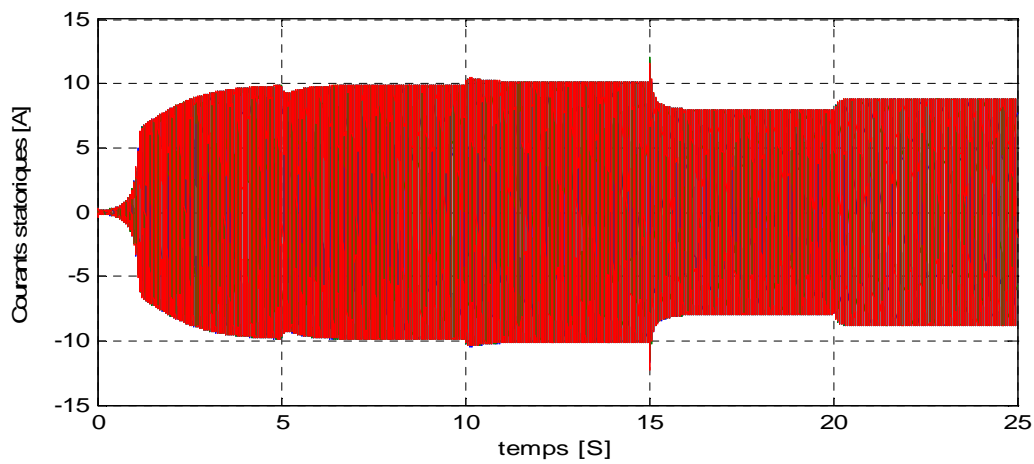


Figure III-17 Courants statorique

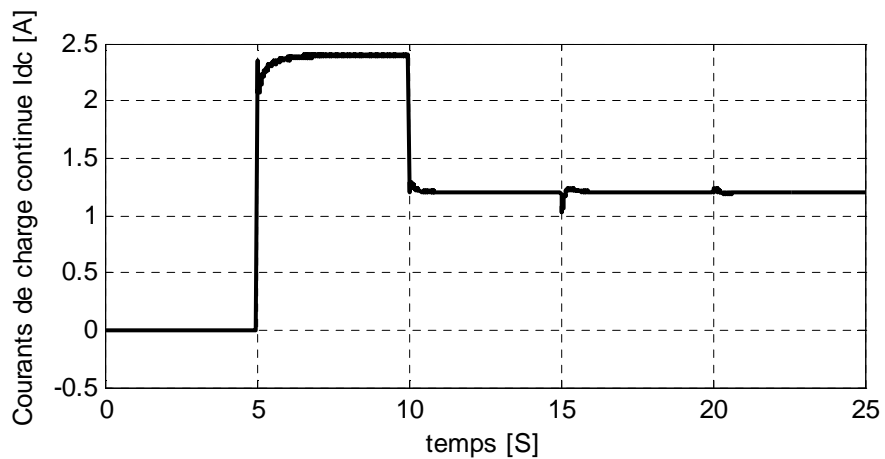


Figure III-18 Courants de charge Idc

La commande VOC est important pour contrôler de la tension continue à la sortie du redresseur à MLI, et l'influence de la charge résistive que ce soit alternative ou continue est important sur la régulation de la tension Vdc.

III-4 Conclusion :

Ce chapitre a été consacré les performances de la commande par orientation de la tension VOC. débitant sur un redresseur commandé à la GAS afin de maintenir la tension continue à la sortie du redresseur constante pour des variations de vitesse et/ou de charge.

Les résultats de simulation consacré que la technique de commande est bien adaptée aux problèmes de poursuite de la référence.

Chapitre IV

Modélisation et simulation de la chaine de production éolienne

Chapitre IV

Modélisation et simulation de la chaîne de production éolienne

IV-1 Introduction:

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique.

La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs en génie électrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie.

A fin de valider notre étude théorique de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, la réalisation pratique sinon la simulation du processus est nécessaire. Pour ce faire, on a besoin de modéliser la chaîne à étudiée. On s'intéresse dans ce chapitre à la modélisation de la chaîne de conversion globale.

IV-2 Modélisation de la chaîne de production éolienne:

Le générateur éolien, constitué d'une turbine à vitesse variable couplée à une génératrice asynchrone à cage auto excitée à travers un multiplicateur et raccordée à un bus continu par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance, est représenté sur la Figure (IV.1). La modélisation de la chaîne éolienne est développée par la suite.

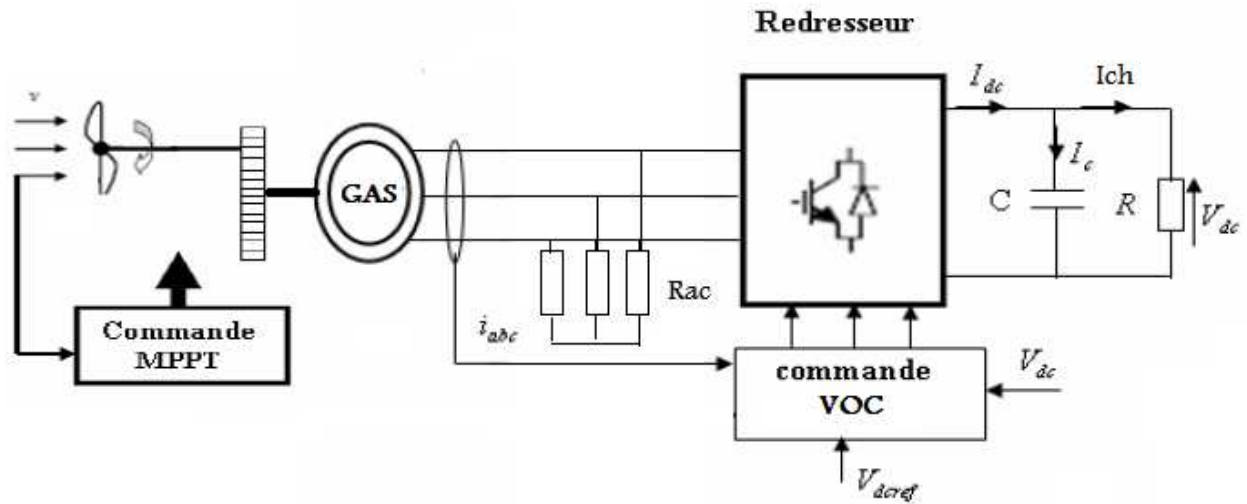


Figure IV.1 Structure du générateur éolien

IV-2-1 Modèle du vent:

La modélisation de l'éolienne exige la modélisation du vent, du comportement aérodynamique des pales, du générateur électrique, du convertisseur de puissance et du système de commande. Le vent est la variable d'entrée du système éolien. Sa mesure exacte à la hauteur du moyeu est assez complexe. Cependant, le vent peut être représenté par une grandeur aléatoire définie par des paramètres statistiques.

De nombreux travaux sur la modélisation du vent ont été réalisés. L'un des principes retenus consiste à générer l'allure temporelle du vent à partir d'un bruit blanc sur lequel est appliquée une fonction de transfert à déterminer. Les paramètres de cette fonction de transfert dépendent de grandeurs caractéristiques du site et de la nature de vent.

La Figure (IV.2) représente le vent simulé avec une vitesse moyenne de 10 m/s.

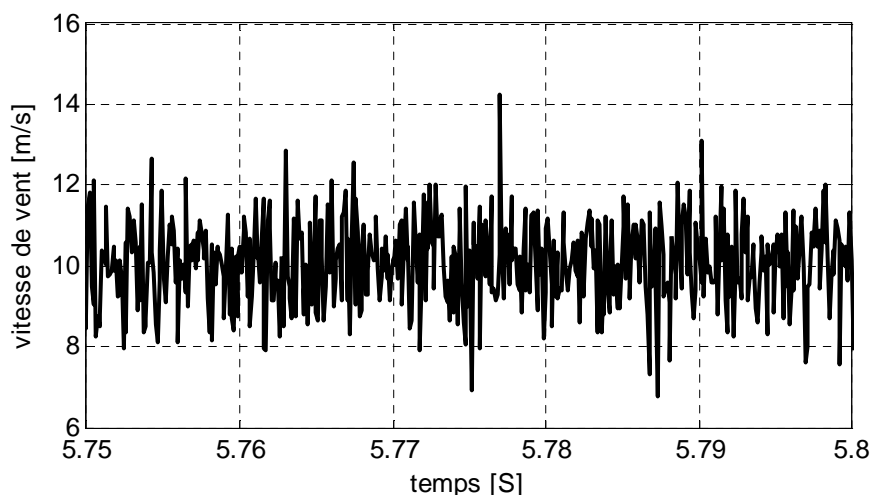


Figure IV.2 Simulation du profil de la vitesse du vent

IV-2-2 Modélisation de la turbine:

Les variables d'entrée et de sortie de la turbine éolienne peuvent se résumer comme suit :

- 1- La vitesse du vent qui détermine l'énergie primaire à l'admission de la turbine.
- 2- Les quantités spécifiques de la machine, résultants particulièrement de la géométrie du rotor et la surface balayée par les pales de la turbine.
- 3- La vitesse de la turbine, l'inclinaison de pales, et l'angle de calage.

Les quantités de sortie de la turbine sont la puissance ou le couple qui peuvent être contrôlées en variant les quantités d'entrée précédents.

La puissance mécanique disponible sur l'arbre de l'aérogénérateur s'exprime par l'équation suivant:

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \Pi R^2 V^3 \quad \text{IV. 1}$$

ρ : densité de l'air, environ 1,3 kg/m³

V : vitesse du vent en m/s

P_m : puissance en Watts

R : rayon du rotor Vitesse angulaire de rotation

C_p : Coefficient de puissance (en fonction de α et β).

IV-2-2-1 Le coefficient de vitesse réduite :

Le coefficient de vitesse réduite λ est un facteur spécifique des aérogénérateurs, il est défini comme le rapport de la vitesse tangentielle en bout de pales ΩR sur la vitesse instantanée du vent V , Figure (IV.3).

Alors :

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V} \quad \text{IV. 2}$$

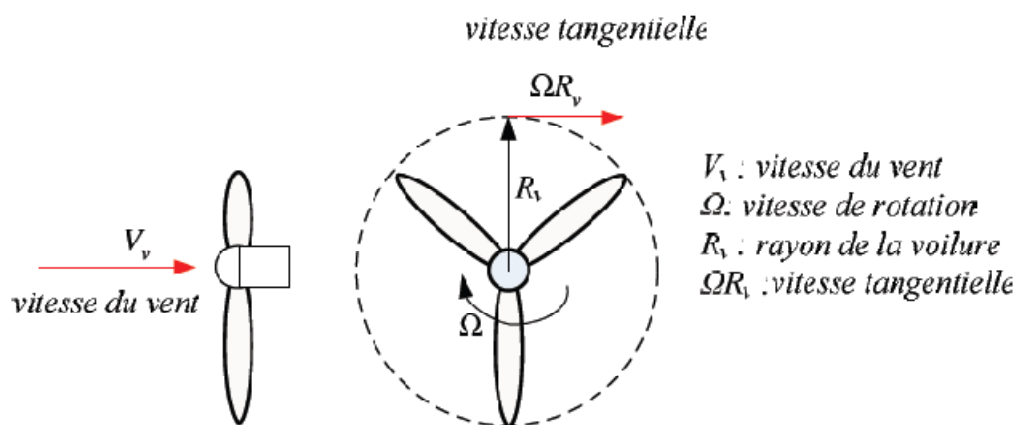


Figure IV.3: Vitesse du vent V et vitesse tangentielle

IV-2-2-2 Le coefficient de puissance :

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique, sa valeur dépend de celle de la vitesse relative de l'éolienne (λ) et de l'angle de calage β .

On définit le coefficient de puissance comme suit :

$$C_p = f(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) \exp \left(\frac{-C_5}{\lambda_i} \right) + C_6 \lambda \quad \text{IV. 3}$$

Avec:

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad \text{IV. 4}$$

Et $C_1 = 0.5176$, $C_2 = 116$, $C_3 = 0.4$, $C_4 = 5$, $C_5 = 21$, $C_6 = 0.0068$.

Les caractéristiques de C_p en fonction de λ pour différentes valeurs de l'angle de calage β sont données sur la Figure (IV.4).

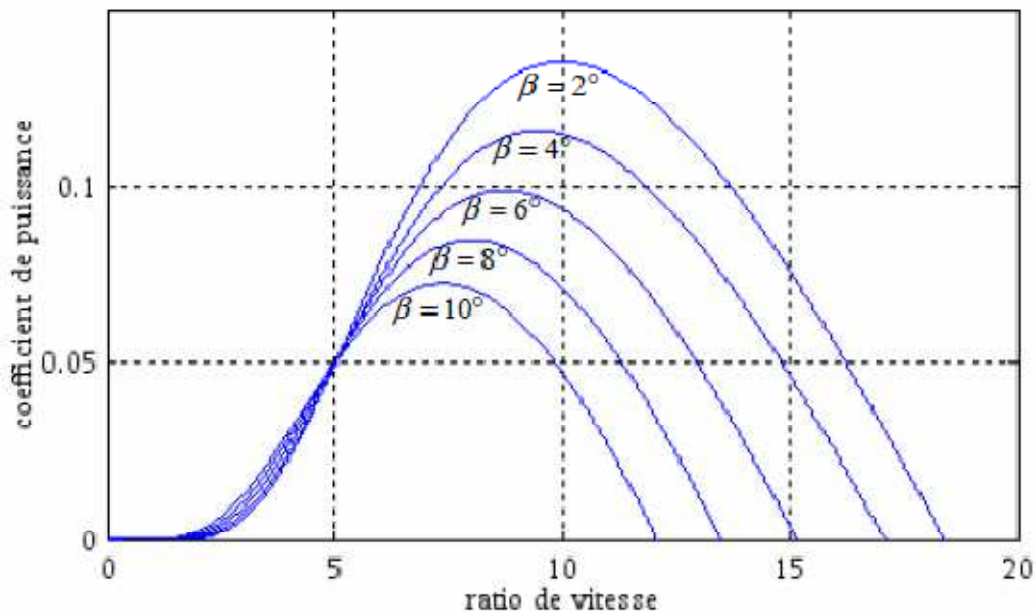


Figure IV.4: Coefficient de puissance C_p .

On remarque d'après la Figure (IV.4) que si, pour un angle constant β , on pouvait maintenir le coefficient de vitesse λ constant et égal à λ optimal à chaque instant, la puissance captée par l'éolienne serait maximale. Cette condition ne peut être vérifiée qu'avec l'utilisation de la vitesse variable. En effet, afin de maintenir $\lambda = \lambda_{\text{optimal}}$, il est nécessaire de faire varier la vitesse de rotation du générateur (et de l'éolienne) avec les variations de vitesse du vent.

IV-2-3 Modèle du multiplicateur:

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. L'élasticité et le frottement du multiplicateur sont négligés.

Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles. Le multiplicateur adapte la vitesse lente de la turbine à la vitesse de la génératrice. C_e multiplicateur est modélisé mathématiquement par l'équation suivante:

$$C_{turbine} = \frac{C_{génératrice}}{G} \quad \text{IV. 5}$$

Avec: G gain de multiplicateur.

Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport de multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur

$$\Omega_{génératrice} = \frac{\Omega_{turbine}}{G} \quad \text{IV. 6}$$

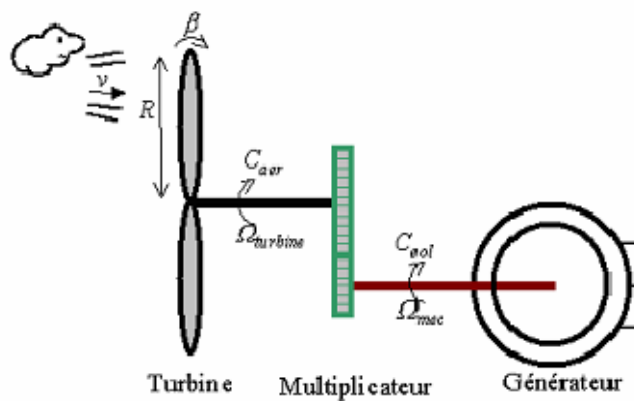


Figure IV.5: Schéma de la turbine éolienne.

IV-2-4 Modèle mécanique :

La partie mécanique de la turbine qui sera étudié comprend trois pales orientables et de longueur R . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse Ω_m qui est relié à un multiplicateur de gain G . L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total C_m appliqué au rotor :

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} = C_m \quad \text{IV. 9}$$

Où C_m est le couple mécanique résultant qui comprend prend en compte C_{em} , le couple électromagnétique produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vis} , et le couple issu du multiplicateur C_g .

$$C_g - C_{em} = C_m - C_{vis} \quad \text{IV. 10}$$

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f_v :

$$C_{vis} = f_v \cdot \Omega_m \quad \text{IV. 11}$$

Donc : $C_g - C_{em} = J \frac{d\Omega_m}{dt} + f_v \cdot \Omega_m$ IV. 12

Cette équation peut s'écrire dans le domaine de LAPLACE de la manière suivante :

$C_g - C_{em} = (J_p + f) \Omega_m$ IV. 13

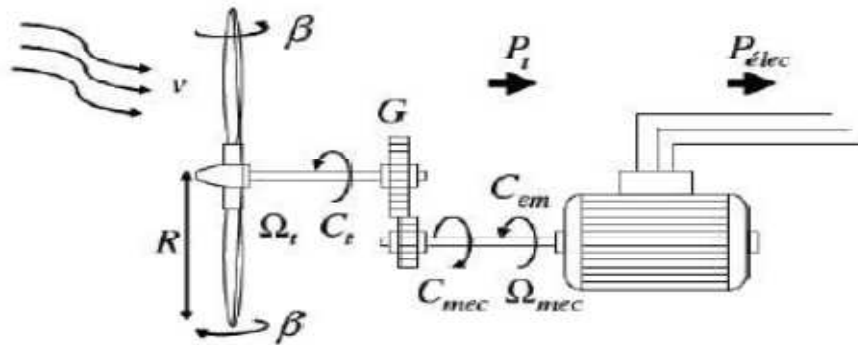


Figure IV.6: Configuration d'une éolienne.

IV-2-5 Modèle global du convertisseur éolien

La turbine génère un couple aérodynamique transmis au multiplicateur. Ce couple peut être calculé à partir des valeurs de la vitesse du vent et la vitesse de rotation de la turbine.

Le multiplicateur transforme la vitesse de la turbine et le couple aérodynamique respectivement en vitesse mécanique et couple du multiplicateur.

La vitesse du vent est considérée comme une perturbation Figure (IV.7).

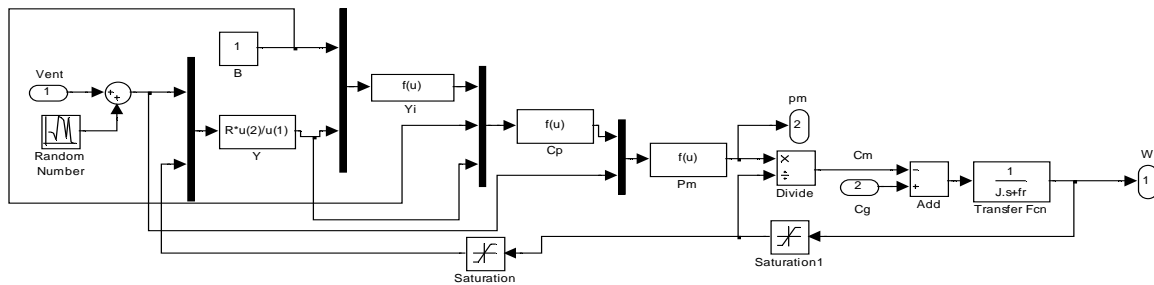


Figure IV.7: Schéma bloc du modèle du convertisseur éolien.

IV-3 Stratégie de maximisation de la puissance (MPPT: Maximal Power Point Tracking):

Un dispositif « MPPT », correspond à une stratégie de gestion permettant de suivre le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs éoliens permettant de maximiser l'efficacité énergétique du système à travers la variation de la vitesse du vent.

La Figure (IV.8) présente un réseau de caractéristiques de la puissance éolienne en fonction de la vitesse de rotation où la courbe noire représente les lieux de la puissance optimale.

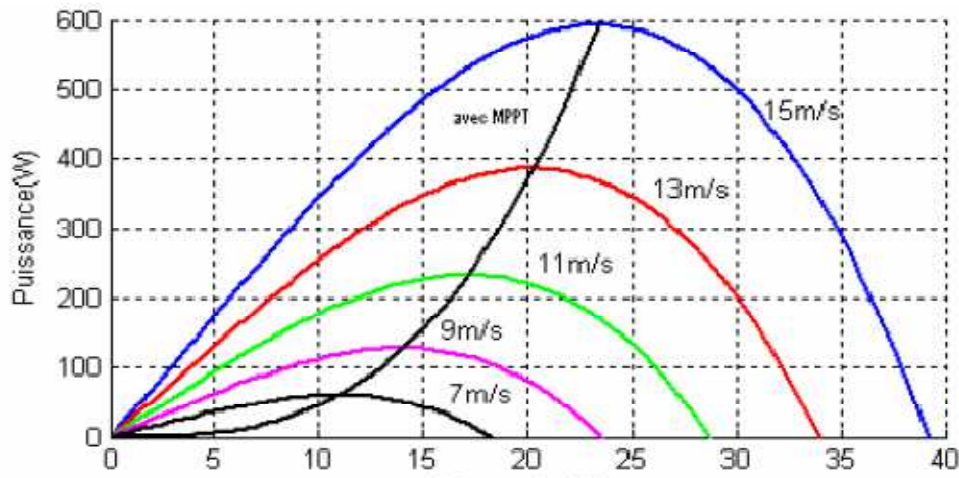


Figure IV. 8: Points de MPPT d'une éolienne tripale avec la vitesse de vent.

Le schéma bloc de la commande MPPT est représenté sur la Figure (IV.9)

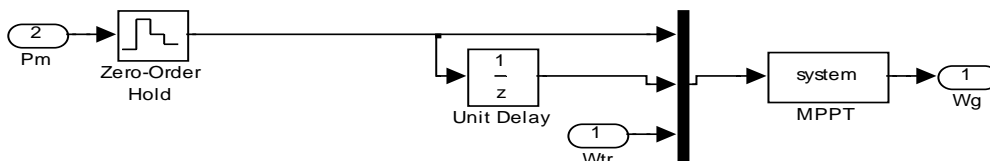


Figure IV. 9 : Schéma bloc de la commande MPPT.

On utilise un programme sous MATLAB, (s_function) pour l'intégration de cette technique :

```

x=u(3);
p0=u(2);
dw = 0.05;
p1 = u(1);
dp = p1-p0;
while (abs(dp)>0)
    if (dp)<0
        dw = -dw;
    end
    x = x+dw;
    if x<0.1
        x = 0.1;
    end
    p0 = p1;
    p1 = u(1);
    dp = p1-p0;
end
sys = x;

```

IV-4 Schéma globale de simulation:

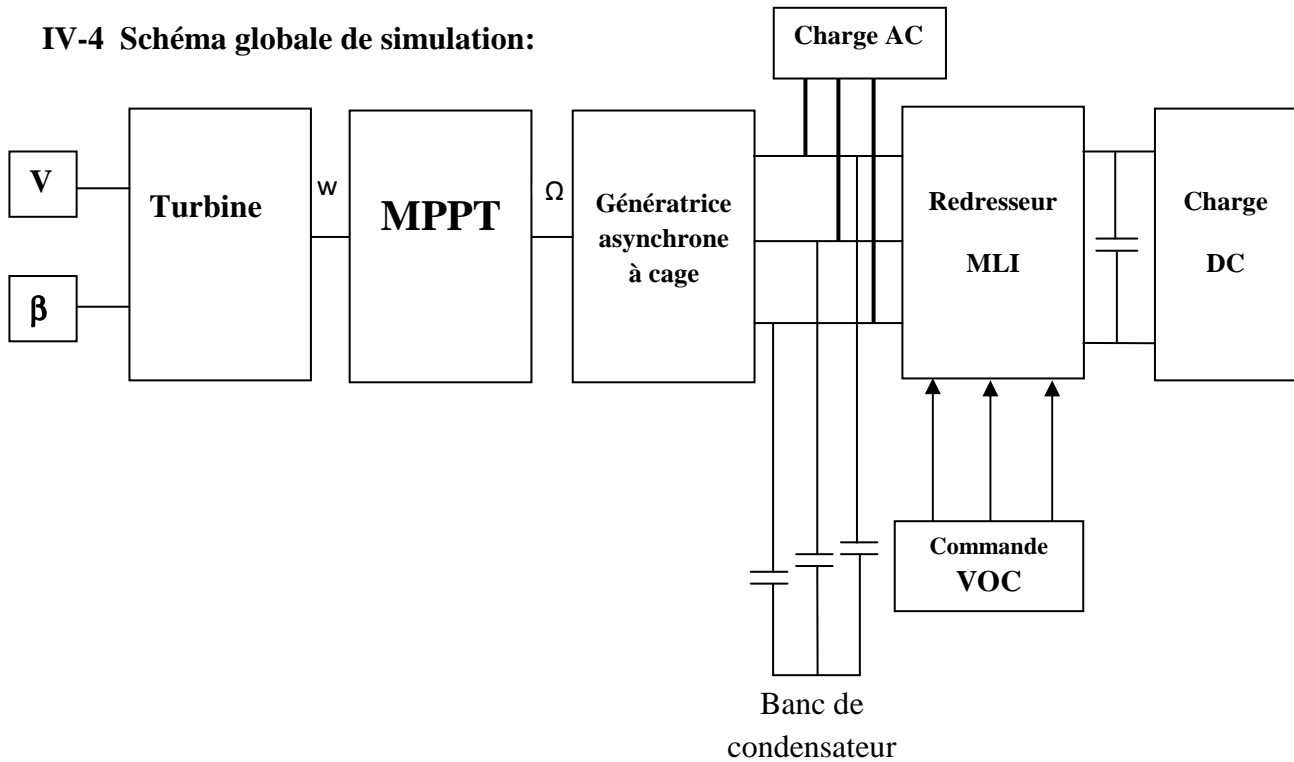


Figure IV. 10: Schéma globale de simulation.

IV-4-1 Résultats de simulation

Nous avons simulé le modèle de profil de vent considéré comme représenté dans la Figure (IV.2). Les résultats de simulation des Figures (IV.11 ,IV.12 ,IV.13) représentant respectivement la tension du bus continu, la vitesse de rotation de l'éolienne optimisée par le dispositif MPPT, et la puissance optimale correspond à la vitesse optimale avec l'insertion de deux types de charge (continu et alternative).

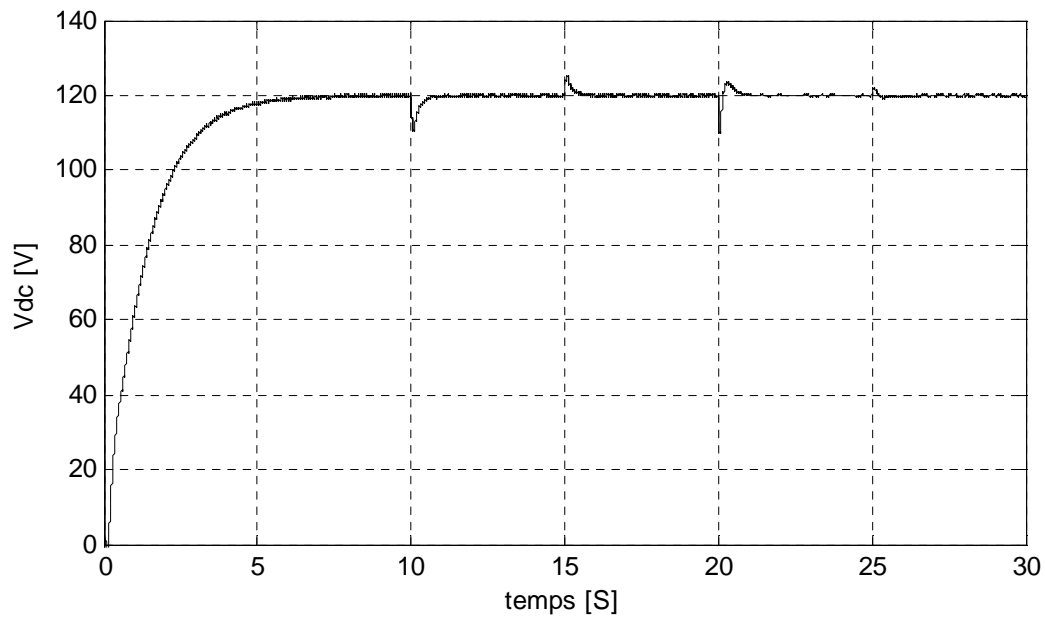


Figure IV. 11 : tension du bus continu Vdc

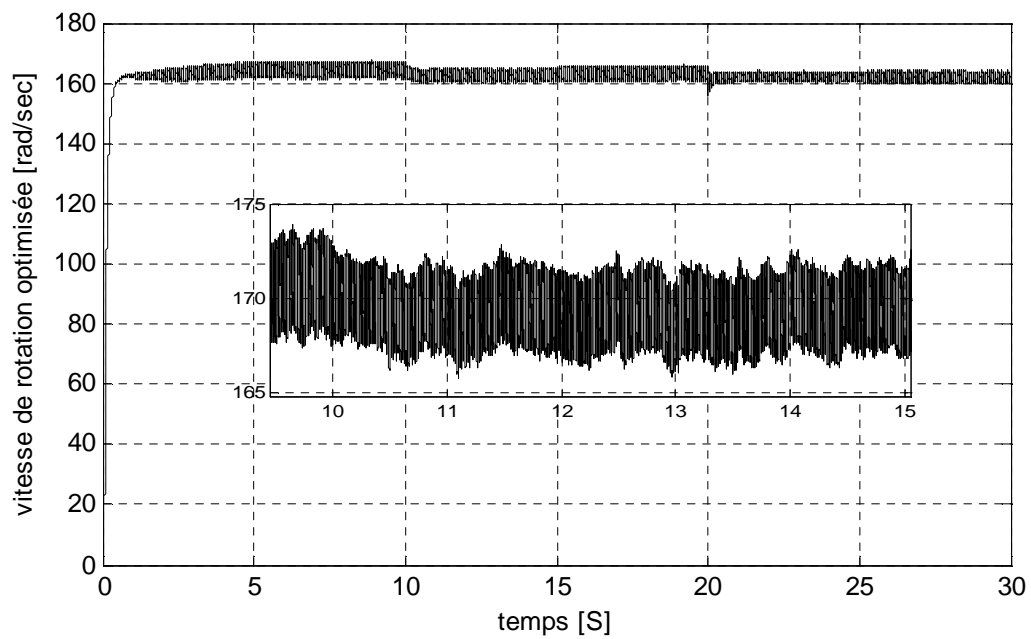


Figure IV. 12 : vitesse de rotation optimisée

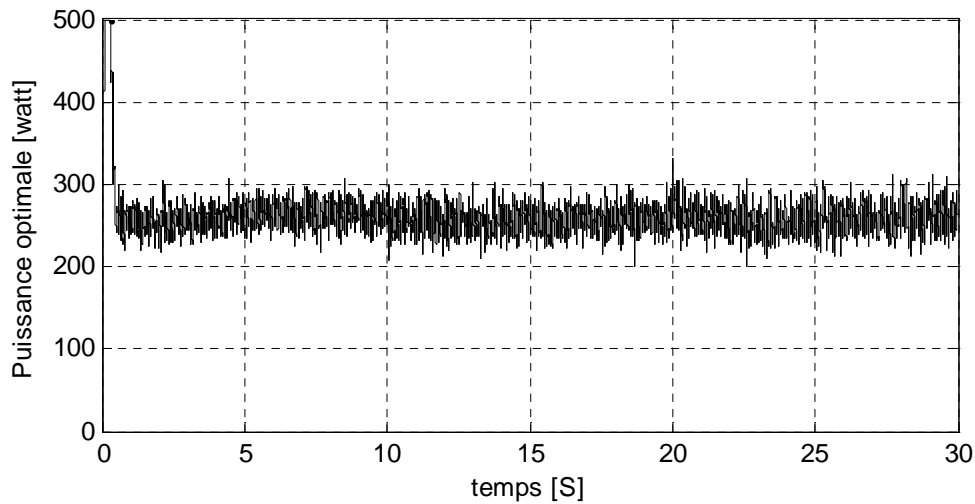


Figure IV.13 : Puissance optimale

Les Figures (IV.11, IV.12, IV.13) présentent une simulation pour une vitesse moyenne du vent 10m/s. La Figure (IV.12) montre l'évolution de la vitesse de rotation de la GAS qui est de 157 rad/s. La Figure (IV.13) présente l'évolution de la puissance qui atteint alors sa puissance nominale qui correspond à 250W avec les valeurs de base considérées.

IV-5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les modèles mathématiques des composantes du système de conversion d'énergie éolienne (modèles de la turbine, de la technique MPPT et du redresseur commandé par la technique MLI à hystérésis). La loi commande du système a été aussi détaillée. Les résultats des différentes simulations réalisées ont été commentés et ont permis de valider les modèles mathématiques du système éolien.

Conclusion générale

Conclusion générale:

Le travail présenté dans ce mémoire concerne un système de production décentralisé de l'énergie électrique capable d'un fonctionnement autonome dédié à un site isolé, qui est la génératrice asynchrone auto-excitée. Beaucoup d'aspects importants et intéressants sur cette génératrice ont été discutés et présentés.

Les problématiques abordées dans ce mémoire nous ont permis d'étudier le mode de fonctionnement de machines asynchrone utilisées dans le système éolien

Le premier chapitre rappelle les concepts fondamentaux de l'état de l'art de l'énergie éolienne en énergie électrique.

Nous avons développé dans le deuxième chapitre la modélisation de la génératrice asynchrone auto-excitée. Cette étude nous a permis de trouver les points critiques de l'auto-amorçage de la génératrice que ce soit les capacités d'excitation, la vitesse et la charge connectée à la machine.

L'inconvénient majeur de l'utilisation de la machine asynchrone auto-excitée dans un système éolien est que ces grandeurs statoriques sont directement influencées par la charge, la vitesse et les capacités d'excitation. Afin de résoudre ce problème, la commande vectorielle connectée au redresseur à MLI a été discutée dans le troisième chapitre. L'objectif de ce système de contrôle est de maintenir la tension du bus continu constante. Cette technique de commande a été étudiée à l'aide de simulations MATLAB/SIMULINK.

La quatrième étude menée dans ce rapport concerne la réalisation d'un simulateur de la chaîne de conversion éolienne par l'intermédiaire d'un modèle de turbine éolienne et d'une machine asynchrone auto-excitée. Le modèle de turbine utilisé étant simple et basé sur les équations décrites dans le chapitre VI.

Annexe:

Paramètre de la turbine:

Symbole	Description	Valeurs	Unités
R	La longueur de pale	2	m
J	L'inertie de la turbine	0.0343	kg.m ²
fr	Fretemon	0.000503	N.m.srd
λ	ratio	8.1	Deg
ρ	densite de l'air	1.225	kg.m ³
β	Butch	1.2	/
C1	Coefficient 1	0.5176	/
C2	Coefficient 2	116	/
C3	Coefficient 3	0.4	/
C4	Coefficient 4	5	/
C5	Coefficient 5	21	/
C6	Coefficient 6	0.0068	/

Paramètre de la GAS:

Symbole	Description	Valeurs	Unités
R _s	Résistance statorique	2.74	Ω
R _r	Résistance rotorique	1.66	Ω
L _s	Inductance statorique	0.19	H

Lr	Inductance rotorique	0.19	H
Lm	Inductance magnétique	0.18	H
L	Inductance totale	0.0297	H
$K\alpha$	Constant de l'axe α	8	/
$K\beta$	Constant de l'axe β	8	/
$V_{c\alpha 0}$	Tension initiale de condensateur de l'axe α	5	V
$V_{c\beta 0}$	Tension initiale de condensateur de l'axe β	5	V
P	Nombre de paire de pole	2	/

Paramètre de Redresseur MLI :

L	Inductance de filtre de lissage	3e-3	H
Rch	Résistance de charge de partie continue	120	Ω
r	Résistance de filtre de lissage	25	Ω
C	Condensateur	6000e-6	F

Bibliographie

- [1] F. Poitiers, "Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne , Machine asynchrone à cage autonome, -Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau", Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, France 2003.
- [2] N. Abu-Tabak, "Stabilité dynamique des systèmes électriques multimachines : modélisation, commande, observation et simulation", Thèse de Doctorat de l'Ecole, Centrale de Lyon, France 2008.
- [3] O. Gergaud, "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur", Thèse de doctorat de l'école normale supérieure de CACHAN, Décembre 2002.
- [4] J. Martin, "Energies éoliennes", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie énergétique ,pp. B 8 585 1- B 8 585 21.
- [5] Désiré Le GOURIERE, Energie éolienne, Théorie, Conception et calcul pratique désinstallations , édition Eyrolles, 1982.
- [6] Frédéric POITIERS, Etude et Commande de Générateurs Asynchrones pour l'utilisation de l'Energie Eolienne, Machine asynchrone à cage autonome ; Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau, Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 2003
- [7] Site Internet de l'Association Danoise de l'industrie éolienne, "<http://www.windpower.org/fr/core.htm>".
- [8] L. Khettache, " Etude et Commande d'un Système Eolien à Base d'une Machine Electrique Double Alimentée", Mémoire de Magister, Université de Batna, Algérie, 2007.
- [9] K. Idjdarene, D. Rekioua et D. Aouzellag – « Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion à énergie éolienne basée sur une génératrice asynchrone en fonctionnement autonome », 3rd Conference on Electrical
- [10] D. Rekioua, T. Rekioua, K. Idjdarene et A. Tounzi – « An approach for the modeling of an autonomous induction generator taking into account the saturation effect », International Journal of Emerging Electric Power Systems, vol. 4, Issue 1, December 2005, pp. 1-25.
- [11] R. Abdessemed et M. Kadjoudj, "Modélisation des machines électriques", Presses de l'université de Batna, Algérie 1997
- [12] D. Seyoum, "The dynamic analysis and control of a self-excited induction generator driven by a wind turbine", Thèse de Doctorat de l'Université de New South Wales, 2003.

- [13] S. BELAKEHAL ‘Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables’ Thèse de Doctorat en électrotechnique,
- [14] A.M.EL Refair,T.M. Jahns,<<Analysis of surface permanent Mangle Machines with Fractional slot concentrated windings>>,IEEE Trasaction on energy conversion 2006
- [15] S. El Aimani, ‘Modélisation de Différentes Technologies d’Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension’, Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 2004.
- [16] P. M. Leplat – « Modélisation de la génératrice asynchrone », Rapport de DEA, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 1994- 1995.
- [17] F. Poitiers – « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l’utilisation de l’énergie éolienne : Machine asynchrone à cage autonome, Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de doctorat, Université de Nantes, Nantes, France, 2003.
- [18] L. Leclercq – « Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d’assurer des services systèmes », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2004.
- [19] 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, Toulouse, France, 2005.
- [20] F. Poitiers – « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l’utilisation de l’énergie éolienne : Machine asynchrone à cage autonome, Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de doctorat, Université de Nantes, Nantes, France, 2003
- [21] A. Abdelli – « Optimisation multicritère d’une chine éolienne passive », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, 2007.
- [22] M. Kassa Idjdarene-<<Contribution à l’Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes >> , Thèse de doctorat, l’Université Abderrahmane MIRA – Béjaia (Algérie), 23 Mai 2010.
- [23] B. Robyns (responsable) et S. Labrique (réalisation), site: www.e-lee.net – « Composants classiques d’une éolienne », consulté juin 2009.
- [24] J. Lesenne, F. Notelet, G. Séguier – « Introduction à l’électrotechnique approfondie », Technique et Documentation, France, ISBN 2-85206-089-2, 1981.
- [25] A .Moussa siddo et I. Soumana Nouhou- « Etude du Générateur Asynchrone pour l’utilisation dans la production de l’énergie éolienne»,2007.
- [26] D-Hoan Tran-<< Conception Optimale Intégrée d’une chaîne éolienne « passive » : Analyse de robustesse, validation expérimentale», 27 septembre 2010.