

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



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

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : MACHINES ELECTRIQUES

Présenté par
Ghalia TOULAÏT

Thème

Etude d'un système de conversion de l'énergie éolienne à base de la machine synchrone

Mémoire soutenu publiquement le 28/09/2015 devant le jury composé de :

M R. MANSOURI

Professeur, UMMTO, Président

M S. HADDAD

Professeur, UMMTO, Rapporteur

M N. BENYAHIA

Maître de conférences classe B, UMMTO, Examineur

M M. MEKIOUS

Maître assistant classe A, UMMTO, Examineur

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon promoteur Mr S.Haddad , pour ces précieux conseils, son aide et encouragements durant toute la période du travail.

Mes remerciements s'adressent également à M^r R ROUAS et M^r M SIBRAHIM pour leurs aide et leurs grande patience et conseils.

Je tiens à remercier tous mes collègues et camarades qui ont participé de près ou de loin à réalisé ce travail.

DEDICACES

Je dédie ce travail à :

- Mon mari qui ma soutenu tous le long de ce parcours.
- Mes enfants (mohamed-aghiles-massinissa).
- Ma famille.
- Mes ami(es).

SOMMAIRE

Introduction générale	01
------------------------------------	----

Chapitre I : Généralités sur les systèmes éoliens.

I.1	Introduction.....	02
I.2	Principe de fonctionnement.....	02
I.3	Principaux composants d'une éolienne	02
I.4	Différents types d'éoliennes	04
I.4.1	Eoliennes à axe vertical	04
I.4.1.a	La traînée différentielle	05
I.4.1.b	La variation cyclique d'incidence	06
I.4.2	Eolienne à axe horizontal	07
I.5	Conversion énergie cinétique –mécanique	08
I.5.1	Description d'une pale éolienne	10
I.5.2	Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne.....	11
I.5.2.1	Le système « pitch »	12
I.5.2.2	Le système « stall »	13
I.5.2.3	Le système « stall actif ».....	14
I.6	Chaînes de conversion de l'énergie éolienne utilisant la machine synchrone.....	15
I.7	Conclusion.....	16

Chapitre II : Modélisation du moteur à courant continu et de l'alternateur

II.1	Introduction	17
II.2	Développement du modèle Matlab-Simulink d'un alternateur	17
II.2.1	Equations électriques dans les axes d et q	17
II.2.2	Equations magnétiques dans les axes d et q	17
II.2.3	Expression du couple électromagnétique	17
II.2.4	Développement du modèle Matlab-Simulink de l'alternateur	18
II.3	Développement du modèle Matlab-Simulink du moteur à courant continu.....	20
II.3.1	Equation électriques de l'inducteur	20

II.3.2	Equation électriques de l'induit	20
II.3.3	Expression du couple électromagnétique.....	20
II.4	Conclusion	21

Chapitre III : Identification des paramètres d'un alternateur et d'un moteur

à courant continu

III.1	Introduction	22
III.2	Identification des paramètres d'un alternateur triphasé, à rotor bobiné, à pôles saillants, sans enroulements amortisseurs.....	22
III.2.1	Mesure des résistances	22
III.2.2	Mesure des inductances.....	23
III.2.3	Mesure de l'inductance mutuelle entre le stator et le rotor	23
III.2.4	Mesure des inductances synchrones longitudinale et transversale	24
III.2.4.1	Méthode du faible glissement	24
III.2.4.2	Mesure de l'inductance synchrone longitudinale par l'essai en court-circuit...	24
III.2.5	Identification des inductances par la méthode des essais indiciels à l'arrêt	25
III.2.5.1	Identification de la résistance et de l'inductance propre de l'inducteur	25
III.2.5.1.1	Identification de la résistance de l'inducteur	25
III.2.5.1.2	Identification de l'inductance propre de l'inducteur	26
III.2.5.2	Identification de l'inductance de fuites totale entre l'induit et l'inducteur ramenée à l'inducteur.....	26
III.3	Identification des paramètres d'un moteur à courant continu.....	28
III.3.1	Modèle du moteur à courant continu.....	28
III.3.2	Méthodes d'identification des paramètres du moteur à courant continu	28
III.3.2.1	Identification des résistances et des inductances propres du moteur à courant Continu.....	28
III.3.2.2	Identification de l'inductance mutuelle entre stator et rotor du moteur à courant continu	29

III.4	Identification des paramètres mécaniques.....	29
III.4.1	Identification du couple statique C_{st} et du coefficient de frottements k_f	29
III.4.2	Identification de l'inertie des masses tournantes	30
III.4.2.1	Première méthode	30
III.4.2.2	Deuxième méthode	31
III.4.2.2.1	Solution théorique	31
III.4.2.3	Troisième méthode.....	32
III.5	Conclusion.....	32
Chapitre IV : Etude de l'ensemble MCC-Alternateur		
IV.1	Introduction.....	33
IV.2	Paramètres de simulation	33
IV.3	Résultats de simulation et interprétations.....	34
IV.3.1	Fonctionnement à vide.....	34
IV.3.2	Fonctionnement en charge.....	35
IV.3.3	Influence de la vitesse sur l'ensemble MCC_ALT.....	35
IV.4	Interprétation des résultats.....	36
IV.5	Conclusion	36
Chapitre V : Etude de l'ensemble MCC-ALT-Régulateur de tension		
V.1	Introduction	37
V.2	Régulation de la tension de sortie de l'alternateur	37
V.2.1	Principe de la régulation et calcul du régulateur de tension.....	37
V.2.2	Calcul du régulateur de tension de l'alternateur.....	37
V.2.3	Simulation de l'alternateur muni du régulateur de tension.....	39
V.2.3.1	Résultats de Simulation et interprétation.....	40
V.2.3.1.1	Réponse à un profil de tension (suivi de consigne).....	41
V.2.3.1.2	Réponse à une perturbation de la vitesse et de la charge (rejet de perturbation)	41

V.3 Conclusion	42
Conclusion générale.....	43
Annexe A : Identification des paramètres du moteur à courant continu.....	45
Annexe B : Identification des paramètres de l'alternateur	49
Annexe C : Identification des paramètres mécaniques de l'ensemble Moteur à courant continu – Alternateur.....	53

Introduction Générale

Introduction générale :

La recherche de systèmes de conversion des énergies renouvelables est le thème d'actualité par excellence ces dernières années. En effet face à la perspective d'épuisement des énergies fossiles, le monde industriel et de la recherche se divise en deux grandes écoles : la première propose d'orienter la recherche vers le tout renouvelable (énergie par essence inépuisable), tandis que la seconde prône l'utilisation optimale des systèmes existants et maîtrisés de production d'énergie. Le travail que nous nous proposons de développer se situe parmi la première école et se fixe comme objectif l'étude d'un système de conversion de l'énergie du vent en énergie électrique en utilisant la machine synchrone fonctionnant en génératrice. Plusieurs systèmes utilisant des génératrices synchrones existent dans la littérature, dépendant des modes de fonctionnement choisis « dictés surtout par la puissance installée » (fonctionnement en site isolé ou connecté au réseau électrique, fonctionnement à vitesse fixe ou variable).

Dans le cadre de ce mémoire de Master, nous nous intéressons à un alternateur entraîné par une turbine éolienne et fonctionnant en site isolé. L'alternateur est à deux paires de pôles, à rotor bobiné, à pôles lisses et sans enroulements amortisseurs. Il sera entraîné par une turbine éolienne émulée par un moteur à courant continu. L'alternateur et le moteur à courant continu sont disponibles au laboratoire, ils de faible puissance (175W) et nous les avons choisis ainsi parce qu'ils sont destinés à faire partie d'un système hybride de conversion d'énergie de type renouvelable. Ce système hybride est composé d'un panneau photovoltaïque d'une puissance de 100W, muni de son système de régulation (MPPT) et d'un ensemble moteur à courant continu-alternateur-redresseur à diodes-hacheur muni d'un régulateur de tension. Cet ensemble débite sur un bus continu qui alimente directement des charges en courant continu ou via un onduleur des charges à courant alternatif.

Nous nous occuperons uniquement de la partie utilisant un alternateur pour laquelle nous allons effectuer un travail de modélisation, d'identification et de simulation. Ce travail précède d'autres travaux de réalisation expérimentale.

C'est ainsi que nous avons subdivisé notre travail en cinq chapitres dont les contenus se présentent comme suit :

- Le premier chapitre présente des généralités sur les systèmes de conversion de l'énergie éolienne.
- Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation du moteur à courant continu et de l'alternateur.
- Le troisième chapitre traite de l'identification des paramètres du moteur à courant continu et de ceux de l'alternateur
- Le quatrième chapitre est dédié à l'étude par simulation du comportement à vide et en charge de l'ensemble moteur à courant continu – alternateur dépourvu de régulateur de tension.
- Dans le cinquième et dernier chapitre, un régulateur de tension est adjoint au système étudié dans le chapitre précédent. Nous y étudierons les performances de ce régulateur vis-à-vis du suivi de consigne et de rejet de perturbation.

Le mémoire est clôturé par une conclusion générale, regroupant les principaux résultats obtenus et complété par trois annexes contenant les détails concernant l'identification.

Chapitre I

I.1 Introduction

Ce chapitre présente les principales composantes d'un générateur éolien. Il débute par les principes de base de l'interaction entre les pales de la turbine éolienne et le vent, pour en déduire les expressions simplifiées de la puissance convertie par la turbine. Les différentes techniques de limitation ou de contrôle de cette puissance sont ensuite brièvement exposées. Les différentes structures d'aérogénérateurs sont ensuite présentées, il s'agit des générateurs associés ou non à des convertisseurs statiques.

I.2 Principe de fonctionnement :

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

*Au niveau de la *turbine (rotor)*, qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.

*Au niveau de la *génératrice*, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique. [1]

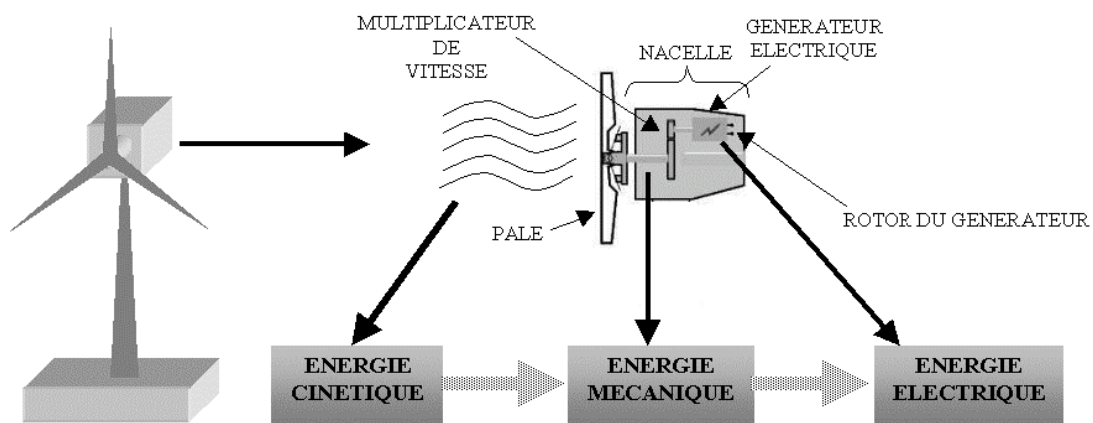


Figure I-1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

I.3. Principaux composants d'une éolienne :

Une éolienne est composée de plusieurs éléments présentés sur la Figure (I-2).

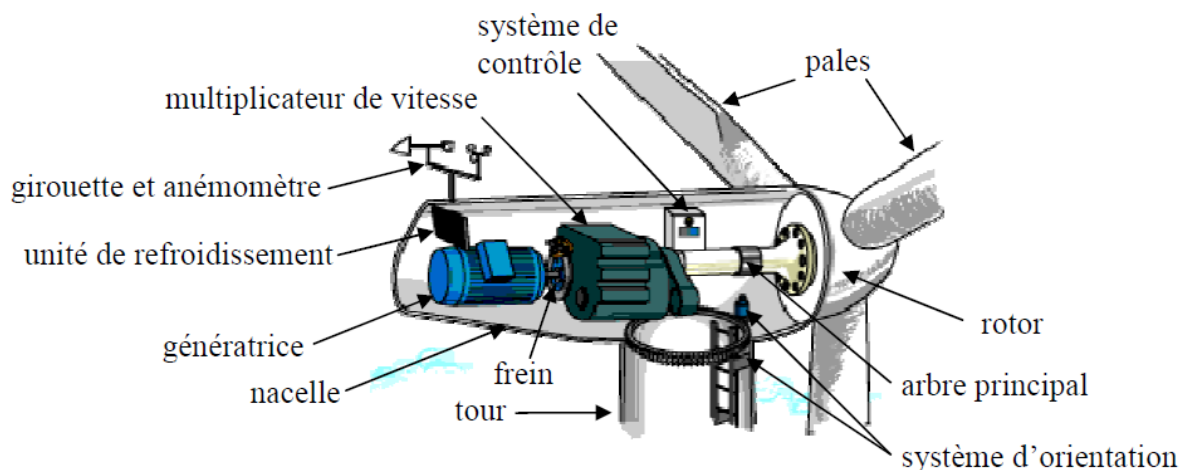


Figure I-2 : Principaux composants d'une éolienne

1. Le **mât (tour)**, généralement en métal, supporte l'ensemble des équipements permettant de produire l'électricité (nacelle plus rotor). Il est fixé sur une fondation implantée dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne. Le mât des éoliennes atteint aujourd'hui 80 m de haut pour les plus puissantes (exceptionnellement jusqu'à 100 m). Si les éoliennes sont-elles si haut perchées, c'est parce que le vent souffle plus fort à quelques dizaines de mètres de hauteur, où il n'est pas perturbé par l'effet des obstacles : relief, arbres, maisons..., et la puissance fournie par une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. La tour doit être suffisamment solide pour supporter non seulement la nacelle et le rotor, mais aussi les charges puissantes provoquées par le vent : d'une part la puissance exercée par le vent directement sur la tour, d'autre part la puissance transmise par le rotor. [2]

2. Un **rotor**, composé de plusieurs pales (en général 3) et du nez de l'éolienne (moyeu). Les pâles sont faites de bois ou de fibres de verre, leur rayon peut atteindre 75 m. La puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pâles (un cercle), donc au carré de son diamètre rotor. [2]

Le rotor est relié à la nacelle par le moyeu, Elle transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

3. Une **nacelle** montée au sommet du mât et abritant les composants mécaniques et pneumatiques et certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine. Le transport de l'électricité produite dans la nacelle

jusqu'au sol est assuré par des câbles électriques descendant à l'intérieur du mât de l'éolienne. [2]

4. Un **arbre principal** qui tourne lentement et transmet une très grande force de rotation au multiplicateur.

5. Le **multiplicateur de vitesse** constitué d'un grand nombre de roues dentées et placées dans un engrenage. Celui-ci transforme la force lente de l'arbre principal en rotation rapide pour la génératrice.

6. Un **frein** mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.

7. La **génératrice** qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

8. Une **girouette** qui informe le système de contrôle de la direction du vent.

9. L'**anémomètre** qui mesure la vitesse du vent et informe le système de commande quand le vent souffle assez fort pour produire de l'électricité de manière efficace.

10. Un **système de contrôle** chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble « rotor plus nacelle » face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par l'anémomètre (vitesse du vent) et la girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle. [2]

11. Une **unité de refroidissement** qui fonctionne comme un ventilateur ou un radiateur d'eau ou d'huile.

12. Une **fondation** pour empêcher l'éolienne de basculer par grands vents.

I.4 Différents types d'éoliennes :

I.4.1. Eoliennes à axe vertical :

Elles ont été les premières structures développées pour la production de l'énergie électrique, elles sont très peu mises en œuvre de nos jours car elles sont moins performantes que celles à axe horizontal. Leurs organes de commande et le générateur se situent au niveau du sol donc facilement accessibles. Il y a symétrie de révolution et le vent peut provenir de toutes les directions sans avoir à orienter le rotor, cependant elles ne peuvent pas démarrer automatiquement il faut les lancer dès l'apparition d'un vent suffisamment fort pour permettre la production. [3]

Elles ont une emprise au sol plus importante que les éoliennes à tour car elles sont haubanées sur de grande distance et les câbles des haubans doivent passer au dessus des pales cela présente un inconvénient majeur pour une implantation sur un site agricole. La conception verticale impose que les éoliennes fonctionnent avec le vent proche du sol, moins fort qu'en hauteur, et en raison de leur petite taille, l'énergie produite reste faible. Ces inconvénients alliés à la faible efficacité de la conversion d'énergie ont limité le développement de ces éoliennes laissant place aux aérogénérateurs à axe horizontal. [3]



Rotor de Savonius



Rotor de Darrieus

Figure I-3 : Eoliennes à axe vertical

Deux principes différents sont utilisés pour ce type d'éoliennes à savoir la traînée différentielle ou la variation cyclique d'incidence.

I.4.1.a. La traînée différentielle :

Le fonctionnement de ce type de machines est basé sur : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble, et la circulation de l'air rendue possible entre les deux demi-cylindres augmente le couple moteur, l'illustration de ce genre d'éolienne est le rotor de Savonius (un ingénieur finlandais qui l'a breveté en 1925). [4]

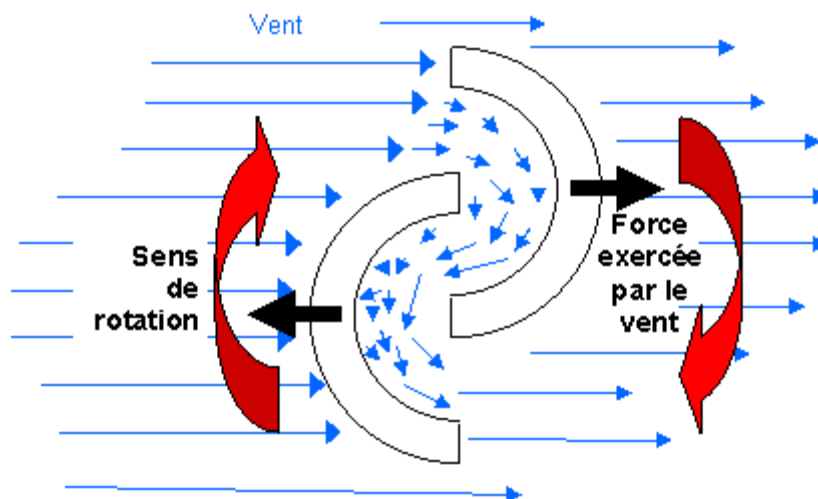
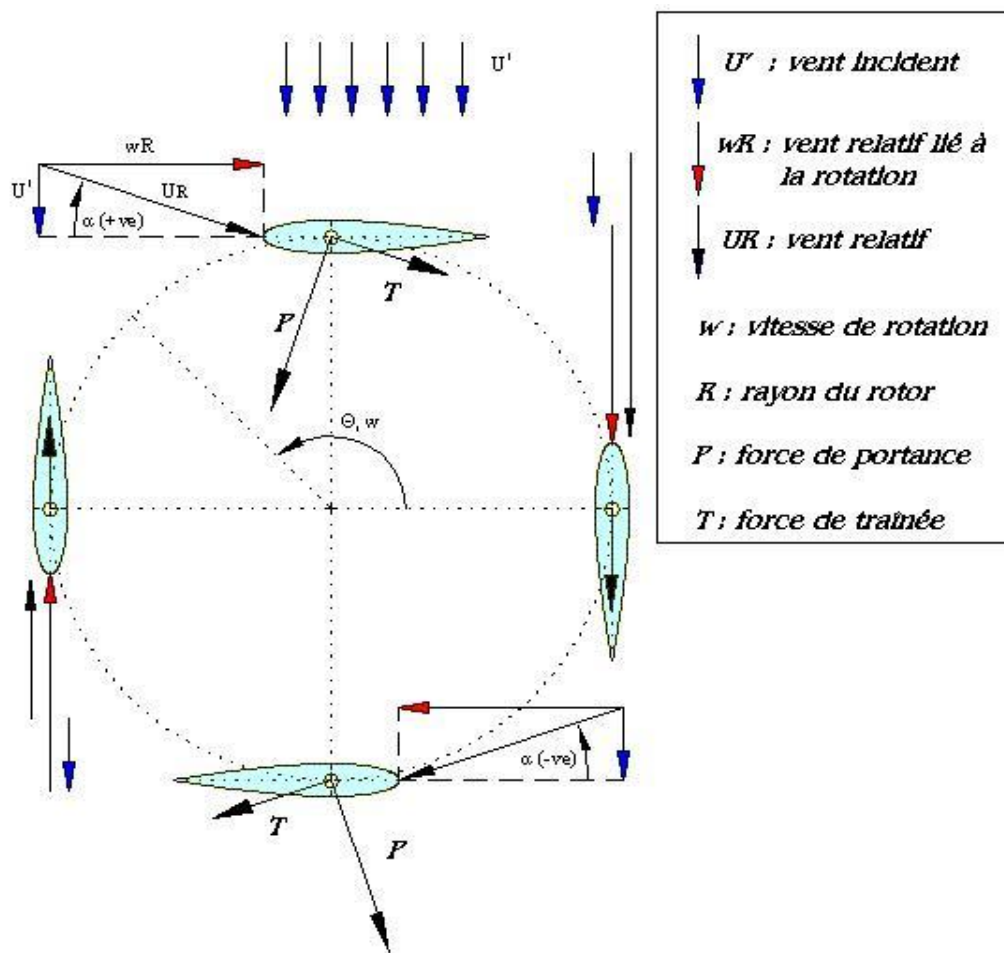


Figure I-4 : Principe de fonctionnement d'un rotor Savonius (trainée différentielle)

I.4.1.b. La variation cyclique d'incidence :

Le fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces d'intensité et de direction variable. La combinaison de ces forces génère alors un couple moteur faisant tourner le dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent, cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur). Ce modèle a été breveté par l'ingénieur français Georges Darrieus en 1931, elle se caractérise avec ses 2 ou 3 pales en forme de C. [4]



**Figure I-5: Principe de fonctionnement du rotor Darrieus
(variation cyclique d'incidence)**

I.4.2. Eolienne à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent, leur emprise au sol est très faible et elles captent le vent en hauteur, elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. La portance de ces ailes placées dans le vent sert à générer un couple moteur entraînant la rotation, le nombre de pales utilisés est de 1 à 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Elles représentent un coût moins important que celle à axe vertical et sont moins exposées aux contraintes mécaniques, de plus la position en hauteur privilégie l'efficacité. [5]

Les plus grandes éoliennes mesurent jusqu'à 180m en bout de pale avec un moyeu à 120m pour une puissance de 6MW. Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront aux cas des éoliennes à axe horizontal.



Eolienne tripôle



Eolienne bipôle

Figure I-6 : Eolienne à axe horizontal

I.5 Conversion énergie cinétique –mécanique :

L'énergie éolienne provient de l'énergie cinétique du vent. Si on considère une masse d'air, m (kg), qui se déplace avec la vitesse v (m/s), l'énergie cinétique de cette masse est : [6]

$$E_c = \frac{1}{2} . m . v^2 \quad (I.1)$$

La masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface A , en une seconde est: [6]

$$m = \rho . A . v \quad (I.2)$$

Si pendant une unité de temps, cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'une hélice qui balaie une surface A (m^2), située perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, la puissance instantanée fournie serait alors : [6]

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

P_v : puissance théorique disponible dans le vent.

ρ : masse volumique de l'air.

Cependant on ne peut pas extraire la totalité de la puissance. On introduit donc, le coefficient de puissance du générateur éolien par la relation : [6]

$$C_p = \frac{P_e}{P_v} \quad (\text{I.4})$$

P_e : puissance extraite du vent.

Ce coefficient caractérise l'aptitude du générateur éolien à capter l'énergie éolienne. La puissance correspondante est donc : [6]

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3 \quad (\text{I.5})$$

R (m) : Rayon de la turbine.

La figure ci-dessous présente une classification des turbines éoliennes selon leur puissance délivrée :

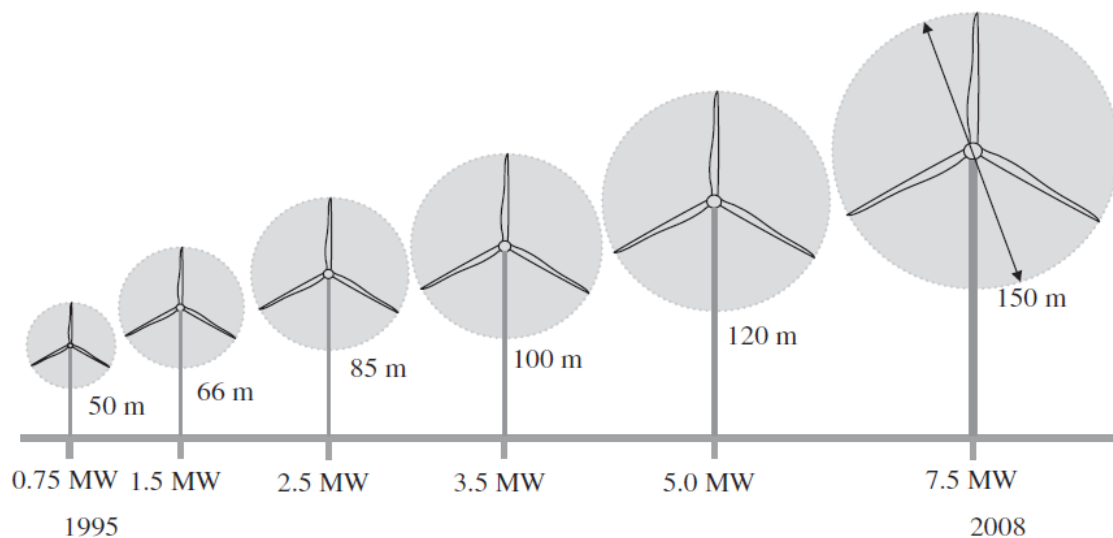


Figure I-7 : Evolution des turbines éoliennes selon leurs dimensions [7]

La valeur du coefficient de puissance C_p va dépendre de la vitesse de rotation de la turbine (qui peut s'exprimer en fonction de la vitesse spécifique λ) et de l'angle d'inclinaison des pâles β . [6]

$$C_p = C_p(\lambda, \beta) \quad (\text{I.6})$$

Avec :

$$\lambda = \frac{R.\Omega}{v} \quad (\text{I.7})$$

Où $R.\Omega$ est la vitesse linéaire périphérique en bout de pâles de l'hélice.

I.5.1 Description d'une pale éolienne :

Les pâles de la turbine sont aujourd'hui faites de matériaux composites à la fois légers et assurant une rigidité et une résistance suffisantes : polyester renforcé de fibre de verre et/ou fibre de carbone. Les éoliennes modernes ont deux ou trois pâles. Leur longueur atteinte actuellement entre 30 et 75 mètres, soit un diamètre du rotor compris entre 60 et 150 mètres. La puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pales (un cercle), donc au carré de son diamètre rotor [2]. Les pales ont un profil aérodynamique présenté sur le schéma de la Figure I-8.

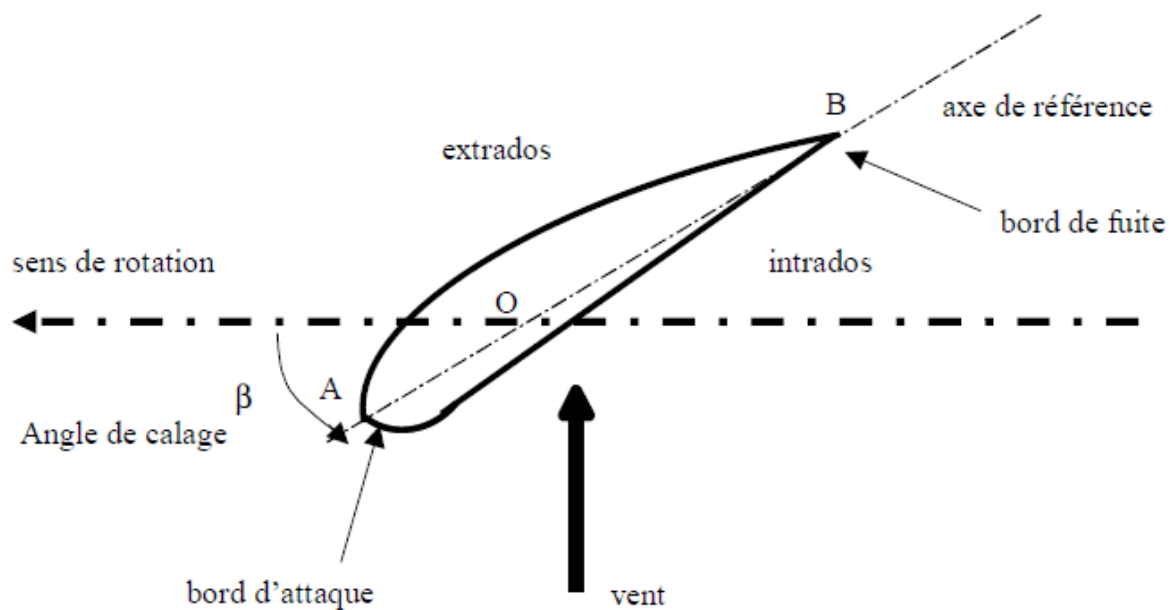


Figure I-8 : Éléments caractéristiques d'une pale

On remarque plus particulièrement les éléments suivants :

- extrados : dessus de la pale.
- intrados : dessous de la pale.
- corde : longueur l du profil du bord d'attaque au bord de fuite.
- angle de calage β (inclinaison de l'axe de référence par rapport au plan de rotation). [1]

I.5.2 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne :

L'objectif de cette régulation est double, d'une part protéger l'éolienne par vent fort et d'autre part délimiter la puissance. En effet, la turbine éolienne est dimensionnée pour fournir une puissance nominale P_n à une vitesse de vent nominale v_n , au delà de cette vitesse les paramètres de la turbine doivent évoluer afin de fournir la puissance nominale et de ne pas produire au delà d'une vitesse maximale v_m qui pourrait endommager la turbine.

On peut définir quatre zones de fonctionnement :

- **la zone I** : le vent n'est pas suffisant pour faire fonctionner la turbine.
- **la zone II** : la puissance fournie par l'arbre va dépendre de la vitesse du vent.
- **la zone III** : la vitesse de rotation est maintenue constante par régulation de la vitesse et la puissance P fournie reste égale à P_n .
- **la zone IV** : la vitesse du vent est trop importante, pour ne pas détériorer le générateur éolien, les pales de la turbine sont mises en drapeaux ($\beta=90^\circ$). [6]

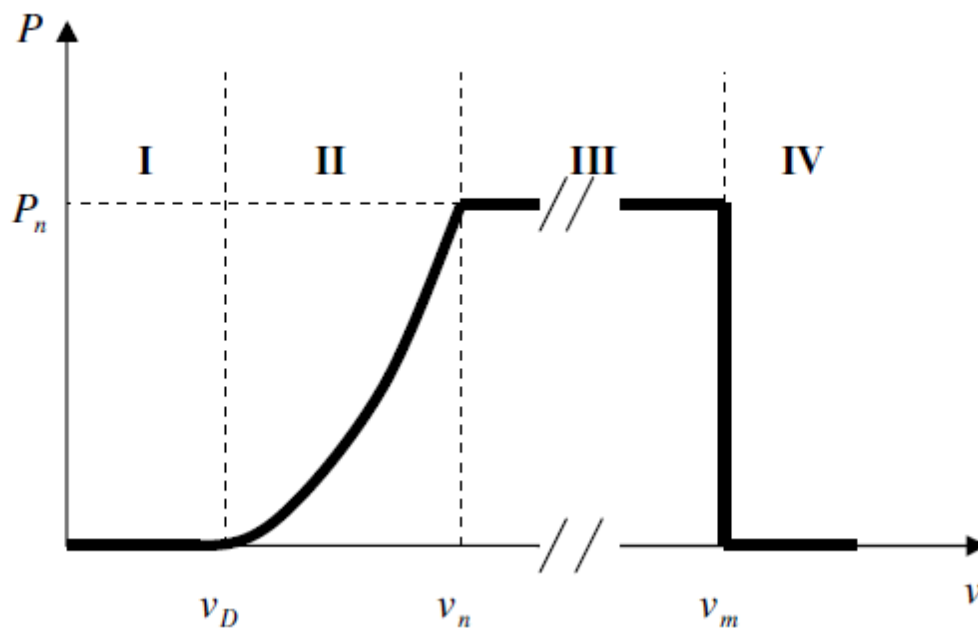


Fig 1-9 : Zone de fonctionnement d'une éolienne

Ils existent plusieurs systèmes de régulation de vitesse pour la turbine, on va s'intéresser pour notre part aux systèmes les plus couramment utilisés à savoir :

- Le système « pitch » ou « pas de calage variable ».
- Le système « stall » ou « à décrochage aérodynamique ».
- Le système « stall actif ». [6]

I.5.3.1. Le système « pitch » :

La caractéristique $C_p(\lambda)$ est directement liée à l'aérodynamisme des pâles. La Figure (I-10) montre l'évolution de la caractéristique d'une éolienne en fonction de β . Plus l'angle de calage sera important, moins la turbine captera l'énergie cinétique du vent. Les pâles sont face au vent pour des vents faibles afin d'en extraire le maximum de puissance puis lorsque le vent nominal v_n est atteint, elles s'inclinent pour atteindre la position « drapeau » à la vitesse de vent maximale. [6]

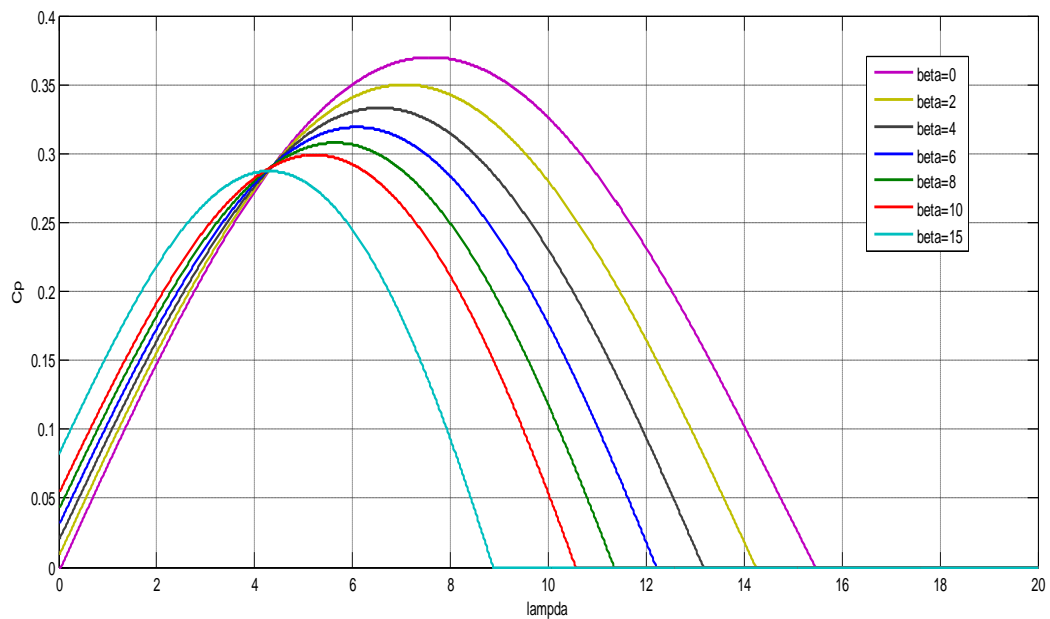


Figure I-10 : Influence de l'angle de calage sur le coefficient de couple

Le système « pitch » a pour avantage de permettre un contrôle actif de la puissance sous une large plage de vitesse du vent. L'angle de calage des pales peut être déterminé afin d'optimiser la conversion d'énergie quand le vent évolue entre v_D et v_n . Le contrôle de l'angle de calage permet également de réguler la vitesse lorsque $v > v_n$ et le démarrage à vitesse de vent faible est facilité par le changement de l'angle de calage. [6]

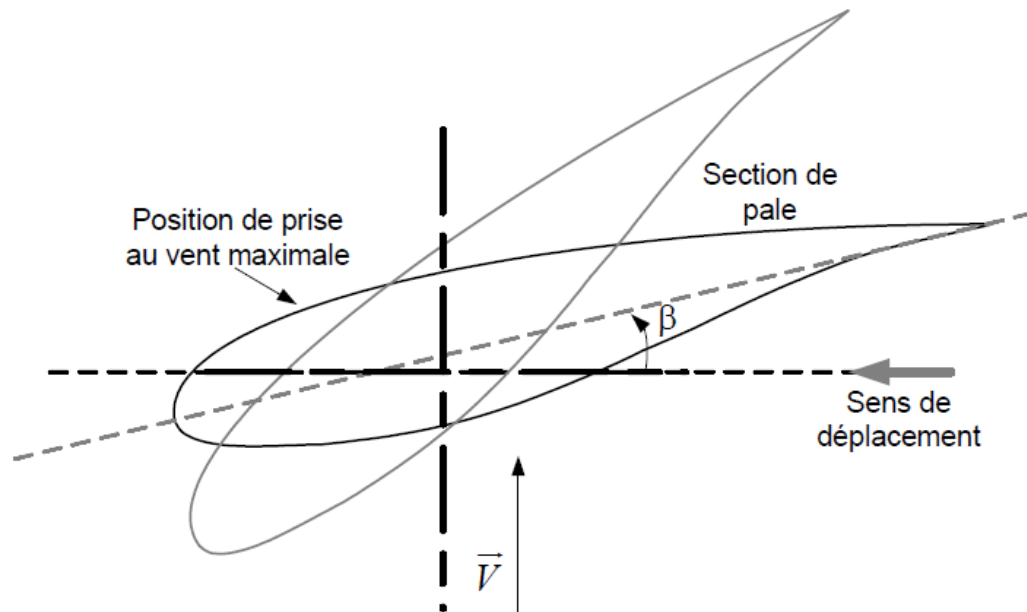


Figure I-11 : Variation de l'angle de calage d'une pôle

I.5.3.2. Le système « stall » :

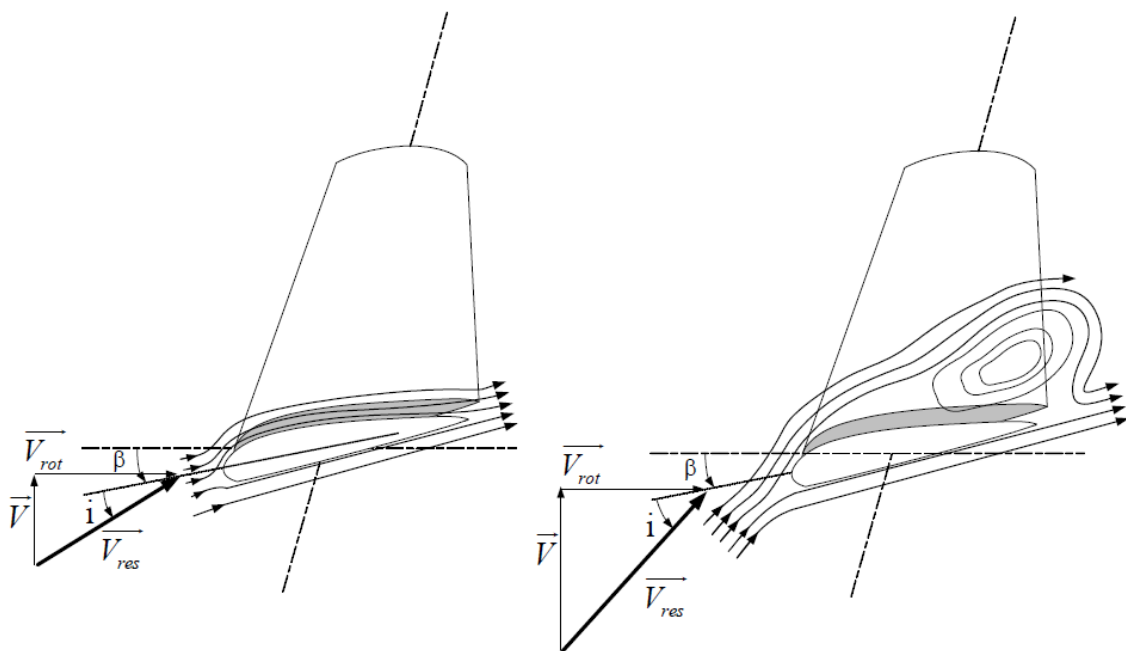


Figure I-12 : Flux d'air sur un profil de pale " stall "

Le système « stall » est beaucoup moins lourd et moins coûteux que le système décrit précédemment. En effet, c'est le profil des pâles établis lors de la construction qui fixe les caractéristiques aérodynamiques. Les pâles sont conçues avec un profil, qui permet

d'obtenir une décroissance brusque de la portance à partir d'une vitesse donnée pour laquelle la puissance doit être diminuée. Les éoliennes munies du système stall génèrent une puissance électrique variable dont la valeur maximale correspond à la puissance nominale de la machine. En dessous de cette valeur, la puissance fournie croît avec la vitesse du vent. Au-delà, la puissance fournie décroît avec la vitesse du vent. [5] [6]

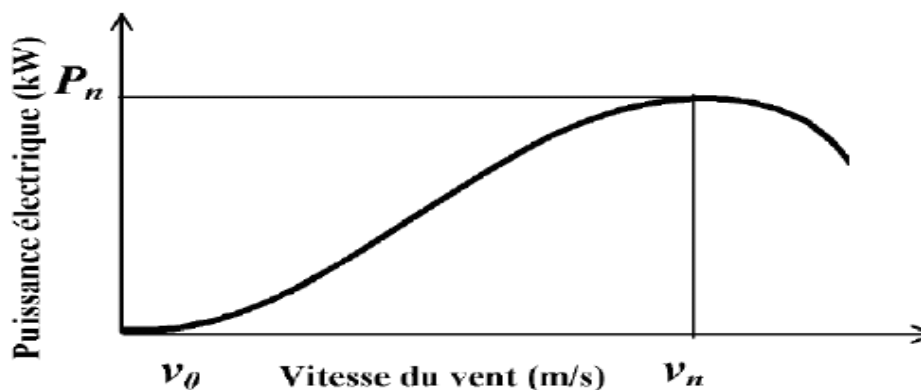


Fig I-13 : Puissance d'éolienne munie d'un système stall

En comparaison avec le pitch, le « stall » a pour avantage l'absence de système de contrôle d'angle de calage. La construction est donc plus simple et moins coûteuse. Par contre la puissance active n'est pas contrôlable. [6]

I.5.3.3. Le système « stall actif » :

Le système stall actif est la combinaison des deux systèmes décrits précédemment, il est utilisé pour les machines de très forte puissance. Le décrochage aérodynamique est obtenu progressivement grâce à un dispositif permettant un débattement des pales contre le vent. Les actionneurs électriques ou hydrauliques nécessaires, sont de taille réduite, les mouvements des pales restant de faible amplitude ainsi le dispositif mécanique est technologiquement plus simple et moins coûteux. [6]

I.6 Chaînes de conversion de l'énergie éolienne utilisant la machine synchrone :

La Machine Synchrone (MS) a l'avantage d'avoir un bon rendement et un bon couple massique notamment pour la Machine Synchrone à Aimants Permanents (MSAP). Ces qualités sont contrebalancées par un coût plus élevé que la MAS. Plusieurs structures sont possibles pour la machine synchrone. On notera que pour chaque topologie, il est possible de s'affranchir du multiplicateur de vitesse en utilisant une machine synchrone à aimants permanents à grand nombre de paires de pôles.

Un redresseur à diodes, associé ou non à un convertisseur DC/DC, peut être utilisé (figure I.14). Cette solution est avantageuse sur le plan économique mais la qualité des courants de la génératrice est moins bonne qu'avec un redresseur MLI ; de plus le nombre de degrés de liberté sur l'ensemble de la chaîne de conversion est plus faible (trois contre quatre).

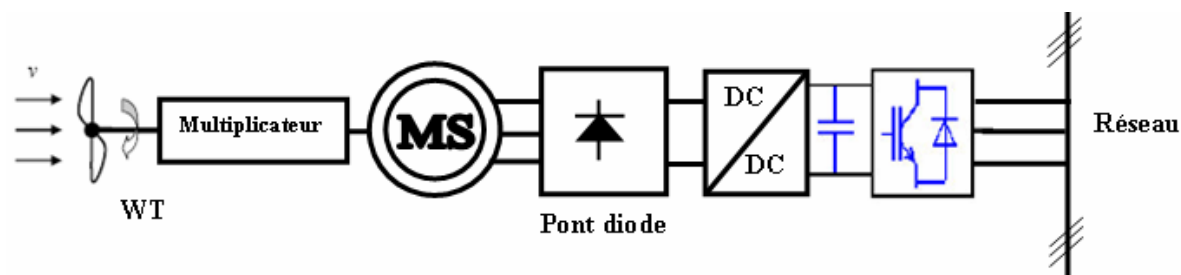


Figure I.14 : Machine synchrone reliée au réseau par un ensemble redresseur à diodes, convertisseur DC/DC et onduleur MLI.

La machine synchrone peut être associée à un redresseur MLI qui permet de fonctionner à vitesse variable et donc de maximiser la puissance (figure (1.15)). La topologie utilisant un redresseur à diodes et un boost comme convertisseur DC/DC est considérée comme la configuration optimale par Carlsson au regard du coût, de la qualité de l'énergie et du facteur de puissance [8].

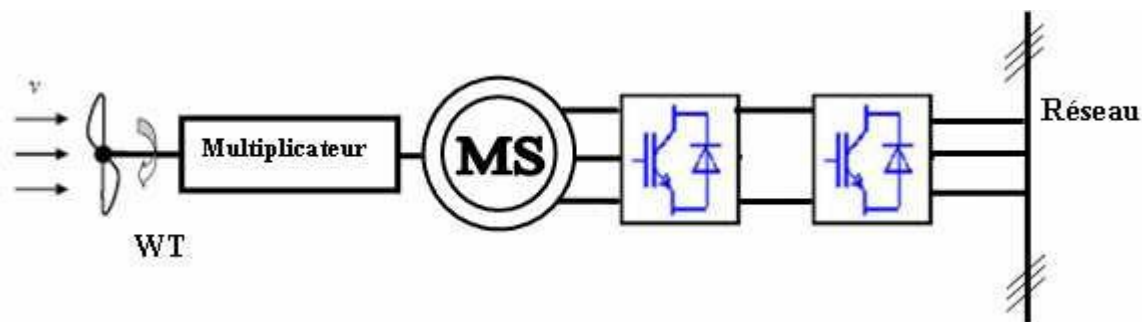


Figure I.15 : Machine synchrone au réseau par deux convertisseurs MLI en cascade

La structure de la figure I.15 peut aussi être utilisée avec une MAS [9]. Dans ce cas, le redresseur MLI assure la magnétisation de la machine asynchrone et le banc de condensateurs n'est plus nécessaire.

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une synthèse des différents types d'éoliennes de grande puissance utilisées dans l'industrie moderne pour la production d'énergie électrique, ainsi que leurs capacités de réglage. Afin d'arriver à une compréhension du fonctionnement des turbines éoliennes, en partant de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine, nous avons décrit de façon explicite les différents éléments constitutifs de la turbine. Nous avons constaté que les éoliennes à vitesse fixe permettent peu de réglage et fonctionnent comme des générateurs passifs, par contre les éoliennes à vitesse variable offrent plus de possibilités de réglage, mais ont un coût plus élevé. Par la suite, nous avons présenté les générateurs les plus utilisés dans la conversion de l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique à savoir les machines synchrones et asynchrones.

Chapitre II

II.1 Introduction :

Dans ce chapitre, il s'agit de reprendre les équations électriques, magnétiques et mécaniques de chaque machine et de les disposer de façon à pouvoir les intégrer numériquement, en faisant appel à des algorithmes d'intégration numériques d'équations différentielles tels que Runge-Kutta, Euler, ...etc. Cette disposition permet de construire aisément les modèles Matlab-Simulink de chaque machine.

II.2 Développement du modèle Matlab-Simulink d'un alternateur

Dans les équations que nous allons établir, nous supposons que les trois phases de l'alternateur sont identiques. Nous supposons par conséquent, que les composantes homopolaires sont nulles.

L'alternateur sur lequel nous serons appelés à travailler est une machine à pôles lisses et sans amortisseurs de très faible puissance (175 VA), mais nous préférons développer les équations d'une machine à pôles saillants aboutissant à un modèle plus général, quitte à le simplifier par la suite.

Les équations de départ sont donc les suivantes :

II.2.1 Equations électriques dans les axes d et q :

$$v_d = -\frac{d\varphi_d}{dt} - \omega_r \cdot \varphi_q - R_a \cdot i_d$$

$$v_q = -\frac{d\varphi_q}{dt} + \omega_r \cdot \varphi_d - R_a \cdot i_q$$

$$v_f = \frac{d\varphi_f}{dt} + R_f \cdot i_f$$

II.2.2 Equations magnétiques dans les axes d et q :

$$\varphi_f = L_f \cdot i_f + \frac{3}{2} M_{af} \cdot i_d$$

$$\varphi_d = L_d \cdot i_d + M_{af} \cdot i_f$$

$$\varphi_q = L_q \cdot i_q$$

II.2.3 Expression du couple électromagnétique :

$$C_{em} = \frac{3}{2} (\varphi_d \cdot i_q - \varphi_q \cdot i_d) \quad ; \quad C_{em} = \frac{3}{2} ((L_d \cdot i_d + M_{af} \cdot i_f) \cdot i_q - L_q \cdot i_q \cdot i_d)$$

$$C_{em} = \frac{3}{2} (L_d - L_q) \cdot i_q \cdot i_d + \frac{3}{2} M_{af} \cdot i_f \cdot i_q$$

Le développement des équations électriques et magnétiques donne :

$$v_d = -\frac{d(L_d.i_d + M_{af}.i_f)}{dt} - \omega_r.L_q.i_q - R_a.i_d$$

$$v_q = -\frac{d(L_q.i_q)}{dt} + \omega_r.(L_d.i_d + M_{af}.i_f) - R_a.i_q$$

$$v_f = \frac{d\left(L_f.i_f + \frac{3}{2}M_{af}.i_d\right)}{dt} + R_f.i_f$$

$$v_d = -L_d \frac{di_d}{dt} - M_{af} \frac{di_f}{dt} - \omega_r.L_q.i_q - R_a.i_d \quad \text{II.1}$$

$$v_q = -L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r.L_d.i_d + \omega_r.M_{af}.i_f - R_a.i_q \quad \text{II.2}$$

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{v_f}{L_f} - \frac{3}{2} \frac{M_{af}}{L_f} \frac{di_d}{dt} - \frac{R_f}{L_f}.i_f \quad \text{II.3}$$

$$C_{em} = \frac{3}{2}(L_d - L_q).i_q.i_d + \frac{3}{2}M_{af}.i_f.i_q \quad \text{II.4}$$

Les équations II.1 à II.4 permettent de construire le modèle Matlab-Simulink de notre alternateur qui aura comme grandeurs de sortie et d'entrée :

Grandeurs de sortie :

- v_{abc} : Les tensions aux bornes des trois phases statoriques obtenues à partir des tensions d'axes d et q, v_{dq} auxquelles on applique la transformation inverse de Park.
- i_f : Le courant inducteur connaissant la tension d'inducteur v_f
- C_{em} : Le couple électromagnétique développé par l'alternateur qui est ici résistant.

Grandeurs d'entrée :

- i_{abc} : les courants absorbés par la charge auxquels on applique la transformation de Park pour obtenir les courants d'axes d et q, i_{dq} .
- La tension d'inducteur v_f .
- La vitesse de rotation ω_r qui doit s'exprimer en rad/s.

II.2.4 Développement du modèle Matlab-Simulink de l'alternateur

La figure II.1 présente le modèle Matlab-Simulink encapsulé (mis en bloc) de l'alternateur. Il montre clairement les grandeurs d'entrée et de sortie. La figure II.2 montre par contre une vue développée du modèle Matlab-Simulink de l'alternateur.



Figure II.1 : Modèle Matlab-Simulink encapsulé de l'alternateur

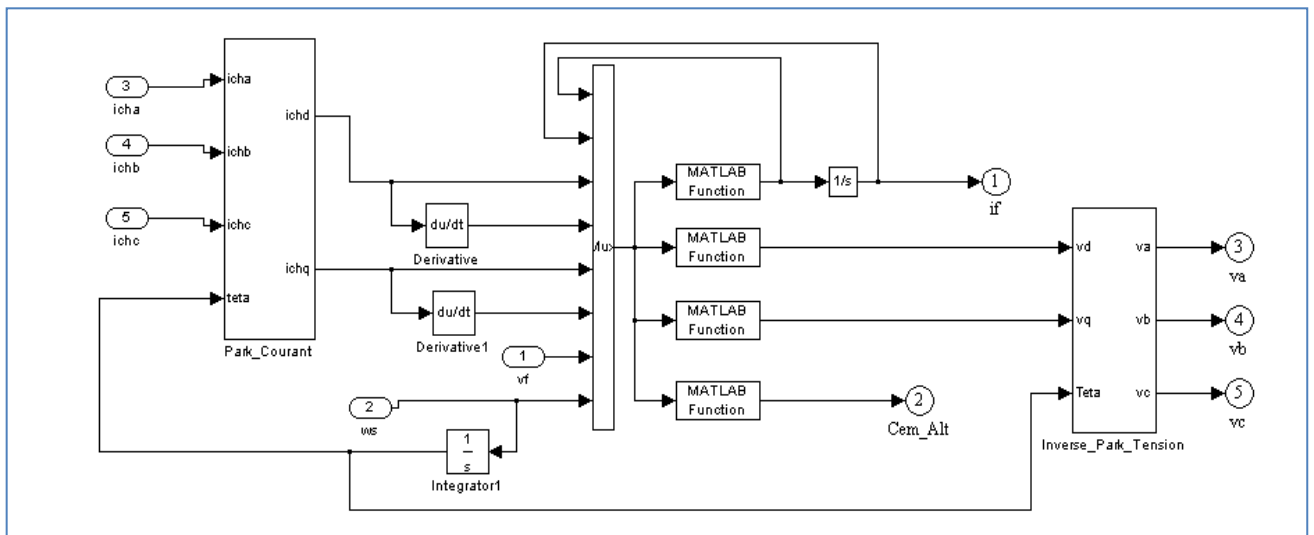


Figure II.2 : Modèle Matlab-Simulink développé de l'alternateur

II.3 Développement du modèle Matlab-Simulink du moteur à courant continu

Les équations de départ sont :

$$\text{II.3.1 Equation électriques de l'inducteur : } V_f = R_f \cdot i_f + L_f \cdot \frac{di_f}{dt}$$

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{1}{L_f} (V_f - R_f \cdot i_f) \quad \text{II.5}$$

$$\text{II.3.2 Equation électriques de l'induit : } V_q = R_q \cdot i_q + L_q \cdot \frac{di_q}{dt} + M_{fd} \cdot \omega_r \cdot i_f$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q} (V_q - R_q \cdot i_q - M_{fd} \cdot \omega_r \cdot i_f)$$

II.6

II.3.3 Expression du couple électromagnétique

$$C_{em} = M_{fd} \cdot i_f \cdot i_q \quad \text{II.7}$$

II.3.4 Equation du mouvement : Cette équation englobe bien sur le moteur à courant continu et l'alternateur où le couple développé par le moteur à courant continu est considéré comme moteur par contre celui développé par l'alternateur est résistant.

$$J \cdot \frac{d\omega_r}{dt} = C_{em} - M_{cc} - C_r \quad \text{II.8}$$

avec :

- $C_r = C_{st} + k_f \cdot \omega_r + C_{em-Alt}$ l'ensemble des couples résistants
- J : est l'inertie des masses tournantes
- C_{st} : est le couple statique
- k_f : est le coefficient de frottements
- C_{em-Alt} : est le couple résistant développé par l'alternateur

Les équations II.5 à I.8 permettent de construire le modèle Matlab-Simulink du moteur à courant continu. Les grandeurs de sortie et d'entrée de ce modèle sont les suivantes :

Grandeurs de sortie :

- i_f : le courant inducteur
- i_q : le courant induit
- C_{em-Mcc} : le couple électromagnétique
- ω_r : la vitesse de rotation

Grandeurs d'entrée :

- V_f : la tension d'inducteur
- V_q : la tension d'induit
- C_{st} : le couple résistant statique
- C_{em-Alt} : le couple résistant développé par l'alternateur

La figure II.3 présente le modèle Matlab-Simulink encapsulé (mis en bloc) du moteur à courant continu. Il montre clairement les grandeurs d'entrée et de sortie. La figure II.4 montre par contre une vue développée du modèle Matlab-Simulink de ce moteur.

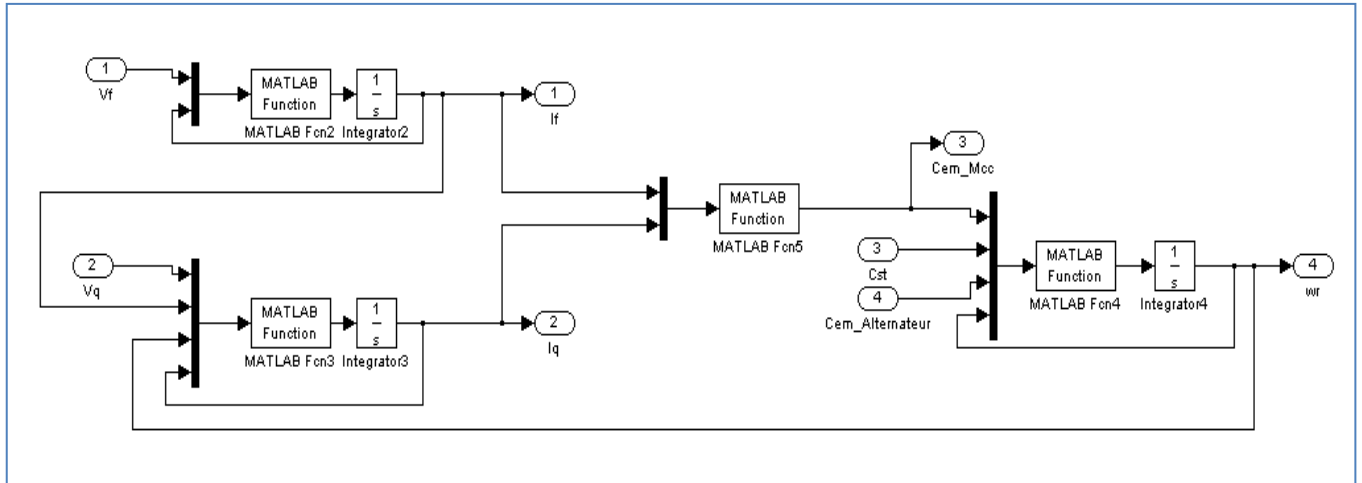


FIG II.3 Modèle Matlab-Simulink encapsulé du moteur à courant continu

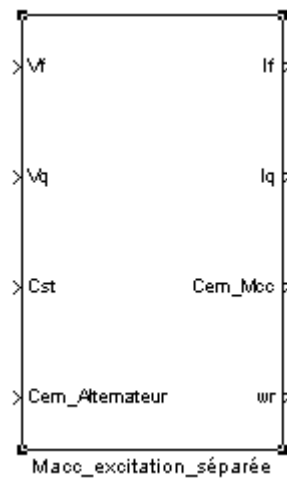


Figure II.4 : Modèle Matlab-Simulink développé du moteur à courant continu

II.4 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les modèles Matlab-Simulink du moteur à courant continu et de l'alternateur et la façon dont il faut les construire à partir de leurs équations électriques, magnétique et mécanique en régime transitoires. Nous les avons construits de façon modulaire en spécifiant pour chaque bloc ses variables d'entrée et de sortie. Cette façon de faire facilite l'insertion de ces blocs dans des systèmes complets et leur réutilisation dans d'autres systèmes.

Chapitre III

III.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons décrire les procédures à suivre pour identifier tous les paramètres de l'alternateur et du moteur à courant continu dont nous nous proposons d'étudier le comportement en régimes permanent et transitoire.

Nous allons recenser tous les paramètres à identifier à partir des équations électriques et magnétiques de l'alternateur.

III.2 Identification des paramètres d'un alternateur triphasé, à rotor bobiné, à pôles saillants, sans enroulements amortisseurs.

Equations électriques :

$$v_d = -\frac{d\varphi_d}{dt} - \omega_r \cdot \varphi_q - R_a \cdot i_d$$

$$v_q = -\frac{d\varphi_q}{dt} + \omega_r \cdot \varphi_d - R_a \cdot i_q$$

$$v_f = \frac{d\varphi_f}{dt} + R_f \cdot i_f$$

Equations magnétiques :

$$\varphi_f = L_f \cdot i_f + \frac{3}{2} M_{af} \cdot i_d$$

$$\varphi_d = L_d \cdot i_d + M_{af} \cdot i_f$$

$$\varphi_q = L_q \cdot i_q$$

A la lumière de ces équations, il apparaît que nous aurons à identifier les paramètres suivants :

- La résistance d'une phase de l'induit R_a
- La résistance de l'enroulement inducteur R_f
- L'inductance propre de l'enroulement inducteur L_f
- L'inductance mutuelle entre l'induit et l'inducteur M_{af}
- L'inductance synchrone longitudinale L_d
- L'inductance synchrone transversale L_q

III.2.1 Mesure des résistances :

Pour mesurer les résistances, il suffit d'utiliser la méthode volt-ampérométrique en courant continu Celle-ci consiste à alimenter par une tension continue le circuit dont on désire mesurer la résistance, noter la tension et le courant et calculer la résistance par une simple division : $R = \frac{u}{i}$.

Noter qu'il faut mesurer la résistance à chaud et qu'il faut effectuer plusieurs mesures (3 en moyenne) pour s'assurer que les mêmes résultats se répètent à une précision près. Dans le

cas d'un enroulement triphasé, il faut faire les essais sur les trois phases et si les résistances sont différentes, il convient de prendre la moyenne des trois.

Dans cet essai, c'est le courant qu'il faut fixer et non la tension. A cet effet, il est préférable de fixer la valeur du courant au tiers ($\frac{1}{3}$) du courant nominal et d'effectuer deux autres mesures au voisinage de cette valeur.

Cette valeur du tiers du courant nominal est choisie pour ne pas provoquer un échauffement des enroulements de la machine puisque l'essai se fait quand la machine est à l'arrêt, donc non ventilée.

III.2.2 Mesure des inductances :

Pour mesurer l'inductance propre de l'inducteur, il suffit d'utiliser la méthode volt-ampérométrique en courant alternatif. Le quotient $\frac{u_f}{i_f}$ mesure l'impédance Z_f . L'inductance

propre de l'inducteur est alors calculée comme suit : $L_f = \frac{1}{\omega} \sqrt{Z_f^2 - R_f^2}$

III.2.3 Mesure de l'inductance mutuelle entre le stator et le rotor :

L'alternateur est entraîné à la vitesse de synchronisme par un moteur à courant continu. On excite l'inducteur par une tension continue et on relève la caractéristique de magnétisation (voir figure III.1)

$$E_v = f(I_f) \quad \text{avec} \quad E_v = U_{ab} * \sqrt{\frac{2}{3}}$$

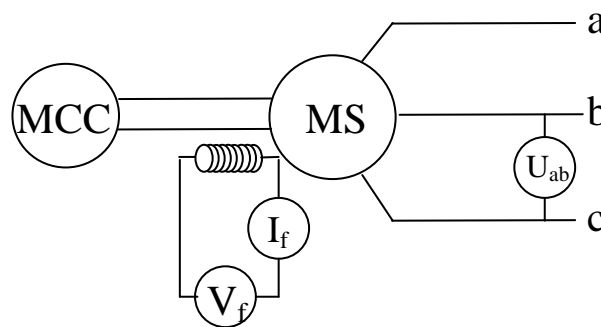


Figure III.1 Schéma de montage pour la mesure de l'inductance mutuelle entre stator et rotor

La pente de la caractéristique $E_v = f(I_f)$ représente la constante de la Fem notée K_v et la valeur de l'inductance mutuelle se calcule comme suit : $M_{af} = \frac{K_v}{\omega}$

Attention, la vitesse doit être donnée en rd/s.

III.2.4 Mesure des inductances synchrones longitudinale et transversale :

III.2.4.1 Méthode du faible glissement :

Le rotor de l'alternateur est entraîné dans le sens du champ tournant à une vitesse légèrement inférieure à celle du synchronisme. Le circuit inducteur est maintenu ouvert. Le stator est branché sur une source de tension triphasée équilibrée de fréquence nominale et de tension réduite (voir figure III.2). Sur l'ampèremètre mesurant le courant d'une phase du stator, on remarque que l'aiguille oscille entre deux valeurs extrêmes : une valeur minimale I_{\min} et une autre maximale I_{\max} .

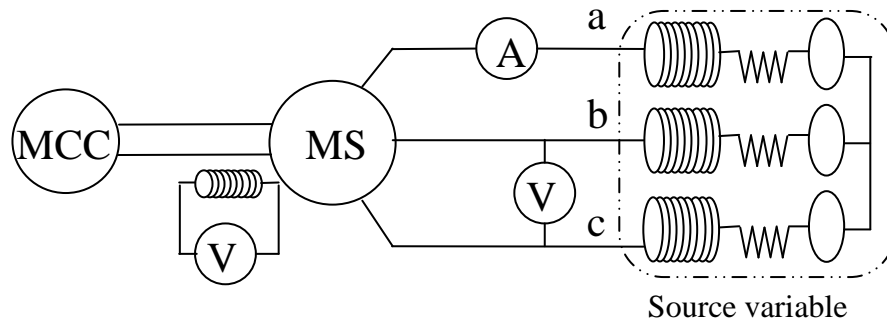


Figure III.2 Schéma de montage pour la mesure des inductances synchrones longitudinale et transversale

Les valeurs des deux inductances se calculent alors comme suit :

$$L_d = \frac{U_{bc}}{\sqrt{3} \cdot \omega \cdot I_{\min}}$$

$$L_q = \frac{U_{bc}}{\sqrt{3} \cdot \omega \cdot I_{\max}}$$

III.2.4.2 Mesure de l'inductance synchrone longitudinale par l'essai en court-circuit :

L'alternateur est entraîné à la vitesse de synchronisme par un moteur à courant continu.

On effectue d'abord l'essai à vide pour tracer la caractéristique $E_0(I_f)$.

On court-circuite les trois phases du stator et on alimente l'inducteur par une tension continue de faible valeur (figure III.3). On relève alors la caractéristique $I_{cc}(I_f)$.

L'inductance synchrone longitudinale se calcule comme suit : Pour un même courant d'excitation, on relève E_0 et I_{cc} (figure III.4) et on calcule L_d par l'expression :

$$L_d = \frac{E_0}{\omega \cdot I_{cc}}$$

On se limite aux zones linéaires des caractéristiques, ie : on ne tient pas compte de la saturation.

NB : La Fem E_0 peut être également obtenue théoriquement par l'expression $E_0 = M_{af} \cdot \omega \cdot i_f$, c'est la Fem induite qu'on retrouve aux bornes de chaque phase statorique.

Attention dans cette méthode la chute de tension dans la résistance statorique est supposée négligeable.

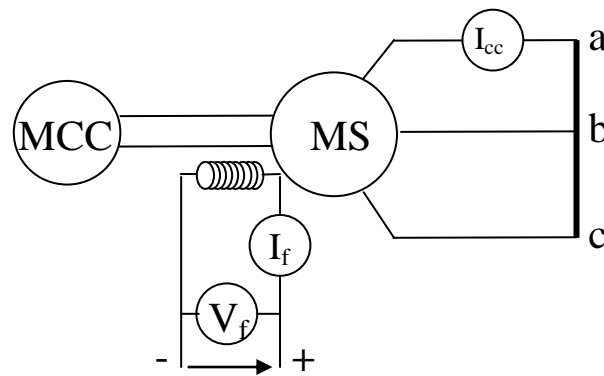


Figure III.3 Schéma de montage de l'essai en court-circuit

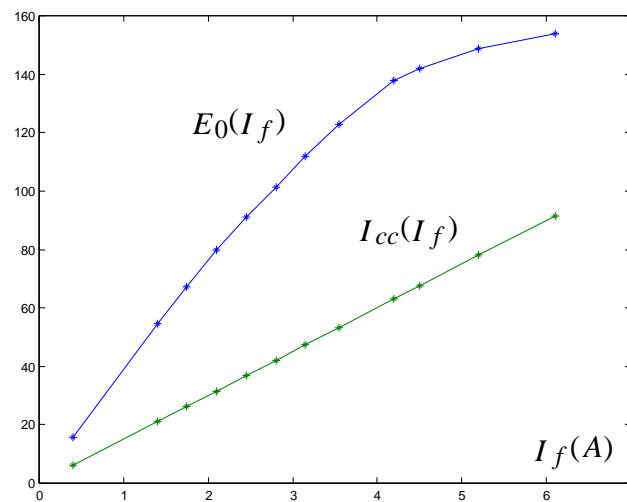


Figure III.4 caractéristiques à vide et en court-circuit

III.2.5 Identification des inductances par la méthode des essais indicels à l'arrêt :

III.2.5.1 Identification de la résistance et de l'inductance propre de l'inducteur :

On soumet l'inducteur de la machine synchrone à un échelon de tension continue d'amplitude E , le stator est ouvert. On relève à l'oscilloscope à mémoire la courbe du courant inducteur en fonction du temps.

$$\text{L'expression de ce courant est : } i_f(t) = \frac{E}{R_f} \cdot \left(1 - e^{-\frac{R_f}{L_f} t} \right)$$

III.2.5.1.1 Identification de la résistance de l'inducteur : On lit sur le graphe la valeur du courant en régime permanent et connaissant l'amplitude de l'échelon de tension, on déduit la valeur de la résistance de l'inducteur R_f en vertu de l'expression $i_f(\infty) = \frac{E}{R_f}$

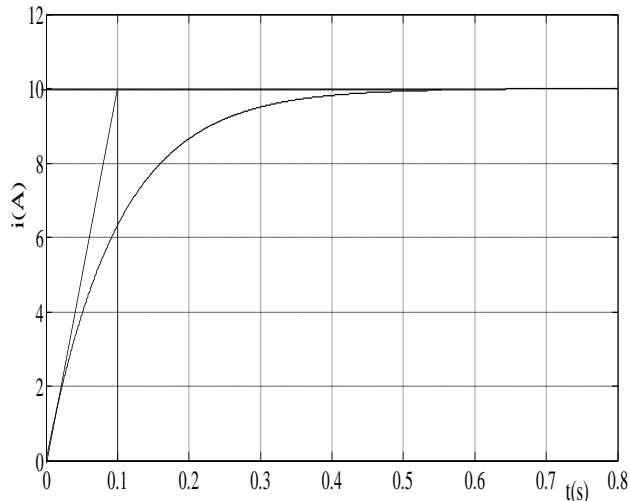


Figure III.4 Réponse du circuit inducteur à un échelon de tension

III.2.5.1.2 Identification de l'inductance propre de l'inducteur : On trace sur le graphe la tangente à la courbe du courant à l'origine, elle coupe la droite horizontale délimitant le régime permanent en un point et la distance entre l'origine et ce point indique la constante de temps de ce circuit. Cette constante de temps s'exprime comme suit : $\tau_f = \frac{L_f}{R_f}$.

Connaissant la valeur de la résistance R_f on déduit celle de l'inductance L_f par la relation $L_f = \tau_f * R_f$.

III.2.5.2 Identification de l'inductance de fuites totale entre l'induit et l'inducteur ramenée à l'inducteur.

Cette inductance est notée N_f , elle a pour expression $N_f = L_f - \frac{3}{2} \frac{M_{af}^2}{L_d}$

La mesure de cette inductance permet d'identifier indirectement l'inductance synchrone longitudinale L_d connaissant les inductances L_f et M_{af} .

On peut identifier l'inductance de fuites totale N_f par le même essai que précédemment, à la différence qu'ici le stator doit être non pas en circuit ouvert mais en court-circuit.

En effet, si l'on écrit les expressions des flux de l'axe d de la machine synchrone.

$$\varphi_f = L_f \cdot i_f + \frac{3}{2} M_{af} \cdot i_d$$

$$\varphi_d = L_d \cdot i_d + M_{af} \cdot i_f$$

$$\text{Si l'on annule le flux d'axe d : } \varphi_d = L_d \cdot i_d + M_{af} \cdot i_f = 0 \Rightarrow i_d = -\frac{M_{af} \cdot i_f}{L_d}$$

$$\text{Si l'on injecte l'expression de } i_d \text{ dans } \varphi_f \quad \varphi_f = L_f \cdot i_f + \frac{3}{2} M_{af} \cdot \left(-\frac{M_{af} \cdot i_f}{L_d} \right)$$

On obtient finalement $\varphi_f = (L_f - \frac{3}{2} \frac{M_{af}^2}{L_d}) \cdot i_f = N_f \cdot i_f$

Un flux traversant un circuit reste nul, s'il était nul et qu'il s'oppose à toute variation brusque du flux qui tente de le traverser.

A la lumière de l'équation électrique de l'induit de la machine synchrone :

$v_{abc} = -R_a i_{abc} - \frac{d\varphi_{abc}}{dt}$ Si la résistance R_a est négligeable, annuler toute variation du flux

revient à annuler la tension $v_{abc} = -\frac{d\varphi_{abc}}{dt} = 0$. Donc un enroulement en court-circuit dont la résistance peut être négligée s'oppose à toute variation brusque du flux qui le traverse.

On peut conclure d'ici que si l'on désire identifier l'inductance de fuites totale N_f , il suffit de court-circuiter le stator de la machine synchrone et de soumettre son l'inducteur à un échelon de tension, comme le montre le schéma de montage de la figure III.4

La figure III.5 montre les courbes du courant inducteur lors de la simulation des deux essais indiciaires (en rouge : stator en court-circuit, en bleu : stator ouvert).

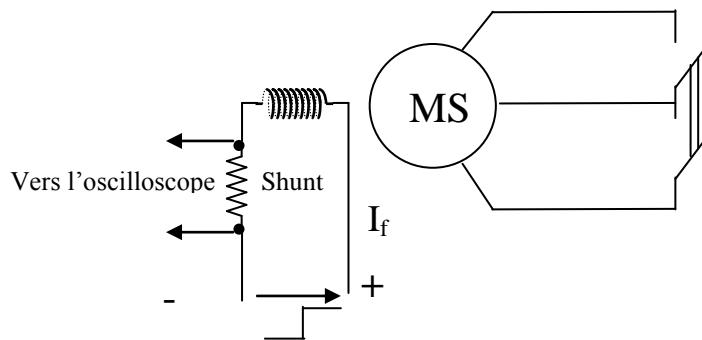


Figure III.4 Schéma de montage pour les essais indiciaires à l'arrêt

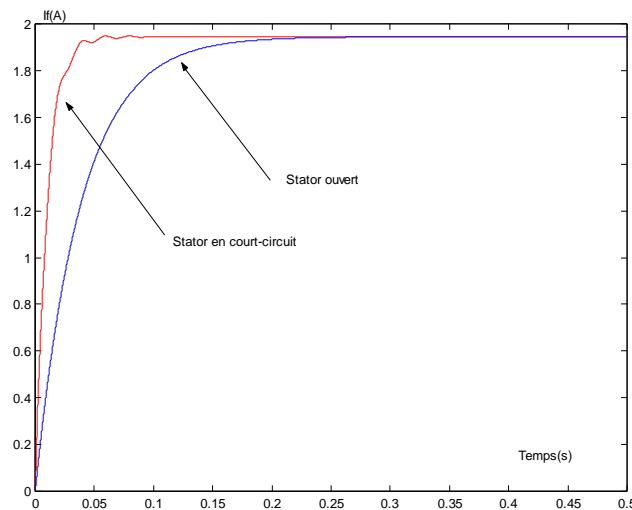


Figure III.5 Simulation de deux essais indiciaires à stator ouvert et en court-circuit, graphes du courant inducteur

III.3 Identification des paramètres d'un moteur à courant continu

Le moteur à courant continu étant le moteur d'entraînement de notre alternateur, nous allons proposer dans ce paragraphe le modèle d'un moteur à courant continu et les méthodes d'identification de ses paramètres.

III.3.1 Modèle du moteur à courant continu :

$$\text{Equation électriques de l'inducteur : } V_f = R_f \cdot i_f + L_f \cdot \frac{di_f}{dt}$$

$$\text{Equation électriques de l'induit : } V_q = R_q \cdot i_q + L_q \cdot \frac{di_q}{dt} + M_{fd} \cdot \omega_r \cdot i_f$$

Les paramètres à identifier pour la machine à courant continu sont donc :

R_f : Résistance de l'inducteur

L_f : Inductance propre de l'inducteur

R_q : Résistance de l'induit

L_q : Inductance propre de l'induit

M_{fd} : Inductance mutuelle entre l'induit et l'inducteur

III.3.2 Méthodes d'identification des paramètres du moteur à courant continu :

III.3.2.1 Identification résistances et des inductances propres du moteur à courant continu :

Concernant l'identification des résistances et des inductances propres de l'inducteur et de l'induit, il suffit d'appliquer comme pour la machine synchrone, la méthode volt-ampérométrique respectivement en courant continu pour les résistances et en courant alternatif pour les inductances.

III.3.2.2 Identification de l'inductance mutuelle entre stator et rotor du moteur à courant continu :

Il suffit d'effectuer un essai à vide et de relever la caractéristique $V_q(i_f)$, le moteur doit fonctionner en génératrice et doit être entraîné à sa vitesse nominale. La pente de la partie linéaire de cette caractéristique représente la quantité $M_{fd} \cdot \omega_r$. Il suffit alors de diviser cette pente par la vitesse de rotation exprimée en rd/s, puisque la tension d'induit à vide s'exprime par la relation : $V_q = M_{fd} \cdot \omega_r \cdot i_f$.

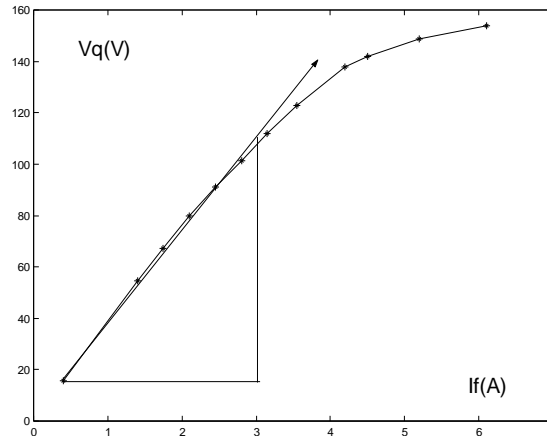


Figure III.6 Caractéristique de magnétisation et mode d'identification de la mutuelle stator rotor

III.4 Identification des paramètres mécaniques :

Puisque le système à étudier est un ensemble composé d'un moteur à courant continu et d'un alternateur. Les paramètres mécaniques à identifier sont ceux de cet ensemble et non pas ceux de chaque machine séparée.

En considérant l'équation du mouvement $J \cdot \frac{d\omega}{dt} = C_m - C_r$.avec $C_r = C_{st} + k_f \cdot \omega$

Où :

- J : est l'inertie des masses tournantes
- C_{st} : est le couple statique
- k_f : est le coefficient de frottements
- C_m : est le couple moteur

Les paramètres à identifier sont donc : J , C_{st} et k_f

III.4.1 Identification du couple statique C_{st} et du coefficient de frottements k_f :

Sachant que pour un moteur à courant continu à excitation séparée ou shunt le couple électromagnétique s'exprime par la relation : $C_{em} = M_{fd} \cdot i_f \cdot i_q$.

Si le courant d'excitation du moteur à courant continu est gardé constant alors l'expression du couple devient : $C_{em} = K_m \cdot i_q$ avec $K_m = M_{fd} \cdot i_f$.

On trace alors la caractéristique $C_{em}(\omega)$. Le couple électromagnétique peut être mesuré par un couple mètre ou calculé par la relation $C_{em} = M_{fd} \cdot i_f \cdot i_q$ après la mesure des courants d'induit et d'inducteur.

Le prolongement de la caractéristique $C_{em}(\omega)$ à l'origine coupe l'axe des ordonnées en un point. Ce dernier désigne la valeur du couple statique C_{st} .

Le coefficient des frottements est la pente de la caractéristique $C_{em}(\omega)$.

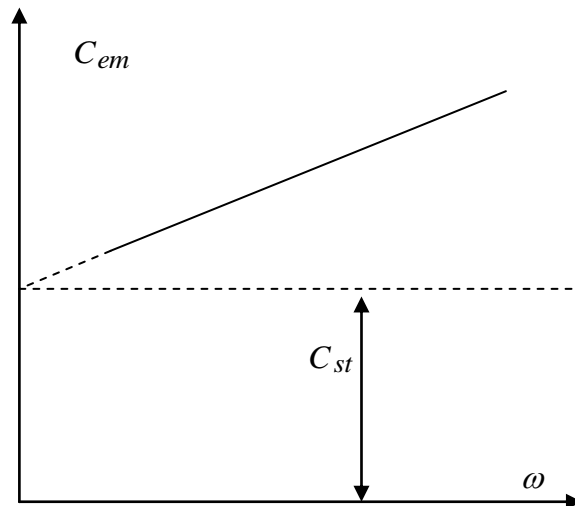


Figure III.5 Identification du couple statique et du coefficient de frottements

III.4.2 Identification de l'inertie des masses tournantes :

III.4.2.1 Première méthode :

Considérons le cas d'un moteur à courant continu : Le moteur est câblé en excitation séparée. On fixe le courant inducteur à sa valeur nominale et on démarre le moteur en faisant augmenter progressivement sa tension d'induit. On fixe cette dernière à sa valeur nominale. On mesure alors la tension d'induit $U_0 = U_n$, le courant d'induit I_0 et la vitesse de rotation ω_0 . On coupe l'alimentation et on note le temps T que le moteur prend pour s'arrêter.

On peut écrire : $J \cdot \frac{d\omega_r}{dt} = C$ Où C est le couple des pertes

$$D'où : J = \frac{\int_0^T dt}{\int_0^{\omega} \frac{d\omega}{C}}$$

La puissance absorbée s'exprime par :

$$P_{abs} = U_n \cdot I_0 = P_0 + R_q \cdot I_0^2 \quad d'où \quad P_0 = U_n \cdot I_0 - R_q \cdot I_0^2 = I_0 \cdot (U_n - R_q \cdot I_0)$$

$$Or \quad P_0 = C \cdot \omega \quad \Rightarrow \quad C = \frac{I_0 \cdot (U_n - R_q \cdot I_0)}{\omega}$$

$$On \text{ déduit que : } J = \frac{\int_0^T dt}{\int_0^{\omega} \frac{d\omega}{C}} = \frac{\int_0^T dt}{\int_0^{\omega} \frac{\omega d\omega}{I_0 \cdot (U_n - R_q \cdot I_0)}} = \frac{T}{\int_0^{\omega} \frac{\omega d\omega}{P_0}}$$

Il faut maintenant tracer la caractéristique $\frac{\omega}{P_0} = f(\omega)$ en faisant varier la tension d'induit et en gardant le courant d'excitation constant.

L'inertie J représente alors l'aire comprise entre les axes, la courbe $\frac{\omega}{P_0} = f(\omega)$ et l'ordonnée du point ω_0 .

Comme calcul approximatif on peut utiliser en supposant que

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \Rightarrow J = C \frac{\Delta t}{\Delta\omega} = C \frac{T}{\omega_0} = \frac{I_0 \cdot (U_n - R_q \cdot I_0) \cdot T}{\omega_0^2}$$

III.4.2.2 Deuxième méthode :

Dans cette méthode, il faut enregistrer à l'oscilloscope à mémoire la courbe de décroissance de la vitesse de rotation du moteur en fonction du temps $\omega(t)$.

Il faut ensuite exploiter la solution théorique de la vitesse de rotation et identifier l'inertie J par la pente de la courbe $\omega(t)$.

III.4.2.2.1 Solution théorique :

Le mouvement de rotation des masses tournantes est régi par l'équation :

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = C_{em} - C_{st} - k_f \cdot \omega$$

Avec :

- C_{em} est le couple moteur qui s'annulera brusquement quand on coupe l'alimentation de l'induit du moteur.
- la vitesse initiale du moteur avant la coupure vaut ω_0 .

On réécrit l'équation du mouvement dans le domaine des fréquences en appliquant la transformée de Laplace.

$$J \cdot (p \cdot \omega(p) - \omega_0) = 0 - \frac{C_{st}}{p} - k_f \cdot \omega(p)$$

$$(J \cdot p + k_f) \omega(p) = J \cdot \omega_0 - \frac{C_{st}}{p}$$

$$\Rightarrow \omega(p) = \frac{J \cdot \omega_0}{(J \cdot p + k_f)} - \frac{C_{st}}{p(J \cdot p + k_f)}$$

$$\Rightarrow \omega(p) = \frac{\omega_0}{(p + \frac{k_f}{J})} - \frac{C_{st}}{J} \cdot \frac{1}{p \cdot (p + \frac{k_f}{J})}$$

$$\Rightarrow \omega(t) = \omega_0 \cdot e^{-\frac{k_f}{J}t} - \frac{C_{st}}{k_f} (1 - e^{-\frac{k_f}{J}t})$$

$$\omega(t) = (\omega_0 + \frac{C_{st}}{k_f}) \cdot e^{-\frac{k_f}{J}t} - \frac{C_{st}}{k_f}$$

$$\begin{aligned} \text{à } t=T; \quad \omega(T)=0 &= (\omega_0 + \frac{C_{st}}{k_f}) \cdot e^{-\frac{k_f T}{J}} - \frac{C_{st}}{k_f} \Rightarrow e^{-\frac{k_f T}{J}} = \frac{\frac{C_{st}}{k_f}}{(\omega_0 + \frac{C_{st}}{k_f})} = \frac{C_{st}}{(K_f \cdot \omega_0 + C_{st})} \\ \Rightarrow e^{\frac{k_f T}{J}} &= \frac{(K_f \cdot \omega_0 + C_{st})}{C_{st}} \Rightarrow \frac{K_f T}{J} = \ln \frac{(K_f \cdot \omega_0 + C_{st})}{C_{st}} \Rightarrow J = \frac{K_f T}{\ln \frac{(K_f \cdot \omega_0 + C_{st})}{C_{st}}} \\ \Rightarrow J &= \frac{K_f T}{\ln(K_f \cdot \omega_0 + C_{st}) - \ln C_{st}} \end{aligned}$$

III.4.2.3 Troisième méthode :

Quand nous ne disposons pas de génératrice tachymétrique pour enregistrer le régime transitoire de la vitesse, on peut toujours identifier l'inertie des masses tournantes par l'essai suivant :

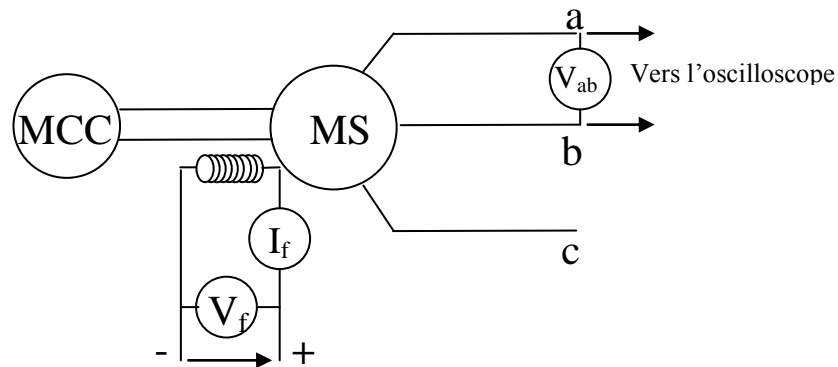


Figure III.5 Identification du moment d'inertie des masses tournantes

L'alternateur est entraîné à la vitesse de synchronisme par le moteur à courant continu, on excite l'alternateur, le stator est gardé à vide. On coupe l'alimentation du moteur à courant continu et relève à l'oscilloscope à mémoire la courbe d'évolution de la tension statorique en fonction du temps.

La tangente à la courbe de décroissance de l'enveloppe de la tension statorique nous donne directement la constante de temps mécanique de l'ensemble moteur à courant continu – alternateur. L'inertie de cet ensemble est déterminée connaissant le coefficient de frottements.

III.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre quelques méthodes d'identification des paramètres électriques et mécaniques d'un moteur à courant continu et d'un alternateur. Les relevés expérimentaux et les résultats de l'identification seront regroupés en annexe. Le choix d'une méthode d'identification ou d'une autre est dicté par le matériel disponible dans notre laboratoire. Nous avons parfois utilisé quand s'est possible, deux méthodes différentes pour identifier un seul paramètre. Cela est utile pour la comparaison des méthodes et pour la confirmation des résultats.

Chapitre IV

IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous nous intéressons au système Moteur à courant continu - Alternateur – Charge triphasée RL série. Nous examinerons le comportement de la tension statorique vis-à-vis de la variation brusque de la vitesse de rotation et de la charge.

IV.2 Paramètres de simulation :

Tous les tests de simulation effectués sont réalisés en considérant les paramètres suivants :

Paramètres du moteur à courant continu à excitation indépendante

Vf=220	Tension d'inducteur
Rf=1050	Résistance de l'inducteur
Lf=8.65	Inductance propre d'inducteur
Vq=220	Tension d'induit
Rq=30	Résistance de l'induit
Lq=1.05	Inductance propre d'induit
Mfd=6.3	L'inductance mutuelle
kf=2.2e-3	Coefficient de frottements
J=5.5e-3	Inertie des masses tournantes
Cst=0.162	Couple résistant statique
p_mcc=1	Nombre de paire de pole

Paramètres de l'alternateur

f=50
$ws=2*\pi*f$
Ra=22.5
Ld=1.99
Lq=1.99
Lf=1.5
Rfa=63
Maf=1.37
p_alt=2
Vf=38.1
$Nf=Lf-Maf^2/Ld$
$Tpd=Nf/Rfa$

Paramètre de la Charge RL :

Rc=2000
Lc=2

Les paramètres de la charge sont choisis de façon à ne pas dépasser la puissance nominale de l'alternateur qui est de 175VA.

La simulation du comportement de l'ensemble Moteur à courant continu – Alternateur _ Charge passive RL série est effectuée selon le schéma Matlab-Simulink de la figure IV.1.

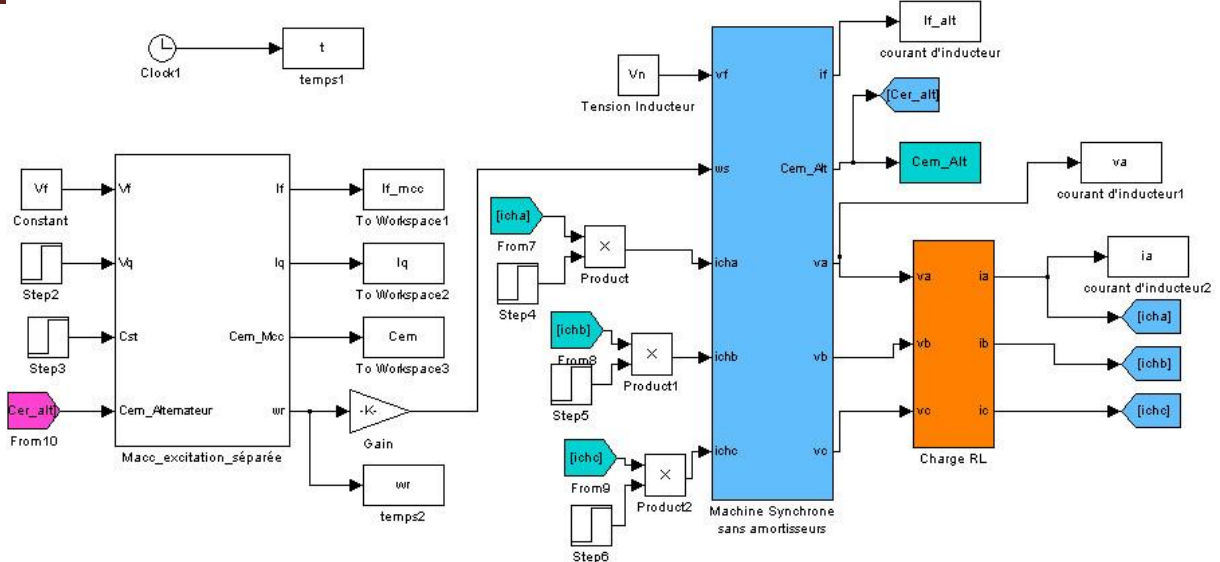


Figure IV.1 : Schéma Matlab-Simulink de l'ensemble MCC-ALT-Charge RL

Le fonctionnement à vide ou en charge est pris en considération dans ce schéma par les trois « step » introduits au niveau des courants d'entrée de l'alternateur. Ces « step » nous permettent de définir l'instant d'entrée en action de la charge. Un autre « step » appliqué au couple résistant du moteur à courant continu nous permet de réaliser une variation de la vitesse de rotation de l'ensemble. Ainsi, nous étudierons l'influence de la charge et de la vitesse d'entraînement sur la tension délivrée par l'alternateur.

IV.3 Résultats de simulation et interprétations : IV.3.1 Fonctionnement à vide :

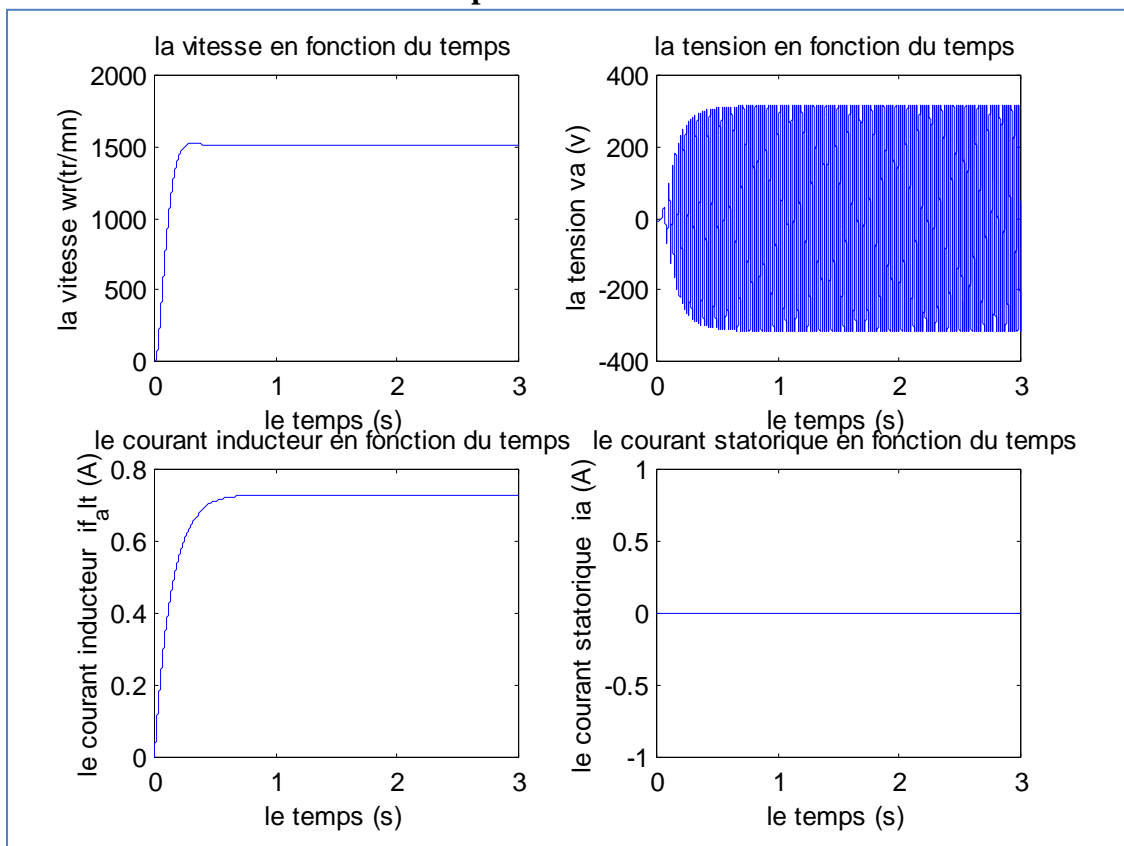


Figure IV.2 : Fonctionnement à vide de l'alternateur

IV.3.2 Fonctionnement en charge :

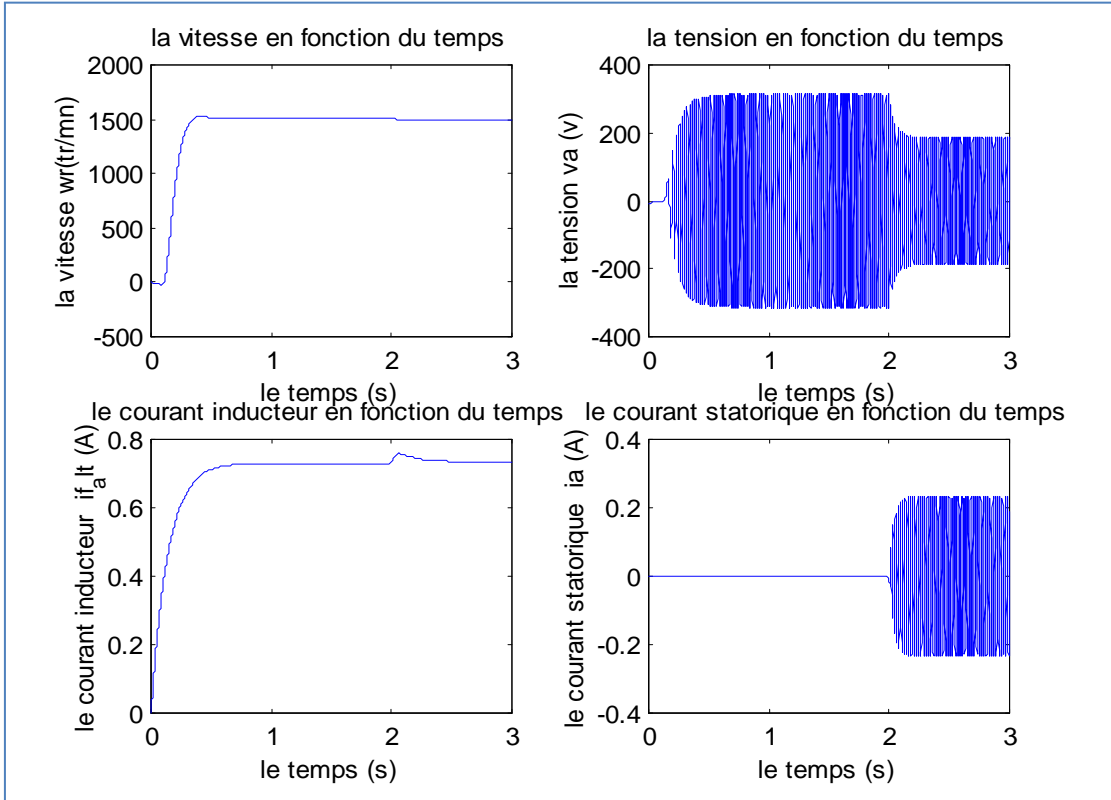


Figure IV.3 : Fonctionnement en charge de L'alternateur

IV.3.3 Influence de la vitesse sur MCC_ALT :

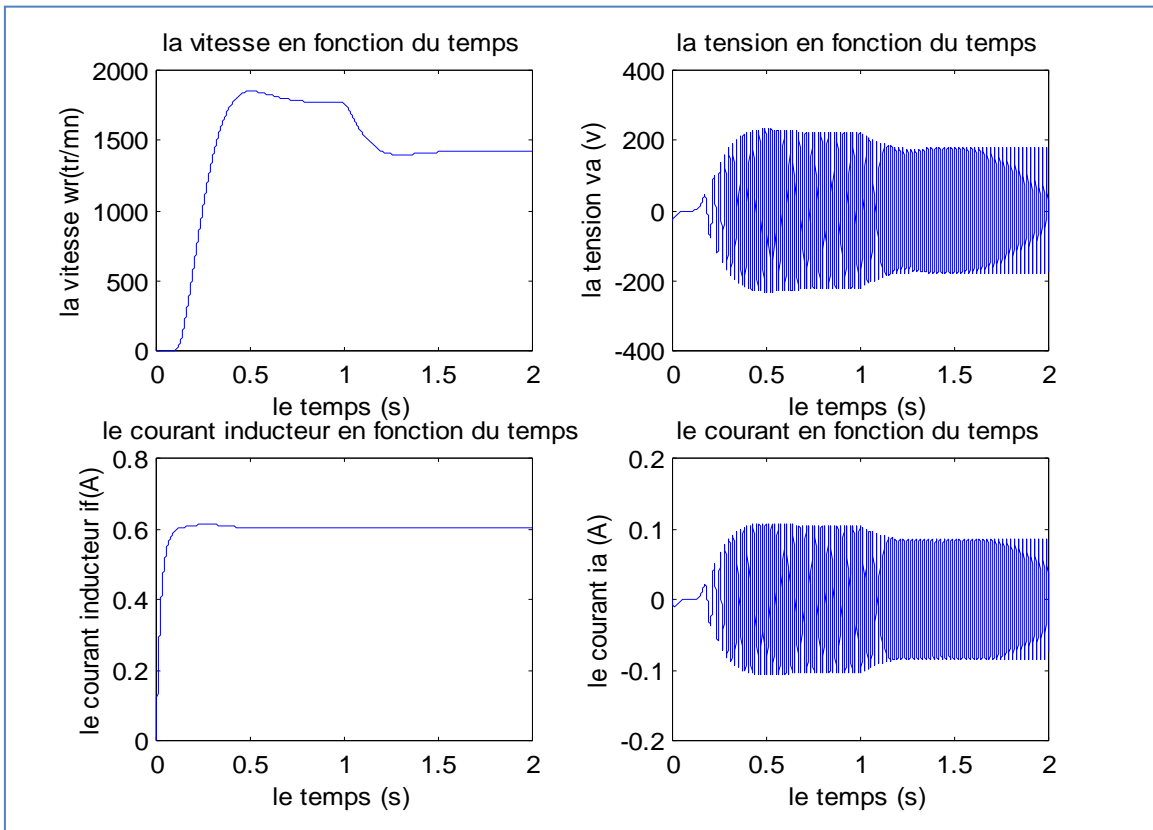


Figure IV.4 : Influence de la vitesse de rotation

IV.4 Interprétation des résultats:

Les courbes de la figure IV.2 représentent respectivement la vitesse de rotation de l'ensemble, la tension statorique délivrée par l'alternateur, le courant inducteur et le courant statorique de la phase A. La vitesse de rotation s'établit après un temps dépendant de la constante de temps mécanique des masses tournantes. Le courant d'excitation s'établit à la constante de temps de l'inducteur à stator ouvert et garde sa valeur constante tant que le courant statorique ne varie pas. La tension statorique atteint une valeur crête égale à la quantité $M_{af} * \omega_r * i_f$ appelée fèm interne. Le courant statorique est nul à vide.

Les courbes de la figure IV.3 représentent le fonctionnement puis l'entrée en action de la charge à l'instant $t=2S$. Nous constatons que l'entrée en action de la charge entraîne une légère diminution de la vitesse à cause de la légère augmentation du couple résistant symbolisée par le couple électromagnétique de l'alternateur ; $C_{em-alt} = M_{af} * i_f * i_q$. Elle entraîne en même temps une diminution prononcée de la tension statorique à cause de l'augmentation de la chute de tension interne. Le courant statorique s'établit à une valeur dépendant de l'impédance de la charge. Le courant inducteur varie en régime transitoire suite à l'entrée en action du courant d'induit, mais en régime permanent, il reprend la valeur acquise précédemment.

Les courbes de la figure IV.4 montrent l'influence de la vitesse de rotation. En effet, dans cette figure, l'alternateur est en charge dès le début de la simulation. A l'instant $t=1s$, un couple résistant est appliqué brusquement au moteur d'entraînement faisant chuter la vitesse de rotation. Cette dernière fait chuter à son tour la tension statorique qui fait chuter le courant statorique.

IV.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, un schéma Matlab-Simulink est établi. Il permet d'étudier le comportement de l'ensemble Moteur à courant continu - Alternateur – Charge triphasée RL série. Les tests par simulation ont montré que la variation de la vitesse d'entraînement et de la charge entraîne une variation de la tension délivrée par l'alternateur. Cette constatation interdit l'utilisation de cet alternateur dans un ensemble de conversion de l'énergie éolienne, surtout dans les systèmes autonomes fonctionnant en sites isolés. En effet, d'une part, la vitesse des turbines éoliennes sont constamment sujettes à des variations au gré du vent, d'autre part l'entrée en action des charges a toujours un caractère aléatoire. Il devient donc indispensable d'adjoindre à notre système un dispositif de régulation de la tension à la sortie de l'alternateur. Ceci constitue l'objet du prochain chapitre.

Chapitre V

V.1 Introduction :

Dans ce dernier chapitre, nous allons proposer deux schémas Matlab-Simulink pour réaliser la régulation en tension en sortie de l'ensemble MCC-ALT. Il s'agit de réguler la tension alternative (valeur efficace ou maximale à garder constante) en sortie de l'alternateur. Ce dernier alimente dans ce cas des charges à courant alternatif.

D'autres schémas de régulation existent ; tels que le passage par un étage intermédiaire à courant continu. Il s'agira dans ce cas d'alimenter des charges à courant continu et donc de réguler la tension du bus continu. Deux convertisseurs peuvent dans ce cas être utilisés : un ensemble redresseur à diodes – hacheur et le régulateur intervient sur le rapport cyclique du hacheur pour maintenir la tension de sortie constante et l'autre et un redresseur à IGBT commandé par modulation de largeur d'impulsions.

V.2 Régulation de la tension de sortie de l'alternateur :

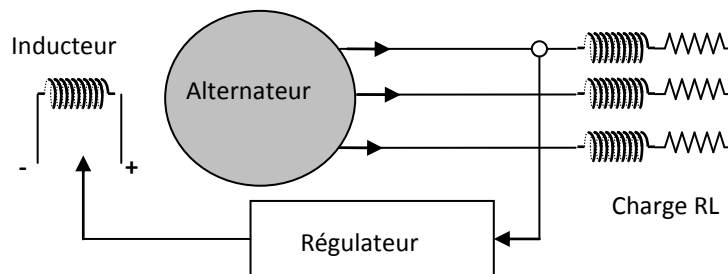


Figure V.1 : Schéma synoptique de l'alternateur muni d'un régulateur de tension

V.2.1 Principe de la régulation et calcul du régulateur de tension :

Il s'agit ici de réguler la tension alternative en sortie de l'alternateur. Ce régulateur a pour rôle de garder la valeur efficace ou maximale en sortie de l'alternateur constante et égale à une consigne donnée et ce en dépit des variations de la charge ou de la vitesse d'entraînement. Le principe est d'agir sur la tension d'excitation ; c'est-à-dire l'augmenter en cas de chute de la tension statorique ou la diminuer dans le cas contraire.

V.2.2 Calcul du régulateur de tension de l'alternateur :

Le calcul se fait à partir des équations électriques du stator et de l'inducteur de l'alternateur. La fém délivrée par l'alternateur s'exprime comme suit :

$$E = M_{af} \cdot \omega_r \cdot i_f$$

L'équation électrique de l'inducteur donne l'équation du courant inducteur

$$V_f = R_f \cdot i_f + L_f \cdot \frac{di_f}{dt}$$

Ce qui donne dans le domaine fréquentiel (de Laplace) :

$$V_f(p) = (R_f + L_f \cdot p) \cdot i_f(p) \Rightarrow i_f(p) = \frac{V_f(p)}{(R_f + L_f \cdot p)}$$

Ce qui donne l'expression de la fém suivante :

$$E(p) = M_{af} \cdot \omega_r \cdot i_f(p) = M_{af} \cdot \omega_r \cdot \frac{V_f(p)}{(R_f + L_f \cdot p)}$$

Ceci donne la fonction de transfert suivante de notre système à réguler :

$$G(p) = \frac{E(p)}{V_f(p)} = M_{af} \cdot \omega_r \cdot \frac{1}{(R_f + L_f \cdot p)} = \frac{M_{af} \cdot \omega_r}{R_f} \cdot \frac{1}{(1 + \frac{L_f}{R_f} \cdot p)} = \frac{M_{af} \cdot \omega_r}{R_f} \cdot \frac{1}{1 + T_f \cdot p}$$

$$F_{Alt}(p) = \frac{E(p)}{V_f(p)} = G_0 \cdot \frac{1}{1 + T_f \cdot p}$$

$$\text{Avec : } G_0 = \frac{M_{af} \cdot \omega_r}{R_f} \text{ et } T_f = \frac{L_f}{R_f}$$

Notre système étant du premier ordre, un régulateur proportionnel intégral suffit, il est de la forme suivante : [10]

$$R(p) = K_i \cdot \frac{1 + T_i \cdot p}{p} \text{ avec } T_i = \frac{K_p}{K_i}$$

La fonction de transfert de notre système en boucle fermée s'écrit :

$$F_{bf}(p) = \frac{F_{alt}(p) \cdot F_{Reg}(p)}{1 + F_{alt}(p) \cdot F_{Reg}(p)}$$

$$F_{bf}(p) = \frac{G_0 \cdot K_i \cdot \frac{1 + T_i \cdot p}{p \cdot (1 + T_f \cdot p)}}{1 + G_0 \cdot K_i \cdot \frac{1 + T_i \cdot p}{p \cdot (1 + T_f \cdot p)}}$$

Si l'on fixe : $T_i = T_f$, la fonction de transfert en boucle fermée devient :

$$F_{bf}(p) = \frac{G_0 \cdot K_i}{P + G_0 \cdot K_i} = \frac{1}{1 + \frac{1}{G_0 \cdot K_i} \cdot p} = \frac{1}{1 + T_{bf} \cdot p}$$

V.2.3.1 Résultats de Simulation et interprétation : Nous présentons dans ce qui suit, les résultats de simulation de l'alternateur muni d'un régulateur de tension de type PI. Les paramètres du système complet sont résumés dans le tableau ci-dessous :

% Paramètres de l'alternateur de puissance 175VA
% *****
f=50; Fréquence
$\omega_s=2*\pi*f$; Vitesse de synchronisme
Ra=22.5; Résistance statorique
Ld=1.99; Inductance synchrone longitudinale
Lq=1.99; Inductance synchrone transversale
Lf=1.5; Inductance de l'inducteur
Rfa=63; Résistance de l'inducteur
Maf=1.37; Mutuelle inductance stator-rotor
p_alt=2; Nombre de paires de pôles
Vn=46; Tension inducteur
$N_f=L_f-Maf^2/L_d$; Inductance de fuites
$T_{pd}=N_f/R_{fa}$; Constante de temps transitoire
% Charge RL
% *****
Rc=2000; Résistance de charge
Lc=2; Inductance de charge
% Paramètres du régulateur de tension
% *****
$T_f=L_f/R_{fa}$; Constante de temps inducteur
$T_{bf}=T_f$; Constante de temps boucle fermée
$G_0=Maf*\omega_s/R_{fa}$; Gain
$K_{ii}=1/(G_0*T_{bf})$; Coefficient intégral
$K_{pi}=T_f*K_{ii}$; Coefficient proportionnel

Tableau V.1 : Paramètres du système complet (Alternateur-Charge-Régulateur)

Les tests par simulation que nous allons présenter, sont des tests de suivi de consigne de tension maximale statorique et des tests de rejet de perturbations. Ces dernières sont représentées par une variation de la vitesse d'entraînement et l'intervention de la charge. Ces deux perturbations induisent automatiquement une chute de tension.

Notons ici que le moteur à courant continu servant d'entraînement de l'alternateur n'est pas pris en compte. Ceci pour ne pas encombrer inutilement notre système. Le moteur à courant continu n'est là que pour délivrer une vitesse donnée. La prise en compte du moteur à courant continu a été effectuée dans le chapitre précédent.

V.2.3.1.1 Réponse à un profil de tension (suivi de consigne) :

La figure V.3.a montre le profil de tension maximale imposé. Ce profil démarre de 314V, puis augmente de 20V à l'instant $t=0.4s$ et diminue de 40V à l'instant $t=0.8s$. La tension statorique est montrée dans la figure V.3.d, tandis la figure V.3.b montre son enveloppe supérieure (valeur maximale). La figure V.3.c représente la tension d'inducteur, qui n'est rien d'autre que la sortie du régulateur de vitesse.

Nous remarquons que l'enveloppe supérieure de la tension statorique suit correctement la consigne imposée (figure V.3.b) avec une erreur statique nulle en régime permanent. Cela est réalisé grâce à l'action intégrale du régulateur. La sortie du régulateur qui impose la tension d'inducteur est montrée dans la figure V.3.c. Nous remarquons que les variations de la tension de l'inducteur suivent celles de la consigne de tension statorique.

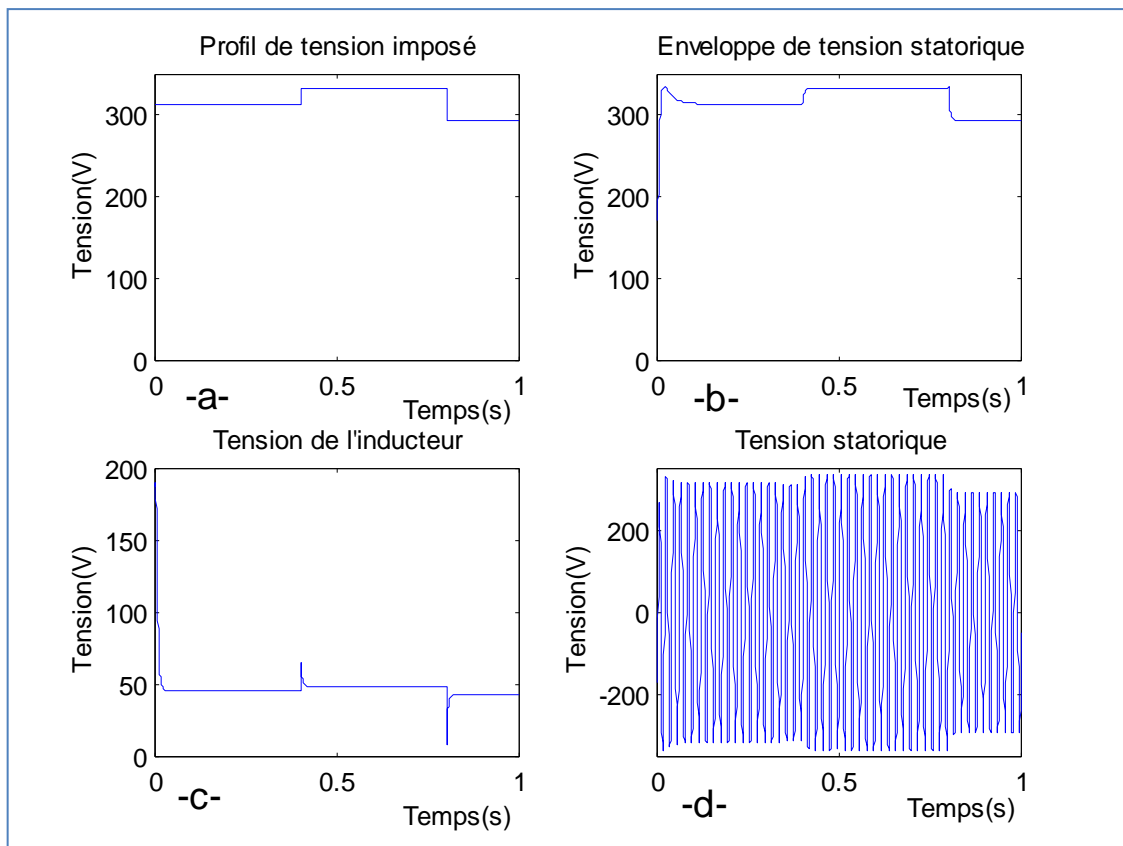


Figure V.3 : Réponse du système à un profil de tension

V.2.3.1.2 Réponse à une perturbation de la vitesse et de la charge (rejet de perturbation) :

La figure V.4.b montre la réponse du système à une consigne de tension constante (314V) mais deux perturbations sont introduites à des instants distincts. La première perturbation concerne la vitesse de rotation. Son profil est montré dans la figure V.4.a où la vitesse démarre de la valeur 314 rd/s et diminue en échelon de 40 rd/s à l'instant $t=0.4s$ puis un autre à l'instant $t=0.8s$. La deuxième perturbation concerne le branchement brusque d'une charge, intervenant à l'instant $t=1.2s$, comme le montre la figure V.4.d représentant le courant statorique de la phase a.

La figure V.4.b montre bien que la tension statorique a tendance à diminuer aux instants d'application des perturbations (0.4 0.8 et 1.2s). Le régulateur, grâce à son action sur la tension de l'inducteur (figure V.4.c) arrive à ramener la tension statorique à sa valeur de consigne.

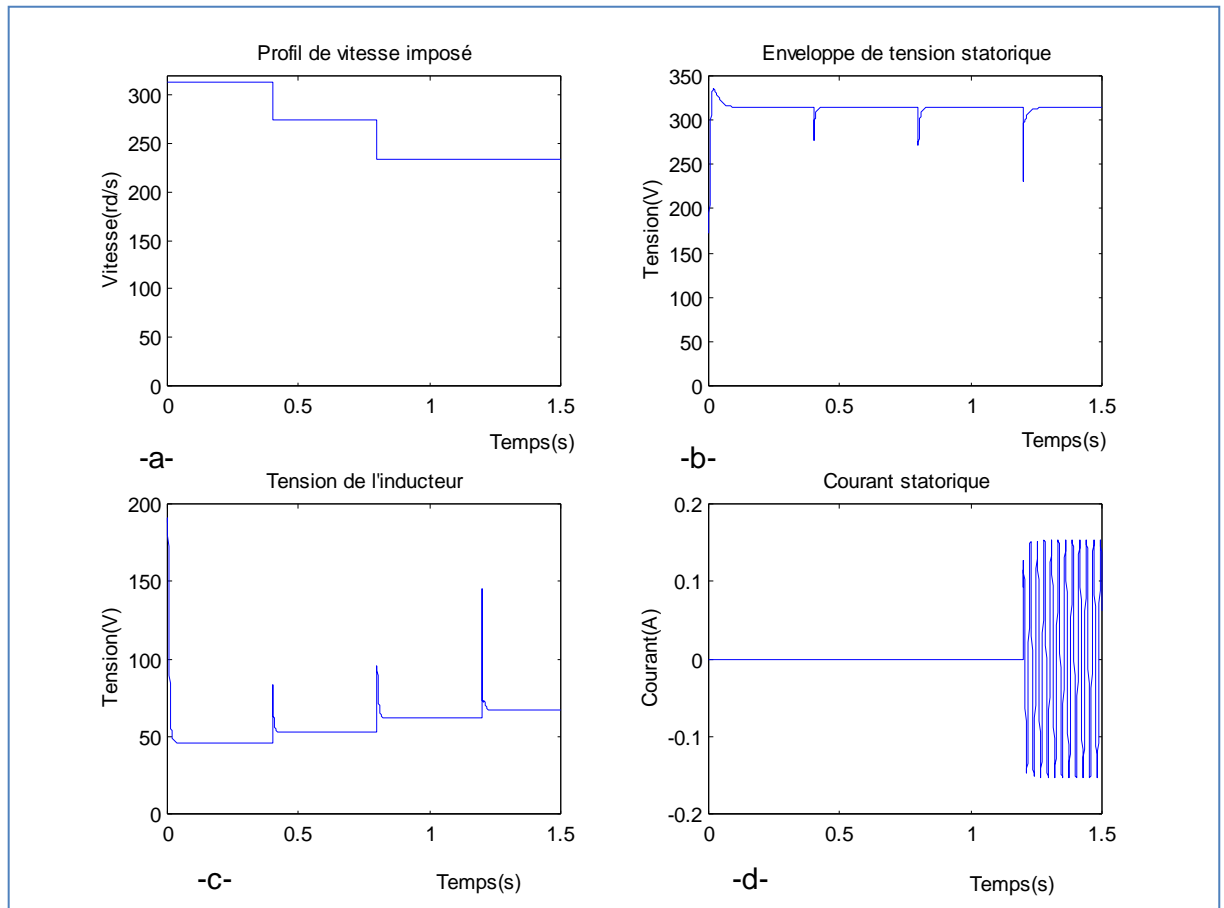


Figure V.4 : Réponse du système à des perturbations de la vitesse et de la charge

V.3 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons calculé le régulateur de tension de l'alternateur et nous avons testé ses performances en termes de suivi de consigne et de rejet de perturbation.

Nous avons imposé une consigne d'amplitude de tension statorique variant en échelon et nous avons introduit des perturbations sur la vitesse d'entraînement et sur la charge. Ces deux paramètres induisent automatiquement des variations de la tension statorique.

Les résultats des tests par simulation réalisés montrent que le régulateur construit réagit correctement face aux consignes imposées et face aux perturbations introduites.

Conclusion Générale

Conclusion générale :

Le travail étudié dans ce mémoire a concerné une chaîne de conversion de l'énergie éolienne à base de la machine synchrone. Ce sujet fait partie d'un thème encore plus vaste et qui traite des systèmes hybrides de conversion des énergies renouvelables, regroupant entre autres des panneaux photovoltaïques et des systèmes de stockage.

Les travaux présentés dans ce mémoire ont traité d'un ensemble composé d'un moteur à courant continu émulant une turbine éolienne et d'un alternateur triphasé. Le travail demandé était de modéliser, d'identifier puis de tester par simulation, le modèle de cette chaîne de conversion de l'énergie éolienne. Nous avons à nous focaliser sur la tension délivrée par l'alternateur dans le cas de la variation de la charge et de la vitesse d'entraînement. L'ensemble étudié étant destiné à fonctionner en site isolé, il fallait donc s'occuper également de la régulation de la tension en sortie de l'alternateur.

Nous avons présenté dans un premier chapitre quelques généralités sur les systèmes de conversion de l'énergie éolienne en citant quelques dispositifs utilisant la machine synchrone.

Le second chapitre a été consacré à la modélisation du moteur à courant continu et de l'alternateur. Nous avons déduit de ses modèles, une liste de paramètres à identifier.

Le troisième chapitre a été dédié à la présentation des méthodes d'identification de tous les paramètres nécessaires aux modèles du moteur à courant continu et de l'alternateur. Nous avons appliqué ces méthodes à l'identification des paramètres d'un moteur à courant continu d'une puissance de 175W et à ceux d'un alternateur d'une puissance de 175VA. Ces deux machines existent au laboratoire « LATAGE ».

Le quatrième chapitre a été réservé à l'étude par simulation numérique du comportement de l'ensemble moteur à courant continu- alternateur vis-à-vis des variations de la vitesse de rotation et de celles de la charge alimentée par l'alternateur. Il a été montré que ces deux paramètres ont une influence considérable sur la tension délivrée par l'alternateur, si bien qu'il est impossible d'envisager un fonctionnement en site isolé sans régulateur de tension.

Le cinquième et dernier chapitre a traité du calcul d'un régulateur de tension en sortie de l'alternateur et de tester les performances de l'ensemble moteur à courant continu- alternateur muni du régulateur de tension, vis-à-vis du suivi de consigne et du rejet de perturbation. En effet, nous avons soumis le système développé à deux types de tests : une consigne de tension variant en une succession d'échelons sans perturbations et une consigne de tension constante avec des perturbations de la charge et de la vitesse de rotation.

Les réponses du système muni du régulateur à ces différents tests ont montré un bon suivi de consigne avec rejet de perturbation. Ces résultats sont prometteurs et laissent

envisager la réalisation d'un banc d'essai expérimental que l'on peut intégrer dans un système hybride.

Les travaux futurs sont nombreux et variés. Parmi ceux-ci nous pouvons citer :

- La construction d'un banc d'essais expérimentaux pour la validation de nos résultats théorique.
- L'utilisation d'autres méthodes de calcul de régulateurs et d'autres régulateurs réputés comme étant robustes.
- L'adjonction d'un régulateur de vitesse au moteur à courant continu pour imposer des profils similaires à ceux de la vitesse du vent.

Annexe

Annexe A : Identification des paramètres du moteur à courant continu

Conformément au modèle du moteur à courant continu établi au deuxième chapitre, les paramètres à sont les suivants :

- R_a : Résistance de l'enroulement statorique (l'induit)
- R_f : Résistance de l'enroulement rotorique (l'inducteur)
- L_a : Inductance de l'induit
- L_f : Inductance de l'inducteur
- M_{fd} : L'inductance mutuelle entre le stator et le rotor
- C_{st} : Couple statique

A.1 : Détermination de la résistance de l'induit R_a :

Pour déterminer la résistance de l'induit et de l'inducteur, on utilise la méthode voltampère métrique en courant continu. La figure A.1 montre le schéma de montage servant à mesurer la résistance de l'induit.

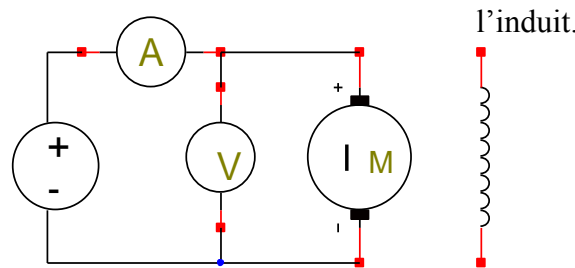


Figure A.1 : Schéma de montage de mesure de la résistance R_a

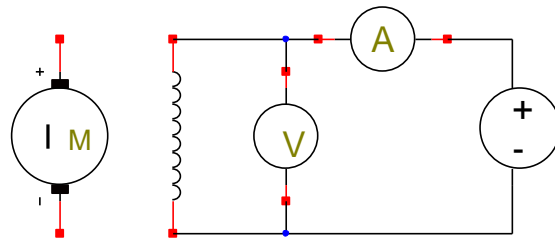
Les résultats de mesure sont consignés dans le tableau suivant :

U_a (V)	14	20	30
I_a (A)	0,5	0,7	1
U_a/I_a	28	28,57	30
R_{a_moy}	28,86		

Tableau A.1 : Résultats de mesure de la résistance de l'induit R_a :

A.2 : Détermination de la résistance de l'inducteur R_f :

La figure A.2 montre le schéma de montage servant à mesurer la résistance de l'inducteur.

Figure A.2 : Schéma de montage de mesure de la résistance R_f

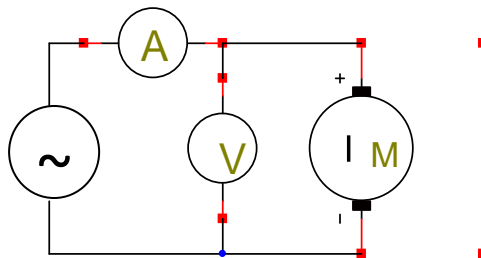
Les résultats de mesure sont consignés dans le tableau suivant :

U_f (V)	100	150	200
I_f (A)	0,1	0,14	0,185
U_f/I_f (Ω)	1000	1071,43	1081,08
R_{f_moy} (Ω)	1050,84		

Tableau A.2 : Résultats de mesure de la résistance de l'inducteur R_f :

A.3 : Détermination de l'inductance propre de l'induit L_a :

Pour déterminer les inductances propres de l'induit et de l'inducteur, on utilise la méthode voltampère métrique en courant alternatif. La figure A.3 montre le schéma de montage servant à mesurer l'inductance propre de l'induit.

Figure A.3 : Schéma de montage de mesure de l'inductance L_a

Les résultats de mesure sont consignés dans le tableau suivant :

U_a (V)	35	50	69
I_a (A)	0,11	0,15	0,2
$Z_a=U_a/I_a$ (\square)	318,18	333,33	345
L_a (H)	1,01	1,06	1,09
L_{a_moy} (H)	1,05		

Tableau A.3 : Résultats de mesure de l'inductance de l'induit L_a

A.4 : Détermination de l'inductance propre de l'inducteur L_f :

La figure A.4 montre le schéma de montage servant à mesurer l'inductance propre de l'inducteur.

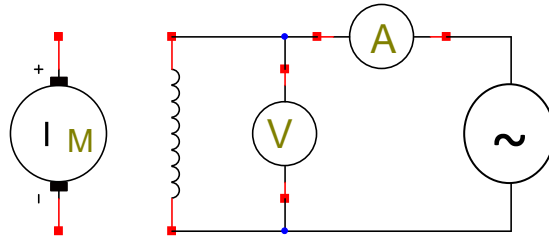


Figure A.4 : Schéma de montage de mesure de l'inductance L_f

Les résultats de mesure sont consignés dans le tableau suivant :

U_f (V)	100	150	200
I_f (A)	0,037	0,052	0,064
$Z_f=U_f/I_f(\square)$	2702,7027	2884,61538	3125
L_f (H)	8,00	8,53	9,34
L_{f_moy} (H)	8,62		

Tableau A.4 : Résultats de mesure de l'inductance de l'inducteur L_f

A.5 : Détermination de l'inductance mutuelle M_{fd} entre l'induit et l'inducteur

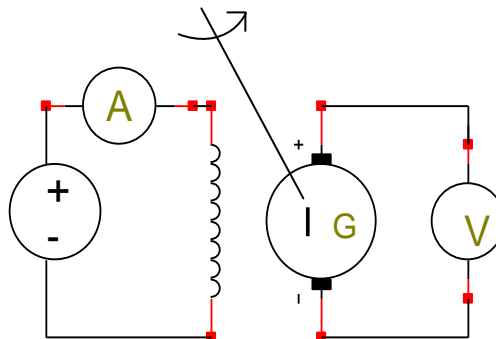


Figure A.5 : Schéma de montage de mesure de l'inductance M_{fd}

Méthode de mesure adoptée : Comme déjà expliqué au troisième chapitre, on fait fonctionner la machine à courant continu en mode génératrice, à vide. On entraîne la machine à courant continu par un moteur asynchrone à une vitesse donnée. On fait varier l'excitation et on relève les valeurs de la tension d'induit V_q et le courant d'excitation I_f . On trace par la suite la caractéristique $V_q(I_f)$ qui représente la quantité $M_{fd} \cdot \omega_r$. Il suffit enfin de diviser cette quantité par la vitesse de rotation exprimée en rad/s et qui est gardée constante pour trouver la courbe de variation de l'inductance mutuelle M_{fd} en fonction du courant inducteur.

Le tableau suivant donne les résultats de mesure de la caractéristique $U_a(I_f)$ où la vitesse de rotation est maintenue constante et égale à $\Omega_r=1498\text{tr/min}$

$U_a(\text{v})$	25	42	53	66	80	91	101	110	118	132	145	150	162
$I_f(\text{mA})$	9	16	20	24.5	30	35	40	45	50	60	70	80	100

Tableau A.5 : Résultats de mesure de la caractéristique $U_a(I_f)$

Pour déduire la valeur de l'inductance mutuelle, il est plus judicieux de la représenter comme étant variable en fonction non linéaire (à cause de la saturation) du courant inducteur I_f . Nous pouvons néanmoins supposer cette caractéristique comme étant linéaire et adopter une seule valeur constante à l'inductance M_{fd} qui correspond à la pente de la caractéristique.

On adopte finalement la valeur suivante : $M_{fd}= 6.3 \text{ H}$.

Annexe B : Identification des paramètres de l'alternateur

L'alternateur utilisé est à pôles lisses et dépourvu d'enroulements amortisseurs.

B.1 Mesure des résistances statorique et rotorique R_s et R_f :

La résistance d'une phase statorique et celle de l'inducteur (rotor) sont mesurées dans les mêmes conditions que celles retenues pour le moteur à courant continu.

Les résultats trouvés sont les suivants :

Résistance statorique :

U_s (V)	3,1	5,8	8,8
I_s (mA)	67	135	200
U_s/I_s (Ω)	23,1343284	21,4814815	22
R_{s_moy} (Ω)	22,20		

$$R_s = 22,20 \Omega$$

Résistance rotorique :

U_f (V)	13,5	18,5	25
I_f (A)	0,22	0,29	0,39
U_f/I_f (Ω)	61,3636364	63,7931034	64,1025641
R_{f_moy} (Ω)	63,08643464		

$$R_f = 63 \Omega$$

B.2 Mesure de l'inductance propre de l'inducteur L_f :

B.2.1 Méthode voltampérométrique :

U_f (V)	19	27	31
I_f (mA)	42	54	62
$Z_f = U_f/I_f$ (Ω)	452,38	500	500
L_f (H)	1,42662586	1,579631	1,579631
L_{f_moy} (H)	1,503128432		

$$L_f = 1,5 \text{ H}$$

B.2.2 Méthode de l'essai indicial à l'arrêt : Dans cet essai, l'alternateur est à l'arrêt à stator ouvert. L'inducteur est soumis à un échelon de tension d'une amplitude donnée et on relève le régime transitoire d'établissement du courant inducteur. La constante de temps de ce courant

s'exprime comme suit : $T_f = \frac{L_f}{R_f}$.

Connaissant la résistance R_f et en mesurant la constante de temps T_f de cette courbe on détermine l'inductance L_f .

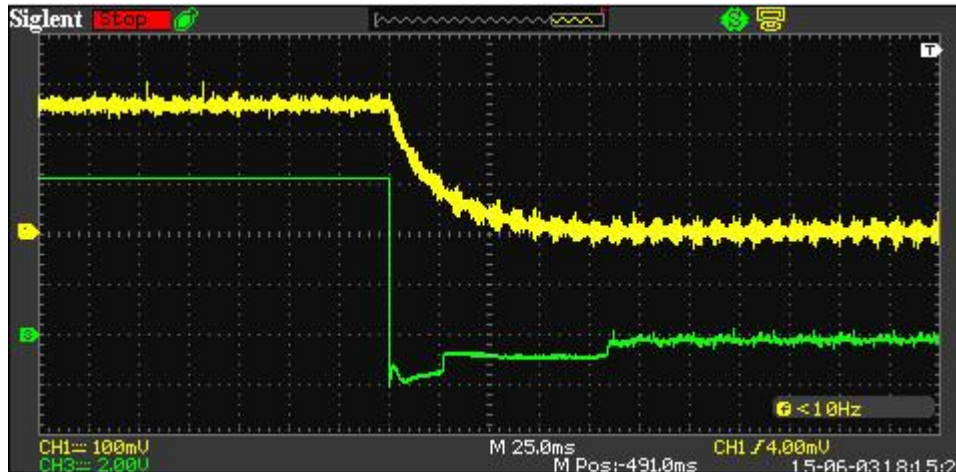


Figure B.1 : Transitoire du courant inducteur lors de l'essai indicial à stator ouvert

La tangente à l'origine à cette figure donne une constante de temps légèrement inférieure à une division qui vaut 25ms. Cette valeur de la constante de temps donne une inductance $L_f = R_f * T_f = 63 * 0.025 = 1.575H$. Ceci confirme la valeur trouvée par la méthode voltampère métrique.

B.3 Mesure de l'inductance mutuelle entre le stator et le rotor M_{af} :

Conformément au paragraphe III.2.3 du chapitre III. Les résultats de la caractéristique de magnétisation à vide de l'alternateur $E_v = f(I_f)$ sont représentés par le tableau ci-dessous.

Va(V)	43	65	87	110	130	150	165	185	200	235
If(mA)	100	150	200	250	300	350	400	450	500	600
$\Omega r(\text{tr}/\text{min})$	1500									

Tableau B.1 : Caractéristique à vide $E_v = f(I_f)$ de l'alternateur

La pente à cette caractéristique donne une inductance mutuelle $M_{af}=1.02H$

B.4 Mesure des inductances synchrones longitudinale L_d et transversale L_q :

B.4.1 Méthode de l'essai en court-circuit : L'alternateur étant à pôles lisses, les inductances synchrones longitudinale et transversale sont égales.

L'identification de cette inductance est faite conformément au paragraphe III.2.4.2 du chapitre III par la méthode de l'essai en court-circuit. Les résultats de la caractéristique en court-circuit de l'alternateur sont représentés dans le tableau ci-dessous.

I_f (mA)	12	26	36	54	100	150	200	250	300	350	400	450	500
I_{cc} (mA)	12	22	28	40	70	110	140	170	205	240	280	310	350
Ω (tr/min)	1510												

Tableau B.2 : Caractéristique en court-circuit $I_{cc} = f(I_f)$ de l'alternateur

L'exploitation de cette caractéristique donne une inductance synchrone $L_d = 1.99H$.

B.4.2 Méthode de l'essai indiciel à l'arrêt :

Cette méthode est similaire à la méthode utilisée pour identifier l'inductance propre de l'inducteur, exposée au paragraphe B.2.2. Il s'agit toujours de soumettre l'inducteur de l'alternateur à un échelon de tension d'amplitude donnée, mais cette fois-ci les trois phases du stator sont court-circuitées au lieu de rester ouvertes. La tangente à l'origine sur la courbe du courant inducteur donne la constante de

temps T_f qui s'exprime comme suit : $T_f = \frac{N_f}{R_f}$ où N_f est l'inductance de fuites totale entre le rotor

et le stator ramenée au rotor. Cette inductance s'exprime comme suit $N_f = 1 - \frac{3}{2} \frac{M_{af}^2}{L_d}$.

Avec cette relation, connaissant N_f et M_{af} on peut déduire aisément L_d .

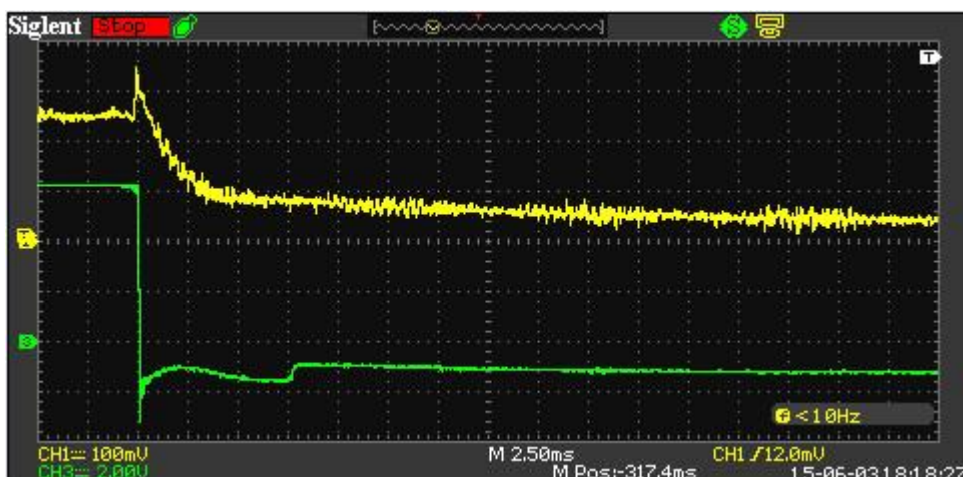


Figure B.2 : Transitoire du courant inducteur lors de l'essai indiciel à stator en court-circuit

L'exploitation de la courbe de la figure B2.2 donne une constante de temps $T_f=2.5\text{ms}$, une inductance de fuites totale $N_f = 0.1575\text{H}$ et une inductance synchrone $L_d=1.98\text{H}$. Cette valeur confirme bien la valeur trouvée par la méthode précédente.

Annexe C : Identification des paramètres mécaniques de l'ensemble Moteur à courant continu – Alternateur

Les paramètres mécaniques concernent en effet tous ce qui est accouplé au même arbre. Ces paramètres sont donc commun aux deux machines : le moteur à courant continu qui le moteur d'entraînement et l'alternateur. Les paramètres à identifier sont donc respectivement l'inertie des masses tournantes J , le couple statique C_{st} et le coefficient de frottements k_f .

C.1 Identification du couple statique et du coefficient de frottements : Conformément au paragraphe III.4.1 du chapitre III, ces deux paramètres sont identifiés en exploitant la caractéristique mécanique $C_{em}(\omega_r)$. La pente à cette caractéristique donne la valeur du coefficient de frottements tandis que son prolongement à l'origine des axes donne la valeur du couple statique. Le relevé de la caractéristique mécanique est consigné dans le tableau C.1.

$\Omega(\text{tr/min})$	1503	1379	1273	1113	966	844	678	500	331	227
$I_a(\text{A})$	0,16	0,155	0,145	0,13	0,12	0,11	0,1	0,09	0,075	0,07
$I_f(\text{A})$	0,19									

L'exploitation de cette caractéristique donne les paramètres suivants :

$$C_{st} = 0.16 \text{Nm} \text{ et } k_f = 0.002 \text{ Nm.s/rad}$$

C.1 Identification de l'inertie des masses tournantes : Conformément au paragraphe III.4.2.3 du chapitre III, l'inertie des masses tournantes est identifiée par la méthode du ralentissement et la mesure de constante de temps mécanique. Toutefois, ne disposant pas d'une génératrice tachymétrique, nous avons mesuré cette constante de temps par le régime transitoire de décroissance de tension statorique quand on couple l'alimentation du moteur d'entraînement (Le MCC).

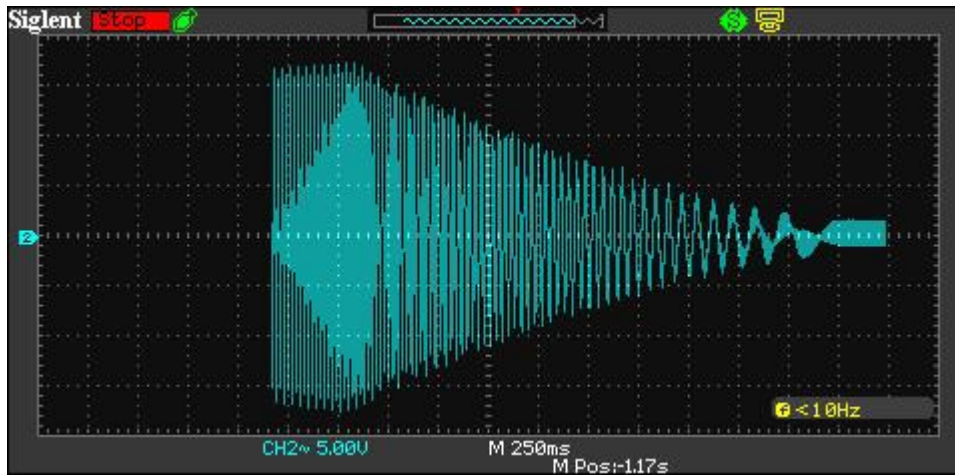


Figure C.1 : Essai de ralentissement, transitoire de la tension statorique à vide, suite à la coupure de l'alimentation du moteur d'entraînement.

L'exploitation de la courbe de la figure C.1 donne une constante de temps mécanique de l'ordre de $T_m = 2.5\text{s}$. Connaissant le coefficient de frottements $k_f = 0.002\text{ Nm.s/rad}$, on déduit que l'inertie des masses tournantes $J = 0.005\text{ kg.m}^2$.

Bibliographie

Bibliographie

[1]: Nicolas Laverdure, « Intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires », Thèse de doctorat de l'université de Grenoble, 2005.

2]: Redjem Radia, « Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne », Mémoire de magister à l'université Mentouri de Constantine, 2009.

[3]: Boyette Armand, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone a double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse de doctorat à l'université Henri Poincaré, Nancy I, 2006.

[4]: Philippe Leconte, Marc rapin, Edmond Szechenyi, « Eoliennes », document pédagogique technique de l'ingénieur « N° de la fiche doc : BM4640doc ».

[5]: Frédéric Poitiers, « Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'utilisation de l'Energie Eolienne », Thèse de doctorat de l'université de Nantes, 2003.

[6] : Vincent Courtecuisse, « Supervision d'une centrale multi-sources à base d'éolienne et de stockage d'énergie connecté au réseau électrique », Thèse de doctorat de l'université d'Arts et Métiers, Paris, « N° : 2008-ENAM-0027 ».

[7] : Olympo Anaya-Lara, « Wind energy generation : modeling and control », Edition John Wiley and Sons, 2009.

[8] : Elaimani Selma, « modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension», Thèse de doctorat de l'école centrale de Lille et de l'université des sciences et de la technologie de Lille ,2004.

[9] : C. Wagner Pereira. " L'énergie éolienne : Principe de fonctionnement, développement viable ". Mai – 2006.

[10] :Dominique. Jacob. « Régulation PID en génie électrique :Etude de cas »,édition :Ellipses Marketing, collection :Techno sup ,2000 .

Résumé :

Dans ce travail, nous avons développé :

- **Un modèle pour le courant continu qui sert d'émulateur d'une turbine éolienne**
- **Un modèle de machine synchrone fonctionnant en alternateur qui sert de générateur d'électricité.**
- **Nous avons identifié les paramètres de la machine à courant continu et de l'alternateur.**
- **Nous avons testé par simulation les performances de l'ensemble machine à courant continu – alternateur (à vide et en charge) sans perturbation, et avec perturbation.**
- **Nous avons proposé un régulateur de tension en sortie de l'alternateur pour faire fonctionner l'ensemble en site isolé.**
- **Nous avons testé par simulation les performances de ce nouvel l'ensemble vis-à-vis du suivi de consigne et de rejet de perturbation.**

Mots clés :

Energie éolienne, turbine éolienne, machine synchrone, onduleur triphasé, modélisation, identification, simulation, commande.