

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU 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 électriques**

*Présenté par*

**Toufik OURZIK**

**Koceila MAZARI**

Thème

## **Etude d'un émulateur d'une turbine éolienne à base d'une machine à courant continu**

*Mémoire soutenu publiquement le 05 /09/ 2015 devant le jury composé de :*

**M<sup>r</sup> Rachide MANSOURI**

Professeur, UMMTO, Président

**M<sup>r</sup> Salah HADDAD**

Professeur, UMMTO, Encadreur

**M<sup>r</sup> Nabil BENYAHIA**

Maitre de Conférences Classe B, UMMTO, Examineur

**M<sup>r</sup> Mhand MEKIOUS**

Maitre Assistant Classe A, UMMTO, Examineur

## *Remerciements :*

*Nous adressons nos vifs remerciements à :*

*Notre promoteur Mr HADDAD, professeur à l'UMMTO*

*Tous les enseignants et tous ceux à qui nous devons notre formation*

*Tous ceux qui, d'une quelconque façon, ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.*

*Cordialement.*

## *Dédicaces :*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mon père, ma mère et mon frère,*

*Tous mes proches,*

*Tous mes amis,*

*Toute la promotion 2015 d'Electrotechnique,*

*Tous ceux qui me sont chers.*

*Toufik.*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mon père, ma mère, mes frères et mes sœurs,*

*Tous mes proches,*

*Tous mes amis,*

*Toute la promotion 2015 d'Electrotechnique,*

*Tous ceux qui me sont chers.*

*Koceila.*

## **Sommaire :**

Introduction générale.....1

### **Chapitre I : Généralités sur la conversion de l'énergie éolienne :**

I.1. Introduction.....5

I.2. Quelques notions sur le vent.....6

I.3. Différents types d'éoliens et leur utilisation.....6

I.a. Eoliennes à axe vertical.....6

I.a.1. Eoliennes de types Savonius.....6

I.a.2. Eoliennes de types Darieus.....7

I.b. Eoliennes à axe horizontal.....8

I.b.1. Eoliennes lentes .....8

I.b.2. Eoliennes rapides.....8

I.4. Description d'une éolienne.....8

I.4.1. Principe de fonctionnement.....8

I.4.2. Principaux composants d'une éolienne.....9

I.5. Modélisation d'une éolienne.....11

I.5.1. Modèle de la partie mécanique.....11

I.5.2. Modèle aérodynamique de la vitesse du vent.....12

I.6. Conclusion.....13

### **Chapitre II : Modélisation d'une machine à courant continu :**

II.1. Introduction.....15

II.2. Description d'un moteur à courant continu .....15

II.2.1. Principe de fonctionnement .....15

II.2.2. Modélisation de la machine à courant continu .....16

II.2.3. Schéma bloc.....17

II.3. Résultats de simulation.....	17
II.3.1. Machine à courant continu à excitation indépendante de 3kW.....	17
II.3.2 Machine à courant continu à excitation indépendante de 175W.....	19
II.4 Interprétation des résultats.....	21
II.5 Conclusion.....	21
<b>Chapitre III : Identification des paramètres d'une machine à courant continu</b>	
III.1 Introduction.....	23
III.2 Identification des paramètres d'un moteur à courant continu.....	23
III.3 La méthode classique.....	23
III.3.1 Mesure des résistances $R_a$ et $R_f$ .....	23
III.3.2 Mesure des inductances propres $L_a$ et $L_f$ .....	23
III.3.3 Détermination de la constante de la $F_{cem}$ .....	24
III.3.4 Détermination des paramètres mécaniques.....	24
III.3.4.1 Détermination du couple de frottement sec et du coefficient de frottement visqueux .....	24
III.3.4.2 Détermination du moment d'inertie.....	25
III.4 Les essais expérimentaux.....	26
III.4.1 : Machine de 3KW.....	26
III.4.1.1 Détermination des résistances $R_a$ et $R_f$ .....	26
III.4.1.2 Détermination des inductances $L_a$ et $L_f$ .....	27
III.4.1.3 Détermination de la constante de la $F_{cem}$ .....	29
III.4.1.4 Détermination du couple statique $C_s$ et du coefficient de frottements $f$ .....	30
III.4.1.5 Détermination de l'inertie des masses tournantes.....	31
III.4.2 Machine de 175 w.....	32
III.4.2.1 Détermination des résistances $R_a$ et $R_f$ .....	32
III.4.2.2 Détermination des inductances $L_a$ et $L_f$ .....	33
III.4.2.3 Détermination de la constante de la $F_{cém}$ .....	33

III.4.2.4 Identification du couple statique $C_s$ et du coefficient de frottements $f$ .....	34
III.4.2.5 Identification de l'inertie des masses tournantes.....	35
III.5 Tableau récapitulatif .....	36
III.6 Conclusion.....	36
<b>Chapitre IV : Régulation de vitesse d'une machine à courant continu</b>	
IV.1 Introduction.....	38
IV.2 Principe de la régulation de vitesse des machines à courant continu.....	38
IV.3 Dimensionnement des paramètres des régulateurs.....	38
IV.3.1 Structure de commande PI.....	39
IV.3.2 Méthode de compensation des pôles.....	39
IV.4 Calcul des régulateurs.....	40
IV.4.1 Machine de 3kW.....	40
IV.4.1.1 Calcul du régulateur de courant.....	40
IV.4.1.2 Calcul du régulateur de vitesse.....	43
IV.4.2 Machine de 175W.....	46
IV.4.2.1 Calcul du régulateur de courant.....	46
IV.4.2.2 Calcul du régulateur de vitesse.....	46
IV.5 Résultats de la simulation avec régulation.....	48
IV.5.1 Allure de la consigne de vitesse.....	48
IV.5.2 Résultats de la machine de 3kW.....	49
IV.5.3 Résultats de la machine de 175W.....	50
IV.5.4 Interprétation des résultats.....	50
IV.6 Conclusion.....	51
Conclusion générale.....	53

# **Introduction générale**

## Introduction générale

L'augmentation des populations et le développement que le monde a connu dans le domaine de l'industrie ces dernières années favorisent une demande importante d'électricité. Dans les pays industrialisés cette demande est trop élevée, ce qui entraîne un recours systématique aux combustibles fossiles, tels que le pétrole, le charbon et le gaz naturel pour les plus répandus, mais conduit à un dégagement massif de gaz polluants. Il est à savoir que les sources de ces combustibles restent non renouvelables et limitées à long terme, ce qui engendre un coût prépondérant de ceux-ci

L'énergie de fission nucléaire, qui ne rejette directement pas de gaz carbonique, souffre généralement d'une mauvaise image médiatique. Certes les risques d'accident lié à leur exploitation sont très faibles, mais les conséquences d'un accident, même très peu probable, seraient désastreuses, (comme la catastrophe de Tchernobyl du 26 avril 1986 qui reste gravée dans la mémoire commune et celle de Fukushima au Japon en mars 2011). Le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures.

Face à ce dilemme, il s'avère nécessaire de faire appel à des sources d'énergie nouvelles qui seront sans conséquence pour l'homme et l'environnement. C'est ainsi que les pays industrialisés se sont lancés dans le développement et l'utilisation des sources d'énergie renouvelables comme le solaire, la biomasse, la géothermie, la marémotrice, l'hydraulique,... Parmi ces sources d'énergie, l'éolienne représente un potentiel assez important non pas pour remplacer les énergies existantes mais pour palier à l'amortissement de la demande de plus en plus galopante.

Aujourd'hui, beaucoup de travaux de recherche portent sur l'intégration et les impacts de l'énergie éolienne sur les réseaux de distribution. Plusieurs technologies de génératrices éoliennes sont actuellement proposées sur le marché:

- la structure à base de machine asynchrone à cage connectée directement au réseau : solution simple et robuste, c'est la structure la plus ancienne. (éoliennes à vitesse fixe).
- la structure à base de machine synchrone à aimants permanents ou à inducteur, connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance dimensionnée à environ 100% de la puissance nominale.
- la structure à base de machine asynchrone à double alimentation, pour laquelle le rotor est connecté au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance dimensionnée à environ 30% de la puissance nominale. Le stator est quant à lui connecté directement au réseau (éoliennes à vitesse variable).

Le développement et la multiplication des éoliennes ont conduit les chercheurs en Génie Electrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie. Les études menées sur les systèmes éoliens dans les laboratoires n'utilisent pas directement les éoliennes mais plutôt leurs émulateurs. Ces derniers sont majoritairement des moteurs à courant continu, vu leur souplesse et leur facilité de réglage. C'est dans ce cadre que se situe le mémoire que nous présentons qui se propose d'étudier l'utilisation des moteurs à courant continu comme émulateurs dans un système éolien. En effet, le laboratoire LATAGE, envisage de construire deux bancs d'essais de système éolien. Le premier est à base d'une machine asynchrone auto-excitée d'une

puissance de 3kW et le second est à base d'un alternateur d'une puissance de 175W. Notre travail d'identification et d'étude par simulation est une étude préalable à une réalisation pratique. C'est ainsi que nous avons subdivisé notre mémoire en quatre chapitres

Le premier chapitre est consacré à la description et la modélisation du système éolien à travers les équations et les concepts physiques régissant son fonctionnement.

Le second chapitre présente une étude sur la modélisation de moteur à courant continu par le biais d'équations électriques et mécaniques. Ces deux groupes d'équations nous permettront de mieux appréhender la machine à courant continu dans son fonctionnement réel.

Le troisième chapitre est dédié à l'identification des paramètres électriques et mécaniques de deux machines à courant continu de puissances différentes (3kW et 175W).

Le quatrième chapitre est consacré au calcul et au test par simulation d'un régulateur de vitesse d'un moteur à courant continu.

Nous terminons ce mémoire par une conclusion générale regroupant nos principaux résultats et dressant une liste de quelques travaux futurs jugés intéressants à réaliser.

# **Chapitre I : généralités sur la conversion de l'énergie éolienne**

## I.1 Introduction :

L'énergie éolienne est une nouvelle source d'électricité qui connaît l'une des croissances les plus rapides dans le monde. En 2011, la capacité mondiale d'énergie éolienne a augmenté de 20%, l'industrie de l'éolienne ayant installé un niveau record d'un peu plus de 41000 MW de nouvelle énergie propre et fiable. Aujourd'hui on compte près de 15000 éoliennes en activité à l'échelle mondiale dans 89 pays.

L'Algérie à l'instar des autres pays essaye de percer dans le domaine des énergies renouvelables et l'énergie éolienne en particulier et ce en donnant beaucoup d'importance à l'étude réalisée dans ce domaine notamment celle qui est dédiée au cas algérien malgré la prédominance de l'énergie solaire. Une étude préliminaire de l'évolution saisonnière et annuelle de la vitesse moyenne du vent a permis de faire une première identification des régions ventées de l'Algérie. Cette représentation sous forme de cartes à deux objectifs : le premier et d'identifier les vastes régions avec de bonne promesse d'exploitation de l'énergie éolienne, le second et de mettre en évidence la variation relative de la ressource à travers le pays. [1]

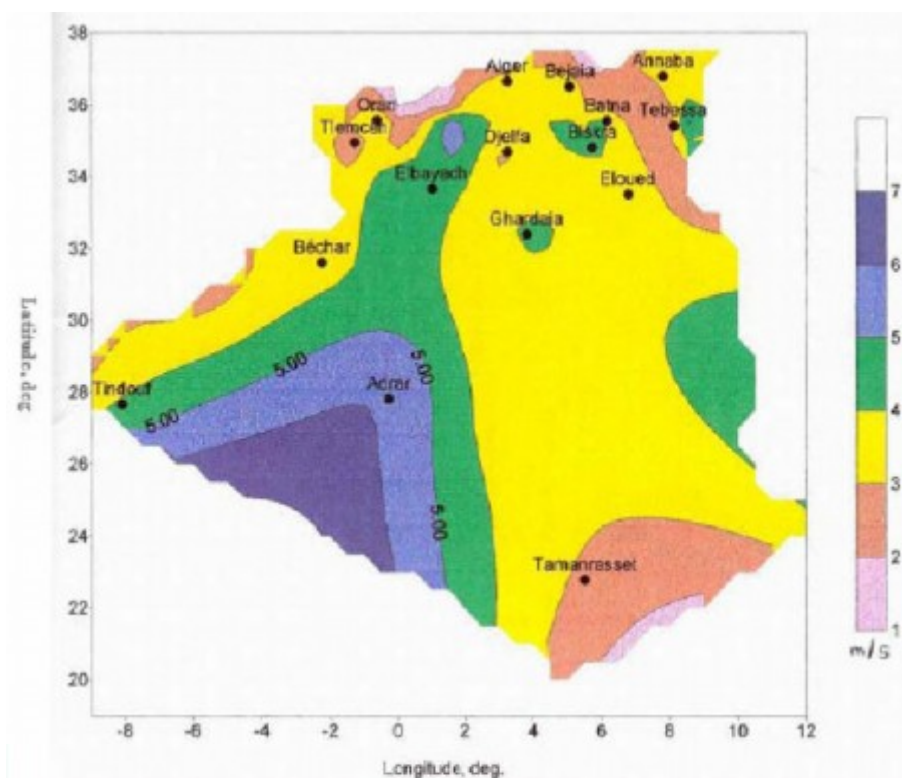


Figure I.1 : Carte du potentiel éolien en Algérie [10].

Cette carte permet de cibler les zones les plus ventées pour installer les parcs éoliens en vue d'alimenter des régions les plus isolées ou de permettre à la région qui baigne dans le vent d'avoir une autonomie énergétique par rapport au réseau national déjà très chargé.

Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou capteur à axe horizontal) et leurs structures sont de plus en plus performantes. En effet il existe deux types d'éoliennes à savoir les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal.

## **I.2 Quelques notions sur le vent :**

L'origine du vent est complexe. On peut cependant dégager 2 phénomènes prédominants :

- La Terre est chauffée par le Soleil. De part la nature même du mouvement terrestre, les pôles reçoivent moins de chaleur que l'équateur.
- Les terres émergées se réchauffent (et refroidissent) plus vite que ne le font les mers et les océans.

Le gradient de température ainsi créé entraîne un flux de convection atmosphérique. L'énergie contenue dans le vent se trouve principalement à haute altitude, où des vents continus pouvant atteindre des vitesses de 160 km/h apparaissent. L'énergie contenue dans le vent est partiellement transformée en chaleur par friction avec la surface du sol permettant une diffusion de chaleur à travers le globe [2].

## **I.3 Différents types d'éoliennes et leur utilisation :**

On peut classer les éoliennes en deux grandes familles: les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal. Les éoliennes à axe vertical et les éoliennes lentes à axe horizontal sont utilisées pour pomper de l'eau et les éoliennes rapides à axe horizontal sont utilisées pour la production d'énergie électrique.

### **a) Eoliennes 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 axe horizontal. Silencieuses, les éoliennes à axe vertical peuvent être installées sur les toits d'une résidence, d'un bâtiment commercial, ou d'une usine. On peut citer deux types d'éoliennes à axe vertical : Savonius, Darrieus.

#### **a.1 Eoliennes de type savonius :**

Le fonctionnement du rotor de savonius est basé sur un couple aérodynamique induit par une déflexion de l'écoulement sur les pales. Le type savonius est constitué schématiquement (figure I.2) de deux ou plusieurs godets demi-cylindriques qui tournent sur un même axe. Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. Cette éolienne est caractérisée par sa forme esthétique et par sa faible vitesse de démarrage (2 à 3 m/s)

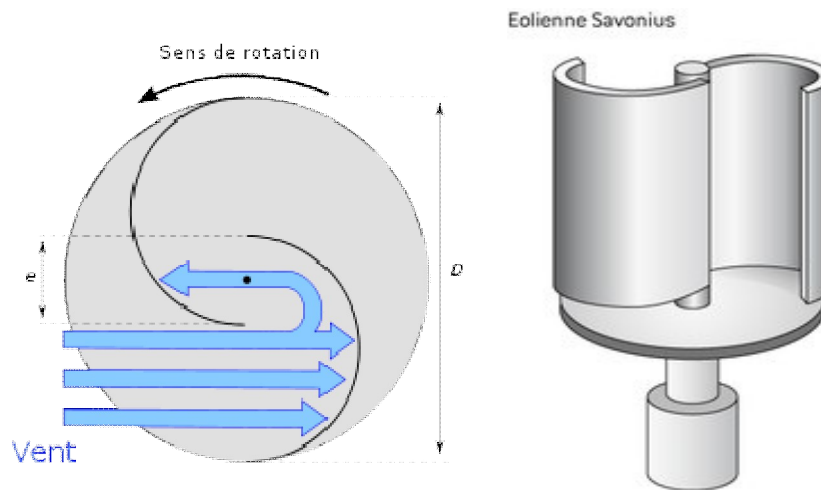


Figure I.2 : Eolienne de type Savonius

**a.2 Eoliennes de type Darieus :**

Elle ne peut pas démarrer toute seule. Son fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces d'intensités et de directions variables (traînée et portance). En fait, les différents angles auxquels sont soumis les profils, proviennent de la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil (en rotation autour de l'axe vertical) et de la vitesse du vent incident (Figure I.3) [3].

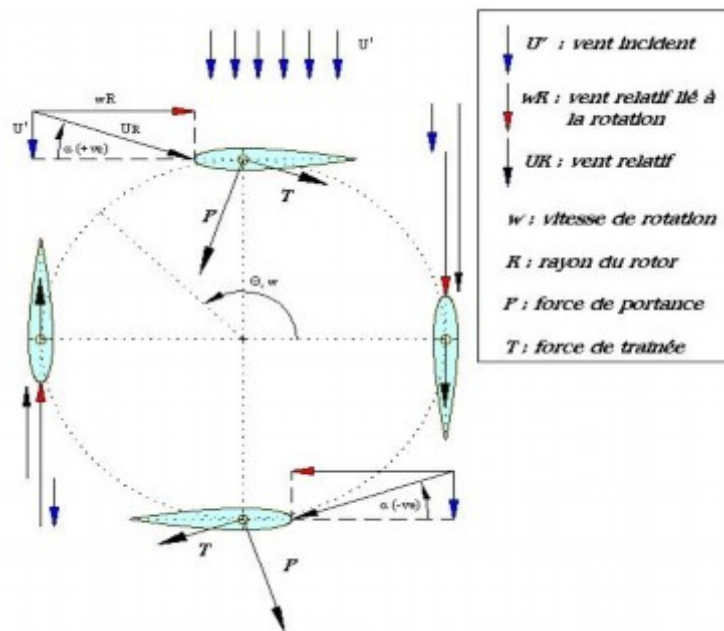


Figure I.3 : éolienne de Darrieus.

**b) Eoliennes à axe horizontal :**

Le principe de l'éolienne à axe horizontal ou (éolienne à hélices) est simple et rappelle celui du moulin à vent. Les pales sont fixées au sommet d'un pylon et sont orientées face ou dos au vent, ce qui permet des rendements élevés.

**b.1 Eoliennes lentes :**

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Ces éoliennes multi-pales sont surtout adaptées aux vents de faible vitesse. Elles démarrent à vide pour des vents de l'ordre de 2 à 3 m/s et leurs couples de démarrage sont relativement forts. Cependant elles sont moins efficaces que les éoliennes rapides et sont surtout utilisées pour le pompage d'eau. La puissance maximale susceptible d'être obtenue par ce type de machine peut se calculer en fonction du diamètre par l'expression suivante [4] :

$$P = 0,15. D^2. V^3 \quad (I.1)$$

La puissance étant exprimée en Watts, le diamètre en mètre et la vitesse du vent en m/s.

**b.2 Éoliennes rapides :**

Les éoliennes rapides ont un nombre de pales assez réduit, qui varie en général entre 2 et 4 pales. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids (moins lourdes comparées à une éolienne lente de même puissance) et de leur rendement élevé. Elles présentent, par contre, l'inconvénient de démarrer difficilement. Leurs vitesses de rotation sont beaucoup plus élevées que pour les machines précédentes et sont d'autant plus grandes que le nombre de pales est faible.

**I.4 Description d'une éolienne :****4.1) Principe de fonctionnement :**

Un aérogénérateur appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

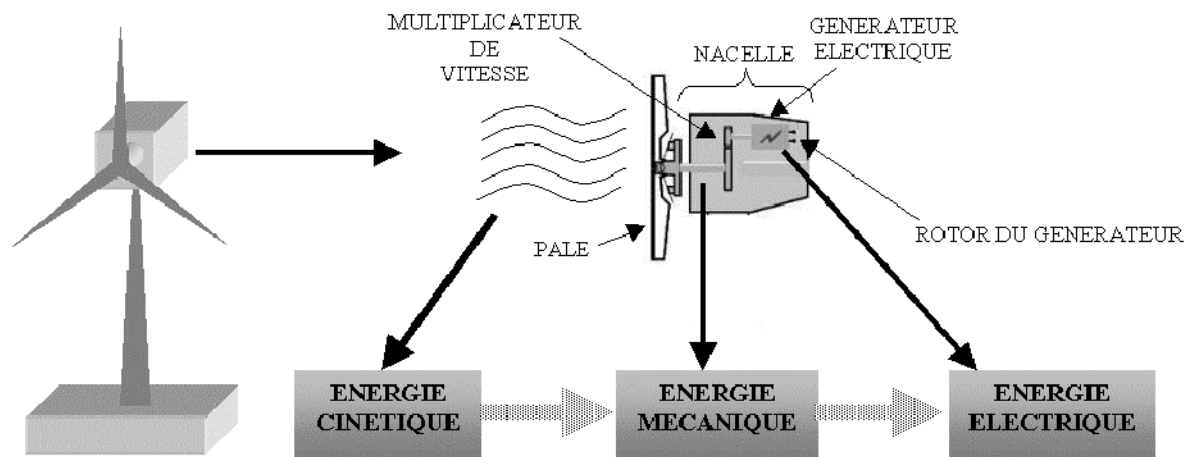


Figure I.4 : Principe de conversion d'énergie éolienne

#### 4.2) Principaux composants d'une éolienne :

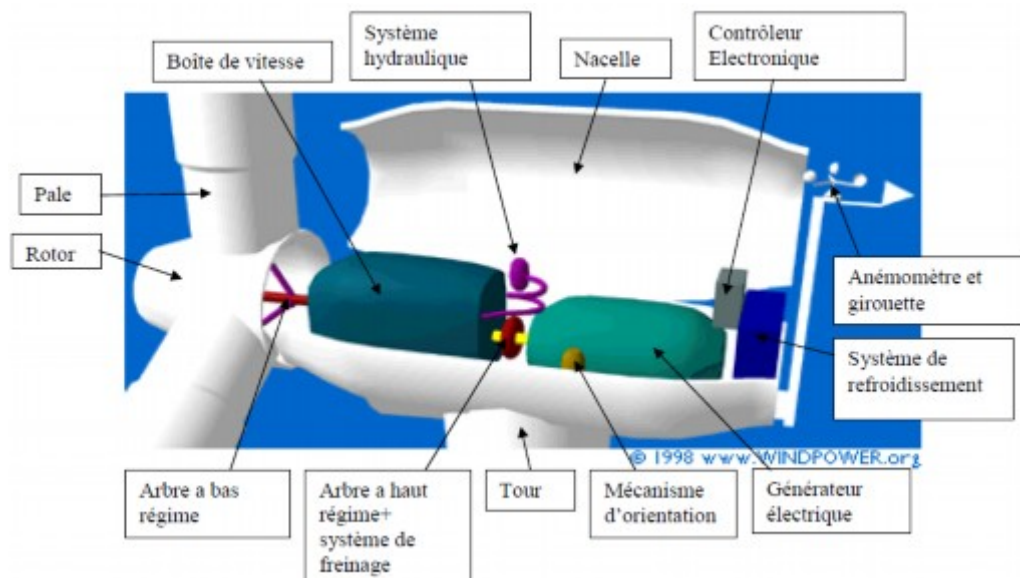


Figure I.5 : Principaux composants de l'éolienne moderne

Une éolienne rapide est constituée principalement de plusieurs parties : les pales (entre 1 et 3), la nacelle et la tour, le mécanisme d'orientation des pales, la boîte de vitesses, l'anémomètre et la girouette.

- 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.

- La nacelle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : les arbres lent et rapide, les roulements, le 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 est 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 des pales 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) [5].
- Mécanisme d'orientation : il permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent pour maintenir une puissance sensiblement constante dans la zone de vitesse. On dit que l'éolienne possède une erreur d'orientation lorsqu'elle n'est pas tournée perpendiculairement au sens du vent.
- Boite de vitesse : la boîte de vitesse est un système de puissance qui permet de réduire ou d'augmenter la vitesse de rotation d'un mécanisme. La puissance provenant de la rotation du rotor est transmise au générateur par le biais de 2 arbres de transmission et de la boîte de vitesse. Ce dispositif permet de multiplier la vitesse de rotation de l'arbre primaire (rotor) et facilite par la même l'exploitation du générateur de manière optimale.
- Anémomètre et girouette : l'anémomètre mesure la vitesse du vent durant le fonctionnement ; il est muni d'un capteur mécanique qui tourne en fonction de la puissance du vent. Si le vent est trop fort, l'éolienne risque de se casser c'est pour quoi l'éolienne est arrêtée lorsque la vitesse et

supérieure à 25m/s. Il est généralement couplé à une girouette permettant de déterminer la direction du vent, les informations récoltées sont transmises au mécanisme d'orientation pour placer l'éolienne dans la meilleure position.

- Système de refroidissement : les générateurs nécessitent la mise en place d'un système de refroidissement pour leur bon fonctionnement. Dans la plupart des éoliennes, le refroidissement se fait en plaçant le générateur dans un conduit d'air frais. Certains fabricants utilisent un refroidissement par eau.

## I.5) Modélisation d'une turbine éolienne :

### I.5.1 Modèle de la partie mécanique :

La partie mécanique de la turbine comprend trois pales orientables et de longueur  $R$ . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse de rotation  $\Omega_t$ , relié à un multiplicateur de gain  $G$ . Ce multiplicateur entraîne la génératrice électrique. Les trois pales sont considérées identiques. De plus, on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces de poussée. Ainsi, on peut modéliser l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques.

De part la conception aérodynamique des pales, nous considérons que leur coefficient de frottement par rapport à l'air est très faible et peut être négligé. De même, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement seront négligeables devant les pertes par frottements du côté de la génératrice.

Sur la base de ces hypothèses, on obtient alors un modèle mécanique constitué de deux masses comme l'illustre la Figure I.6 [6].

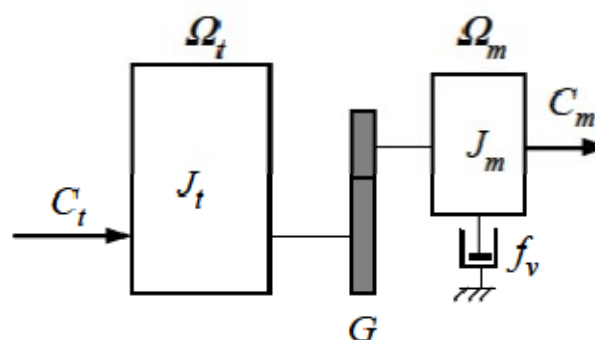


Figure I.6 :Modèle mécanique simplifié de la turbine.

Avec :

- $J_t$ : le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales de l'éolienne.
- $J_m$ : le moment d'inertie de l'arbre de la turbine.
- $f_v$ : le coefficient dû aux frottements visqueux des pales de la turbine.
- Le couple exercé par le vent sur l'arbre de la turbine (ou couple mécanique à la sortie de la turbine) s'exprime comme suit :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} \quad (I.2)$$

- Le couple mécanique sur l'arbre de la turbine est donné par l'expression suivante :

$$C_m = \frac{C_t}{G} \quad (I.3)$$

- La vitesse de rotation de la turbine est donnée par :

$$\Omega_m = G\Omega_t \quad (I.4)$$

### I.5.2 Modèle aérodynamique de la vitesse du vent

La ressource en vent, du point de vue de sa distribution statique, est primordiale dans un projet éolien et constitue un facteur déterminant pour le calcul de la production de l'électricité et de la rentabilité. Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion de l'énergie, car la puissance de la turbine (puissance aérodynamique), dans les conditions optimales, évolue au cube de la vitesse du vent. La vitesse du vent est un vecteur tridimensionnel. Dans ce travail, la direction du vecteur de la vitesse du vent se limite à une seule dimension [7]. Il peut être modélisé par une valeur moyenne et une somme de plusieurs harmoniques [8] comme suit :

$$v = A_v + \sum_{k=1}^n a_k + \sin(w_k t) \quad (I.5)$$

Où  $A_v$  est la valeur moyenne,  $a_k$  et  $w_k$  sont respectivement l'amplitude et la fréquence de l'harmonique d'ordre  $k$ . La puissance cinétique du vent peut être décrite par l'équation (I.6) suivante [9] :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 \quad (I.6)$$

Où  $v$  est la vitesse du vent (m/s),  $\rho$  est la masse volumique de l'air (approximativement  $1.225 \text{ kg/m}^3$  à la pression atmosphérique et à  $15^\circ\text{C}$ ) et  $R$  est la longueur d'une pale ou le rayon de l'aérogénérateur (m).

L'éolienne ne pouvant récupérer qu'une fraction de la puissance du vent et la puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors :

$$P_t = \frac{1}{2} \rho C_p(\lambda, \beta) \pi R^2 v^3 \quad (I.7)$$

Où  $C_p(\lambda)$  est le coefficient de puissance qui représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine.

La vitesse relative  $\lambda$  (en anglo-saxon tip speed ratio) est définie comme étant le rapport entre la vitesse linéaire des pales ( $\Omega_t R$ ) et la vitesse du vent ( $v$ ), son équation est donnée par :

$$\lambda = \frac{(\Omega_t R)}{v} \quad (I.8)$$

## I.6 Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons donné une vue d'ensemble des différentes turbines éoliennes utilisées dans l'industrie moderne pour la production d'énergie électrique. Afin d'arriver à une meilleure compréhension du fonctionnement des turbines éoliennes, partant de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine (Loi de Betz), nous avons décrit de façon explicite les différents éléments constitutifs de la turbine ainsi que le mode de régulation de la vitesse de rotation. Enfin nous avons établi un modèle mathématique de la turbine à partir de ses équations caractéristiques. Il est à noter que pour qu'un projet éolien soit rentable, il est essentiel de s'assurer que l'on dispose d'une ressource suffisante car la vitesse moyenne du vent sur un site est un facteur déterminant du fait que l'énergie produite varie proportionnellement au cube de cette vitesse. Un site idéal bénéficie de vents assez forts et constants.

Dans ce qui suit nous allons établir un modèle Matlab-Simulink d'une machine à courant continu que nous utiliserons comme émulateur d'une turbine éolienne.

**Chapitre II :**  
**modélisation d'une**  
**machine à courant**  
**continu à excitation**  
**indépendante**

## II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux moteurs à courant continu, car ils sont facilement commandables contrairement à leurs homologues à courant alternatif. En effet, nous désirons réaliser des émulateurs de turbines éoliennes destinés à être insérés dans une chaîne complète de conversion de l'énergie éolienne. Le moteur à courant continu commandé en vitesse nous paraît comme étant le moyen le plus simple et le plus souple pour réaliser notre objectif, surtout si une réalisation expérimentale est demandée.

## II.2 Description d'un moteur à courant continu

Un moteur à courant continu est un convertisseur électromécanique permettant la conversion bidirectionnelle d'énergie entre une installation électrique parcourue par un courant continu et un dispositif mécanique.

Un moteur électrique à courant continu (figure II.1) est constitué :

D'un stator qui est à l'origine de la circulation d'un flux magnétique longitudinal fixe créé soit par des enroulements statoriques (bobinage) soit par des aimants permanents. Le stator est aussi appelé inducteur.

D'un rotor bobiné relié à un collecteur rotatif inversant la polarité dans chaque enroulement rotorique au moins une fois par tour, de façon à faire circuler un flux magnétique transversal en quadrature avec le flux statorique. Les enroulements rotoriques sont aussi appelés enroulements d'induits, ou communément induit [13].

Le système balais-collecteur joue le rôle de redresseur mécanique.

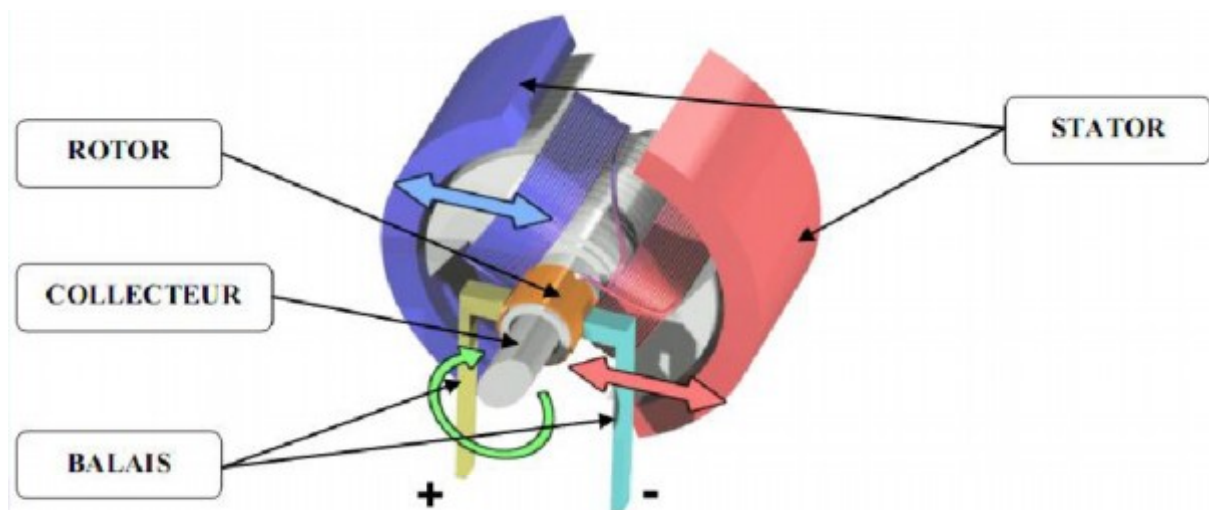


Figure II.1 : Schéma d'un moteur à courant continu[13].

### II.2.1 Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement d'une MCC est basé sur le principe des forces de Laplace.

Un conducteur de longueur  $L$ , placé dans un champ magnétique et parcouru par un courant continu, est soumis à une force électromagnétique appelée force de Laplace (figure II.2).

Dans le Moteur à courant continu, le champ magnétique est produit par un inducteur, les conducteurs cités précédemment sont ici des spires placées dans l'induit. Lorsqu'on alimente les spires embrassées par le flux magnétique de l'inducteur il se crée sur celle-ci des forces électromagnétiques qui entraînent un déplacement angulaire de l'induit. Le collecteur alimente ensuite une autre spire et ce phénomène se produit tant que le moteur est alimenté. L'induit entraîne alors le rotor en mouvement en lui transmettant son couple.

Pour inverser le sens de rotation d'un Moteur à courant continu, il suffit d'inverser le sens du courant dans l'induit ou dans l'inducteur.

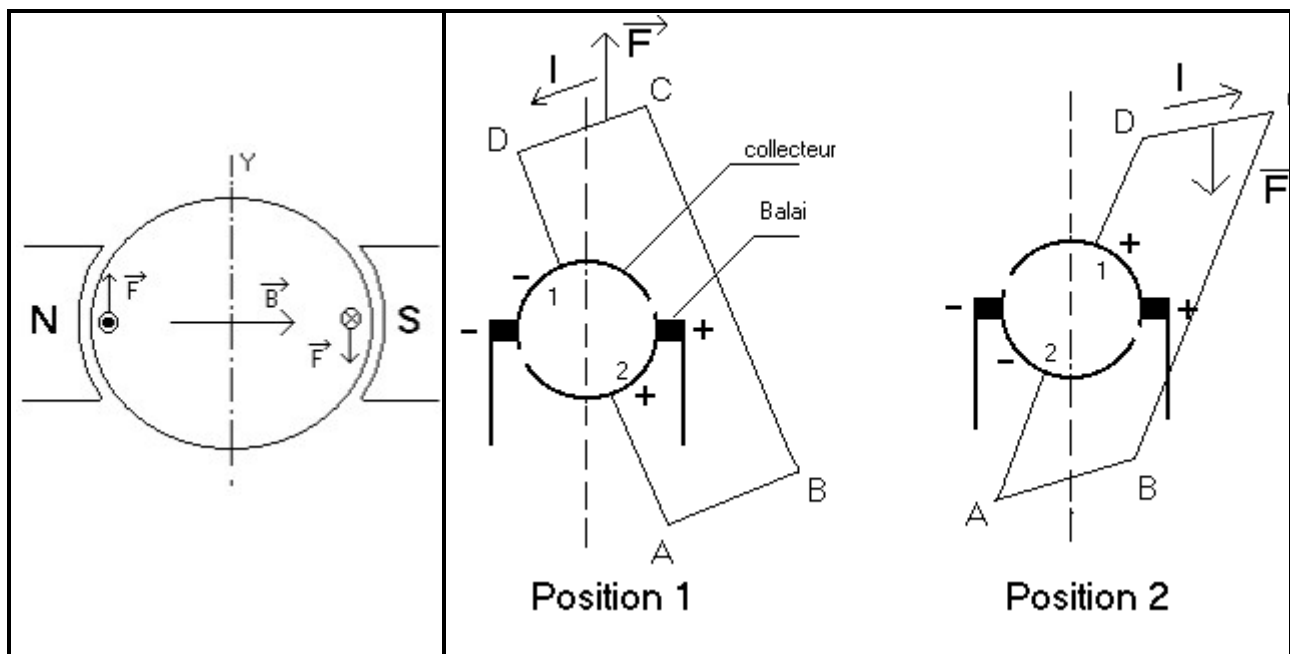


Figure II 2 : schéma simplifié du principe de fonctionnement.

## II.2.2 Modélisation de la machine à courant continu :

- Equations électriques :

$$V_f = R_f \cdot I_f + L_f \frac{dI_f}{dt} \quad (\text{II.1})$$

$$\frac{dI_f}{dt} = \frac{1}{L_f} (V_f - R_f \cdot I_f) \quad (\text{II.2})$$

$$V_a = M_{fd} \cdot \omega_r I_f + R \cdot I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} \quad (\text{II.3})$$

$$\frac{dI_a}{dt} = \frac{1}{L_a} (L_a - M_{fd} \cdot \omega_r I_f - R \cdot I_a) \quad (\text{II.4})$$

- **Expression du couple électromagnétique :**

$$C_{em} = M_{fd} \cdot I_f \cdot I_a \quad (\text{II.5})$$

- **Equation du mouvement du moteur entrainant une charge de couple résistant  $C_{r0}$  :**

$$C_{em} - C_{r0} - F \cdot \omega_r = J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (\text{II.6})$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{(M_{fd} \cdot I_f I_a - C_{r0} - F \cdot \omega_r)}{J} \quad (\text{II.7})$$

Si  $I_f = C^{ste}$

On pose  $K_m = M_{fd} \cdot I_f$

### II.2.3 Schéma bloc :

Si on considère comme grandeurs d'entrée la tension appliquée aux bornes de l'induit et le couple résistant et comme grandeurs de sortie la vitesse de rotation du moteur, le courant absorbé et le couple électromagnétique, nous obtenons le schéma bloc permettant de construire le modèle Matlab-Simulink (figure II.3) du moteur à courant continu.

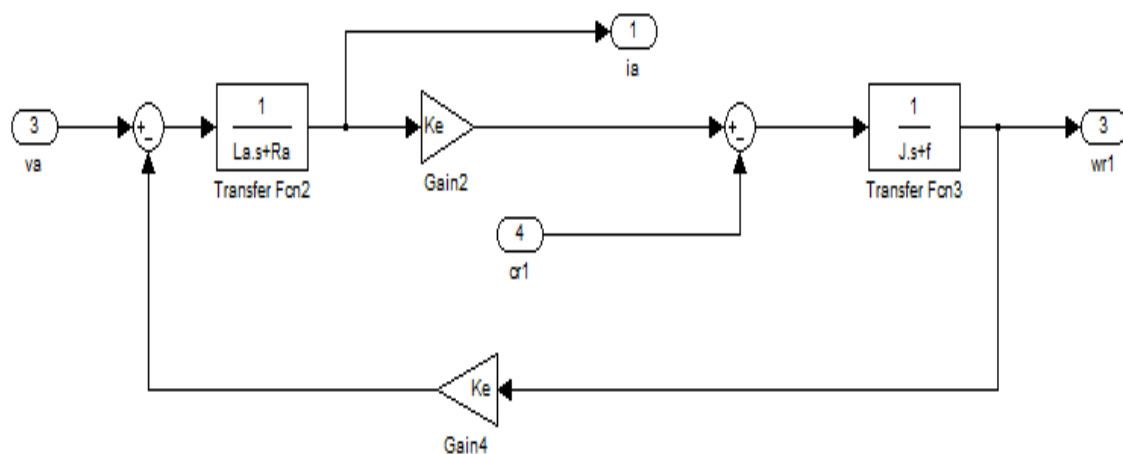


Figure II.3 : Schéma Matlab-Simulink d'un moteur à courant continu

### II.3 Résultats de simulation :

#### II.3.1 machine à courant continu à excitation indépendante de 3kW:

En utilisant le schéma Matlab-simulink du moteur à courant continu, associé à un programme Script Matlab, pour introduire les valeurs des paramètres du moteur, nous pouvons réaliser différentes simulations, telles le démarrage en pleine tension ou l'action d'un couple résistant.

- **Paramètres de la machine à courant continu à 3kW :**

Tension d'induit :

$V_a=220$  (V)

Résistance et inductance d'induit :

$R_a=1.35$  ( $\Omega$ )

$L_a=0.0059$  (H)

Résistance et inductance de l'inducteur :

$R_f=65.15$  ( $\Omega$ )

$L_f=8.35$  (H)

Mutuelle inductance entre induit et inducteur :

$M_{fd}=1.07$  (H)

Coefficient du couple :

$K_e=1.41$  (V.rd/s)

Coefficient de frottement :

$f=0.0045$  (Nm.rd/s)

Inertie des masses tournantes :

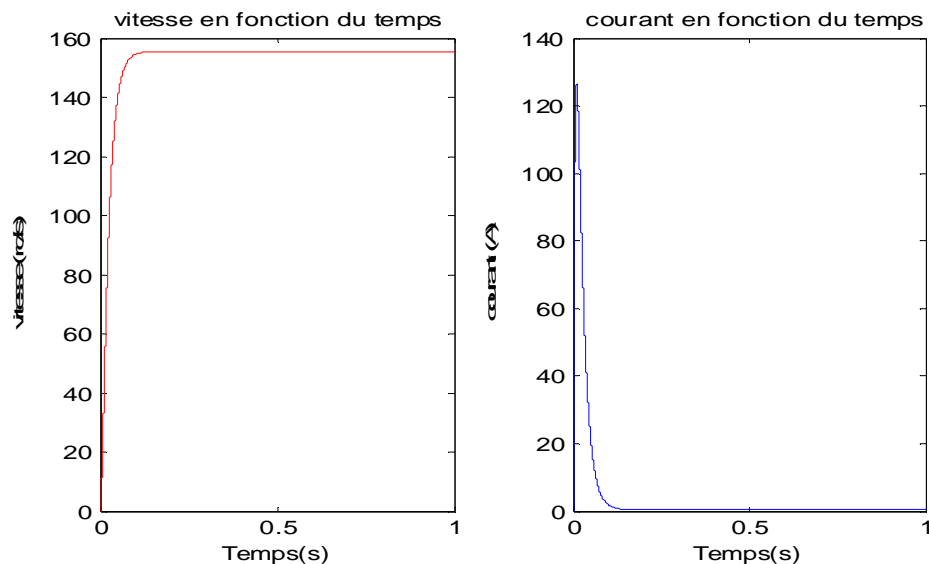
$J=0.036$  (Kg.m<sup>2</sup>)

Couple résistant externe :

$C_r=30$  (Nm)

Après avoir lancé la simulation, on obtient les résultats suivants :

- Démarrage en pleine tension, sans couple résistant :



**Figure II.4 :** Vitesse et courant sans couple ( $c_r$ ).

- Démarrage en pleine tension, application d'un couple résistant à  $t=0.5s$ :

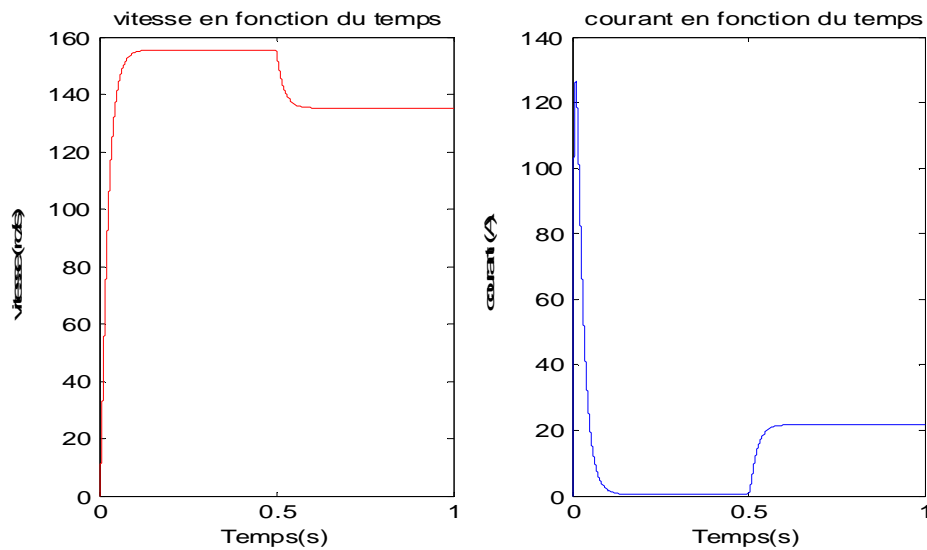


Figure II.6 : Vitesse et courant avec couple résistant ( $cr$ ).

### II.3.2 machine à courant continu à excitation indépendante de 175W:

- Paramètres de la machine à courant continu à 3kW :

Tension d'induit :

$$V_a = 220 \text{ (V)}$$

Résistance et inductance d'induit :

$$R_a = 30 \text{ (\Omega)}$$

$$L_a = 1.05 \text{ (H)}$$

Résistance et inductance de l'inducteur :

$$R_f = 1050 \text{ (\Omega)}$$

$$L_f = 8.65 \text{ (H)}$$

Mutuelle inductance entre induit et inducteur :

$$M_{fd} = 6.95 \text{ (H)}$$

Coefficient du couple :

$$K_e = 1.41 \text{ (V.rd/s)}$$

Coefficient de frottement :

$$f = 2.2 \cdot 10^{-3} \text{ (Nm.rd/s)}$$

Inertie des masses tournantes :

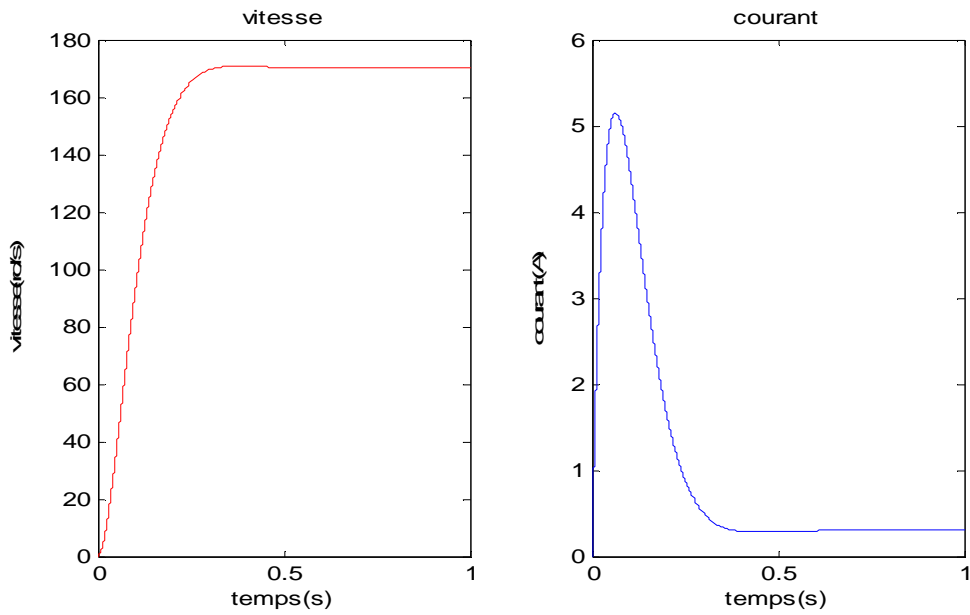
$$J = 5.5 \cdot 10^{-3} \text{ (Kg.m}^2\text{)}$$

Couple résistant externe :

$$C_r = 1 \text{ (Nm)}$$

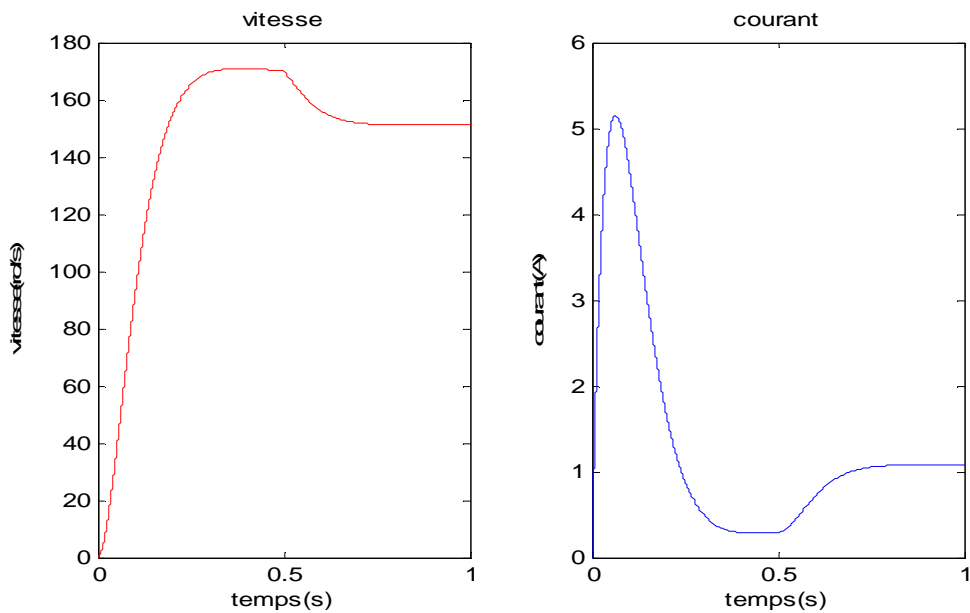
Après avoir lancé la simulation on obtient les résultats suivants :

-Sans couple résistant :



**Figure II.7 :** Vitesse et courant sans couple résistant.

-Action d'un couple résistant d'amplitude  $C_r=1\text{Nm}$ , agissant à l'instant  $t=0.5\text{s}$  :



**Figure II.8 :** Vitesse et courant avec couple résistant.

#### II.4 Interprétation des résultats :

Dans cet essai, l'inducteur est supposé déjà magnétisé et le courant inducteur a déjà atteint son régime permanent et reste constant. Lors du démarrage, aux instants voisins de 0, c'est-à-dire tant que la vitesse de rotation n'a pas atteint sa valeur finale, nous observons un fort appel de courant. Ce dernier est nécessaire au moteur pour faire tourner son inertie. En effet, en considérant l'équation électrique de l'induit suivante :

$$V_a = M_{fd} \cdot \omega_r I_f + R \cdot I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} \quad (\text{II.8})$$

Nous constatons qu'à vitesse nulle ou très faible, le courant d'induit n'est limité que par la résistance de l'induit  $R$ , très faible. Le courant par conséquent est très grand au démarrage. Par contre, au fur et à mesure que la vitesse s'établit, la  $F_{cem}$  du moteur  $M_{fd} \cdot \omega_r I_f$  augmente et limite le courant d'induit qui s'établit en régime permanent à une faible valeur correspondant à l'équilibre entre le couple moteur et le couple résistant, soit l'équation suivante :

$$M_{fd} \cdot I_f \cdot I_a - C_{r0} - F \cdot \omega_r = 0 \quad (\text{II.9})$$

La vitesse s'établit à une valeur dictée par l'équation électrique d'induit en régime permanent :

$$V_a = M_{fd} \cdot \omega_r I_f + R \cdot I_a \quad (\text{II.10})$$

En appliquant un couple résistant, nous constatons que le courant d'induit augmente toujours pour réaliser l'équilibre entre le couple moteur et le couple résistant. La vitesse diminue toujours en vertu de la même équation électrique de l'induit. En effet en considérant l'équation d'induit ; à tension  $V_a$  constante, si le courant  $I_a$  augmente, la vitesse ne peut que chuter.

Les allures de courbes sont les mêmes pour les deux moteurs, la différence réside dans les amplitudes en régime permanent et dans les dynamiques des courants, des couples et des vitesses.

#### II.5 Conclusion:

Dans ce chapitre, après avoir présenté des différents éléments constituant une machine à courant continu ainsi que son principe de fonctionnement, nous avons établi les équations électriques et mécaniques de la machine qui nous ont permis de construire son schéma Matlab-simulink. Nous avons testé ce modèle par des essais en simulation sur deux machines à courant continu de puissances respectives 3kW et 175W.

Nous nous intéresserons dans le prochain chapitre à l'identification des paramètres électriques et mécaniques de ces deux moteurs.

# **Chapitre III :**

## **identification des**

### **paramètres d'une**

#### **machine à courant**

##### **continu**

### III.1 Introduction

L'identification des paramètres d'un système donné est une opération primordiale. Sans les valeurs de leurs paramètres, les modèles sont inutilisables et sans les valeurs des paramètres des moteurs à courant continu, le calcul des régulateurs devient difficile. C'est ainsi que nous avons consacré ce chapitre à l'identification des paramètres électriques et mécanique d'un moteur à courant continu. Nous avons choisi deux moteurs à courant continu de puissances différentes ; le premier est d'une puissance de 3kW et le second est d'une très faible puissance, à savoir 175W.

Le choix de ces deux moteurs a un double objectif : le premier est de savoir jusqu'à quelle puissance le modèle reste-t-il fiable, le second est de tester les deux moteurs pour savoir lequel répond correctement en termes de rapidité et de précision au profil de vitesse imposé.

### III.2 Identification des paramètres d'un moteur à courant continu :

Il existe plusieurs méthodes d'identification des paramètres des machines à courant continu, parmi ces méthodes nous citons :

- La méthode de Pasek.
- La méthode directe dite méthode classique.

On procédera ensuite à la détermination de ces paramètres par la méthode classique.

### III.3 La méthode classique :

Cette méthode consiste à exploiter des essais expérimentaux en régime permanent sur la machine.

#### III.3.1 Mesure des résistances $R_a$ et $R_f$ :

Les résistances de l'induit et de l'inducteur sont mesurées à chaud par la méthode volt-ampérométrique en courant continu, les mesures s'effectuent à différentes valeurs de l'intensité (jusqu'à 30% du courant nominal pour éviter l'échauffement de la machine).

#### III.3.2 Mesure des inductances propres $L_a$ et $L_f$ :

Les inductances propres  $L_a$  et  $L_f$  de l'induit et de l'inducteur sont mesurées par la méthode volt-ampérométrique en courant alternatif. En mesurant les impédances, on calcule les inductances connaissant les résistances.

$$L_a = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{V_a}{I_a}\right)^2 - R_a^2} \quad (\text{III.1})$$

$$L_f = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{V_f}{I_f}\right)^2 - R_f^2} \quad (\text{III.2})$$

Avec :  $\omega=2\pi f$

### III.3.3 Détermination de la constante de la $F_{cm}$ :

Il suffit d'effectuer un essai à vide et de relever la caractéristique  $V_a(I_f)$ , la machine à courant continu doit fonctionner en génératrice et doit être entraînée à sa vitesse nominale, la pente de cette caractéristique représente la quantité " $M_{fd}.\omega$ ". 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  $V_a=M_{fd}.\omega_r.I_f$ . La vitesse est maintenue constante dans cet essai.

La constante de la f.c.e.m.  $K_e$  et donnée par :  $K_e=M_{fd}.I_f$ . Cette constante est utilisée quand la machine fonctionne à excitation constante.

### III.3.4 Détermination des paramètres mécaniques :

L'équation différentielle fondamentale de la mécanique régissant le fonctionnement dynamique d'une machine électrique est exprimée par :

$$J \frac{d\omega}{dt} = C_m - C_s - f\omega \quad (\text{III.3})$$

Avec :

$J$  : moment d'inertie du rotor.

$f$  : coefficient de frottement visqueux.

$C_s$  : couple de frottement sec.

#### III.3.4.1 Détermination du couple de frottement sec et du coefficient de frottement visqueux :

A vide, le couple électromagnétique s'écrit :

$$C_e = C_s + f\omega \quad (\text{III.4})$$

Sachant que le couple électromagnétique est proportionnel au courant de l'induit quant le courant d'excitation est constant :

$$C_e = K_e.I_a \quad (\text{III.5})$$

On aura :

$$K_e.I_a = f\omega + C_s \quad (\text{III.6})$$

Pour tracer  $K_e.I_a=f(\omega)$ , le moteur fonctionnant à vide est alimenté sous tension variables afin de faire varier  $I_a$  et  $\omega$ , le tracé donne une droite de la forme  $y=ax+b$  comme le montre la figure(III.1).

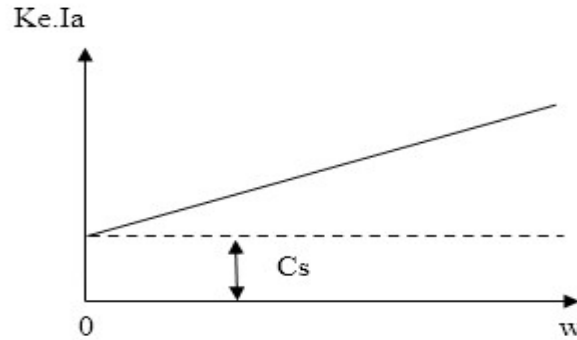


Figure III.1 : caractéristique du couple-vitesse du moteur

A l'intersection de la courbe avec l'axe des ordonnées, on lit la valeur de  $C_s$ . La pente de cette caractéristique représente le coefficient de frottement  $f$ .

### II.3.4.2 Détermination du moment d'inertie :

Pour identifier le moment d'inertie du notre moteur, nous utilisons l'essai de ralentissement que nous expliquons ci-après. Après avoir démarré le moteur à courant continu, la tension est réglée à sa valeur nominale. On coupe l'alimentation de l'induit, l'inducteur reste alimenté en excitation séparée.

On note à  $t=0$ , les grandeurs suivantes :  $V_0 = V_n$ ,  $I_0$ ,  $\omega_0$ , et on enregistre également le temps  $T$  que prend le moteur pour s'arrêter.

En faisant abstraction des signes, on écrit à vide :

$$J \frac{d\omega}{dt} = C \quad (\text{III.7})$$

Où  $C$  : couple des pertes

D'où :

$$J = \frac{\int_0^T dt}{\int_0^{\omega} \frac{d\omega}{C}} \quad (\text{III.8})$$

Puisque «  $C$  » est une fonction de  $w$ , la puissance prise du réseau est

$$P_{ab} = V_n I_0 = P_o + R a I_0^2 \quad (\text{III.9})$$

D'où

$$P_o = I_0 (V_n - R a I_0) \quad (\text{III.9})$$

D'autre part :

$$P_o = C \omega$$

On déduit :

$$C = \frac{I_o(Vn - RaI_o)}{w} \quad (\text{III.10})$$

Alors

$$J = \frac{T}{\int_0^{\omega} \frac{\omega d\omega}{P_o}} \quad (\text{III.11})$$

Il est donc intéressant de tracer la caractéristique  $\frac{\omega}{P_o} = f(\omega)$ . Les différentes vitesses seront obtenues par la variation de la tension d'alimentation d'où la variation de  $P_o$ . Il est par ailleurs fondamentale de conserver l'excitation à sa valeur constante.

Le dénominateur de l'expression de  $J$  représente l'aire comprise entre les axes, la courbe  $\frac{\omega}{P_o} = f(\omega)$  et l'ordonnée au point  $\omega_0$ .

### Calcul approximatif :

Si on suppose que  $d\omega/dt$  est approchée à  $\Delta\omega/\Delta t$  on peut écrire :

$$J = C \frac{\Delta t}{\Delta\omega} = \frac{C.T}{\omega_0} = \frac{I_o(Vn - RaI_o)T}{\omega_0^2} \quad (\text{III.12})$$

## III.4 essais expérimentaux :

### ➤ III.4.1 : Machine de 3kW

#### III.4.1.1 Détermination des résistances $R_a$ et $R_f$ :

Les schéma de mesure des résistances de l'induit et de l'inducteur est montré dans la figure ci-dessous.

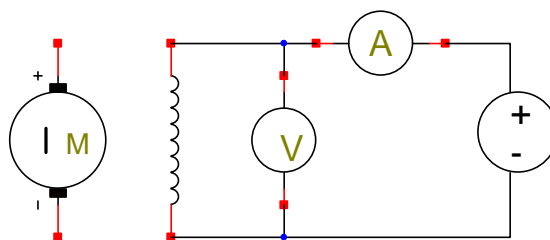


Fig. III 2 : déterminations des résistances de l'induit  $R_a$  et de l'inducteur  $R_f$ .

Les résultats obtenus sont résumés dans les tableaux 1 et 2 :

$V_a$ (V)	4.4	7	9.1
$I_a$ (A)	3.1	5.2	6.9
$R_a$ ( $\Omega$ )	1.42	1.35	1.32

**Tableau 1 : Résultats de mesure de la résistance d'induit**

$V_f$ (V)	32	51.8	66.7
$I_f$ (A)	0.5	0.8	1
$R_f$ ( $\Omega$ )	64	64.75	66.7

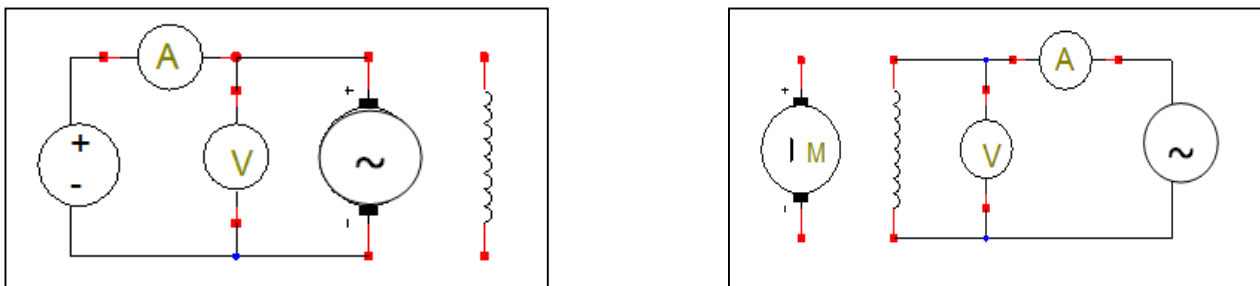
**Tableau 2 : Résultats de mesure de la résistance d'inducteur**

Les valeurs moyennes des résistances sont :

$$R_a = 1.35 \Omega \quad ; \quad R_f = 65.15 \Omega$$

#### III.4.1.2 Détermination des inductances $L_a$ et $L_f$ :

Nous alimentons l'induit du moteur à courant continu par une tension alternative  $V_a$ . Pour différentes valeurs de  $V_a$  et de  $I_a$ , nous déduisons la valeur de l'inductance à travers le calcul de l'impédance moyenne  $Z_a$  de l'induit. Le montage proposé est le suivant :

**Figure III.3** : déterminations des inductances de l'induit  $L_a$  et de l'inducteur  $L_f$ .

Les mesures obtenues sont rassemblées dans les tableaux suivants :

$V_a(V)$	4.3	6.7	8.7
$I_a(A)$	1.8	2.9	3.9
$Z_a(\Omega)$	2.38	2.31	2.23

**Tableau 3 : Résultats de mesure de l'inductance propre de d'induit**

$V_f(V)$	91	100	122
$I_f(A)$	0.035	0.038	0.046
$Z_f(\Omega)$	2600	2631.5	2652.2

**Tableau 4 : Résultats de mesure de de l'inductance propre de d'inducteur**

Les valeurs moyennes des impédances donnent :

$$Z_a = 2.3 \Omega \quad ; \quad Z_f = 2627.9 \Omega$$

Le calcul l'inductance se fait comme suit :

$$L_a = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{[(Z_a^2 - R_a^2)]} \quad (\text{III.13})$$

$$L_f = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{[(Z_f^2 - R_f^2)]} \quad (\text{III.14})$$

Après calcul on trouve :

$$L_a = 0.0059 \text{ H} \quad ; \quad L_f = 8.35 \text{ H}$$

Connaissant les valeurs de la résistance et de l'inductance, nous pouvons déduire la constante de temps électrique de l'induit et de l'inducteur comme suit :

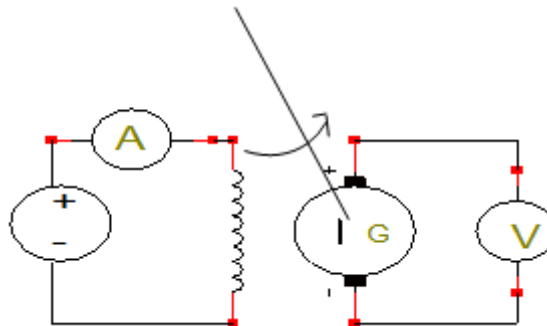
$$T_e = \frac{L_a}{R_a} = \frac{0.0059}{1.35} = 0.0043s$$

$$T_f = \frac{L_f}{R_f} = \frac{8.35}{65.15} = 0.128s$$

**III.4.1.3 Détermination de la constante de la Fcem :**

Il suffit d'effectuer un essai à vide et de relever la caractéristique  $V_a(I_f)$ , la machine doit fonctionner en génératrice et doit être entraînée à sa vitesse nominale. La pente 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  $V_a = M_{fd} \cdot \omega_r \cdot I_f$  Et que la constante de la f.c.é.m.  $K_e$  est donnée par :  $K_e = M_{fd} \cdot I_f$ .

Le montage proposé est le suivant :



**Figure III.4 :** détermination de la constant de la f.c.é.m. $K_e$ .

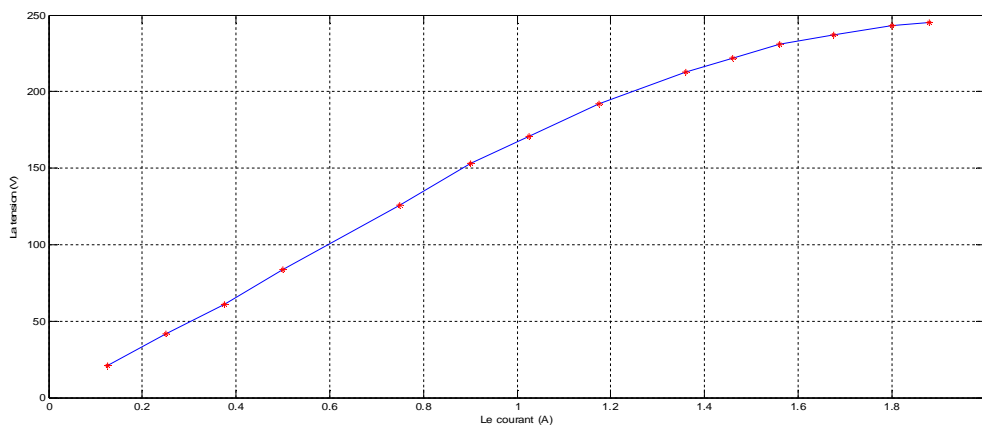
Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau suivant :

$I_f$ (A)	0.125	0.25	0.375	0.5	0.75	0.9	1.025	1.175	1.36	1.46	1.56	1.675	1.8	1.88
$V_a$ (V)	21	42	61	84	126	153	171	192	213	222	231	237	243	245

Le rotor est entraîné à une vitesse  $\omega_r = 1488(\text{tr / min})=155.74(\text{rd/s})$

**Tableau 5 : Résultats de mesure de la constante de la Fcem**

Le graphe de la figure III.5 représente la tension  $V_a$  en fonction du courant  $I_f$



**Figure III.5 :** Courbe de la tension  $V_a$  en fonction du courant  $I_f$ .

La pente de la courbe  $V_a(I_f)$  vaut 166.64 et elle nous donne la valeur de  $M_{fd} \cdot \omega_r$ . Pour trouver la valeur de  $M_{fd}$ , il suffit de diviser cette valeur par  $\omega_r$ , qui doit être exprimée en rad/s.

La valeur de l'inductance mutuelle entre le stator et le rotor vaut après mesure :

$$M_{fd} = 1.07 \text{ H}$$

On peut déduire la valeur de la constante  $K_e$  par la relation suivante :

$$K_e = M_{fd} \cdot I_f = 1.07 \times 1.32 = 1.41 \text{ V /rd/s}$$

#### III.4.1.4 Détermination du couple statique $C_s$ et du coefficient de frottements $f$ :

Sachant que pour un moteur à courant continu à excitation séparée le couple électromagnétique s'exprime par la relation:

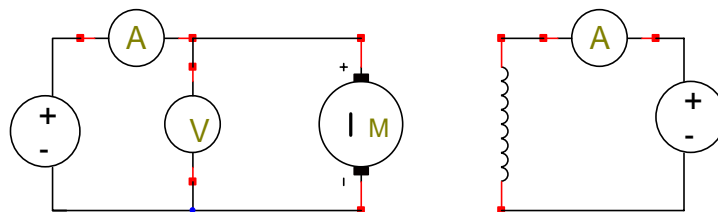
$$C_{em} = M_{fd} \cdot I_f \cdot I_a \quad (\text{III.15})$$

On garde le courant d'excitation du moteur constant à sa valeur nominale alors l'expression du couple devient :

$$C_{em} = K_e \cdot I_a \quad \text{Avec} \quad K_e = M_{fd} \cdot I_f \quad (\text{III.16})$$

On fait varier la tension d'induit jusqu'à la tension nominale après on la diminue et on relève la valeur des différentes vitesses du rotor par un tachymètre.

On trace alors la caractéristique  $C_{em}(\omega_r)$ . Le couple électromagnétique peut être mesuré par un couple mètre ou calculé par la relation  $C_{em} = M_{fd} \cdot I_f \cdot I_a$  après la mesure du courant d'induit, comme le montre le montage suivant :

**Figure III.6 :** Schéma d'identification du couple statique  $C_s$  et du coefficient de frottements  $f$ 

Les résultats obtenus sont donnés dans les tableaux suivants :

$V_a$ (V)	49	81	101	131	154	170	189	204	216	224
$I_a$ (A)	1.2	1.3	1.35	1.4	1.45	1.5	1.51	1.53	1.6	1.65

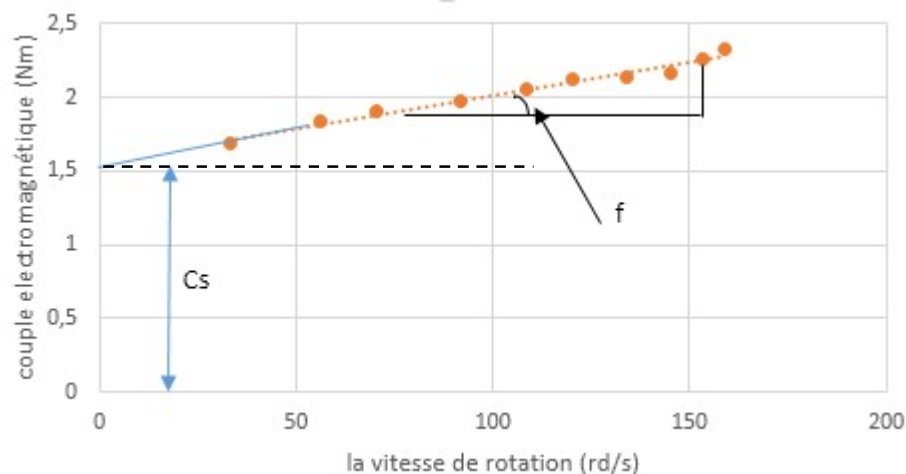
**Tableau 6 :** Résultats de mesure du courant et de la tension d'induit

Wr(rd/s)	33.07	56	70.33	91.79	108.74	120.36	134.07	144.96	153.54	158.98
Cem(N.m)	1.69	1.84	1.9	1.97	2.05	2.12	2.13	2.16	2.26	2.33

**Tableau 7 :** Résultats de mesure du couple et de la vitesse de rotation

Le couple électromagnétique est calculé par la relation  $C_{em} = K_e \cdot I_a = 1.41 * I_a$

A partir du tableau 7, on peut tracer le graphe de la figure (III.7) du couple en fonction de la vitesse.

**Figure III.7 :** La courbe du couple en fonction de la vitesse.

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

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

$$f = 0.0045 \text{ Nm/rd/s} \quad ; \quad C_s = 1.51 \text{ Nm}$$

#### III.4.1.5 Détermination de l'inertie des masses tournantes :

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. A l'aide d'un oscilloscope à mémoire on tire la courbe de décroissance de la vitesse de rotation du moteur en fonction du temps  $W_r(t)$ , comme le montre la figure III.8.

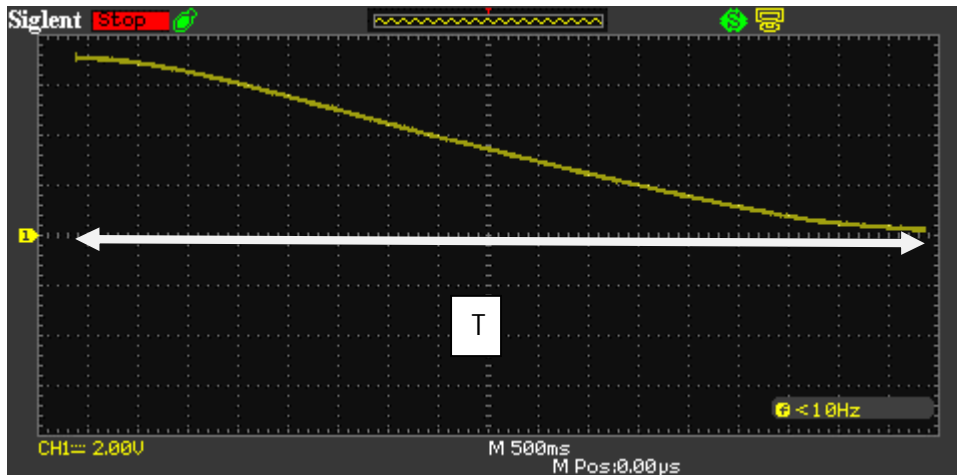


Figure III.8 : Vitesse en fonction du temps lors de l'essai de ralentissement

La tangente à la courbe de ralentissement enregistrée par l'oscilloscope donne la valeur de la constante de temps mécanique. Celle-ci vaut  $T_m=8s$ , soit 16 divisions.

A partir de la constante de temps mécanique, on peut déduire la valeur de l'inertie  $J$  par la relation suivante :

$$J = f.T_m = 0.0045.8 = 0.036 \text{ Kg.m}^2$$

➤ **III.4.2 : Machine de 175 w**

**III.4.2.1 Détermination des résistances  $R_a$  et  $R_f$  :**

Les résultats obtenus sont montrés dans les tableaux 8 et 9 :

$V_a$ (V)	14	20	30
$I_a$ (A)	0.5	0.7	1.
$R_a$ ( $\Omega$ )	28	28.57	30

**Tableau 8 : Résultats de mesure de la résistance d'induit**

$V_f$ (V)	100	150	200
$I_f$ (A)	0.1	0.14	0.185
$R_f$ ( $\Omega$ )	1000	1071.43	1081.08

**Tableau 9 : Résultats de mesure de la résistance d'inducteur**

Les valeurs moyennes des résistances sont :

$$R_a = 28.86 \, \Omega \quad ; \quad R_f = 1050.83655 \, \Omega$$

### III.4.2.2 Détermination des inductances $L_a$ et $L_f$ :

Les mesures obtenues sont montrées dans les tableaux 10 et 11 suivants :

$V_a(V)$	35	50	69
$I_a(A)$	0.11	0.15	0.2
$Z_a(\Omega)$	318.18	333.33	345

**Tableau 9** : Résultats de mesure de l'inductance propre de l'induit

$V_f(V)$	100	150	200
$I_f(A)$	0.037	0.052	0.064
$Z_f(\Omega)$	2702.70	2884.62	3125

**Tableau 10** : Résultats de mesure de l'inductance propre de l'inducteur

Les valeurs moyennes des impédances donnent :

$$Z_a = 332.17 \, \Omega \quad ; \quad Z_f = 2904.1060 \, \Omega$$

Après calcul des inductances propres on trouve :

$$L_a = 1.05 \, H \quad ; \quad L_f = 8.62 \, H$$

La constante de temps électrique de l'induit est :

$$T_e = \frac{L_a}{R_a} = \frac{1.05}{28.86} = 0.03638s$$

Celle de l'inducteur vaut :

$$T_f = \frac{L_f}{R_f} = \frac{8.62}{1050.83} = 0.0082s$$

### III.4.2.3 Détermination de la constante de la $F_{cém}$ :

Les résultats de mesures sont donnés dans le tableau 11 :

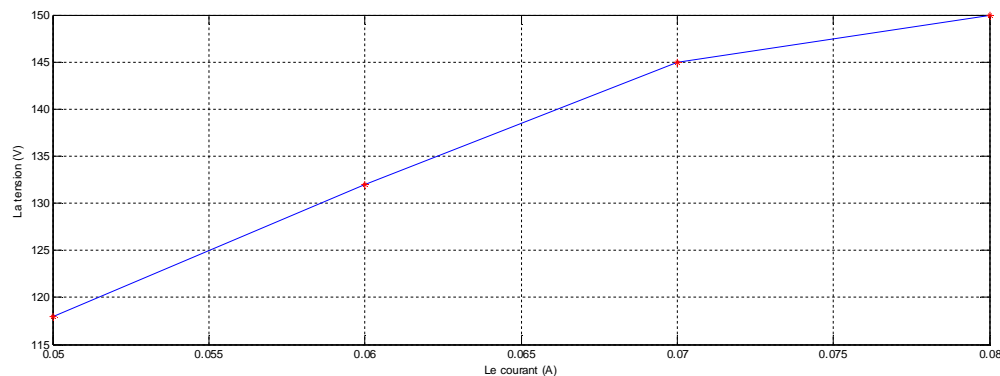
Le rotor est entraîné à une vitesse  $\omega_r = 1498(\text{tr}/\text{min}) = 156.79(\text{rd}/\text{s})$

$I_f$ (A)	0.009	0.016	0.02	0.0245	0.03	0.035	0.04	0.045	0.05	0.06	0.07	0.08	0.1
$V_a$ (V)	25	42	53	66	80	91	101	110	118	132	145	150	162

**Tableau 11** : Résultats de mesure de la caractéristique  $V_a(I_f)$

Le graphe de la figure III.9 représente la tension  $V_a$  en fonction du courant  $I_f$ .

La pente de la courbe  $V_a(I_f)$  donne la valeur de  $M_{fd} \cdot \omega_r$ . Pour trouver la valeur de  $M_{fd}$  il suffit de diviser cette valeur par  $\omega_r$ .



**Figure III.9** : La courbe de tension  $V_a$  en fonction du courant  $I_f$ .

La pente de cette caractéristique vaut : 1090. L'inductance mutuelle entre l'induit et l'inducteur vaut donc :  $M_{fd} = 1090/156.79 = 6.95\text{H}$

On déduit la valeur de la constante  $K_e$  par la relation suivante :

$$K_e = M_{fd} \cdot I_f = 6.95 \times 0.19 = 1.24 \text{ V.s/rd}$$

#### III.4.2.4 Identification du couple statique $C_s$ et du coefficient de frottements $f$ :

Identiquement à la démarche suivie pour le moteur de 3kW, nous avons dressé le tableau 12 permettant de tracer la caractéristique mécanique  $C_{em}(\omega_r)$ .

$I_a$ (A)	0.07	0.075	0.09	0.1	0.11	0.12	0.13	0.145	0.155	0.16
$\omega_r$ (rd/s)	23.76	34.64	52.33	70.96	88.34	101.1	116.49	133.24	144.33	157.31
$C_{em}$ (N.m)	0.218	0.234	0.281	0.3125	0.343	0.375	0.406	0.453	0.484	0.5

**Tableau 12** : Résultats de mesure de la caractéristique mécanique  $C_{em}(\omega_r)$ .

La courbe III.10 représente la courbe de la caractéristique mécanique du moteur de 175W.

La même démarche que précédemment aboutit aux valeurs du couple statique et du coefficient de frottements suivant :

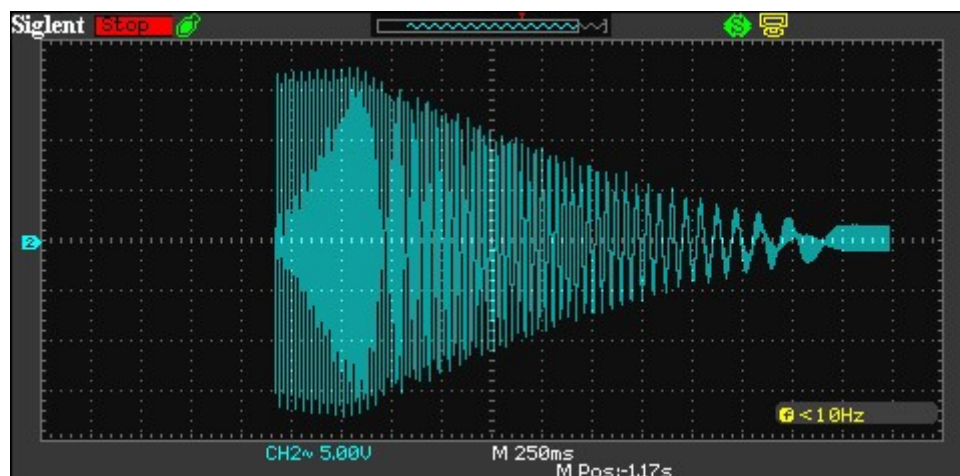
$f$ (Nm.s/rd)	$C_s$ (Nm)
0.002	0.16

### III.4.2.5 Identification de l'inertie des masses tournantes :

Notons que les paramètres mécaniques ne concernent pas le moteur seul, mais plutôt le moteur et la machine qu'il entraîne. C'est pour cela que nous parlons d'inertie des masses tournantes, c'est-à-dire l'inertie de tout ce qui est couplé au même arbre.

Dans notre cas, le moteur à courant continu de 3kW est couplé à une machine asynchrone de même puissance. Tandis que le moteur à courant continu de 175W est couplé à un alternateur d'égale puissance. Le banc de 3kW est équipé d'une génératrice tachymétrique nous permettant d'enregistrer le transitoire de la vitesse. Par contre le banc de 175W n'est pas équipé de tachymètre. Pour pallier à cet inconvénient, nous nous servons de l'alternateur pour identifier la constante de temps mécanique par la procédure suivante :

On entraîne l'alternateur à la vitesse de synchronisme par le moteur à courant continu, puis on excite l'alternateur. La tension s'établit aux bornes des phases de l'alternateur, son amplitude vaut. On coupe l'alimentation du courant continu et on enregistre la courbe de décroissance de la tension statorique. La tangente effectuée à l'enveloppe de cette courbe donne la constante de temps mécanique. La figure III.10 montre cette courbe.



**Figure III.10 :** 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 III.10, donne une constante de temps mécanique de l'ordre de  $T_m = 2.5$ s. Connaissant le coefficient de frottements  $k_f = 0.002$  Nm.s/rad, on déduit que l'inertie des masses tournantes  $J = 0.005$  kg.m<sup>2</sup>.

$T_m$ (S)	$J$ (Kg.m <sup>2</sup> )
2.5	0.005

**III.5 Tableau récapitulatif :** En guise de comparaison, nous avons dressé le tableau suivant récapitulant les paramètres des deux moteurs.

Paramètre	Moteur de 3kW	Moteur de 175 W
Résistance d'induit $R_a$ ( $\Omega$ )	1.35	28.86
Résistance d'inducteur $R_f$ ( $\Omega$ )	65.15	1050.84
Inductance d'induit $L_a$ (H)	0.0059	1.05
Inductance d'inducteur $L_f$ (H)	8.35	8.62
Inductance mutuelle induit-inducteur $M_{fd}$ (H)	1.07	16.45
Coupe statique $C_{st}$ (N.m)	1.51	0.16
Coefficient des frottements visqueux (N.m.s/rd)	0.0045	0.002
Inertie des masses tournantes ( $\text{Kg.m}^2$ )	0.036	0.005
Constante de la $F_{cém}$ (V.s/rd)	1.41	3.125
Constante de temps électrique de l'induit (S)	0.0043	0.036
Constante de temps électrique de l'inducteur (S)	0.128	0.0082
Constante de temps mécanique (S)	8	2.5

**Tableau 13 :** Tableau récapitulatif des paramètres

### III.6 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes méthodes et procédés expérimentaux permettant d'identifier les paramètres électriques et mécanique de deux moteurs à courant continu de puissances 175W et 3kW.

Ces paramètres nous permettront d'exploiter correctement les modèles Matlab-Simulink établis au chapitre précédent et de calculer les coefficients des régulateurs que nous étudierons au chapitre suivant.

**Chapitre IV :**  
**régulation de vitesse**  
**d'une machine à**  
**courant continu**

### IV.1 Introduction

L'objet de ce chapitre est de concevoir puis de tester par simulation sous Matlab un régulateur de vitesse d'un moteur à courant continu servant d'émulateur d'une turbine éolienne. Ce régulateur de vitesse aura pour tâches de faire suivre au moteur une consigne de vitesse dont la forme est une succession d'échelons de vitesse. Le régulateur aura également à rejeter des perturbations que nous injecterons sous forme d'échelons de couple résistant.

### IV.2 Principe de la régulation de vitesse des machines à courant continu

En effet, en cours de fonctionnement d'une MCC, des éléments peuvent varier :

- La variation du couple résistant, de la tension du réseau... peut provoquer une modification de la vitesse réelle par rapport à celle désirée. Un régulateur de vitesse doit pouvoir ramener automatiquement la vitesse à sa valeur de consigne, et ceci en dépit de la présence des perturbations.
- La régulation doit être double : elle doit agir sur la vitesse mais aussi sur le courant pour le maintenir dans des limites acceptables lors des situations suivantes : démarrage rapide, variation brutale du couple résistant, freinage brusque ou accroissement très rapide de la consigne vitesse.
- La structure d'un régulateur de vitesse (pour MCC) comporte donc généralement deux boucles de régulation en cascade (figure IV.1) : une boucle interne qui contrôle le courant et une boucle externe qui contrôle la grandeur principale qui est la vitesse  $\Omega$ .

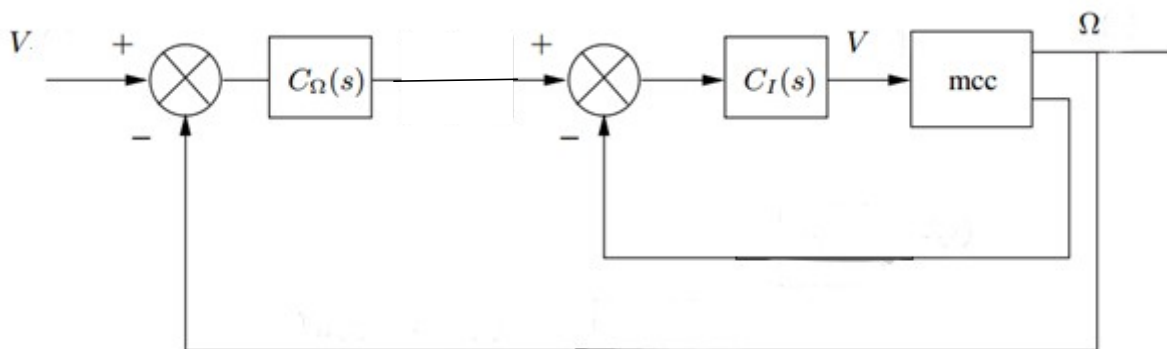


Figure IV.1 : Principe de régulation de la vitesse d'un moteur à courant continu.

### IV.3 Dimensionnement des paramètres des régulateurs :

Afin de réguler la vitesse de notre moteur on a choisi deux régulateurs PI (proportionnel intégral) : un pour la boucle de vitesse et un autre pour la boucle de courant.

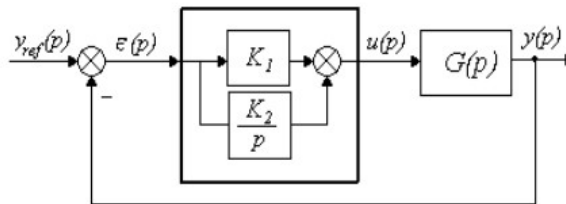
### IV.3.1 Structure de commande PI :

La structure générale d'un régulateur proportionnel intégral, noté P I, est composée de la fonction proportionnelle et de la fonction intégrale mises en parallèle. Sa fonction de transfert est donnée par :

$$C(p) = K_1 + \frac{k_2}{p} = \frac{k_1 p + k_2}{p} = K \left( 1 + \frac{1}{T_i p} \right) \quad (\text{IV.1})$$

Avec :  $K = K_1$       et       $T_i = \frac{K_2}{K_1}$

L'avantage principal d'un régulateur P I est qu'il annule l'erreur statique grâce à la fonction intégrale. En effet, il calcule la commande  $u(t)$  à injecter au système en intégrant la grandeur d'erreur  $\varepsilon(t)$ . Ainsi, le signal de commande augmente tant que le signal d'erreur est non nul, la commande  $u(t)$  ne cesse de croître tant que l'erreur entre la sortie  $y(t)$  et la référence  $y_{\text{ref}}(t)$  n'est pas nulle.



FigureIV.2: Structure de commande en utilisant un régulateur PI.

La fonction du transfert de la boucle fermée est donnée par :

$$G_{bf}(p) = \frac{K_1 \left( p + \frac{K_2}{K_1} \right) G(p)}{1 + K_1 \left( p + \frac{K_2}{K_1} \right) G(p)} \quad (\text{IV.2})$$

Ceci montre que le régulateur PI ajoute un zéro à la fonction de transfert en boucle fermée. Celui-ci peut éventuellement être utilisé pour compenser un pôle de la fonction de transfert du système à commander, simplifiant ainsi l'ordre la fonction du transfert en boucle fermée. La méthode la plus utilisée est la méthode de compensation des pôles [11].

### IV.3.2 Méthode de compensation des pôles :

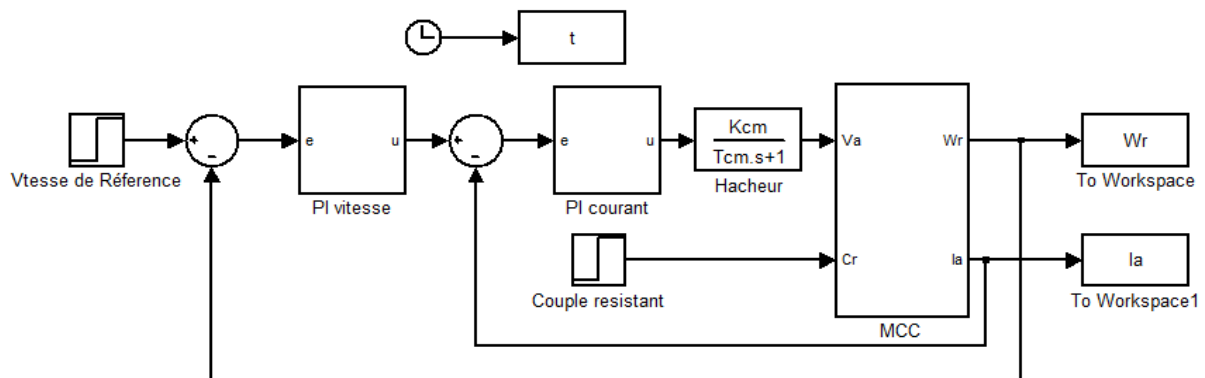
Cette méthode se déroule en deux étapes ; elle consiste dans une première étape, à utiliser le zéro du régulateur pour compenser un pôle du système à commander.

Elle permet ainsi de simplifier l'ordre de la fonction de transfert en boucle ouverte. Cette compensation donne la première équation permettant de calculer les deux paramètres  $K_i$  et  $K_p$ . Dans une seconde étape, on calcule la fonction de transfert en boucle fermée, et on détermine une seconde équation permettant de calculer le deuxième coefficient du régulateur[11].

#### IV.4 Calcul des régulateurs

##### IV.4.1 Machine de 3kW :

Le schéma Matlab-Simulink qui englobe notre système et qui permet le calcul des régulateurs est donné par la figure suivante :



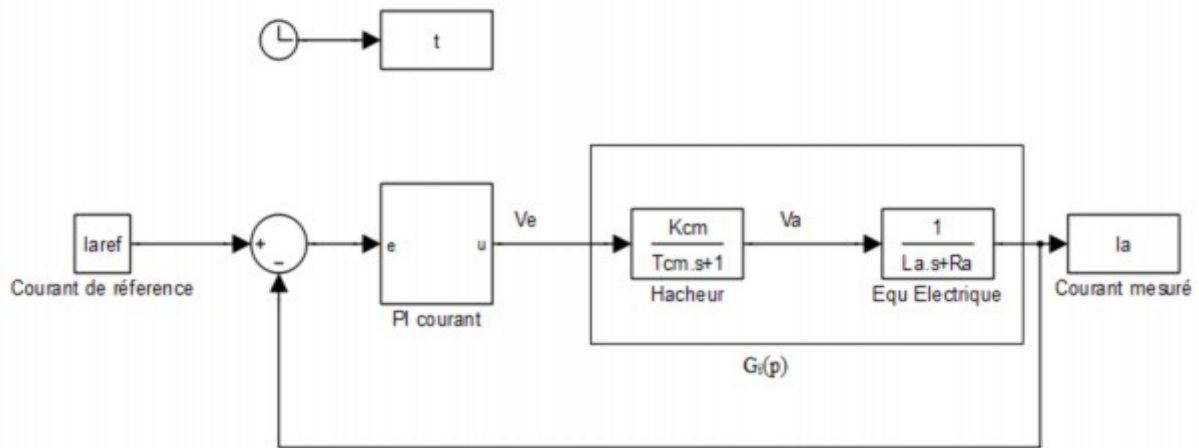
FigureIV.3 : Schéma Matlab-Simulink du système

##### IV.4.1.1 Calcul du régulateur de courant :

Les dépassements de courant constituent un véritable problème, tant pour le convertisseur statique que pour le moteur. Les transitoires de courant risquent de détruire les composants de puissance du convertisseur statique. En plus les conducteurs du moteur risquent d'être détruits par une surintensité. Pour ces raisons il convient :

- d'asservir le courant pour avoir la maîtrise des dépassements ;
- de limiter le courant maximum pour protéger le moteur dans tous les cas.[12]

Le calcul des paramètres du régulateur de courant du la MCC se fait à partir du schéma bloc suivant :



FigureIV.4:Schéma Matlab-Simulink de la boucle du courant.

On a:

$$Gi(p) = \frac{I(p)}{V(p)} \tag{IV.3}$$

$$I(p) = \frac{1}{Ra+La.P} (Va(p) - E(p)) \tag{IV.4}$$

$$I(p) = \frac{1}{Ra+La.P} Va(p) - \frac{1}{Ra+La.P} E(p) \tag{IV.5}$$

$$I(p) = \frac{1}{Ra+La.P} \frac{Kcm}{1+Tcm.P} V(p) - \frac{Ke}{Ra+La.P} Wr(p) \tag{IV.6}$$

On suppose que la vitesse est une perturbation (donc  $\omega_r(p)=0$ ), ce qui permet de simplifier  $Gi(p)$  comme suit :

$$Gi(p) = \frac{Kcm}{(1+Tcm)(Ra+La.P)} \tag{IV.7}$$

Posons  $Te = \frac{La}{Ra}$

$$Gi(p) = \frac{Kcm/Ra}{(1+Tcm)(1+Te.P)} \tag{IV.8}$$

Puisque  $Tcm \ll Te$ , on obtient :

$$Gi(p) = \frac{Kcm/Ra}{(1+Te.P)} = \frac{Goi}{(1+T.P)} \tag{IV.9}$$

La fonction de transfert étant du premier ordre, une simple correction PI suffit.

$$C_i(p) = K_{pi} + \frac{K_{ii}}{P} \tag{IV.10}$$

Qui est égale à :

$$C_i(p) = \frac{PK_{pi} + K_{ii}}{P} = \left( \frac{P \frac{K_{pi}}{K_{ii}} + 1}{P} \right) K_{ii} = K_{ii} \frac{(1 + T_i P)}{P} \tag{IV.11}$$

Le choix le plus simple consiste alors à compenser le pôle électrique en choisissant  $K_{pi}/K_{ii} = T_i = T = T_e$ , ce qui conduit à un système en boucle fermée d'une fonction de transfert d'ordre 1 comme le montre la figure ci-dessous :

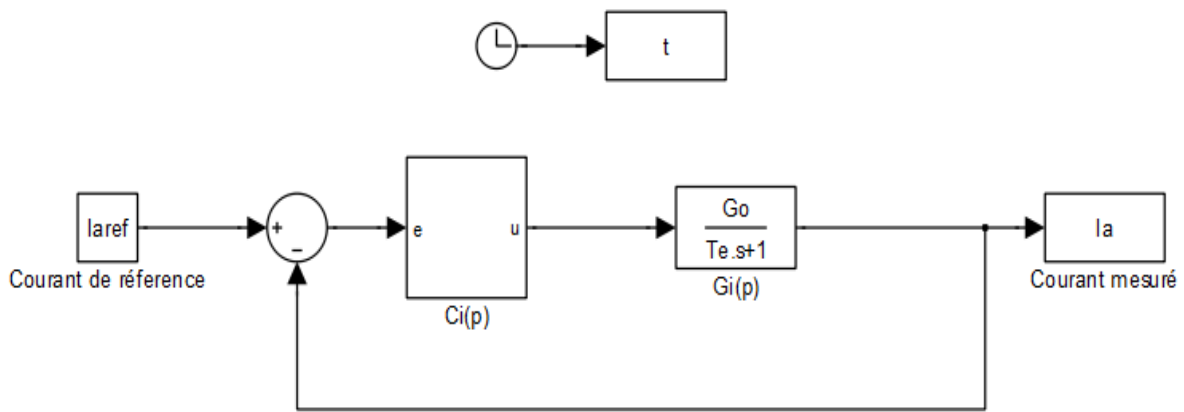


Figure IV.5 : Représentation de la boucle fermée du courant.

$$G_{i_{bf}}(p) = \frac{C_i(p).G_i(p)}{1 + C_i(p).G_i(p)} \tag{IV.12}$$

$$G_{i_{bf}}(p) = \frac{K_{ii} \frac{(1 + T_i P)}{P} \frac{G_{oi}}{(1 + T.P)}}{1 + K_{ii} \frac{(1 + T_i P)}{P} \frac{G_{oi}}{(1 + T.P)}} \tag{IV.13}$$

Après compensation du pôle électrique en posant  $T = T_i$  nous aurons :

$$G_{i_{bf}}(p) = \frac{K_{ii}.G_{oi}}{P + K_{ii}.G_{oi}} \tag{IV.14}$$

En faisant sortir la quantité  $K_{ii}.G_{oi}$  en facteur au numérateur et au dénominateur, on obtient :

$$G_{i_{bf}}(p) = \frac{1}{1 + \frac{1}{K_{ii}.G_{oi}} P} \tag{IV.15}$$

Cette expression se simplifie comme suit :

$$G_{i_{bf}}(p) = \frac{1}{1 + T_{bf}.P} \tag{IV.16}$$

Avec :

$$T_{bf} = \frac{1}{K_{ii}G_{oi}} = T \tag{IV.17}$$

D'où on tire le coefficient intégral  $K_{ii}$  :

$$K_{ii} = \frac{1}{G_{oi}T_i} \tag{IV.18}$$

Ainsi que le coefficient proportionnel  $K_{pi}$  :

$$K_{pi} = T_i \cdot K_{ii} \tag{IV.19}$$

#### IV.4.1.2 Calcul du régulateur de vitesse :

Une fois la boucle de courant réglée, on peut facilement régler la boucle de vitesse. Le calcul des paramètres du régulateur de vitesse du mcc se fait à partir du schéma bloc suivant :

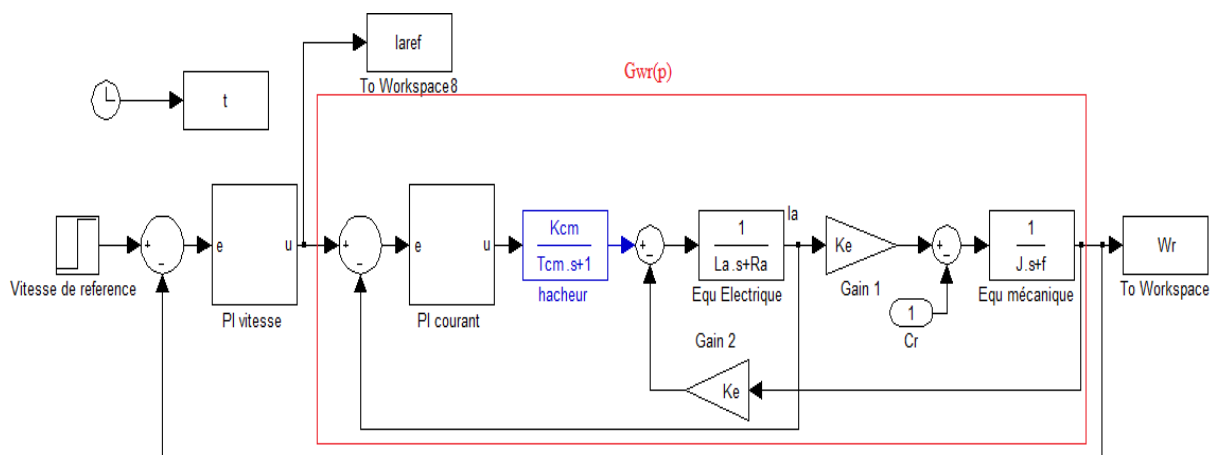


Figure IV.6 : Représentation de la boucle fermée du courant

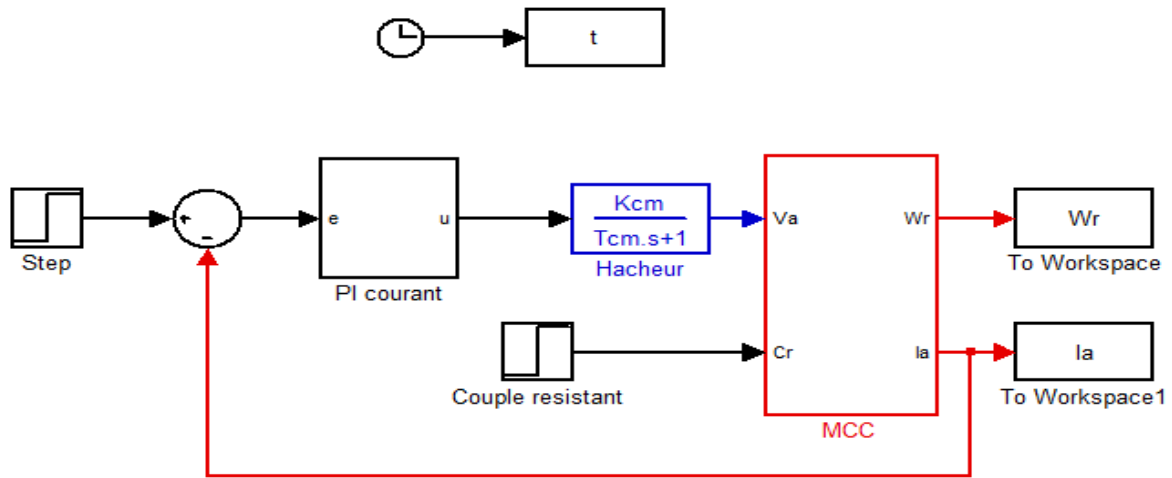
Supposons que le courant  $I_a$  est exactement  $I_{aref}$ , la fonction de transfert de la vitesse est donc :

$$G_w(p) = \frac{W_r(p)}{I_{aref}(p)} \tag{IV.20}$$

On voit bien que cette fonction est d'ordre 4, le calcul des paramètres du régulateur de vitesse sera dans ce cas difficile. Afin de contourner cette difficulté nous optons pour la méthode suivante :

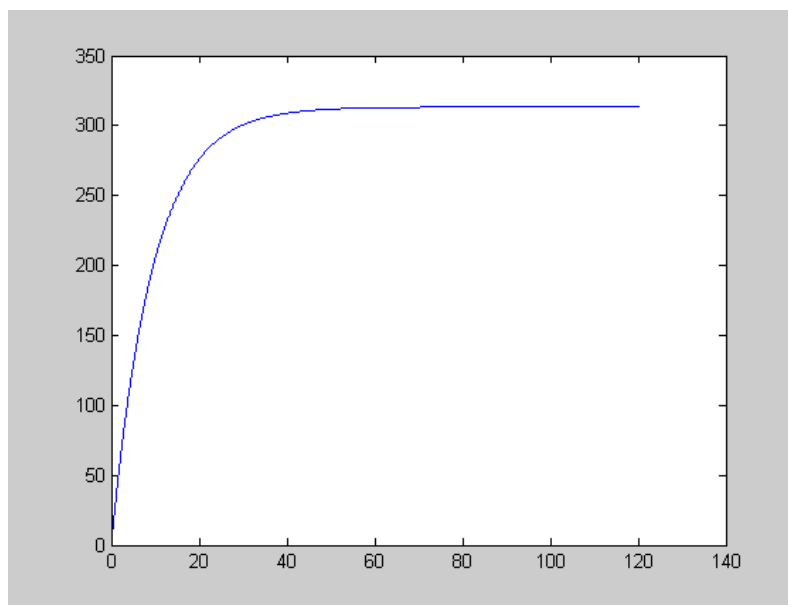
Il suffit d'envoyer un échelon d'amplitude unitaire au système qui est donné par la figure IV.6, la réponse obtenue est similaire à celle du système du premier ordre, dont la fonction de transfert est donnée par :

$$Gw(p) = \frac{Gow}{1+Tw.P} \tag{IV.21}$$



FigureIV.7 :Attaque du système par un échelon unitaire

La réponse du système est donnée par la courbe suivante :

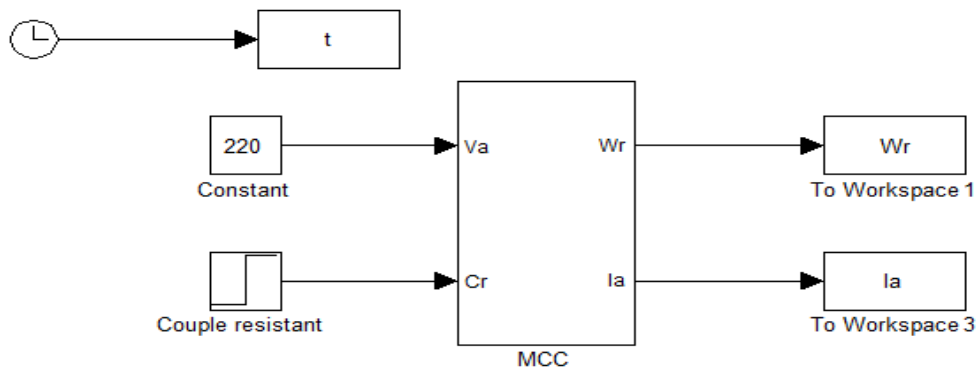


FigureIV.8 : Courbe représentant la réponse du système

On peut maintenant déduire facilement les paramètres ( $Gow$  et  $Tw$ ) de la fonction de transfert du système, où le gain  $Go$  représente la valeur finale et la constante du temps  $Tw$  représente 63% de la valeur finale.

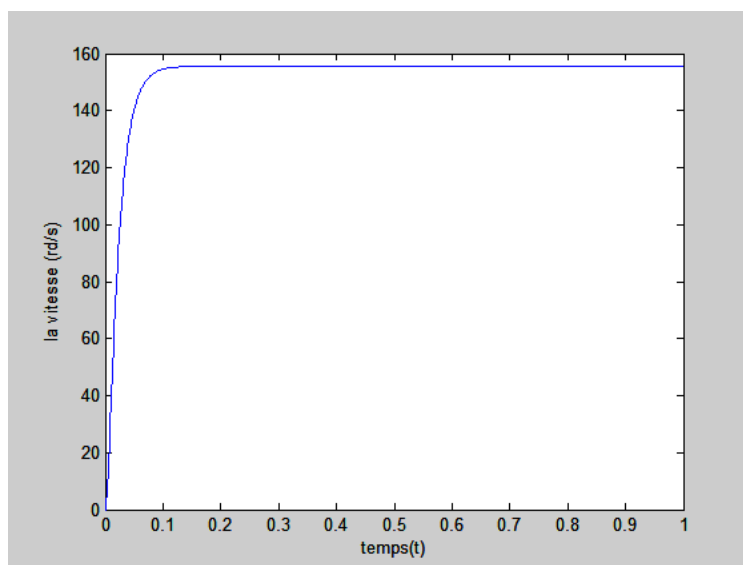
$$Gow = 313.33 \quad \text{et} \quad Tw = 9.38$$

On remarque que le temps de réponse est important, donc afin d'avoir un temps de réponse plus rapide on peut prendre la constante du temps du moteur seul. Donc on alimente le moteur directement avec sa tension nominale après on tire la constante du temps à travers la courbe de la vitesse.



FigureIV.9 :Simulation du moteur seul

La courbe de la vitesse et donnée par la figure ci-dessous :



FigureIV.10 : Courbe de la vitesse du moteur seul

On peut tirer la nouvelle valeur de la constante du temps en boucle fermée de la vitesse qui est :  $T_{bfw} = 0.025$ .

Après l'obtention des paramètres de la fonction de transfert de la vitesse le calcul de régulateur ce fait de la même manière.

$$G_w(p) = \frac{313.33}{1 + 0.025 \cdot P} \tag{IV.22}$$

Après calcul on trouve :

$$K_{iw} = \frac{1}{G_{ow} \cdot T_{bfw}} \tag{IV.23}$$

$$Kpw = Tw \cdot Kiw \quad (IV.24)$$

#### IV.4.2 Machine de 175W :

Les mêmes démarches que pour le moteur de 3kW sont adoptées ici pour déterminer les coefficients des régulateurs de courant et de vitesse. Les formes des régulateurs sont les mêmes, ils ne diffèrent que par les valeurs numériques des coefficients.

##### IV.4.2.1 Calcul du régulateur de courant :

$$G_{Ibf}(p) = \frac{Kii \cdot Goi}{P + Kii \cdot Goi} = \frac{1}{1 + Tbf \cdot P} \quad (IV.25)$$

Avec :

$$Tbf = \frac{1}{KiiGoi} = T, \quad Kii = \frac{1}{GoiTi} \quad \text{et} \quad Kpi = Ti \cdot Kii$$

##### IV.4.2.2 Calcul du régulateur de vitesse :

$$Gw(p) = \frac{Wr(p)}{Iqref(p)} \quad (IV.26)$$

Fonction d'ordre 4, à simplifier en un système de premier ordre, de fonction de transfert :

$$Gw(p) = \frac{Gow}{1 + Tw \cdot P} \quad (IV.27)$$

L'excitation du système par un échelon unitaire fournit la réponse suivante :

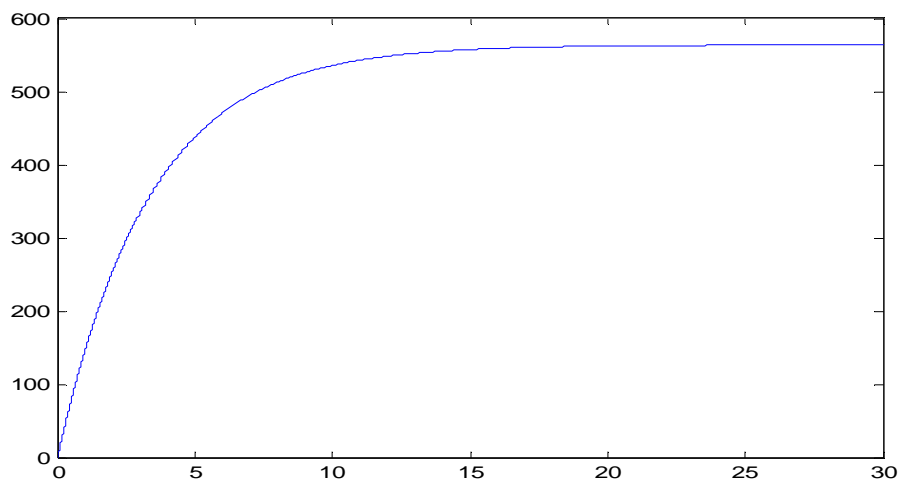
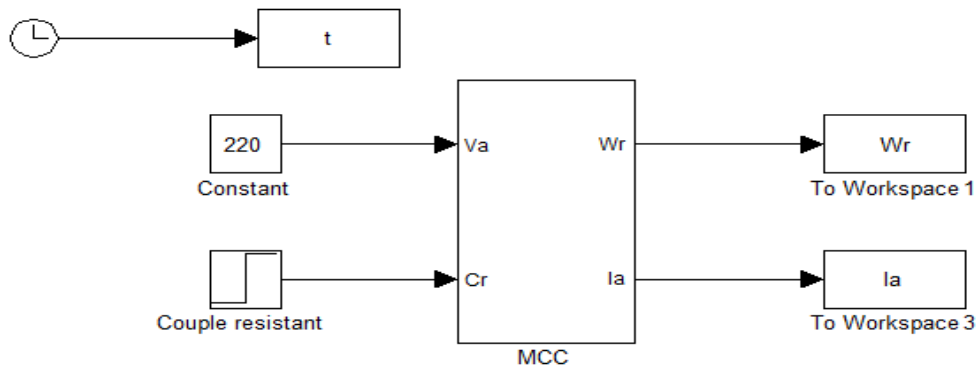


Figure IV.11 : Courbe représentant la réponse du système à un échelon unitaire

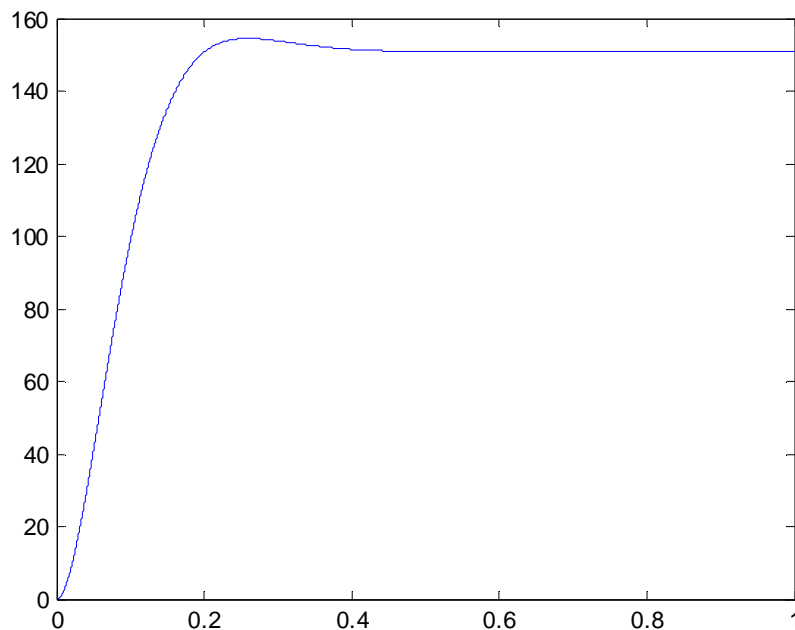
De cette réponse, on déduit les paramètres  $Gow$  et  $Tw$  comme suit :

- $Go$  est le gain, il représente la valeur finale.
- $Tw$  est la constante de temps, elle représente le temps que met le système pour atteindre 63% de sa valeur finale. Soit en résumé :  $Gow = 563.56$  et  $Tw = 3.33$ .

Le temps de réponse étant important, et afin d'obtenir un temps de réponse plus rapide, on le prendra égal à la constante du temps du moteur seul. Pour déterminer cette dernière, on alimente le moteur directement avec sa tension nominale après on tire la constante du temps à travers la courbe de la vitesse.



**FigureIV.12** :Simulation du moteur seul



**FigureIV.13** :Courbe de la vitesse du moteur seul.

La nouvelle valeur de la constante de temps en boucle fermée de la vitesse est :  
 $T_{bfw} = 0.117$ .

Après obtention des paramètres de la fonction de transfert de la vitesse, le calcul du régulateur se fait de la même manière.

$$G_w(p) = \frac{563.56}{1 + 0.117 \cdot p} \quad (\text{IV.28})$$

Après calcul on trouve :

$$K_{iw} = \frac{1}{G_{ow} \cdot T_{bfw}} \quad K_{pw} = T_w \cdot K_{iw} \quad (\text{IV.29})$$

#### IV.5 Résultats de la simulation avec régulation :

Les tests par simulation sont conduits selon le schéma Matlab-Simulink de la figure IV.14 où le système complet est soumis à une consigne de vitesse selon un profil déterminé. Nous étudierons le comportement des deux machines (3kW et 175W) vis-à-vis de ce profil de vitesse.

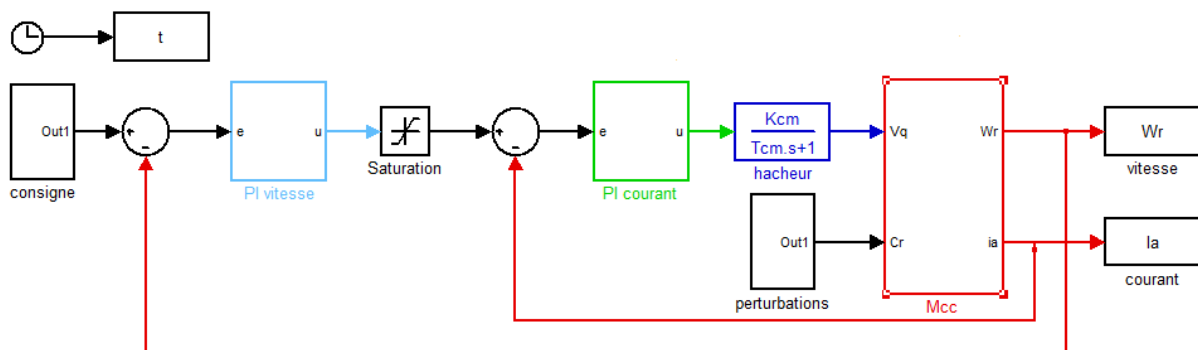


Figure IV.14 :Schéma Matlab-Simulink du système étudié.

##### IV.5.1 Allure de la consigne de vitesse :

Nous avons choisi le profil de vitesse de la figure IV.15 car notre moteur à courant continu est destiné à émuler une turbine éolienne. Cette turbine entraînera en rotation soit une génératrice synchrone, soit une génératrice asynchrone. Cette consigne fait passer la vitesse d'une machine à deux paires de pôles, du synchronisme à une vitesse hypo-synchrone puis à une vitesse hyper-synchrone pour retomber finalement à une vitesse hypo-synchrone. Cette consigne est intéressante quand la machine entraînée est une génératrice asynchrone auto-excitée.

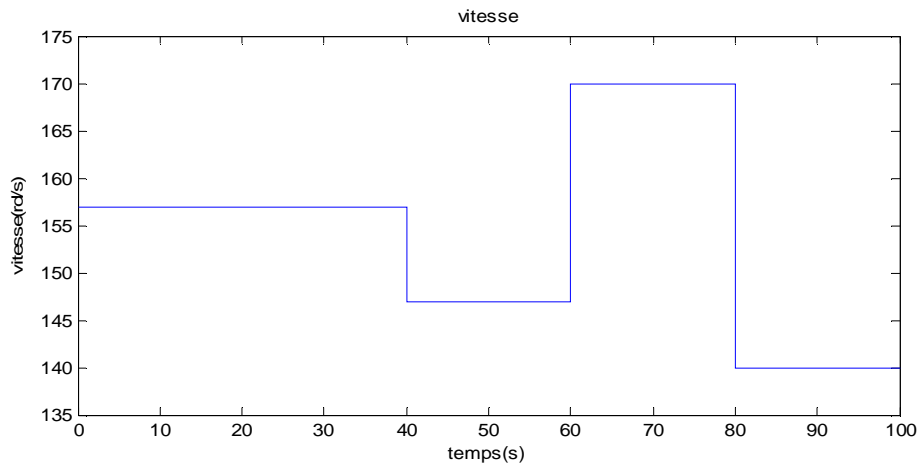


Figure IV.15 : Allure de la consigne de vitesse.

### IV.5.3 Résultats de la machine de 3kW :

#### a- Résultats sans perturbation :

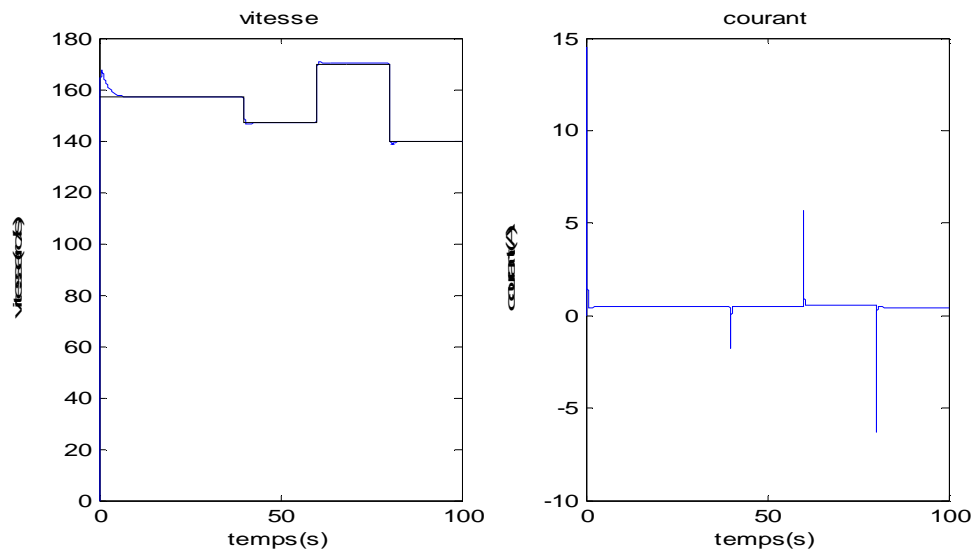
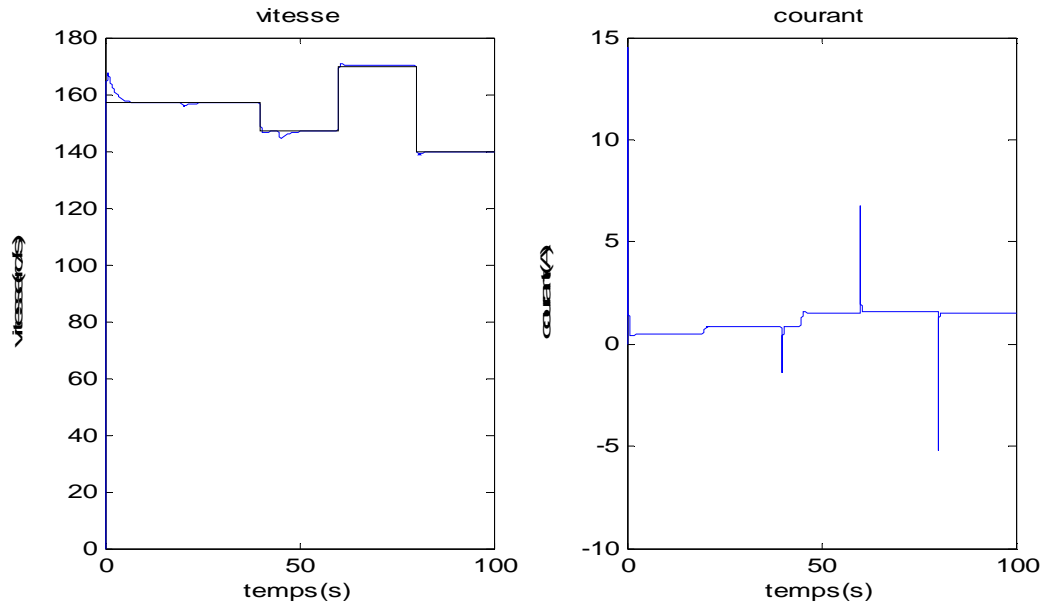


Figure IV.16 : Réponse en vitesse et du courant du moteur à la consigne de la figure IV.15 sans perturbation

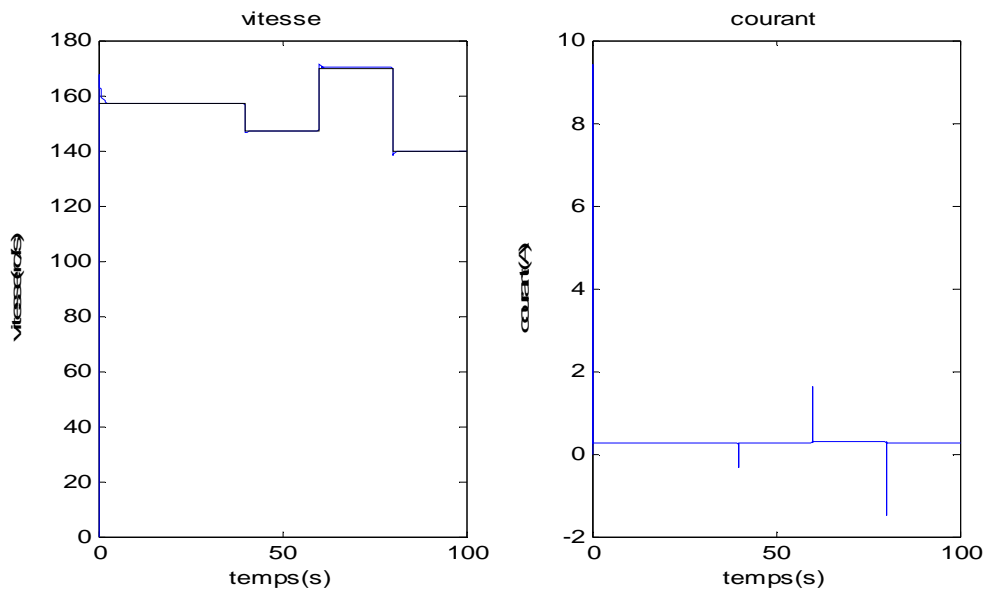
La perturbation est un échelon de couple résistant d'amplitude 0.5 Nm, intervenant à instant  $t=45s$  puis un autre de 1 Nm à  $t=60s$ .



FigureIV.17 :Réponse en vitesse et en courant du système suite à une consigne de vitesse avec perturbation

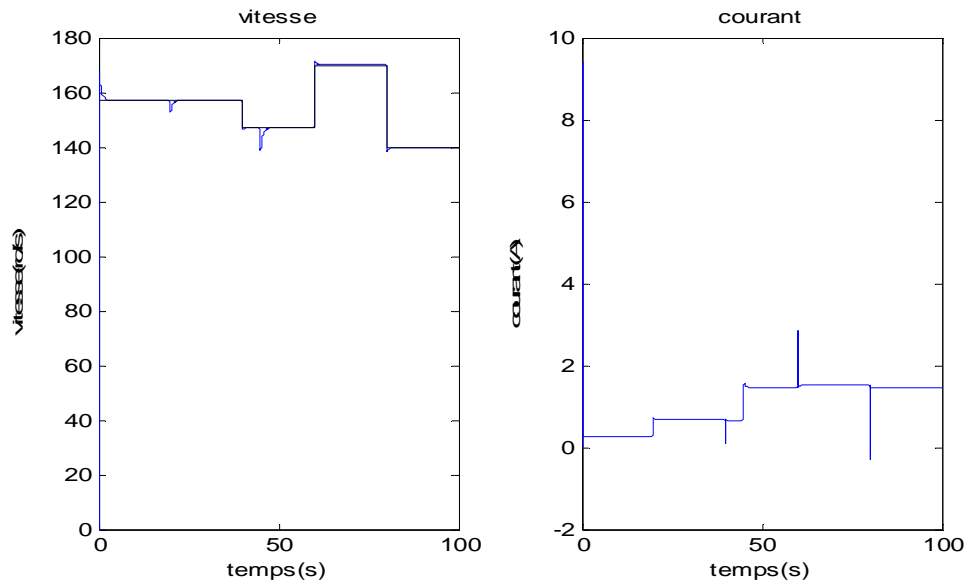
**IV.5.4 Résultats de la machine de 175W :**

**a- Résultats sans perturbation :**



FigureIV.18 : Réponse en vitesse et en courant du système suite à une consigne de vitesse sans perturbation

**b- Résultats avec perturbation :**



**Figure IV.19 :** Réponse en vitesse et en courant du système suite à une consigne de vitesse avec perturbation

#### IV.5.5 Interprétation des résultats :

On voit bien d'après les résultats obtenus que les deux machines répondent correctement à la consigne imposée après avoir atteint leurs régimes permanents.

La vitesse des deux moteurs atteints son régime permanent avec un fort courant de démarrage avant de se stabiliser à son régime permanent. A chaque fois que la vitesse de la consigne change le courant absorbé change.

L'application d'un couple résistant de 0.5 Nm à  $t=45s$  et 1 Nm a  $t=60s$ , à notre moteur de 3kW, fait chuter la vitesse et fait augmenter le courant d'induit. L'intervention du régulateur remet la vitesse à sa valeur précédente. Nous constatons des pics de courant aux instants d'application du couple résistant.

Les résultats obtenus pour les deux machines sont similaires, ce qui est en toute logique prévisible, puisqu'il s'agit du même type de machine opérant dans les mêmes conditions. La différence réside dans l'amplitude des courants absorbés. Nous constatons toutefois une meilleure dynamique et moins de dépassement chez la petite machine de 175W. Cela est probablement dû à sa faible inertie. Ce résultat laisse penser qu'il est plus facile de faire suivre à la petite machine une consigne de vitesse similaire à celle du vent.

#### IV.6 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons calculé un régulateur de vitesse et de courant d'une machine à courant. Nous l'avons appliqué à deux machines de puissances différentes.

Le moteur à courant continu associé à son régulateur constitue un émulateur d'une turbine éolienne, puisqu'il est capable de suivre une consigne de vitesse déterminée.

# **Conclusion générale**

### **Conclusion générale :**

Dans le cadre de notre mémoire de fin d'études, nous avons travaillé sur le thème de l'étude d'un émulateur d'une turbine éolienne à base d'une machine à courant continu. Cet émulateur est destiné à être utilisé dans deux projets d'étude de systèmes éoliens ; l'un utilise une génératrice asynchrone auto-excitée d'une puissance de 3kW et l'autre est à base d'un alternateur de puissance 175W. Ce dernier fera partie d'un système hybride éolien-photovoltaïque. Les émulateurs de turbines éoliennes les plus communément utilisés sont les moteurs à courant continu munis de régulateurs de vitesse. C'est ainsi que nous nous sommes fixés comme objectif de réaliser une étude de modélisation, d'identification puis de calcul de régulateurs de vitesse pour deux moteurs à courants continu disponibles au laboratoire « LATAGE », l'un est d'une puissance 3kW et l'autre de 175W. Les performances de ces deux émulateurs sont testées par simulation numérique sous Matlab-Simulink.

Le travail que nous avons réalisé est transcrit dans un mémoire que nous avons subdivisé en quatre chapitres dont les contenus sont les suivants :

- Dans le premier chapitre, on a traité des généralités sur la conversion de l'énergie éolienne en rendant compte de l'état actuel de l'exploitation mondiale de ce créneau énergétique. Puis nous avons parlé des différents types d'éoliennes existant avec leurs différentes structures à savoir les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal. Nous avons également traité des lois fondamentales permettant la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique. Nous avons enfin présenté une liste non exhaustive de quelques turbines éoliennes existantes.
- Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié de façon sommaire la constitution d'un moteur à courant continu ainsi que son principe de fonctionnement. Nous avons ensuite procédé à la mise en équations et à la modélisation d'un moteur à courant continu à excitation indépendante. Nous avons finalement présenté des résultats de simulation de démarrage en pleine tension de deux moteurs à courant continu de puissance 3kW et 175W.
- Le troisième chapitre a été consacré à l'identification des paramètres électriques et mécanique de deux moteurs à courant continu de puissances 175W et 3kW existant au sein du laboratoire « LATAGE ».

- Enfin, nous nous sommes intéressés dans le dernier chapitre à la conception d'un émulateur à base des deux machines à courant continu. En premier lieu nous avons procédé au calcul du régulateur PI la boucle de courant, en suite de celle de vitesse ; de manière à obtenir le meilleur résultat possible pour les deux machines. Nous avons ensuite testé par simulation les performances de l'ensemble régulateur-machine, en lui appliquant un profil de vitesse donné en présence de perturbations.

Les résultats ont montré que la méthode de calcul choisie a abouti à la construction de régulateurs répondant aux objectifs fixés ; à savoir un bon suivi de consigne même en présence de perturbations.

Beaucoup de travaux restent à faire, tant sur le plan théorique que sur le plan expérimental. Nous citons à titre d'exemple :

- L'exploration d'autres techniques de calcul de régulateurs.
- La construction d'autres régulateurs réputés plus robustes.
- La réalisation de bancs d'essais expérimentaux pour la validation de nos résultats.

# **Références bibliographiques**

- [1] V. COURTESUISSE, “Supervision d’une centrale multi-source à base d’éoliennes et de stockage d’énergie connectée au réseau électrique“, Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Ecole Nationale d’Arts et Métiers, 2008.
- [2] Damien RIZZO, “Conception d’éoliennes“, Projet de Fin d’Etudes, – Spécialité Génie Civil -, INSA de Strasbourg, juin 2008.
- [3] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, "Eoliennes", Techniques de l’Ingénieur, traité de Génie mécanique, pp. BM 4 640 1 - BM 4 640 21.
- [4] Désiré LEGOURIERE, “Energie éolienne, Théorie, Conception et calcul pratique des installations“, édition Eyrolles, 1982.
- [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] Salma EL AIMANI, “Modélisation de différentes technologies d’éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension“, thèse doctorat, Université des sciences de technologies de LILLE, 16/12/2004
- [7] A. ABDELLI, “Optimisation multicritère d’une chaîne éolienne passive“, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Octobre 2007.
- [8] A. Mirecki, “Etude comparative de chaînes de conversion d’énergie dédiées à une éolienne de petite puissance“, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [9] T. Ghennam, “Supervision d’une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d’un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveau au réglage des éoliennes base de machine asynchrone à double alimentation“, Thèse de Doctorat, Ecole Militaire Polytechnique d’Alger – Ecole Centrale de Lille, 2011.
- [10] <http://www.missioneco.org/algerie>
- [11] Rachide MANSOURI, “Cours sur les systèmes asservis linéaires continus“. Année Universitaire : 2013/2014, non édité.
- [12] Bernard BAYLE “Technologie des asservissements variateurs de vitesse“. Ecole Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg, année 2010/2011.
- [13] Mohammed ARHOUDAM, “Mise en œuvre d’une régulation de vitesse d’un moteur à courant continu“, Ecole normale supérieure de l’enseignement technique, 2012/2013