



L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

**ÉTUDE DE L'AJUSTEMENT EN LIGNE DES PARAMÈTRES
D'ASSERVISSEMENT DE PUISSANCE MÉCANIQUE VIA L'IDENTIFICATION
EN CONTINU DU COUPLE GÉNÉRATEUR-CHARGE DANS UNE
APPLICATION HYDROLIENNE**

PAR

AMR HAYYANI

Août 2019

RÉSUMÉ

Un générateur électrique est un dispositif permettant de produire de l'énergie électrique à partir d'une autre forme d'énergie. Dans l'industrie des hydroliennes, cette machine est alimentée par une turbine qui fonctionne grâce à la puissance hydraulique de l'eau. Le coût d'asservissement et de réglage représente une part considérable ainsi une préoccupation majeure pour l'industrie qui déclenche des défis de taille pour les ingénieurs et les scientifiques. Cette mémoire a pour but de la modélisation du système de contrôle de couple direct (CTC) de GSAP en utilisant MATLAB / Simulink®. Le contrôle de la vitesse de P à l'aide de la technique de contrôle orienté sur le champ et de la technique de modulation de largeur d'impulsion de vecteur à espace direct à couple direct est également analysé et comparé au CTC traditionnel. Les résultats de la simulation sont présentés pour aider à analyser les performances du système et les paramètres du contrôleur PI influent sur les performances du système.

L'amélioration continue de la qualité de contrôle et d'asservissement s'avère primordiale pour la réduction des coûts et l'augmentation de la productivité. Dans ce projet, un algorithme ajustant les paramètres de l'asservissement de façon continue, à partir d'une identification du couple du générateur, qui a été développé afin d'avoir un prototype complet permettant de simuler un fonctionnement turbine-générateur-circuit. Pour des raisons de simplifications, la turbine a été remplacée par un moteur.

Le premier chapitre présente la problématique, l'objectif et la méthodologie de cette mémoire.

Le deuxième chapitre montre une étude bibliographique qui aborde l'énergie hydrolienne, ses types et ses performances, ainsi que les catégories de systèmes de commande, et les méthodes de contrôle.

Le troisième chapitre parle de deux modèles de BEH, qui sont : le modèle spécifique, et le modèle numérique de BEH qui concerne principalement au contrôle de puissance électrique du générateur et effectue la simulation du système de contrôle de la puissance électrique générée par le générateur en utilisant le logiciel de MATLAB. Un modèle mathématique a été développé, en utilisant les données expérimentales fournies par notre partenaire industriel, ce qui a permis d'étudier le comportement de notre système expérimental et d'identifier les paramètres de PI.

Le quatrième et le dernier chapitre est consacré au contrôle de la puissance électrique générée par le générateur. Une série d'essais numériques permettant de construire une base de données. Cette série d'essais décrit l'évolution de la puissance électrique en fonction du réglage paramétrique du PI. Finalement, un modèle autonome adaptatif asservi est mis en œuvre afin de jouer le rôle d'un simulateur représentatif du mode de fonctionnement turbine-générateur.

Mots clés : hydrolienne, énergie renouvelable, PID, générateur

ABSTRACT

An electric generator is a device for producing electrical energy from another form of energy. In the tidal turbine industry, this machine is powered by a turbine that operates thanks to the hydraulic power of the water. The cost of servo control and adjustment represents a considerable share as well as a major concern for the industry that triggers significant challenges for engineers and scientists. The aim of this memory is to model the PMSG direct torque control system (DTC) using MATLAB / Simulink®. Speed control of P using the field-oriented control technique and the direct-torque direct-space vector pulse width modulation technique is also analyzed and compared to the traditional DTC. The results of the simulation are presented to help analyze system performance, and PI controller parameters affect system performance.

Continuous improvement in control quality and servo control is essential for cost reduction and increased productivity. In this project, an algorithm continuously adjusts the servo parameters, based on an identification of the generator torque, which was developed in order to have a complete prototype for simulating a turbine-generator-circuit operation. For reasons of simplification, the turbine has been replaced by a motor.

The first chapter presents the problematic, the objective and the methodology of this thesis.

The second chapter presents a literature review that discusses hydroelectric energy, its types and performance, as well as categories of control systems, and control methods.

The third chapter discusses two models of turbine test bench, which are: the specific model, and the numerical model of turbine test bench which mainly concerns the electrical power control of the generator and performs the simulation of the control system of electrical power generated by the generator. Using the MATLAB software. A mathematical model was developed, using the experimental data provided by our industrial partner, which made it possible to study the behavior of our experimental system and to identify the PI parameters.

The fourth and last chapter is dedicated to controlling the electrical power generated by the generator. A series of numerical tests to build a database. This series of tests describes the evolution of the electric power according to the parametric setting of the PI. Finally, a controlled autonomous adaptive model is implemented in order to play the role of a simulator representative of the turbine-generator mode of operation.

Keywords: hydraulic machine, renewable energy, PID, generator

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un projet de maîtrise à l'Université du Québec à Chicoutimi, au sein du laboratoire de recherche LIMA-UQAC.

Tout d'abord, je tiens à exprimer mes plus sincères remerciements à mes directeurs de recherche, le professeur Jean Perron, et le professeur Adrian Ilinca qui m'ont supervisé tout au long de mes travaux. J'ai été ravi de travailler en sa compagnie dans un environnement avec une discipline exemplaire et des réunions de travail régulières qui furent enrichies tant avec un support scientifique que moral.

Je ne peux pas finir sans remercier mes chers parents, mes frères et ma sœur, ainsi qui m'ont toujours soutenu et m'ont poussé à poursuivre mes études au niveau des cycles supérieurs. Une reconnaissance éblouissante et particulière de leurs aides et encouragements dans tous mes parcours aux niveaux académiques et personnels. Vous m'avez enseigné qu'on ne peut rien avoir sans rien donner, même dans le monde du travail, ce qui m'a toujours poussé à m'améliorer dans tout ce que je fais.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	II
ABSTRACT	IV
REMERCIEMENTS	VI
TABLE DES MATIÈRES	VII
LISTE DES TABLEAUX	XI
LISTE DES FIGURES	XII
LISTE DES SYMBOLES.....	XV
CHAPITRE 1.....	1
INTRODUCTION	1
1.2 Problématiques	3
1.3 Objectifs	5
1.4 Méthodologie.....	6
CHAPITRE 2	8
ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE	8
2.1 Introduction	8
2.2 Sources de l'énergie hydrolienne.....	8
2.3 L'énergie hydrolienne	8
2.4 État actuel des hydroliennes.....	10
2.5 Potentiel hydrolien	11
2.6 Hydroliennes en rivière	11
2.7 Rendement et frais d'Hydroliennes en rivière	11
2.8 Avantages et inconvénients des hydroliennes.....	11
2.9 Les différents types d'hydroliennes.....	12
2.10 Hydrolienne à axe horizontal versus hydrolienne à axe vertical	13
2.11 Mécanique des fluides	15
2.12 Système de contrôle	19
2.12.1 Définition	19
2.12.2 Exigences d'un bon système de contrôle	20

2.13 Conception d'un système d'asservissement.....	21
2.14 Systèmes en boucle ouverte et boucle fermée	23
2.14.1 Système en boucle ouverte.....	23
2.14.2 Système en boucle fermée.....	24
2.15 Contrôleur PID.....	25
2.15.1 Les caractéristiques des contrôleurs P, I et D.....	27
2.16 Méthodes de réglage PID.....	28
2.16.1 Performance du contrôleur PID :	29
2.16.2 Effet du PID sur le générateur d'hydrolienne	33
CHAPITRE 3	34
MODÉLISATION DU BANC D'ESSAI D'HYDROLIENNE.....	34
3.1 Introduction	34
3.2 Modèle spécifique de banc d'essai d'hydrolienne.....	34
3.3 Machines électriques	35
3.4 Les moteurs.....	35
3.4.1 Machines asynchrones.....	36
3.4.2 Structures des moteurs à induction.....	36
3.5 Les Générateurs	38
3.5.1 Classification des générateurs	38
3.5.2 Générateur synchrone à aimant permanent	39
3.6 La commande (ABB).....	40
3.7 Modèle numérique de banc d'essai l'hydrolienne.....	41
3.7.1 Sim power system	42
3.7.2 Description du modèle numérique	43
3.7.3 Construction du modèle numérique.....	43
3.7.4 Modèle du générateur synchrone à aimant permanent	44
3.8.2 Équations du générateur dans le cadre de référence du rotor.....	45
3.9 Test du bloc de générateur à aimant permanent	47
3.9.1 Charge de série triphasée RLC.....	48
3.9.2 Mesure de V-I triphasée.....	48
3.10 Commande directe du couple du moteur à induction.....	52

3.10.1 Introduction	52
3.10.2 Caractéristique de contrôle.....	53
3.10.3 Principe de commande de couple direct (CDC)	54
3.10.4 Définition de la stratégie de contrôle	56
CHAPITRE 4.....	58
RÉSULTATS DE LA SIMULATION	58
4.1 Introduction	58
4.2 Comparaison entre le générateur numérique et expérimental.....	58
4.3 Étude de l'asservissement du BEH	63
4.3.2 Détermination des gains du régulateur PI	63
4.3.3 Réalisation d'un asservissement autonome	68
CHAPITRE 5.....	78
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	78
5.1 Conclusion	78
5.2 Recommandations	79
Référence	80
Annexe A.1	86

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4 1 les résultats obtenus pour les différents paramètres	59
Tableau 4 2 Comparaison entre la puissance électrique qui fournit par le générateur numérique et expérimental	59
Tableau 4.3 Valeurs de Kp et Ki.....	64

LISTE DES FIGURES

Figure 1. 1 Banc d'entraînement de la Chaire TERRE.	5
Figure 2. 1 Hydrolienne à axe horizontal [31].....	13
Figure 2. 2 Hydroliennes à axe vertical [31].	13
Figure 2. 3 la taille d'hydrolienne par rapport à celle d'éolienne[18].	15
Figure 2. 4 Modèle du disque plein.....	16
Figure 2. 5 Limite de BETZ[36].....	19
Figure 2. 6 Exemple de schéma bloc.....	21
Figure 2. 7 Système en bloc en boucle ouverte.	23
Figure 2. 8 Schéma bloc en boucle fermée.	24
Figure 2. 9 Le contrôleur PID dans un système en boucle fermée.	26
Figure 3. 1 Les comportements du (BEH).....	34
Figure 3. 2. Moteur à induction[68].....	37
Figure 3.3 Commande de l'entreprise ABB[73].....	40
Figure 3. 4 Le modèle numérique de système.....	43
Figure 3. 5 Bloc de machine synchrone à aimant permanent	44
Figure 3. 6 Charge de série triphasée RLC.....	48
Figure 3. 7 les détails des paramètres du bloc de la charge de série triphasée RLC.	48
Figure 3.8 Mesure de V-I triphasée.....	49
Figure 3.9 les détails des paramètres du bloc de mesure V-I triphasée.....	49
Figure 3. 10 le modèle numérique du générateur	51
Figure 3. 11 command de couple direct.	54
Figure 3. 12 Système d'asservissement du banc d'essai d'hydrolienne	57
Figure 4 1 Variation de la puissance électrique expérimentale et théorique en fonction de la vitesse de rotation	60
Figure 4 2 Erreur de puissance électrique au démarrage du générateur théorique et expérimentale en fonction de la vitesse de rotation	61
Figure 4 3 Variation de la puissance électrique moyenne en fonction de la vitesse de rotation	61
Figure 4.4 Variation de l'efficacité du générateur en fonction de la vitesse de rotation	62
Figure 4.5 Influence des gains du correcteur $K_P=0.022$ et $K_i=0.45$ à une puissance de référence $P=1000$ W	65
Figure 4.6 Influence des gains du correcteur $K_P=0.087$ et $K_i=0.25$ à une puissance de référence $P=5000$ W	65
Figure 4.7 Influence des gains du correcteur $K_P=0.069$ et $K_i=0.099$ à une puissance de référence $P=10000$ W.	66
Figure 4.8 Influence des gains du correcteur $K_P=0.045$ et $K_i=0.088$ à une puissance de référence $P=15000$ W	66
Figure 4.9 Influence des gains du correcteur $K_P=0.024$ et $K_i=0.074$ à une puissance de référence $P=20000$ W	67

Figure 4.10 Influence des gains du correcteur $K_P=0.011$ et $K_i=0.063$ à une puissance de référence $P=25000$ W	67
Figure 4.11 Variation du K_p en fonction de la puissance demandée	69
Figure 4.12 Variation du K_i en fonction de la puissance demandée	69
Figure 4.13 Variation de la puissance électrique en fonction du temps obtenue à une puissance de référence 1000 W, A : Manuellement, B : Modèle adaptatif	70
Figure 4.14 Variation de la puissance électrique en fonction du temps obtenue à une puissance de référence 5000 W, A : Manuellement, B : Modèle adaptatif	71
Figure 4.15 Variation de la puissance électrique en fonction du temps obtenue à une puissance de référence 10000 W, A : Manuellement, B : Modèle adaptatif	72
Figure 4.16 Variation de la puissance électrique en fonction du temps obtenue à une puissance de référence 15000 W, A : Manuellement, B : Modèle adaptatif	73
Figure 4.17 Variation de la puissance électrique en fonction du temps obtenue à une puissance de référence 20000 W, A : Manuellement, B : Modèle adaptatif	74
Figure 4.18 Variation de la puissance électrique en fonction du temps obtenue à une puissance de référence 25000 W, A : Manuellement, B : Modèle adaptatif	75
Figure 4.19 Système (incomplet) montrant les étapes de l'asservissement	76
Figure 4.20 Courbe représentative de l'asservissement de la puissance électrique en fonction du temps pour quatre différentes étapes.....	77
Figure A.1 Influence des gains du correcteur $K_P=0.017$ et $K_i=0.42$ à une puissance de référence $P=2000$ W	86
Figure A.2 Influence des gains du correcteur $K_P=0.014$ et $K_i=0.34$ à une puissance de référence $P=3000$ W	86
Figure A.3 Influence des gains du correcteur $K_P=0.010$ et $K_i=0.29$ à une puissance de référence $P=4000$ W	87
Figure A.4 Influence des gains du correcteur $K_P=0.0085$ et $K_i=0.022$ à une puissance de référence $P=6000$ W	87
Figure A.5 Influence des gains du correcteur $K_P=0.0081$ et $K_i=0.20$ à une puissance de référence $P=7000$ W	88
Figure A.6 Influence des gains du correcteur $K_P=0.0078$ et $K_i=0.17$ à une puissance de référence $P=8000$ W	88
Figure A.7 Influence des gains du correcteur $K_P=0.0073$ et $K_i=0.12$ à une puissance de référence $P=9000$ W	89
Figure A.8 Influence des gains du correcteur $K_P=0.0067$ et $K_i=0.098$ à une puissance de référence $P=11000$	89
Figure A.9 Influence des gains du correcteur $K_P=0.0058$ et $K_i=0.093$ à une puissance de référence $P=12000$ W	90
Figure A.10 Influence des gains du correcteur $K_P=0.0057$ et $K_i=0.092$ à une puissance de référence $P=13000$ W	90

Figure A.11 Influence des gains du correcteur $K_P=0.0054$ et $K_i=0.091$ à une puissance de référence $P=14000$ W	91
Figure A.12 Influence des gains du correcteur $K_P=0.0035$ et $K_i=0.085$ à une puissance de référence $P=16000$ W	91
Figure A.13 Influence des gains du correcteur $K_P=0.0032$ et $K_i=0.082$ à une puissance de référence $P=17000$ W	92
Figure A.14 Influence des gains du correcteur $K_P=0.0030$ et $K_i=0.078$ à une puissance de référence $P=18000$ W	92
Figure A.15 Influence des gains du correcteur $K_P=0.0030$ et $K_i=0.078$ à une puissance de référence $P=19000$ W	93
Figure A.16 Influence des gains du correcteur $K_P=0.0023$ et $K_i=0.073$ à une puissance de référence $P=21000$ W	93
Figure A.17 Influence des gains du correcteur $K_P=0.0022$ et $K_i=0.070$ à une puissance de référence $P=22000$ W	94
Figure A.18 Influence des gains du correcteur $K_P=0.021$ et $K_i=0.069$ à une puissance de référence $P=23000$ W	94
Figure A.19 Influence des gains du correcteur $K_P=0.0017$ et $K_i=0.065$ à une puissance de référence $P=24000$ W	95

LISTE DES SYMBOLES

Symbole	Définition de la variable
A	Surface balayée par le rotor, surface
BEH	Banc d'essai d'hydrolienne
C_p	Coefficient de performance de l'hydrolienne
CDC	Commande direct du couple
K_e	Constante de force électromotrice induite de GSAP
i_d	Courant de stator le long de axe d
i_q	Courant de stator le long de axe q
CA	Courant alternatif.
CC	Courant continu
Te	Couple électromagnétique
f	Fréquence électrique.
GES	Gaz à effet de serre
GSAP	Générateur synchrone a aimant permanent
ICVE	Intégrale de la carrée de la valeur de l'erreur
L_d	Inductance le long de axe d
L_q	Inductance le long de axe q
K_I	Gain intégral du contrôleur PI
K_d	Gain dérivé
K_P	Gain proportionnel du contrôleur PI
\dot{m}	Débit massique de l'écoulement.
M	Masse
MSAP	Machine synchrone à aimant permanent
MAS	Machine asynchrone
P	Nombre de pôles
PID	Proportionnel Intégral Dérivation

P_p	Puissance produite
P_{perdue}	Puissance perdue
R	Rayon de la turbine
r_d	Résistance du stator dans l'axe d
r_q	Résistance du stator dans l'axe q
ω_e	Vitesse électrique angulaire
n	Vitesse de rotation
U	Vitesse de l'écoulement
V	Vitesse du fluide
ρ_e	Densité de l'eau
ρ_f	Densité volumique du fluide
φ_s	Flux du stator
Ψ_f	Liaison de flux d'aimant permanent

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

La consommation des ressources naturelles telles que l'eau[2], les minéraux et le pétrole a connu une croissance importante depuis le début du vingtième siècle[3, 4]. Le charbon, le pétrole et les autres combustibles sont des sources essentielles pour la production d'énergie et le transport [5]. Cependant, leurs impacts négatifs sur l'environnement, causant entre autres les émissions des gaz à effet de serre (GES) qui conduisent au réchauffement climatique [6], et tout le monde essaie de réduire leur quantité dans l'environnement [7].

Afin de réduire le réchauffement climatique et pour éviter une crise énergétique mondiale, les technologies des énergies renouvelables ont connu leurs émergences [8]. Ce sont des sources alternatives plus propres et possédant un grand potentiel non exploité dans la plupart des régions [9].

Au Québec, l'énergie hydroélectrique est la forme prédominante de production d'électricité [10]. Cependant, lorsqu'on est dans des sites isolés, comme une pourvoirie, un village inuit, etc., coupés du réseau électrique d'Hydro-Québec [11], il faut chercher des méthodes alternatives pour subvenir à ses besoins énergétiques. Bien souvent, un site isolé aura recours au générateur diesel comme solution, cette dernière s'avère polluante et dispendieuse [12]. Au Québec, il y a plus de 40000 unités d'hébergement ou d'habitation en milieu isolé, un grand nombre d'entre elles se trouvent à proximité d'un cours d'eau. Les

propriétaires de résidences isolées n'ont souvent comme seul recours fiable que les génératrices à essence ou à diesel pour satisfaire leurs besoins en énergie électrique. L'hydrolienne peut changer ce portrait, et devrait être la première solution hydroélectrique qui permet de générer une source d'électricité sur demande. L'hydrolienne s'installe au fil de l'eau et n'occupe qu'une place minime dans la rivière, une petite partie de débit qui la traverse. Elle est en plus une source idéale pour un système en énergie renouvelable.

Ces sites pourraient bénéficier grandement de production d'énergie renouvelable adaptée à leurs besoins pour remplacer ou compléter l'énergie produite par le moteur diesel [12]. La Chaire TERRE (l'acronyme de Technologies des Énergies Renouvelables et du Rendement Énergétique)[13] souhaite développer un modèle permettant d'identifier les besoins énergétiques de ses sites et d'élaborer une solution alternative à l'aide des turbines éoliennes, des panneaux solaires et des hydroliennes. Cependant, il existe des difficultés à leur utilisation. Elles ne sont pas toujours disponibles sur demande, et nécessitent d'énormes investissements initiaux, qui prennent beaucoup de temps à récupérer.

L'énergie hydrolienne est l'énergie extraite de l'énergie cinétique continue dans les courants des rivières, des fleuves ou des mers [14]. Le domaine étant encore peu développé [15], la Chaire TERRE s'est associée avec Nordest Marine (Distributeur de produits de plaisance Nautique-Fabrication aluminium. Recherche et développement de technologies d'énergie marine.), afin de développer et concevoir une hydrolienne.

Cette hydrolienne étant toujours en développement, la Chaire TERRE désire développer un algorithme permettant d'identifier en continu le couple résistif du générateur pour optimiser la production d'énergie.

La principale façon de produire de l'électricité avec une hydrolienne consiste à ce que l'eau passe par les hélices, ce qui force la turbine à tourner [16]. L'énergie cinétique continue dans l'eau se transforme en énergie mécanique. Les hélices de l'hydrolienne entraînent le générateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique [17]. Cette dernière sera utilisée directement pour la génération d'énergie consommée par les sites isolés ou emmagasinée dans des batteries.

1.2 Problématiques

L'utilisation des groupes électrogènes diesel demande d'une quantité du carburant considérable, et cela conduit aux émissions des gaz qui polluent énormément l'atmosphère, à noter que les réserves pétrolières qui s'épuisent de jour en jour. Au Québec il existe une centaine de sites isolés qui ne sont pas connectés au réseau d'Hydro-Québec qui utilise des générateurs diesel.

L'énergie hydrolienne se présente aujourd'hui comme l'une des sources d'énergie renouvelable les plus intéressantes, grâce à son énorme potentiel mondial estimé à une puissance de 100 GW, ce qui représente un gisement considérable non négligeable, les hydroliennes utilisent les mêmes principes que les éoliennes, elles peuvent donc s'appuyer sur des techniques viables et éprouvées. En ce qui concerne la production d'énergie avec des hydroliennes installées en moyenne profondeur, la marée est totalement prédictible et sa

vitesse varie très lentement, ce qui explique la facilité d'intégration des hydroliennes au réseau électrique par rapport à beaucoup de sources d'énergie renouvelable.

Procéder à des essais en rivière demande une infrastructure lourde et coûteuse. En effet, pour être en mesure de tester un prototype [18] sur toute sa plage d'opération, il faut être en mesure de contrôler la vitesse de l'eau par rapport à l'hydrolienne. Cela implique de monter le prototype et son circuit de puissance sur un bateau.

Le fait qu'un tel circuit doit être sur une embarcation pose des problèmes au niveau de la sécurité et des normes. De plus, procéder à des essais en rivière nécessite d'avoir un prototype complet (turbine-générateur-circuit).

La Chaire TERRE souhaite l'effectuer en quantifiant les performances des candidats sur un banc d'entraînement, reproduisant le comportement mécanique d'une turbine immergée en rivière sur le générateur. Il sera ainsi possible de choisir adéquatement le générateur et les composantes du circuit de puissance avant de procéder aux essais en rivière, et avant que la turbine hydrolienne ne soit fabriquée. Les perturbations du courant d'eau dans les rivières déstabilisent le système hydrolien (puissance, tension, fréquence). Dans ces conditions, ce dernier ne peut plus être utilisé par un algorithme qui assure la stabilité en tension et en fréquence et permet d'identifier en continu le couple résistif du générateur pour stabiliser la production d'énergie fournie par le générateur.

Une version préliminaire d'un asservissement de puissance mécanique a été développée et testée sur le banc d'entraînement, mais les performances varient en fonction de la charge électrique branchée au générateur, donc du couple résistif offert par le générateur. La Chaire TERRE a besoin de développer un algorithme ajustant les paramètres de l'asservissement de façon continue, à partir d'une identification du couple du générateur. Tout cela en utilisant uniquement des mesures disponibles du côté moteur.

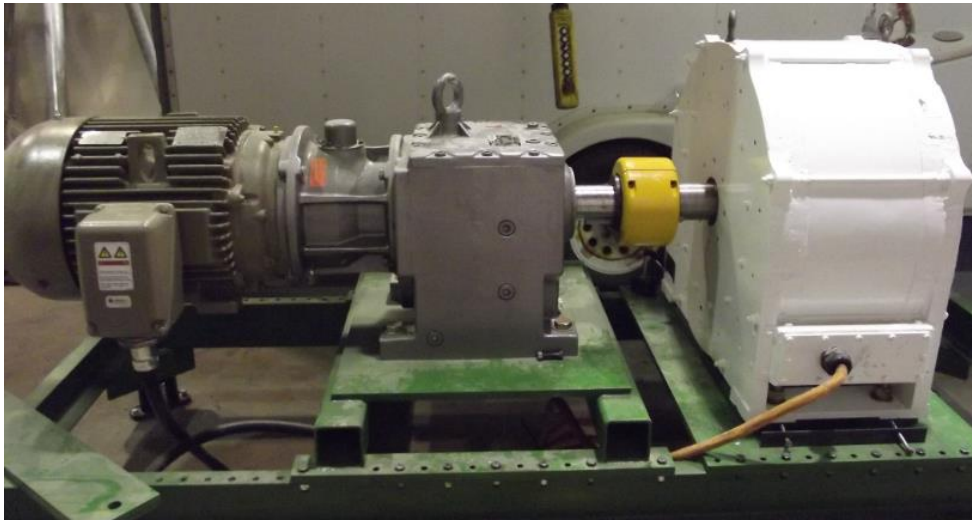


Figure 1.1 Banc d'entraînement de la Chaire TERRE.

1.3 Objectifs

Le but principal de ce travail est de calculer les paramètres PID en continu afin d'optimiser les performances du PID pour tout point de fonctionnement et d'obtenir le meilleur rendement électrique du générateur. Pour ce faire, nous possédons à exécuter les étapes suivantes :

- Développer un algorithme permettant d'identifier continuellement le couple résistant continu d'un générateur. Cet algorithme ne doit utiliser aucune mesure

provenant du côté générateur. Il doit se baser sur l'utilisation de la dynamique du système (des mesures disponibles du côté moteur) pour déduire le couple générateur.

- Développer un modèle qui permettra d'utiliser la valeur de couple obtenue pour optimiser en ligne (online) les paramètres du régulateur de puissance mécanique du moteur. En effet, les réglages optimaux du régulateur dépendent du couple générateur, donc de la charge électrique du circuit. Pour développer ce modèle, il faudra apprendre à utiliser un logiciel approprié.
- Permettre la modification en ligne des paramètres du régulateur de puissance mécanique en fonction des données générées par le modèle. Il est important à noter que les changements en ligne des paramètres du régulateur ne doivent pas occasionner de discontinuités dans la commande.

1.4 Méthodologie

Afin de développer le modèle de réglage du PID qui sera intégré dans le système présentement utilisé à la Chaire TERRE, il faut exécuter plusieurs étapes primordiales.

Une étude bibliographique et une revue théorique et de littérature doivent être faites. Cette étape permet de se familiariser avec les différentes théories qui entrent en jeu dans le projet et également de connaître les derniers développements et les méthodes utilisées dans ce domaine. Une fois la théorie bien assimilée, il est possible de faire un choix approprié pour la méthode de réglage PID qui doit être utilisée pour le modèle numérique. Une fois une modélisation numérique est réalisée sur la librairie Sim Power System de Matlab (logiciel comprend douze différentes bibliothèques de haut niveau)[13] pour réguler efficacement la vitesse relative et la puissance électrique du système hydrolienne, et obtenir des

oscillations de la vitesse relative ainsi que les variations de la puissance électrique qui doivent être très faibles, alors le système hydrolien sera directement couplé au réseau électrique sans risque majeur. Par la suite, en utilisant les modèles mathématiques qui comprennent des blocs présentant les différents éléments du banc d'essai, et par la suite, effectuer une analyse des signaux. L'étape suivante consiste à réaliser une série d'essais sur le modèle numérique afin d'ajuster les paramètres de PID. L'objectif de cette étape est d'optimiser le rendement électrique du système de contrôle.

CHAPITRE 2

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1 Introduction

L'énergie hydrolienne est une sorte d'énergie renouvelable qui permet de générer de l'électricité, l'énergie générée par des processus naturels qui sont continuellement renouvelés, grâce à la force de l'eau. Cette force dépend : soit de la hauteur de la chute d'eau, soit du débit des fleuves et des rivières. Cette énergie ne peut pas être épuisée et elle est constamment renouvelée [1].

2.2 Sources de l'énergie hydrolienne

La seule source de l'énergie hydrolienne vient de la puissance de l'eau [19], soit la puissance de mer (marée), rivières. Cette énergie dépend du cycle de l'eau. Elle est la plus importante source d'énergie renouvelable. Sous l'action du soleil, l'eau s'évapore de la surface de la Terre, monte dans l'atmosphère, se refroidit et se condense en pluie ou en neige dans les nuages, et retombe à la surface sous forme de précipitations [20]. L'eau qui tombe sur la terre s'accumule dans les rivières et les lacs, dans le sol et dans les couches poreuses de roches, et une grande partie retourne dans les océans, où elle s'évapore une fois de plus [21].

2.3 L'énergie hydrolienne

Une hydrolienne est une machine rotative sous-marine qui capte l'énergie cinétique des courants marins ou de cours d'eau, comme une éolienne capte l'énergie cinétique du vent [1]. L'hydrolienne semble être une réelle solution énergétique de demain, puisqu'elle utilise une énergie renouvelable et gratuite. Cette invention est de plus en plus étudiée,

puisque la densité de l'eau est supérieure à celle du vent ($1000/1.25 \text{ kg/m}^3$) [22], alors l'énergie contenue dans l'eau est plus grande que l'énergie du vent.

Lorsque l'eau s'écoule autour des pales de l'hydrolienne, elle entraîne celles-ci en rotation grâce à la friction qu'elle exerce à la surface des pales. L'énergie cinétique de l'eau est transformée en énergie mécanique qui fait tourner les pales de l'hydrolienne et qui entraîne la rotation du rotor de l'alternateur. Le rotor est l'élément qui est entraîné par la turbine [23]. Il est constitué d'un aimant et il tourne à l'intérieur du stator qui lui est fixe. Un mécanisme permet d'orienter les pales par rapport à la direction de l'eau. Le rotor entraîne l'axe de l'alternateur. Un courant électrique est alors produit et distribué par l'intermédiaire du réseau électrique [24].

Comme les éoliennes, les hydroliennes utilisent le principe de l'énergie cinétique [25]. Afin de calculer la puissance d'une hydrolienne, il faut commencer par calculer la puissance cinétique contenue dans le fluide [26] :

$$P_f = \frac{1}{2} C_p \rho A V^3 \quad (2.1)$$

Où :

ρ_f : La densité volumique du fluide,

V : La vitesse du fluide,

A : la surface équivalente balayée par les pales de la turbine qui correspond à [27]

$$A = \pi \cdot R^2 \quad (2.2)$$

Où : R le rayon de la turbine.

Seule une fraction de cette énergie sera captée par l'hydrolienne. Cette fraction est définie par C_p le coefficient de performance de l'hydrolienne [28]. Il représente le rendement de la turbine, et il est défini comme étant la fraction de l'énergie de l'eau extraite par la turbine par rapport à l'énergie totale qui aurait traversé la surface balayée par les pales du rotor. Il dépend principalement de la forme des pales et de leur angle par rapport à l'écoulement. Les pales sont conçues à partir de simulation numérique afin d'optimiser les performances de l'hydrolienne. C'est d'ailleurs les résultats de ces simulations qui seront utilisés comme entrée dans le modèle d'asservissement à défaut d'avoir les performances de l'hydrolienne en rivière. La formule de Betz [29] indique que, comme pour les éoliennes, seule une partie de l'énergie du fluide (soit 59 %)[29] peut être transformée en énergie mécanique pour produire de l'électricité.

2.4 État actuel des hydroliennes

De nos jours, les hydroliennes en mer bénéficient d'un développement important contenu de la bonne qualité de la ressource (profondeur et vitesse du courant), leur puissance nominale peut atteindre 1 MW et plus [30]. Les hydroliennes en rivière et en fleuve (profondeur moins profonde que celle de la mer) sont nécessairement de plus petites dimensions, leur puissance nominale excède rarement 400 kW [31], même dans un courant qui atteint de 4,5 m/s. Au Québec, la technique hydrolienne à l'heure actuelle est arrivée à la phase de l'expérimentation ou de la préparation de la commercialisation. En septembre 2010, un premier exemplaire industriel a été connecté au réseau d'Hydro-Québec. L'hydrolienne de RER Hydro était immergée dans le fleuve de Saint-Laurent, à la hauteur du Vieux-Port de Montréal. D'une puissance prévue de 100 kW [31], elle a fourni de l'électricité dans le réseau d'Hydro-Québec entre les années 2010 à 2013 [31].

2.5 Potentiel hydrolien

Théoriquement, le potentiel hydrolien mondial du courant des marées et des océans, près des côtes, se place à 7 800 TWh/an [31]. C'est qui vaut à quelque 40 % de la production d'électricité mondiale en 2013 [31]. Le potentiel hydrolien du courant des marées seulement correspond à un pourcentage de 10 à 15 % du total. Divisée de façon inégale sur la terre, la ressource dépend notamment de la morphologie sous-marine locale, près des côtes [31].

2.6 Hydroliennes en rivière

Le potentiel hydrolien du Canada est estimé à 15 000 MW [31]. Quant à celui du Québec, qui reçoit environ 35 % de l'écoulement annuel de tout le territoire canadien serait proportionnellement de 5 250 MW [31]. Compte tenu de la faisabilité technique (10-15 %), il se situerait entre 525 MW et 788 MW [31].

2.7 Rendement et frais d'Hydroliennes en rivière

Les bonnes conditions d'exploitation (profondeur supérieure à 6 m et vitesse du courant plus grande que 2 m/s) sont rarement réunies. D'ailleurs [31], bien que leur rendement de conversion énergétique soit de 30 à 40 %, leur taux de captage de l'énergie cinétique totale d'un cours d'eau n'atteint au plus que 15 %, car une importante quantité d'eau est déviée autour des hydroliennes [31]. Une fois que la technique hydrolienne sera parvenue à maturité, le coût estimé de l'électricité produite par une hydrolienne en rivière serait supérieur à 15 ¢/kWh [31].

2.8 Avantages et inconvénients des hydroliennes

On compare souvent le principe de l'hydrolienne à celui de l'éolienne. Les avantages et les inconvénients sont [14]:

- Pas de pollution, ni gaz à effet de serre, ni polluants pour l'eau, un impact minime sur la faune,
- faibles coûts d'exploitation,
- Production plus prévisible que celle de l'éolien,
- pas d'infrastructure de génie civil,
- Présence discrète, voire invisible, en raison de l'immersion quasi totale des composants de l'hydrolienne, c'est-à-dire impact visuel minimal,
- L'hydrolienne est constituée de matériaux recyclables comme l'aluminium et le cuivre,
- Exploitation de la turbine en conditions hivernales possiblement problématique. Pour optimiser la production d'énergie sur une année, il faudrait tenir compte des variations locales des niveaux d'eau,

2.9 Les différents types d'hydroliennes.

Dans la réalité il existe deux grands types d'hydroliennes. Les différents types d'hydroliennes sont basés sur la disposition axiale de l'arbre de rotation [32]. Les hydroliennes à axe horizontal ont un arbre de rotation parallèle à l'écoulement et utilisent des rotors de type hélice marine [32]. Ce type d'hydrolienne à axe horizontal est le principal type d'hydrolienne [33]. Les hydroliennes à flux transverse munies d'un arbre de rotation parallèle à la surface de l'eau et orthogonal à l'écoulement. Enfin, les hydroliennes à axe vertical disposent d'un arbre de rotation perpendiculaire à la fois à la surface de l'eau et à l'écoulement [32].

2.10 Hydrolienne à axe horizontal versus hydrolienne à axe vertical

En comparant l'hydrolienne à axe horizontal avec l'hydrolienne à axe vertical, on peut conclure les points suivants :

- Le rotor d'hydrolienne à axe horizontal est privilégié, figure 2.1 [31], car il présente des avantages en comparaison avec ceux d'hydroliennes à axe vertical figure 2.2 :

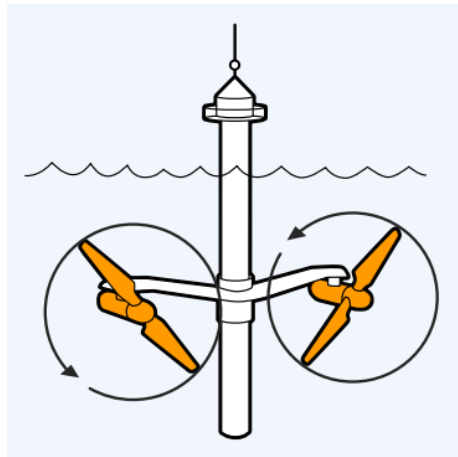


Figure 2.1 hydrolienne à axe horizontal [31].

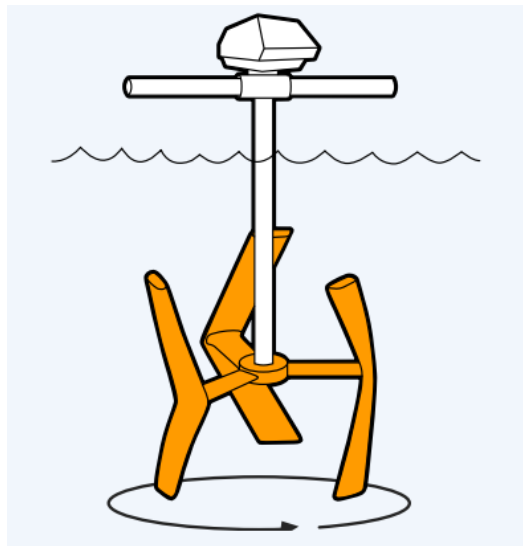


Figure 2.2 hydrolienne à axe vertical [31].

- Les hydroliennes à axe horizontal sont faciles à démarrer et les technologies développées de l'éolien et des hélices marines sont appliquées par les hydroliennes à axe horizontal [19].

Le fonctionnement d'une hydrolienne à axe vertical ne dépend pas de la direction de l'écoulement, par conséquent, sa conception est très simple, le générateur peut être placé en bout d'arbre au-dessus de l'eau. Elle émet moins de bruit, par la diminution des pertes en bout de pale [34]. Cependant, la disposition verticale de l'axe de rotation présente plusieurs inconvénients : un faible couple de démarrage, qui nécessite souvent l'utilisation d'un dispositif pour faire tourner le rotor : de forts d'écoulements dynamiques et un faible rendement hydrodynamique [34]. La disposition horizontale de l'axe de rotation élimine un grand nombre de ces inconvénients. Ainsi, les hydroliennes à axe horizontal avec des fondations gravitaires ou structures flottantes sont la technologie la plus adaptée pour une telle conversion de l'énergie hydrocinétique.

Comme les courants marins sont constants et prévisibles, la production d'électricité peut donc être estimée avec précision, ce qui constitue un grand avantage par rapport à l'énergie éolienne. Le rotor d'hydrolienne est relativement petit et peut récupérer une énergie considérable dans les zones de forts courants [35]. Malgré d'une légère ressemblance avec les éoliennes, il existe une différence dans la conception d'une hydrolienne en raison de la densité plus grande de l'eau (800 fois la densité de l'air) [1]. Ainsi, pour la même puissance produite, une hydrolienne est de taille plus petite que celle d'éolienne, Figure 2.3. Par conséquent, les chargements donnés à la structure d'une hydrolienne sont très différents de ceux donnés à la structure d'une éolienne. En matière d'environnement, les hydroliennes peuvent être immergées jusqu'à 35 m de profondeur

sans gêner la navigation. La vitesse de rotation des pales est faible et perturbe peu la faune aquatique. Toutefois, au Québec, des études environnementales sont nécessaires avant de pouvoir implanter des éoliennes.



Figure 2.3 la taille d'hydrolienne par rapport à celle d'éolienne[1]

2.11 Mécanique des fluides

D'après le théorème de l'énergie cinétique, l'énergie cinétique d'une masse est égale à la moitié du produit de cette masse par le carré de sa vitesse de déplacement.

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot U^2 \quad (2.3)$$

Pour calculer la force de poussée exercée sur les pales d'hydrolienne, on a tenu compte des hypothèses suivantes [36] :

- Pas de frottement.
- Écoulement homogène, incompressible, stationnaire.
- Nombre infini de pales (disque plein) est présenté à la Figure 2.4
- Poussée uniforme sur la surface du disque.
- Sillage sans rotation.
- Pressions statiques en amont et en aval du disque sont égales.

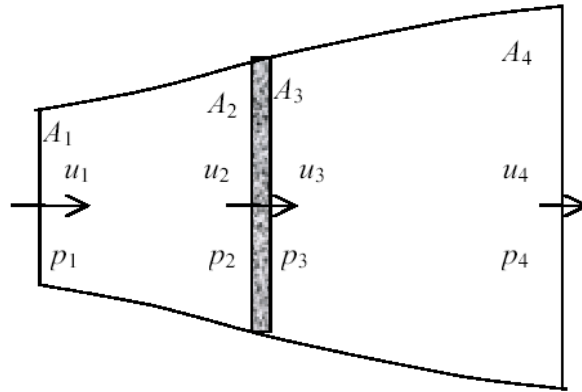


Figure 2.4 Modèle du disque plein [1] .

À partir de l'équation de conservation de la quantité de mouvement au volume de contrôle, la force de poussée est donnée par :

$$T = U_1(\rho_e AU)_1 - U_4(\rho_e AU)_4 \quad (2.4)$$

Où :

ρ_e : Densité de l'eau.

A : Surface balayée par le rotor.

U : Vitesse de l'écoulement.

$$\dot{m} = (\rho_e AU)_1 = (\rho_e AU)_4 \quad (2.5)$$

\dot{m} : Débit massique de l'écoulement.

Ainsi, la force de poussée devient

$$T = \dot{m}(U_1 - U_4) \quad (2.6)$$

En appliquant l'équation de Bernoulli sur chaque côté du disque, on obtient :

En amont du disque :

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho_e U_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho_e U_2^2 \quad (2.7)$$

En aval du disque :

$$P_3 + \frac{1}{2} \rho_e U_3^2 = P_4 + \frac{1}{2} \rho_e U_4^2 \quad (2.8)$$

Les forces de pression P_1 et P_4 peuvent être supposées égales et les vitesses sur les deux côtés du disque sont identiques.

La force de poussée peut être obtenue par une autre expression par la différence de forces sur chaque côté du disque

$$T = A_2(P_2 - P_3) \quad (2.9)$$

En utilisant les équations (2.7), (2.8) et (2.9). On obtient l'équation suivante :

$$T = \frac{1}{2} \rho_e A_2 (U_1^2 - U_4^2) \quad (2.10)$$

En faisant l'égalité des équations (2.6) et (2.10), et en écrivant le débit massique de

l'écoulement égal à : $\dot{m} = \rho_e \cdot A_2 U_2$, On obtient :

$$U_2 = \frac{U_1 + U_4}{2} \quad (2.11)$$

Cela signifie que la vitesse reçue par le rotor est la moyenne des vitesses en amont et en aval du rotor.

Si on définit le facteur d'interférence (a), qui représente la diminution fractionnaire de la vitesse entre l'écoulement amont et le flux perçu par le rotor on a :

$$a = \frac{U_1 - U_2}{U_1} \quad (2.12)$$

$$U_2 = (1 - a)U_1 \quad (2.13)$$

Et :

$$U_4 = U_1 (1 - 2a) \quad (2.14)$$

En utilisant l'équation (2.10), on obtient la puissance P produite.

$$P = TU_2 = \frac{1}{2} \rho_e A_2 U_2 (U_1 - U_3)(U_1 + U_4) \quad (2.15)$$

En injectant (2.13) et (2.14) dans (2.15), on obtient:

$$P = \frac{1}{2} \rho_e A_2 U_1^3 4a(1 - a)^2 \quad (2.16)$$

Le rendement de la turbine est exprimé par le coefficient de puissance :

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho_e A_2 U_1^3} = \frac{\frac{1}{2} \rho_e A_2 U_1^3 4a(1 - a)^2}{\frac{1}{2} \rho_e A_1 U_1^3} = 4a(1 - a)^2 \quad (2.17)$$

Le coefficient de puissance maximal est déterminé en dérivant l'équation précédente, on obtient que :

$$C_{p, \max} = 16/27 = 0.5926 \quad (2.18)$$

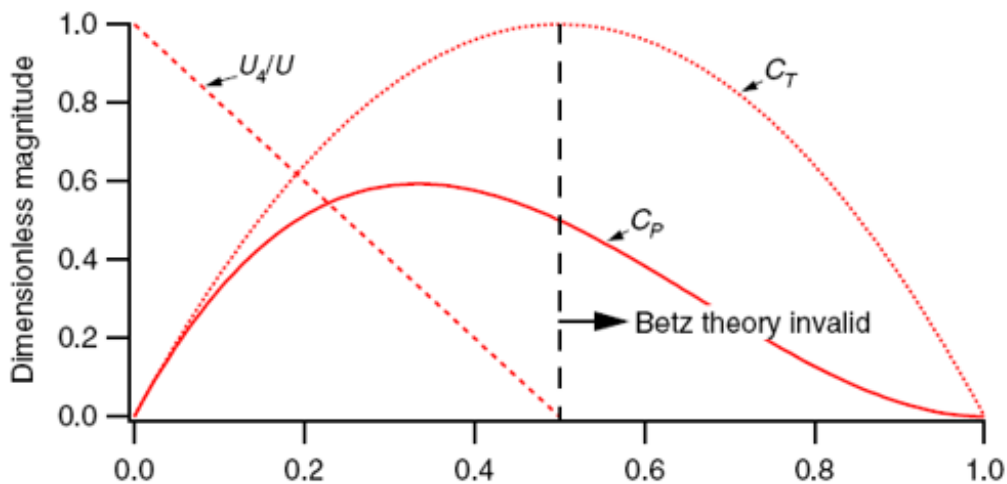


Figure 2.5 Limite de BETZ[36]

2.12 Système de contrôle

2.12.1 Définition

Un système de contrôle c'est un ensemble des dispositifs qui gère, commande, dirige ou régule le comportement d'un autre dispositif ou d'un système pour obtenir des résultats désirés [37]. En d'autres termes, la définition du système de contrôle peut être réécrite sous la forme d'un système de contrôle qui commande un autre système. Au fur et à mesure que la civilisation humaine se modernise jour après jour, et la demande d'automatisation augmente en conséquence. L'automatisation exige fortement le contrôle des systèmes [38].

Ces dernières années, les systèmes de contrôle jouent un rôle majeur dans le développement et l'avancement de la technologie et de la civilisation modernes. Pratiquement tous les aspects de notre vie quotidienne sont affectés plus ou moins par un système de contrôle [39], comme une hydrolienne, une éolienne, et une automobile qui ont toutes un système de contrôle. Ces systèmes sont également utilisés dans les processus

industriels pour avoir plus de production. Nous trouvons le système de contrôle dans le contrôle de qualité des produits, des systèmes de transport [39], du système de fabrication d'alimentation, de la technologie spatiale, de la robotique et bien d'autres. Les principes de la théorie du contrôle sont applicables à l'ingénierie et au domaine non technique à la fois [40].

2.12.2 Exigences d'un bon système de contrôle

La principale caractéristique d'un bon système de contrôle devrait avoir une relation mathématique claire entre l'entrée et la sortie du système [41]. Lorsque la relation entre l'entrée et la sortie du système peut être représentée par une proportionnalité linéaire, le système est appelé système de contrôle linéaire [42]. Lorsque la relation entre l'entrée et la sortie ne peut pas être représentée par une seule proportionnalité linéaire, l'entrée et la sortie sont liées par une relation non linéaire, le système est appelé système de contrôle non linéaire. On peut résumer les exigences d'un bon système de contrôle comme suit [41] :

- **Précision:** La précision est la tolérance de mesure de l'instrument et définit les limites des erreurs commises lorsque l'instrument est utilisé dans des conditions de fonctionnement normales. La précision peut être améliorée en utilisant des éléments de rétroaction. Pour augmenter, la précision de tout détecteur d'erreurs du système de contrôle doit être présente dans le système de contrôle.
- **Sensibilité:** Les paramètres du système de contrôle changent toujours en fonction des conditions environnantes, des perturbations internes ou de tout autre paramètre. Ce changement peut être exprimé en termes de sensibilité. Tout système de contrôle doit être insensible à ces paramètres, mais sensible aux signaux d'entrée uniquement.

- **Stabilité:** C'est une caractéristique importante du système de contrôle. Pour le signal d'entrée borné, la sortie doit être bornée et si l'entrée est zéro, la sortie doit être nulle, alors un tel système de contrôle est dit système stable.
- **Bruit:** Un signal d'entrée indésirable est appelé bruit. Un bon système de contrôle devrait être capable de réduire l'effet de bruit pour de meilleures performances.
- **Vitesse:** C'est le temps pris par le système de contrôle pour atteindre sa sortie stable. Un bon système de contrôle possède une grande vitesse. La période transitoire pour un tel système est très petite.
- **Oscillation:** Un petit nombre d'oscillations ou oscillation constante de la sortie ont tendance à être stables.

2.13 Conception d'un système d'asservissement

Un système d'asservissement est une forme la plus importante [43] utilisée dans un système de commande donc est défini comme un système de contrôle de processus, que ce soit la variable contrôlée est une valeur physique ou un mouvement [42], donc correspond à un ensemble de relations causales entre des signaux d'entrées et des signaux de sortie. Ce sont représentées par un schéma figure 2.6 qui permet de décrire le système physique par un ensemble d'équations algébriques lors d'une modélisation complète. Chaque équation est représentée par un bloc et établit une relation entre les signaux.

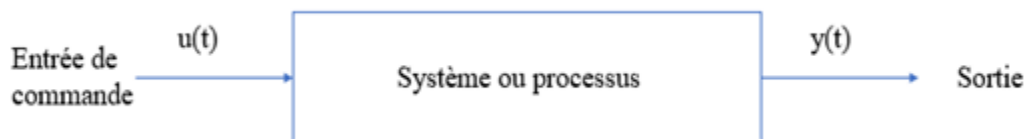


Figure 2. 6 Exemple de schéma bloc.

La première étape de la conception de schéma asservi consiste à réaliser une modélisation mathématique du système [42]. Cela est élaboré par une représentation d'état ou une fonction de transfert entre les entrées et les sorties. En fait, tout système physique doit obéir à un bilan des forces à partir duquel il est possible d'estimer la réalité selon un certain niveau d'incertitude.

La deuxième étape après avoir déterminé la représentation mathématique du système, consiste à choisir la loi de commande la plus appropriée. Cela est élaboré par des régulateurs de type P, PI, PD et PID [42].

La troisième étape est basée sur l'utilisation des différents logiciels de conception et de simulation comme Matlab (Simulink, script) ou LabVIEW [13], pour modéliser le système. En développant un algorithme qui prend en considération les différents paramètres de projet (puissance, vitesse), le système de contrôle (PID) peut être amélioré [42].

La quatrième et dernière étape, après avoir conçu un système complet, comprend la configuration des paramètres du système de contrôle. Cela a pour objectif de trouver le gain optimal de ce dernier. Cette étape est basée essentiellement sur l'étude de la non-linéarité, la stabilité ainsi que la validation de la performance du système par rapport aux valeurs mesurées. Ainsi, il est possible de retourner à l'étape numéro deux, pour trouver une modélisation plus complète qui correspond mieux à la réalité si les résultats ne sont pas satisfaisants.

2.14 Systèmes en boucle ouverte et boucle fermée

Il existe deux principaux types de systèmes de contrôle, système de commande en boucle ouverte et système de commande en boucle fermée.

2.14.1 Système en boucle ouverte

Le système de commande en boucle ouverte s'appelle système de contrôle manuel. Dans ce système de commande en boucle ouverte, la sortie est générée directement en réponse à un signal d'entrée sans retour d'information sur l'état de la sortie [44]. Dans une commande en boucle ouverte les causes d'erreur peuvent être multiples, manque de connaissance des conditions extérieures, la mauvaise définition des spécifications du système pour ce contrôleur, etc. Dû au manque d'information sur l'état de la sortie, ces erreurs ne peuvent être corrigées par le système lui-même. Un système générique de schéma bloque en boucle ouverte est présenté dans la figure 2.7[45].



Figure 2.7 Système en bloc en boucle ouverte.

Les avantages du système en boucle ouverte sont faciles à la construction et à la conception et que ce système est généralement stable, pratique à utiliser, et peu coûteux. Les désavantages du système en boucle ouverte sont que toutes variations du processus ne peuvent pas être corrigées automatiquement et qu'il n'est pas fiable et n'est pas précis.

2.14.2 Système en boucle fermée

Le système de commande en boucle fermée s'appelle système de commande automatique. Dans ce système de commande en boucle fermée, le signal de sortie du système est comparé à celui désiré [46]. La différence entre les deux signaux est utilisée pour générer un signal d'erreur. Le système utilise le signal d'erreur pour ajuster le signal de sortie jusqu'à ce qu'un signal de sortie satisfaisant soit obtenu. Le schéma en boucle fermée est illustré dans la figure 2.8.

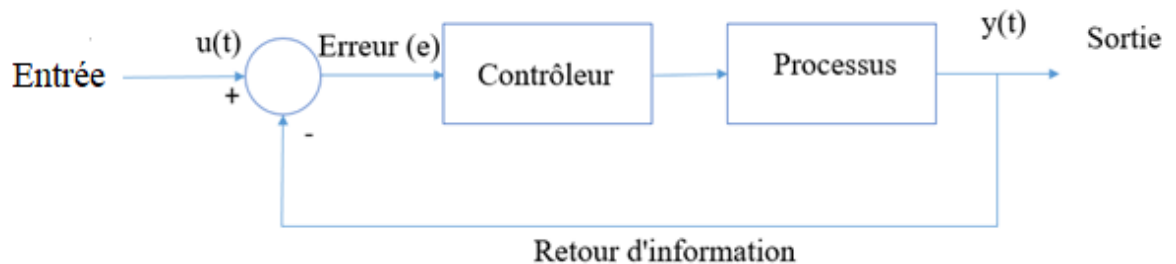


Figure 2.8 Schéma bloc en boucle fermée.

Un système en boucle fermé comprend un ensemble de blocs successifs, qui est la partie opérative du système (contrôleur et processus), et une boucle de retour d'informations. Le système en boucle fermée doit répondre à des critères de performance du système.

Les avantages du système en boucle fermée sont plus précis que le système en boucle ouverte, en raison de la présence du signal de rétroaction, qui facilite l'automatisation. Également, la sensibilité du système en boucle fermée peut être réduite pour rendre le système plus stable et moins affectée par le bruit.

Les inconvénients du système en boucle fermée sont: le système est compliqué à concevoir, exige plus d'entretien, le retour d'information conduit à une réponse oscillatoire, et le gain global est réduit en raison de la présence de rétroaction[47].

2.15 Contrôleur PID

Les ingénieurs des systèmes de contrôle sont fréquemment confrontés à la tâche d'ajuster les paramètres du contrôleur pour obtenir un comportement souhaité [48]. Il y a plusieurs façons de les faire. Parmi de ces façons est de passer par les étapes de la modélisation et de la conception de contrôle. Puisque le contrôleur PID a très peu de paramètres, un certain nombre de méthodes empiriques spéciales ont également été développées. Une idée simple consiste à connecter un contrôleur avec n'importe quel système par augmentation les gains jusqu'à ce que le système commence à osciller, puis réduire les gains par un facteur approprié [49].

Les contrôleurs PID sont largement utilisés dans les installations industrielles, car ils sont simples et efficaces [50]. Le contrôleur PID fournit une correction à partir du signal d'erreur, soit la différence entre le signal désiré et celui mesuré. Le PID consiste à la combinaison de trois actions de base, soit l'action P (proportionnelle) c'est-à-dire la correction instantanée entre la consigne et le signal mesuré, l'action I (intégrale), c'est une correction complémentaire à la valeur corrigée par la correction proportionnelle, par la suite l'intégrale permet de stabiliser cette correction en fonction du temps, et finalement l'action D (dérivée), c'est l'action avec anticipation de la régulation en cas de perturbation rapide ou en modification du système.

L'équation du contrôleur PID est présentée par la formule suivante [51] :

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (2.19)$$

Où :

K_p : gain proportionnel.

K_I : gain intégral.

K_d : Gain dérivé.

Le contrôleur PID fonctionne dans un système en boucle fermée en utilisant le schéma ci-dessus figure 2.9 [48]. La variable (e) représente l'erreur de suivi, la différence entre la valeur d'entrée souhaitée (U) et la sortie réelle (Y). Ce signal d'erreur (e) sera envoyé au contrôleur PID, et le contrôleur calcule à la fois : l'ajustement, la dérivée et l'intégrale de ce signal d'erreur. Le signal (R) sorti du contrôleur est maintenant égal au gain proportionnel (K_p) multiplié par l'amplitude de l'erreur, plus le gain intégral (K_i) multiplié par l'intégrale de l'erreur, et plus le gain dérivé (K_d) multiplié la dérivée du Erreur [51] 0

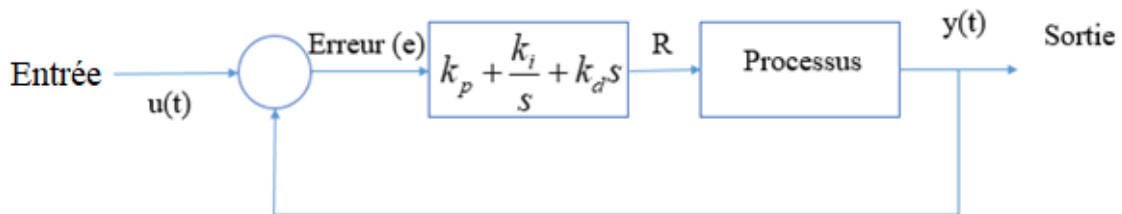


Figure 2.9 Le contrôleur PID dans un système en boucle fermée.

2.15.1 Les caractéristiques des contrôleurs P, I et D

a. Régulation proportionnelle

Dans la régulation proportionnelle, la réponse du régulateur est proportionnelle à l'erreur. La réponse peut être ajustée en multipliant l'erreur par un gain. Plus le gain est élevé, plus le changement en sortie sera grand pour une variation de l'erreur, jusqu'à ce que parfois, le système devienne instable. En contrepartie, un gain trop faible rendra le contrôleur peu sensible et inefficace[52].

Le contrôleur P est principalement utilisé dans les processus de premier ordre avec un stockage d'énergie unique pour stabiliser le processus instable[52]. L'utilisation principale du contrôleur P est pour diminuer l'erreur en régime permanent du système. Lorsque le facteur de gain proportionnel K_p augmente[53], l'erreur en régime permanent du système diminue. Cependant, malgré la réduction de l'erreur, le contrôleur P ne parvient jamais à éliminer l'erreur de régime permanent du système. Quand on augmente le gain proportionnel, il fournit une marge d'amplitude et de phase plus petite, une bande de fréquence plus large satisfaisante, et une plus grande sensibilité au bruit[53]. On ne peut utiliser ce contrôleur que lorsque notre système est tolérable à une erreur d'état constant. Par contre, on peut facilement conclure que l'application du contrôleur P diminue le temps de montée et qu'après une certaine valeur de réduction sur l'erreur en régime permanent, l'augmentation du gain K_p n'entraîne qu'un dépassement de la réponse du système. La commande P provoque également une oscillation si elle est suffisamment instable en présence de retard du temps[54].

b. Régulation intégrale

L'action intégrale complète l'action proportionnelle. Elle permet d'éliminer l'erreur résiduelle en régime permanent[55]. Elle est la somme des erreurs instantanées sur la durée du temps et donne l'écart accumulé qui aurait dû être corrigé précédemment. Elle est utilisée afin de rendre le système plus dynamique, en permettant d'amener le procédé vers une valeur désirée plus rapidement[55].

c. Régulation dérivée

L'action dérivée est proportionnelle à la vitesse de changement de l'erreur sur une durée de temps[55]. Elle prédit le comportement du système et améliore le temps de stabilisation et la stabilité du système. Elle est utilisée dans l'industrie pour régler des variables lentes comme la température [56]. Cette action n'est pas recommandée pour le réglage d'une variable bruitée ou très dynamique (la pression). La composante dérivée d'un contrôleur aide à réduire le dépassement. Il est utilisé pour réduire le taux de changement de l'erreur de suivi afin d'éviter les dépassements dus à l'inertie du système.

2.16 Méthodes de réglage PID

Toutes les méthodes générales de conception de contrôle peuvent être appliquées au contrôle PID. Un certain nombre de méthodes spéciales qui sont faites sur mesure pour le contrôle PID ont également été développées, ces méthodes sont souvent appelées méthodes convenables. Quelle que soit la méthode utilisée, il est essentiel de prendre toujours en compte les éléments clés du contrôle, les perturbations de charge, le bruit du capteur, l'incertitude du processus et les signaux de référence. Le PID parfait n'existe pas. Certaines applications autorisent un dépassement de la valeur souhaitée afin d'améliorer le

temps de stabilisation, alors que pour d'autres dépassements de cette valeur pourraient engendrer de conséquences critiques. Il existe de nombreuses méthodes pour le réglage PID. Elles sont classifiées en deux principales catégories : les méthodes de boucle fermée et méthodes de boucle ouverte [19]. Dans cette étude, une méthode en boucle fermée doit être utilisée en raison de sa stabilité et sa rapidité à corriger l'erreur. [57].

La méthode des moindres carrés fournit la justification générale pour le placement de la droite de meilleur ajustement parmi les points de données étudiés. L'application la plus courante de la méthode des moindres carrés, appelée linéaire ou ordinaire, vise à créer une ligne droite minimisant la somme des carrés des erreurs générées par les résultats des équations associées, telles que les résidus au carré résultant des différences entre la valeur observée et la valeur anticipée basée sur le modèle.

2.16.1 Performance du contrôleur PID :

À l'heure actuelle, la majorité des installations industrielles travaillent sous contrôle, où la stabilité et aussi les performances sont d'une grande importance [58]. La mesure de la qualité d'une réponse du système est un problème difficile. Au cours des années, plusieurs indices de performance de qualité ont été proposés dans la littérature de contrôle pour améliorer la qualité de réponse d'un système contrôlé [58].

Les indices de performance des contrôleurs PID peuvent être divisés en deux catégories[58]: La première catégorie comprend des caractéristiques qui peuvent être explicitement identifiées à partir de la réponse progressive du système, tel que le temps de montée, le temps d'établissement, le taux de décroissance, les dépassements et les erreurs du régime stationnaire. Les indices de la deuxième catégorie sont calculés à partir de la

réponse par étape en intégrant l'erreur de processus, ainsi appelée critère de performance intégré. Ces derniers sont plus exigeants en calcul que les indices de la première catégorie, mais ils sont plus complets, car les performances sont calculées pour l'ensemble des données d'erreur, et non à partir d'une caractéristique de la réponse du système.

Il existe quatre indices de performance intégrale de contrôleur PID couramment utilisés: erreur de l'intégrale absolue (EIA), erreur de l'intégrale-carré (EIC), erreur de l'intégrale du temps absolue (EITA) et erreur de l'intégrale du temps carrée (EITC). Le résumé complet des règles de réglage PID dans montre que ces indices de performance intégrés sont souvent utilisés dans les comparaisons de performances du contrôleur PID. Étant donné que l'erreur est intégrée donne une petite valeur, cela signifie de meilleures performances. Les équations des indices de performance les plus couramment utilisées sont [59] :

$$EIA = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (2.20)$$

$$EIC = \int_0^{\infty} e(t)^2 dt \quad (2.21)$$

$$EITA = \int_0^{\infty} t * |e(t)| dt \quad (2.22)$$

$$EITC = \int_0^{\infty} t * e(t)^2 dt \quad (2.23)$$

Comme le nom de EIA l'indique, la valeur absolue d'erreur mesurée est intégrée sans ajouter un terme ou un multiplicateur supplémentaire. La valeur absolue d'erreur est

utilisée pour éviter des erreurs avec de forme de signe afin de compenser l'une et l'autre, comme ce serait le cas avec l'indice de performance EI (Erreur Intégrale). Toutes les erreurs au fil du temps prennent le même effet lors du calcul de l'EIA et l'effet dépend linéairement de l'ampleur de l'erreur. En d'autres termes, le temps d'apparition de l'erreur n'affecte pas l'indice de performance EIA et le fait de doubler l'ampleur des erreurs double également le EIA. Semblable à EIA, le temps n'affecte pas la valeur de performance de EIC. Cependant, lorsque l'erreur est au carré, les erreurs de plus grande magnitude sont accentuées. Ainsi, on peut voir qu'un réglage de contrôleur PID basé sur EIC entraînera un dépassement inférieur par rapport à EIA, mais un temps de stabilisation plus long par rapport à EITA et EITC pondérés dans le temps [59].

Des alternatives aux indices de réponse par étape peuvent être obtenues en pondérant l'erreur par le moment où elle s'est produite. EITA et EITC utilisent le temps comme un multiplicateur de l'erreur lors de l'intégration. Cela réduit l'impact de l'erreur provoquée par le changement de la valeur de consigne au début du test de réponse par étape. En plus de cela, il met l'accent sur les erreurs survenant plus tard dans le test de réponse par étape, ce qui aidera à minimiser les oscillations restantes et les erreurs d'état stable.

Les indices de performance présentés mesurent les différentes propriétés des performances du contrôleur PID. Les caractéristiques de la réponse par étape, telles que les temps de montée et de stabilisation et le dépassement du contrôleur, peuvent être utilisées pour évaluer la performance. Si le système a des exigences pour ces valeurs, il est raisonnable de les choisir pour évaluer les performances d'un contrôleur. Par exemple, dans

certains cas, un dépassement excessif du point de consigne ne peut pas être toléré dans le système. Par conséquent, il est justifié de mesurer et d'optimiser cette caractéristique exacte. Les mesures de performance intégratives décrivent l'erreur de consigne globale. Cela signifie que la même valeur de performance peut être obtenue avec des réponses par étapes très différentes.

- Il est important de noter que la longueur de mesure affecte ces indices de performance, car la somme des erreurs est calculée et même les plus petites erreurs sont notées. Lorsque l'erreur est au carré, l'accent est mis sur l'effet des erreurs les plus grandes et par conséquent sur l'impact des erreurs les plus petites. Le fait de rendre carré des erreurs peut être utilisé lorsque l'erreur maximale doit être minimisée et que le suivi du point de consigne est une caractéristique importante du contrôle du système. Selon la structure du contrôleur et le cas d'utilisation, le temps peut également être utilisé comme multiplicateur de l'erreur. S'il est crucial que le système se stabilise au point de consigne, mais que le chemin d'accès au point de consigne n'est pas important, la multiplication de l'erreur par le temps accentuera les erreurs dans des parties les plus importantes du contrôle plus tard. De plus, si le changement de point de consigne est une étape nette sans aucun lissage, l'erreur sera importante près des changements rapides. Dans ce cas, si tous les points d'erreur sont considérés comme d'égales importances, un réglage plus rapide du contrôleur de réponse aura de meilleures performances que le contrôleur plus lent avec un meilleur contrôle de l'état stable. Cependant, si l'erreur est pondérée dans le temps, son effet lors du changement de point de consigne est diminué et les performances à l'état stable sont accentuées. Le choix de bon indice

de performance pour un contrôleur n'est pas une tâche facile, car les exigences et le comportement souhaité diffèrent d'une application à l'autre. Dans notre cas, l'erreur intégrale du temps absolue (EITA) a été utilisée parce qu'elle intègre l'erreur absolue multipliée par le temps, elle pondère des erreurs qui existent après une longue période beaucoup plus que ceux au début de la réponse. Cette méthode de réglage produit des systèmes qui réagissent beaucoup plus rapidement que les deux autres méthodes de réglage [60].

2.16.2 Effet du PID sur le générateur d'hydrolienne

Le contrôleur à dérivée intégrale proportionnelle (PID) est la forme de rétroaction la plus courante dans les systèmes de contrôle de la vitesse d'un hydro générateur. C'est un élément essentiel des régulateurs et l'outil standard du contrôle de processus. Le contrôle PID est également un élément important d'un système de contrôle distribué et, en tant que tels, ces contrôleurs se présentent sous différentes formes. De plus, grâce à ses performances efficaces et robustes avec un algorithme simple, les contrôleurs PID ont été largement acceptés dans la plupart des applications industrielles. Ziegler et Nichols ont mis en œuvre et publié leurs méthodes classiques et de nombreuses recherches sont également effectuées dans le cadre de la conception de contrôleurs PID conventionnels. Cependant, les méthodes de réglage classiques impliquées dans le contrôleur PID souffrent de quelques problèmes de conception systématiques.

CHAPITRE 3

MODÉLISATION DU BANC D'ESSAI D'HYDROLIENNE

3.1 Introduction

La modélisation du banc d'essai d'hydrolienne (BEH) permet la modélisation expérimentale et numérique, en tenant compte que la modélisation est divisée en deux parties, où le troisième chapitre conçoit la simulation, tandis que le quatrième chapitre montre les résultats des simulations numériques.

Le but de cette section est de présenter la construction du modèle numérique de BEH qui est conçue par le logiciel numérique Matlab. Il faut pour chaque conception du système de contrôle qu'il réalise les objectifs et les caractéristiques de ce système.

Ce chapitre présente deux modèles de BEH, qui sont : le modèle spécifique, et le modèle numérique de BEH qui concerne principalement au contrôle de puissance électrique du générateur et effectue la simulation du système de contrôle de la puissance électrique générée par le générateur en utilisant le logiciel de MATLAB.

3.2 Modèle spécifique de banc d'essai d'hydrolienne

Le BEH qui se trouve dans le laboratoire de la Chaire TERRE se compose des composantes mécaniques et des composantes électriques figure 3.1.



Figure 3.1 Les comportements du (BEH).

Le (BEH) se comporte de plusieurs de composantes : La commande (BBA), le moteur asynchrone, et le générateur. Où la commande contrôle le moteur asynchrone qui fournit la puissance mécanique au générateur synchrone à aimant permanent. La puissance mécanique de l'hydrolienne est convertie en énergie électrique par un générateur de courant alternatif (CA) ou par un générateur de courant continu (CC). Le générateur de courant alternatif peut être une machine synchrone ou une machine à induction (asynchrone). La machine synchrone à aimant permanent est la plus utilisée dans l'industrie des énergies renouvelables [61] et a été adoptée dans ce projet.

3.3 Machines électriques

Dans les zones industrielles, il existe deux sortes de machines électriques, cela dépend de la façon de fonctionnement et de la transformation de l'énergie d'une forme à une autre. Chaque type de ces machines a des caractéristiques électriques et mécaniques différentes. Les deux types de machines sont : les machines synchrones et les machines asynchrones. La machine synchrone peut être des moteurs ou des générateurs pour les utiliser dans de nombreux domaines appliqués. Dans ce projet la machine synchrone à aimant permanent a été utilisée comme un générateur et la machine asynchrone a été employée comme un moteur[62].

3.4 Les moteurs

Il existe de nombreux types des moteurs électriques qui peuvent être divisés en deux catégories principales : les moteurs à courant continu, et les moteurs à courant alternatif. Les moteurs à courant alternatif peuvent être classifiés en deux sous-catégories [63] : les moteurs synchrones et les moteurs asynchrones. En fait qu'un moteur synchrone signifie que l'arbre du moteur tourne à la même vitesse que le champ magnétique rotatif à l'intérieur

du moteur, tandis qu'un moteur asynchrone tourne plus lentement que le champ magnétique en rotation [62].

Les petits moteurs à courant continu sont utilisés dans les télécommandes, les petits jouets et les lecteurs de disques, cependant, des moteurs à courant continu les plus gros sont encore utilisés dans certaines applications industrielles [64].

3.4.1 Machines asynchrones

De nos jours les procédés industriels dépendent largement des moteurs à induction : pompage, machines agricoles et applications minières. Les statistiques montrent que 70 à 80% des applications industrielles utilisent des moteurs à induction [65], en raison que les machines asynchrones sont des machines électriques les plus couramment utilisées. Ils sont moins chers, robustes et plus faciles à entretenir par rapport à d'autres moteurs alternatifs [66].

Le moteur à induction est un moteur à courant alternatif, le principe de fonctionnement de ce moteur est basé sur l'induction électromagnétique. L'énergie est transformée par les champs magnétiques rotatifs du moteur à induction. Les courants triphasés du côté stator créent un champ électromagnétique qui interagit avec le champ électromagnétique dans les barres du rotor, puis le couple résultant sera produit par la loi de Lorentz [67]. Par conséquent, l'énergie électrique pourrait être transformée en énergie mécanique.

3.4.2 Structures des moteurs à induction

Généralement le moteur à induction se compose des parties internes et externes, figure 3.2, où les parties externes comprennent l'enveloppe extérieure du moteur qui protège les principales parties intérieures du moteur de l'environnement, et aide au transfert

de chaleur de l'intérieur du moteur vers l'extérieur. Les moteurs ont souvent des ailettes de refroidissement pour augmenter la surface pour une meilleure dispersion de la chaleur. Au-dessus de l'enveloppe du moteur se trouve la boîte à bornes utilisée pour connecter le moteur au réseau électrique, elle sert également à protéger les connecteurs des facteurs environnementaux externes (eau, poussière). Au bout de l'enveloppe du moteur, il existe l'arbre qui transmet le couple du moteur à une application entraînée. Du côté opposé, il y a le capot du ventilateur pour le protéger, le ventilateur monté sur l'arbre dirige le flux d'air créé par le ventilateur pour refroidir le moteur, en même temps, il protège les humains, les animaux et les objets de tout contact avec le ventilateur en rotation.

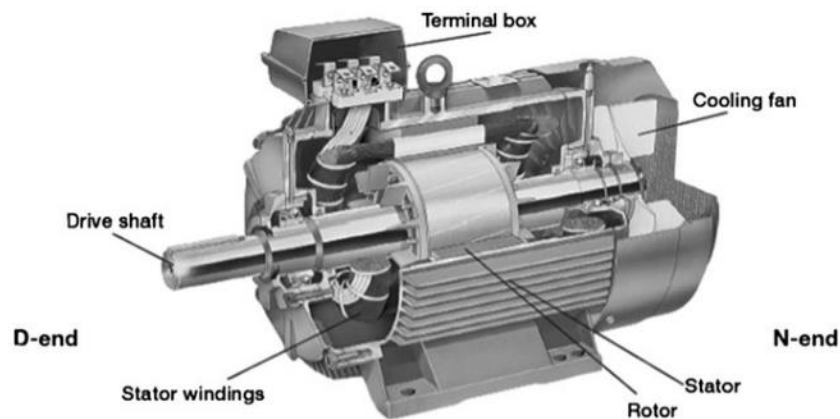


Figure 3.2 Moteur à induction[68]

Les parties internes du moteur à induction se combinent de deux parties principales: stator et rotor, le stator est une partie stationnaire et le rotor est une partie tournante. Où le stator est fabriqué de plusieurs plaques d'acier laminées électriquement qui sont fixées ensemble. Lorsque le courant alternatif passe à travers le stator, ce dernier produit un champ magnétique tournant. Le rotor se retrouve à l'intérieur du stator. Et également, le noyau du rotor est constitué des plaques d'acier laminées électriquement [68].

3.5 Les Générateurs

Le générateur est une machine électrique définie comme un appareil qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Un générateur électrique peut être défini comme une machine électrique qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. En effet l'arbre du rotor du générateur est couplé mécaniquement à l'arbre de la turbine d'hydrolienne, de sorte que la puissance mécanique de la turbine transmise à l'arbre du rotor et selon la loi d'induction électromagnétique de Faraday chaque fois qu'un conducteur est déplacé à l'intérieur d'un champ magnétique tournant ou vice versa alors EMF est induite dans le conducteur et le courant commence à circuler à travers le conducteur selon le principe du générateur[62].

3.5.1 Classification des générateurs

Les générateurs sont classés en fonction du courant généré, soit courant alternatif ou continu. Une autre classification des générateurs peut également être effectuée en fonction de la rotation du rotor, générateurs synchrones (vitesse constante), qui fonctionnent à une vitesse constante en fonction du nombre de pôles et de la fréquence appliquée, et Générateurs asynchrones (à vitesse variable), qui ne fonctionnent jamais à la vitesse synchrone. Les générateurs sont classifiés aussi en fonction du champ magnétique. Pour fonctionner, le générateur a besoin d'un champ magnétique qui peut être un aimant permanent ou un électroaimant. Dans cette étude, le générateur synchrone à aimant permanent a été utilisé pour éviter les besoins en alimentation pour l'excitation du champ magnétique[62].

3.5.2 Générateur synchrone à aimant permanent

Les machines synchrones à aimant permanent sont largement utilisées dans les générateurs, en particulier dans la production d'énergie électrique, telles que les générateurs de turbines et les générateurs hydroélectriques dans l'alimentation de réseau. Les générateurs synchrones convertissent la puissance mécanique en énergie électrique, et les condensateurs synchrones alimentent uniquement la puissance réactive pour stabiliser les tensions du système [69]

Les générateurs synchrones caractérisés par la vitesse de rotation du champ magnétique proportionnelle à la fréquence du courant d'armature. Le champ magnétique généré par le courant qui circule à la même vitesse de celle créée par le courant de champ du rotor. Lorsqu'on alimente les bobines du stator, on crée un champ magnétique tournant à l'intérieur du stator, cela par le phénomène d'induction magnétique, et un courant induit va se créer dans le rotor selon la loi de Lenz [70].

Les générateurs synchrones à aimant permanent présentent de nombreux avantages: rendement élevé, une densité de puissance élevée, un facteur de puissance élevé, un bruit faible et facile à contrôler [71, 72], en raison de l'absence des enroulements du rotor, une densité de puissance élevée peut être obtenue par la réduction de la taille et du poids du générateur. En outre, il n'y a pas de pertes par enroulement du rotor qui entraînent une réduction de la contrainte thermique dans le rotor [71].

Le principe fondamental de la machine synchrone est que la fréquence électrique (Hz) est liée à la vitesse mécanique (RPM).

$$n = \frac{120 f}{P} \quad (3.1)$$

Où :

n : Vitesse de rotation.

f : Fréquence électrique.

P : Nombre de pôles.

Nous avons utilisé dans ce travail le GSAP en raison de ses avantages suivants:

- Sa taille est petite, moins de poids et haute densité d'énergie.
- Pas besoin de courant d'excitation.
- Peut gérer une large gamme de vitesse de rotor.

3.6 La commande (ABB)

Ou les secteurs industriels, quelle que soit la gamme de puissance [73]. Des essais expérimentaux ont été effectués avec le variateur de torque ABB (modèle ACS800). La commande peut être reliée de manière flexible à des réseaux d'automatisation, grâce au contrôle direct du couple. Elle contrôle précisément les moteurs à induction AC et les moteurs à aimants permanents. La figure 3.3 présente la commande.



Figure 3.3 Commande de l'entreprise ABB[73].

La commande ABB est simple à installer, à configurer et à utiliser, ce qui permet d'économiser un temps considérable. La commande possède une interface utilisateur et procède commune avec le bus de terrain, des outils logiciels communs pour le dimensionnement. La mise en service, l'entretien et les pièces de rechange courantes. Les applications typiques incluent la pompe, le ventilateur et l'utilisation de couple constant, comme les convoyeurs. Le convertisseur de fréquence présente de nombreux avantages lorsque le moteur doit être contrôlé. La vitesse de fonctionnement est rapide et parce que le processus peut être contrôlé avec précision, le convertisseur de fréquence est plus économe en énergie. Le convertisseur de fréquence permet également un démarrage en douceur, ce qui réduit les contraintes mécaniques. Facilité à Installation et démarrage sans problème, Panneau de contrôle avancé permettant un fonctionnement intuitif. Amortisseur pivotant breveté pour une réduction harmonique supérieure[73].

3.7 Modèle numérique de banc d'essai l'hydrolienne

La modélisation et la simulation sont largement utilisées par les ingénieurs et l'industrie [74] comme une procédure efficace pour concevoir des machines électriques afin d'économiser le coût de construction d'un prototype de système. Lorsque tous les composants d'une simulation sont correctement choisis, le processus de simulation est capable de démontrer à la fois l'état stable et la performance transitoire qui aurait été obtenue si les machines électriques étaient réellement construites. Cette pratique permet ainsi de gagner du temps, de réduire les coûts de construction d'un prototype et de s'assurer que les exigences sont satisfaites à l'avance.

Il ne sera pas toujours facile d'évaluer les impacts et les changements des effets d'interaction sur les configurations d'un banc d'essai dans les conditions d'exploitation. Le recours à des modèles numériques en effet est indispensable, et bien que la détermination et le calcul des coefficients de puissance sont déterminés plus rapidement que ceux obtenus expérimentalement [75].

3.7.1 Sim power system

Année après année le Matlab / Simulink a prouvé sa capacité à la modélisation et à la simulation de la plupart des programmes des systèmes électriques et mécaniques [76]. Donc MATLAB / Simulink est conçu par MathWorks inc.

Dans ce projet la bibliothèque Sim power system a été utilisée. Sim power system est une bibliothèque dans Matlab qui est un logiciel numérique permettant de construire des circuits électriques et cela permet à la simulation en temps réel des modèles électriques développés. Le logiciel Matlab est interactif pour simuler, analyser et optimiser les performances du système d'alimentation électrique et mécanique. Sim power system nous permet de simuler les centrales électriques (Parc éolien, hydrolien) qui peuvent être utilisés pour de nombreux objectifs, comme la formation des opérateurs (étudiants, Ingénieurs), ou pour le réglage des systèmes de commande afin d'adapter des différentes conditions de fonctionnement. Il contient des outils qui disposent d'une interface graphique interactive, des capacités d'automatisation et une gestion efficace des données. Donc l'objectif principal est de concevoir une simulation réaliste pour différentes conditions de fonctionnement du générateur de BEH, et de construire des modèles numériques utilisés pour simuler l'influence de la charge sur le générateur.

3.7.2 Description du modèle numérique

Dans cette section, le modèle de la BEH est réalisé dans l'environnement SIMULINK/MATLAB. L'objectif est de tester de différentes puissances électriques. Le modèle numérique est présenté dans la figure 3.4 .En effet, la puissance générée est obtenue à partir du GSAP, ce dernier est régulé par le CTC qui lui fournit la vitesse nécessaire permettant par la suite d'avoir la puissance désirée à la sortie du générateur, de plus, la régulation entre la puissance désirée et la puissance mesurée est réalisée par un régulateur PI.

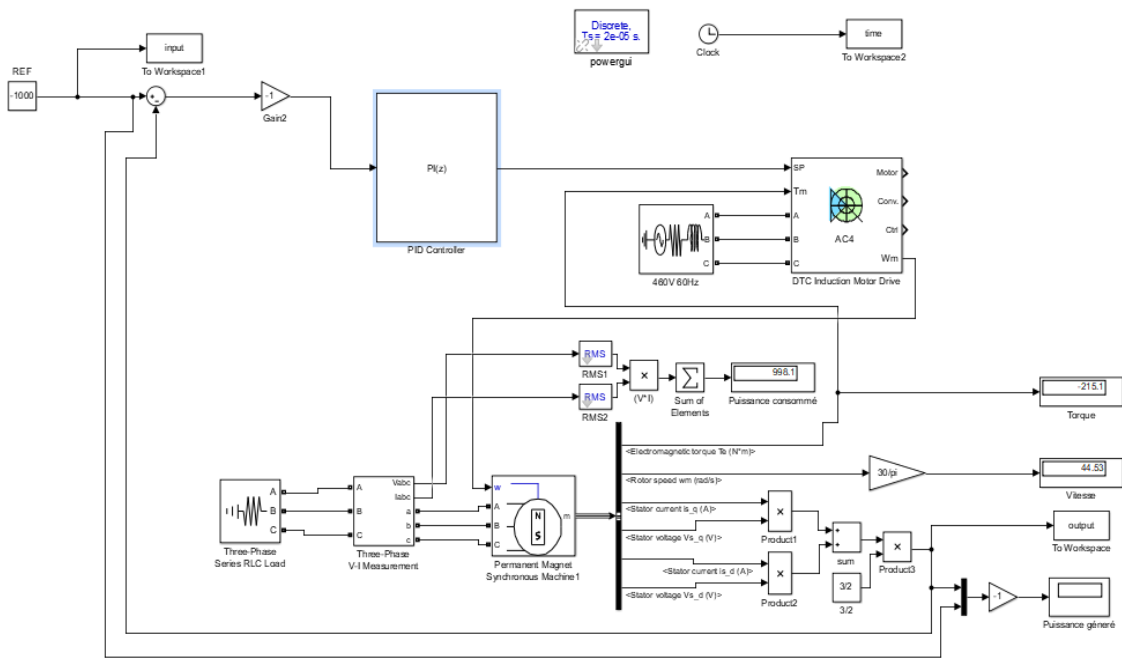


Figure 3.4 Modèle numérique de système.

3.7.3 Construction du modèle numérique.

En effet, la construction de notre modèle numérique représenté par un diagramme de simulation qui nous nécessite d'utiliser un logiciel de calcul, c'est pour cette raison nous utilisons Simulink et MATLAB pour exécuter nos simulations. Pour se faire, nous devons d'abord dessiner le diagramme de simulation dans Simulink. Ensuite, nous devons définir

les paramètres de simulation pour le fonctionnement numérique, comme le temps de simulation, les conditions initiales et finales, et les tolérances d'erreurs. Enfin, nous avons utilisé MATLAB pour exécuter la simulation dans Simulink et analyser les résultats de la simulation.

3.7.4 Modèle du générateur synchrone à aimant permanent

Sim Power System fait partie de Matlab Simulink et contient une bibliothèque (powerlib) avec des machines synchrones, asynchrones. Le bloc Machine synchrone à aimant permanent fonctionne en mode générateur ou en mode moteur. Le mode de fonctionnement est réglé par le signe du couple mécanique (positif pour le mode moteur, négatif pour le mode générateur). Les parties électriques et mécaniques de la machine sont chacune représentées par un modèle d'espace d'états de second ordre. Le bloc suppose que le flux établi par les aimants permanents dans le stator est sinusoïdal, ce qui implique que les forces électromotrices sont sinusoïdales. Le bloc illustré dans la figure 3.5 contient les équations exprimées dans le cadre de référence du rotor (dq Cadre)[62].

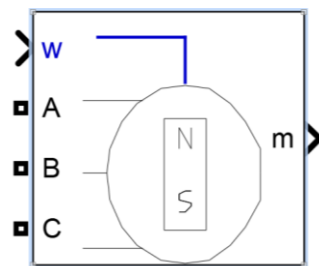


Figure 3.5 Bloc de machine synchrone à aimant permanent

Ce bloc a été utilisé dans le modèle numérique, à noter que ce bloc présente une machine triphasée qui peut être décrite par un ensemble d'équations différentielles avec des

coefficients dépendant du temps. Les méthodes les plus courantes pour décrire le bloc sont les transformations de Clarke et Park. Selon les définitions [77].

Les deux transformations présentées ci-dessous ne sont pas l'original Clarke et Park, mais sous une forme légèrement modifiée pour leur rendre le pouvoir invariant. En utilisant ces modifications, il est possible de calculer les valeurs de puissance / couple correctes à partir des paramètres de moteur transformés sans qu'il soit nécessaire de les ramener à trois valeurs de phase.

3.8.2 Équations du générateur dans le cadre de référence du rotor

Le générateur synchrone à aimant permanent est modélisé dans un référentiel d-q fixé au rotor. Les équations mathématiques du GSAP peuvent être décrites comme suit :

Où la liaison de flux le long des axes d et q est donnée par les équations [78] (3.2) et (3.3)

$$\Psi_d = -L_d i_d + \Psi_f \quad (3.2)$$

$$\Psi_q = -L_q i_q \quad (3.3)$$

Où : L_d et L_q sont les inductances le long des axes d et q respectivement, i_d et i_q sont les courants de stator le long des axes d et q respectivement. Ψ_f est la liaison de flux d'aimant permanent donné par (3.4)

$$\Psi_f = \frac{K_e}{\pi P} \quad (3.4)$$

Où : K_e est la constante de force électromotrice induite de GSAP et P le nombre de pôles.

L'équation de tension le long des axes d et q est donnée par (3.5)
Et (3.6)

$$V_d = -r_d i_d + P \Psi_d - \omega_e \Psi_q \quad (3.5)$$

$$V_q = -r_q i_q + P\Psi_q - \omega_e \Psi_d \quad (3.6)$$

Où : r_d et r_q sont la résistance du stator dans les axes d et q, ω_e est la vitesse électrique angulaire.

En substituant les valeurs de Ψ_d et Ψ_q des équations (3.2) et (3.3) nous obtenons les équations (3.7) et (3.8)

$$V_d = -r_d i_d + L_d P i_d - \omega_e L_q i_q \quad (3.7)$$

$$V_q = -r_q i_q + L_q P i_q - \omega_e L_d i_d + \omega_e \Psi_f \quad (3.8)$$

Réarrangeant les équations (3.5) et (3.6), les équations de courant peuvent être obtenues comme

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d} [-r_d i_d + \omega_e L_q i_q - V_d] \quad (3.9)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q} [-r_q i_q - \omega_e L_d i_d + \omega_e \Psi_f - V_q] \quad (3.10)$$

La relation entre la vitesse de rotation électrique et la vitesse mécanique est donnée par

$$\omega_e = \omega_m \times \frac{P}{2} \quad (3.11)$$

La puissance électromagnétique générée par le GSAP est donnée par

$$P_e = \frac{3}{2} (e_d i_d + e_q i_q) \quad (3.12)$$

Où : e_d et e_q sont induits f.é.m. en d et q axes donnés par

$$e_d = \omega_e L_q i_q \quad (3.13)$$

$$e_q = -\omega_e L_d i_d + \omega_e \Psi_f \quad (3.14)$$

En remplaçant les expressions pour e_d et e_q dans l'équation (3.10)

$$P_e = \frac{3}{2}(\omega_e L_q i_q i_d - \omega_e L_d i_d i_q + \omega_e \Psi_f i_q) \quad (3.15)$$

Où

$$P_e = \frac{3}{2} \omega_e [\Psi_f i_q - (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (3.16)$$

Le couple électromagnétique développé est donné par

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_m} = \frac{P}{2} \times \frac{3}{2} [\Psi_f i_q - (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (3.17)$$

L_q, L_d = inductances d'axe q et d.

R = Résistance des enroulements du stator.

i_q, i_d = courants d'axe q et d.

V_q, v_d = tensions d'axe q et d.

ω_r = Vitesse angulaire du rotor.

p = Nombre de paires de pôles.

T_e = couple électromagnétique.

3.9 Test du bloc de générateur à aimant permanent

Afin de démarrer le bloc de générateur à aimant permanent et d'obtenir les valeurs dont on a besoin, il y a des blocs supplémentaires qu'il faut les connecter avec le bloc de générateur pour qu'il soit opérationnel. Il faut d'abord d'identifier les entrées et les sorties du bloc de GSAP que nous souhaitons extraire. Les entrées et les sorties sont expliquées dans les paragraphes suivants.

3.9.1 Charge de série triphasée RLC

Ce bloc met en œuvre une charge équilibrée triphasée en tant de combinaison en série de résistance, d'inductance et de capacité. La charge fournit une impédance constante.

Le bloc est représenté dans la figure 3.6

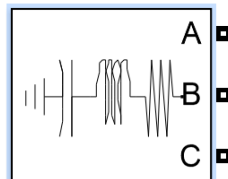


Figure 3.6 Charge de série triphasée RLC

Et le diagramme suivant 3.7 explique les détails des paramètres du bloc de la charge de série triphasée RLC.

Cette option permet de mettre la charge dans le type de connexion dont vous avez besoin pour votre modèle simulate.in notre cas, Y à la terre.

Il est la ligne à la valeur de ligne dans le système et ici, Il est réglé à 380 V.

C'est la valeur de la fréquence de fonctionnement du système qui peut être ou 60 Hz. ici je 60Hz.

C'est la puissance active requise pour la charge totale. Dans notre cas, il est réglé sur 25KV.

C'est la puissance réactive inductive totale dont j'ai besoin de la grille et elle est due aux charges inductives dans la valeur de charge totale. il est réglé sur 0 Mvar.

C'est la puissance réactive capacitive totale qui est requise du réseau et qui est due à la charge capacitive dans la valeur de charge totale. Il est réglé sur 0 Mvar.

L'option est d'obtenir des valeurs de tensions et de courants pour la phase à la terre. Mais il n'est pas sélectionné ici car nous utilisons un bloc de mesure V / I triphasé à la place.

Figure 3.7 les détails des paramètres du bloc de la charge de série triphasée RLC.

3.9.2 Mesure de V-I triphasée

Afin de surveiller les tensions et les courants dans le système, le bloc de mesure à trois phases VI est disponible dans l'ensemble de mesure de la bibliothèque Sim Power

System, figure 3.8. Ce bloc mesure les courants et les tensions instantanés triphasés dans un circuit. La mesure de phase à phase ou de phase à terre peut être mesurée à l'aide du bloc de mesure à trois phases VI. Donc V_{abc} et I_{abc} sont les sorties contenant trois courants de phase et trois tensions. Les bornes A B C sont les bornes d'entrée et connectées au bloc de la charge de série triphasée RLC, les bornes a b c sont les bornes de sortie et connectées au bloc de GSAP.

Ce bloc est souvent utilisé comme lien dans le modèle BEH et donne les mêmes valeurs à la sortie qu'à l'entrée. Dans ce projet, ce bloc est le lien entre le bloc de GSAP et le bloc de la charge de série triphasée RLC.

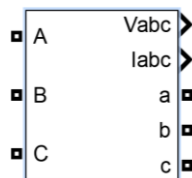


Figure 3.8 Mesure de V-I triphasée

Et le diagramme suivant (3.9) explique les détails des paramètres du bloc mesure de V-I triphasée [79].

L'option de mesure de tensions de phase à phase ou de phase à terre est fournie.

Il permet les mesures de courant triphasé.

Si les mesures sont nécessaires dans p.u, les valeurs de base de la puissance et de la tension doivent être saisies. Comme dans notre cas, nous avons besoin des deux, donc cette option est ajustée en fonction des besoins.

Figure 3.9 Détails des paramètres du bloc de mesure V-I triphasée

Ensuite, pour obtenir la puissance produite par le générateur, il faut ajouter deux blocs de multiplicateur et un bloc d'additionneur qui se retrouvent dans la bibliothèque Math Operations ensuite connecter les sorties de mesure V-I triphasée V_{abc} et I_{abc} avec eux, et les résultats présenteront au scope ou display.

D'autre part afin qu'obtenir la puissance électrique et le torque généré par le générateur il y a une sortie indiquée par le symbole m contenant des signaux de mesure à la sortie du générateur où les signaux disponibles dépendent des valeurs dont on a besoin. Par la suite les signaux de mesure peuvent être extraits grâce au bloc sélecteur de lien (Bus Selector) prévu dans la bibliothèque Simulink. Tableau 3.1

Tableau 3.1 les signaux extraits du générateur.

Symbole du signal	Définition	Unité
I_{qs}	Courant de stator I_{sq}	A
I_{ds}	Courant de stator I_{sd}	A
V_{qs}	Tension du stator V_{sq}	V
V_{ds}	Tension du stator V_{sd}	V
W	Vitesse du rotor	Rad/s
T_e	Électromagnétique torque	N.m

Pour calculer la puissance électrique à la sortie du bloc de la machine synchrone à aimants permanents, les signaux de mesure doivent être utilisés en utilisant l'équation (3.12) ensuite formuler cette équation au diagramme de bloc en utilisant les deux blocs le

multiplier et le somme et indique les résultats à l'aide du bloc d'affichage dont que la dernière indique la valeur de son entrée comme il est indiqué ci-après figure 3.10

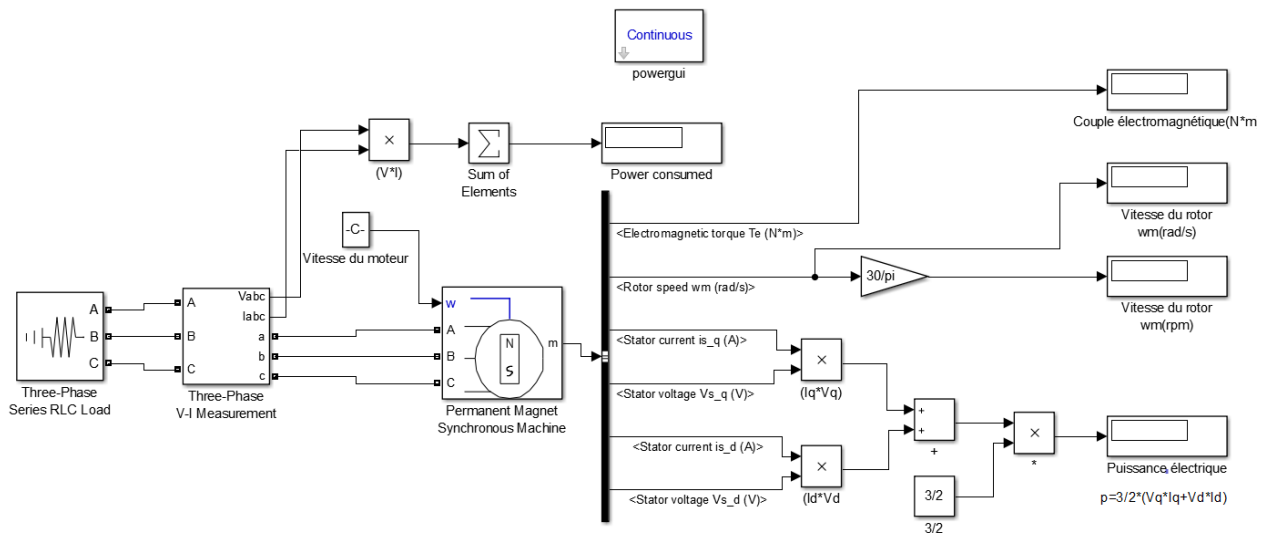


Figure 3.10 le modèle numérique du générateur

Il existe plusieurs sous-systèmes de modèle électrique. Il y a sous-système de wattmètre, tension, impédance interne du générateur et autres signaux de mesure.

La puissance mécanique de moteur sur le modèle numérique est convertie en énergie électrique par un générateur de courant alternatif (CA) ou un générateur de courant continu (CC). Le générateur de courant alternatif peut être une machine synchrone ou une machine à induction (asynchrone). La machine synchrone est la plus utilisée dans l'industrie des énergies renouvelables et a été sélectionnée pour ce projet, dont les spécifications techniques sont données par le Tableau.

La sortie des contrôleurs PI (contrôleurs proportionnels intégratifs) est une combinaison linéaire de l'entrée, de la dérivée de l'entrée et de l'intégrale de l'entrée. Ils

sont largement utilisés et jouissent d'une grande popularité, car ils sont simples, efficaces et robustes.

Une des raisons pour cela est l'existence de règles pour trouver des paramètres appropriés pour les PID, règles qui ne nécessitent aucun contrôle de la part de l'usine. Tout ce qui est nécessaire pour appliquer ces règles est d'avoir une certaine réponse en temps de l'usine.

En fait, les PID réglés par règle fonctionnent souvent de manière non optimale. Mais même si d'autres ajustements sont possibles et parfois nécessaires, les règles constituent un bon point de départ. Leur utilité est évidente quand aucun modèle de l'usine n'est disponible, et donc aucun moyen analytique d'accorder un contrôleur n'existe, mais les règles peuvent également être utilisées quand un modèle est connu.

3.10 Commande directe du couple du moteur à induction

3.10.1 Introduction

Le principe du CDC a été introduit à la fin des années 1980, qui a été acceptée par le fabricant de la commande après 20 ans de recherche approfondie. Depuis le milieu des années 90, ABB fabrique commercialement un entraînement par moteur à induction à couple direct. Dans la commande de couple direct développé par ABB[80]. Le noyau du système de contrôle dans CDC est le sous-système contenant le contrôleur d'hystérésis de couple et de flux et le moteur à induction à logique de commutation d'onduleur optimale. Dans ce système, les valeurs instantanées du flux et du couple sont calculées à partir des seules variables primaires. Ils peuvent être contrôlés directement et indépendamment en sélectionnant les modes de commutation optimaux d'onduleur. Le choix est fait de manière

à limiter les pertes de flux et de couple dans la bande d'hystérésis et à obtenir une réponse de couple plus rapide et une efficacité maximale à chaque instant.

Dans un moteur à induction, le flux du stator peut varier rapidement par rapport au flux du rotor. CDC utilise cette propriété. Le CDC utilise deux contrôleurs d'hystérésis, à savoir un contrôleur de flux et un contrôleur de couple, pour y parvenir. Les flux et le couple des variables de contrôle sont exprimés en termes de variables du stator. Ainsi, l'estimation et le contrôle de ces variables deviennent simples. La sortie du contrôleur détermine les positions de commutation de l'onduleur, qui à leur tour accélèrent ou ralentissent le flux du stator. Par conséquent, le couple est modifié plus rapidement. Simultanément, le contrôleur de flux essaie de maintenir le flux de fonctionnement autour de la valeur de référence.

3.10.2 Caractéristique de contrôle.

Un schéma d'un système CDC pour un moteur à induction est présenté dans la figure 3.11. Le schéma CDC est très simple, dans sa configuration de base, il comprend un contrôleur d'hystérésis, un estimateur de couple et de flux et une table de commutation. La configuration est beaucoup plus simple que les systèmes de contrôle vectoriel en raison de l'absence de transformation des coordonnées entre le cadre fixe et cadre synchrone et le régulateur PI. De plus, il n'a pas besoin d'impulsion avec modulateur ni de codeur de position, qui introduisent des retards et nécessitent un transducteur mécanique, respectivement[81].

Le principe de la commande CDC est contrôlé de la manière d'un système à boucle fermée sans utiliser la boucle de régulation de courant. De plus, ce contrôleur est très

insensible au désaccord des paramètres par rapport au contrôle vectoriel. Le schéma de CDC utilise un cadre de référence stationnaire d-q (fixe sur le stator) dont l'axe d est aligné sur l'axe q du stator. Le couple et le flux sont contrôlés par le vecteur d'espace de la tension du stator défini dans le cadre de référence.

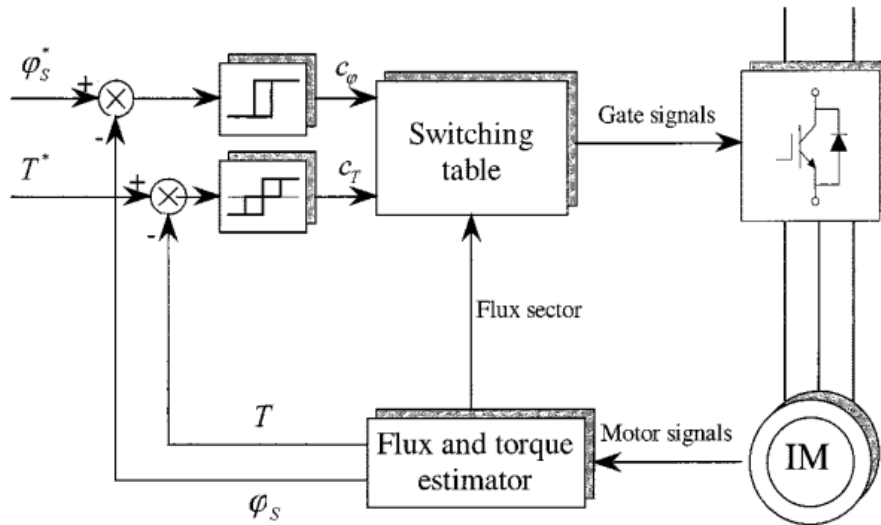


Figure 3.11 Commande de couple direct [82].

3.10.3 Principe de commande de couple direct (CDC)

Le principe du DTC est de contrôler directement la liaison de flux stator (ou la liaison de flux du rotor ou la liaison de flux magnétisante), et couple électromagnétique de la machine simultanément par la sélection des modes de commutation optimaux des onduleurs. L'utilisation d'une Table de vérité pour la sélection des vecteurs de tension permet une réponse rapide, une fréquence de commutation d'onduleur faible et de faibles pertes harmoniques sans orientation de champ complexe, en limitant les erreurs de flux et de couple dans les bandes d'hystérésis de flux et de couple respectives. La commande CDC comprend des contrôleurs d'hystérésis pour le flux et le couple afin de sélectionner le vecteur de tension de commutation afin de maintenir le flux et le couple entre les limites supérieures et inférieures. La présence de contrôleurs d'hystérésis qui dépendent de la

vitesse, du flux, de la tension statorique et de la bande d'hystérésis entraîne également un fonctionnement à fréquence de commutation variable, des variations de couple et une chute de flux à basse vitesse en raison du comparateur d'hystérésis utilisé pour les comparateurs de couple et de flux [83].

Ces inconvénients affectent le résultat: augmentation des courants sous-harmoniques, ondulation de courant et pertes de commutation variables dans l'onduleur. Il est montré que la fréquence de commutation est principalement affectée par la bande d'hystérésis de couple et augmente avec la largeur de la bande. Pour un contrôleur de bande fixe, il est donc nécessaire de régler la bande sur la condition maximale (ou dans le pire des cas) afin que la fréquence de commutation ne dépasse pas sa limite qui est déterminée par la restriction thermique des dispositifs de puissance [81]. Une stratégie de contrôle de bande d'hystérésis adaptative a été proposée, la bande étant contrôlée en temps réel par la variation du vecteur de tension appliqué afin de maintenir la fréquence de commutation constante, quelle que soit la condition de fonctionnement. Cette méthode réduit l'ondulation du couple tout en maintenant une fréquence de commutation du couple constante.

Le flux de stator est une intégrale temporelle du stator est donné par la formule suivante :

$$\frac{d\Psi_s}{dt} = V_s - i_s R_s \quad (3.18)$$

La sélection du vecteur de tension approprié dans l'onduleur est basée sur l'équation de stator en coordonnées du stator :

$$\Delta\Psi_s = \int_0^{TL} (V_s - i_s R_s) dt = V_s(i)T_i \quad (3.19)$$

3.10.4 Définition de la stratégie de contrôle

Dans les applications industrielles où les charges électriques connaissent de grandes fluctuations, les générateurs électriques doivent fonctionner à des vitesses très variables. Par conséquent, les moteurs entraînant ces générateurs nécessitent un asservissement continu afin de produire, de manière précise et en temps réel, la vitesse désirée, d'où l'intérêt de bien définir une stratégie de contrôle adéquate.

Dans le but de définir la stratégie de contrôle du BEH, il convient de rappeler que, de façon générale, les moteurs électriques et les combinaisons de couplage utilisés pour modifier la vitesse se comportent comme un «contrôle de vitesse » ou un « contrôle de couple». En effet, le couple et la vitesse sont les deux grandeurs physiques qui décrivent l'état de l'arbre. Lorsque le variateur de vitesse fonctionne en mode « contrôle de vitesse », le moteur tourne à la vitesse de référence et le couple est alors lié à la charge (puissance désirée) par l'équation(3.20)[84]

$$P = n.t \quad (3.20)$$

Où : P la puissance électrique en W, n la vitesse de rotation (rad/s) et t le couple N.m

De même, en mode « contrôle de couple », le moteur fournit un couple égal au couple de référence, et la vitesse est ajustée de telle sorte que la puissance obtenue soit égale à la charge. Cependant, ce dernier mode n'est pas préféré dans le cas où la vitesse peut varier très rapidement, car il provoque des accélérations élevées du moteur. Ainsi, dans notre cas, c'est le mode « contrôle de vitesse » qui est utilisé pour l'asservissement du BEH.

Le schéma suivant 3.12 décrit sommairement le fonctionnement du système d'asservissement du banc d'essai d'hydrolienne. Ce système comporte un régulateur PI, un bloc de commande directe du couple (CDC) et le générateur GSAP que nous avons étudié dans la section précédente. Le régulateur PI fournit en sortie la valeur de la vitesse de référence, tandis que le CDC régule la vitesse de rotation du moteur qui va entraîner le générateur afin d'obtenir la puissance électrique désirée[81]. L'asservissement est réalisé en boucle fermée reliant la puissance électrique de sortie du générateur à la puissance de référence. Pour tenir compte de la liaison physique entre le moteur et le générateur, le couple du générateur est relié schématiquement à l'entrée du CDC (et plus précisément à l'entrée du moteur). Cela permet de simuler l'action mécanique du générateur sur le moteur dans le CDC.

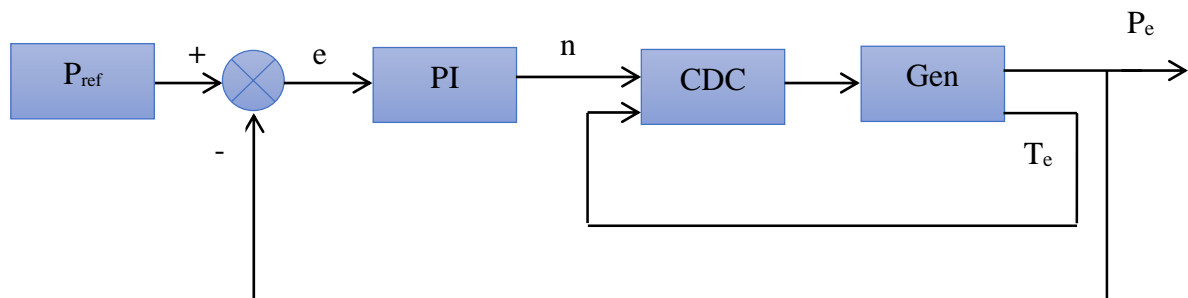


Figure 3.12 Système d'asservissement du banc d'essai d'hydrolienne

Cette stratégie de contrôle (l'intégrale du temps absolue (EITA)) permet d'obtenir de bons résultats où la vitesse reste stable en fonction de la puissance de référence. Cependant, l'asservissement ne peut être parfait que si ses paramètres sont judicieusement choisis. Plus précisément, les coefficients K_p et K_i du régulateur PI doivent être bien déterminés.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS DE LA SIMULATION

4.1 Introduction

Le générateur est un élément qui permet d'avoir une certaine puissance électrique. Afin d'obtenir la puissance désirée, il est indispensable d'ajuster les paramètres d'asservissement de la puissance mécanique fournie à partir du moteur, et ce, via l'identification en continu du couple générateur-charge. Le CDC est l'équipement qui permet de réaliser la régulation entre la torque du générateur et la torque référence obtenue à partir du moteur, pour fournir la vitesse angulaire convenable pour le fonctionnement du générateur[85].

La puissance électrique générée dans un système d'énergie de banc d'essai dépend principalement de la vitesse du moteur. De plus, la puissance de sortie du système de conversion d'énergie varie en fonction de la vitesse angulaire du générateur. Dans notre projet, le GSAP est utilisé. Donc il est important d'extraire le maximum de la puissance désirée.

La simulation a été réalisée en utilisant l'environnement MATLAB avec des ensembles de blocs dans le Simulink. Dans ce chapitre, la modélisation, l'analyse de notre système ainsi que la réalisation de la commande de puissance électrique sont présentées pour un GSAP piloté par un moteur asynchrone à l'aide du logiciel MATLAB / Simulink.

4.2 Comparaison entre le générateur numérique et expérimental

Afin d'essayer notre modèle numérique, il est nécessaire d'avoir les paramètres de réel générateur, des essais expérimentaux ont été réalisés avec la Chaire sur un générateur industriel. Les paramètres obtenus sont présentés dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1 les résultats obtenus pour les différents paramètres

Paramètre	Valeur	Unité
Inductance synchrone Ld	3.16	mH
Inductance synchrone Lq	3.21	mH
Résistance du stator Ra-phase A	0.0447	Ω
Résistance du stator Ra-phase B	0.0445	Ω
Résistance du stator Ra-phase C	0.0447	Ω
Constant de la force contre-électromotrice	3003	V/Krpm
Nombre de paires de pôles	32	-
Forme d'ondes de la force contre-électromotrice	Sinusoidal	-
Type de pôle du rotor	Saillants	-

Les paramètres identifiés ont été implémentés dans le générateur numérique. Par la suite, une comparaison entre la puissance électrique fournie par le générateur expérimental et numérique a été effectuée et présentée dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2 Comparaison entre la puissance électrique qui fournit par le générateur numérique et expérimental

Vitesse (rad/s)	Expérimentale (W)	Théorique (W)
3.147	800	516
4.134	1100	836
5.231	1600	1338
6.318	2100	1952
7.371	2800	2655
8.402	3600	3448
9.342	4700	4260

Donc le tableau 4.2 représente la variation de la puissance électrique expérimentale et théorique consommée par le générateur en fonction de la vitesse de rotation. La figure 4.1 montre que les valeurs expérimentales sont supérieures à celles obtenues par le modèle numérique. Cette figure montre aussi que pour des vitesses de démarrage inférieures à 6.31 rad/s, l'écart entre les deux puissances est remarquable ce qui n'est pas le cas pour des vitesses de démarrage supérieures à 6.31 rad/s. Ceci peut être expliqué par les pertes mécaniques causées par le moteur qui alimente le générateur électrique.

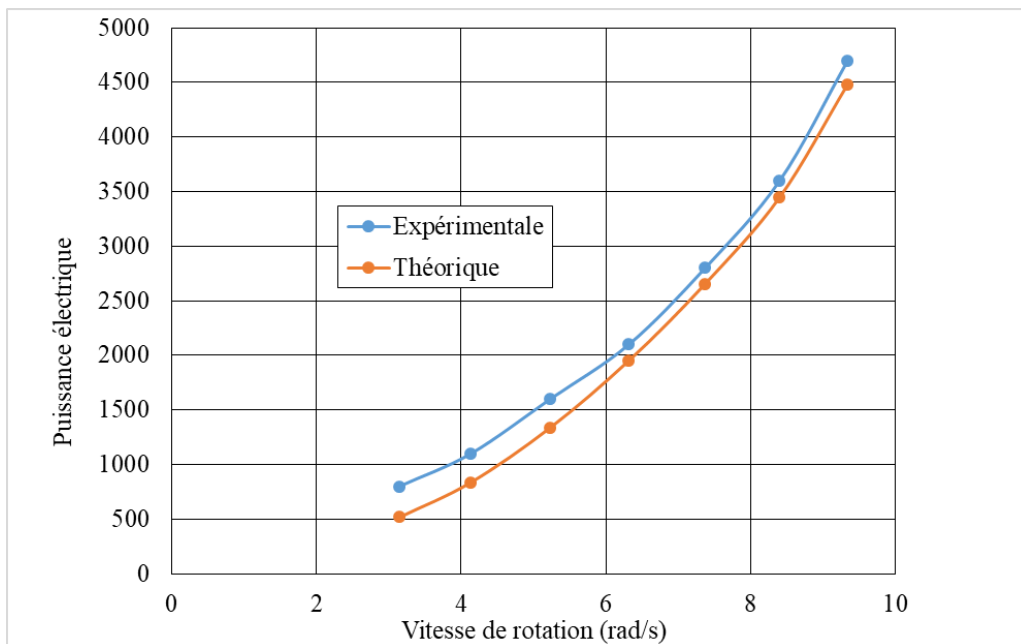


Figure 4 1 Variation de la puissance électrique expérimentale et théorique en fonction de la vitesse de rotation

La figure 4.2 représente l'erreur en pourcentage, elle commence un peu grande au démarrage du générateur et se stabilise rapidement avec l'augmentation de la vitesse pour atteindre 5% à environ 6.3 rad/s.

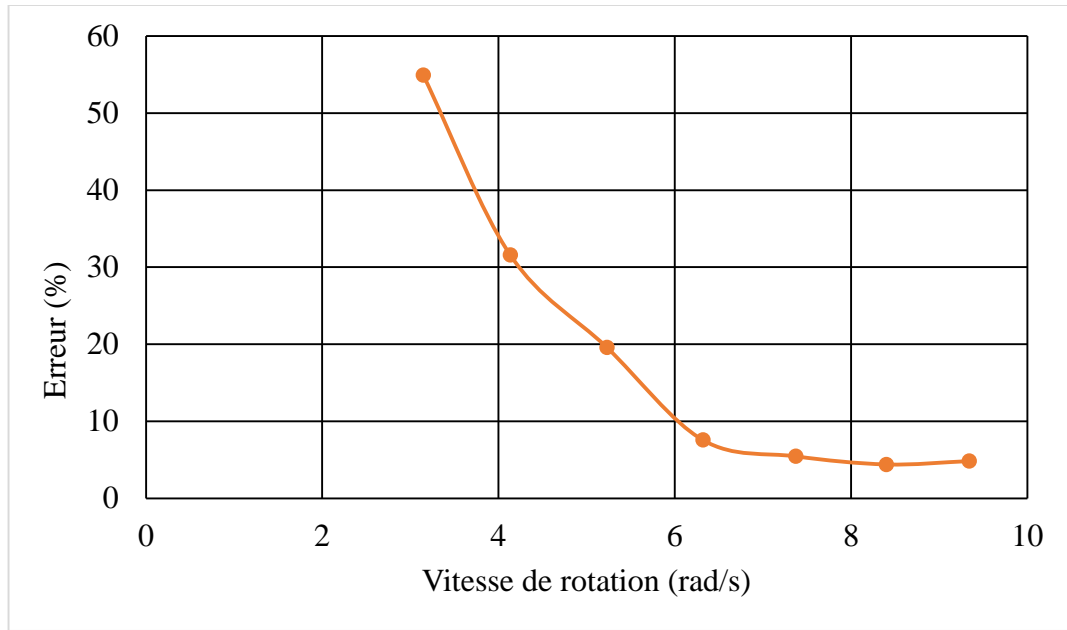


Figure 4.2 Erreur de puissance électrique au démarrage du générateur théorique et expérimentale en fonction de la vitesse de rotation

La puissance électrique moyenne illustrée dans la figure 4.3 débute relativement faible à 3.14 rad/s avec une valeur de 658.2 W et continue à augmenter progressivement pour atteindre 4591.5 W à 9.34 rad/s.

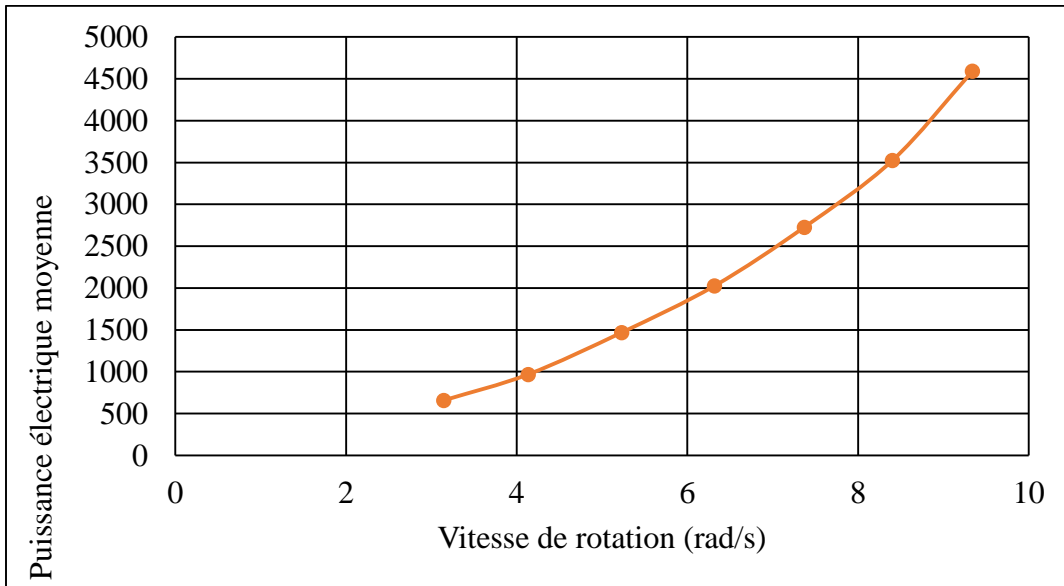


Figure 4.3 Variation de la puissance électrique moyenne en fonction de la vitesse de rotation

La figure 4.4 représente l'efficacité μ (obtenue à partir de l'équation 4.1) du générateur en fonction de la vitesse de rotation.

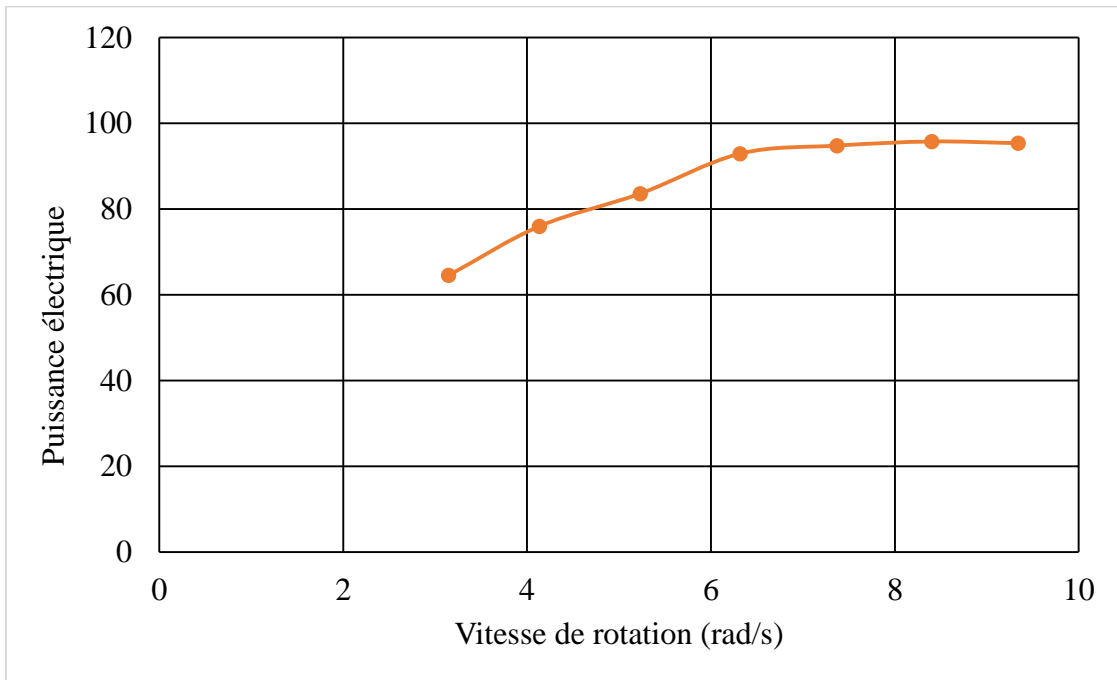


Figure 4.4 Variation de l'efficacité du générateur en fonction de la vitesse de rotation

$$\mu = 100 * \left(\frac{P_p - P_{perdue}}{P_p} \right) \quad (4.1)$$

Tel que :

P_p : Puissance produite

P_{perdue} : Puissance perdue

Au début, L'efficacité commence un peu faible avec une valeur 64.55% à 3.14 rad/s environ. Ceci peut être expliqué par le démarrage du moteur qui nécessite une énergie assez importante pour fonctionner. Par la suite, μ commence à augmenter tranquillement jusqu'à sa stabilisation à environ 6.31 rad/s. À partir de cette valeur, le moteur fonctionne dans son meilleur régime avec une efficacité moyenne de 93%.

4.3 Étude de l'asservissement du BEH

4.3.2 Détermination des gains du régulateur PI

Cette partie est consacrée à la détermination des gains K_p et K_i pour chaque valeur de puissance demandée. En effet, étant donné l'intervalle de variation de la puissance de référence (entre 1000 et 25000 W), il est nécessaire d'ajuster les valeurs des gains en fonction de la puissance afin d'assurer un bon fonctionnement du système. Pour cela, la méthode de minimisation de l'erreur des moindres carrés est utilisée. Dans cette méthode, pour une puissance donnée, on cherche les valeurs de K_p et K_i qui minimisent l'écart entre la consigne (puissance de référence) et la réponse (puissance générée) du BEH. Cet écart est donné par l'expression suivante :

$$(y - u)^T * (y - u) \quad (4.2)$$

Où :

u et y sont des vecteurs composés respectivement des signaux d'entrée u et de sortie y du système asservi en fonction du temps. Un programme Matlab a été développé pour résoudre ce problème. Les valeurs de K_p et K_i correspondant à l'intervalle de puissance étudiée (avec un pas de 1000 W) ont été calculées et sont présentées dans le tableau 4.3 ci-dessous :

Tableau 4.3 Valeurs de K_p et K_i

Puissance demandée (W)	Gain de K _p	Gain de K _i	Temps de réponse(s)
1000	0.022	0.45	1.233
2000	0.017	0.42	1.001
3000	0.014	0.34	1.099
4000	0.010	0.29	1.105
5000	0.0087	0.25	1.163
6000	0.0085	0.22	1.314
7000	0.0081	0.20	1.271
8000	0.0078	0.17	1.396
9000	0.0073	0.12	1.488
10000	0.0069	0.099	1.675
11000	0.0067	0.098	1.514
12000	0.0058	0.093	1.365
13000	0.0057	0.092	1.425
14000	0.0054	0.091	1.356
15000	0.0045	0.088	1.439
16000	0.0035	0.085	1.478
17000	0.0032	0.082	1.458
18000	0.0030	0.078	1.498
19000	0.0029	0.077	1.521
20000	0.0024	0.074	1.527
21000	0.0023	0.073	1.547
22000	0.0022	0.070	1.566
23000	0.0021	0.069	1.578
24000	0.0017	0.065	1.485
25000	0.0011	0.068	1.331

Dans ce tableau 4.3, on constate que les valeurs des gains diminuent lorsque la puissance augmente. Par ailleurs, le temps de réponse du système (ou plus précisément de la puissance générée) est relativement court montrant l'efficacité de l'approche utilisée pour déterminer les gains. Ceci est davantage corroboré par l'allure du signal de sortie par comparaison à celui de la consigne, comme on peut le voir sur les figures (4.5 à 4.10).

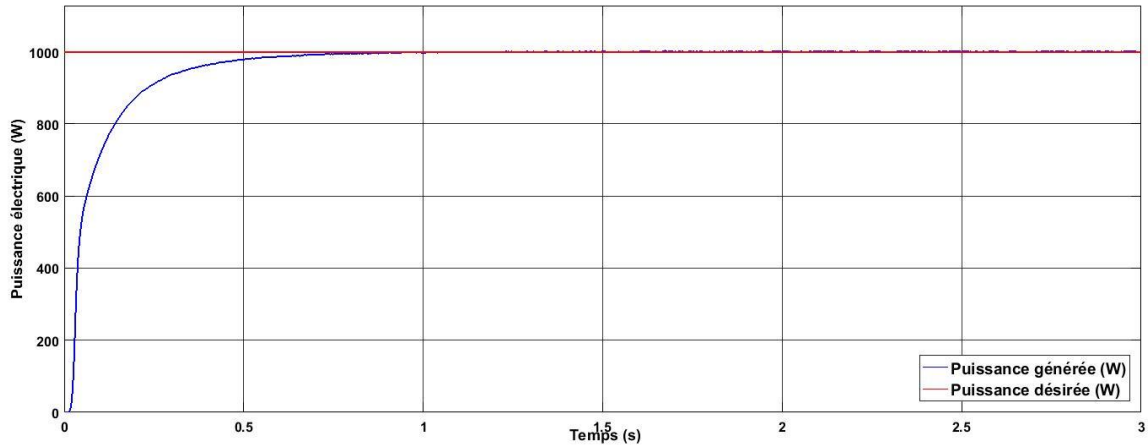


Figure 4.5 Influence des gains du correcteur $K_P=0.022$ et $K_i=0.45$ à une puissance de référence $P=1000$ W

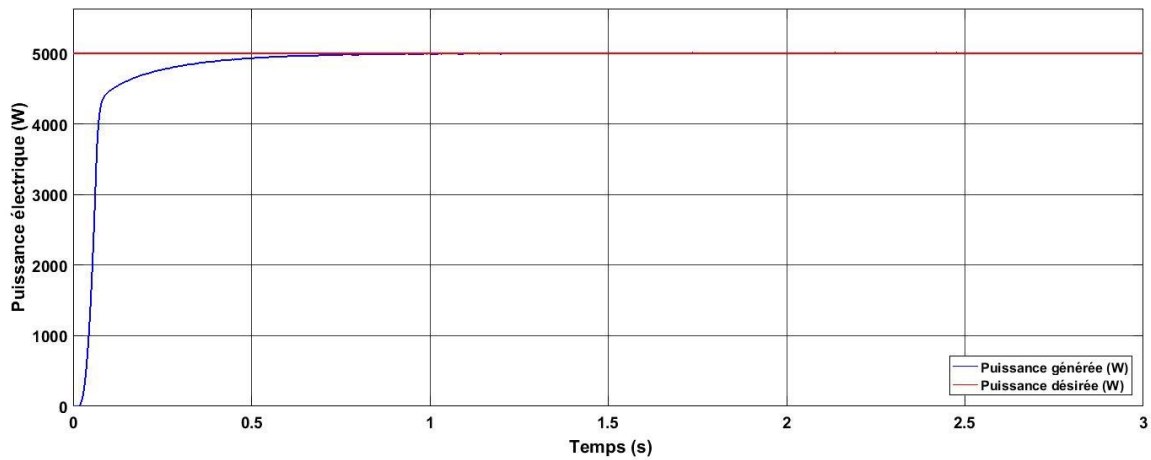


Figure 4.6 Influence des gains du correcteur $K_P=0.087$ et $K_i=0.25$ à une puissance de référence $P=5000$ W

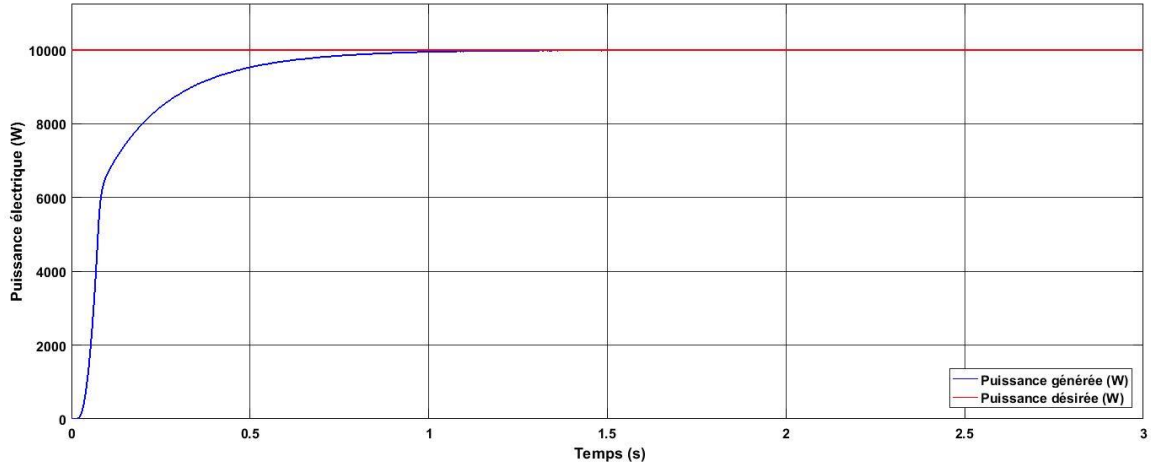


Figure 4.7 Influence des gains du correcteur $K_P=0.069$ et $K_i=0.099$ à une puissance de référence $P=10000$ W.

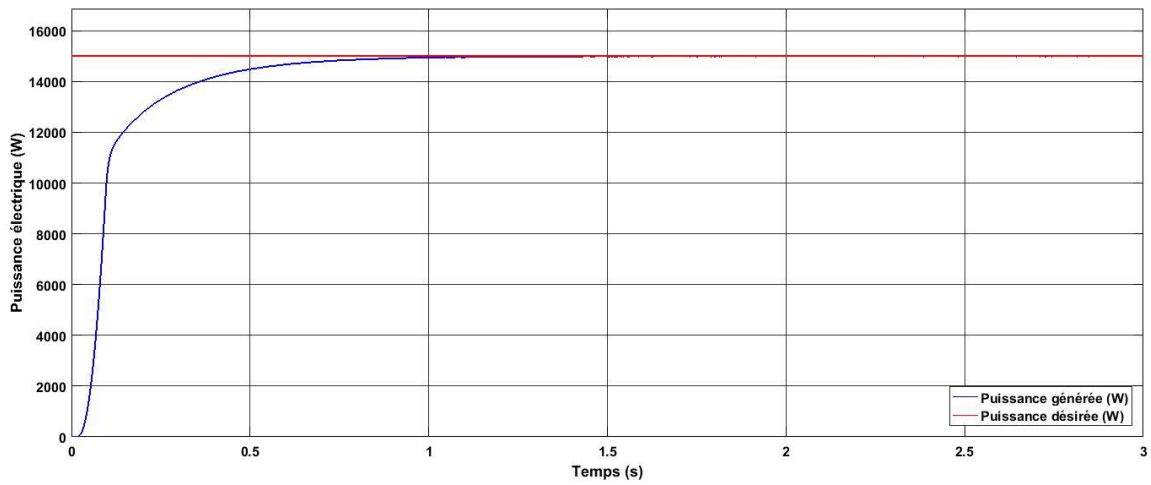


Figure 4.8 Influence des gains du correcteur $K_P=0.045$ et $K_i=0.088$ à une puissance de référence $P=15000$ W.

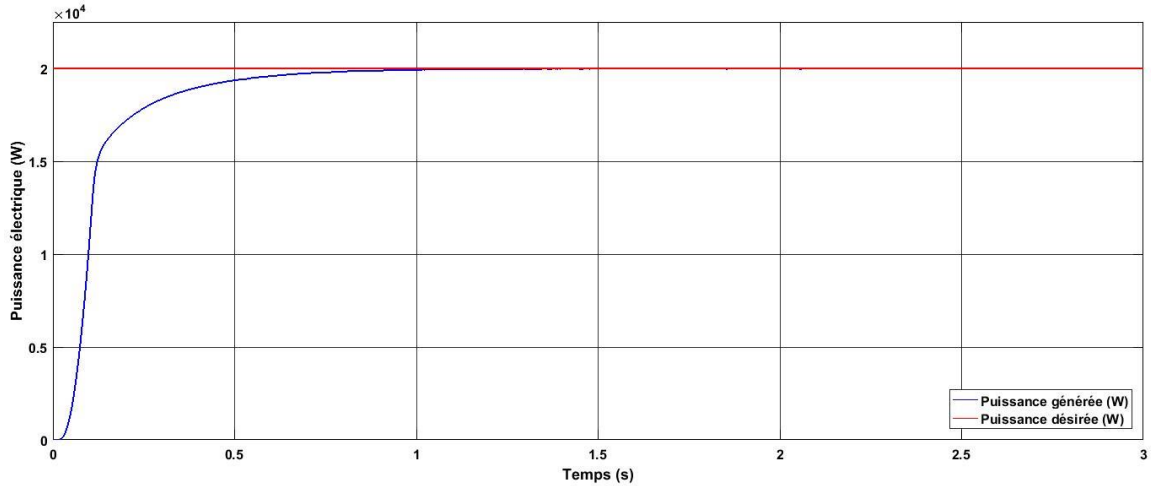


Figure 4.9 Influence des gains du correcteur $K_P=0.024$ et $K_i=0.074$ à une puissance de référence $P=20000$ W

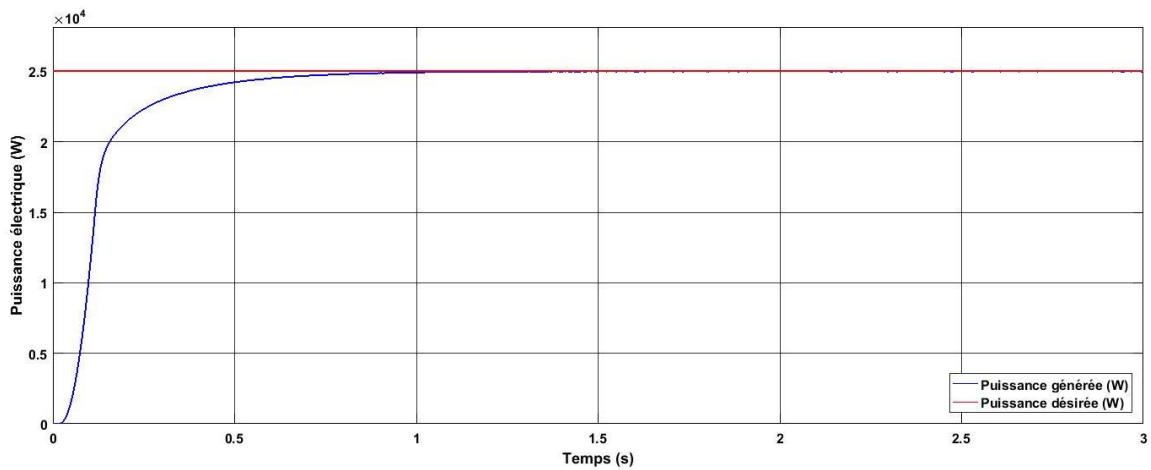


Figure 4.10 Influence des gains du correcteur $K_P=0.011$ et $K_i=0.063$ à une puissance de référence $P=25000$ W

Après un court régime transitoire, les figures (4.5 à 4.10) montrent que pour toute la gamme de puissance étudiée, le signal de sortie se stabilise à la valeur de la consigne, au régime permanent. En outre, la phase transitoire est lisse et ne présente aucun dépassement ni oscillation. Ces avantages sont obtenus grâce à l'utilisation de la méthode des moindres carrés. D'autres résultats liés à d'autres valeurs de puissances sont illustrés dans l'annexe

A,1

4.3.3 Réalisation d'un asservissement autonome

L'approche utilisée nous a permis d'identifier la meilleure valeur de K_p et K_i en fonction de la puissance désirée. Ceci nous a permis de créer une base de données avec des valeurs expérimentales permettant d'aboutir un modèle mathématique capable de décrire le comportement du générateur sur une plage de puissance allant de 1000 à 25000W. Cependant, l'implémentation directe des gains K_p et K_i dans la boucle de régulation ne permettent pas un asservissement adaptatif.

Pour pallier cet inconvénient, nous avons défini des fonctions d'interpolation reliant K_p et K_i à la puissance de référence à partir des valeurs de ces gains calculées précédemment (valeurs du tableau 4.3). Ensuite, en reliant des blocs de type « fonction » aux entrées K_p et K_i du régulateur PI, il était possible d'introduire les expressions mathématiques des gains dans la boucle de contrôle. Ainsi, pour chaque puissance de référence, les valeurs de K_p et K_i sont calculées avec une bonne précision et en un temps très court permettant ainsi un asservissement autonome. Les fonctions d'interpolations et leurs expressions mathématiques sont montrées aux figures (4.11 et 4.12).

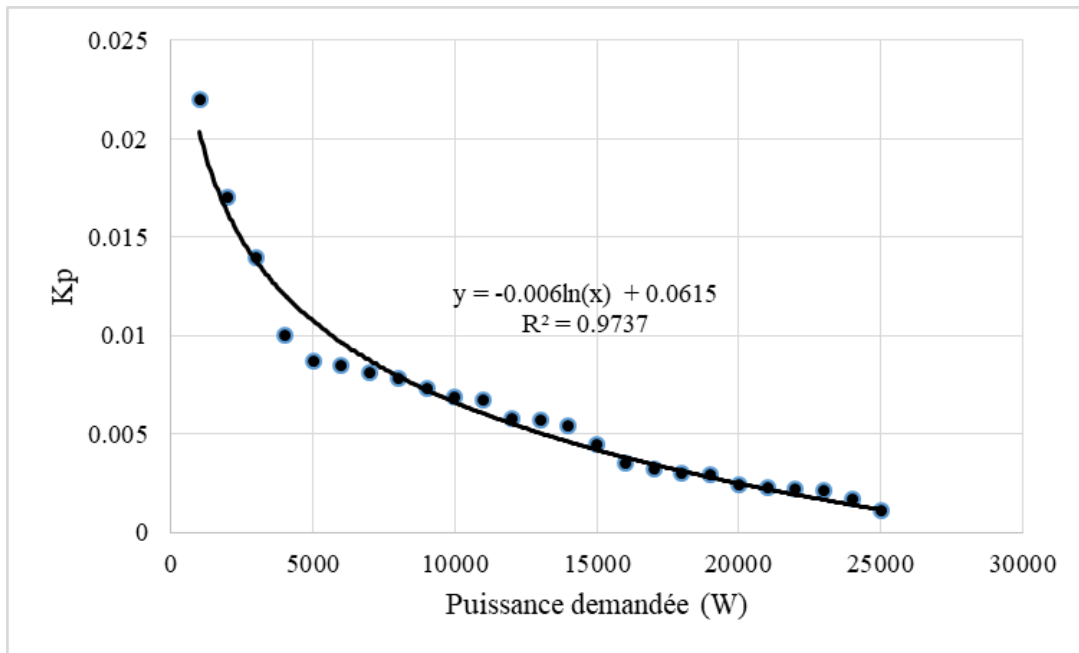


Figure 4.11 Variation du K_p en fonction de la puissance demandée

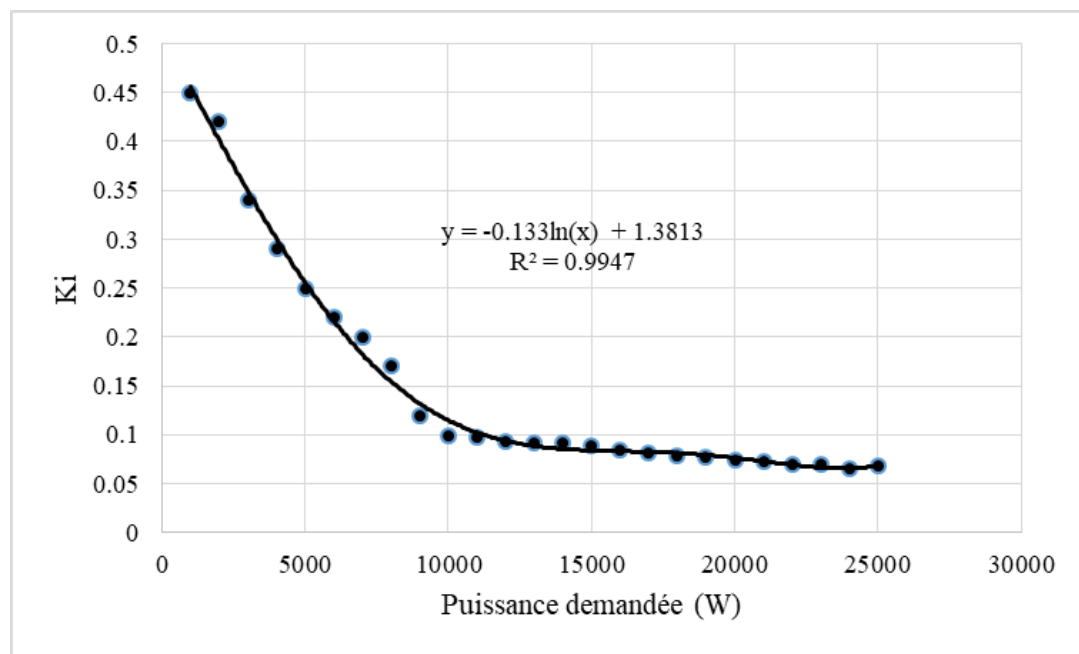
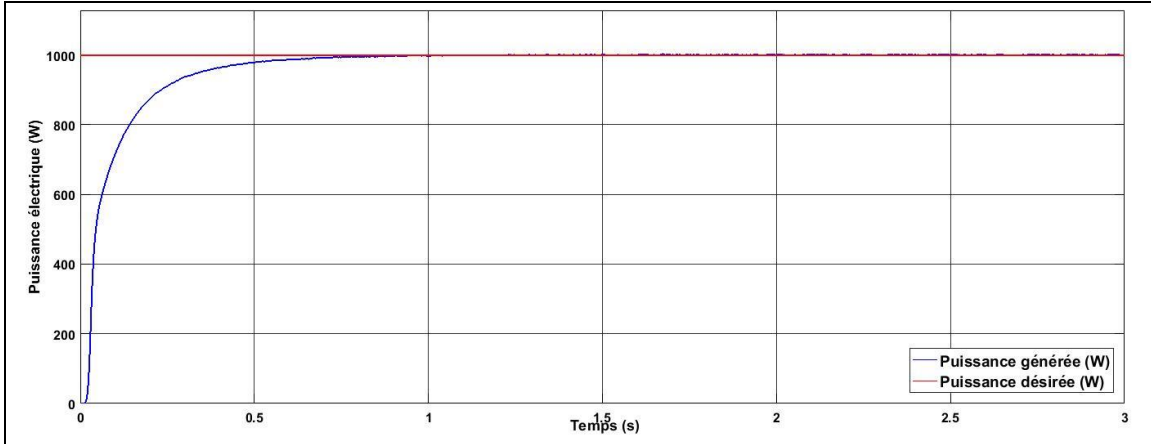
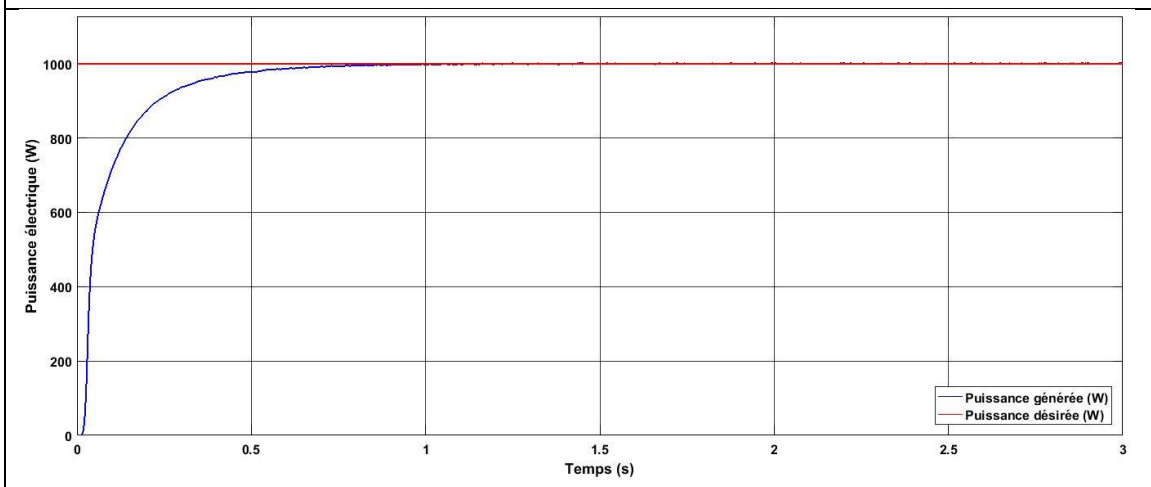


Figure 4.12 Variation du K_i en fonction de la puissance demandée

Afin de valider ce modèle, une étude comparative a été réalisée avec les valeurs obtenues manuellement, et les résultats obtenus ont montré une correspondance similaire (figures 4.13 à figure 4.18)

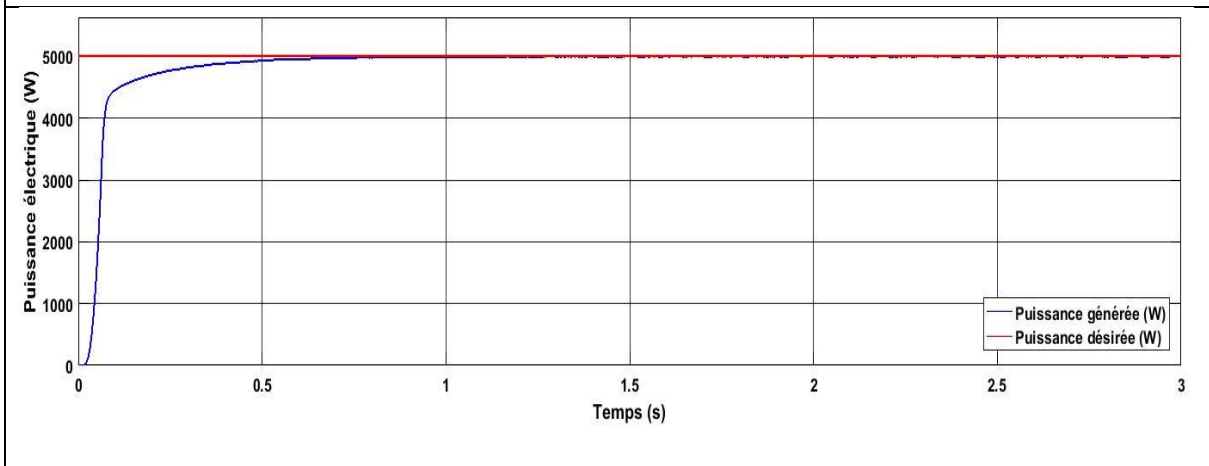
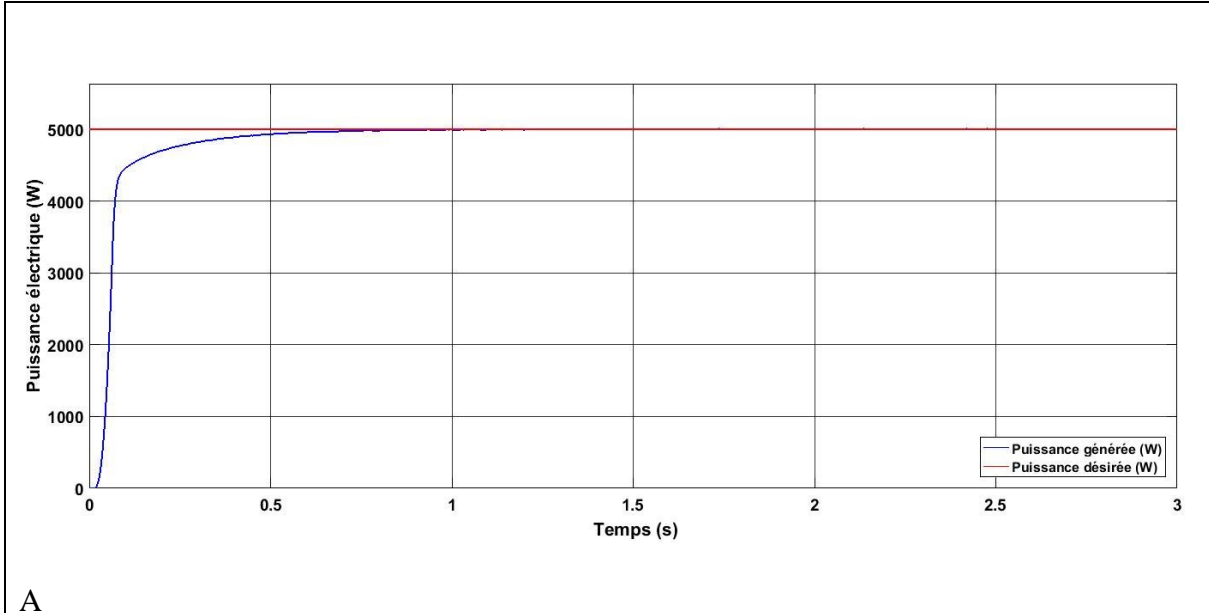


A

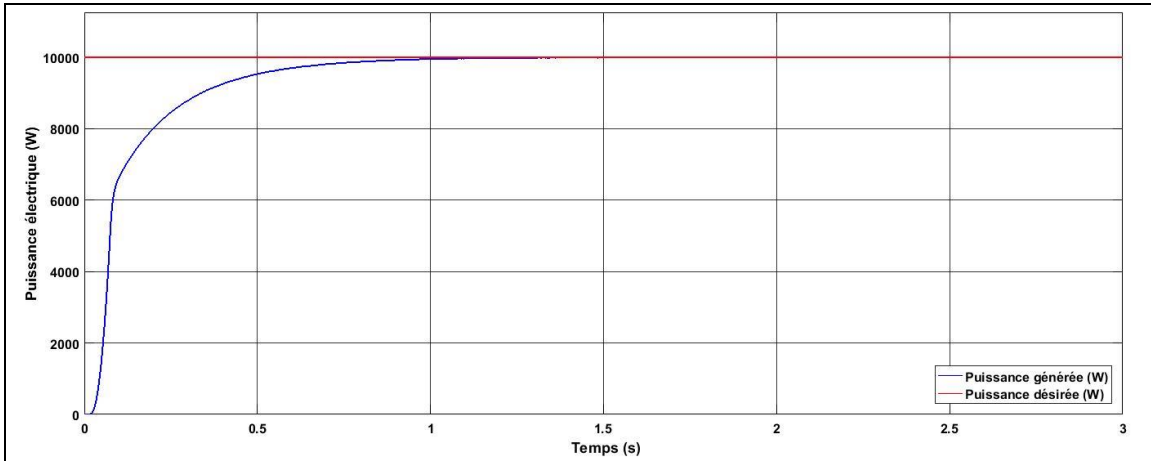


B

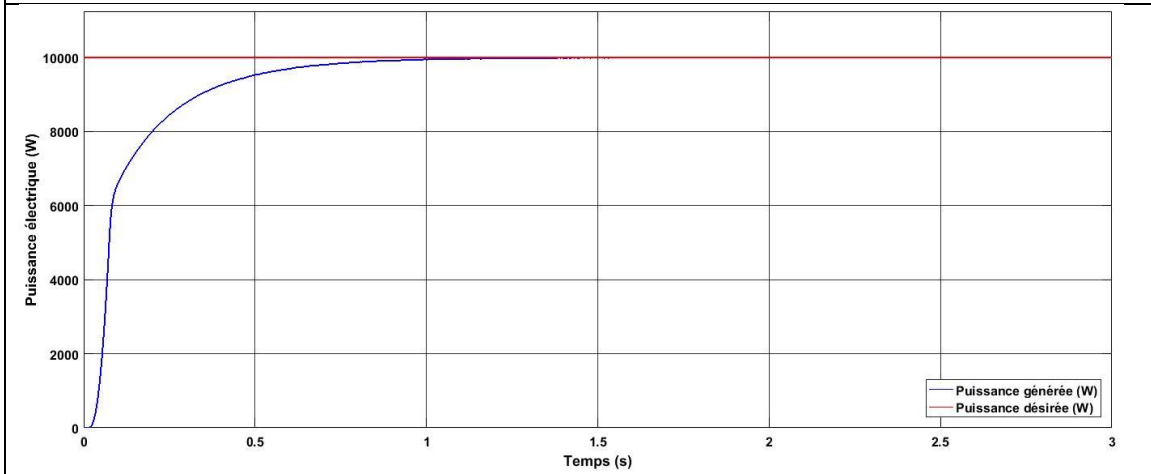
Figure 4.13 Variation de la puissance électrique en fonction du temps obtenue à une puissance de référence 1000 W, A : Manuellement, B : Modèle adaptatif



B
Figure 4.14 Variation de la puissance électrique en fonction du temps obtenue à une puissance de référence 5000 W, **A** : Manuellement, **B** : Modèle adaptatif



A



B

Figure 4.15 Variation de la puissance électrique en fonction du temps obtenue à une puissance de référence 10000 W, A : Manuellement, B : Modèle adaptatif

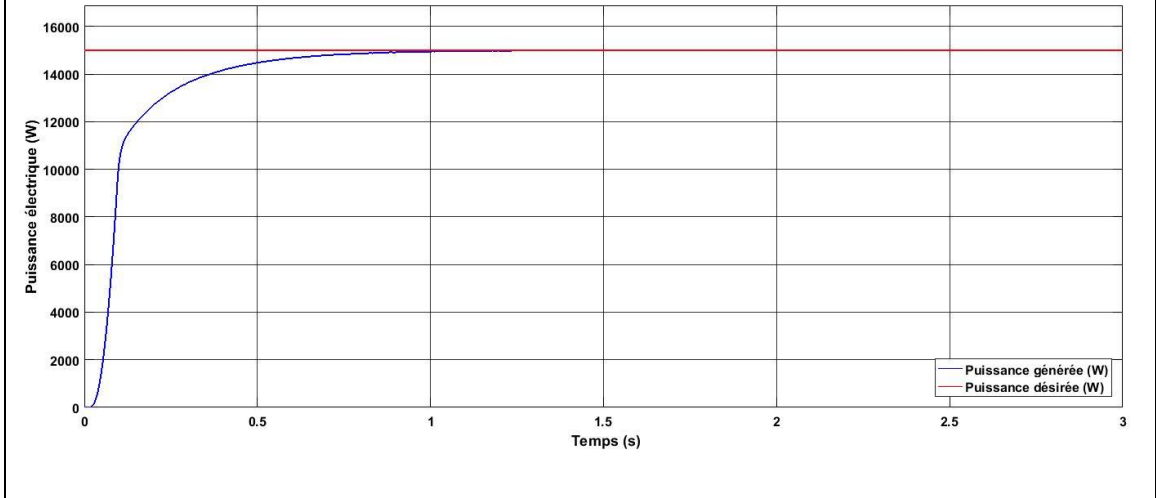
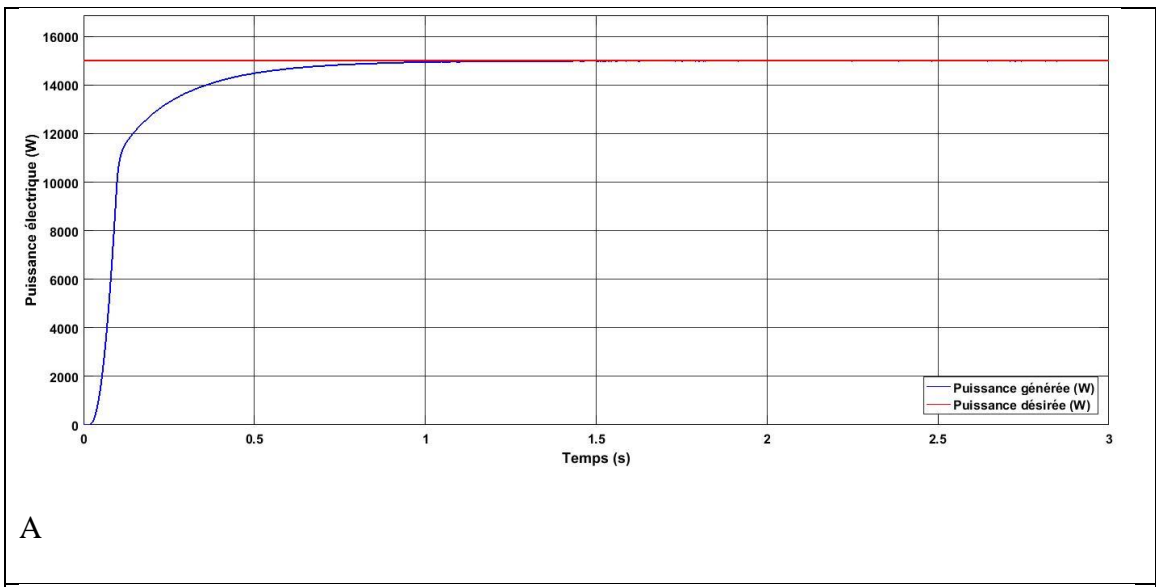
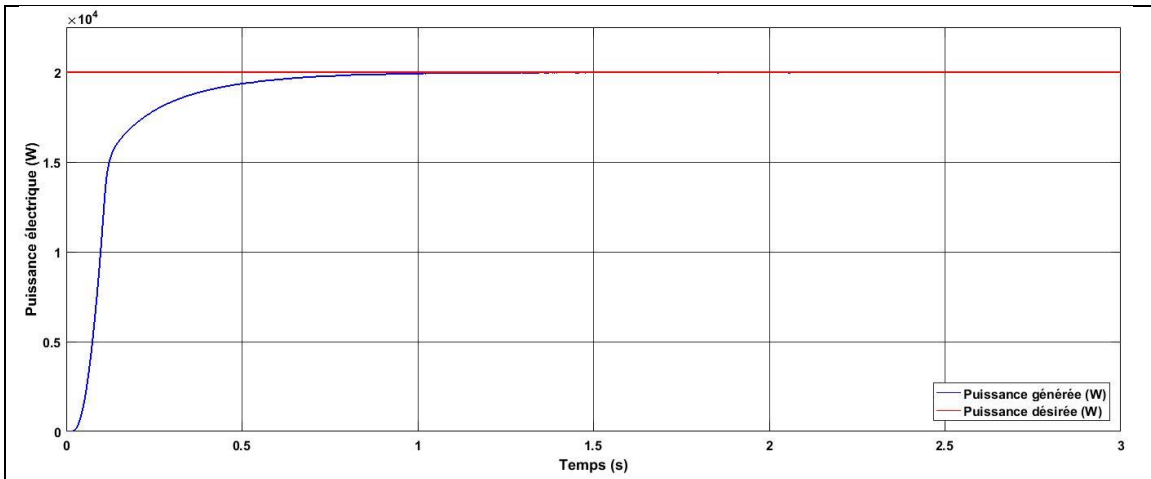
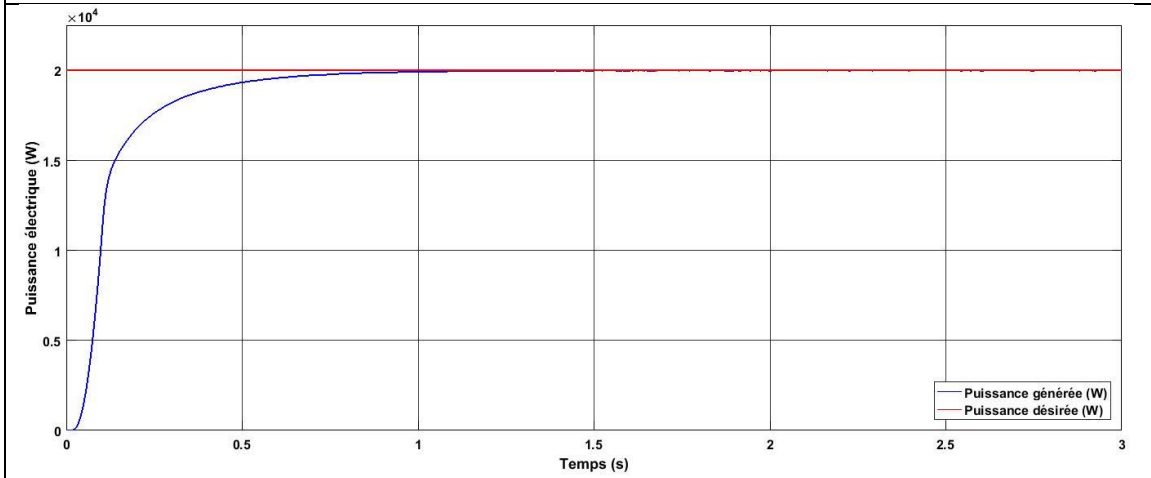


Figure 4 16 Variation de la puissance électrique en fonction du temps obtenue à une puissance de référence 15000 W, A : Manuellement, B : Modèle adaptatif

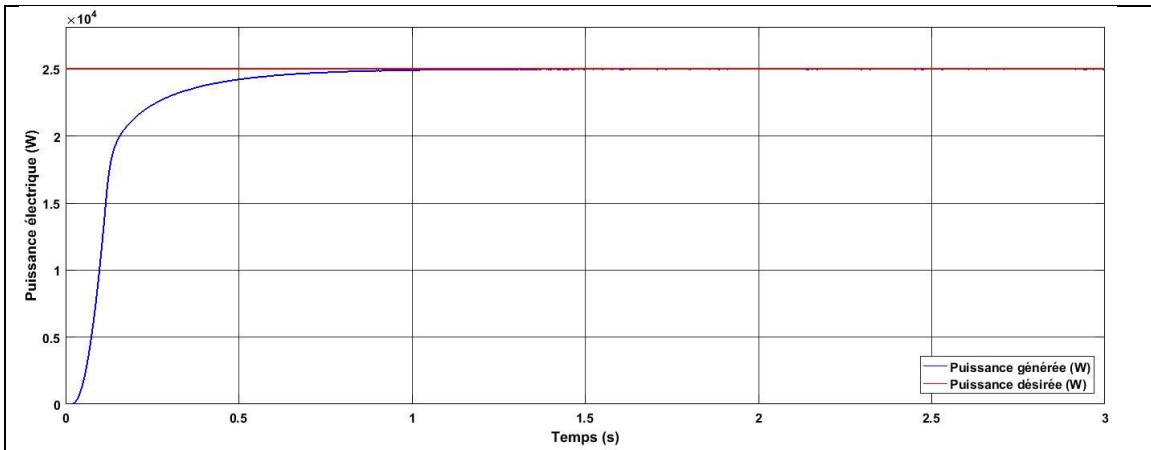


A

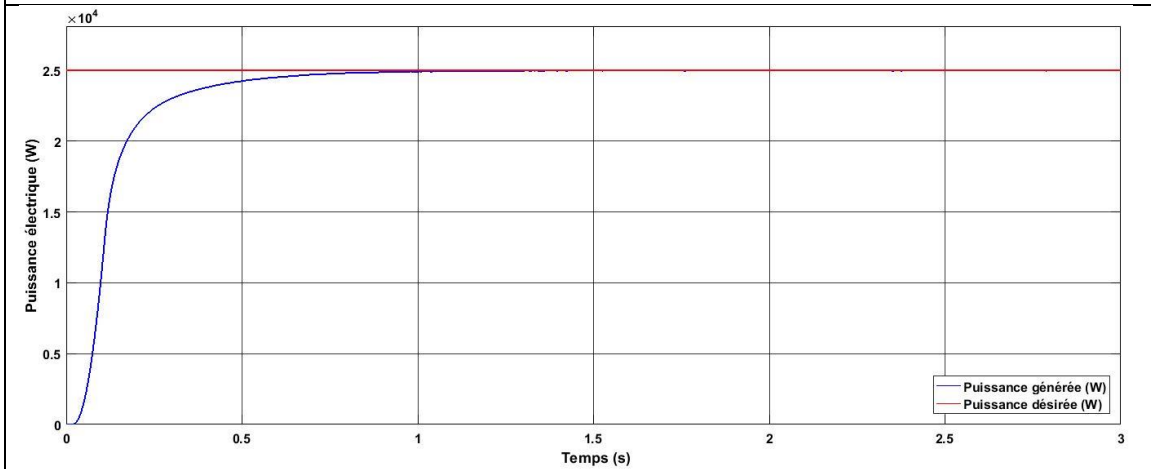


B

Figure 4.17 Variation de la puissance électrique en fonction du temps obtenue à une puissance de référence 20000 W, A : Manuellement, B : Modèle adaptatif



A



B

Figure 4.18 Variation de la puissance électrique en fonction du temps obtenue à une puissance de référence 25000 W, A : Manuellement, B : Modèle adaptatif

Les résultats obtenus de la validation expérimentale d'un contrôle en temps réel de la machine synchrone à aimant permanent à l'aide du logiciel MATLAB en utilisant une technique de commande directe de couple proposée dans cette étude avec CDC. Les résultats de l'étude comparative prouvent que la commande adaptative du PI proposée est meilleure que la commande manuelle avec des dépassements négligeables. Les (figures

4.13 à 4.18) montrent que la commande proposée régule précisément les grandeurs à commander. Globalement, les résultats obtenus mettent en évidence l'efficacité du contrôleur PI proposé en termes de rapidité, précision et d'amortissement des oscillations. Ces caractéristiques sont importantes pour éviter le problème bien connu de déstabilisation des génératrices synchrones.

Pour montrer convenablement l'asservissement de notre système on a procédé comme suit : Premièrement, on a ajouté 4 étapes telles que la valeur de référence figure 4.19 (puissance désirée) est 5000 W. La première étape commence après 3 s de la mise en marche du système avec l'ajout d'une puissance de 5000 W, soit 10000 W en total. Par la suite, la deuxième étape s'obtient avec l'ajout d'une autre 5000 W à $t = 6$ s, soit 15000 W en 6 s du démarrage de notre système. Finalement, la dernière étape est obtenue en retranchant 2000 W à $t = 8$ s pour un total de 12000 W. Ceci est illustré dans la figure 4.20

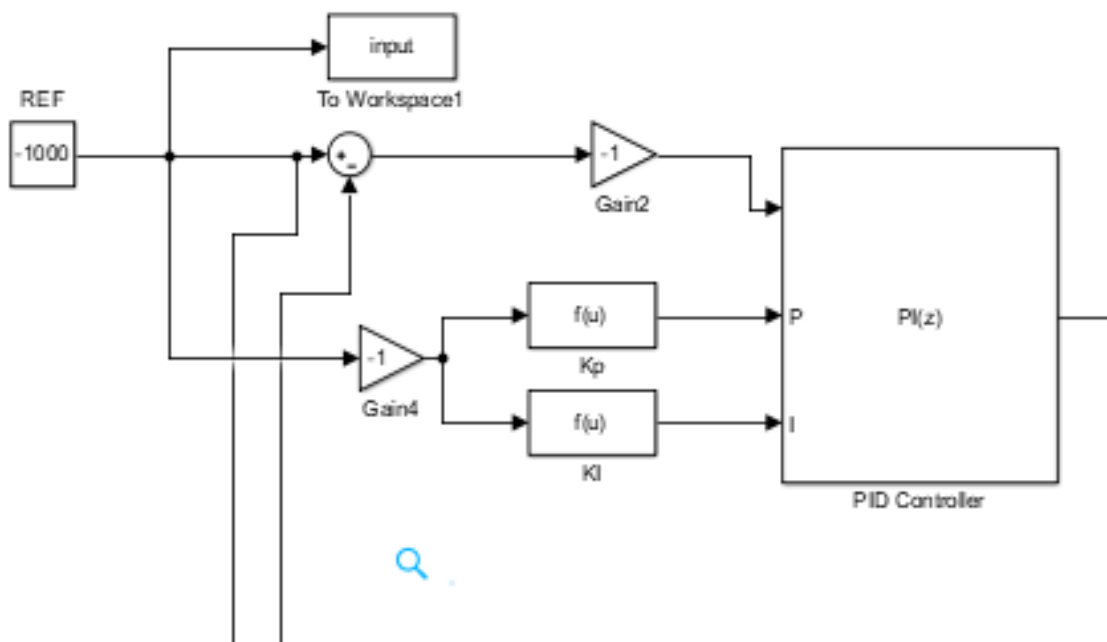


Figure 4.19 Système (incomplet) montrant les étapes de l'asservissement

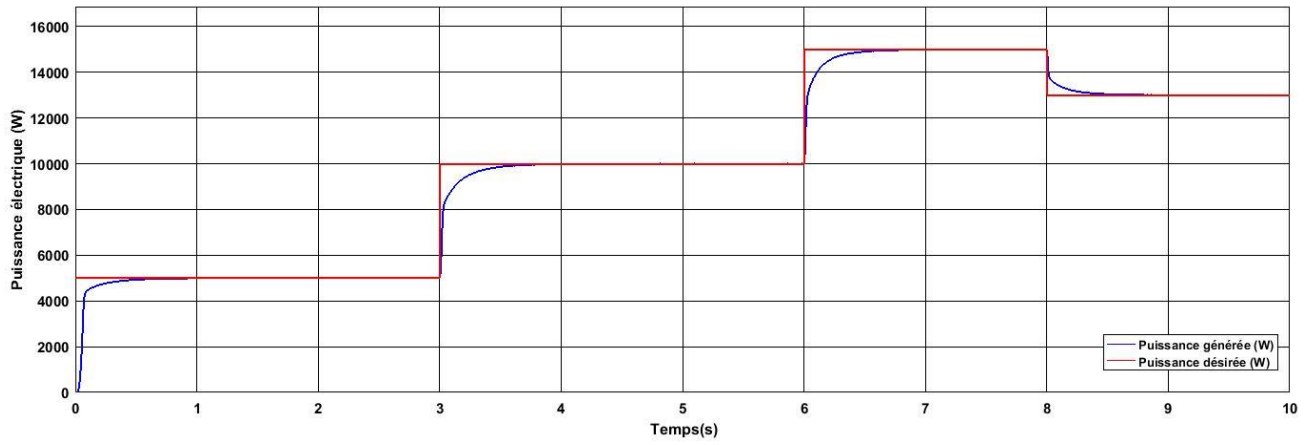


Figure 4.20 Courbe représentative de l'asservissement de la puissance électrique en fonction du temps pour quatre différentes étapes

CHAPITRE 5

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

5.1 Conclusion

Tout d'abord, une revue bibliographique a été réalisée afin d'acquérir des connaissances concernant le réglage PID ainsi que la conception d'un système d'asservissement de puissance de puissance mécanique du moteur électrique couplé avec une génératrice.

Dans ce projet, un modèle mathématique a été développé à l'aide du logiciel Matlab permettant d'ajuster les paramètres d'asservissement de puissance mécanique via l'identification en continu du couple générateur-charge dans une application hydrolienne.

Afin de développer un modèle numérique permettant de décrire le comportement de notre système expérimental, des paramètres ont été identifiés à l'aide d'un générateur réel tel que des essais expérimentaux ont été réalisés avec notre partenaire industriel la Chaire TERRE. Ceci a permis de réaliser une étude comparative de notre modèle et des données fournies par un générateur réel. Les résultats ont montré une correspondance similaire avec une efficacité d'environ 93%.

Cette étape a été suivie par un développement d'un code Matlab qui a permis d'optimiser les valeurs des gains K_p et K_i pour une puissance électrique désirée générée par le générateur. Ceci a permis d'avoir une base de données décrivant la variation des gains K_p et K_i tout le long de l'évolution de la puissance électrique. Par la suite, ces données ont permis de décrire un modèle traduit par deux équations mathématiques qui ont été implémentées dans un bloc 'fonction' à l'entrée du contrôleur PI. Ce modèle a joué le rôle simulateur autonome adaptatif asservi. Les résultats de la simulation sont satisfaisants. En effet, la puissance électrique suit la valeur de la puissance de référence souhaitée. Les

résultats montrent que la commande proposée régule efficacement la vitesse relative et la puissance électrique du système hydrolienne. Les mêmes résultats obtenus prouvent que les oscillations de la vitesse relative ainsi que les variations de la puissance électrique sont très faibles, par conséquent le système hydrolien peut être directement couplé au réseau électrique sans risque majeur.

En conclusion, cette étude a contribué aux :

- 1- L'amélioration et analyse les caractéristiques d'une commande de type 'PID' afin d'optimiser le rendement électrique d'une génératrice hydrolienne.
- 2- L'implémentation numérique d'une structure de commande (CDC) sur le système de modèle numérique qui présente le BEH disponible au sein du laboratoire de la Chaire TERRE du cégep de Jonquière.

5.2 Recommandations

Nous terminons ce rapport par quelques recommandations dans le but d'apporter une meilleure orientation aux travaux futurs :

- Développer un modèle mathématique plus complet afin de remplacer les blocs prédéfinis par des équations mathématiques décrivant le système de banc d'essai pour avoir la liberté d'essayer plusieurs méthodes de réglage PID.
- Améliorer le programme de calcul des gains K_p et K_i afin qu'il soit plus performant au point de vue d'avoir une vitesse de calcul rapide.
- Valider le modèle mathématique par des tests réels expérimentaux afin de comparer ces résultats par ceux obtenus par le modèle mathématique.

Référence

1. Jaquier, T., *Hydroliennes à flux transverse: développement d'un prototype HARVEST en canal*. 2011, Grenoble.
2. Robert, M. and C. Cheverry, *Les ressources mondiales en eau et en sols: une limitation pour l'avenir*. Cahiers Agricultures, 1996. **5**(4): p. 243-248 (1).
3. Matos, G. and L. Wagner, *Consumption of materials in the United States, 1900–1995*. Annual review of energy and the environment, 1998. **23**(1): p. 107-122.
4. Mirecki, A., *Étude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance*. 2005, Institut National Polytechnique de Toulouse.
5. Demirbas, A., *Importance of biodiesel as transportation fuel*. Energy policy, 2007. **35**(9): p. 4661-4670.
6. Pielke Sr, R.A., et al., *The influence of land-use change and landscape dynamics on the climate system: relevance to climate-change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2002. **360**(1797): p. 1705-1719.
7. Damtoft, J.S., et al., *Sustainable development and climate change initiatives*. Cement and concrete research, 2008. **38**(2): p. 115-127.
8. Walker, G. and P. Devine-Wright, *Community renewable energy: What should it mean?* Energy policy, 2008. **36**(2): p. 497-500.
9. Omer, A.M., *Energy, environment and sustainable development*. Renewable and sustainable energy reviews, 2008. **12**(9): p. 2265-2300.
10. Perron, D., *Le nouveau roman de l'énergie nationale: analyse des discours promotionnels d'Hydro-Québec de 1964 à 1997*. 2006: University of Calgary Press.
11. *Electric power purchases for the Québec market*. Available from: <http://www.hydroquebec.com/electricity-purchases-quebec/supply-plan.html>.
12. Ibrahim, H., *Étude et conception d'un générateur hybride d'électricité de type éolien-diesel avec élément de stockage d'air comprimé*. 2010: Université du Québec à Chicoutimi.
13. ; Available from: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/simscape-electrical-block-libraries.html>.
14. Khan, M., et al., *Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review*. Applied energy, 2009. **86**(10): p. 1823-1835.
15. Ginocchio, R. and P.-L. Viollet, *L'énergie hydraulique*. 2012: Lavoisier.
16. Kirke, B., *Developments in ducted water current turbines*. Tidal paper, 2006(25-04).
17. Elghali, S.B., M. Benbouzid, and J.F. Charpentier. *Marine tidal current electric power generation technology: State of the art and current status*. in *2007 IEEE International Electric Machines & Drives Conference*. 2007. IEEE.
18. Techtouch, *al ma7mous dhou el mo5 ata7an*. 3020.
19. Andreica, A.-M., *Optimisation énergétique de chaînes de conversion hydroliennes-modélisation, commandes et réalisations expérimentales*. 2009, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG.

20. Goosen, M.F., et al., *Thermodynamic and economic considerations in solar desalination*. Desalination, 2000. **129**(1): p. 63-89.
21. Ghosh, T.K. and M.A. Prelas, *Energy resources and systems: volume 2: renewable resources*. Vol. 2. 2011: Springer Science & Business Media.
22. Cengel, Y.A., *Fluid mechanics*. 2010: Tata McGraw-Hill Education.
23. Roques, S., *Modélisation du comportement dynamique couplé rotor-stator d'une turbine en situation accidentelle*. 2007, Ecole Centrale de Nantes (ECN).
24. Poitiers, F., *Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-machine asynchrone à cage autonome-machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau*. 2003, Université de Nantes.
25. Vechiu, I., *Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome*. 2005, Université du Havre.
26. Padet, J.P. and P. Germain, *Fluides en écoulement: méthodes et modèles*. 1991: Masson.
27. Laverdure, N., *Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires*. 2005, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG.
28. Mohammed, M.A., *Etude des tuyères composites pour une conception optimale d'une hydrolienne à axe horizontal*. 2017, Université de Bretagne occidentale-Brest.
29. Merzouk, N.K., *Evaluation du Gisement Energétique Eolien-Contribution à la Détermination du Profil Vertical de la Vitesse du Vent en Algérie*. 2006, Thèse de doctorat. Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen.
30. Huang, A.Q., et al., *The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy internet*. Proceedings of the IEEE, 2011. **99**(1): p. 133-148.
31. *Filière d'énergie renouvelable l'énergie hydrolienne 2014*; Available from: <http://www.hydroquebec.com/data/developpement-durable/pdf/fiche-hydrolienne.pdf>.
32. Morgan, J.J., N. Twigg, and C.H. Enderby, *Developments relating to a rotor arrangement*. 2011, Google Patents.
33. Maganga, F., et al. *Caractérisation expérimentale du sillage généré par une hydrolienne-Influence du taux de turbulence ambiant*. in *Journées Genie Civil/Génie Côtier 2010, Sables d'Olonne*. 2010.
34. Roa, A.M., *Analyse numérique des hydroliennes à axe vertical munies d'un carénage*. 2011, Université de Grenoble.
35. Myers, L. and A. Bahaj, *Simulated electrical power potential harnessed by marine current turbine arrays in the Alderney Race*. Renewable energy, 2005. **30**(11): p. 1713-1731.
36. Manwell, J.F., J.G. McGowan, and A.L. Rogers, *Wind energy explained: theory, design and application*. 2010: John Wiley & Sons.
37. Join, C., J. Masse, and M. Fliess, *Etude préliminaire d'une commande sans modèle pour papillon de moteur..... A model-free control for an engine throttle: a preliminary study*. Journal européen des systèmes automatisés (JESA), 2007. **42**(2-3): p. 337--354.
38. Åström, K.J. and R.M. Murray, *Feedback systems: an introduction for scientists and engineers*. 2010: Princeton university press.

39. Patwardhan, R.S. and M. Ruel, *Meilleures pratiques de surveillance de vos boucles PID-La clé pour optimiser les systèmes de contrôle et régulation*. ISA Expo, 2008.
40. Bakshi, U.A. and V.U. Bakshi, *Control Systems*. 2010: Technical Publications.
41. Kelouwani, S., *Stratégie de commande d'un système à énergie renouvelable avec stockage d'hydrogène*. 2002, Université du Québec à Trois-Rivières.
42. Ross, D., E. Deguine, and M. Camus, *Asservissement par PID*. rose. eu. org, 2010. **3**.
43. Barnes, S. and S. Maekawa, *Generalization of Faraday's law to include nonconservative spin forces*. Physical review letters, 2007. **98**(24): p. 246601.
44. Nagy, Z.K. and R.D. Braatz, *Open-loop and closed-loop robust optimal control of batch processes using distributional and worst-case analysis*. Journal of process control, 2004. **14**(4): p. 411-422.
45. Dorf, R.C. and R.H. Bishop, *Modern control systems*. 1998.
46. Steil, G.M. and K. Rebrin, *Closed loop system for controlling insulin infusion*. 2008, Google Patents.
47. Helgesen, H., *A robust Multi-Loop tuning Procedure based at Successive Semidefinite Programming, that achieves optimal Performance and Failure Tolerance*. 2008, Institutt for teknisk kybernetikk.
48. Tandan, N. and K.K. Swarnkar, *PID controller optimization by soft computing techniques-A review*. International Journal of Hybrid Information Technology, 2015. **8**(7): p. 357-362.
49. Zhang, P., *Advanced industrial control technology*. 2010: William Andrew.
50. Sariyildiz, E., H. Yu, and K. Ohnishi, *A practical tuning method for the robust PID controller with velocity feed-back*. Machines, 2015. **3**(3): p. 208-222.
51. Nagaraj, B., S. Subha, and B. Rampriya, *Tuning algorithms for PID controller using soft computing techniques*. International Journal of Computer Science and Network Security, 2008. **8**(4): p. 278-281.
52. Amaral, J., R. Tanscheit, and M. Pacheco, *Tuning PID controllers through genetic algorithms*. complex systems, 2018. **2**: p. 3.
53. Kovacic, Z. and S. Bogdan, *Fuzzy controller design: theory and applications*. 2018: CRC press.
54. Garpinger, O., T. Hägglund, and K.J. Åström, *Performance and robustness trade-offs in PID control*. Journal of Process Control, 2014. **24**(5): p. 568-577.
55. Kiong, T.K., et al., *Advances in PID control*. 1999: Springer.
56. Gao, Z., T.A. Trautzsch, and J.G. Dawson, *A stable self-tuning fuzzy logic control system for industrial temperature regulation*. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002. **38**(2): p. 414-424.
57. Verma, A., *Performance Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motor Drive using Particle Swarm Optimization Technique*. Journal of Energy Technology Research, 2017. **1**(2): p. 19-29.
58. Yurkevich, V.D., *Advances in PID Control*. 2011.
59. Maiti, D., et al. *Tuning PID and PI/λ D δ controllers using the integral time absolute error criterion*. in *2008 4th International Conference on Information and Automation for Sustainability*. 2008. IEEE.

60. Ige, O.O., *Automatic Tuning of PID Controllers*. 2018, Universitetet i Sørøst-Norge.
61. Tebri, Z., *Etude des propriétés dynamiques des entraînements électriques à moteurs à commutation électronique*. 2017, Université Mouloud Mammeri.
62. Boldea, I., *Synchronous generators*. 2018: CRC Press.
63. Zhao, J., *An efficient wide-speed direct torque control based on fuzzy logic technique*. 2012, University of Toledo.
64. Singh, B. and S. Singh, *State of the art on permanent magnet brushless DC motor drives*. *Journal of power electronics*, 2009. **9**(1): p. 1-17.
65. Allirani, S. and V. Jagannathan, *High performance direct torque control of induction motor drives using space vector modulation*. *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*, 2010. **7**(6): p. 178.
66. Morand, F., *Techniques d'observation sans capteur de vitesse en vue de la commande des machines asynchrones*. Institut National des Sciences appliquées de Lyon, 2005.
67. Guy, B., *Sur l'identité des relations spatiales et des relations temporelles: une clé pour reprendre les problèmes de la physique*. 2018.
68. Karmakar, S., et al., *Induction motor fault diagnosis*. Vol. 25. 2016: Springer.
69. Gür, T.M., *Review of electrical energy storage technologies, materials and systems: challenges and prospects for large-scale grid storage*. *Energy & Environmental Science*, 2018. **11**(10): p. 2696-2767.
70. Toledo, D., *Cobalt Ferrite Nanoparticles Fabricated via Co-precipitation in Air: Overview of Size Control and Magnetic Properties*. 2015.
71. Saad, N.H., A.A. El-Sattar, and M.I. Marei, *A current controlled matrix converter for wind energy conversion systems based on permanent magnet synchronous generator*. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 2016. **3**(1): p. 108-118.
72. Saad, N.H., A.A. El-Sattar, and M.E. Marei, *Improved bacterial foraging optimization for grid connected wind energy conversion system based PMSG with matrix converter*. *Ain Shams Engineering Journal*, 2018. **9**(4): p. 2183-2193.
73. Manual, F., *ACS800 Standard Control Program 7. x*. ABB Oy, Helsinki, Finland, 2007.
74. Papegay, Y., *De la modélisation littérale à la simulation numérique certifiée*. 2012, Université Nice Sophia Antipolis.
75. Day, A., et al., *Hydrodynamic modelling of marine renewable energy devices: A state of the art review*. *Ocean Engineering*, 2015. **108**: p. 46-69.
76. Iov, F., et al., *Wind Turbine Blockset in Matlab/Simulink. General Overview and Description of the Models*. Aalborg University, 2004.
77. De Bobes I Coll, A., *Voltage and frequency regulation to support synchronous generators operation by grid feeding distributed energy resources*. 2016, Universitat Politècnica de Catalunya.
78. Aliprantis, D., et al. *Modeling and control of a variable-speed wind turbine equipped with permanent magnet synchronous generator*. in *Proc. of ICEM*. 2000.
79. Sklett, L.M., *Simulation of Small Scale Pumped Hydro Power Plant with Permanent Magnet Generator during Faults*. 2015, NTNU.

80. ABB. *Technical guide No. 1 Direct torque control -the world's most advanced AC drive technology*. 2011; Available from: https://library.e.abb.com/public/14f3a3ad8f3362bac12578a70041e728/ABB_Technical_guide_No_1_REVC.pdf.
81. Karlovsky, P. and J. Lettl, *Induction Motor Drive Direct Torque Control and Predictive Torque Control Comparison Based on Switching Pattern Analysis*. Energies, 2018. **11**(7): p. 1793.
82. Kadri, F., S. Drid, and F. Djeflal. *Direct torque control of induction motor fed by three-level NPC inverter using fuzzy logic*. in *International Conference on Systems and Processing Information*. 2011.
83. Nikzad, M.R., B. Asaei, and S.O. Ahmadi, *Discrete duty-cycle-control method for direct torque control of induction motor drives with model predictive solution*. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018. **33**(3): p. 2317-2329.
84. Diarra, Z.D., et al. *Amélioration des performances d'une machine à réluctance variable à double saillance par adjonction d'une capacité commutée flottante*. in *SGE 2018*. 2018.
85. Sood, A. and N. Gupta, *DIRECT TORQUE CONTROL SCHEME OF INDUCTION MOTOR DRIVE USING SPACE VECTOR MODULATION*. International Journal of Recent Advances in Science and Technology, 2019. **6**(1): p. 1-7.

Annexe A.1

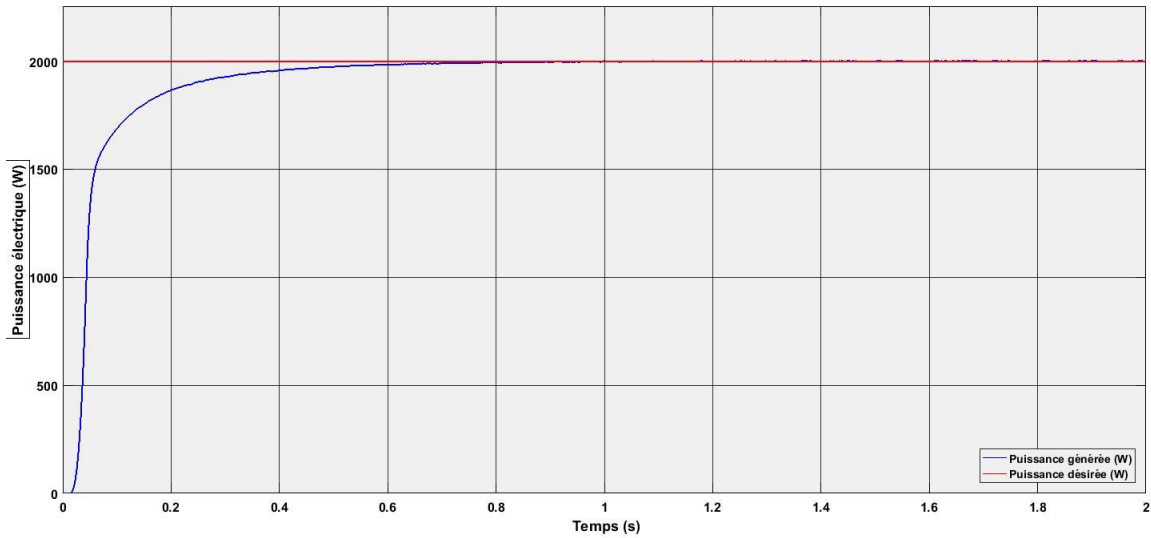


Figure A.1 Influence des gains du correcteur $K_P=0.017$ et $K_i=0.42$ à une puissance de référence $P=2000$ W

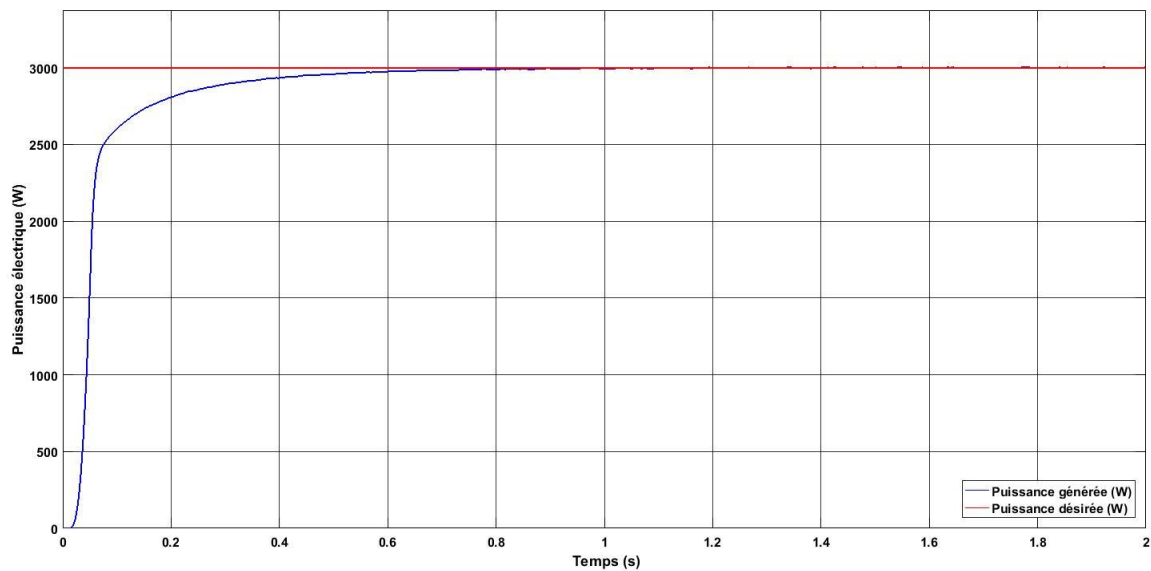


Figure A.2 Influence des gains du correcteur $K_P=0.014$ et $K_i=0.34$ à une puissance de référence $P=3000$ W

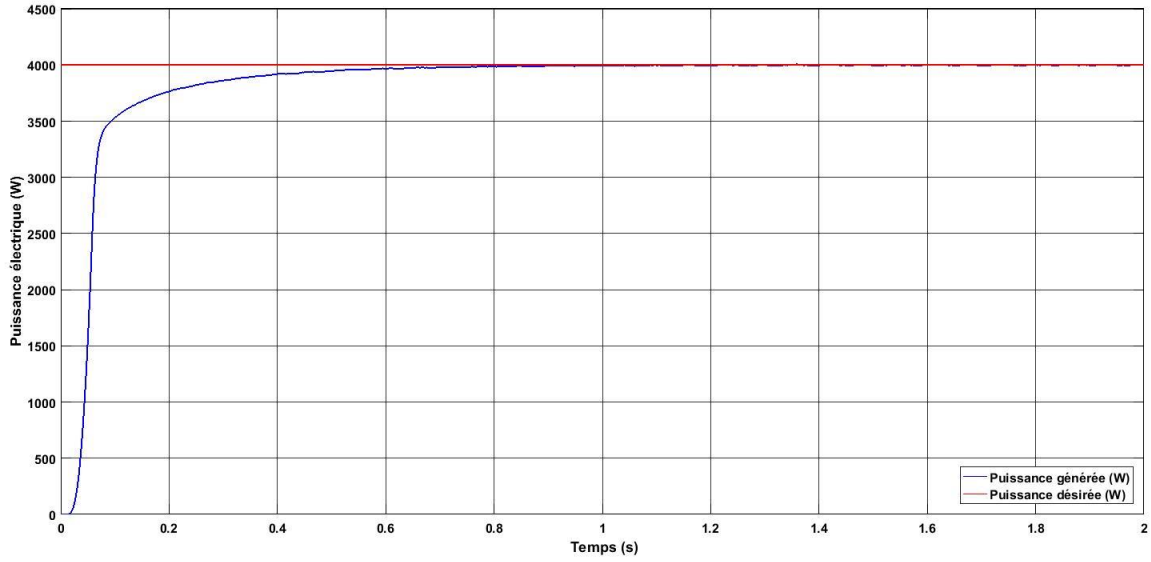


Figure A 3 Influence des gains du correcteur $K_P=0.010$ et $K_i=0.29$ à une puissance de référence $P=4000$ W

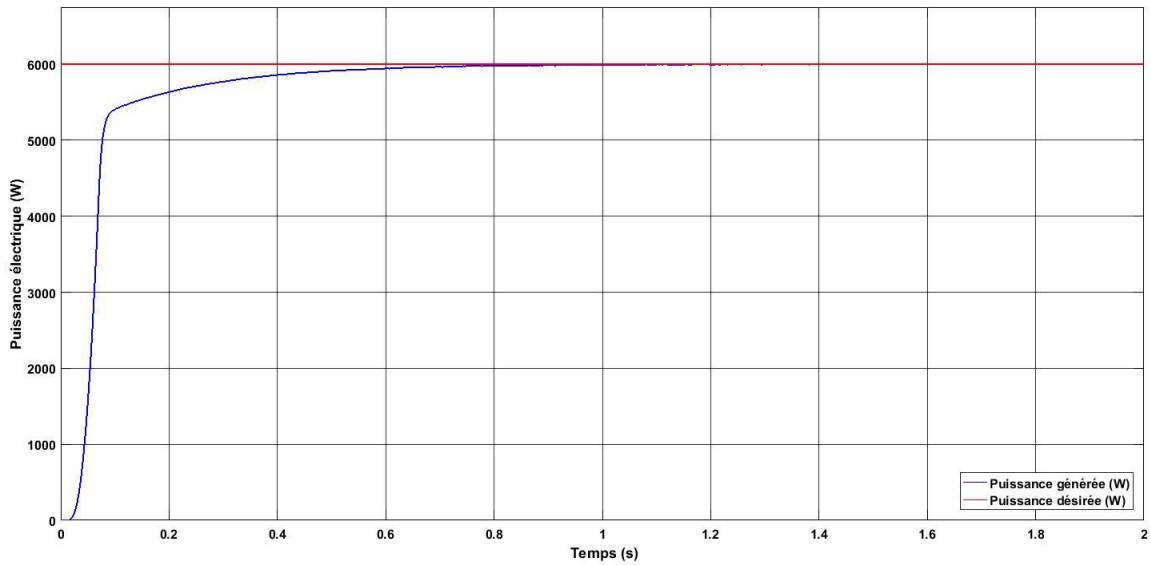


Figure A.4 Influence des gains du correcteur $K_P=0.0085$ et $K_i=0.022$ à une puissance de référence $P=6000$ W

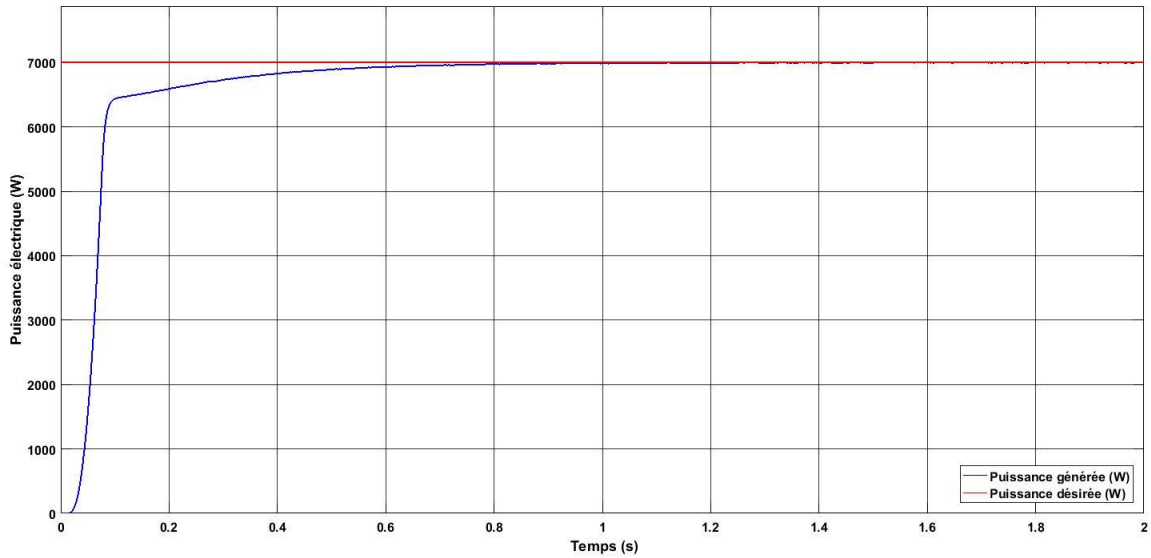


Figure A.5 Influence des gains du correcteur $K_P=0.0081$ et $K_I=0.20$ à une puissance de référence $P=7000$ W

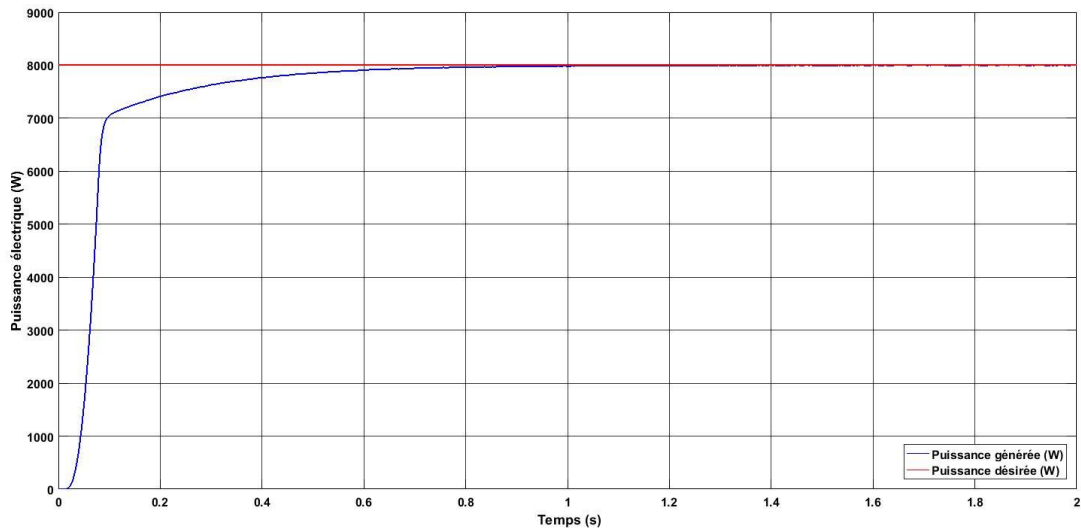


Figure A.6 Influence des gains du correcteur $K_P=0.0078$ et $K_I=0.17$ à une puissance de référence $P=8000$ W

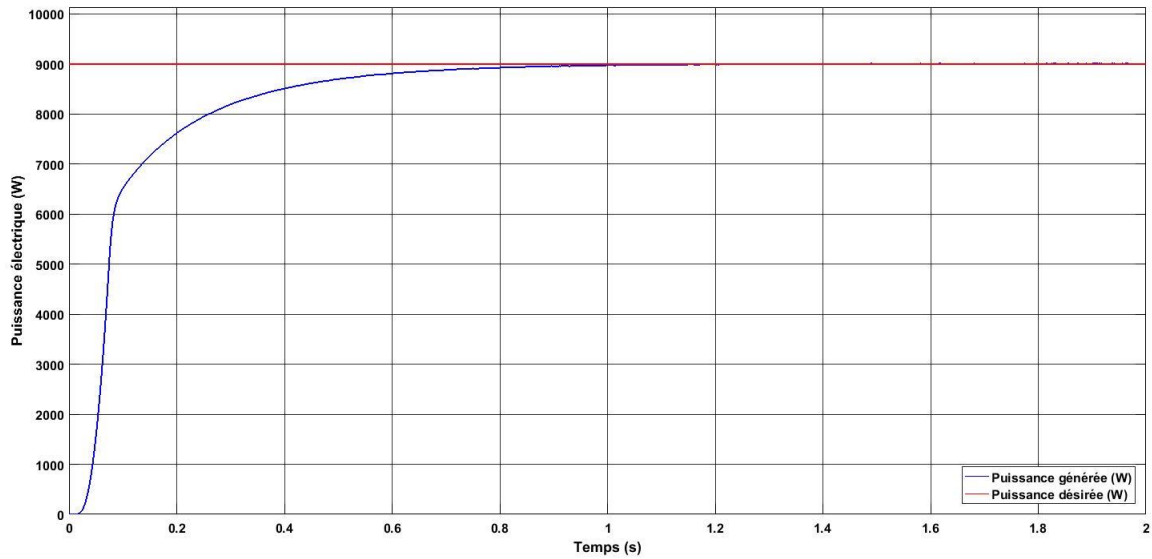


Figure A.7 Influence des gains du correcteur $K_P=0.0073$ et $K_i=0.12$ à une puissance de référence $P=9000$ W

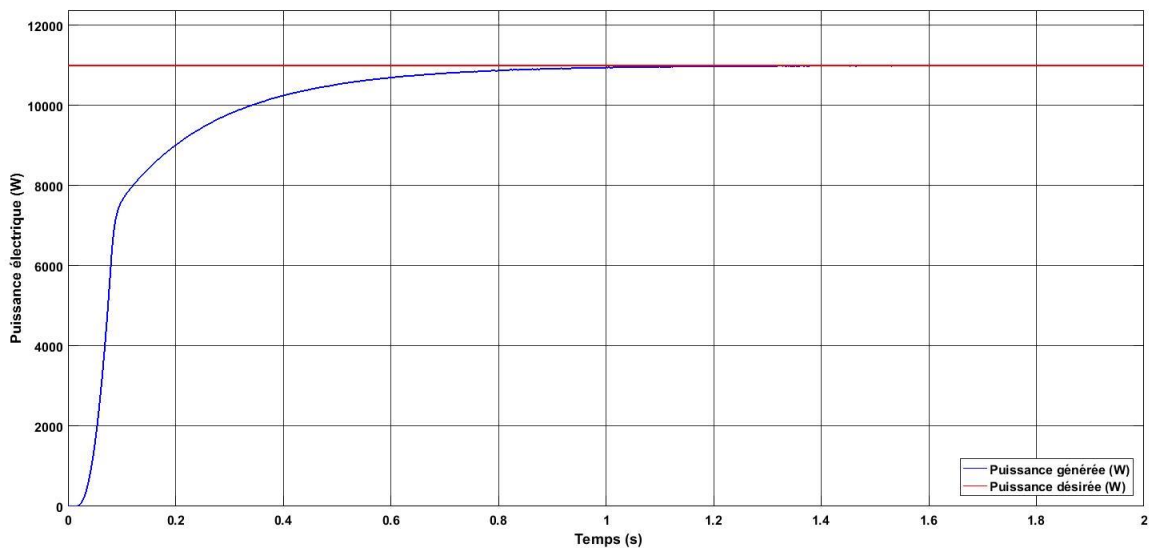


Figure A.8 Influence des gains du correcteur $K_P=0.0067$ et $K_i=0.098$ à une puissance de référence $P=11000$ W

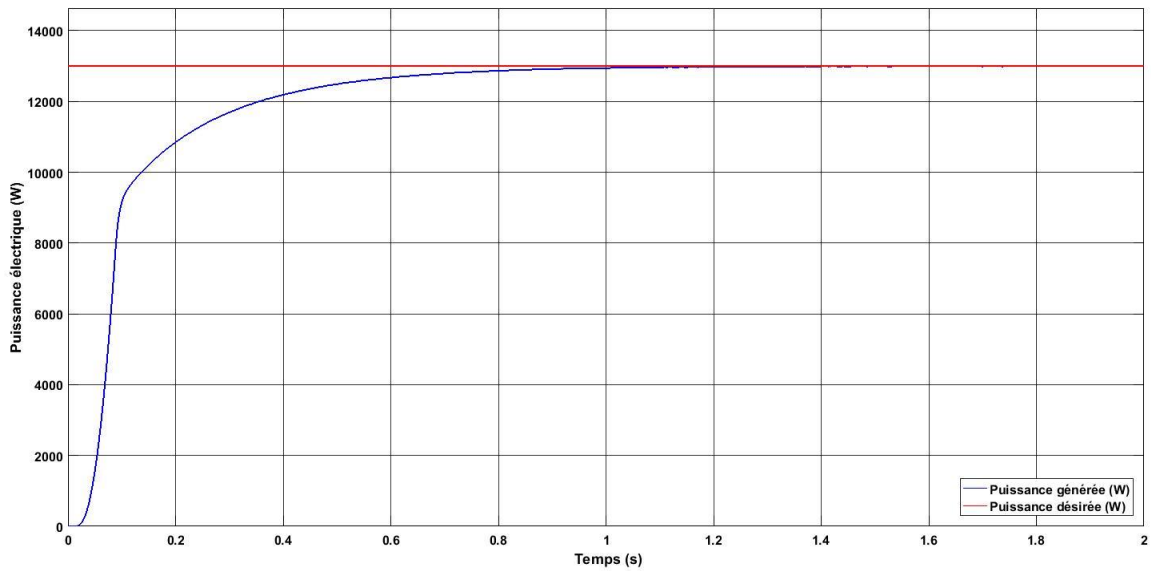


Figure A.9 Influence des gains du correcteur $K_P=0.0058$ et $K_i=0.093$ à une puissance de référence $P=12000$ W

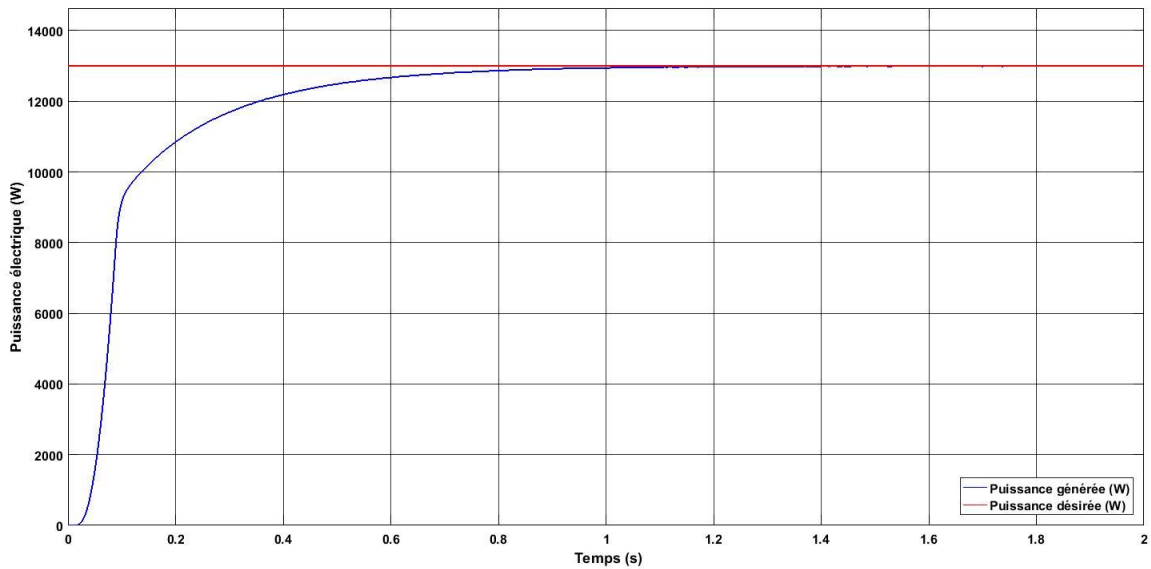


Figure A.10 Influence des gains du correcteur $K_P=0.0057$ et $K_i=0.092$ à une puissance de référence $P=13000$ W

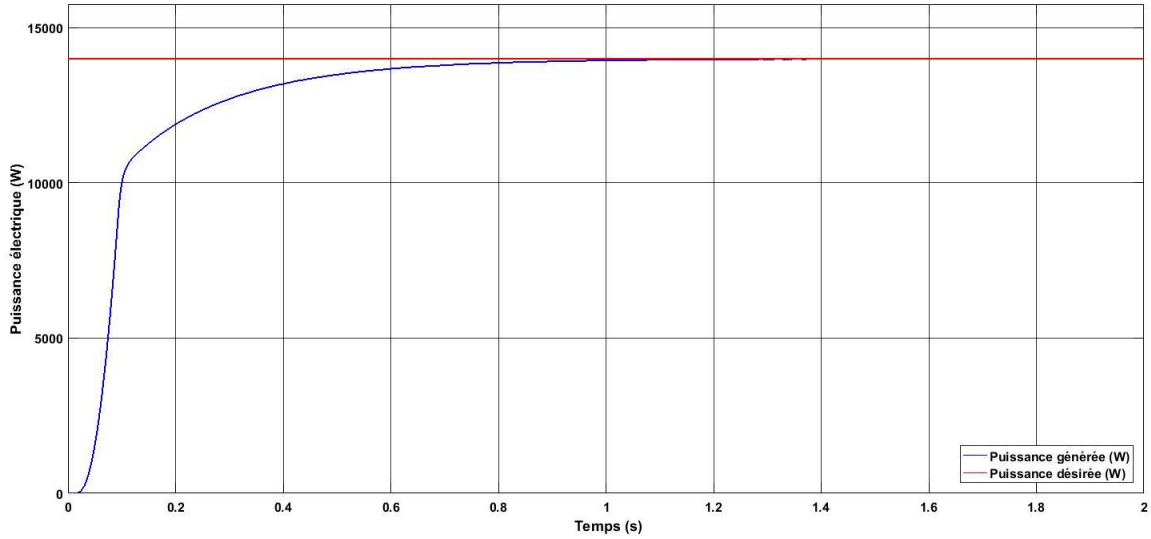


Figure A.11 Influence des gains du correcteur $K_P=0.0054$ et $K_i=0.091$ à une puissance de référence $P=14000$ W

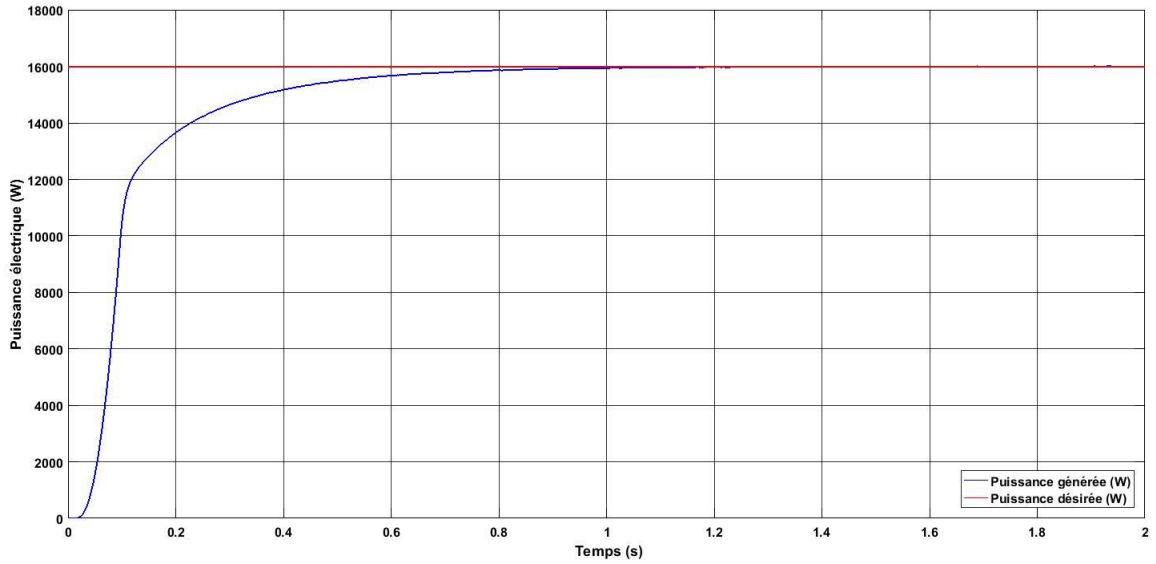


Figure A.12 Influence des gains du correcteur $K_P=0.0035$ et $K_i=0.085$ à une puissance de référence $P=16000$ W

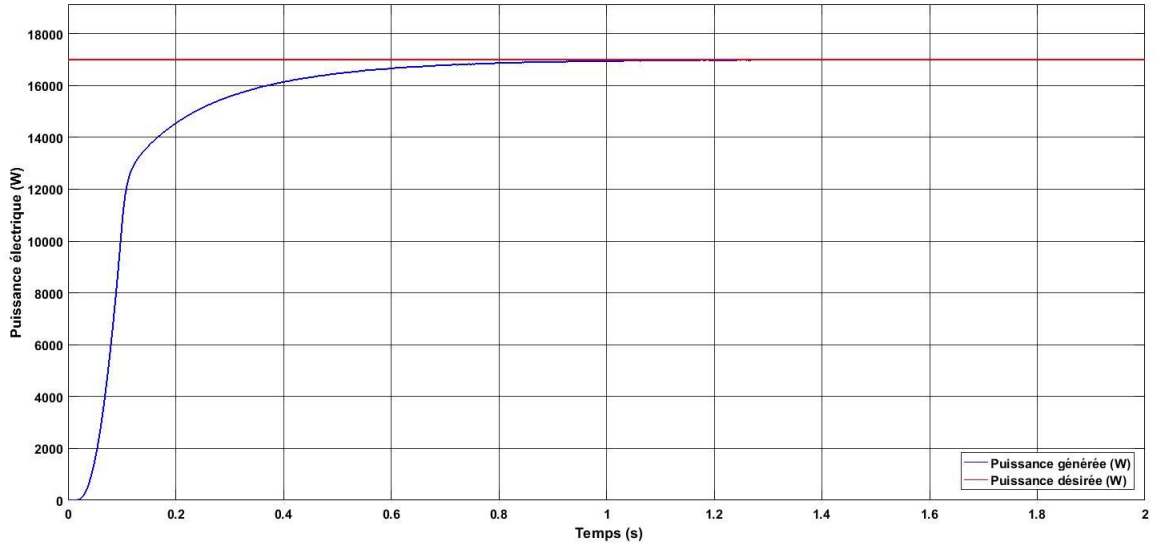


Figure A.13 Influence des gains du correcteur $K_P=0.0032$ et $K_i=0.082$ à une puissance de référence $P=17000$ W

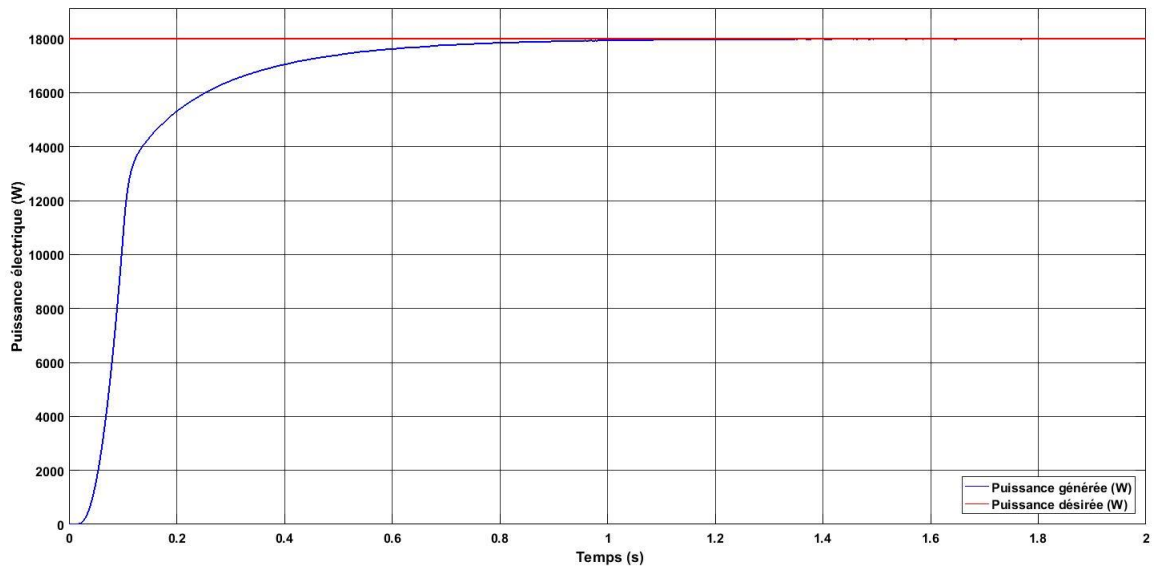


Figure A.14 Influence des gains du correcteur $K_P=0.0030$ et $K_i=0.078$ à une puissance de référence $P=18000$ W

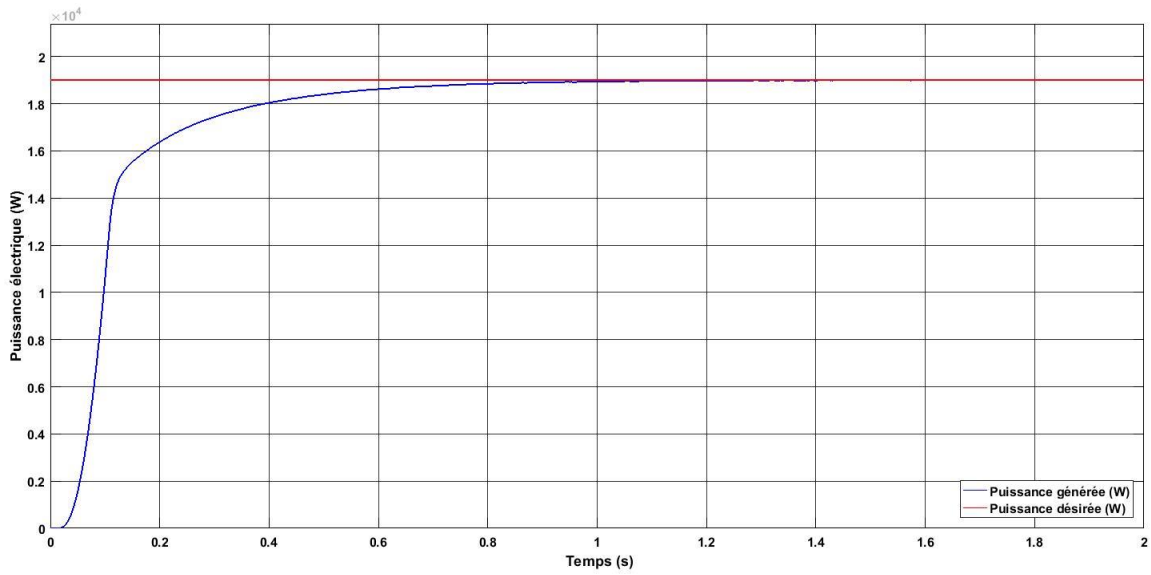


Figure A.15 Influence des gains du correcteur $K_P=0.0030$ et $K_i=0.078$ à une puissance de référence $P=19000$ W

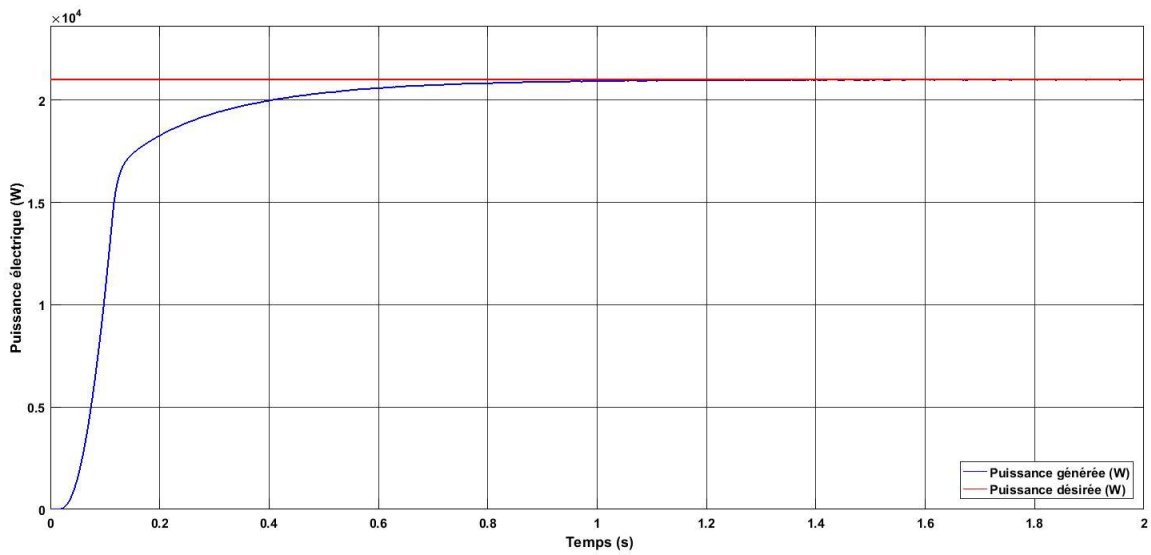


Figure A.16 Influence des gains du correcteur $K_P=0.0023$ et $K_i=0.073$ à une puissance de référence $P=21000$ W

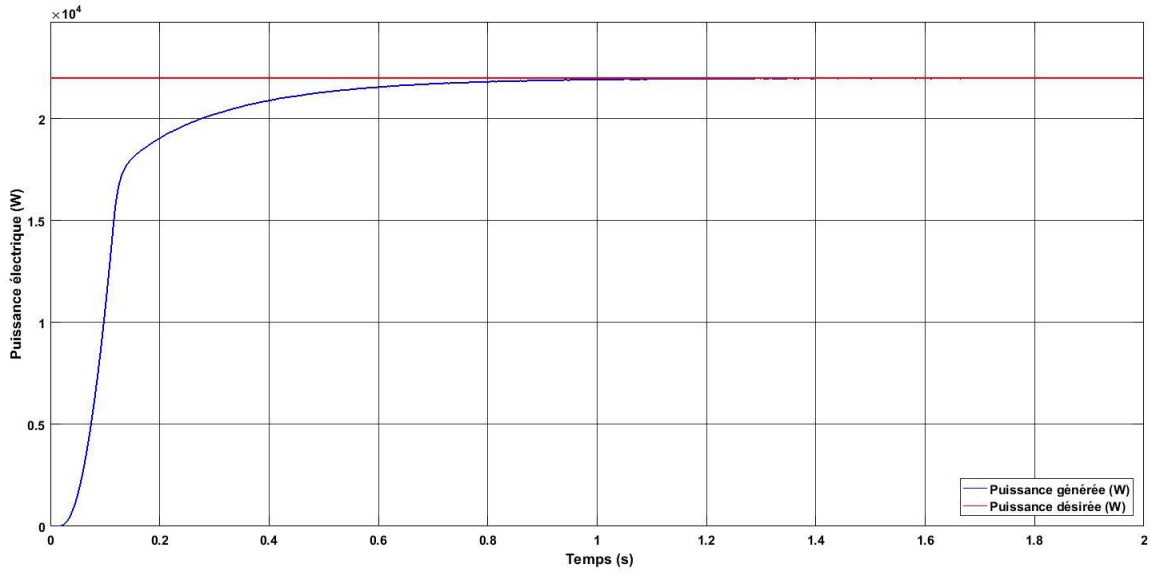


Figure A.17 Influence des gains du correcteur $K_P=0.0022$ et $K_i=0.070$ à une puissance de référence $P=22000$ W

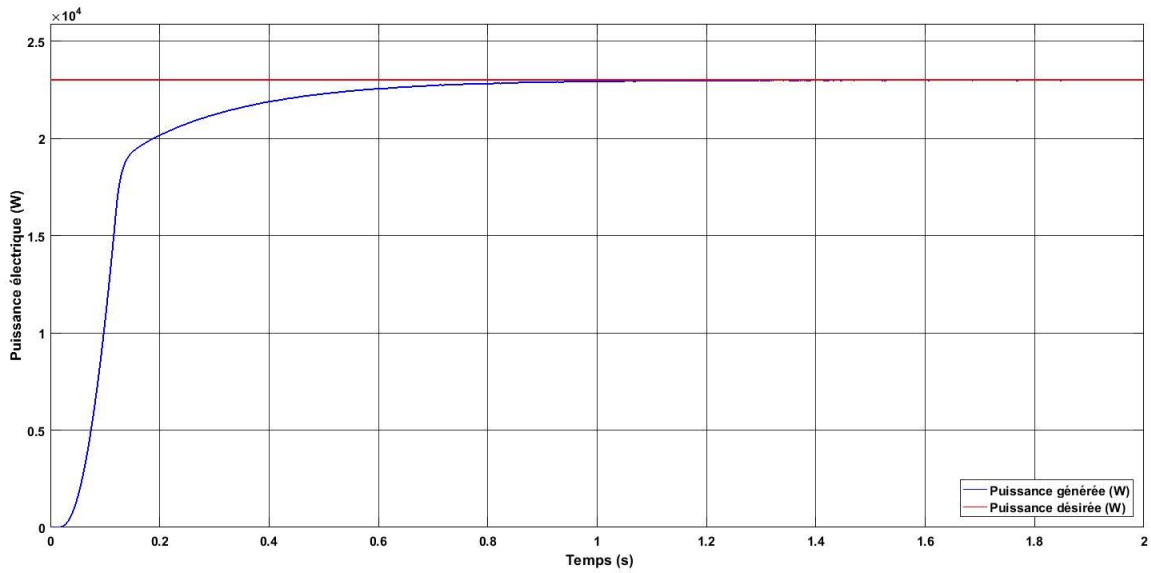


Figure A.18 Influence des gains du correcteur $K_P=0.021$ et $K_i=0.069$ à une puissance de référence $P=23000$ W

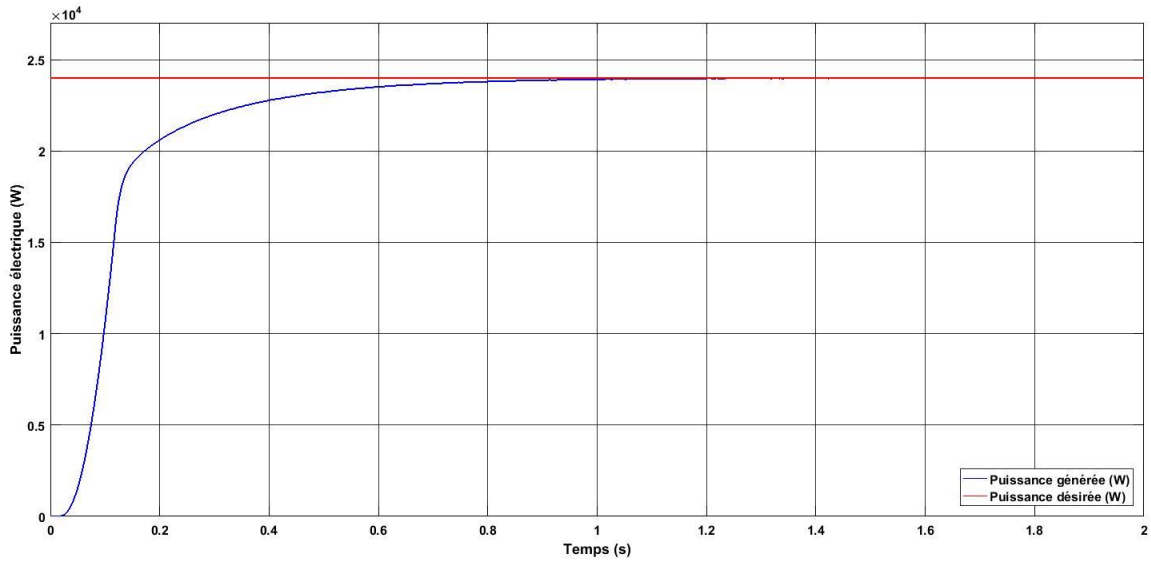


Figure A.19 Influence des gains du correcteur $K_P=0.0017$ et $K_i=0.065$ à une puissance de référence $P=24000$ W