



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Republique Algerienne Democratique Et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة العربي التبسي - تبسة

Université Larbi Tébessi- Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département d' électrotechnique



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de Master Académique**

En : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique industrielle

Par : Djedouani Dhiaelhak & Djedouani Nidhal

Sujet

Modélisation et commande d'une machine synchrone à aimant permanent

Présenté et soutenu publiquement, le 13/ 06 / 2022, devant le jury composé de :

Mr : Djebbar Mohamed Salah	MCB	Président
Mme : Bouguerne Abla	MCB	Rapporteur
Mr : Bendakir Abdelhakim	MCB	Examineur

Dédicaces

À notre exemple éternel, notre soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour nous voir réussir, que Allah te garde dans son se ferdousse, à toi notre père.

À la lumière de notre jours, la source de notre efforts, la flamme de notre cœurs, notre vies et notre bonheurs ; maman que nous adorons.

Aux personnes dont nous avons bien aimé la présence dans ce jour, à tous nos frères

À mes grands-mères, mes grands - pères mes oncles et mes tantes. Que Allah leur donne une longue et joyeuse vie.

À tous les cousins, les voisins et les amis. Merci pour leurs amours et leurs encouragements.

Remerciement

Au terme de ce travail, nous tenons à remercier Allah le tout puissant de nous avoir donnés le courage, la volonté et la patience pour achever ce travail.

Nous tenons, tout d'abord à remercier :

Mme BOUGUERNE Absa d'avoir accepté la direction de ce mémoire. Nous lui exprime toute nous gratitude pour son expérience, son soutien et pour avoir partagé ses connaissances.

Nos respectueux remerciements à l'ensemble des membres du jury: Mr D J A B B A R mohamed salah et Mr B E N D A K I R Abdeshakim pour l'intérêt porté sur notre travail

Nos remerciements vont également à tous les personnes qui nous ont aidées à réaliser ce travail.

Enfin, nous adressons nos vifs remerciements à tous les enseignants du département d'électrotechnique qui ont assisté à notre formation

LISTE DES SYMBOLES

GSAP	La génératrice synchrone à aimants permanents.
MSAP	Machine synchrone à aimants permanents.
A, B, C	Indices correspondants aux trois phases A, B, C.
PI	Proportionnel Intégral.
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor.
d, q	Les axes biphasés respectivement directe et en quadrature.
I_d, I_q	Courants statoriques d'axe direct et en quadrature.
V_d, V_q	Tension statoriques d'axe direct et en quadrature.
V_a, V_b, V_c	Tensions instantanées des phases statoriques.
I_a, I_b, I_c	Courants instantanés des phases statoriques.
R_s	La résistance statorique.
P	Nombre de paire de pôles.
C_{em}	Couple électromagnétique.
C_f	Couple de frottement.
J	Inertie totale des parties tournantes.
f	Coefficient de frottements visqueux.
C_{mec}	Couple mécanique.
$C_{aér}$	Couple aérodynamique.
M	Mutuelle inductance entre phases du stator.
L_d	Inductance propre d'axe d.
L_q	Inductance propre d'axe q.
C_p	Coefficient de puissance.
R_s	Résistance d'une phase statorique.
$\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$	Flux instantanés des phases statoriques.
θ	L'angle entre les axes triphasé et les axes biphasé.
$p(\theta)^{-1}$	Matrice de Park inverse.
$P(\theta)$	Matrice de PARK.
V_{red}	La tension redressée.
V_{ond}	La tension d'alimentation de l'onduleur.
L_f	L'inductance du filtre.
R_f	La résistance du filtre.
ρ	Densité de l'air.
R	Rayon du cercle.
V	Vitesse du vent (m/s).
$\Omega_{turbine}$	La vitesse de la turbine.
Ω_{mec}	La vitesse mécanique.
Ω_{ref}	La vitesse de référence de la turbine.
λ	Ration de vitesse.
β	L'angle de l'orientation de la pale.
k_i	Le gain intégral.
k_p	Le gain proportionnel.
ω_s	Pulsation des tensions statoriques.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau N°	Titre	Page
Tableau 3.1	Classification des turbines éoliennes	34

LISTE DES FIGURES

figures N°	Titre	Page
Figure 1.1	Les différentes classes des machines électriques	04
Figure 1.2	Classement des machines synchrones	05
Figure 1.3	Stator de la machine synchrone	07
Figure 1.4	rotor à aimant permanent de la machine synchrone	07
Figure 1.5	différentes configurations rotoriques de la MSAP	09
Figure 1.6	Fonctionnement génératrice d'une MSAP	10
Figure 1.7	Principe fonctionnement d'un moteur à aimant permanent	10
Figure 2.1	Modèle équivalent d'un enroulement de la MSAP	13
Figure 2.2	Différents couples qui agissent sur le rotor de la MSAP	16
Figure 2.3	Schéma équivalent de la MSAP dans le repère de Park (d,q)	17
Figure 2.4	Cadres de référence dans un circuit de 3 phases	17
Figure 2.5	simulation l'alimentation de la MSAP par réseau triphasé équilibré	20
Figure 2.6.a	Courants statoriques (isabc) de la MSAP	20
Figure 2.6.b	Courants statoriques (isq) de la MSAP	21
Figure 2.6.c	Courant statorique (isd) de la MSAP	21
Figure 2.6.d	Vitesse rotorique de la MSAP	22
Figure 2.6.e	Couple électromagnétique de la MSAP	22
Figure 2.7	Simulation alimentation de la MSAP par onduleur	23
Figure 2.8.a	Les courant statoriques(is abc) de la MSAP	24
Figure 2.8.b	Courant statorique (isq) de la MSAP	24
Figure 2.8.c	Courant statorique (isd) de la MSAP	25
Figure 2.8.d	La vitesse de rotation de la MSAP	25
Figure 2.8.e	Le couple électromagnétique de la MSAP	26
Figure 2.8.f	Angle de rotor de la MSAP	26
Figure 3.1	Conversion de l'énergie cinétique du vent.	28
Figure 3.2	Principaux composants d'un aérogénérateur.	30
Figure 3.3	Schéma de principe du rotor de Savonius	32
Figure 3.4	Schéma du rotor de Darrieus	32
Figure 3.5	Types d'éoliennes à axe horizontal	33
Figure 3.6	Régulation de puissance d'une éolienne en fonction du vent	35
Figure 3.7	Configuration d'une éolienne	36

Figure 3.8 : Tube de courant autour d'une éolienne	37
Figure 3.9 : Evolution du coefficient C_p en fonction de λ et β	39
Figure 3.10 : Coefficient de puissance en fonction de la vitesse normalisée λ	39
Figure 3.11 : Modèle de l'arbre et de la turbine éolienne	41
Figure 3.12 Schéma bloc de l'asservissement en utilisant un régulateur PI	42
Figure 3.13 : Synoptique de construction de vent	44
Figure 3.14 : Variation de la vitesse du vent	44
Figure 3.15 : Modèle de choix vitesse référence sous Matlab / Simulink	45
Figure 3.16 : Variation de la vitesse de référence	45
Figure 3.17 : Modèle de turbine PI sous Matlab / Simulink	46
Figure 3.18 : Allure de couple de la turbine	46
Figure 3.19 : Allure de la puissance mécanique	47
Figure 3.20 : Allure de Couple électromagnétique	47
Figure 3.21 : Allure de vitesse mécanique de la turbine	48
Figure 3.22 : Superposition entre la vitesse mécanique de la turbine et sa référence	48
Figure 3.23 : Schéma de principe de la commande vectorielle en puissance de la MSAP	49
Figure 3.24 : Schéma de la fonction de transfert d'un régulateur PI	49
Figure 3.25 : Schéma de régulation des courants I_d et I_q .	50
Figure 3.26 : Schéma de régulation de vitesse	51
Figure 3.27 : Schéma bloc de la commande MASP associée à un onduleur de tension	51
Figure 3.28 : Vitesse de rotation de la machine avec sa référence	52
Figure 3.29 : Courants statoriques (i_a, i_b, i_c) de la MSAP testée pour une référence de vitesse (1000 à 1200 tr/min)	53
Figure 3.30 : Courants statoriques (i_d, i_q) de la MSAP testée pour une référence de vitesse (1000 à 1200 tr/min)	53
Figure 3.31 : Couple électromagnétique de la MSAP	54
Figure 3.32 : Vitesse de rotation de la machine avec sa référence	55
Figure 3.33 : Courants statoriques(i_d, i_q) de la MSAP testée pour une référence de vitesse	55
Figure 3.34 : Couple électromagnétique de la MSAP ($C_r=20Nm$ à l'instant 0.5s)	56
Figure 3.35 : Courants statoriques (i_a, i_b, i_c) de la MSAP testée pour une référence de vitesse	56
Figure 3.36 : Schéma bloc de la commande MASP associée à une turbine éolienne	57
Figure 3.37 : Variation de la vitesse du vent	58
Figure 3.38 : Allure de couple de charge T_m	58
Figure 3.39 : Vitesse de rotation de la MSAP	59

Figure 3.40 : Couple électromagnétique de la MSAP	59
Figure 3.41 : Trois courants du stator de la MSAP	60
Figure 3.42 : Trois tensions du stator de la MSAP	60
Figure 3.43 : Superposition entre la puissance mécanique et la puissance électrique	61
Figure 3.44 : Puissance réactive à la sortie de la MSAP	61

TABLE DES MATIÈRES

<i>Introduction général</i>	
<i>Chapitre I : GÉNÉRALITÉ SUR LA MACHINE SYNCHRONE A AIMANT PERMANANT</i>	
<i>I. Introduction</i>	<i>03</i>
<i>I.2 Historique.....</i>	<i>03</i>
<i>I.3 Classement des machines synchrones.....</i>	<i>04</i>
<i>I.4 Machine synchrone à aimant permanent (MSAP).....</i>	<i>06</i>
<i>I.4.1 Constitution.....</i>	<i>06</i>
<i>I.5 Types des machine synchrone à aiment permanent</i>	<i>08</i>
<i>I.5.1 Machine Synchrone à aimant permanent en surface.....</i>	<i>08</i>
<i>I.5.2 Machine Synchrone à aimants permanents insérés.....</i>	<i>08</i>
<i>I.5.3 Machine Synchrone à aimants permanents enterrés.....</i>	<i>08</i>
<i>I.5.4 Machine Synchrone à aimants à concentration de flux</i>	<i>08</i>
<i>I.6. Fonctionnement de la machine synchrone à aimant permanent(MSAP)</i>	<i>09</i>
<i>I.6.1 fonctionnement en mode génératrice (GSAP)</i>	<i>09</i>
<i>I.6.1 fonctionnement en mode Moteur (MSAP)</i>	<i>10</i>
<i>I.7 Avantages et Inconvénients de la MSAP.....</i>	<i>11</i>
<i>I.7.1 Avantages de la MSAP</i>	<i>11</i>
<i>I.7.2 Inconvénients de la MSAP.....</i>	<i>11</i>
<i>I.8 Domaines d'application des MSAP</i>	<i>12</i>
<i>I.9 Conclusion.....</i>	<i>12</i>
<i>Chapitre II : MODELISATION ET SIMULATION DE LA MACHINE SYNCHRONE A AIMENT PERMANENT</i>	
<i>II.1 Introduction</i>	<i>13</i>
<i>II.2. Modèle de la Machine synchrone (alternateur)</i>	<i>13</i>
<i>II.3 Hypothèses simplificatrices</i>	<i>14</i>
<i>II.4 Modélisation de la machine synchrone à aimant permanant (MSAP).....</i>	<i>14</i>
<i>II.4.1 Modèle mathématique de MSAP</i>	<i>15</i>
<i>II.4.2 Equations magnétiques de la MSAP.....</i>	<i>15</i>
<i>II.4.3 Equation mécanique</i>	<i>16</i>
<i>II.4.4 Modèle diphasé de la MSAP dans le repère de Park</i>	<i>16</i>
<i>II.4.5 Equations générales de la MSAP dans le repère de Park (d-q)</i>	<i>17</i>
<i>II.4.5.1 Equation des tensions dans le repère de Park.....</i>	<i>18</i>

II.4.5.2 Equations des flux.....	18
II.4.5.3 Equation de la puissance	19
II.5. Simulation de la machine synchrone à aimant permanent	20
II.5.1 Alimentation par le réseau	20
II.5.2 Alimentation par un onduleur de tension	23
II.6 Conclusion	27
Chapitre III : COMMANDE DE LA MACHINE SYNCHRONE A AIMANT PERMANENT ASSOCIÉ A TURBINE ÉOLIENNE	
III.1 Introduction	28
III.2 Turbine éolienne	28
III.2.1 Constitution d'une éolienne.....	28
III.2.2 Utilisation des éoliennes.....	31
III.2.2.1 Systèmes isolés	31
III.2.2.2 Systèmes Hybrides.....	31
III.2.2.3 Systèmes Liés au Réseau.....	31
III.2.3 Types d'éoliennes	31
III.2.3.1 Eoliennes à Axe Vertical.....	31
III.2.3.2 Eoliennes à Axe Horizontal.....	33
III.2.4 Classification des turbines éoliennes.....	34
III.2.5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	34
III.2.5.1 Avantages.....	34
III.2.5.2 Inconvénients.....	34
III.3 La régulation de la puissance du vent.....	34
III.4 Modélisation de l'éolienne	35
III.4.1 Modèle mécanique	36
III.4.2 Modèle de la turbine	37
III.4.2.1 Modèle aérodynamique	37
III.4.2.2 La loi de Betz.....	37
III.4.2.3 Modèle du multiplicateur	40
III.4.2.4 Modèle de l'arbre.....	40
III.4.2.5 Détermination de la vitesse de référence.....	41
III.4.3 Régulation de la turbine.....	41
III.4.3.1 Régulateur PI.....	41
III.4.4 Système de contrôle de l'aérodynamique	42
III.5 Simulation de la turbine sous Matlab/simulink.....	43

<i>III.5.1 Modélisation et simulation du vent</i>	<i>43</i>
<i>III.5.2 Modélisation et simulation de la vitesse de référence de la turbine.....</i>	<i>44</i>
<i>III.5.3 Simulation du modèle globale de la turbine doté d'un régulateur PI.....</i>	<i>45</i>
<i>III.6 Commande vectoriel de la MSAP associé à turbine éolienne.....</i>	<i>49</i>
<i>III.6.1 Calcul des régulateurs</i>	<i>49</i>
<i>III.6.2 Synthèse de calcul du PI</i>	<i>50</i>
<i>III.7 Simulation de La MSAP</i>	<i>51</i>
<i>III.7.1 MSAP alimentée par un onduleur de tension (fonctionnement moteur)</i>	<i>51</i>
<i>III.7.2 MSAP alimentée associé par éolienne (fonctionnement génératrice)</i>	<i>57</i>
<i>III.8 Conclusion</i>	<i>62</i>
<i>Conclusion générale</i>	

ملخص

أدت المتطلبات المتزايدة للتكنولوجيا إلى استخدام آلات المتزامنة ذات المغناطيس الدائم بشكل متزايد خاصة في التطبيقات من حيث الزخم والقوة وأيضا في إنتاج الطاقة الكهربائية. لهذا السبب، تتناول هذه المذكرة نمذجة سلسلة تحويل طاقة الرياح بناءً على مولدات متزامنة ذات مغناطيس دائم. قمنا بعمل نموذج للمكونات المختلفة لسلسلة التحويل ثم يتم توصيلها معًا لتشكيل النموذج الكامل الذي يتم تنفيذه في محيط MATLAB. أتاحت نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها تحليل سلوك جهاز الرياح وقدمت معلومات يمكن أن تكون مفيدة في تنفيذ نظام التحكم والتحكم المناسب.

الكلمات الرئيسية : مولد متزامن بمغناطيس دائم، طاقة كهربائية، سلسلة تحويل، طاقة الرياح، محاكاة، تحكم.

Résumé

Les exigences de plus en plus pointues de la technologie ont fait que les machines à aimant permanent sont de plus en plus utilisées plus particulièrement dans des applications industrielles exigeantes en encombrement et en puissance et aussi dans la production de l'énergie électrique. Pour cette raison ce mémoire traite de la modélisation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base de génératrice synchrone à aimants permanents. Nous avons fait un modèle des différents constituants de la chaîne de conversion sont ensuite connectés entre eux afin de former le modèle complet qui est implémenté dans l'environnement MATLAB. Les résultats de simulation obtenus ont permis d'analyser le comportement du dispositif éolien et ont fournis des informations pouvant être utiles à la mise en œuvre d'un système de commande et de contrôle adéquat.

Mots clés : Génératrice synchrone à aimant permanent, énergie électrique, la chaîne de conversion, Eolienne, simulation, commande.

Abstract

The increasingly advanced requirements of the technology have meant that the magnet permanent synchronous machines are increasingly used more particularly in applications demanding in terms of space and power and also in the production of the electrical energy. For this reason, this paper deals with the modeling of a wind energy conversion chain based on synchronous generators with permanent magnets. We made a model of the different components of the conversion chain are then connected together to form the complete model that is implemented in the MATLAB environment. The simulation results obtained made it possible to analyze the behavior of the wind device and provided information that could be useful for the implementation of an adequate control and control system.

Key words: Permanent magnet Synchronous generator, electrical energy, conversion chain, Wind turbine, simulation, control.

INTRODUCTION GENERALE

Au cours des dernières années, les machines à aimants permanents sont devenues de plus en plus répandues dans une large gamme d'applications grâce aux progrès accrus dans le domaine des matériaux magnétiques à base de terres rares. En effet, les nouveaux aimants permanents ont permis d'améliorer la performance dynamique, le rendement et le facteur de puissance de ces machines par rapport aux machines traditionnelles. Les chaînes éoliennes, les véhicules électriques hybrides et l'aéronautique sont des domaines dans lesquels les machines à aimants permanents sont largement employées actuellement. Toute fois, les exigences liées à la sûreté de fonctionnement de ce type de machines prennent une large part dans les contraintes de leur mise en disposition.

Dans des applications à vitesse variable qui nécessitent des réponses précises malgré différents types de perturbations et incertitudes paramétriques, les contrôleurs linéaires classiques comme les PI et PID sont difficiles à régler face à un problème de type non linéaire et ont des performances qui peuvent être améliorées par des techniques de commande non linéaire. Les dernières années ont connu des progrès rapides de la commande des systèmes non linéaires. En particulier plusieurs techniques de linéarisation exacte par changement de coordonnées et bouclage ont été appliquées pour la commande des machines synchrones. Ces techniques nécessitent la bonne connaissance des paramètres des systèmes, ce qui n'est pas en général le cas pour les machines électriques.

Dans notre travail, nous allons nous intéresser à la machine synchrone à aimants permanents. Qui à partir d'un modèle de circuits se propose de simuler son fonctionnement en mode moteur et génératrice.

Dans le premier chapitre, à travers une étude de la MSAP, Nous présenterons la famille des machines électriques notamment la machine synchrone à aimants permanents, son utilisation, sa constitution, et son fonctionnement, passant par leurs avantages et inconvénients ainsi que les domaines d'applications de ce type des machines.

Le deuxième chapitre porte sur la modélisation et la simulation de la machine synchrone à aimant permanent le côté mise en équation, réalisé deux simulations l'une est l'alimentation directe de la MSAP aux réseaux et l'autre c'est l'alimentation à travers un onduleur de tension à deux niveaux à partir d'une source continue le mode moteur.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude de l'association de la machine synchrone à aimant permanent à la turbine dont le mode génératrice. On Commencera par un rappel sur les notions élémentaires du fonctionnement d'un système éolien et la modélisation d'aérogénérateur. Les zones de fonctionnement d'une éolienne et les systèmes de régulation de la vitesse sont

Introduction générale

également décrites. On clôturera ce chapitre par une simulation de la turbine connecté au MSAP le mode génératrice. Des résultats de simulations seront discutés et interprétés

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

CHAPITRE I
GÉNÉRALITÉ SUR
LA MACHINE
SYNCHRONNE A AIMANT
PERMANANT

I.1 Introduction

La machine synchrone est la machine la plus utilisée pour la production de l'énergie électrique ainsi que pour l'entraînement à vitesse variable des charges électriques. A cause de sa synchronisation avec le réseau, la machine synchrone présente un glissement nul, c'est-à-dire que la vitesse du champ tournant au stator égale la vitesse du rotor. Il existe plusieurs types des machines synchrones, parmi lesquelles, la machine synchrone à aimant permanent, le présent travail dans ce chapitre s'intéresse à l'étude de ce type de la machine.

I.2 Historique

L'augmentation constante de la demande d'énergie à travers le monde et les problèmes écologiques et environnementaux imposés par la nature ont donné naissance à un nouveau type d'énergie dite énergie propre, c'est l'énergie électrique.

Le 19^{ème} siècle fut une période importante dans l'histoire de l'électricité,

- *En 1821* le chimiste Danois Oersted découvre le phénomène de l'électromagnétisme, ensuite le physicien Michael Faraday construit un appareil qui produit une rotation électromagnétique ce qui lui a permis d'inventer le principe du moteur électrique.
- *En 1832* Andrés Marie Ampère réussit à réaliser une des premières machines à courant continu
- *En 1883* Nicolas Tesla inventa la première machine à induction.

C'est donc petit à petit que l'évolution de la machine électrique se construisit, mais ce processus d'évolution ne s'arrêtera pas ici ;

au milieu de 20^{ème} siècle, l'électronique de puissance pour la commande des machines électriques a connu une évolution rapide.

- *En 1960* l'avènement des thyristors, puis les G.T.O, I.G.B.T ,M.O.S...etc.
- *En 1970* l'apparition des microprocesseurs et aussi la découverte de nouveaux matériaux .

Les machines électriques se partagent en différentes classes dont on cite : les machines statiques et les machines tournantes, dans cette dernière on distingue deux familles essentielles des machines tournantes (machine à courant continu et la machine à courant alternatif) et dans les machines à courant alternatif on trouve les machines synchrones et les machines asynchrones.

La figure suivante présente une les différent types des machines électriques [1].

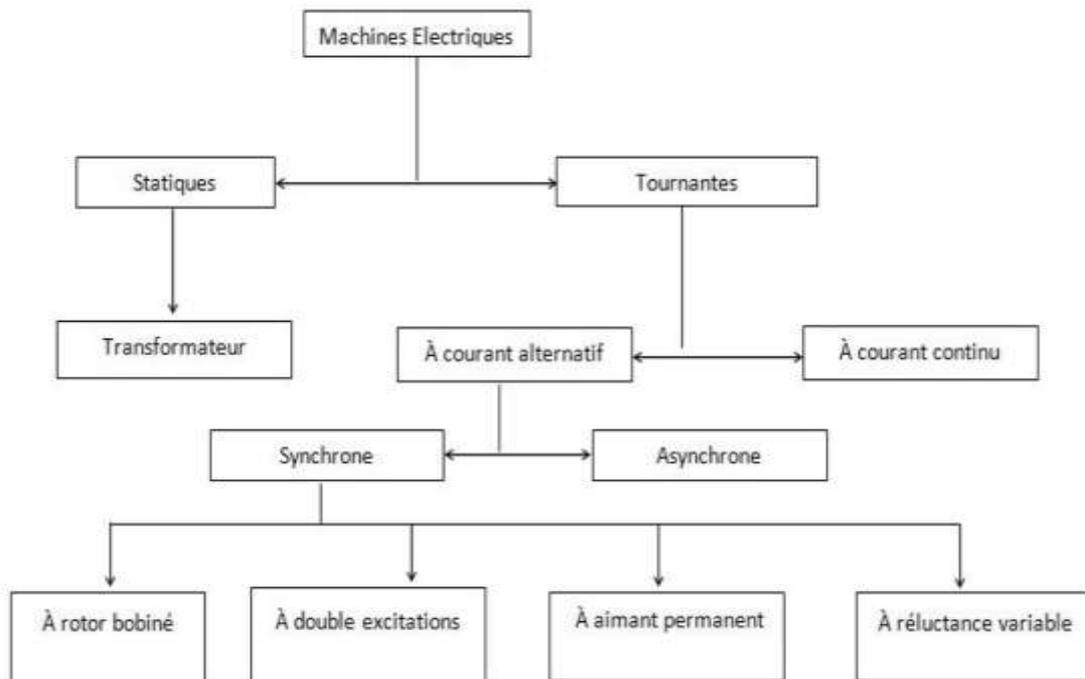


Figure 1.1 Les différentes classes des machines électriques

I.3 Classement des machines synchrones

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants permanents soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique [2].

Les rappels historiques concernant l'évolution des MSAP, nous établirons un classement exhaustif et illustré des machines synchrones.

Selon le principe de la classification de CHALMERS et de ses collègues, on peut arranger l'ensemble des machines synchrones comme l'indique la figure 1.2, les machines synchrones sont distinguées par la nature de leur excitation (bobinage, aimant permanent, etc.).

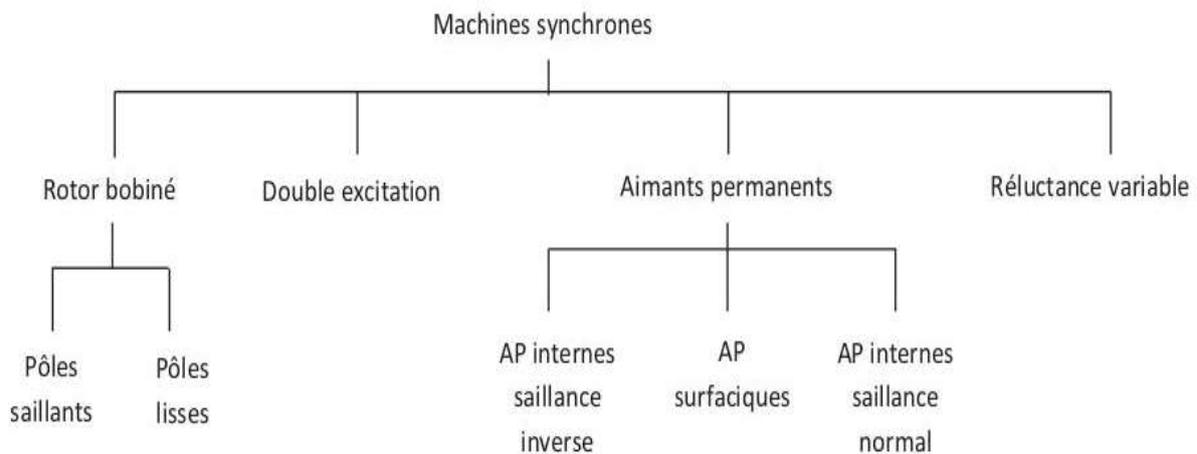


Figure 1.2 Classement des machines synchrones

➤ Machine synchrone à rotor bobiné (MSRB)

Ce genre de machines est constitué d'un rotor qui comporte des bobines.

On alimente ces bobines par des courants continus par l'intermédiaire des contacts glissant balais-bagues pour générer le flux inducteur dans l'entrefer.

On distingue deux types de machines synchrones à rotor bobiné :

- Les machines à pôles lisses
- Les machines à pôles saillants

la machine à pôles lisses a une inductance constante quelle que soit la position du rotor (rapport de saillance $\xi=1$), par contre la machine à pôles saillants a un entrefer variable suivant la position de pôles, ce qui entraîne une variation d'inductance [3].

➤ Machine synchrone à double excitation (MSDE)

Les MSDE tentent d'allier les avantages des MSAP (très bon rendement énergétique) à ceux des MSRB (facilité de fonctionnement à vitesse variable), le flux d'excitation dans ces machines est la somme d'un flux créé par des aimants permanents et d'un flux d'excitation créé par des bobines.

➤ Machine synchrone à aimants permanents (MSAP)

Dans les machines à aimants permanents, les aimants sont situés sur la partie tournante. Le stator est constitué d'un enroulement triphasé distribué sinusoïdalement. Concernant son fonctionnement il est basé sur le principe de rotation du champ magnétique en synchronisme avec le rotor d'où le nom des machines synchrones à aimant permanent (MSAP)

Dans la plupart des applications un onduleur est nécessaire pour avoir une alimentation avec une tension et une fréquence variable.

Dans ces systèmes le champ tournant rotorique peut être gardé en synchronisme avec la sortie de l'onduleur pour une vitesse allant de zéro à sa vitesse maximale [4].

➤ **Machine synchrone à reluctance variable(MSRV)**

Les générateurs à reluctances variables sont des machines mécaniquement robustes, ils ont de plus un bon rendement à toutes les vitesses et une large marge de variation de la vitesse de rotation [4]. Elles sont principalement destinées applications qui exigent des vitesses relativement grandes ou bien des entrainements lents avec un couple mécanique important. [5].

Notre travail consiste à étudier la machine synchrone à aimant permanent, et pour cela nous allons donner un aperçu sur les aimants permanents et présenter leurs caractéristiques.

I.4 Machine synchrone à aimant permanent(MSAP)

Les machines synchrones à aimant permanent, utilisées en mode moteurs ou génératrices, sont devenues de plus en plus attractive car elles répondent aux exigences de nouvelles technologies. L'intérêt pour ces machines est dû en grande partie à leur faible perte et à leur robustesse ainsi qu'à leur important couple massique.

I.4.1 Constitution

La machine synchrone est constituée de deux parties principales, la partie mobile dite rotor et une partie fixe dite stator.

- ❖ **Le stator** ou l'induit de la machine, il se compose de trois enroulements identiques parcourus par des trois courants alternatifs de même amplitude et décalés l'une par rapport aux autres de 120° dans l'espace et dans le temps, logés dans les encoches du circuit magnétique fixe [6].



Figure 1.3 : Stator de la machine synchrone

- ❖ **Le rotor** ou inducteur de la machine se compose d'un aimant permanent. Ce dernier présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotoriques, ainsi que la nécessité d'une source pour fournir le courant d'excitation.

Cependant, on ne peut pas contrôler l'amplitude du flux rotorique [7].



Figure 1.4 : rotor à aimant permanent de la machine synchrone

I.5 Types des machines synchrones à aimant permanent

Les machines à aimants permanents peuvent être construites avec plusieurs configurations rotoriques [8]. Leur classification globale selon la position de l'aimant permanent est la suivante:

- Aimants en surface
- Aimants insérés
- Aimants enterrés
- Aimants à concentration de flux

I.5.1 Machine Synchrone à aimant permanent en surface

Pour ces types de machines, les aimants sont placés sur le rotor, ils sont aimantés radialement, comme montré sur la figure (1.5.a). Cette configuration du rotor est la plus utilisée. Le principal avantage de ce type sa simplicité de commande, son faible coût de fabrication par rapport aux autres.

L'inconvénient est l'exposition des aimants permanents aux champs démagnétisant. De plus, les aimants sont soumis à des forces centrifuges qui peuvent causer leur détachement du rotor [9] [10].

I.5.2 Machine Synchrone à aimants permanents insérés

Comme les machines avec aimants en surface, les aimants du type insérés sont aussi montés sur la surface du rotor. Toutefois, les ouvertures entre les aimants sont partiellement remplies avec le fer, comme montré sur la figure (1.5.b). Le fer entre les aimants permanents crée une saillance et donne un couple réactant en plus du couple des aimants. La réactance synchrone de l'axe q est légèrement supérieure à celle dans l'axe d [9] [10].

I.5.3 Machine Synchrone à aimants permanents enterrés

Les machines à aimants enterrés sont des machines avec des aimants intégrés dans le rotor figure (1.5.c) et aimantés radialement. Du fait que la surface du pôle magnétique est plus petite que celle du rotor, l'induction dans l'entrefer est plus faible que l'induction dans l'aimant. La réactance synchrone dans l'axe d est plus petite que celle de l'axe q .

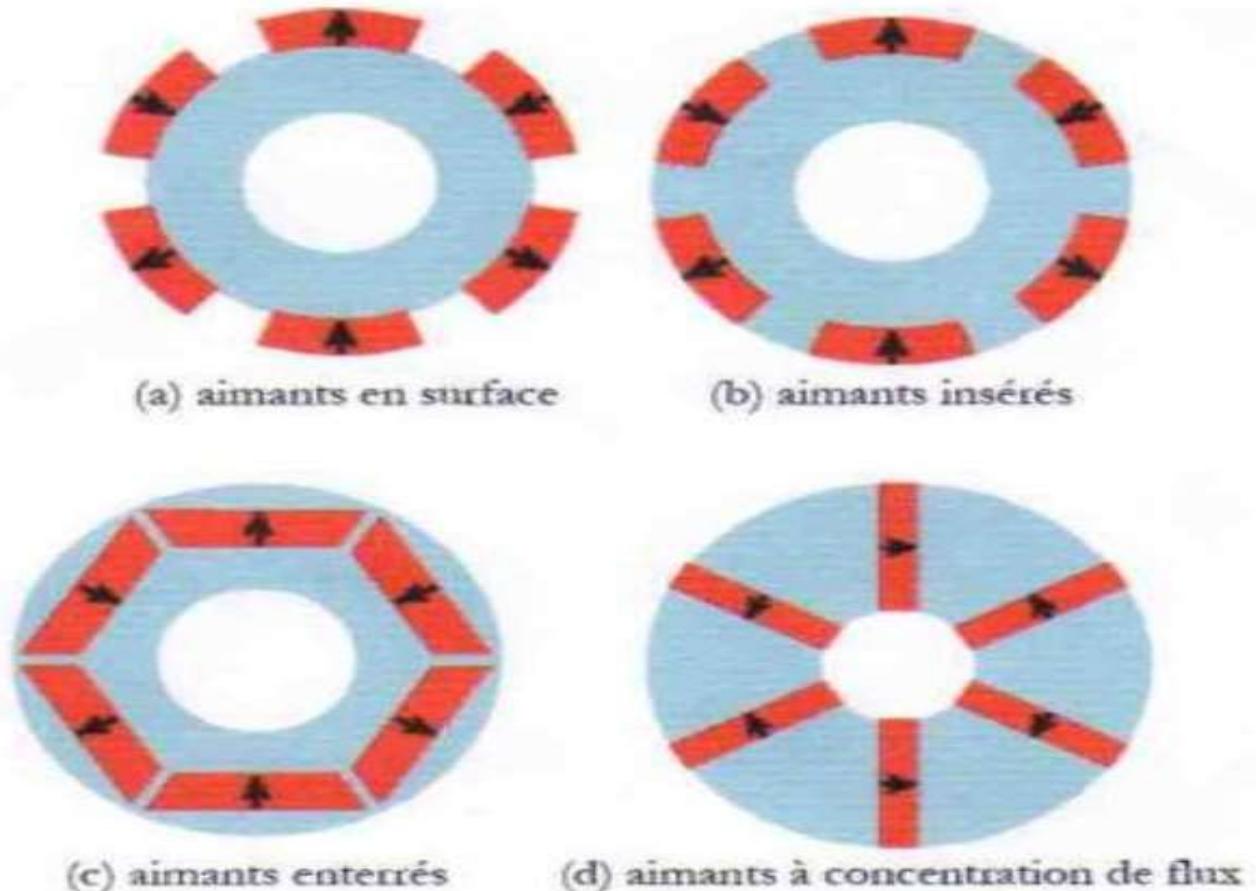
Les aimants dans cette configuration sont très bien protégés contre les forces centrifuges. Cette configuration du rotor est recommandée pour les applications à grandes vitesses [9] [10].

I.5.4 Machine Synchrone à aimants à concentration de flux

Dans ce type, les aimants sont aimantés dans le sens de la circonférence figure (1.5.d). Les pôles magnétiques se forment alors au niveau des parties ferromagnétiques du rotor par concentration de

flux provenant des aimants permanents. L'avantage de cette configuration par rapport aux autres est la possibilité de concentrer le flux générés par les aimants permanents dans le rotor et d'obtenir ainsi une induction plus forte dans l'entrefer. Comme les machines à aimants permanents intérieurs, les aimants permanents de cette dernière sont aussi bien protégés contre la désaimantation et les contraintes mécaniques. La réactance synchrone sur l'axe- q est plus grande que celle de l'axe d [9] [10].

Figure 1.5 : différentes configurations rotoriques de la MSAP



I.6 Fonctionnement de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP)

La machine synchrone à aimant permanent est une machine réversible donc elle peut fonctionner en deux modes (mode génératrice et mode moteur) [8].

I.6.1 Fonctionnement en mode génératrice (GSAP)

Les alternateurs à base des machines synchrones sont la source primaire de toute énergie électrique. Entraînées par des turbines hydrauliques, à vapeur ou éoliennes, ces machines constituent les plus gros convertisseurs d'énergie au monde. Elles transforment l'énergie mécanique en énergie électrique avec des puissances allant jusqu'à 1500 MW.

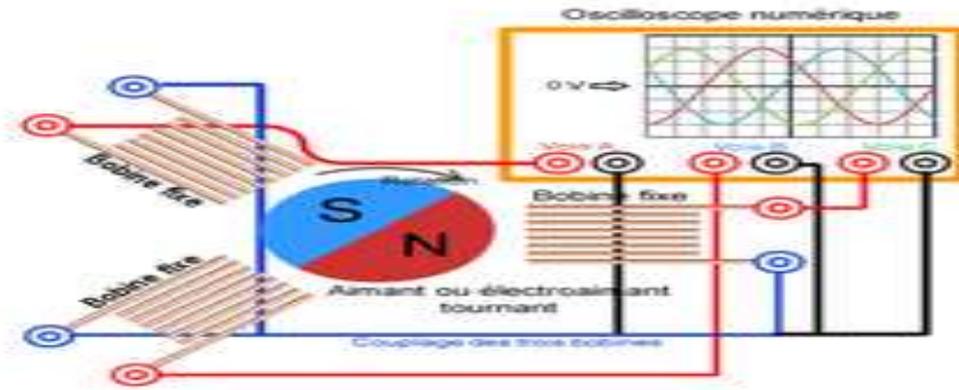


Figure 1.6 : Fonctionnement génératrice d'une MSAP

L'inducteur de la génératrice synchrone, entraîné mécaniquement, crée un champ à répartition spatiale variable dans les bobinages statoriques. Les forces-électro-motrices (f-é-m) dans ces bobinages provoquent la circulation des courants induits qui créent à leur tour un champ statorique dans l'entrefer qui tourne à la même vitesse que celui de champ inducteur [11].

I.6.2 Fonctionnement en mode Moteur (MSAP)

Parmi les moteurs à courant alternatif utilisés dans les entraînements, le moteur synchrone à aimants permanents reste un bon candidat. Son choix devient attractif et concurrent celui des moteurs asynchrones grâce à l'évolution des aimants permanents et les progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance.

Il permet donc une conversion électromécanique de l'énergie. Le stator de celui-ci est alimenté par un réseau triphasé. Il produit ainsi un champ tournant qui entraîne le rotor. La vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de synchronisme. Elle est donc directement proportionnelle à la fréquence d'alimentation du stator [11].

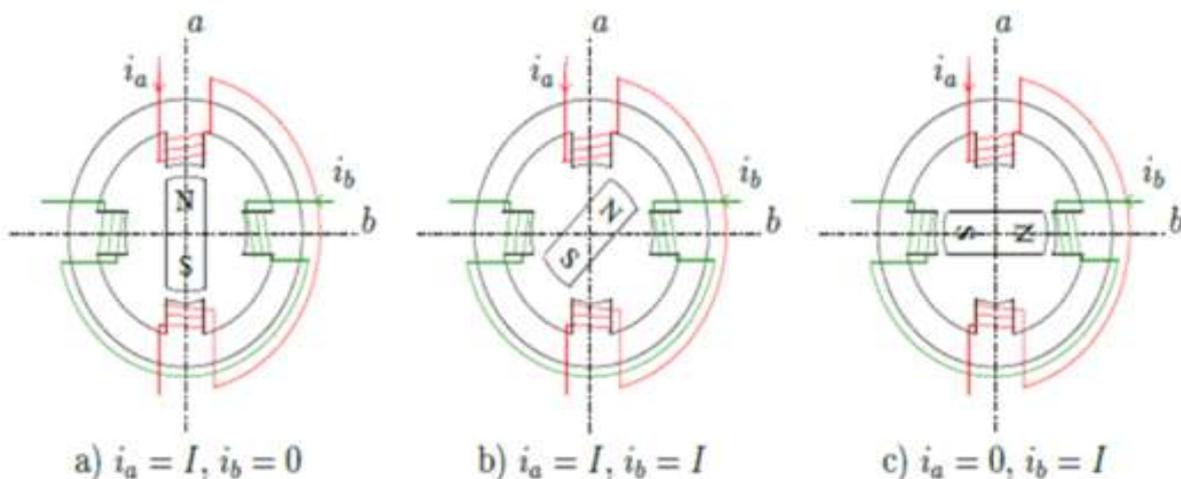


Figure 1.7 : Principe fonctionnement d'un moteur à aimant permanent

I.7 Avantages et Inconvénients de la MSAP

La MSAP à plusieurs avantages mais aussi elle a quelques inconvénients

I.7.1 Avantages de la MSAP

- L'absence d'enroulement rotorique annule les pertes joules au niveau du rotor ;
- La densité de flux, relativement élevée dans l'entrefer, assure une très bonne performance dynamique.
- Grande fiabilité.
- Robustesse incontestée par rapport au moteur à courant continu.
- Fonctionnement à très haute vitesses
- Très bon rendement et un facteur de puissance élevé (proche de l'unité)
- Construction et maintenance plus simple.
- Le couple volumique et la puissance massique importante permettent une meilleure compacité.
- Possibilité de supporter des surcharges transitoires importantes et un bon comportement dynamique en accélération et en freinage.
- L'absence des collecteurs et des balais simplifie la construction et l'entretien.

I.7.2 Inconvénients de la MSAP

- Coût élevé (à cause du prix des aimants) ;
- Problème de tenue en température des aimants ;
- Risque de démagnétisation irréversible des aimants par la réaction d'induit.
- Impossibilité de régler l'excitation ;
- Pour atteindre des vitesses élevées, il est nécessaire d'augmenter le courant statorique afin de démagnétiser la machine. Ceci entraînera inévitablement une augmentation des pertes statoriques par effet Joule ;

- La non-régulation de ce flux ne permet pas une souplesse de contrôle sur une très large plage de vitesse ;
- Influence des vibrations et des chocs sur la structure de la machine ;
- Risque de démagnétisation irréversible des aimants par la réaction d'induit.

I.8 Domaines d'application des MSAP [10] [11]

- Les machines synchrones à aimants permanents peuvent être utilisées dans une large gamme de puissance, allant de centaines de Watts (servomoteurs) à plusieurs méga Watts ;
- Elles peuvent être aussi utilisé aux faibles puissances ($P < 600W$), ou on peut les trouver dans des équipements de technologie de l'information (DVD driver), les équipements de soins médicaux et de santé, les servomoteurs.
- Dans les applications aux moyennes puissances ($500W < P < 100kW$), ainsi que dans les véhicules électriques, les machines-outils et les applications robotiques.
- Applications aux fortes puissances ($P < 100kW$) : les propulsions des véhicules électriques, la propulsion des sous-marins, la production d'électricité.
- Le domaine d'emploi de MSAP à l'heure actuelle est de quelques dizaines de Kilowatt à cause des caractéristiques magnétique des aimants qui peuvent être perdu en dépassant les limites de fonctionnement.

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude générale sur la machines synchrone à aimant permanent en se basant sur les éléments fondamentaux qui constituent la machine et les différentes structures des aimants permanents, nous avons aussi discuté les avantages et les inconvénients ainsi que les domaines d'applications de la MSAP.

CHAPITRE II
MODÉLISATION ET
SIMULATION
DE LA MACHINE
SYNCHRONNE A AIMANT
PERMANENT

II.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude de la modélisation et la simulation d'une machine synchrone à aimant permanent dont le fonctionnement moteur. Dans ce contexte, une modélisation et simulation de la MSAP en utilisant le model de Park seront présentés. La machine est alimentée directement au réseau en premier cas, et par l'intermédiaire d'un onduleur de tension à deux niveaux dans le deuxième cas.

II.2 Modèle de la Machine synchrone (alternateur)

La liaison qui relie entre la pulsation ω_g du champ magnétique tournant et la vitesse de rotation est donnée par [1]:

$$\Omega_s = \frac{\omega_g}{p} \quad (\text{II.1})$$

Avec : $\omega_g = 2\pi \cdot f$

Ou : f : est la fréquence de courant alternatif qui correspondant au fréquence du réseau (50Hz).

L'enroulement statorique sera influencé par un champ magnétique tournant prend un emplacement à l'entrefer en créons une force électromotrice $e(t)$ de valeur efficace E donnée par [2] :

$$E = k \cdot N \cdot \varphi \cdot f \quad (\text{II.2})$$

Avec : k : Le coefficient de Kapp.

N : Nombre de conducteurs d'une phase de la machine.

φ : Flux maximum en weber pour une phase.

La Figure 2.1 montre le modèle équivalent d'un enroulement du stator de la génératrice synchrone :

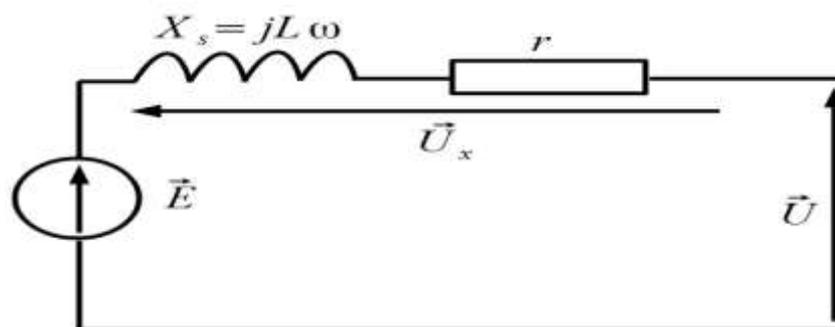


Figure 2.1 Modèle équivalent d'un enroulement de la MS

e_g : F.é.m. à vide en volt.

U : Tension aux bornes d'un enroulement de la machine en volt.

R_g : Résistance de l'enroulement en ohm.

L_g : L'inductance synchrone en henry.

D'après le schéma de la Figure II.1 on trouve selon la loi des mailles :

$$e_g = U + L_g \cdot \frac{di_g}{dt} + R_g \cdot i_g \quad (\text{II.3})$$

Dans le même modèle simplifié l'équation de la partie mécanique sans l'apparition du frottement s'écrit comme suit :

$$J_{ds} \frac{d\Omega_s}{dt} = T_d - T_{em} \quad (\text{II.4})$$

D'où J_{ds} : L'Inertie totale de générateur synchrone.

Ω_s : La vitesse de rotation.

T_d : Le couple mécanique sur l'arbre.

T_{em} : Le couple électromagnétique.

II.3 Hypothèses simplificatrices

Pour la modélisation de la machine synchrone à aimant permanent nous respectons les hypothèses suivantes [3] :

- ❖ Le circuit magnétique de la machine n'est pas saturé.
- ❖ Les f.m.m sont réparties sinusoïdalement dans l'entrefer de la machine.
- ❖ L'effet de la température sur les résistances est négligeable.
- ❖ On ne tient pas compte de l'hystérésis et des courants de Foucault dans les parties magnétiques.
- ❖ L'effet de Peau qui augmente les résistances et réduit les inductances est négligeable.
- ❖ L'entrefer est d'épaisseur uniforme.

II.4 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP)

Les machines à aimant permanent possède un grand nombre des pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables par rapport aux autres. Le couplage de cette machine avec l'électronique de puissance permet de contrôler sa vitesse de rotation ainsi que la tension d'alimentation.

II.4.1 Modèle mathématique de MSAP

L'équation de la tension statorique de la MASP est donnée par la formule suivante [4] :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d[\varphi_s]}{dt} \quad (\text{II.5})$$

Où : $[V_s] = [V_a \ V_b \ V_c]^T$: Vecteur tensions statoriques,

$[i_s] = [i_a \ i_b \ i_c]^T$: Vecteur courants statoriques,

$[\varphi_s] = [\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c]^T$: Vecteur flux statoriques,

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} : \text{Matrice résistance du stator}$$

II.4.2 Equations magnétiques de la MSAP

L'équation magnétique du flux est donnée par :

$$[\varphi_s] = [L_s][i_s] + [\varphi_{f \ abc}] \quad (\text{II.6})$$

Où :

$[\varphi_s] = [\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c]^T$: Vecteur flux statoriques,

$[i_s] = [i_a \ i_b \ i_c]^T$: Vecteur courants statoriques,

$[\varphi_{f \ abc}] = [\varphi_{fa} \ \varphi_{fb} \ \varphi_{fc}]^T$: Vecteur flux créé par l'aimant à travers l'enroulement statorique.

La matrice $[L_s]$ est une matrice carrée qui contient deux termes :

- ✓ Les termes constants regroupés dans $[L_{s0}]$
- ✓ les termes variables dépendant de (θ) sont regroupés dans $[L_{s2}(\theta)]$.

Dans le cas général, La matrice $[L_s]$ se met sous la forme :

$$[L_s] = [L_{s0}] + [L_{s2}(\theta)] \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$$[L_{s0}(\theta)] = \begin{bmatrix} L_{s0} & M_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & L_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & M_{s0} & L_{s0} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Et

$$[L_{s2}(\theta)] = \begin{bmatrix} \cos(2\theta) & \cos2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos2\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos2\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(2\theta) \\ \cos2\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(2\theta) & \cos2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Où : M_{s0} : Inductance mutuelle entre deux phases statoriques,

L_{s0} : Inductance propre d'une phase statorique,

θ : Caractérise la position angulaire du rotor par rapport au stator.

II.4.3 Equation mécanique

L'équation mécanique qui décrivant la dynamique du rotor de la machine est s'exprimée par :

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - f_c \omega_r \quad (\text{II.10})$$

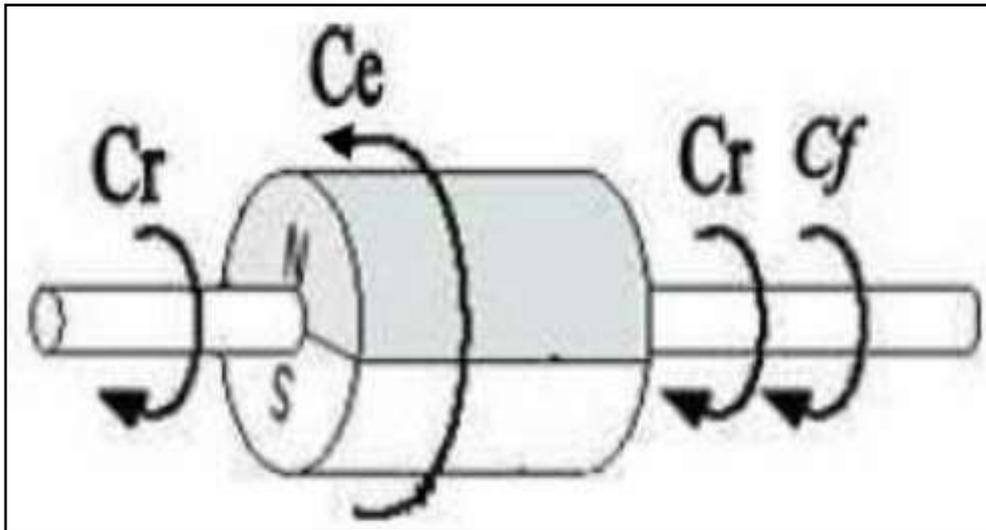


Figure 2.2 Différents couples qui agissent sur le rotor de la MSAP

L'analyse des équations précédentes est un peu difficile vu le grand nombre de coefficients variables, pour cette raison on utilise la transformation de Park mathématiques qui permettent de décrire le comportement du moteur à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants [5].

II.4.4 Modèle diphasé de la MSAP dans le repère de Park [6]

Le modèle diphasé de la MSAP s'effectue par une transformation du repère triphasé réel en un repère diphasé fictive (d, q). Le repère (d,q) peut être fixé au stator, au rotor ou au champ tournant selon l'objectif de l'application.

La Figure (2.3) présente la MSAP dans le modèle de Park dont le repère (oa) est fixe et le repère (d,q) tourne avec la vitesse de synchronisme ω_s .

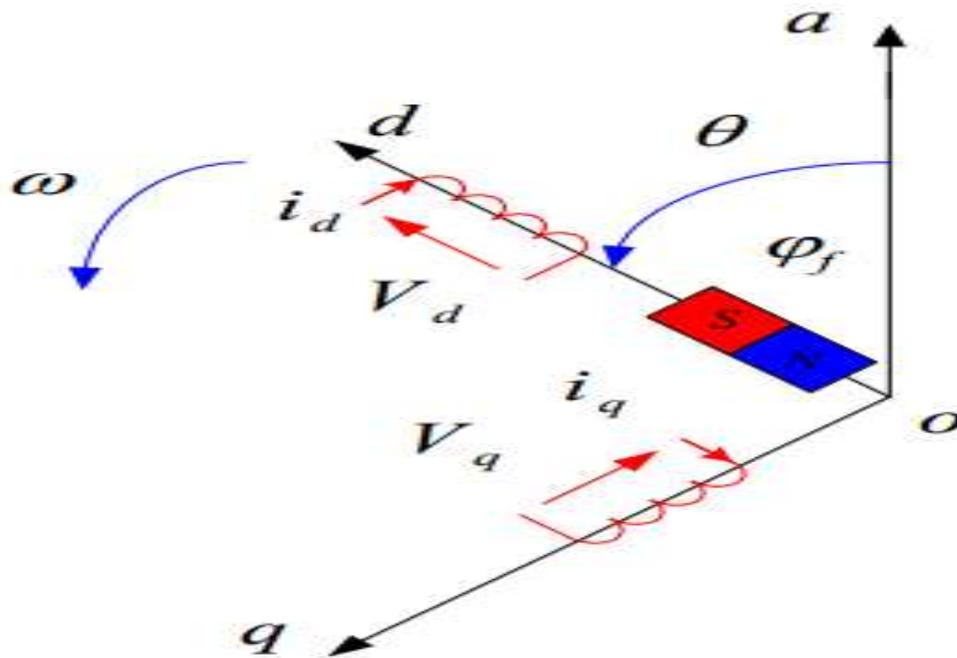


Figure 2.3 Schéma équivalent de la MSAP dans le repère de Park (d,q)

II.4.5 Equations générales de la MSAP dans le repère de Park (d-q)

Pour simuler la MSAP dans MATLAB/SIMULINK le modèle de Park est nécessaire (voir annexe A) En transformant le système (a, b, c) dans le système d-q. Cette transformation permet de simplifier les équations électriques et réduire le temps et les dépendances de position sont supprimés figure (2.4) [5][4].

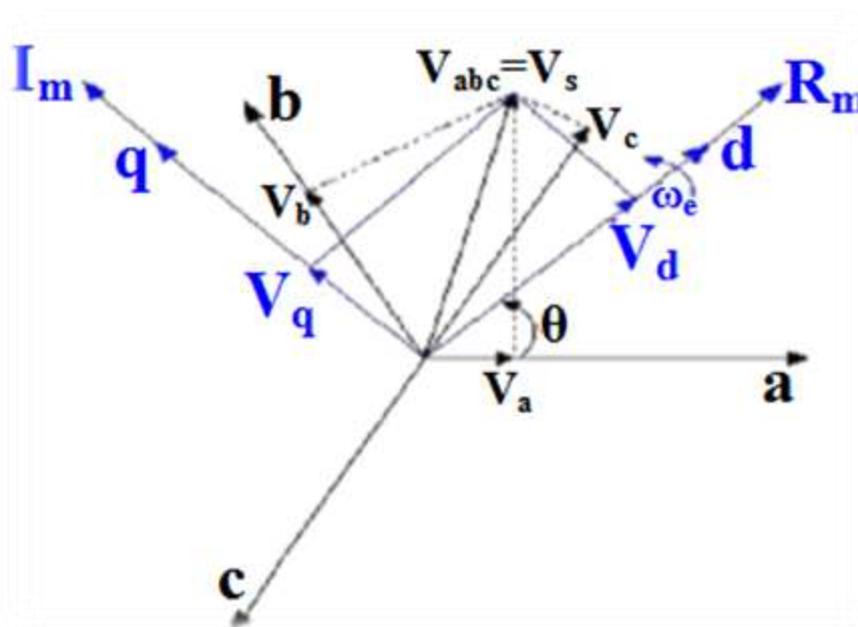


Figure 2.4 Cadres de référence dans un circuit de 3 phases

II.4.5.1 Equation des tensions dans le repère de Park

$$V_d = R_s \cdot I_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - \omega_e \cdot \varphi_q \quad (\text{II.11})$$

$$V_q = R_s \cdot I_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + \omega_e \cdot \varphi_d \quad (\text{II.12})$$

Avec :

V_d, V_q : Tension statoriques du repère de Park.

I_d, I_q : Courants statoriques du repère de Park.

R_s : Résistance statorique.

φ_d, φ_q : Flux de stator selon les axes d-q.

ω_e : Vitesse électrique en rad/sec.

II.4.5.2 Equations des flux

Le flux est présenté dans l'équation (II.13) et (II.14) :

$$\varphi_d = L_d \cdot I_d + \varphi_f \quad (\text{II.13})$$

$$\varphi_q = L_q \cdot I_q \quad (\text{II.14})$$

Avec : L_d, L_q : Inductance équivalente d'induit sur l'axe d-q.

φ_f : Flux des aimants.

En remplaçant les expressions des flux φ_d et φ_q dans le système (II.15) nous obtenons :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \\ V_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega (L_d i_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

Le couple électromagnétique est exprimé par la dérivée partielle de l'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor comme suit :

$$C_{em} = \frac{d\omega_e}{d\theta_{geo}} = p \frac{d\omega_e}{d\theta} \quad (\text{II.16})$$

En modèle de Park, l'expression de la puissance transmise est la suivante :

$$P(t) = \frac{3}{2} (V_d i_d + V_q i_q) \quad (\text{II.17})$$

En remplaçant V_d, V_q par leurs expressions on aura donc :

$$P(t) = \frac{3}{2} \left[R_s (i_d^2 + i_q^2) + \left(\frac{d\varphi_d}{dt} i_d + \frac{d\varphi_q}{dt} i_q \right) + \frac{d\theta}{dt} (\varphi_d i_q - \varphi_q i_d) \right] \quad (\text{II.18})$$

Où :

- $\frac{3}{2} R_s (i_d^2 + i_q^2)$ Qui représente la puissance dissipée en pertes Joules dans les enroulements du stator,
- $\left(\frac{d\varphi_d}{dt} i_d + \frac{d\varphi_q}{dt} i_q \right)$ Qui représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée dans les enroulements du stator,
- $(\varphi_d i_q - \varphi_q i_d)$ Qui représente la puissance électromagnétique.

Sachant que :

$$P_e = C_{em} \omega_r \quad (\text{II.19})$$

On obtient alors :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p (\varphi_d i_q - \varphi_q i_d) \quad (\text{II.20})$$

L'expression du couple électromagnétique en fonction des courants (i_d , i_q) est comme suit :

$$C_e = \frac{3}{2} p [(L_d - L_q) i_d + i_q \varphi_f] \quad (\text{II.21})$$

II.4.5.3 Equation de la puissance

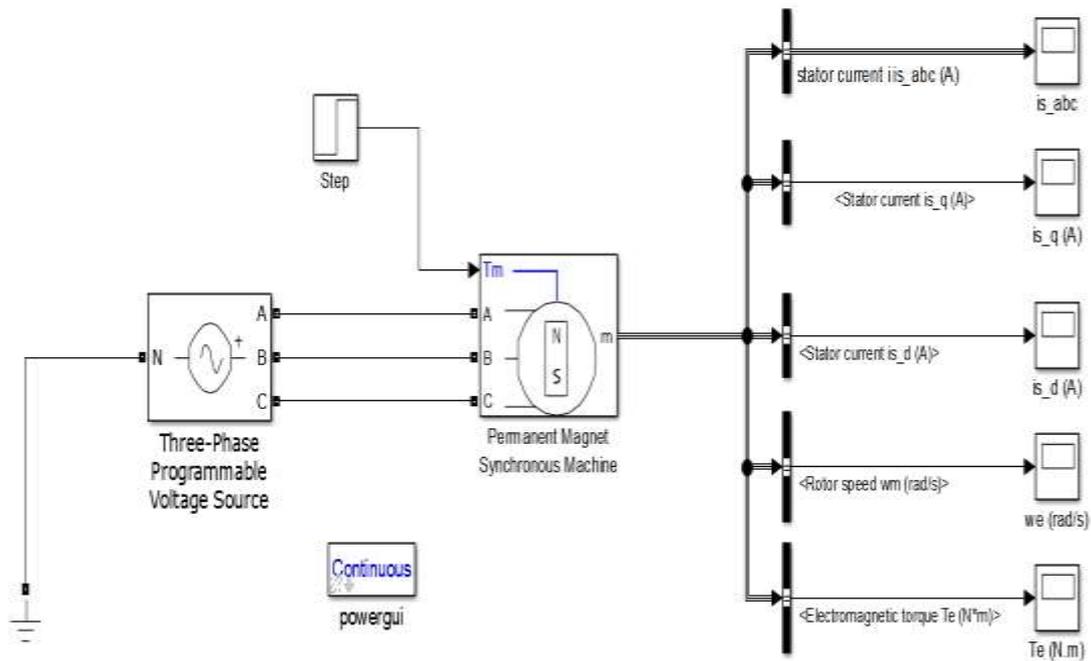
L'équation de la puissance active et réactive est présentée respectivement dans les deux équations (II.22) et (II.23) comme suit [4][5] :

$$P = V_d \cdot I_d + V_q \cdot I_q \quad (\text{II.22})$$

$$Q = V_q \cdot I_d - V_d \cdot I_q \quad (\text{II.23})$$

II.5 Simulation de la machine synchrone à aimant permanent

II.5.1 Alimentation par le réseau



alimentation directe par le réseau

Figure 2.5 : simulation l'alimentation de la MSAP par réseau triphasé équilibré

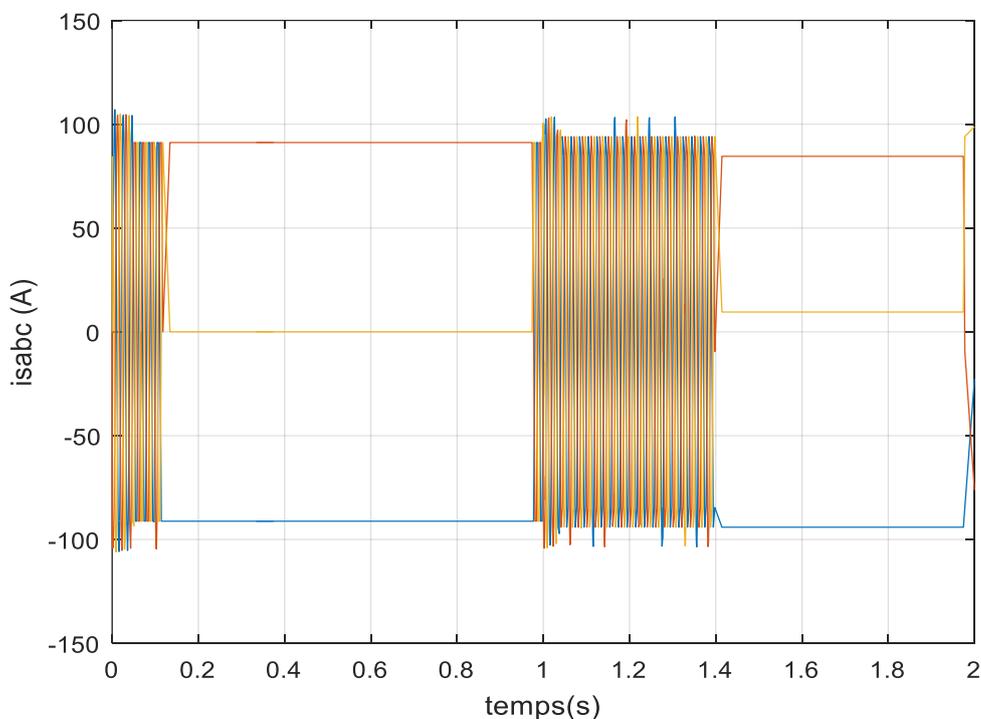


Figure 2.6.a : Courants statoriques (isabc) de la MSAP

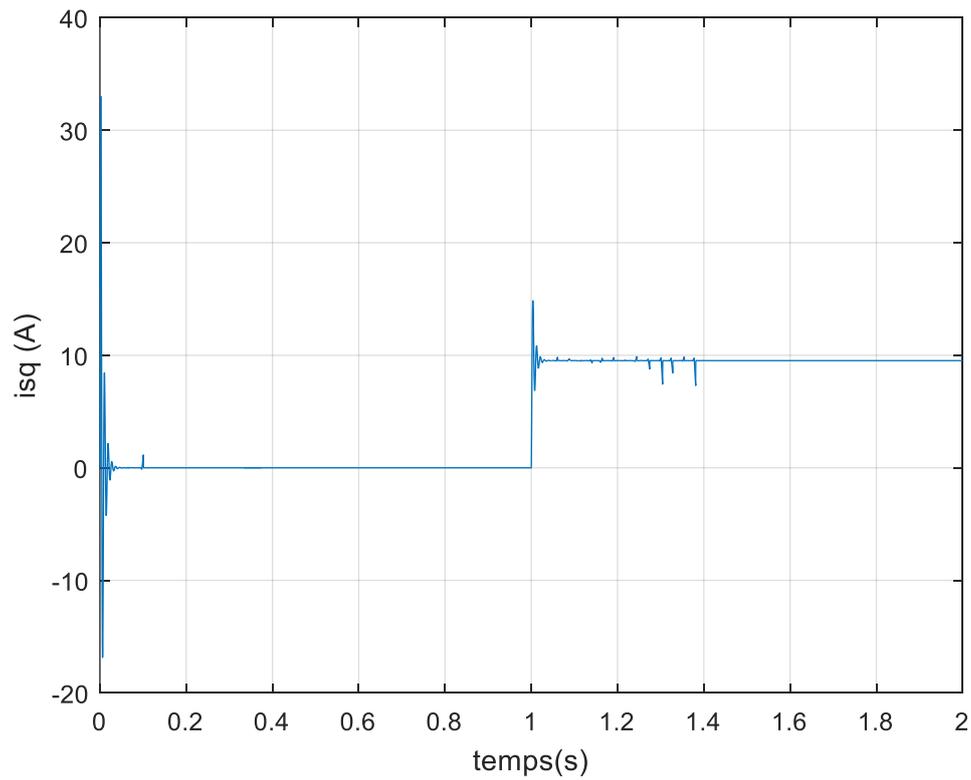


Figure 2.6.b : Courants statoriques (i_{sq}) de la MSAP

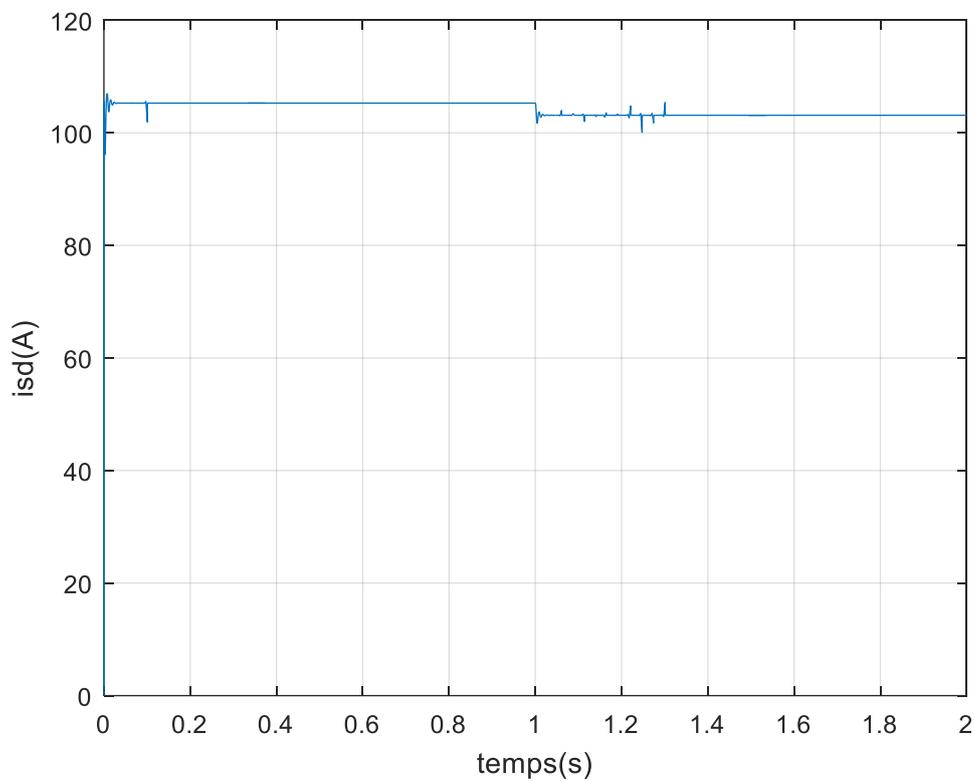


Figure 2.6.c : Courant statorique (i_{sd}) de la MSAP

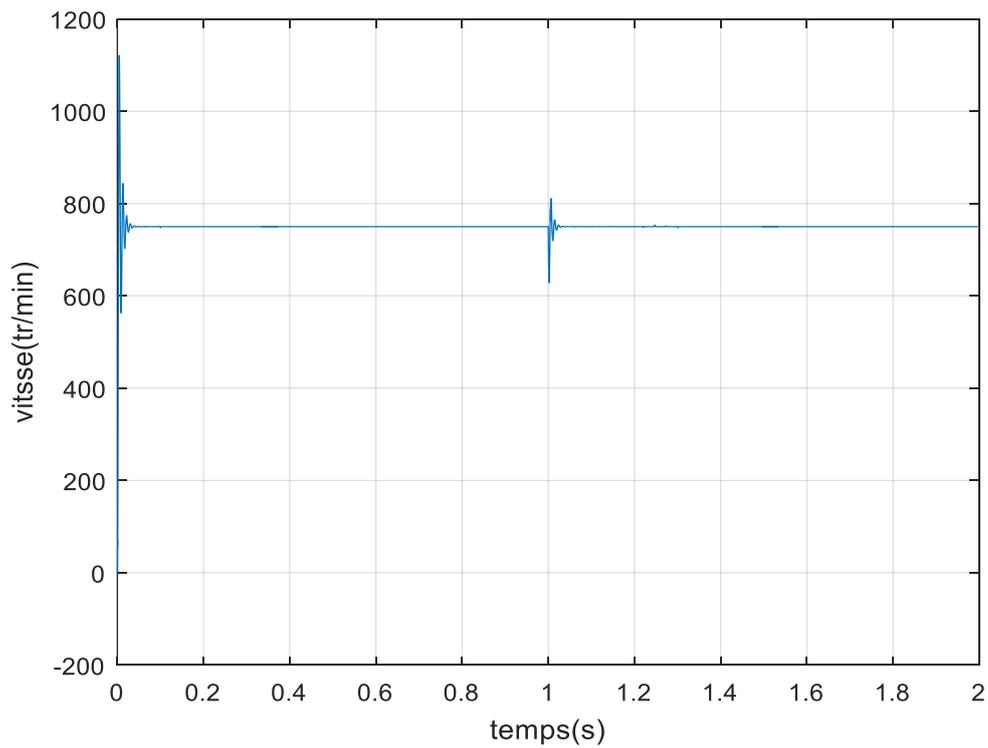


Figure 2.6.d : Vitesse rotorique de la MSAP

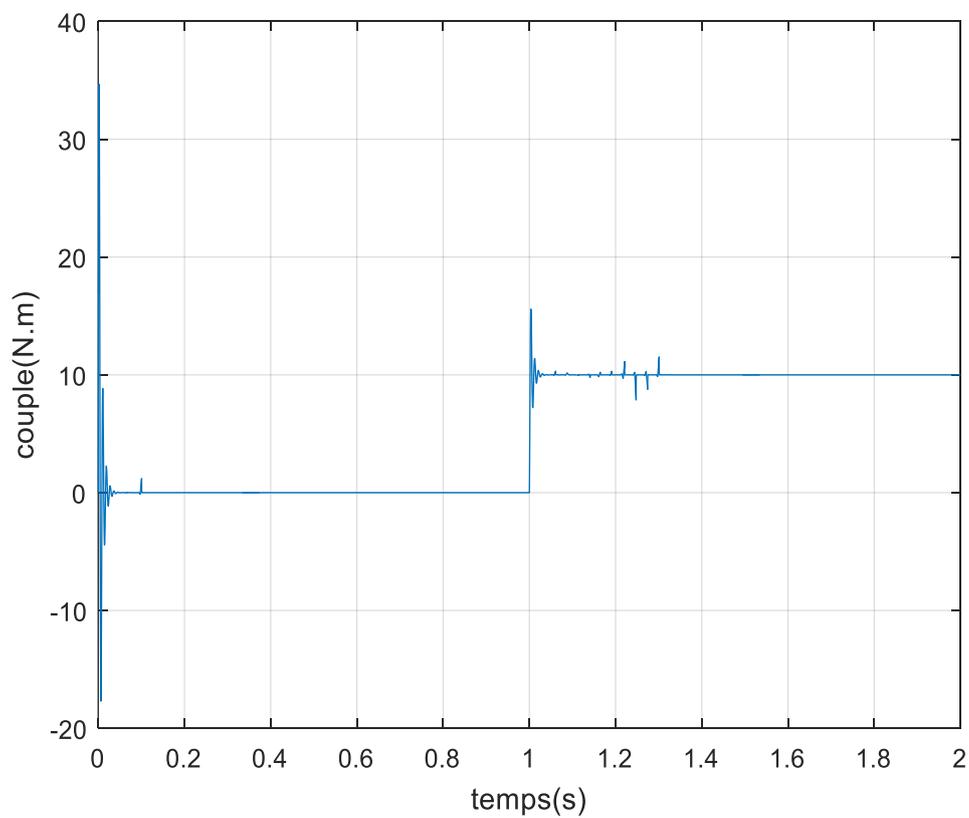


Figure 2.6.e : Couple électromagnétique de la MSAP

Interprétation des résultats

Les figures 2.6 : a,b,c,d illustrent les résultats de la simulation de la MSAP, en premier temps pour un démarrage à vide ($C_r=0$) sous une alimentation de tension $U=400V$ et de fréquence $50 Hz$. Et dans le deuxième temps on applique un couple résistant de $10 N.m$ à l'instant $t = 1s$. Pendant le régime transitoire, la vitesse est fortement pulsatoire, présentant au premier instant de démarrage des battements importants, et atteint sa valeur nominale de $750tr/min$ qui correspond à un nombre de pair de pôles égale à 4.

L'allure de la courbe du couple présente au démarrage des battements importants dans un intervalle de temps court, puis se stabilisé à zéro puisque la machine est à vide, et pour le i_q au début de démarrage on voit des pics de courant assez important démarrage, ensuite ils se stabilisent à leurs valeurs correspond au valeur du couple de charge de $10Nm$ après un temps $t= 1s$

On remarque ainsi que l'allures des courants i_{sabc} et i_d , une variation au début des courants pour un régime transitoire puis ils se stabilisent au régime permanent.

Ces résultats montrent bien le fort couplage existant entre ces différentes variables indiquant le caractère non linéaire de la MSAP.

II.5.2 Alimentation par un onduleur de tension

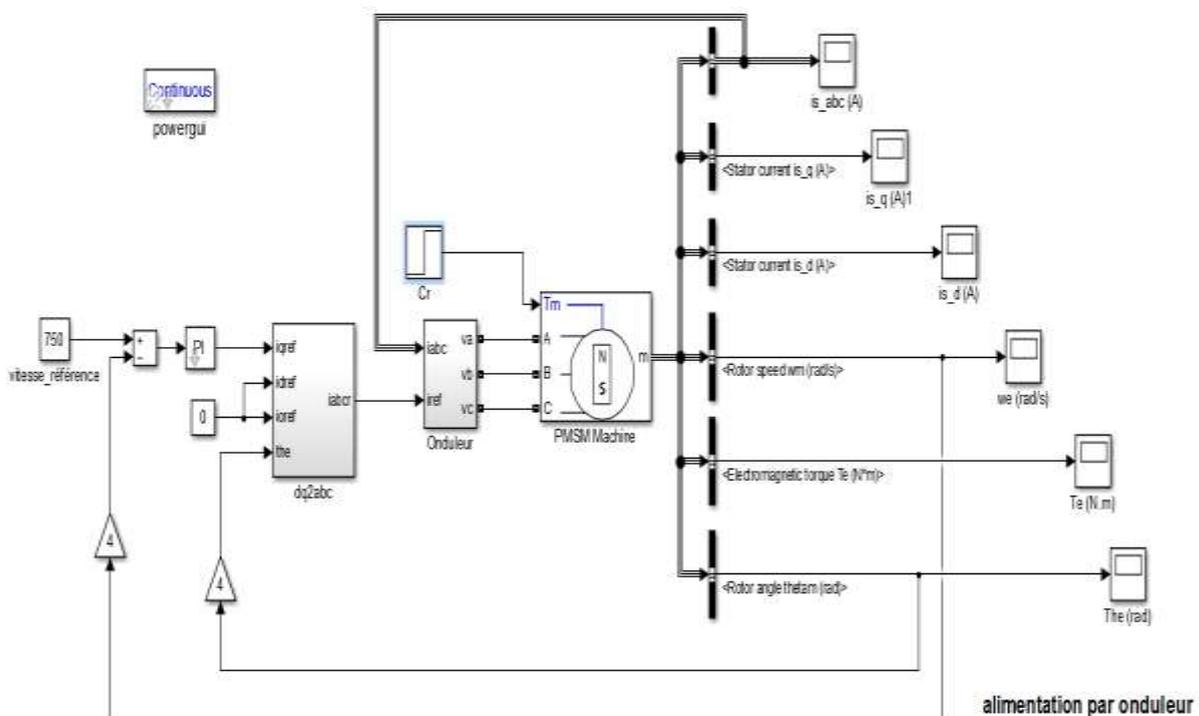


Figure 2.7 : Simulation alimentation de la MSAP par onduleur

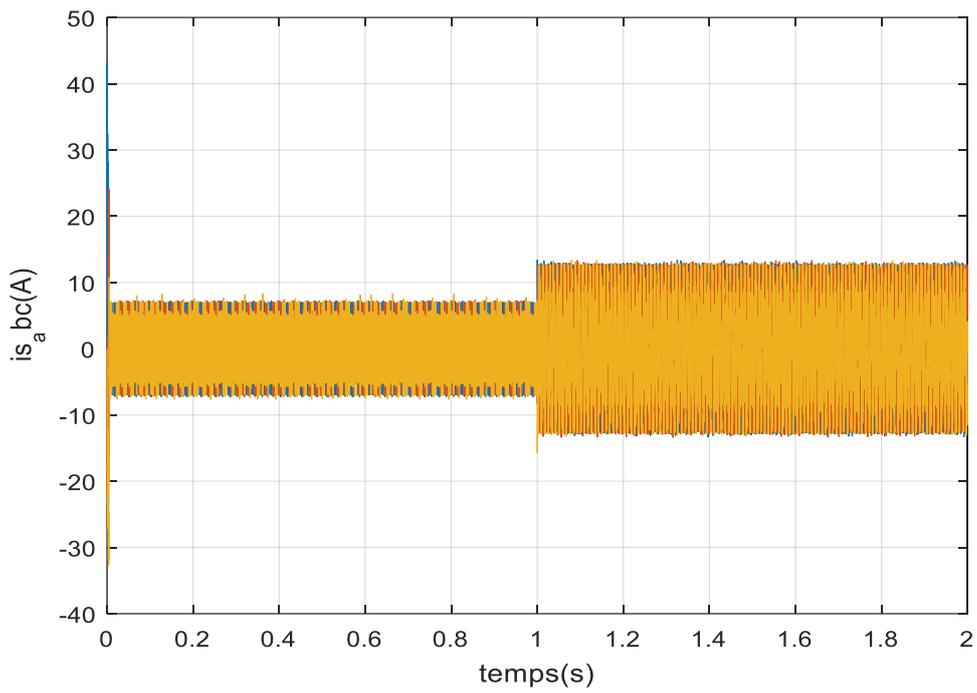


Figure 2.8.a : Les courant statoriques($i_s abc$) de la MSAP

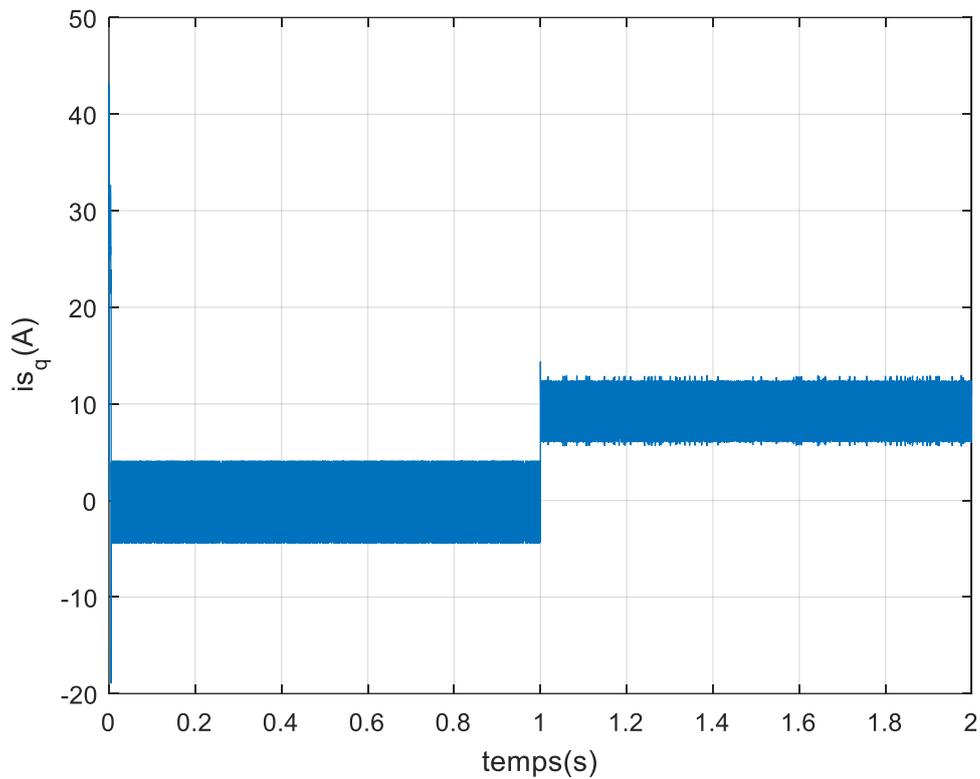


Figure 2.8.b : Courant statorique (i_{sq}) de la MSAP

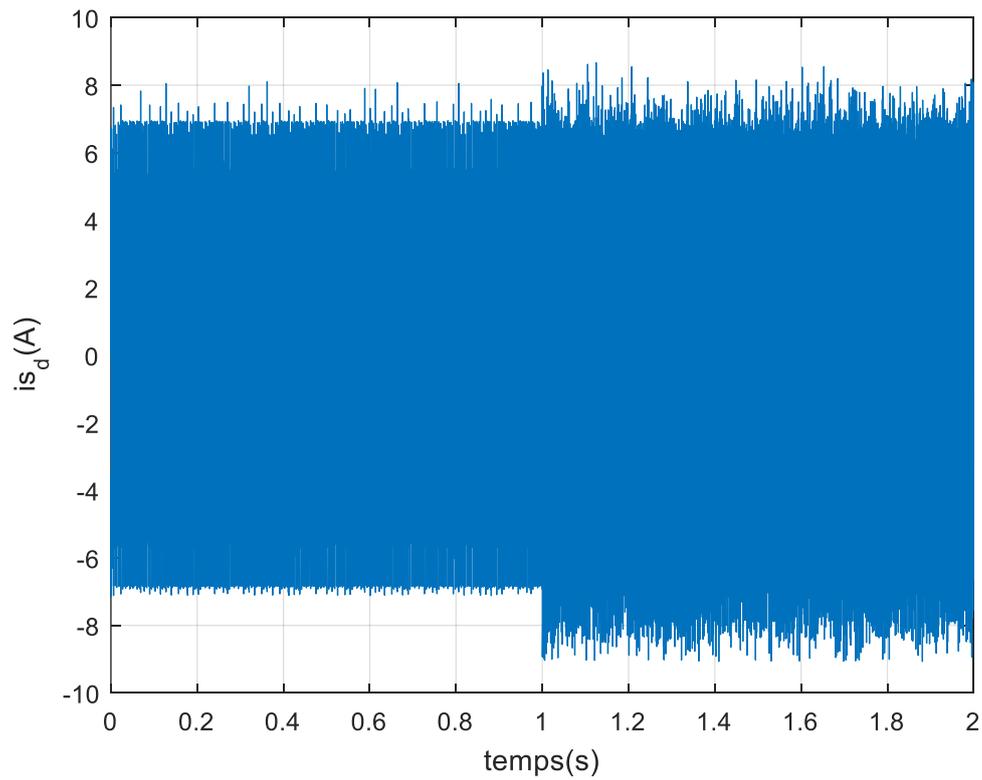


Figure 2.8.c : Courant statorique (i_{sd}) de la MSAP

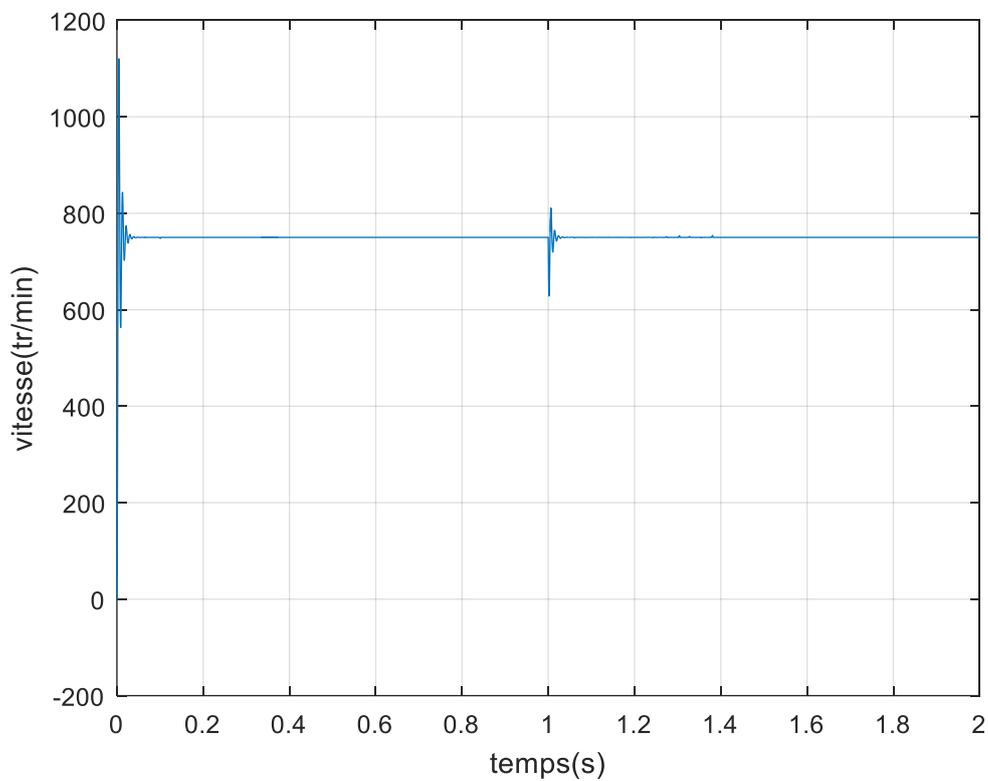


Figure 2.8.d : La vitesse de rotation de la MSAP

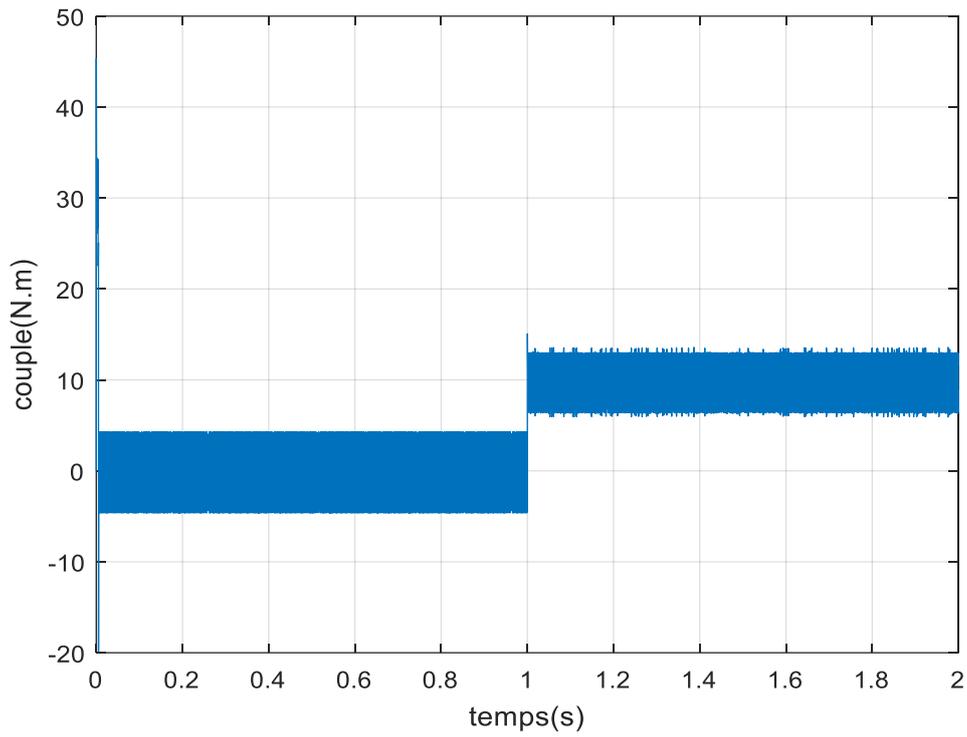


Figure 2.8.e : Le couple électromagnétique de la MSAP

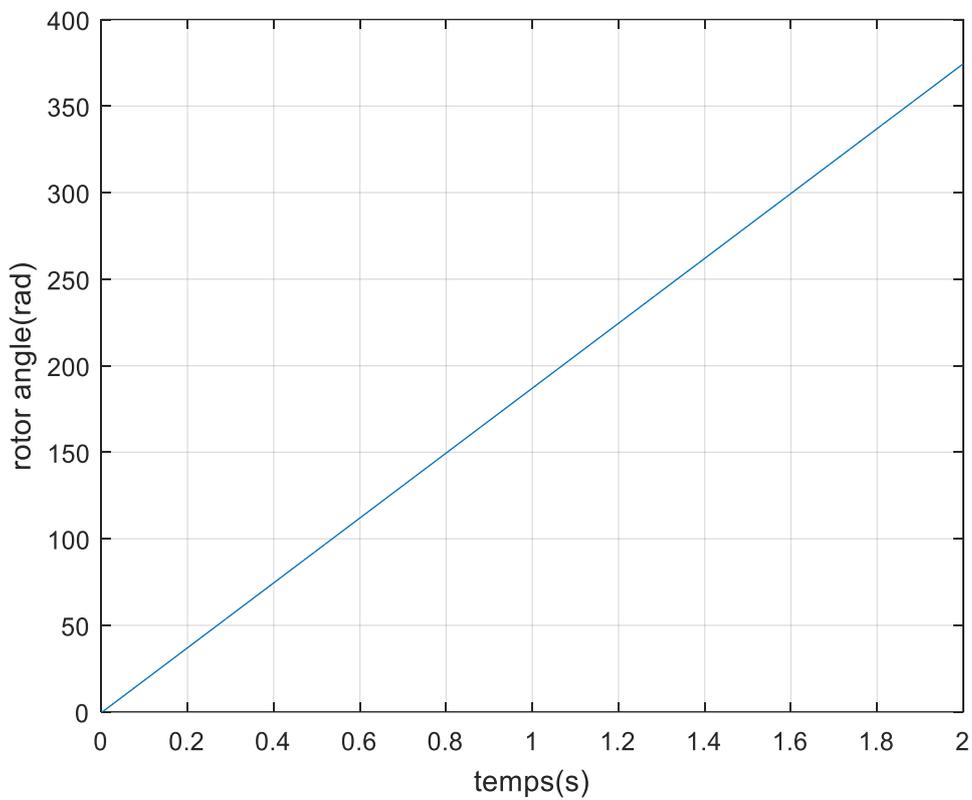


Figure 2.8.f Angle de rotor de la MSAP

L'association du convertisseur statique qu'il s'agit d'un onduleur de tension avec MSAP, pour un démarrage à vide puis on applique un couple résistant de 10 N.m à l'instant $t = 1$ s. L'onduleur est commandé par la commande MLI hystérésis.

Si on compare ces résultats (MSAP alimentée par un onduleur) avec ceux obtenus auparavant (MSAP alimentée par le réseau), on constate qu'ils sont similaires, sauf que la présence de l'onduleur minimise des ondulations.

La commande de la MSAP par un onduleur à hystérésis permet de varier la vitesse et de minimiser les ondulations du couple et du courant pendant le régime transitoire.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié la modélisation et la simulation d'une machine synchrone à aimant permanent le mode moteur. Dans le premier cas, la machine est alimentée directement sur le réseau et dans le second cas par un onduleur à deux étages. Une série de simulations a été réalisée sur la machine synchrone à aimants permanents avec le logiciel MATLAB/SIMULINK afin de prévoir son comportement pour les deux modes d'alimentation. La Simulation de la MSAP alimentée par une turbine éolienne en fonctionnement générateur sera présentée dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III
COMMANDE D'UNE
MACHINE SYNCHRONE
A AIMANT PERMANENT
ASSOCIÉ AVEC TURBINE
ÉOLIENNE

III.1 Introduction

L'énergie éolienne est l'énergie la plus respectueuse de l'environnement que les énergies fossiles et nucléaire, car elle présente moins de pollution. La source de cette énergie est le vent soit une source d'énergie gratuite, sa puissance varie considérablement en fonction du lieu et du moment ainsi que du climat et des saisons.

Pour cette raison, ce chapitre consacré l'association de la machine synchrone à aimant permanent avec une turbine éolienne. On Commencera par un rappelle sur les notions élémentaires du fonctionnement d'un système éolien et la modélisation d'aérogénérateur. Les zones de fonctionnement d'une éolienne et les systèmes de régulation de la vitesse sont également décrites. On clôturera ce chapitre par une simulation de la turbine connectée au MSAP. Un model et des résultats de simulation de la turbide éolienne sera développé à la fin de ce chapitre.

III.2 Turbine éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [1, 2], la figure (3.1) donne une chaine conversion de l'énergie cinétique du vent .



Figure 3.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent.

III.2.1 Constitution d'une éolienne

Il existe plusieurs configurations possibles de la turbine éolienne qui peuvent avoir des différences importantes entre elles (figure 3.2). Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de [3]:

- **Le mât,**
 - ✓ Généralement en métal, supporte l'ensemble des équipements permettant de produire l'électricité (nacelle + rotor).
 - ✓ Il est fixé sur une fondation implantée dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne.

- ✓ Le mât des éoliennes atteint aujourd'hui 80 m de haut pour les plus puissantes (exceptionnellement jusqu'à 100 m).
- ✓ Les éoliennes sont-elles si haut perchées c'est parce que le vent souffle plus fort à quelques dizaines de mètres de hauteur, où il n'est pas perturbé par l'effet des obstacles: relief, arbres, maisons...
- ✓ la puissance fournie par une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent [3].
- ✓ La tour doit être suffisamment solide pour supporter non seulement la nacelle et le rotor, mais aussi les charges puissantes provoquées par le vent : d'une part la puissance exercée par le vent directement sur la tour, d'autre part la puissance transmise par le rotor [3].

- **Le rotor**

- ✓ Il est composé de plusieurs pales (en général 3) et du nez de l'éolienne.
- ✓ Les pales sont aujourd'hui faites de matériaux composites à la fois légers et assurant une rigidité et une résistance suffisantes : polyester renforcé de fibre de verre et/ou fibre de carbone.
- ✓ Leur longueur atteinte actuellement entre 30 et 55 mètres, soit un diamètre du rotor compris entre 60 et 110 mètres.
- ✓ La puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pales (un cercle), donc au carré de son diamètre rotor [3].
- ✓ Un rotor balaye un disque circulaire au cours d'une rotation et peut donc récolter l'énergie des molécules d'air traversant ce disque.
- ✓ Le rotor est relié à la nacelle par le moyeu, Elle transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique [3].

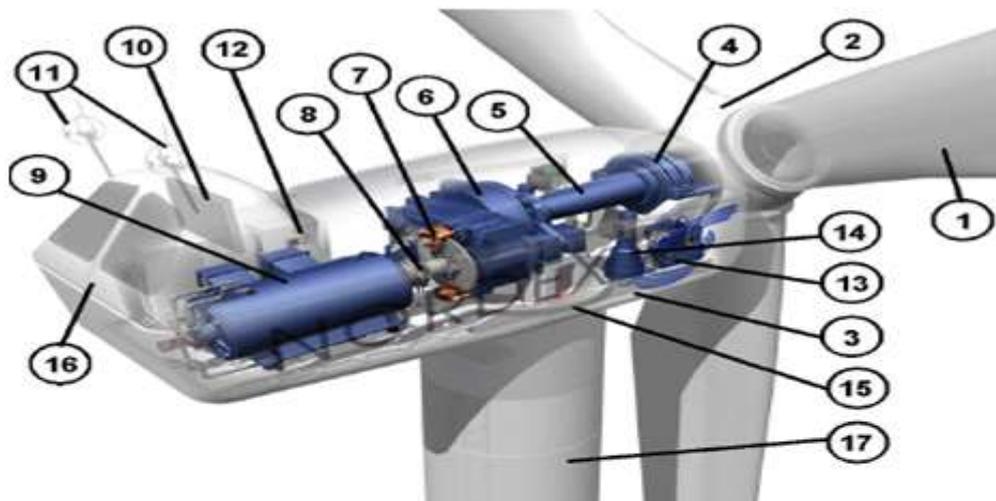
- **La nacelle**

- ✓ Elle est montée au sommet du mât et abritant les composants mécaniques et pneumatiques et certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine [3].
- ✓ Le transport de l'électricité produite dans la nacelle jusqu'au sol est assuré par des câbles électriques descendant à l'intérieur du mât de l'éolienne.
- ✓ Les différents composants d'une nacelle sont [4] :

❖ **Le multiplicateur de vitesse** : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique.

- ❖ *L'arbre secondaire* comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.
- ❖ *La génératrice* : c'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.
- ❖ *Un contrôleur électronique* chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble « rotor plus nacelle » face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle. Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir.
- ❖ *Divers dispositifs de refroidissement* (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau ou d'huile [4].

La nacelle supervise ainsi l'éolienne qui peut être arrêtée dès que le vent n'est pas suffisant ou au contraire trop puissant ou dans tout autre cas qui pourrait poser problème.



1: pales.	7: frein à disque.	13: centrale hydraulique.
2: moyeu rotor.	8: accouplement.	14: mécanisme.
3: nacelle.	9: génératrice.	15: paliers du système d'orientation
4: cardan.	10: radiateur de refroidissement équipé d'un frein à disque.	
5: transmission.	11: centrale de mesures du vent.	16: capot.
6: multiplicateur de vitesse.	12: contrôle.	17: mât.

Figure 3.2 Principaux composants d'un aérogénérateur.

III.2.2 Utilisation des éoliennes

Un système éolien peut être utilisé en trois applications différentes :

III.2.2.1 Systèmes isolés

Les systèmes isolés en général, utilisent une certaine forme de stockage d'énergie. Ce stockage peut être fait par des batteries donc il faut un dispositif pour contrôler la charge et la décharge de la batterie. Le contrôleur de charge a comme principal objectif d'éviter qu'il y ait des dommages au système de batterie par des surcharges ou des décharges profondes [5]. Pour l'alimentation d'équipements qui opèrent avec un réseau alternatif (AC), il est nécessaire d'utiliser un onduleur.

III.2.2.2 Systèmes hybrides

En général, les systèmes hybrides sont employés dans des petits systèmes destinés à desservir un nombre plus grand d'utilisateurs. Pour travailler avec des charges à courant alternatif, le système hybride aussi a besoin d'un onduleur [5].

III.2.2.3 Systèmes liés au réseau

Les systèmes liés au réseau n'ont pas besoin de systèmes de stockage d'énergie, c.-à-d toute la génération est livrée directement au réseau électrique. Ces systèmes nécessitent un convertisseur statique [5].

III.2.3 Types d'éoliennes

Il existe deux types d'éoliennes, les unes avec un axe horizontal, parallèle au sol, et l'autre avec un axe vertical, perpendiculaire au sol. Les plus vieux modèles d'éoliennes étaient munis de nombreuses des pales. Les éoliennes modernes comptent en général trois pales [6].

III.2.3.1 Eoliennes à Axe Vertical

Les pylônes des éoliennes à axe vertical sont courts, entre 0,1 et 0,5 fois la hauteur du rotor. Cela permet de placer tout le dispositif de conversion de l'énergie (génératrice, multiplicateur, etc,...) au pied de l'éolienne, facilitant ainsi les opérations de maintenance. De plus, il n'est pas nécessaire d'utiliser un dispositif d'orientation du rotor.

Cependant, les vents sont faibles à proximité du sol, ce qui induit un moins bon rendement car l'éolienne subit les turbulences du vent. De plus, ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mât subit de fortes contraintes mécaniques.

Pour ces raisons, de nos jours, les constructeurs d'éoliennes privilégient les éoliennes à axe horizontal [7].

Les deux types des structures d'éoliennes à axe vertical les plus répandues reposent sur les principes de traînée différentielle ou de la variation cyclique d'incidence :

Le rotor de Savonius dont le fonctionnement est basé sur le principe de la traînée différentielle. Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes [7] (voir figure 3.3). Il en résulte un couple entraînant la rotation de l'ensemble.

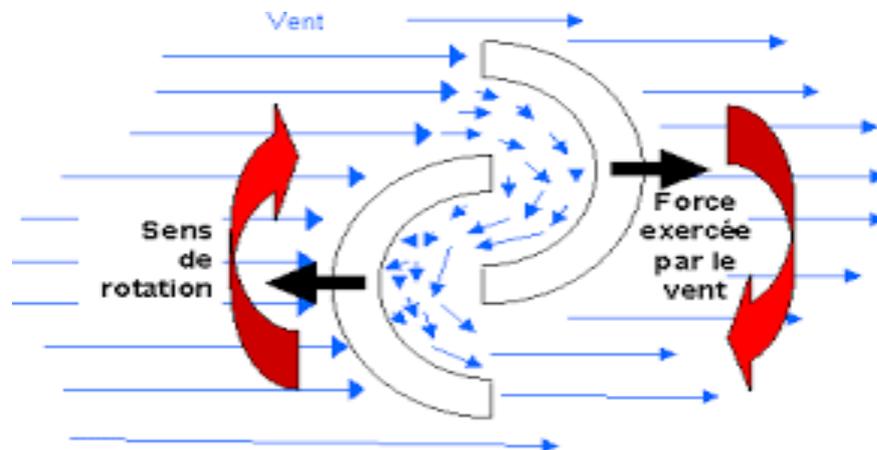


Figure 3.3 Schéma de principe du rotor de Savonius

➤ **Le rotor de Darrieus** est basé sur le principe de la variation cyclique d'incidence. Un profil, placé dans un écoulement d'air selon différents angles, est soumis à des forces d'intensités et de directions variables.

La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif [8] (voir figure 3.4).



Figure 3.4 Schéma du rotor de Darrieus

III. 2.3. 2 Eoliennes à Axe Horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles sont constituées d'une à trois pales profilées aérodynamiquement. Le plus souvent le rotor de ces éoliennes est tripale, car trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales (figure 3.5) [9].

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical ; elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques [8] [9]. Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal:

- ❖ **Montage Amont** le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.
- ❖ **Montage Aval** le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto orientable. La disposition turbine en amont est la plus utilisée car plus simple et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances : pas de gouverne, les efforts de manœuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité.

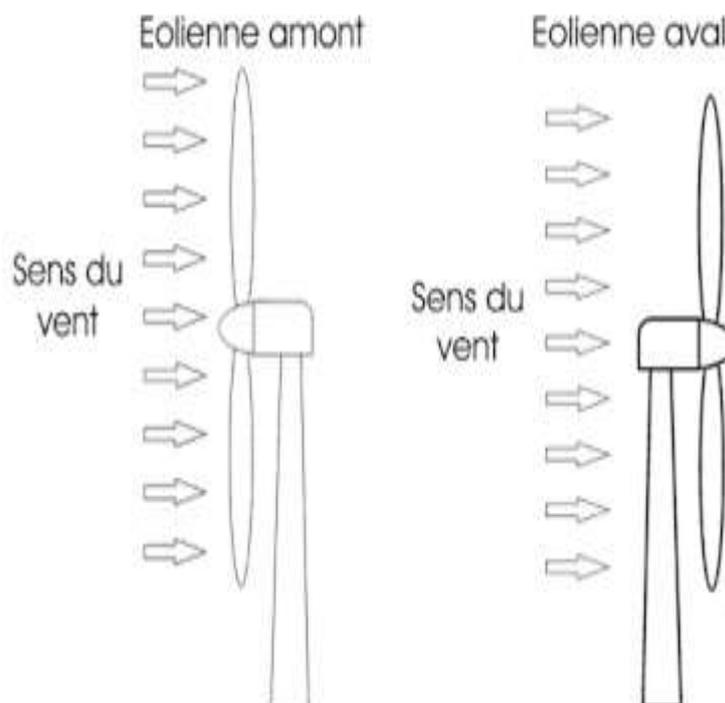


Figure 3.5 Types d'éoliennes à axe horizontal

En principe, les pales des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent. Pour cela, il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction [10].

III.2.4 Classification des turbines éoliennes

Le tableau 3.1 présente une classification des turbines éoliennes [11] [12].

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 kW
Moyenne	12 à 45 m	40 kW à 1 MW
Grande	46 m et plus	1 MW

Tableau. 3.1 Classification des turbines éoliennes

III.2.5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

Le développement d'outils informatiques, est apte à traiter chacune des étapes nécessaires à l'aboutissement d'un projet de grande envergure et à permettre d'exploiter au mieux les possibilités d'un gisement de vent, permet d'envisager sereinement une part de plus en plus conséquente de ce type d'énergie dans la production mondiale d'électricité [9], [10].

III.2.5.1 Avantages

- Rapidité d'installation ;
- Puissance beaucoup plus élevée que le solaire ;
- Energie respectueuse de l'environnement ;
- Autonomie énergétique, bon complément à d'autres sources (diesel, solaire).

III.2.5.2 Inconvénients

- Investissement élevé ;
- Pas de rentabilité pour un site relié au réseau ;
- Risques causés par vents forts ;
- Surveillance technique.

III.3 Régulation de la puissance du vent

La production électrique varie selon la vitesse du vent :

- Lorsque le vent est inférieur à 10 km/h (2,8 m/s), l'éolienne est arrêtée car le vent est trop faible. Cela n'arrive que 15 à 20 % du temps.
- Entre 10 et 36 km/h (2,8 et 10 m/s), la totalité de l'énergie du vent disponible est convertie en électricité, la production augmente très rapidement.
- À partir de 36 km/h (10 m/s), l'éolienne approche de sa production maximale : les pales se mettent progressivement à tourner sur elles-mêmes afin de réguler la production.

- À 45 km/h (12,5 m/s), l'éolienne produit à pleine puissance. Les pales sont orientées en fonction de la vitesse du vent. La production reste constante et maximale jusqu'à une vitesse de vent de 90 km/h.
- À partir de 90 km/h (25 m/s), l'éolienne est arrêtée progressivement pour des raisons de sécurité, et les pales sont mises en drapeau. Cela n'arrive que sur les sites très exposés, quelques heures par an, durant les fortes tempêtes.

En générale, une éolienne dispose de trois freins principaux (chacune des trois pales), mais est également équipée d'un frein mécanique afin d'assurer l'arrêt rapide de la machine et son immobilisation lors de la maintenance [11].

La figure (3.6) illustre la variation de la puissance d'une éolienne en fonction du vent.

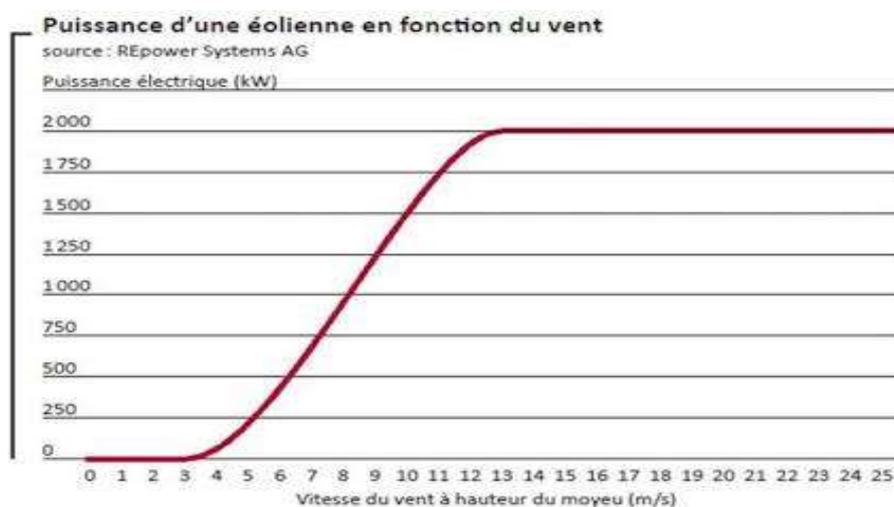


Figure 3.6 Régulation de puissance d'une éolienne en fonction du vent

III.4 Modélisation de l'éolienne

Le modèle du convertisseur de puissance ne sera pas inclus dans le modèle de l'éolienne. En effet, la modélisation de cette partie électronique de puissance est difficile, surtout en régime transitoire. En plus, inclure le modèle du convertisseur dans le modèle complet augmente le temps de simulation. En plus, dans cette thèse, nous n'intéressons pas à la stratégie de la commande des convertisseurs, nous sommes plutôt intéressés par la variation de la puissance écoulée entre le générateur éolien et le réseau. Le convertisseur de puissance et sa commande sont supposés idéaux, c'est-à-dire que les puissances électriques à l'entrée et à la sortie du convertisseur de puissance sont égales.

La figure (3.7) suivante montre les deux parties à modéliser :

1. *Partie mécanique I.*
2. *Partie électrique II*

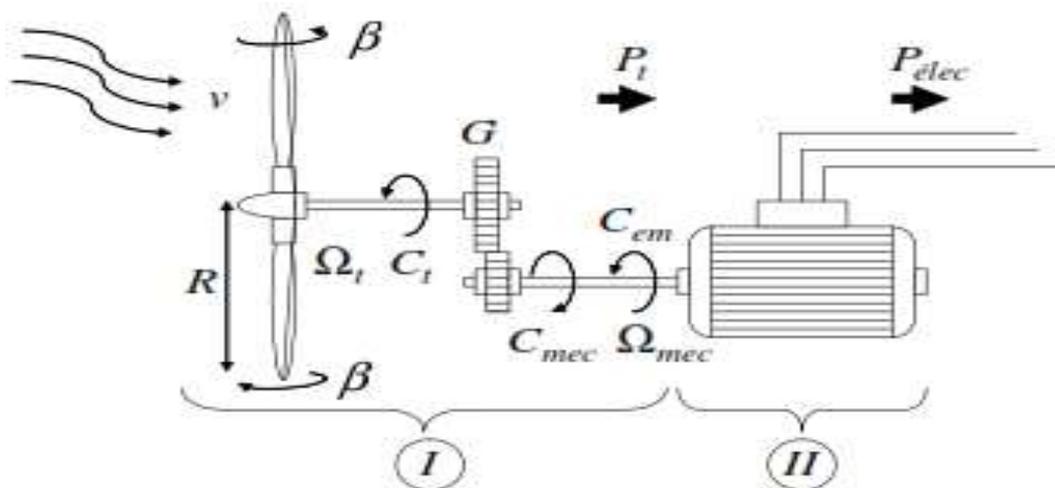


Figure 3.7 Configuration d'une éolienne

Sur l'arbre de l'éolienne il y a la turbine éolienne, le multiplicateur de vitesse et le rotor du générateur. La turbine éolienne se compose de plusieurs pales fixes ou orientables. 80% des fabricants fabriquent des turbines tri pales pour des raisons de stabilité, de poids et de fluctuations mécaniques [13].

La turbine éolienne, en général, tourne à une vitesse nominale de 25 à 40 (*tr/min*). Le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique qui tourne à environ 1500 (*tr/min*). Avec les mêmes simplifications citées dans [14], le modèle de la partie mécanique peut être obtenu. L'élasticité et le frottement des pales avec l'air sont ignorés.

Dans ce travail, le modèle de l'éolienne est élaboré pour la commande de vitesse variable. La turbine éolienne sera modélisée ainsi que le générateur synchrone.

III.4.1 Modèle mécanique

L'entraînement mécanique d'une éolienne sert à transmettre l'énergie captée par le rotor de la turbine à la génératrice électrique. La boîte de vitesse sert à augmenter la vitesse et à diminuer le couple aérodynamique à transmettre à la génératrice. Aussi la partie mécanique de la turbine comprend deux pales orientables et de longueur R . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse de rotation w_t , relié à un multiplicateur de gain G .

- ✓ Ce multiplicateur entraîne la génératrice électrique. Les deux pales sont considérées identiques.
- ✓ On considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces de poussée.

- ✓ On peut modéliser l'ensemble des deux pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques
- ✓ La conception aérodynamique des pales, nous considérons que leur coefficient de frottement par rapport à l'air est très faible et peut être négligé.
- ✓ La vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par Frottement seront négligeables devant les pertes par frottement du côté de la génératrice.

Sur la base de ces hypothèses, on obtient alors un modèle mécanique constitué de deux masses comme l'illustre la figure dont la validité, par rapport au modèle complet de la turbine.

III.4.2 Modèle de la turbine

III.4.2.1 Modèle aérodynamique

Le bloc aérodynamique se compose de trois sous-systèmes:

- Calcul de la vitesse relative,
- Calcul de coefficient de puissance du rotor C_p ,
- Calcul de couple aérodynamique.

La vitesse du vent v_{vent} l'angle d'inclinaison β sont des entrées définies par l'utilisateur.

III. 4.2.2 Loi de Betz

La limite de Betz est une loi physique qui indique que la puissance théorique maximale développée par un capteur éolien est égale à 16/27 de la puissance incidente du vent qui traverse l'éolienne. (Figure 3.8),

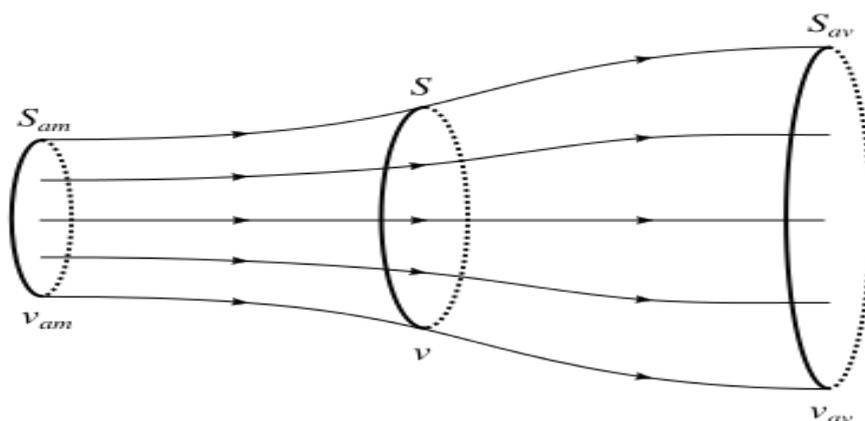


Figure 3.8 Tube de courant autour d'une éolienne

- ✓ La puissance incidente du vent est cinétique et dépend de la surface que le capteur éolien propose au vent, de la vitesse du vent et de la masse volumique de l'air.

- ✓ La puissance cinétique du vent à travers un disque éolien de rayon R , est donnée par la relation suivante [15] :

$$P_{vent} = \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3}{2} \quad (III.1)$$

Où :

ρ : densité de l'air 1.22 (kg/m³) à la pression atmosphérique à 15°C.

R : rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale.

V : Vitesse du vent (m/s).

- ✓ La puissance aérodynamique (puissance mécanique de la turbine) apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors :

$$P_{aer} = C_p \cdot P_V = C_p (\lambda \cdot \beta) \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3}{2} \quad (III.2)$$

C_p : est le coefficient de performance ou coefficient de puissance (rendement)

- ✓ Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine [16], [17].
- ✓ Théoriquement, ce coefficient qui ne peut dépasser la valeur limite, appelée limite de **Betz** qui est **16/27** soit **0,5926** [18], [19] c'est cette valeur qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée.
- ✓ La relation de coefficient de puissance C_p est donnée par l'expression suivante :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5 - 0.0167 \cdot (\beta - 2) \cdot \sin\left(\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{14.8 - 0.3(\beta - 2)}\right) - 0.00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad (III.3)$$

- ✓ Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent, donné par l'expression suivante :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_{turbine}}{V} \quad (III.4)$$

Avec :

$\Omega_{turbine}$: La vitesse de la turbine

V : vitesse du vent

La figure (III.9) représente la variation du coefficient de puissance C_p en fonction du ratio de vitesse λ et de l'angle de l'orientation de la pale β

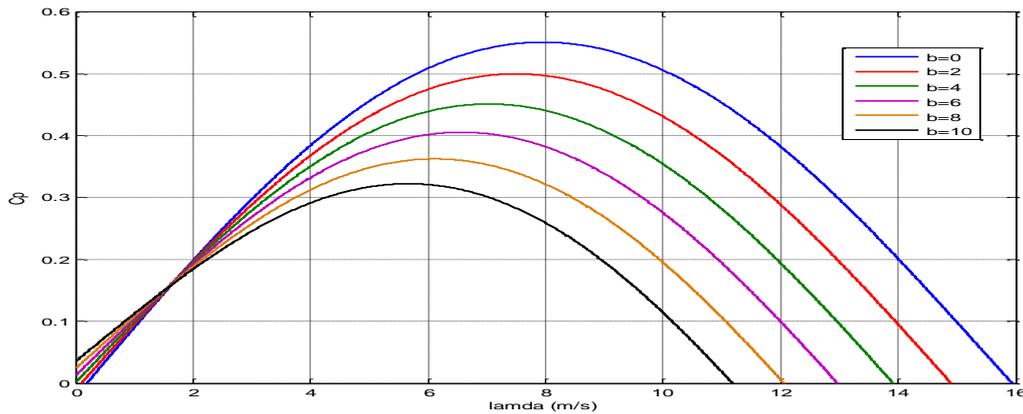


Figure 3.9 Evolution du coefficient C_p en fonction de λ et β

- ✓ Sur la figure (3.9), plusieurs courbes sont distinguées mais nous sommes intéressés à celle qui possède le plus haut sommet.
- ✓ Cette courbe est caractérisée par le point optimal ($\lambda_{opt} = 8$ pour un $C_{p_max} (deg) = 0.55$) qui est le point correspondant au maximum du coefficient de puissance et donc au maximum de la puissance mécanique récupérée.
- ✓ Nous remarquons que l'augmentation de λ permet de dégrader le coefficient C_p .

Des courbes typiques pour différents aérogénérateurs sont présentes sur la figure (3.10).

En générale dans un premier temps, le coefficient de puissance augmente avec la vitesse normalisée, atteignant un maximum pour une certaine valeur de λ puis diminue même avec l'augmentation de la vitesse normalisée. Ces variations de $C_p(\lambda)$, dépendent de plusieurs propriétés aérodynamiques, mais essentiellement de plusieurs éléments dans la conception du rotor, notamment, dans le nombre de pales utilisées [20].

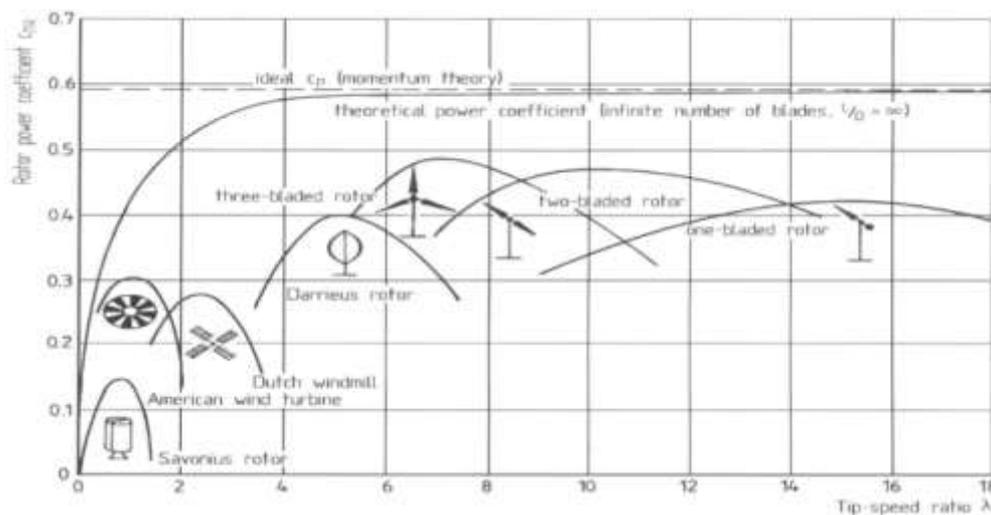


Figure 3.10 coefficient de puissance en fonction de la vitesse normalisée λ

III.4.2.3 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. L'élasticité et le frottement du multiplicateur sont négligés. Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles. Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport de multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur [21].

$$C_{mec} = \frac{1}{k} C_t \quad (III.5)$$

Où :

k = Rapport de multiplication (-).

C_{mec} = Couple mécanique sur l'axe du générateur en (N.m).

Le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine à celle du générateur comme suivant :

$$\Omega_{mec} = k. \Omega_t \quad (III.6)$$

Où : Ω_{mec} = Vitesse du générateur (rad /S mécanique).

III.4.2.4 Modèle de l'arbre

L'arbre du générateur est modélisé par l'équation suivant

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_T - f\Omega_{mec} \quad (III.7)$$

Où :

J = Inertie totale des parties tournantes (Kg.m²).

f = Coefficient de frottements visqueux.

$C_T = C_{men} + C_{em}$ = Couple total de l'éolienne.

C_{em} = Couple électromagnétique du générateur en (N. m).

En mode génératrice le couple électromagnétique C_{em} a un signe négatif.

L'inertie totale est la somme de l'inertie du générateur et de la turbine ramenée au côté générateur

$$J = \frac{J_{Turbine}}{G^2} + J_{Générateur} \quad (III.8)$$

Le schéma bloc suivant (figure 3.11) représente le modèle de l'arbre de l'éolienne associé au modèle de la Turbine [22].

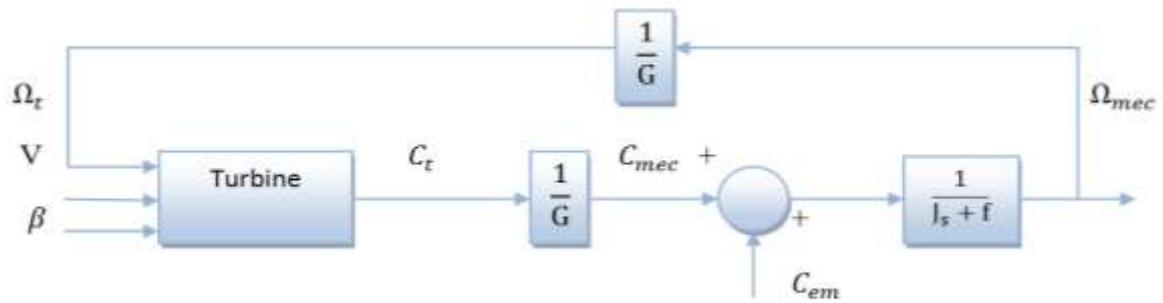


Figure 3.11 Modèle de l'arbre et de la turbine éolienne

III.4.2.5 Détermination de la vitesse de référence

La commande de la vitesse de rotation de la turbine nécessite d'imposer une vitesse de référence qui permet de vérifier les conditions de la turbine dont le fonctionnement à des paramètres optimaux. Cette vitesse de rotation de référence est déterminée par la relation suivante :

$$\Omega = \frac{\lambda_{\max} v_v}{R} \quad (\text{III.9})$$

III.4.3 Régulation de la turbine

Dans la littérature, il existe plusieurs types de régulateurs de la vitesse de rotation de turbine, le choix entre ces types des régulateurs est dépend de leur performance statique et dynamique. Permet ces types de régulateur, on peut citer :

- Le régulateur proportionnel intégral (PI)
- Le régulateur intégral proportionnel (IP)
- Régulateur proportionnel intégral dérivateur (PID)
- Les régulateurs avancés telles que : le régulateur par logique floue,etc.

III.4.3.1 Régulateur PI

Le régulateur PI est le type le plus utilisé dans la commande et le réglage de la turbine éolienne, à cause de sa simplicité d'implantation, sa robustesse et facilité de commande. Dans notre étude on a choisi ce type de réglage.

➤ Calcul des paramètres du régulateur de vitesse PI

Considérons le schéma de commande donné par la figure (3.28), le couple électromagnétique de référence est obtenu grâce à l'action d'un contrôleur de type PI sur la différence entre la vitesse de rotation. La fonction de transfert qui décrit cette action est donnée par :

$$C_{em-ref}(s) = \left(k_i + \frac{k_p}{s}\right) \cdot (\Omega_{tur-ref}(s) - \Omega_{mec}(s)) \quad (\text{III.10})$$

k_i : Le gain intégral
 k_p : Le gain proportionnel

Si on isole la partie du schéma de commande qui la boucle de régulation de la vitesse on obtient le schéma de la figure (3.12) [23].

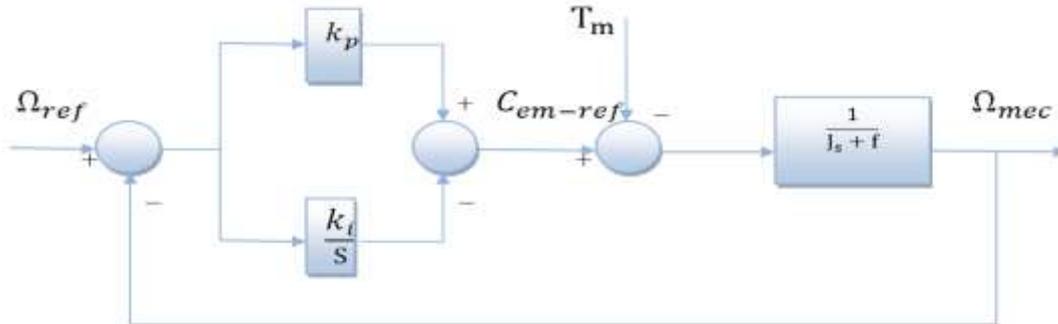


Figure 3.12 Schéma bloc de l'asservissement en utilisant un régulateur PI

Comme le système à étudier est linéaire on peut écrire, en vertu du théorème de superposition, la fonction de transfert sous la forme suivante :

$$\Omega_{mec}(s) = F(s) \cdot \Omega_{ref}(s) - P(s) \cdot T_m(s) \tag{III.11}$$

$$F(s) = \frac{k_p s + k_i}{Js^2 + (f + k_p)s + k_i} \tag{III.12}$$

$$P(s) = \frac{s}{Js^2 + (f + k_p)s + k_i} \tag{III.13}$$

Au régime permanent l'erreur statique due à la perturbation externe en l'occurrence le couple aérodynamique T_m est nulle grâce à la fonction intégrale du régulateur.

La fonction de transfert s'écrira alors comme ceci :

$$\Omega_{mec} = F(s) \cdot \Omega_{ref}(s) \tag{III.14}$$

Le choix d'une pulsation propre ω_n et d'un facteur d'amortissement ξ_n permettent de calculer les coefficients du régulateur PI [23].

$$k_i = \omega_n^2 \cdot J \tag{III.15}$$

$$k_p = 2 \cdot \xi_n \cdot \omega_n \cdot J - f \tag{III.16}$$

III.4.4 Système de contrôle de l'aérodynamique

La plupart des grandes turbines éoliennes utilisent deux principes de contrôle aérodynamique pour limiter la puissance extraite à la valeur de la puissance nominale de la génératrice :

1. système « pitch » ou « à pas ou calage variable » qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent, principalement pour maintenir une puissance sensiblement constante dans la zone III de vitesses.

2. système « stall » ou à « décrochage aérodynamique », le plus robuste car c'est la forme des pales qui conduit à une perte de portance au-delà d'une certaine vitesse de vent, mais la courbe de puissance maximale n'est pas plate et chute plus vite. Il s'agit donc d'une solution passive et robuste (pas besoin de système d'orientation des pales).

D'autres systèmes de régulation, dans les petites éoliennes notamment, sont exploités :

- Basculement (relèvement) de l'axe, normalement horizontal ;
- Pas variable par la pression du vent (modèle Airwind) : les pales en fibre, se déforment et provoquent un décrochage) ;
- Déviation par rapport à l'axe du vent. La dérive se trouve légèrement décalée par rapport à l'axe de rotation vertical (qui permet normalement à la turbine d'être face au vent) et crée une force de déviation qui régule la puissance aérodynamique [24].

III. 5 Simulation de la turbine sous Matlab/simulink

III. 5. 1. Modélisation et simulation du vent

Le vent est une variable très importante à modéliser car la précision des simulations dépendra de la qualité de son modèle. L'un des principes retenus consiste à générer une série temporelle de la vitesse du vent à partir d'un bruit en entrée. Pour ce faire, la vitesse du vent va être décomposée en deux composantes [25]:

- Une composante turbulente du vent $v_t(t)$ est un processus aléatoire stationnaire (ne varie pas avec la vitesse moyenne du vent).
- Une composante lente v_{moy} ; c'est la moyenne de la vitesse du vent variant régulièrement sur de plus longues périodes dans un site donné.

$$v(t) = v_0 + v_t(t) \quad (III.17)$$

Pour les fluctuations des hautes fréquences, on reconstitue à cet effet un filtre passe-bas à la composante de turbulence afin que celle-ci reproduise une caractéristique plus proche de la réalité dont la fonction de transfert (figure 3.13) est donnée par:

$$H_f = \frac{1}{1 + \tau \cdot s} \quad (III.18)$$

La valeur de la constante de temps dépend du diamètre du rotor et également de l'intensité de turbulence du vent et de la vitesse du vent moyenne ($\tau = 4s$) [26].

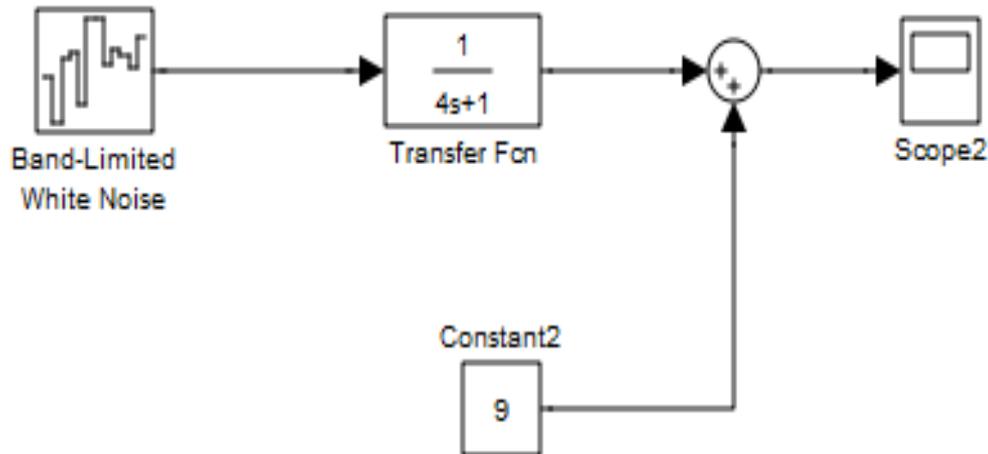


Figure 3.1 Synoptique de construction de vent

La figure (3.14) présente la variation du vent en fonction du temps, on remarque que l'allure du vent dans une bande varier entre 9,20 et 8,7 et d'une valeur moyenne presque égale à 9ms.

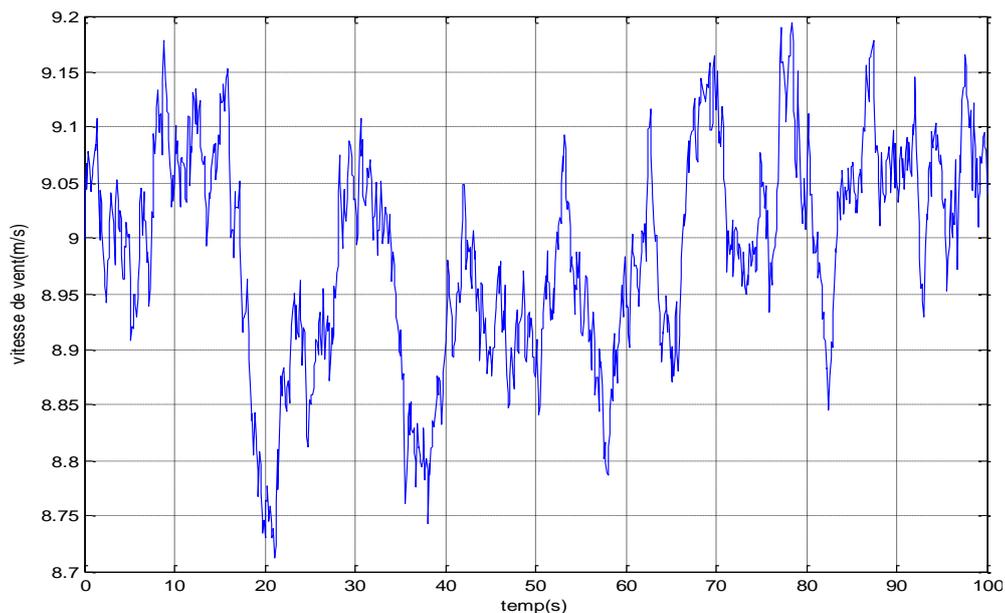


Figure 3.14 Variation de la vitesse du vent

III. 5. 2. modélisation et simulation de la vitesse de référence de la turbine

Dont le fonctionnement optimal des paramètres de la turbine on peut construire le modèle de simulation de la vitesse de rotation de référence représenté par le schéma bloc de la figure (3.15), le résultat de simulation de cette vitesse est illustré à la figure (3.16) :

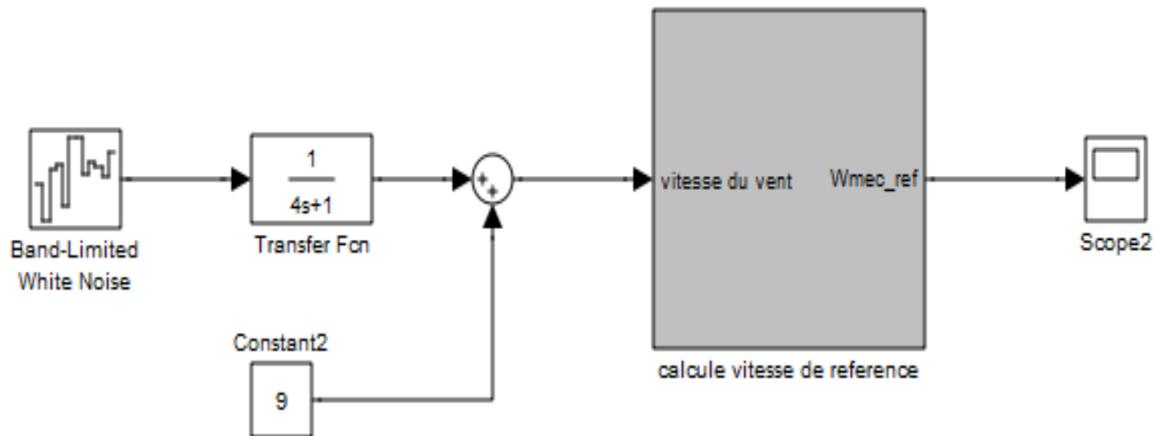


Figure 3.15 Modèle de choix vitesse référence sous Matlab / Simulink

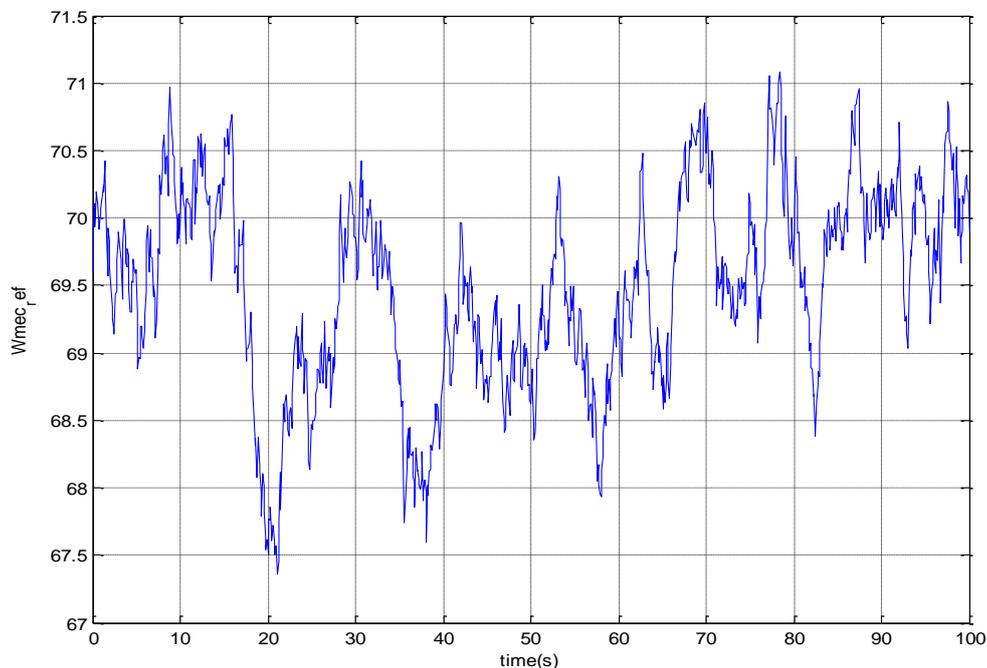


Figure 3.16 Variation de la vitesse de référence

III.5.3 Simulation du modèle globale de la turbine doté d'un régulateur PI

Les figure ci-dessous, montre le model de la turbine à simulé figure (3.17), la variation du couple électromagnétique, variation de la puissance mécanique, Variation de la puissance mécanique, variation de vitesse mécanique et la superposition de la vitesse mécanique et sa référence afin de valider les performances du régulateur PI proposé, dont les paramètres du modèle sera déclaré dans l'annexe.

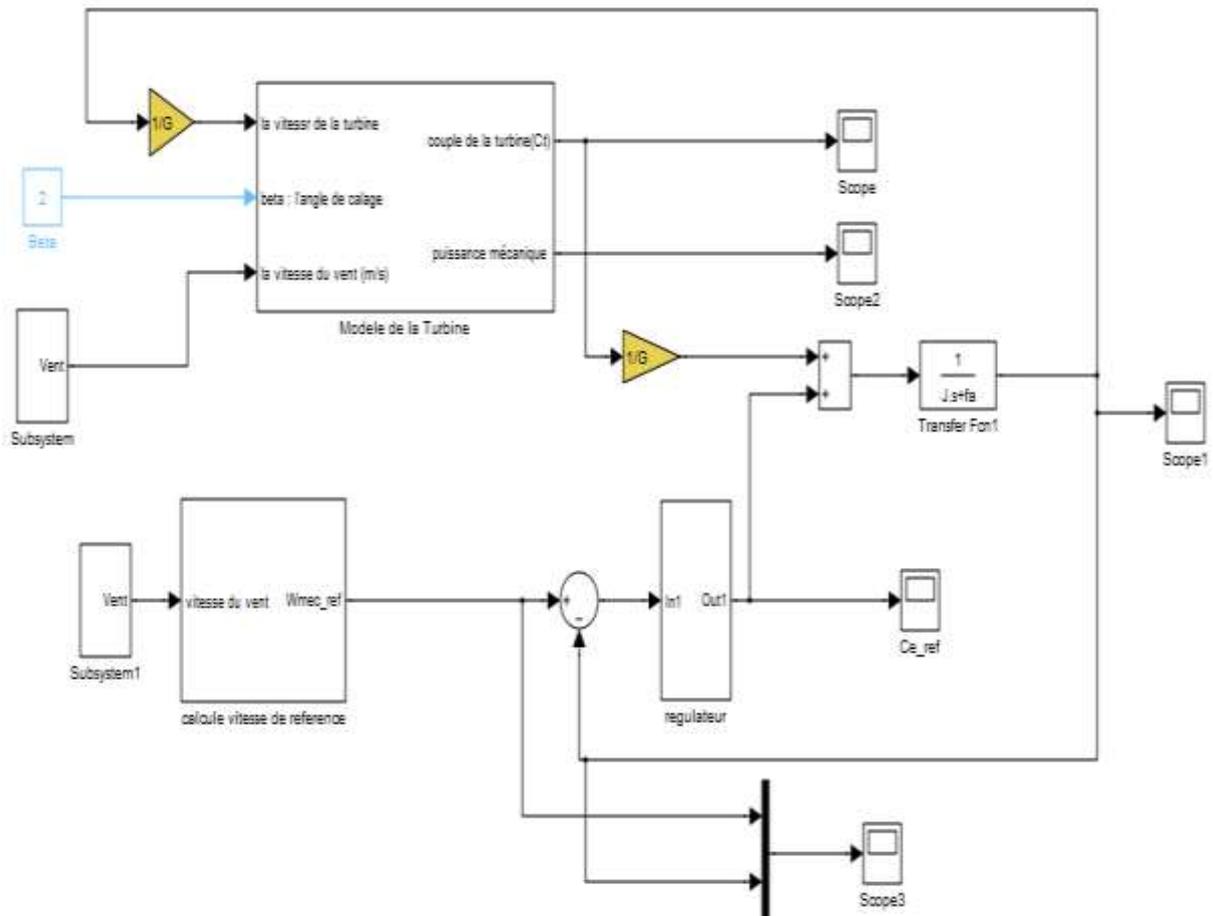


Figure 3.17 Modèle de turbine PI sous Matlab / Simulink

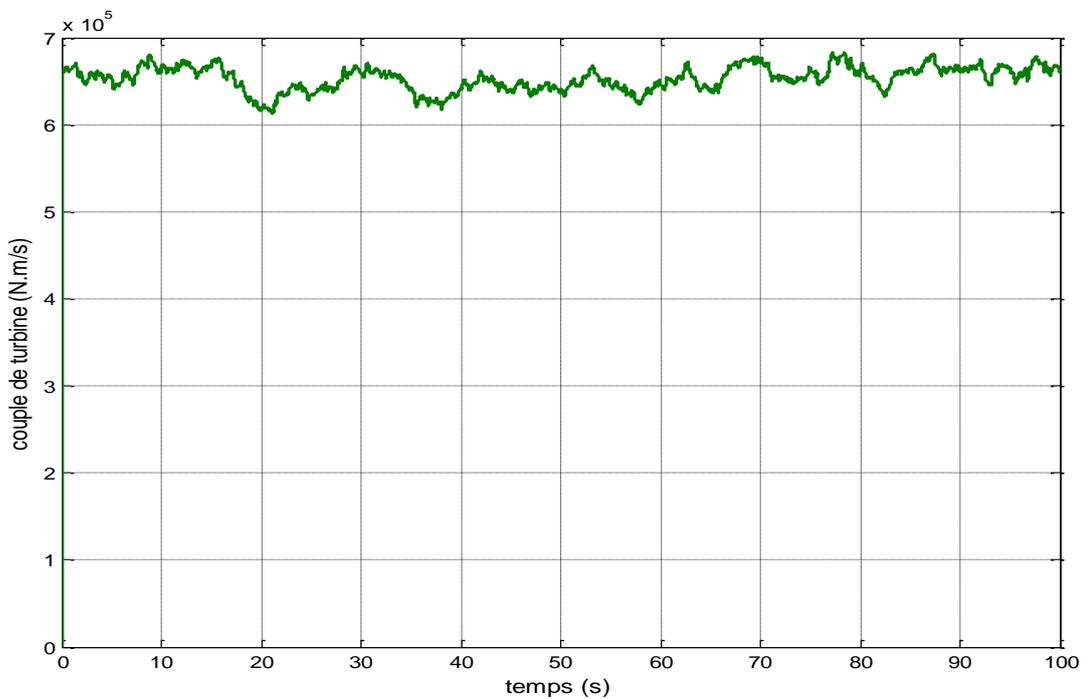


Figure 3.18 Allure de couple de la turbine

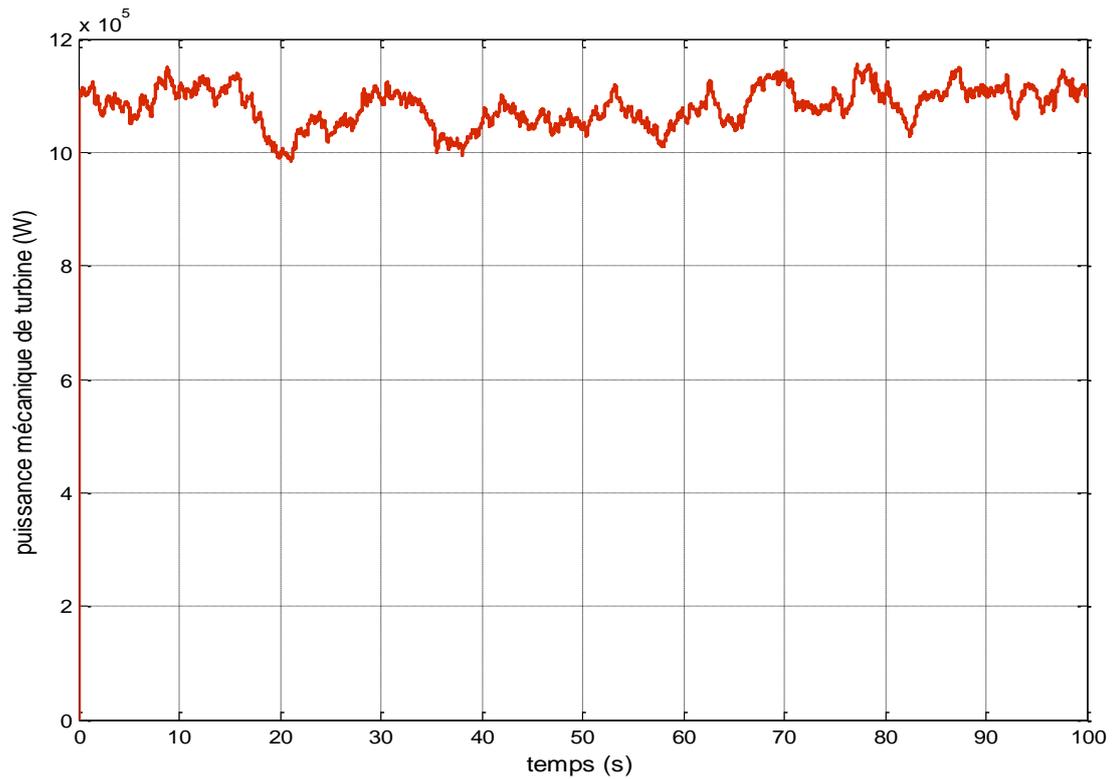


Figure 3.19 Allure de la puissance mécanique

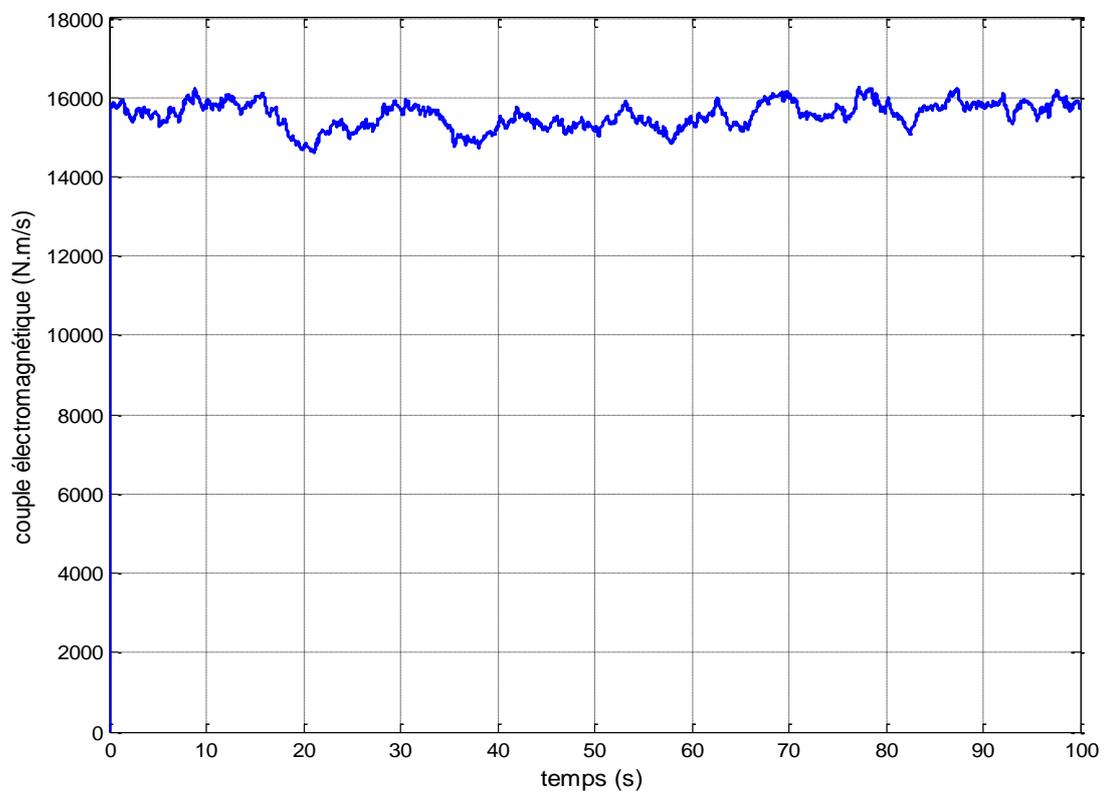


Figure 3.20 Allure de Couple électromagnétique

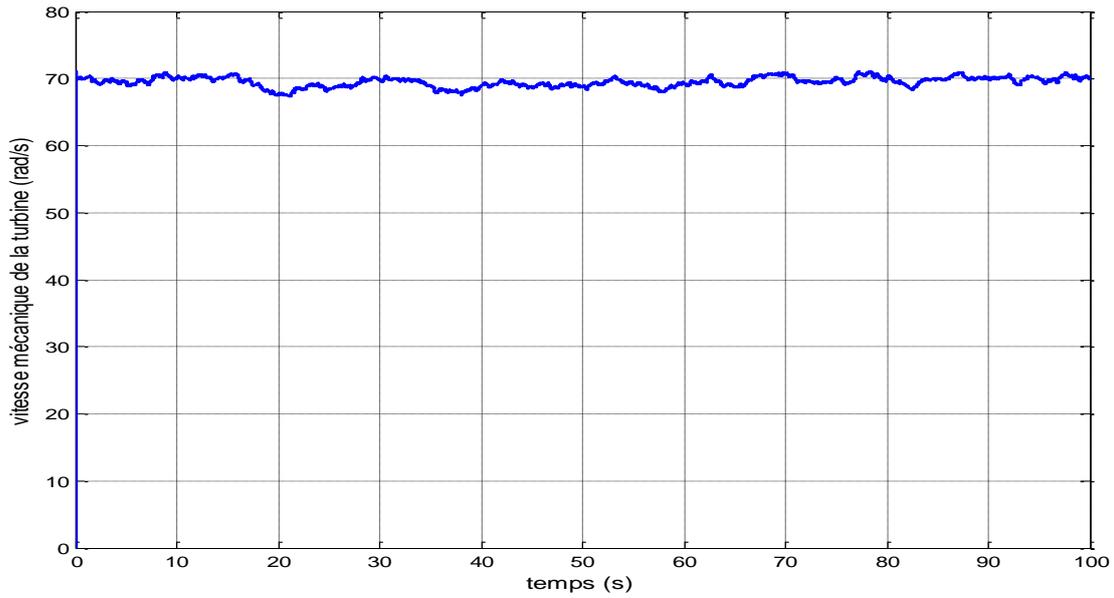


Figure 3.21 Allure de vitesse mécanique de la turbine

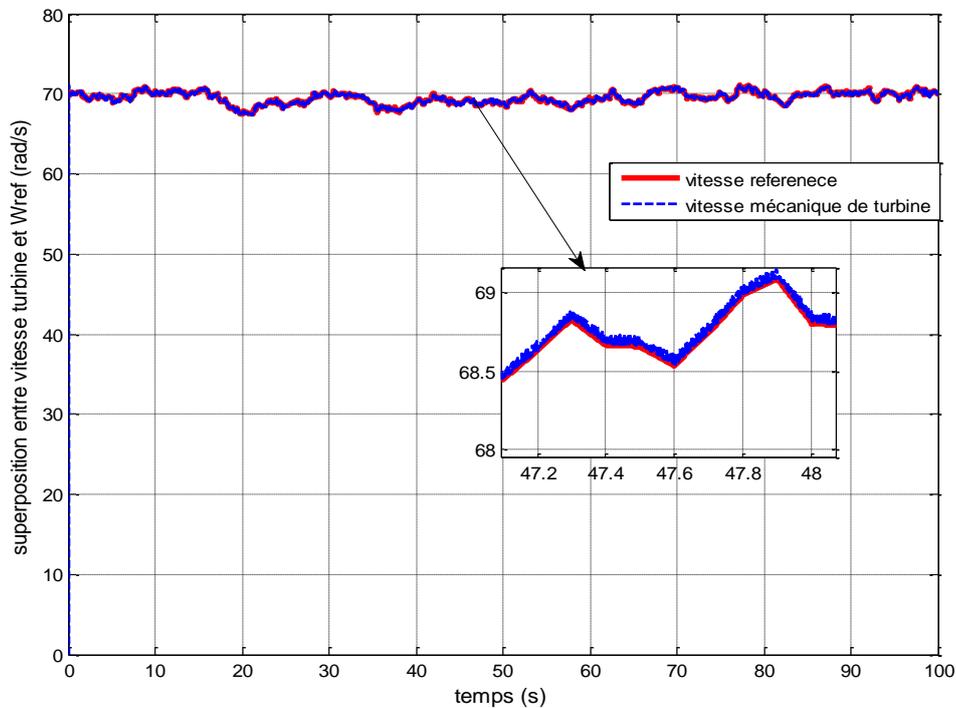


Figure 3.22 Superposition entre la vitesse mécanique de la turbine et sa référence

Les résultats obtenus dans les figures ci-dessus montrent les bonnes performances des grandeurs de la turbine éolienne en termes de valeurs et stabilité en régime permanent, le dernier résultat donne une nette superposition de la vitesse de rotation mécanique de la turbine et sa référence, ce dernier montre les performances statiques et dynamiques du régulateur choisis. On remarque que la vitesse de rotation se stabilise une valeur de 70 rad/s ainsi que sa référence.

III.6.2 Synthèse de calcul du PI

La fonction de transfert du régulateur PI est donnée par :

$$C_s = K_p + \frac{K_i}{P} \tag{III.21}$$

Pour b (effet de la perturbation négligée) la fonction de transfert en boucle ouvert (FTBO) du processus régulé

$$F_o(P) = \frac{K_p P + K_i}{a_0 P^2 + a_1 P} \tag{III.22}$$

La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$F_f(P) = \frac{T(P)}{1+T(P)} = \frac{1+\tau P}{\frac{a_0}{K_i} P^2 + \tau P + 1} \tag{III.23}$$

Avec $\tau = \frac{K_p}{K_i}$ (III.24)

Le système de régulation de la vitesse est de second ordre et la fonction de transfert du système est :

$$F(P) = \frac{1+\tau P}{\tau_n P^2 + 2\varepsilon \tau_n P + 1} \tag{III.25}$$

Par identification, on a :

$$\begin{cases} K_i = \frac{a_0}{\tau_n^2} \\ K_p = \frac{2 \cdot \xi \cdot a_0 - a_1}{\tau_n} \end{cases} \tag{III.26}$$

Les schémas des régulateurs appliqués au système (figures 3.25, 3.26) sont :

Pour les courants (I_d , I_q)

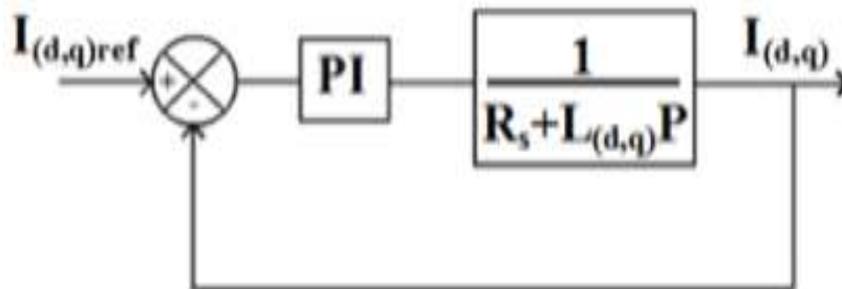


Figure 3.25 Schéma de régulation des courants I_d et I_q .

Pour la vitesse Ω_m

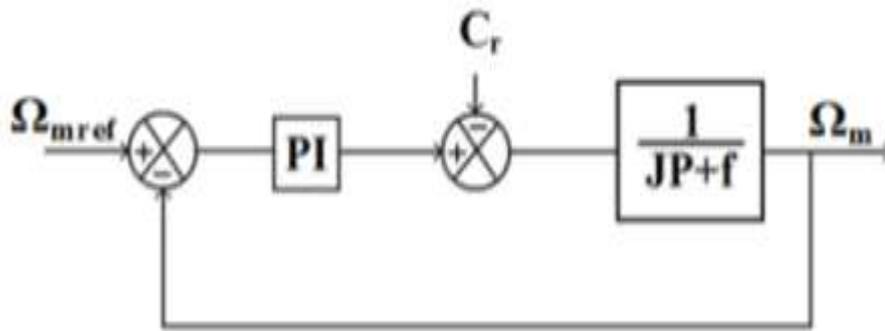


Figure 3.26 Schéma de régulation de vitesse

III.7 Simulation de La MSAP

III.7.1. MSAP alimentée par un onduleur de tension (fonctionnement moteur)

Dans ce cas nous avons présenté les résultats de simulation de la MSAP, Le schéma de simulation de la machine synchrone à aimant permanent associé avec un onduleur à deux niveaux illustré par la figure suivante :

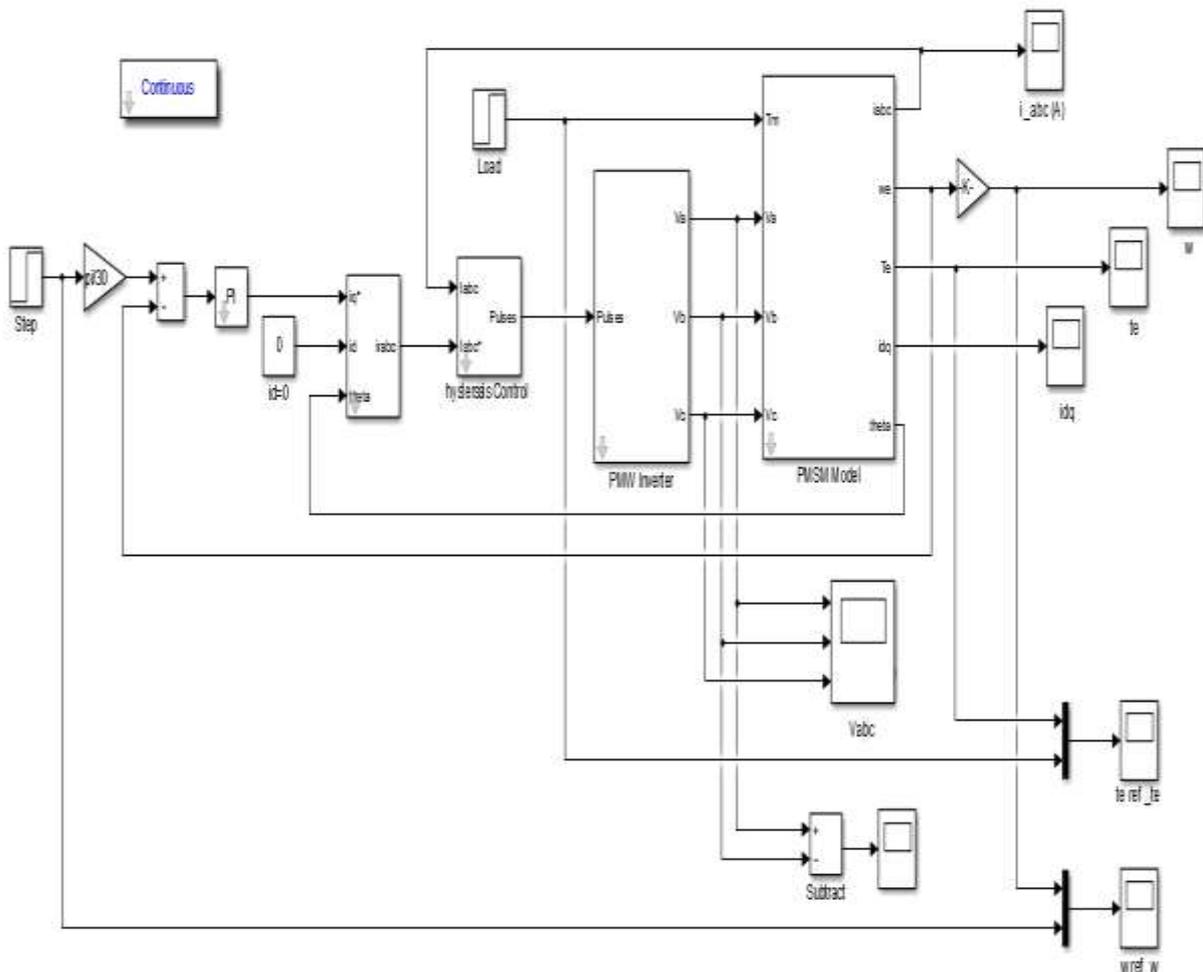


Figure 3.27 Schéma bloc de la commande MASP associée à un onduleur de tension

Pour réaliser cette simulation, l'onduleur de tension est commandé à MLI, les paramètres de la machine sont mentionnés dans l'annexe B.

a) Simulation de MSAP avec variation de vitesse entre 1000 à 1500 tr/min

Pour tester la robustesse de la commande et de la régulation, nous avons simulé une vitesse de référence 1000 tr/min puis 1500tr/min applique à l'instant $t=3s$. Les résultats de simulation sont présentés par les figures ci-dessous.

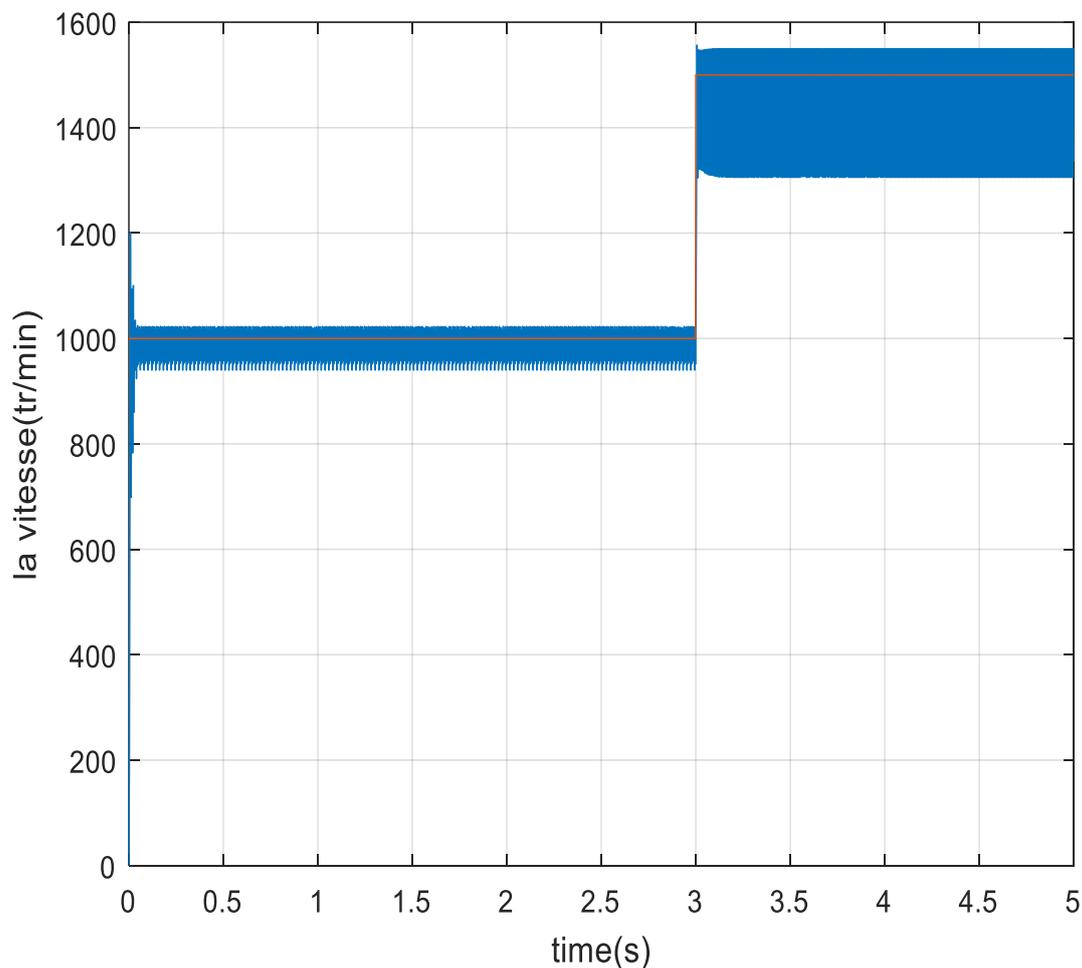


Figure 3.28 Vitesse de rotation de la machine avec sa référence

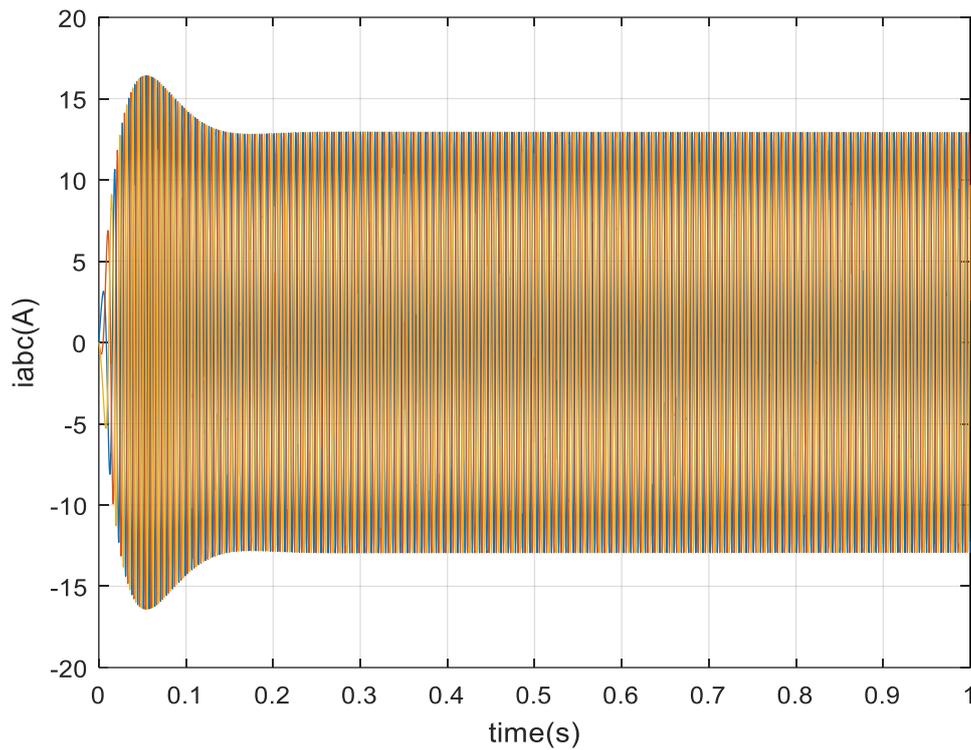


Figure 3.29 Courants statoriques (i_a, i_b, i_c) de la MSAP testée pour une référence de vitesse (1000 à 1200 tr/min)

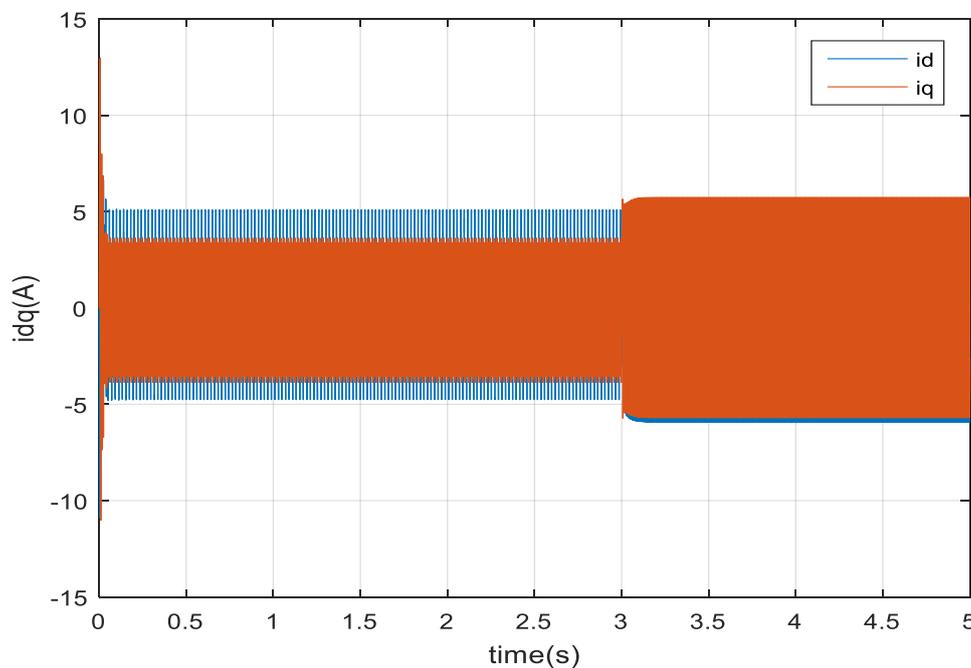


Figure 3.30 Courants statoriques (i_d, i_q) de la MSAP testée pour une référence de vitesse (1000 à 1200 tr/min)

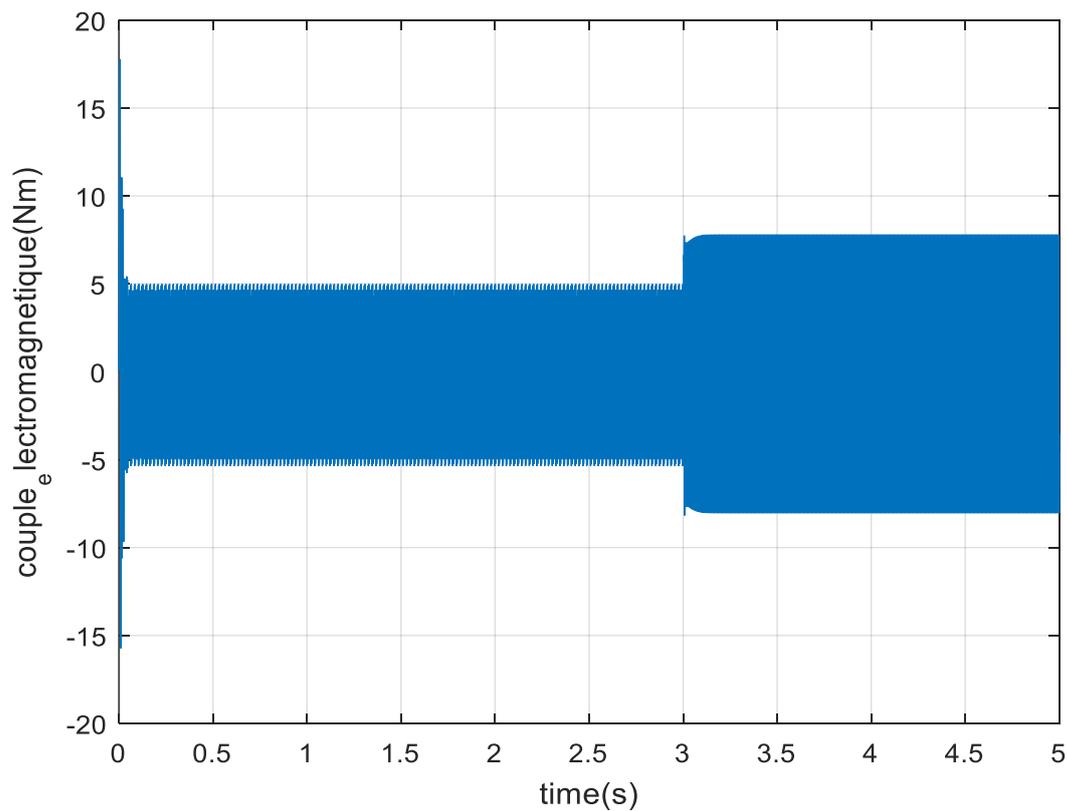


Figure 3.31 Couple électromagnétique de la MSAP

Les résultats présentés dans les figures 3.28 à 3.31 montrent la variation des paramètres de la machine à aimant permanent en fonction du temps pour un régime de fonctionnement moteur. Les résultats montrent la bonne réponse et la stabilité de vitesse, la bonne réponse des courants i_d et i_q . Et la forme sinusoïdale des trois courants statoriques.

b) Simulation de MSAP avec variation du signe de vitesse entre 1000 à -1000 tr/min

Pour encore tester la robustesse de la commande, nous avons testé la machine pour une variation de vitesse de référence de 1000 à -1000 tr/min) à l'instant $t=3$ sec avec un couple de charge 20Nm. Les résultats de simulation sont présentés par les figures ci-dessous.

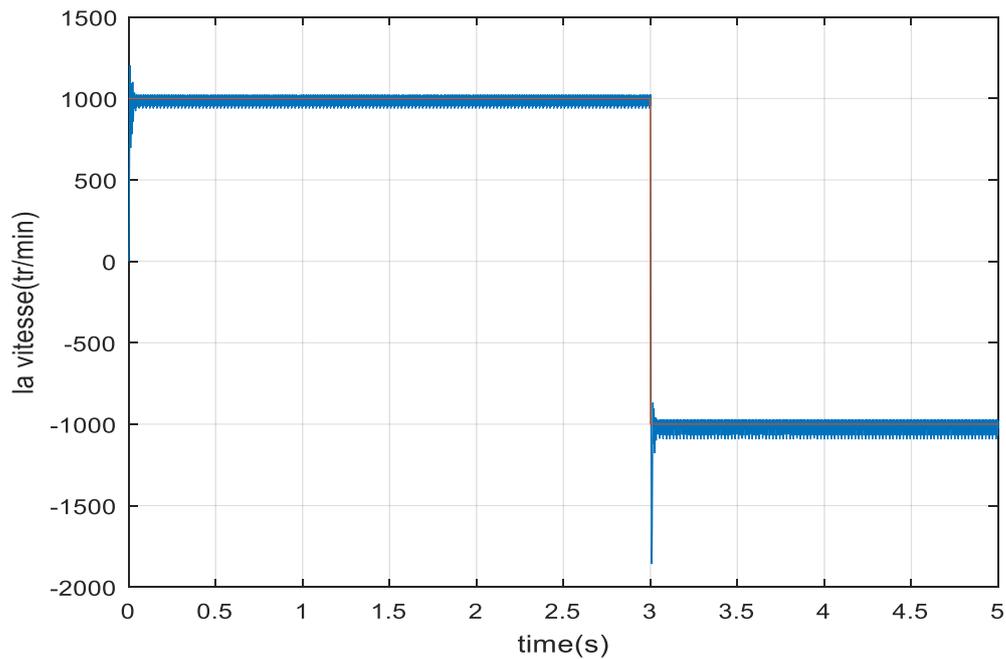


Figure 3.32 Vitesse de rotation de la machine avec sa référence

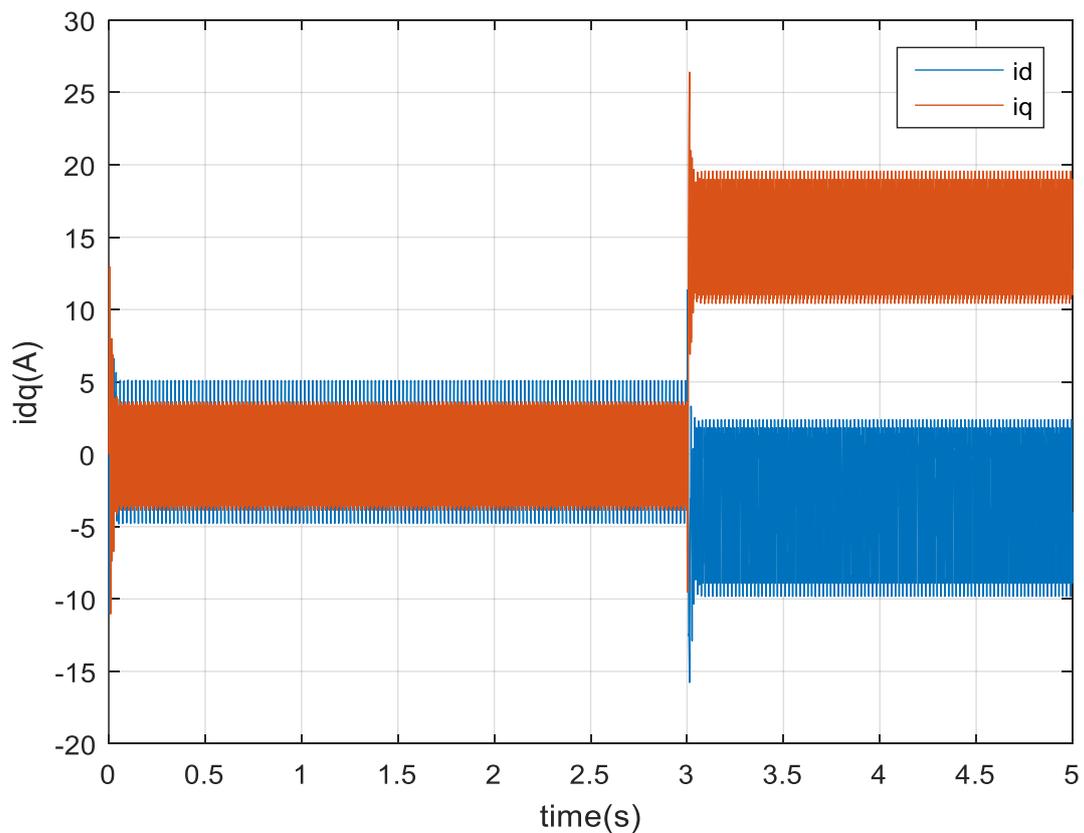


Figure 3.33 Courants statoriques (i_d , i_q) de la MSAP testée pour une référence de vitesse

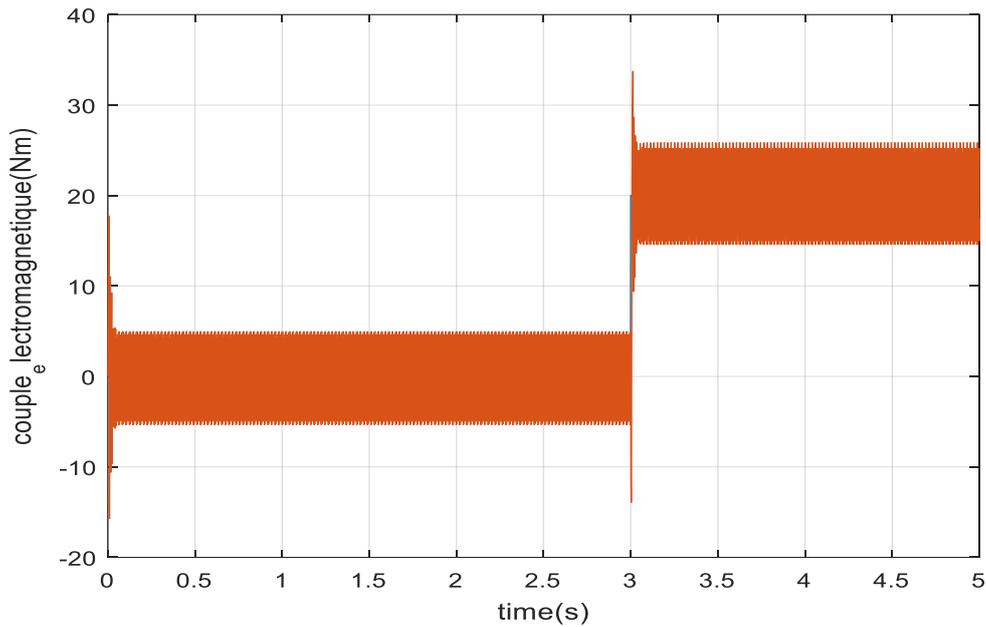


Figure 3.34 Couple électromagnétique de la MSAP ($C_r=20\text{Nm}$ à l'instant 3s)

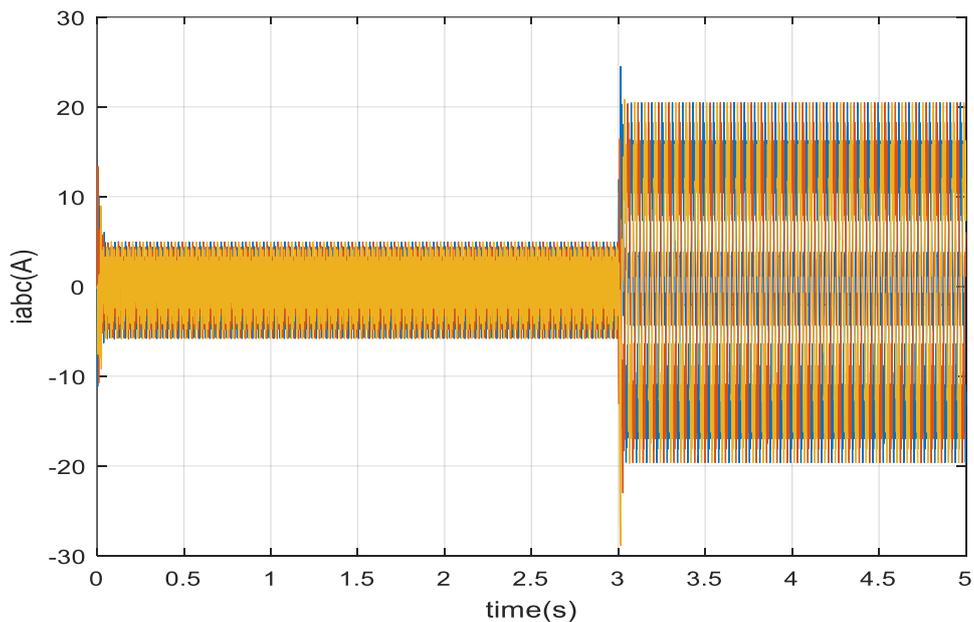


Figure 3.35 Courants statoriques (i_a, i_b, i_c) de la MSAP testée pour une référence de vitesse

Les résultats présentés dans les figures 3.32 à 3.35 montrent la bonne réponse et la stabilité de vitesse avec sa référence, la bonne réponse de découplage des courants i_d et i_q dont l'introduction du couple de charge et que la forme des trois courants statoriques reste toujours sinusoïdale. On peut conclure que l'application de cette technique de commande permet nous d'avoir une vitesse suit parfaitement sa référence et un découplage entre le flux et le couple être réalisé.

III.7.2. MSAP alimentée associé à une turbine éolienne (fonctionnement génératrice)

Dans ce cas nous avons présenté les résultats de simulation de la MSAP associée à une turbine éolienne, Le schéma de simulation illustré par la figure suivante :

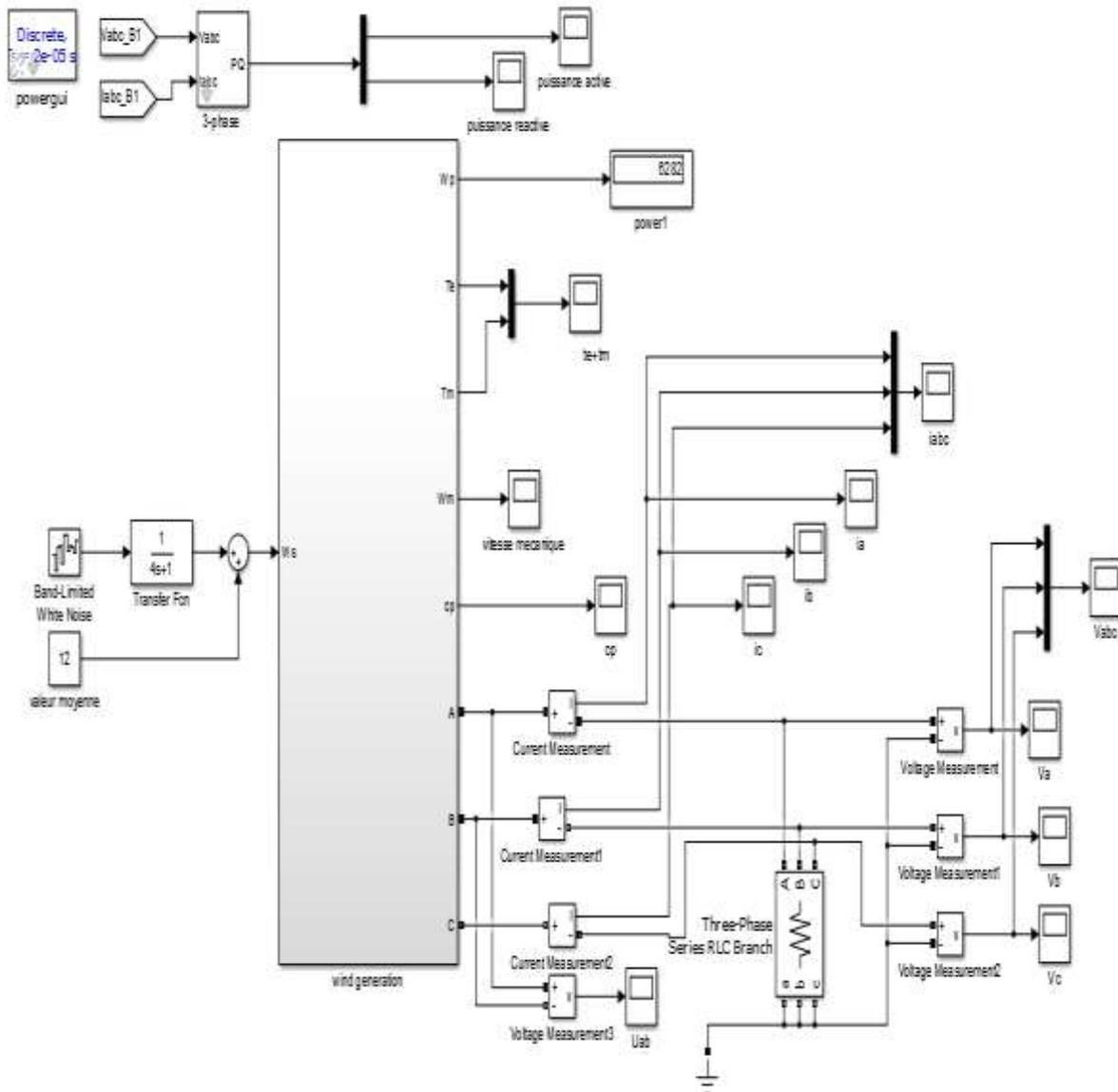


Figure 3.36 Schéma bloc de la commande MASP associée à une turbine éolienne

La vitesse de vent appliquée à la turbine éolienne est présentée dans la figure (3.37), dans cette figure on remarque que la valeur moyenne de vent est de 12ms.

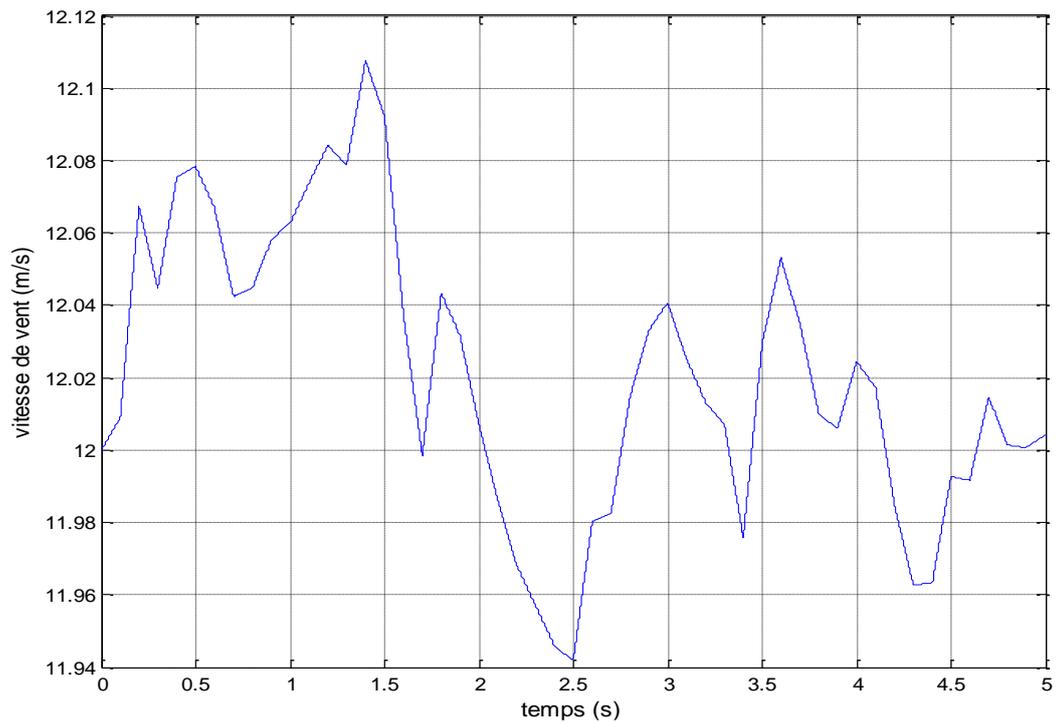


Figure 3.37 Variation de la vitesse du vent

La figure (3.38), présente l'allure du couple de charge qui entraine la MSAP

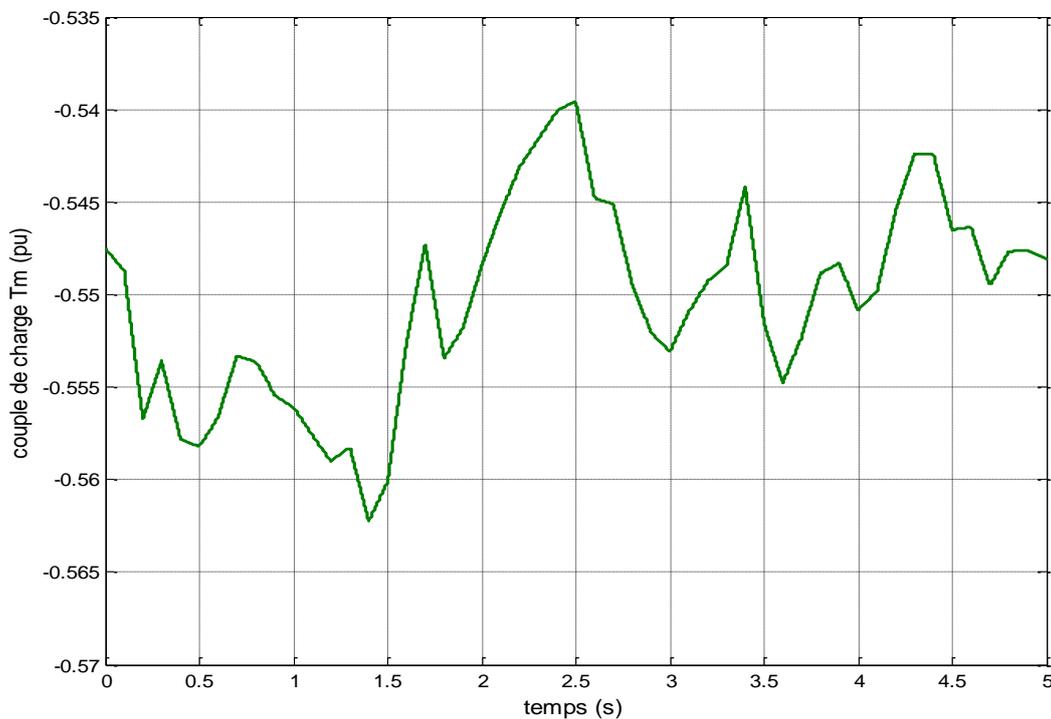


Figure 3.38 Allure de couple de charge Tm

Figure (3.39), présente la vitesse de rotation de la machine en (rad/s), on remarque que la vitesse de la machine après un régime transitoire se stabilise à une valeur de 110rad/s supérieur à sa valeur nominale 78.5ms.

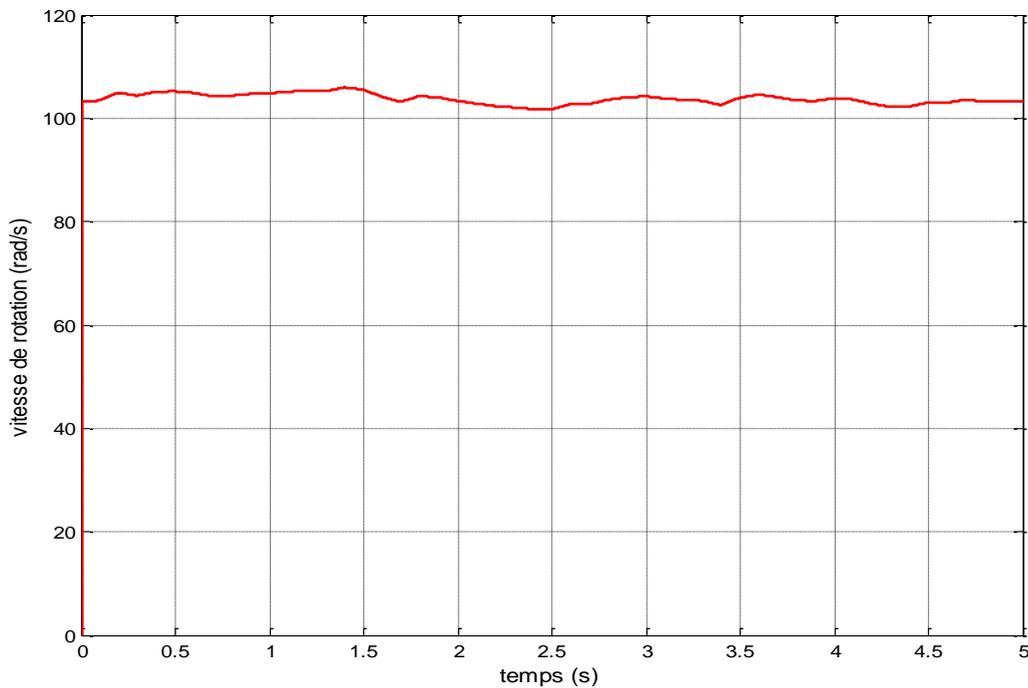


Figure 3.39 Vitesse de rotation de la MSAP

La figure (3.40), présente le couple électromagnétique de la MSAP

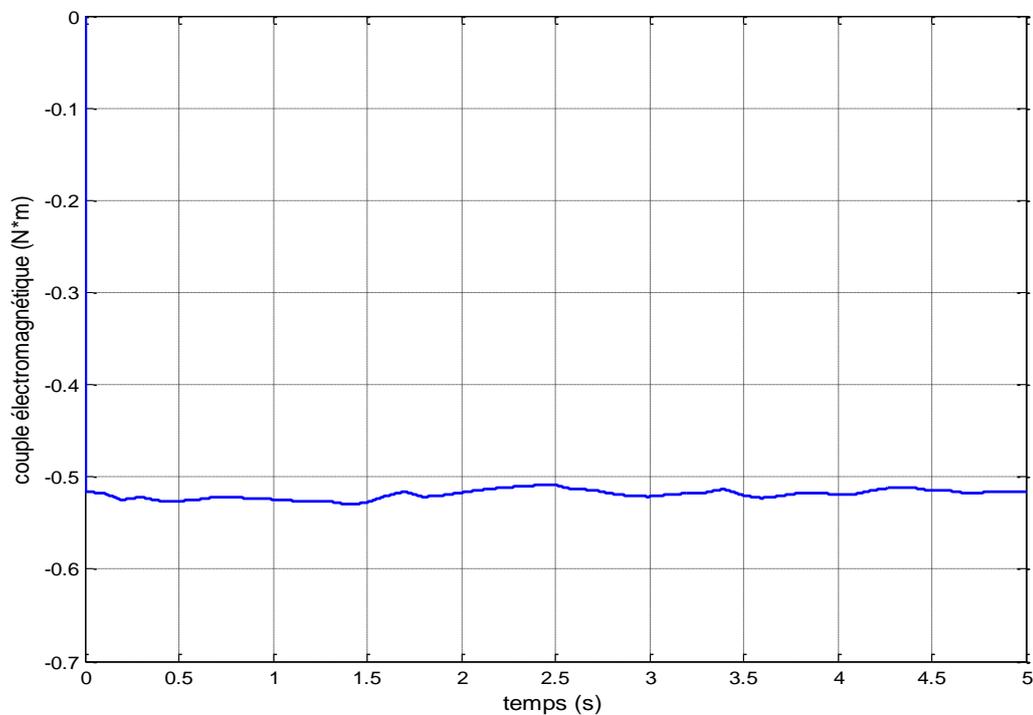


Figure 3.40 Couple électromagnétique de la MSAP

La figure (3.41), présente les courants statoriques de la MSAP qui alimentent la charge

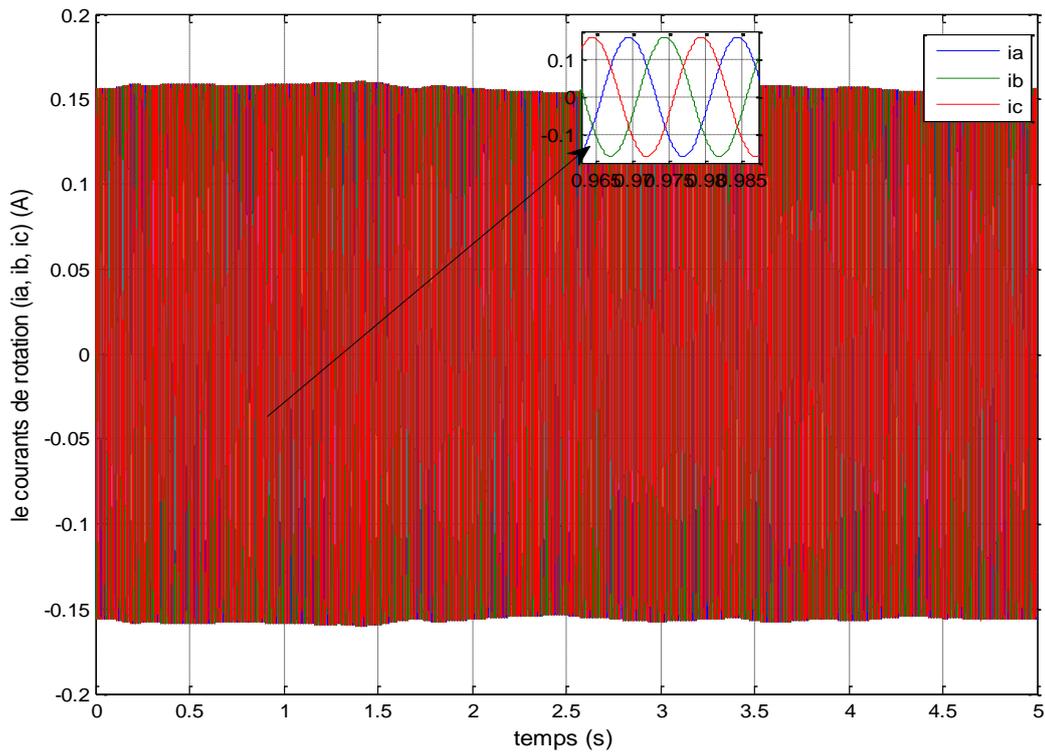


Figure 3.41 Trois courants du stator de la MSAP

La figure (3.42), présente les trois tensions obtenues aux bornes des enroulements du stator de la MSAP.

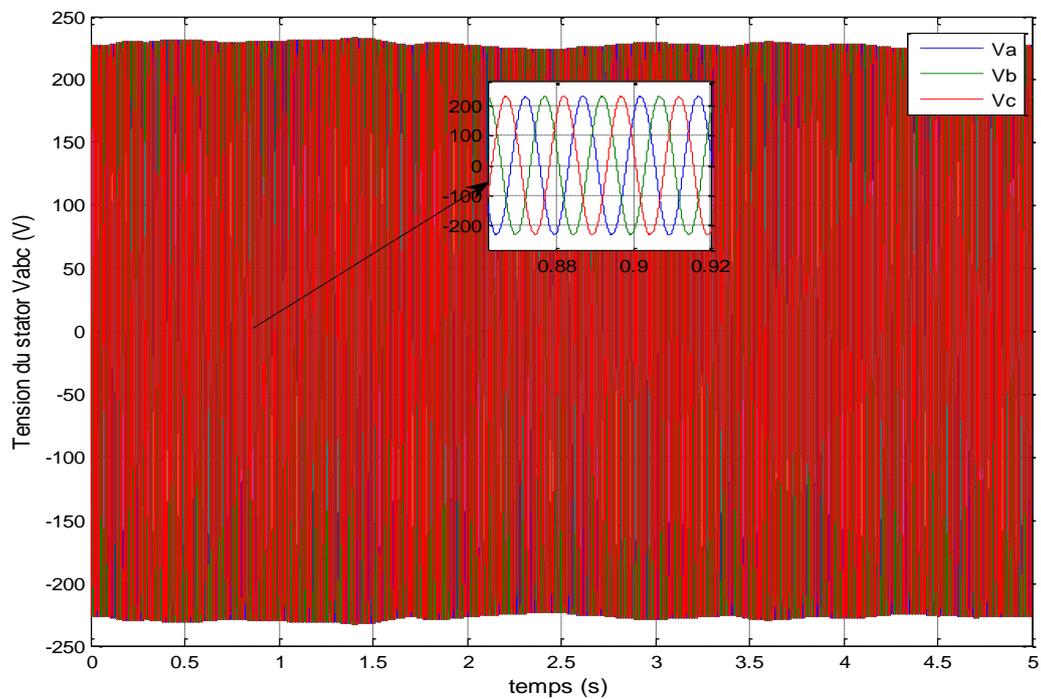


Figure 3.42 Trois tensions du stator de la MSAP

La figure (3.43), présente la superposition entre la puissance mécanique disponible à l'arbre de la machine et la puissance électrique délivrée par cette machine.

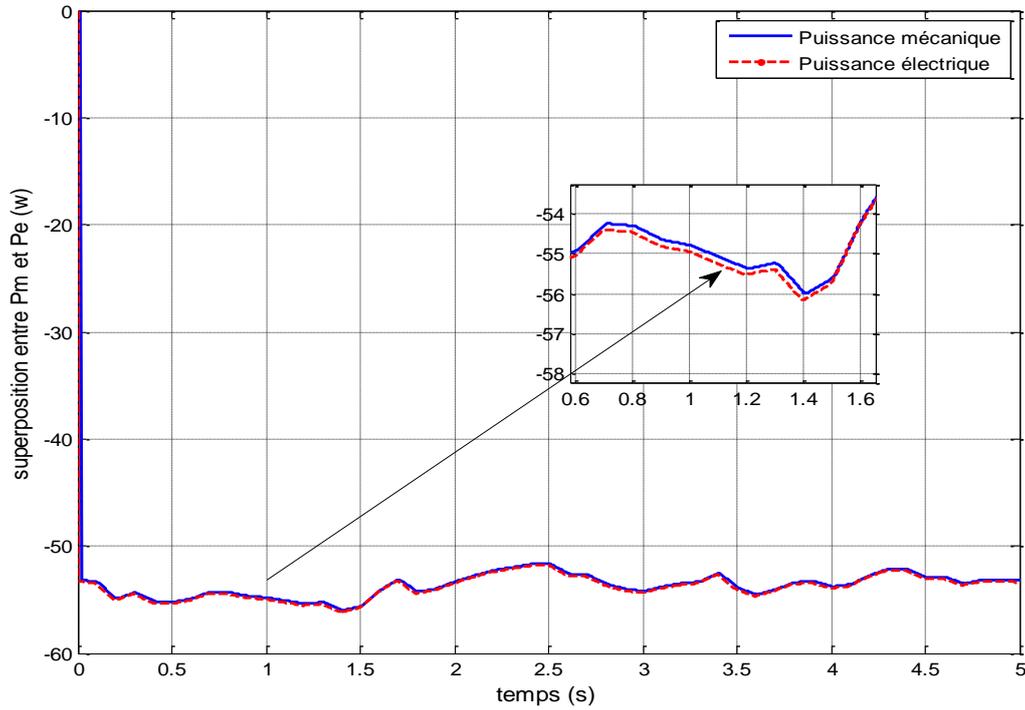


Figure 3.43 Superposition entre la puissance mécanique et la puissance électrique

La figure (3.44), donne la puissance réactive de la machine pour charge R.

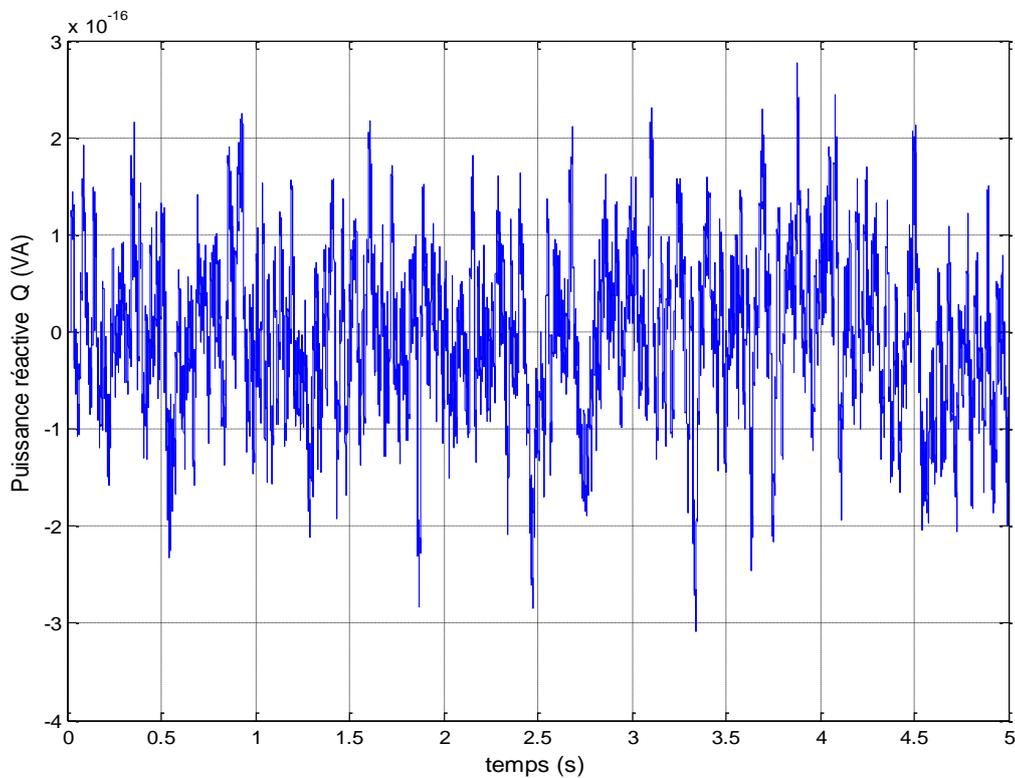


Figure 3. 44. Puissance réactive à la sortie de la MSAP

Dans les résultats de simulation obtenus on constat que les grandeurs mesurés à la sortie de la génératrice, qu'ils s'agit de la forme des tension et des courants sont purement sinusoïdales avec un amplitude de 230 V et de fréquence fondamentale de 50Hz qui correspondant aux grandeurs nominaux du réseau d'alimentation, on remarque aussi que une nette superposition entre la puissance mécanique et électrique de la MSAP et que la puissance active délivrée par la machine est de 55W et que la puissance réactive elle est nulle a cause de la présence seulement de la résistive.

III. 8 Conclusion

Dans ce chapitre, dans la première partie, nous avons présenté une modélisation et simulation de la turbine éolienne dotée d'un régulateur PI. Les résultats obtenus présentent des bonnes performances, la deuxième partie est consacrée à l'étude de l'association de la génératrice synchrone à aimant permanent avec une turbine éolienne. Les résultats obtenus sont acceptables.

Conclusion Générale

Le présent travail s'intéresse à l'étude de la modélisation et la simulation de la génératrice synchrone à aimant permanent et leur domaine d'application

La machine synchrone à aimant permanent, utilisée en mode moteur et génératrices, est devenue de plus en plus attractive car elle répond aux exigences de nouvelles technologies plus particulièrement utilisés dans le domaine d'énergie renouvelable.

Dans ce contexte, nous avons présenté une étude générale sur la machine synchrone à aimant permanent, sa constitution et ces différents types, ainsi que ces avantages et ces inconvénients et domaines d'applications.

Dans le deuxième chapitre, nous avons donné une modélisation et simulation de la machine synchrone à aimant permanent, des essais de simulation cette machine est alimentée directement avec le réseau puis par l'intermédiaire d'un onduleur de tension à deux niveaux.

Puis Nous avons présenté la modélisation et la simulation des grandeurs de la machine dont le fonctionnement moteur, des résultats de simulation de la machine connectée au réseau dans le premier cas et avec un onduleur de tension à deux niveau dans le deuxième cas ont été effectué, la machine est testé pour le fonctionnement moteur.

Finalement, nous avons étudié l'association de la machine synchrone à aimant permanent avec une turbine éolienne le mode génératrice. Un rappel sur les notions les différents éléments de la turbine éolienne et sa modélisation. Les zones de fonctionnement d'une éolienne et les systèmes de régulation de la vitesse sont également décrites. On clôture ce chapitre par une simulation de la turbine associée à une MSAP. Un model sous MATLAB/Simulink et des résultats de simulation de la turbine éolienne ont été développé. Les résultats de simulations obtenus sont présentés et interprètes, ils sont très satisfaisants et montrent les bonnes performances de notre système étudié.

Bibliographie

Références chapitre I

- [1] Bendib Mohammed El Hadi « conception d'une machine à aimant permanent a flux axial » thème magister en électrotechnique Université de Batna 2011
- [2] Annane Adel « Analyse du comportement du moteur synchrone dans les entraînements électriques à vitesse variable » thème magister en électrotechnique, Université BADJI MOKHTAR- ANNABA, Faculté des sciences de l'ingénieur Département d'électromécanique 2009/2010
- [3] Livia Eric Radaozandry « conception et optimisation des machines synchrones avec des modèles analytique en tenant compte de la saturation magnétique » mémoire pour obtention du grade de maitrise ès sciences, université de Laval 2007
- [4] Cardenas W.F Ray G.M Asher « switched reluctance generator for wind energy application » Procieeepesc, 1995
- [5] Luc Moreau « modélisation, conception et commande de génératrice a reluctance variable basse vitesse » thèse de doctorat université de Nantes 2005
- [6] Ounnadi Mohammed « Elaboration d'un model en régime dynamique d'une machine à aimant permanent » mémoire de magister en électrotechnique université de Tizi-Ouzou 2011
- [7] S.Hamache, Dj.Ghemeri « modélisation par éléments finis d'une machine synchrone à Aimant permanent » mémoires d'ingénieur à l'université de Bejaia.
- [8] François Leprince-Ringuet « aimant permanent/ matériaux et application » ingénieur de l'école nationale supérieur de chimie de Paris-technique de l'ingénieur.
- [9] L.Alia, N.Hassani « Classification des machines à aimant permanent » mémoire de DEUA à l'université de Bejaïa, 2006
- [10] Abdelhalim Tlemssani « contribution à l'application des commandes adaptives par les systèmes floue a une machines synchrone a aimant permanent alimente par un convertisseur multicellulaire série » Janvier 2006
- [11] Messaadi Mouna « commande backstepping appliquée à la machine synchrone à aimant permanent » pour l'obtention du diplôme de magister en électrotechnique. Université Hadj Lakhdar-Batna ,2012

Référence chapitre II

- [1] Guy, S. Eddie, S. " Modélisation et commande des moteurs triphasés». Ellipses, Première Edition 2000.
- [2] G. Sturtzer, " Modélisation et Commande des Moteurs Triphasés", Ellipses Edition Markty. S. A, 2000.

- [3] Hussein Dogan « Méthodologie de Conception des Machines Synchrones à Aimants Permanents - Application au Véhicule Electrique avec Chargeur Rapide Embarqué » thèse de doctorat université de Grenoble 07/08/2006
- [4] Toufik Rekioua « contribution à la modélisation et à la commande vectorielle des machines synchrones à aimants permanents » Doctorat de l'I.N.P.L, Institut national de polytechnique de lorraine 1991
- [5] R. Abdessemed, "Modélisation et simulation des machines électriques", Presse de Université de Batna, 2011

Références chapitre III

- [1] M. Muralikrishnan and V. Lakshminarayana, "Hybrid (Solar and Wind) Energy System for Rural Electrification", ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 3, No. 5, October 2008.
- [2] F. POITIERS « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne - Machine asynchrone à cage autonome - Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau » Thèse de Doctorat Université de Nantes, 2003
- [3] L. H. Hansen, L. Helle, F. Blaabjerg, E. Ritchie, S. Munk-Nielsen, H. Bindner, P. Sorensen and B. Bak-Jensen, « Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines », Risø national laboratory, Roskilde, Denmark, december 2001.
- [4] REDJEM Radia ; Étude : (d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne Soutenu le: 04 /07/2009) [Présenté en vue de l'obtention du diplôme de magistère en Electrotechnique].
- [5] Energies Renouvelables. <http://www.energies-renouvelables.org>
- [6] confort & domotique dossier sur les éoliennes 4ème (Dossier_eolienne.pdf1793437396)
- [7] Historique des éoliennes.
<http://www.lei.ucl.ac.be/multimedia/eLEE/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/index.htm>
- [8] A. MIRECKI « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » Thèse de Doctorat à laboratoire d'électrotechnique et d'électronique industrielle de L'ENSEEIH, Université de Toulouse 5 Avril 2005.
- [9] B. Denis, V. Paredes, « L'énergie Eolienne », Projet De Machines thermiques, Insa lyon, pp.34-35, 2004
- [10] S. Taraft, D. Rekioua et D. Aouzellag, « Système de Stockage Inertiel Dédie aux Eoliennes Connectées au Réseau », 5th International Conference on Electrical Engineering 27 - 29 October 2008
- [11] www.enr.fr - www.fee.asso.fr dernière révision du document : mai 2010
- [12] L. Moreau, « Modélisation conception et commande de génératrice à réluctance variable basse vitesse », thèse de doctorat, de l'université de Nantes, le 9 décembre, 2005.

- [13] Claudio Rossi, Piero Corbelli, Gabriele Grandi - WCVT Continuously Variable
- [14] J. G. Sloopweg , "Representing distributed Ressources in Power System Dynamics Simulations", Proceedings of the IEEE 2002 Summer Meeting, 21 - 25 July 2002, Chicago, USA.
- [15] J.P. Hautier, J.P. Caron, " Convertisseurs statiques, méthodologie causale de modélisation et de commande ", Editions Technip, 1999, ISBN 2-7108-0745-9.
- [16] S. El Aimani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse de doctorat, ENSAM Lille, 2004
- [17] S. El Aimani, 'Modélisation de Générateurs Eoliens à Vitesse Variable Connectés à un Bus Commun ', Forum International sur les Energies Renouvelables, Tétouan, Maroc, pp. 356 – 362, 2002.
- [18] Herve Heamart Joseph et Martin. Conception d'une éolienne (HAWT) par approche aérodynamique. INCI 3101-22, Octobre, 2001.
- [19] L.Leclercq. Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes, Thèse de doctorat. Ecole doctorale sciences pour l'ingénieur, Université des Sciences et Technologie de Lille, 2004.
- [20] F. Labrique, H. Buyse, G. Séguier, " Les convertisseurs de l'électronique de puissance, Commande et comportement dynamique ", Tome 5, Technique et Documentation - Lavoisier, 1998.
- [21] B. Robyns, Y. Pankow, L. Leclercq, B. Francois, " Equivalent Continuous Dynamic Model of Renewable Energy Systems ", 7th International Conference on Modeling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems : Electrimacs 2002, CD, 18-21 Aout 2002, Montreal, Canada
- [22] Transmission for Wind Energy Conversion System - Dept. of Electrical Engineering – University of Bologna - 2
- [23] O.Gergaud, B. Multon, H.Ben Ahmed, «Modélisation d'une chaîne de conversion éolienne», Electronique du Futur, 2001, pp.17-22. Nancy. Novembre 2001.
- [24] hassini née belghitri houda, modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien photovoltaïque 'université abou-bakr belkaid de Tlemcen faculté de sciences' 2010.
- [25] M.M. Hand, Variable-Speed Wind Turbine Controller Systematic Design Methodology: A Comparison of Non-Linear and Linear Model-Based Designs. Soutenu July 1999
- [26] Furat Abdal Rasul Abbas and Mohammed Abdulla Abdulsada, Simulation of Wind-Turbine.
- [27] Khaled Ferkous ' ' Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne ' ' 2009.
- [28] Amor KHLAIEF « Contribution `a la Commande Vectorielle sans Capteur mécanique des Machines Synchrones `a Aimants Permanents (MSAP) Automatique » MARSEILLE UNIVERSITE, 2012.

ANNEXE (A)

A.1. Transformation de Park

L'équation qui traduit le passage du système triphasé au système biphasé (d,q) est donnée par :

$$[X_{dqo}] = [p(\theta)][X_{abc}] \quad (\text{A.1})$$

Avec :

$[p(\theta)]$: La matrice de passage direct de Park,

X : Représente les variables considérées de la machine (tensions, courants ou flux),

X_0 : La composante homopolaire, ajoutée pour rendre la transformation réversible, elle est nulle lorsque le système est en équilibre.

$$[p(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta & -\sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

A.2. Transformation inverse de Park

La transformée de Park inverse est nécessaire pour revenir aux grandeurs triphasées, elle est définie par :

$$[X_{abc}] = [p(\theta)]^{-1}[X_{dqo}] \quad (\text{A.3})$$

Et la matrice de passage inverse de Park $[p(\theta)]^{-1}$ est donnée par :

$$[p(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \\ \cos \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

*ANNEXE (B)***Paramètres de simulation****B.1 Paramètres de la turbine et de vent**

Lamdaopt = 8.1;

Rtr=44;

c1=0.5176;

c2=116;

c3=0.4;

c4=5;

c5=21;

c6=0.0068;

fa=0.0;

J=50;

G=42;

kpv=1.64e5;

kiv=1.3456e7;

B.2 Paramètres du moteur à courant continue

Pour lamdaopt =8;

Pour Rtr =1.5;

fa=0.2;

Jt=50;

G=42;

kpv=1.9777;

kiv=0.5357;

kpi=1.9777;

kii=0.5357;

R=2.58;

L=0.028;

J=0.1;

b=0.01;

Kphi=0.006;

lf=156;

rf=281.3;

V=220;

Cr=0;

B.1 Paramètres de la MSAP

Puissance nominale (Pn)= 1.1 kW

Vitesse nominale (ω_r)= 750 tr/min

Tension nominale (Vn)= 220 V

Résistance statorique (Rs)= 4 Ohms

Nombre de paires de pôles (P)= 4 pôles

Flux des aimants (ϕ_s)= 0.0003035 Wb

Fréquence nominale (F)= 50 Hz

Facteur de puissance= 0.83

Inertie du moteur (J)= 0.09 10⁻⁵ N.m.s²/rad

Inductance statorique direct (Ld)= 2.5 mH

Inductance statorique quadratique (Lq)= 2.5 mH

Coefficient de frottement (f)=0