

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A.MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Projet de Fin d'Etude

Pour l'obtention du diplôme de Master en Electromécanique
Option : Electromécanique

Préparé par :

AZEGAGH Hassen

Thème :

Stockage inertiel à base de la machine synchrone à aimants permanents

Soutenu devant le jury composé de :

Président : Mr. S.TARAFT

Examineur: Mr. R.BABOURI

Encadreur :
Mr. S.TAMALOUZT

Année Universitaire : 2017/2018

Remerciements

Ce travail a été réalisé à l'université A. Mira de Bejaia sous la direction du monsieur TAMALOUZT Salah.

Je saisis cette occasion pour exprimer ma profonde gratitude et mes remerciements les plus sincères à mon promoteur Monsieur TAMALOUZT Salah pour la confiance qu'il m'a accordée. Sans ces compétences scientifiques, sa grande expérience, ses remarques constructives, ses conseils et encouragements, ce travail n'aurait pas pu être mené à terme.

En acceptant de présider le jury de mon mémoire, Monsieur TARAFT Saci, Qu'il trouve ici toute ma gratitude.

J'adresse mes respectueux remerciements à Monsieur BABOURI Rabah. qui a bien voulu examiner et juger mon travail.

J'adresse mes respectueux remerciements à tous mes amis, plus particulièrement à messieurs ZIANE Djamel et MEZZAI Nabil qui m'ont énormément aidé.

J'adresse à ma famille ma reconnaissance la plus profonde pour leur amour, leurs encouragements et leur soutien dans les moments les plus difficiles.

J'exprime toute ma gratitude à ma petite famille, mon épouse qui m'a soutenu moralement et qui a partagé avec moi les bons et les moins bons moments de ce mémoire. Je remercie également mon ange **ASMA** et je lui présente mes excuses pour mes absences.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A ma chère femme que je remercie énormément pour son soutien, patience et sacrifice. Que dieu la protège.

A ma chère fille Asma.

A mes chers parents.

A mon frère.

A mes sœurs.

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau I.1 Moyens de stockage de l'électricité à court terme.....	2
Tableau I.2 Moyens de stockage de l'électricité à long terme.....	2

Liste des figures

Liste des Figures

Chapitre I

Figure.I.1 Principe de stockage gravitaire hydraulique [5].....	4
Figure. I.2 Système stockage thermique [5].....	5
Figure.I.3 Stockage à air comprimé en caverne [5].....	5
Figure. I.4. Super condensateur [6].....	6
Figure.I.5 Dispositif de stockage d'énergie magnétique par bobine Supraconductrice [6].....	7
Figure. I.6 Principe d'un accumulateur électrochimique [6].....	8
Figure. I.7 Système de stockage inertiel [8].....	8
Figure. I.8 Différents formes de volants [4].....	9
Figure.I.9 Deux types de SISES [9] : a-SISE à volant lent ; b- SISE à volant rapide.....	10
Figure. I.10 Dispositif de stockage électromécanique d'énergie [2].....	11
Figure. I.11 Schéma du système éolien+ SISE.....	12

Chapitre II

Figure.II.1 : Machine synchrone à aimants permanents montés en surface.....	15
Figure.II.2 : Machine synchrone à aimants permanents insérés.....	16
Figure.II.3 : Machines synchrones à aimants permanents enterrés.....	16
Figure. II.4 Axes de repères classiques. Machine synchrone à aimants permanents.....	18
Figure. II.5 Axes de repères dq . Machine synchrone à aimants permanents.....	19
Figure. II.6 Diagramme vectoriel de tensions en régime moteur ($\cos \varphi > 0$ et $\delta > 0$).....	21
Figure. II.7. Représentation du redresseur à diodes.....	24
Figure. II.8. Représentation de la tension redressée.....	25
Figure. II.9. Onduleur triphasé.....	26

Chapitre III

Figure III.1. Découplage par compensation.....	30
Figure III.2. Commande découplée.....	30
Figure III.3. Représentation de la commande par PI.....	31
Figure III.4 : commande des courants en deux boucles indépendantes.....	32
Figure III.5 : Boucle de régulation de vitesse	34
Figure III.6 : Schéma global de simulation	37

Figure III.7 : Puissance de la MSAP et celle de référence	38
Figure III.8 : Vitesse de la MSAP et sa référence	38
Figure III.9 : Le courant I_d et sa référence	39
Figure IV.10 : Le courant I_q et sa référence.....	39
Figure III.10 : Couple électromagnétique et couple résistant de la MSAP	40
Figure III.11 : Tension et courant d'une phase statorique de la MSAP	40
Figure III.12 : Tension et courant du SISE (stockage d'énergie)	41
Figure III. 13 : Tension et courant du SISE (restitution d'énergie)	41
Figure III.14 : Courants des phases statorique.....	42

Sommaire

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Notations et abréviations

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur le stockage d'énergie	2
Introduction.....	2
I. Systèmes de stockage d'énergie.....	2
I.1. Techniques de stockage d'énergie électrique.....	4
I.1.1. Stockage sous forme gravitaire.....	4
I.1.2. Stockage sous forme thermique.....	4
I.1.3. Stockage sous forme de pression.....	5
I.1.4. Stockage électrostatique (Condensateurs et super condensateurs).....	5
I.1.5. Stockage électromagnétique.....	6
I.1.6. Accumulateurs électrochimiques.....	7
I.1.7. Stockage par volant d'inertie.....	8
I.1.7.1. Avantages et inconvénients de stockage par volant d'inertie.....	10
I.1.7.2. Présentation d'un accumulateur électromécanique.....	10
I.1.8. Comparaison entre les modes de stockage présentés.....	11
Conclusion.....	12
Chapitre II : Généralités et modélisation de la machine synchrone à aimant permanent	13
Introduction	13
II. Présentation du moteur synchrone à aimants permanents (MSAP)	13
II.2 Principe de fonctionnement de la MSAP.....	13
II.2.1 Différentes structures de machines à aimants permanents	14
II.2.2 Machines à aimants permanents à flux radial	14
II.2.3 Machines à aimants permanents à flux axial.....	15
II.3 Avantages de la MSAP	16
II.4 Inconvénients de la MSAP	16
II.5 Les domaines d'application de MSAP	16
II.6 Modélisation mathématique de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP).....	17
II.6.1 Modèle triphasé	17
II.6.1.1 Equations électriques.....	17

II.6.1.2 Equations magnétiques	18
II.6.1.3 Equation mécanique	19
II.6.2 Modèle biphasé	19
II.6.2.1 Equations électriques dans le repère de Park	20
II.6.2.2 Equations de flux	21
II.6.2.3 Equation du couple électromagnétique.....	21
II.7 Convertisseurs statique.....	22
II.7.1 Modélisation du redresseur	22
II.7.2 Modélisation du filtre.....	23
II.7.3 Modélisation de l'onduleur.....	24
Conclusion	26
Chapitre III : Commande vectorielle de la MSAP associé au système de stockage.....	27
Introduction.....	27
III.1. Commande vectorielle de la MSAP alimentée en tension.....	27
III.1.1. Principe de la Commande vectorielle.....	27
III.1.2. Découplage par compensation.....	28
III.1.3. La régulation.....	30
III.1.3.1. Conception des Régulateurs.....	30
III.1.4. Calcul des régulateurs.....	30
III.1.4.1. Régulateur des Courants.....	30
III.1.4.2. Calcul du Régulateur de vitesse.....	33
III.2. Avantages et inconvénients de la commande vectorielle.....	35
III.2.1. Avantages de la commande vectorielle.....	35
III.2.2. Inconvénients de la commande vectorielle.....	35
III.3. Schéma global de simulation	35
III.3.1 Simulation et interprétation des résultats	36
Conclusion et perspectives.....	42
Conclusion générale.....	43

Annexes

Références bibliographiques

Introduction générale

Introduction générale

La production d'électricité doit répondre à la demande, c'est pourquoi le stockage d'énergie devient une nécessité, il permet de réaliser un équilibre entre la production et la consommation.

Le stockage d'énergie est connu depuis l'antiquité, son rôle est de stocker l'électricité pendant les périodes de faible demande pour la restituer aux moments de forts appels de puissance [1]. Il signifie dans ce mémoire un moyen de transformer une énergie d'une forme à une autre pour la restituer et la réutiliser plus tard.

Il existe aujourd'hui différentes solutions de stockage telles que le stockage dans les piles à combustible, les batteries de stockage, stockage par volant d'inertie...etc. Ce dernier permet de lisser la puissance débitée sur le réseau.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude d'un système inertiel de stockage d'énergie à base d'une machine synchrone à aimants permanents et pour cela nous avons divisé le travail comme suit :

Le premier chapitre dans ce mémoire est une généralité sur les systèmes de stockage d'énergie électrique, on va parler sur les différentes formes de stockage de cette énergie.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents, ainsi que les convertisseurs d'électronique de puissance.

Le troisième chapitre est destiné à la commande vectorielle associé au système de stockage inertiel et la présentation de la simulation sous l'environnement MATLAB/Simulink, et l'interprétation des résultats obtenus.

Enfin, on termine par une conclusion générale et éventuellement quelques perspectives.

Chapitre I
Généralités sur le stockage
d'énergie

Introduction

Ce présent chapitre est consacré à la présentation des différents modes de stockage. Notamment, le stockage inertiel et ses constituants. Une brève comparaison entre les systèmes de stockage sera présentée. Le stockage d'énergie consiste à préserver une quantité d'énergie pour une utilisation ultérieure [1].

I. Systèmes de stockage d'énergie

La notion de stockage d'énergie est impérativement associée à la production d'électricité. Cette dernière n'est pas une forme d'énergie facile à stocker, son stockage passe plus souvent par une forme d'énergie intermédiaire quelconque, (gravitaire, de compression, électrochimique, électrostatique, électromagnétique, cinétique, thermique, etc....) transformable en second temps en électricité. Il y a deux types de stockage à envisager :

- Stockage à court terme : (temps de stockage inférieur à 10 minutes) ce type de stockage est utilisé pour se prémunir contre les incidents potentiels sur la qualité de la tension, donc il permet de lisser les fluctuations de puissance, réglage de la tension, de la fréquence (réglage primaire) et permettre l'îlotage (phase transitoire) ;
- Stockage à long terme : (temps de stockage supérieur à 10 minutes) ce type de stockage est utilisé pour répondre aux pics d'appels de puissance aux heures chargées du réseau ; et en absence du vent. Il permet de régler la tension, la fréquence (réglage primaire et secondaire), adaptation aux réseaux d'énergie existant et planification à long terme de la production en fonction des besoins.

Les principaux moyens de stockage de l'électricité à court et à long terme sont donnés dans les tableaux I.1 et le tableau I.2.

Tableau I.1 Moyens de stockage de l'électricité à court terme [1]

Stockage à court terme	Energie intermédiaire	Système de Stockage	Rendement	Densité de stockage kW/m ³	Type de cycle ou délai de décharge
	Cinétique	Volant d'inertie	0,7 à 0,9	10 à 100	Quelques dizaines de minutes
	Electromagnétique	Courant permanent en bobine	0,9 à 0,95	0,1 à 5 dans la bobine	Quelques millisecondes à Quelques secondes
	Electrostatique	Supraconductrice Condensateur classique	-----	< 0,1	Fraction de millisecondes
	Electrostatique	Super condensateur à électrolyte double couche	0,9 à 0,95	1 à 10	Quelques secondes à quelques dizaines de secondes.

Tableau I.2 Moyens de stockage de l'électricité à long terme [1]

Stockage à long terme	Gravitaire	Pompage Hydraulique	0,73	2 (pour 1000 mètres de chute)	Quotidien hebdomadaire ou saisonnier
	Thermique	Stockage de chaleur latente ou sensible	0,65 à 0,85	20 à 150	Quotidien
	De pression	Compresseur d'air	0,7	2 à 5	Quotidien ou hebdomadaire
	Chimique	Batteries d'accumulateur électrochimique	0,7 à 0,9	5 à 150	Quelques jours à quelques dizaines de minutes
	Chimique	Stockage H ₂ par électrolyse et pile à combustible	<0,55	5 à 150	Quotidien à saisonnier

Il existe différents modes de stockages d'énergie, et diffèrent principalement par les caractéristiques suivantes [1] :

- La puissance massique (en W/kg) ;
- L'énergie massique (en Wh/kg) ;
- Le nombre de cycles de fonctionnement ;
- Le coût ;
- Le rendement énergétique.

I.1. Techniques de stockage d'énergie électrique

I.1.1. Stockage sous forme gravitaire

Cette technique est ancienne et nommée aussi stockage par pompage hydraulique. Ce système de stockage est constitué de deux grands réservoirs situés à des hauteurs différentes, l'eau est pompée du réservoir inférieur au réservoir supérieur. L'eau pompée revient au bassin inférieur selon la demande toute en traversant une ou plusieurs turbines qui transforment l'énergie potentielle de l'eau en énergie mécanique, cette dernière est régie par la formule ($w=mgh$), puis des générateurs entraînés par ces turbines transforment l'énergie mécanique en énergie électrique voir (figure I.1).

Cette technique de stockage nous fournis jusqu'à 1000 MW, mais ils sont conditionnés par les contraintes géographiques, géologiques, environnementales et le coût assez élevé de leur construction [2]. Ce dispositif ne peut pas être implanté au voisinage des centres de consommation et ils sont difficilement transportable [3].

En général, le rendement associé à cette technique de stockage est de l'ordre 75% [4].

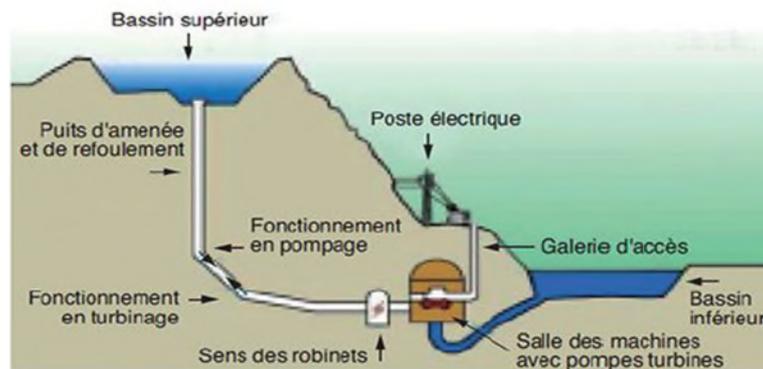


Figure.I.1 Principe de stockage gravitaire hydraulique [5]

I.1.2. Stockage sous forme thermique

Le principe de stockage thermique consiste à chauffer un corps (sodium, sel, eau sous pression, etc...) qui ne subit pas de changement d'état pendant la phase d'accumulation ; la chaleur est ensuite récupérée pour produire de la vapeur d'eau qui entraîne un groupe turboalternateur. L'utilisation de l'eau comme fluide de stockage est la seule envisagée pour les stockages de grande capacité énergétique, mais la production d'électricité implique des températures élevées, supérieures à 200 °C, de sorte qu'il est impossible de stocker cette eau dans des nappes captives car le terrain subirait des modifications irréversibles. Il faut donc utiliser des cavités étanches de grand volume, creusées dans la roche voir (figure I.2).

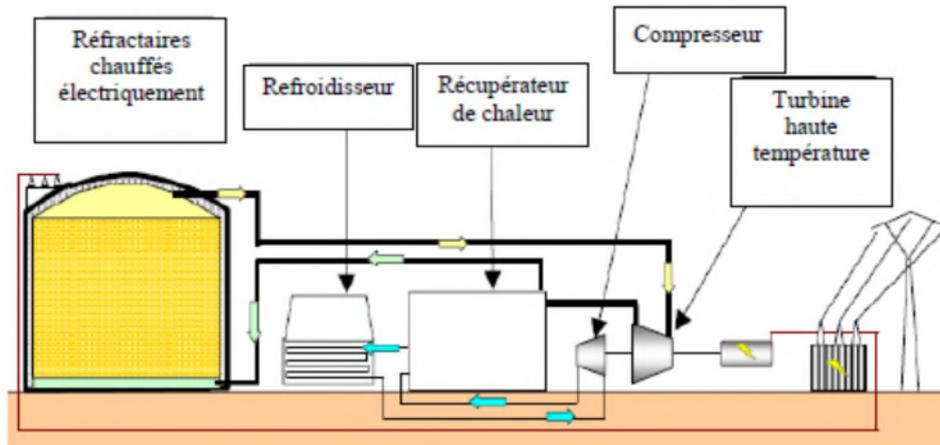


Figure.I.2 Système stockage thermique [5]

I.1.3. Stockage sous forme de pression

Ce type de stockage, peut être considéré comme dérivant du stockage par pompage hydraulique. L'unité de stockage d'air comprimé comprendra un système de réservoirs et une turbine à gaz avec compresseur pouvant être déconnecté et faisant partie d'un système moteur générateur. L'air comprimé doit être stocké à forte pression (40 à 70 bar) et à une température proche de l'ambiante, cela afin de réduire son volume massique et de diminuer ainsi la capacité du réservoir. Cependant, les volumes stockés restent très importants [6] voir (figure I.3).

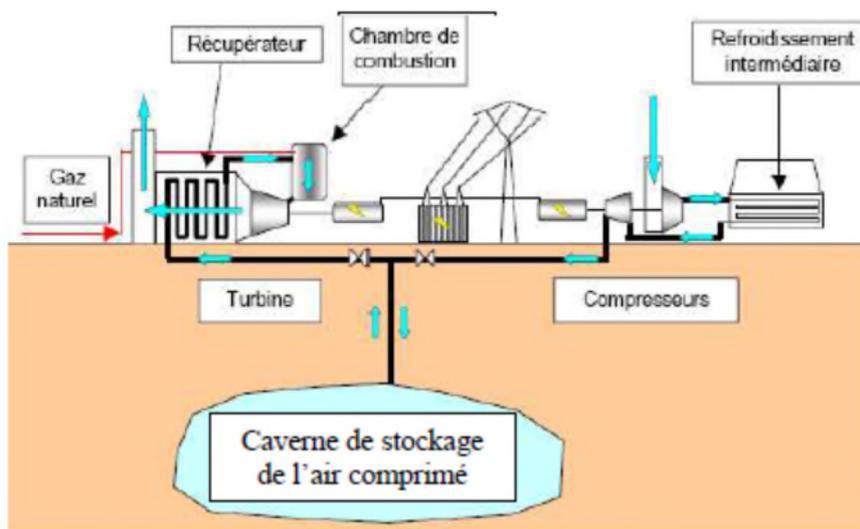


Figure.I.3 Stockage à air comprimé en caverne [5]

I.1.4. Stockage électrostatique (Condensateurs et hyper condensateurs)

L'énergie emmagasinée dans un condensateur (W_c) est exprimée par :

$$W_c = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2 \quad (I.1)$$

Avec :

C : Capacité du condensateur [F] ;

V : Tension appliquée aux bornes du condensateur.

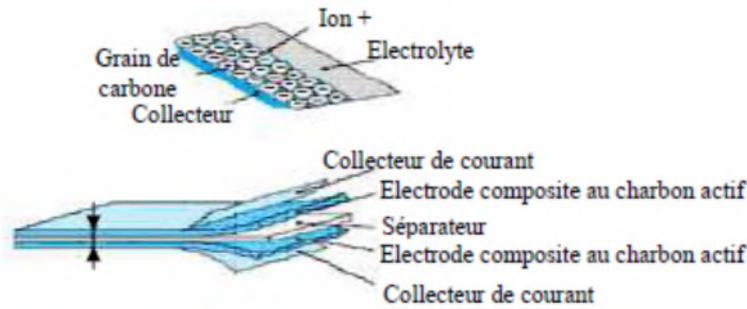


Figure. I.4. Super condensateur [6]

Cette énergie est limitée par le claquage diélectrique, d'où sa capacité de stockage est réduite

quelques centièmes à quelques dixièmes de Wh/L). Classiquement, les condensateurs performants d'aujourd'hui montent en tension jusqu'à $300 V$ par micromètre d'épaisseur de film, tandis que les temps de décharge peuvent être limités à quelques microsecondes.

I.1.5. Stockage électromagnétique

Une bobine parcourue par un courant électrique (I) engendre une distribution de champ magnétique dans l'espace d'induction B . L'énergie magnétique W_L est donnée par l'expression suivante [6] :

$$W_L = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 = \int \frac{B^2}{2\mu_0} dv \quad (I.2)$$

Avec :

L , v sont respectivement inductance de la bobine et le volume magnétisé.

Le dispositif de stockage d'énergie magnétique met en jeu une bobine supraconductrice, source de courant continu, connectée au réseau 50 Hz via un convertisseur à électronique de puissance. Les principaux éléments de ce dispositif sont représentés sur la (figure I.5) [6].

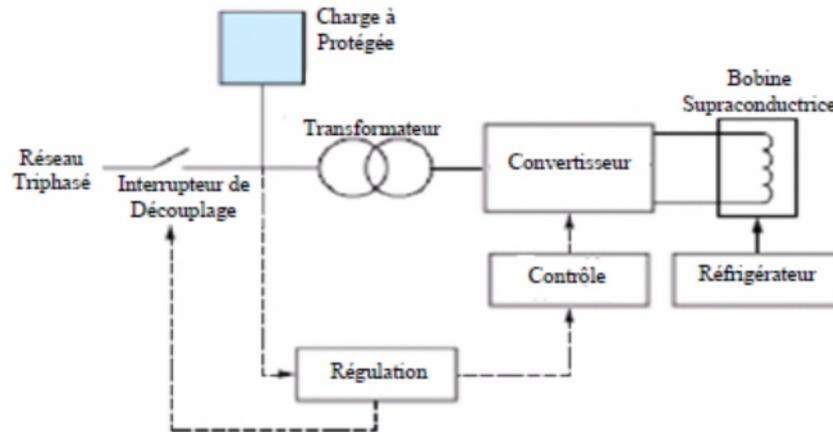


Figure.I.5 Dispositif de stockage d'énergie magnétique par bobine Supraconductrice [6]

Ces systèmes ont la faculté de pouvoir décharger la totalité de l'énergie emmagasinée, à l'inverse des batteries. Ils sont utilisés dans des systèmes qui fonctionnent à plein temps avec une charge et décharge totale et un grand nombre de cycles. Les installations peuvent être réalisées à l'intérieur de bâtiments spécialisés, ou enterrées.

I.1.6. Accumulateurs électrochimiques

L'énergie électrique peut être emmagasinée dans des accumulateurs, sous forme d'énergie chimique. Ces accumulateurs sont constitués d'un couple électrochimique, composé de deux électrodes séparées par un électrolyte et aux interfaces desquelles interviennent des réactions d'oxydation ou de réduction qui cèdent ou absorbent des électrons. Les ions ainsi générés circulent dans l'électrolyte [3]. Pour avoir une grande énergie stockée, il faut un grand nombre d'électrons échangés par mole, ainsi qu'une réaction entre un élément très oxydant et un autre très réducteur [4].

La décharge d'un accumulateur fournit moins d'énergie électrique que sa charge, car les réactions électrochimiques s'accompagnent d'une assez forte dégradation en chaleur. La (figure I.6) nous montre le Principe d'un accumulateur électrochimique

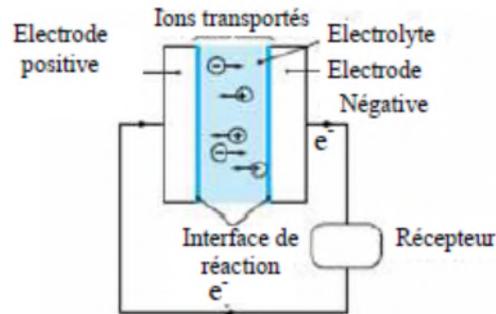


Figure.I.6 Principe d'un accumulateur électrochimique [6]

I.1.7. Stockage par volant d'inertie

Un volant d'inertie est une masse mouvante, circulaire ou non, tournant à une vitesse de rotation Ω_{vol} autour d'un axe passant par son centre de gravité possède une quantité d'énergie cinétique W_c de valeur :

$$W_c = \frac{1}{2} \cdot J_{vol} \cdot \Omega_{vol}^2 \quad (I.3)$$

Le fonctionnement de système de stockage inertiel est basé sur la conversion de l'énergie sous forme cinétique, qui est reconvertie en cas de besoin en énergie électrique. Pour cela un volant d'inertie est entraîné par une machine électrique réversible fonctionnant dans un premier temps, en moteur pour fournir de l'énergie à la masse inertielle. Le système d'entraînement désaccouplé, le volant d'inertie stocke de l'énergie dans sa rotation. A la demande cette dernière sera transformée en énergie électrique par la même machine. Ce type de stockage est bien adapté pour le lissage de la puissance injectée au réseau d'origine éolienne. La (figure I.7) nous montre que le système de stockage inertiel joue le rôle de régulateur.

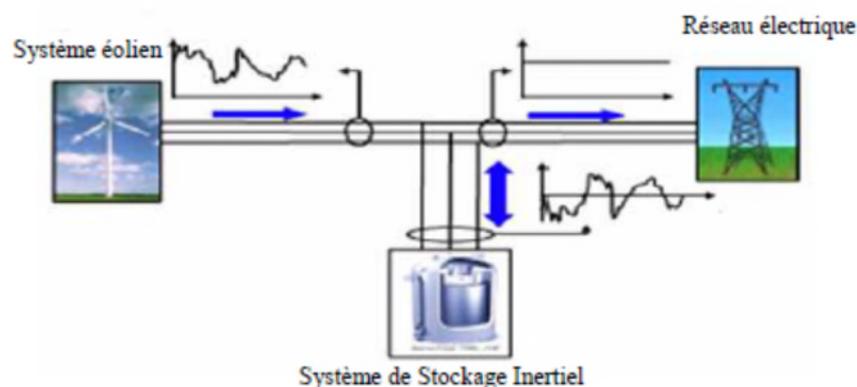


Figure.I.7 Système de stockage inertiel [8]

Cette énergie stockée est limitée, dans la pratique par la contrainte maximale admissible (σ) liée aux efforts centrifuges. Cette dernière est proportionnelle à la masse volumique (ρ) du matériau constituant le mobile et au carré de la vitesse périphérique :

$$\sigma = k_f \cdot \rho \cdot v^2 \quad (\text{I.4})$$

L'énergie cinétique stockée par unité de masse est donnée par l'expression suivante :

$$\frac{E_c}{m} = k_f \frac{\sigma}{\rho} \quad (\text{I.5})$$

Avec k_f : est le facteur de forme géométrique du mobile en rotation.

Les formes les plus utilisées sont les suivantes (Figure. I.8)

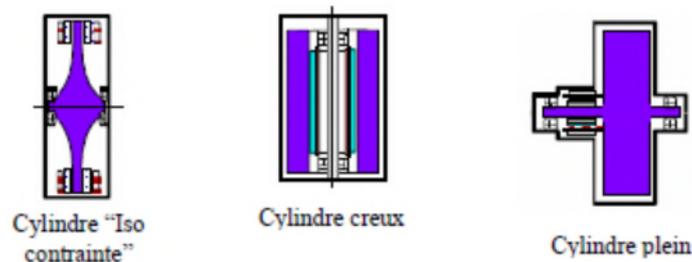


Figure. I.8 Différents formes de volants [4]

La densité d'énergie maximale est caractérisée par le rapport $\frac{\sigma}{\rho}$ et de facteur de forme k_f . Les volants d'inertie doivent être fabriqués avec des matériaux à la fois légers et résistants [6]. Les volants d'inertie, utilisés dans les systèmes de stockage diffèrent principalement par la vitesse dont ils sont entraînés, et par les matériaux dont ils sont fabriqués. Il y a des SISEs à vitesse lente, et à vitesse rapide. La vitesse critique qui les distingue, n'est pas encore limitée. Certains auteurs, limitent cette vitesse à 6000tr/min, d'autres parlent de 10000 tr/min ou même de 14000tr/min. Il existe des volants métalliques, et d'autres de matériaux composites.

En général, les volants lents sont métalliques, autrement sont de matériaux composites. Les deux types du SISE sont montrés sur la (figure I.9).

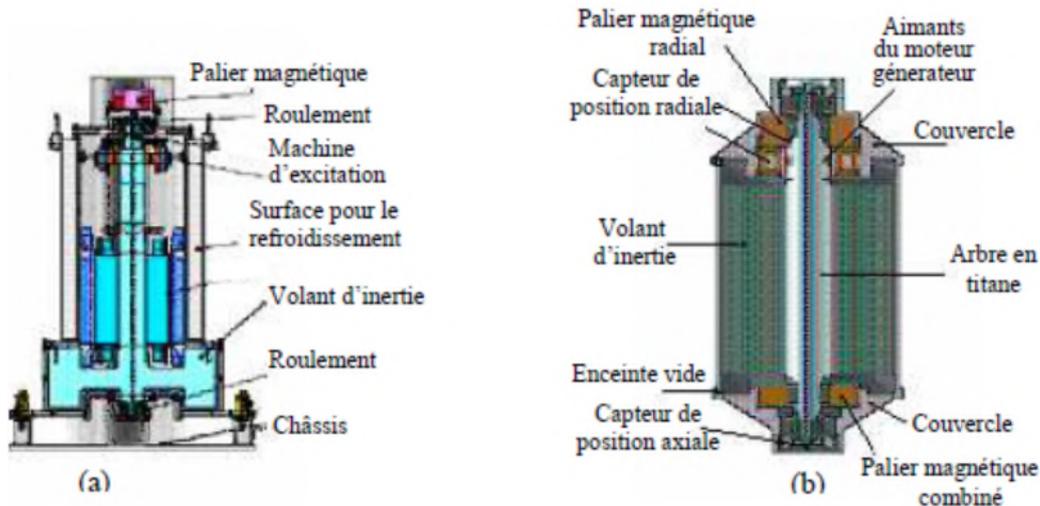


Figure.1.9 Deux types de SISES [9] :
 a- SISE à volant lent ; b- SISE à volant rapide.

I.1.7.1. Avantages et inconvénients de stockage par volant d'inertie

✓ *Avantages de stockage inertiel :*

- Grande puissance massique ;
- Rendement énergétique élevé ;
- Rendement de charge élevé ;
- Durée de vie indépendante du nombre de cycles ;
- Connaissance précise du niveau d'énergie stocké ;
- Gestion de la charge simplifiée ;
- Moins de contraintes thermiques.

✓ *Inconvénients de stockage inertiel*

- Faible durée de stockage ;
- Décharge complète à éviter ; (Rendement diminue, risque d'instabilité mécanique)
- Risque de rupture et d'éclatement ;
- Pour le spatial difficulté de maîtriser le moment cinétique et les micros vibrations.

I.1.7.2. Présentation d'un accumulateur électromécanique

On voit d'une façon bien distincte sur la (figure I.10) les composantes principales de l'accumulateur électromécanique qui sont :

- Moteur/générateur ;
- Le volant d'inertie ; Les paliers ;

- L'enceinte sous vide ;
- Pour pouvoir faire fonctionner le volant à haute vitesse, et de limiter les risques en cas d'explosion des pièces en rotation il est nécessaire de loger la masse tournante dans une enceinte sous vide ; pour minimiser les pertes par frottement, l'utilisation des paliers magnétiques est indispensable.

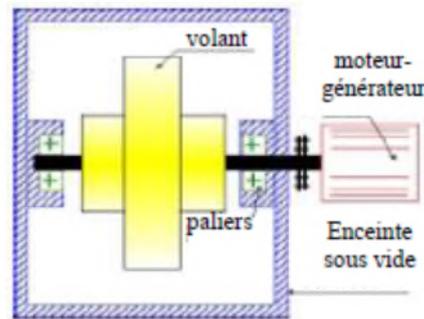


Figure. I.10 Dispositif de stockage électromécanique d'énergie [7]

I.1.8. Comparaison entre les modes de stockage présentés

Les barrages hydroélectriques et le stockage d'air comprimé sont des dispositifs gigantesques.

Les supraconducteurs, leur développement est encore à ce jour limité, ce qui les rend très onéreux [4].

Les accumulateurs électrochimiques, se reconnaissent par une bonne énergie massique. Leur utilisation paraît intéressante dont la charge très peu fluctuante. Par contre, lorsque le mode de fonctionnement est de nature impulsionnelle avec des temps de charge et de décharge inférieur à une minute, leur rendement est dégradé avec une forte réduction de la cyclabilité.

Les batteries électrochimiques, nécessitent outre la maintenance régulière des traitements coûteux en fin de vie. Voilà pourquoi ce type de stockage n'est pas utilisé. Il est remplacé par d'autres modes de stockage qui sont les capacités, les supercapacités, les inductances pour les temps de charge et de décharge très courts.

Le stockage par volant d'inertie paraît séduisant pour des applications à fortes puissances spécifiques et aux nombres de cycles importants, et ces avantages par rapport à une batterie électrochimique sont les suivants :

- Pas de dégradation au cours du temps ;
- Rendement 93% ;

- Pas de risque chimique (pollution) ;
- Bon connaissance de l'état de charge ;
- Peu sensible à l'environnement (température, humidité) ;
- Profondeur de décharge 95%.

Néanmoins il a quelques inconvénients à savoir :

- Sensibilité aux chocs ;
- Coût matériaux composites ;
- Bruit faible.

Vu tous les avantages présentés par le stockage par volant d'inertie, leur association aux éoliens permet à ces derniers d'augmenter le taux de leur pénétration au réseau et de renforcer la production décentralisée. Voilà pourquoi on a opté dans la suite de travail à l'étude et à l'application du système inertiel de stockage d'énergie (SISE), dans un système de production éolienne schéma de principe est représenté par (figure I.11)

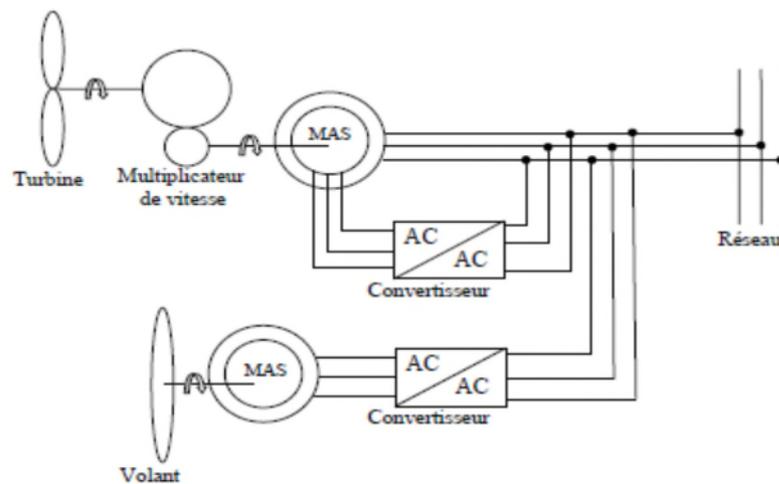


Figure. I.11 : Schéma du système éolien+ SISE [10]

Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'avoir une vue générale, sur les différentes techniques de stockage d'énergie électrique.

Le stockage inertiel peut représenter une bonne alternative aux autres types de stockage d'énergie électrique. En effet le volant permet de soutirer ou d'injecter une puissance électrique donnée pendant une durée très courte.

Le stockage d'énergie électrique est impérativement lié à la production de cette dernière, le chapitre suivant sera consacré à la modélisation de la MSAP.

Chapitre II
Généralités et modélisations
de la machine synchrone à
aimant permanent

Introduction

Pendant les années récentes, le moteur à courant continu (M.C.C) est remplacé par le moteur à courant alternatif dans le milieu industriel. La présence du système balais collecteur dans les moteurs à courant continu a toujours posé de grands problèmes qui limitent de plus en plus son utilisation. La fragilité du système balais-collecteur a été un inconvénient majeur, car il limitait la puissance et la vitesse maximale et présentait des difficultés de maintenance et des interruptions de fonctionnement. C'est pour cette raison qu'on ait orientée à utiliser des moteurs électriques à courant alternatif afin d'écartier cet inconvénient. Parmi les moteurs à courant alternatif, on trouve le moteur à aimants permanents qui présente d'excellentes caractéristiques dynamiques, de faibles pertes et un couple massique important, ce qui le rend mieux adapté aux applications industrielles. [11.12].

Dans ce chapitre, nous présentons quelques généralités sur les machines synchrones à aimants permanents puis nous passerons à sa modélisation mathématique en utilisant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices afin d'obtenir un modèle simple et fiable pour la simulation numérique.

II. Présentation du moteur synchrone à aimants permanents (MSAP)

II.1 Principe de fonctionnement de la MSAP

Toute machine électrique dans laquelle la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant est appelé machine synchrone. Pour l'obtention d'un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique doit être généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. Cela dit, qu'en mode permanent la position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ceci impose une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique [13]. Dans une machine triphasée, nous retrouvons les deux parties suivantes :

- ❖ Le stator : ou l'inducteur est la partie fixe de la machine, il se compose de trois enroulements parcourus par des courants alternatifs décalés de 120° dans l'espace et dans le temps, logés dans les encoches du circuit magnétique fixe [14].
- ❖ Le rotor : ou induit est la partie mobile de la machine qui se compose d'aimants permanents. 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 [12]. Il existe deux types de rotor, ayant pour rôle de générer le champ d'induction rotorique. Les rotors à pôles lisses et les rotors à pôles saillants.

II.2 Différentes structures de machines à aimants permanents

Les structures des machines synchrones à aimants permanents sont classées suivant la disposition des aimants sur le rotor. Leurs différentes configurations incluent les machines à flux radial et à flux axial.

II.2.1 Machines à aimants permanents à flux radial

Il existe trois catégories de machines synchrones à aimants permanents à flux radial du point de vue construction mécanique :

- ✚ **Machines synchrones à aimants permanents montés en surface (MSAPS)** : Cette structure est la plus simple à construire parce que des aimants permanents à aimantation radiale sont disposés directement sur la périphérie du rotor. Les aimants ont généralement une forme de tuile et sont collés sur une culasse cylindrique. Cette structure de machine rentre dans la catégorie des machines à pôles lisses (figure II.1).

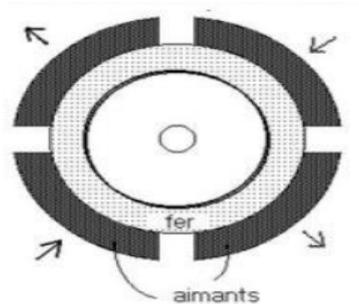


Figure II.1 : Machine synchrone à aimants permanents montés en surface

- ✚ **Machine synchrones à aimants permanents insérés (MSAPI)** : à partir de la structure précédente, on entaille des logements pour insérer les aimants permanents dans le rotor afin de faciliter l'assemblage mécanique. Les parties de fer entre les aimants permanents sont des espaces inter polaires qui rajoutent de la saillance. Toutefois, les caractéristiques de cette structure restent fondamentalement proches de la MSAPS [15] (figure II.2).

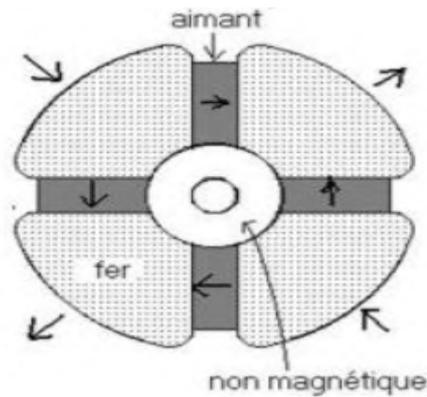


Figure II.2 : Machine synchrone à aimants permanents insérés

🏗️ **Machines synchrones à aimants permanents enterrés (MSAPE) :** Le principe de cette structure est d'augmenter l'induction magnétique dans l'entrefer par rapport à l'induction rémanente des aimants permanents. En fait, les pièces polaires canalisent le flux généré par les aimants permanents à aimantation tangentielle dont la surface latérale est supérieure à la demi-surface de la pièce polaire prise au niveau de l'entrefer [15] (figure II.3).

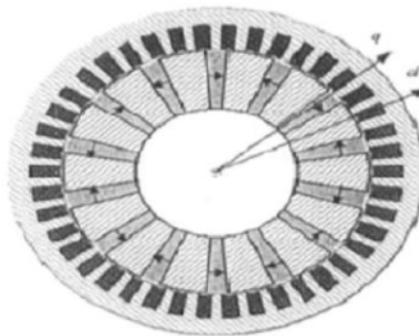


Figure II.3 : Machines synchrones à aimants permanents enterrés

II.2.2 Machines à aimants permanents à flux axial

Ces machines dites « discoïdales » ou AFPM représentent une autre solution possible les entraînements directs à basse vitesse. Elles comportent un ou plusieurs disques fixes bobinés et un ou plusieurs disques mobiles supportant les aimants permanents.

Leurs principal avantage est l'optimisation de la surface utile de génération du couple, qui se traduit par une puissance volumique importante. Cependant, leur assemblage est très compliqué, à cause des contraintes mécaniques liées aux poussées axiales. Comparées à la

structure à flux radial, ces machines se caractérisent par un plus grand diamètre et une longueur axiale relativement plus courte. Le flux provenant des aimants est axial tandis que le courant est dans la direction radiale. Différentes configurations à flux axial existent: celle à structure simple avec un seul rotor associé à un seul stator et celles à double entrefer avec soit, un seul stator inséré entre deux rotors ou un seul rotor inséré entre deux stators. L'exploitation de ces machines dans le domaine de traction (vélo électrique et voiture hybride) est très prometteuse [15].

II.3 Avantages de la MSAP

Les machines synchrones à aimants permanents présentent plusieurs avantages par rapport aux autres types de machines, parmi ces avantages, nous pouvons citer :

- ✓ Puissances massiques élevées.
- ✓ Absence de contacts glissants.
- ✓ Un bon rendement
- ✓ Absence des balais et d'alimentation continue.
- ✓ Possibilité de supporter des surcharges transitoires importantes et un bon comportement dynamique en accélération et en freinage.
- ✓ Fonctionnement en survitesse.

Cette machine est donc bien indiquée pour les systèmes embarqués et peut être employée pour des systèmes de faible puissance (petits moteurs) ou de puissance plus importante (jusqu'à quelques dizaines de MW en fonctionnement moteur) [16].

II.4 Inconvénients de la MSAP

La machine synchrone à aimants permanents présente aussi quelques inconvénients comme :

- ✓ Technologie coûteuse liée au coût des aimants.
- ✓ Interaction magnétique due au changement de structure.
- ✓ Ondulations de couple.

II.5 Les domaines d'application de MSAP

Ces machines ont trouvé un vaste champ d'applications dans plusieurs domaines (équipement domestique, lecteurs CD/DVD et disques durs d'ordinateur, voiture et vélo électriques, transport, aérospatial, servomoteurs, équipement médical et propulsion des

navires). Celles-ci sont utilisées pour des puissances allant de la gamme des microwatts à celle des mégawatts. Elles sont utilisées pour les entraînements qui nécessitent une vitesse de rotation constante, tels que les grands ventilateurs, les compresseurs et les pompes centrifuges, et grâce au développement de l'électronique de puissance, l'association machine à aimants convertisseur de puissance a trouvé de nombreuses applications dans les domaines très divers tels que la robotique, la technologie de l'espace et dans d'autres applications plus particulières [17].

II.6 Modélisation mathématique de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP)

II.6.1 Modèle triphasé :

Dans le repère classique, il y a trois axes orientés suivant les axes des trois enroulements statoriques de la machine [18].

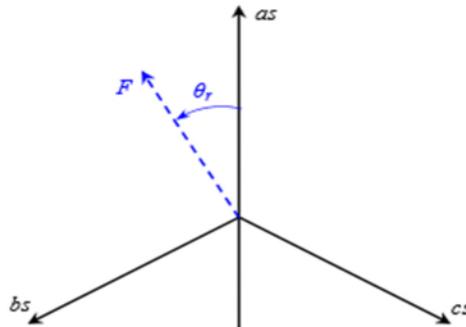


Figure II.4 : Axes de repère classique pour la MSAP [18]

II.6.1.1 Equations électriques :

Les équations de tensions dans le repère (a,b,c) sont données par les relations suivantes :

$$\begin{cases} V_a = R_s \cdot I_a + \frac{d\varphi_a}{dt} \\ V_b = R_s \cdot I_b + \frac{d\varphi_b}{dt} \\ V_c = R_s \cdot I_c + \frac{d\varphi_c}{dt} \end{cases} \quad \text{II.1}$$

R_s : Résistance d'une phase statorique.

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d\varphi_s}{dt} \quad \text{II.2}$$

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} [I_s] = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

$[V_s]$: Vecteur des tensions statoriques;

$[I_s]$: Vecteur des courants statoriques ;

$[\varphi_s]$: Vecteur des flux statoriques ;

$[R_s]$: Matrice des résistances statoriques.

II.6.1.2 Equations magnétiques :

Les équations du flux dans le repère triphasé sont :

$$\begin{cases} \varphi_a = L_s I_a + M I_b + M I_c + \varphi_{ar} \\ \varphi_b = M I_a + L_s I_b + M I_c + \varphi_{br} \\ \varphi_c = M I_a + M I_b + L_s I_c + \varphi_{cr} \end{cases} \quad \text{II.3}$$

Avec :

L_s : Représente l'inductance propre d'enroulements statoriques ;

M : Représente l'inductance mutuelle entre les enroulements statoriques.

$$[\varphi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [\varphi_{sr}] \quad \text{II.4}$$

$$\text{Avec : } [L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M & M \\ M & L_s & M \\ M & M & L_s \end{bmatrix} [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix}$$

$[L_{ss}]$: Matrice des inductances statoriques ;

$[\varphi_{sr}]$: Vecteur des flux stator-rotor.

$$[\varphi_{sr}] = \varphi_f \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad \text{II.5}$$

Avec :

P : nombre de paire de pôles ;

θ : Angle électrique du rotor par rapport au stator ;

φ_f : Le flux généré par les aimants permanents du rotor.

II.6.1.3 Equation mécanique :

Cette équation fait la liaison entre la partie mécanique et la partie électromagnétique de la machine, elle est donnée par :

$$C_{em} - C_r = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega \quad \text{II.6}$$

C_{em} : Couple électromagnétique [N*m] ;

C_r : Couple résistant [N*m] ;

J : Moment d'inertie de la machine ;

f : Coefficient de frottement visqueux ;

Ω : Vitesse angulaire mécanique du rotor.

II.6.2 Modèle biphasé [19] :

Pour passer du système triphasé au système biphasé, on utilise la transformation de Park.

La transformation de Park $P(\theta)$ fait correspondre aux variables réelles (a,b,c) leurs composantes fictives (d,q,o)[19], comme illustré sur la Figure (II.1).

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} = [P(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}$$

Avec :

x_a, x_b, x_c : sont des grandeurs du système triphasé ;

x_d, x_q : sont des grandeurs du système biphasé ;

x_o : est la composante homopolaire ;

$[P(\theta)]$: est la matrice de Park :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{II.7}$$

L'inverse de la matrice de Park est égal à sa transposée :

$$[P(\theta)]^{-1} = [P(\theta)]^T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{II.8}$$

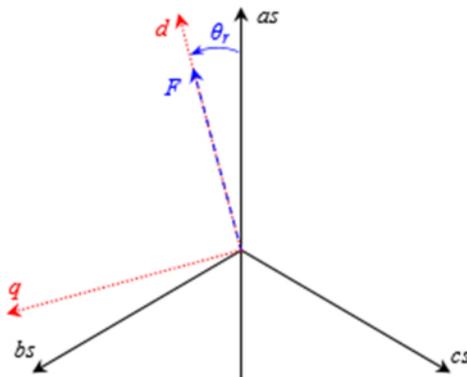


Figure II.5 : Axes de repère dq pour la MSAP [19]

II.6.2.1 Equations électriques dans le repère de Park [20] :

Les équations de tensions de la machine dans le repère de Park sont les suivantes :

$$\begin{cases} V_d = R_s \cdot I_d + L_d \cdot \frac{dI_d}{dt} - L_q \cdot \omega_r \cdot I_q \\ V_q = R_s \cdot I_q + L_q \cdot \frac{dI_q}{dt} - L_d \cdot \omega_r \cdot I_d + \phi_r \cdot \omega_r \end{cases} \quad \text{II.9}$$

$$[V_{dq0}] = [P(\theta)] \cdot [V_s]$$

Avec :

$[P(\theta)]$: La matrice directe de Park

I_d, I_q : Les courants statoriques ;

V_d, V_q : Les tensions statoriques ;

R_s : Résistance statorique ;

L_d, L_q : Inductances du stator ;

φ_r : Flux de l'aimant permanent ;

ω_r : La vitesse angulaire du rotor ;

$$\omega_r = \frac{d\theta}{dt} = p \cdot \frac{d\theta_m}{dt} \quad \text{II.10}$$

θ_m : Position mécanique du rotor.

On peut exprimer les grandeurs de sortie I_d et I_q en fonction de celle d'entrée (V_d et V_q):

$$\begin{cases} \frac{dI_d}{dt} = \frac{1}{L_d} \cdot (V_d - R_s \cdot I_d + L_q \cdot \omega_r \cdot I_q) \\ \frac{dI_q}{dt} = \frac{1}{L_q} \cdot (V_q - R_s \cdot I_q + L_d \cdot \omega_r \cdot I_d - \varphi_r \cdot \omega_r) \end{cases} \quad \text{II.11}$$

II.6.2.2 Equations de flux :

Les équations de flux des axes directe et en quadrature sont :

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d \cdot I_d + \varphi_r \\ \varphi_q = L_q \cdot I_q \end{cases} \quad \text{II.12}$$

$$[\varphi_{dq}] = [P(\theta)] \cdot [\varphi_{abc}]$$

II.6.2.3 Equation du couple électromagnétique :

Le couple électromagnétique est donné par l'équation suivante :

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot ((L_d - L_q) \cdot I_d \cdot I_q + \varphi_r \cdot I_q) \quad \text{II.13}$$

φ_r : Le flux rotorique.

A partir des équations (II.6), (II.9) et (II.13), on a réalisé le modèle de la MSAP dans le repère de Park sous MATLAB/Simulink :

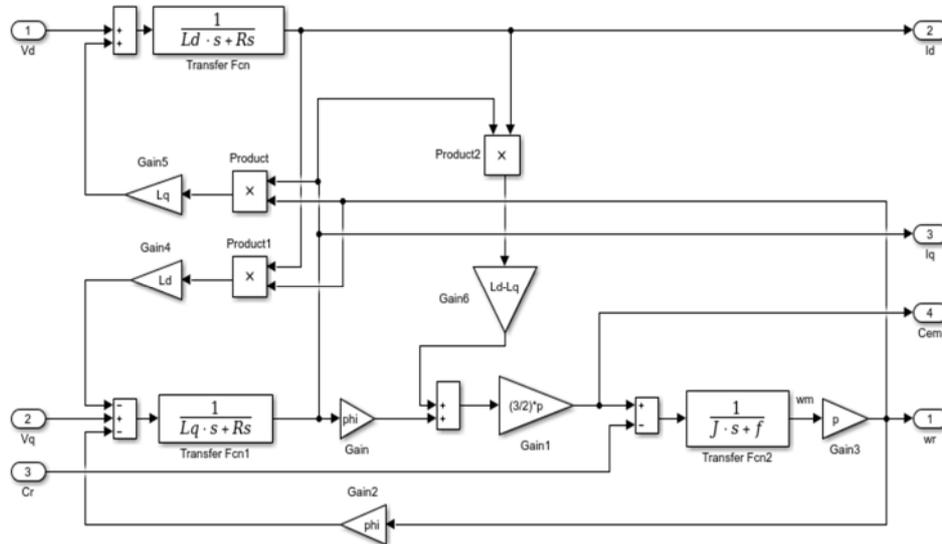


Figure II.6 : Modèle de la MSAP sous Simulink

II.7 Convertisseurs statiques :

La machine électrique est alimentée par l'intermédiaire des convertisseurs de l'électronique de puissance.

Les convertisseurs statiques utilisés sont : un redresseur et un onduleur avec l'intermédiaire d'un filtre.

La commande des interrupteurs des deux convertisseurs est complémentaire.

II.7.1 Modélisation du redresseur [23] :

Un redresseur est un convertisseur statique qui converti une grandeur alternative en une continue.

Le redresseur est présenté sur la figure (II.8) :

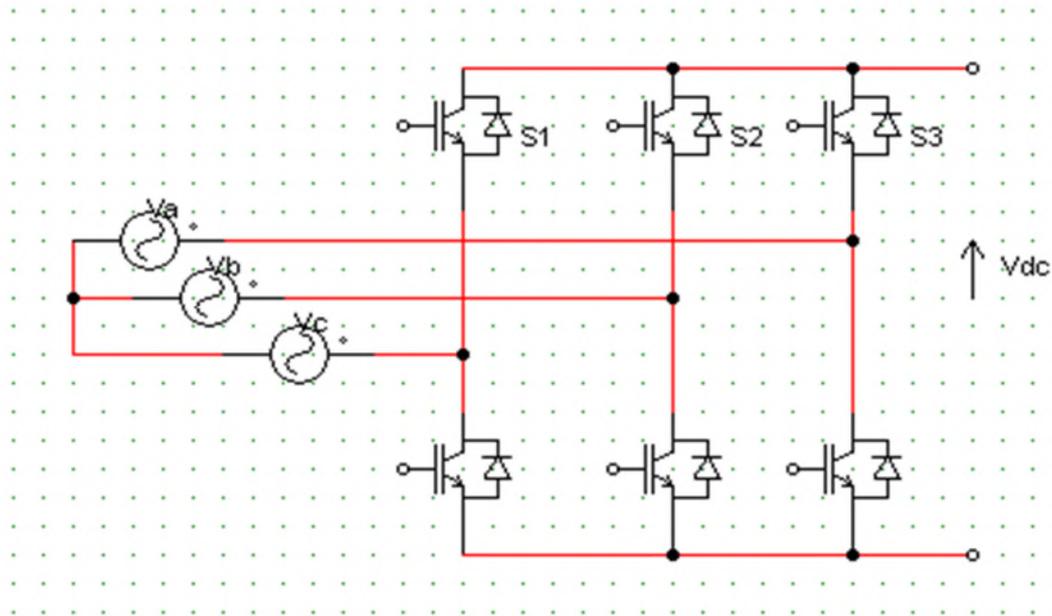


Figure II.7 : Schéma du redresseur

On peut exprimer la tension continue V_{dc} en fonction des états d'interrupteurs S_i ; $i=1$ à 3 et des tensions d'entrée (V_a , V_b et V_c).

De même pour le courant continu I_{red} en fonction des courants d'entrée (I_a , I_b et I_c).

I_{red} : Le courant à la sortie du redresseur ;

V_{dc} : La tension continue ;

V_a, V_b, V_c : Les tensions alternatives à l'entrée du redresseur ;

I_a, I_b, I_c : Les courants alternatifs à l'entrée du redresseur.

II.7.2 Modélisation du filtre [22] :

Le filtre utilisé est un filtre capacitif, il est inséré entre le redresseur et l'onduleur :

Le schéma du filtre est présenté sur la figure (II.9) :

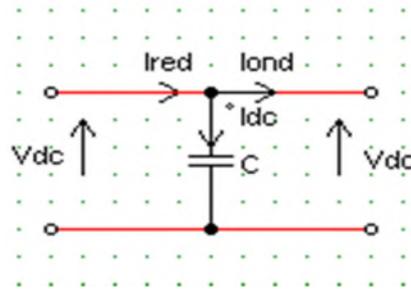


Figure II.8 : Schéma d'un filtre

$$I_{dc}(t) = C \cdot \frac{dV_{dc}(t)}{dt} \tag{II.14}$$

$$V_{dc} = V_0 + \frac{1}{C} \int_{t_1}^{t_2} I_{dc} \cdot dt \tag{II.15}$$

Avec :

C : est la capacité du condensateur.

$$I_{dc} = I_{red} - I_{ond} \tag{II.16}$$

I_{red} : Le Courant à la sortie du redresseur ;

I_{ond} : Le courant à l'entrée de l'onduleur.

II.7.3 Modélisation de l'onduleur [23] :

Un onduleur est un convertisseur statique DC/AC, il réalise la fonction inverse du redresseur.

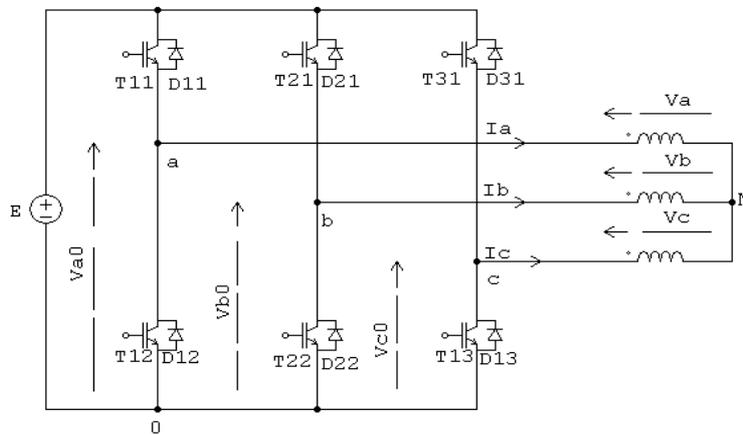


Figure II.9 : Schéma de l'onduleur

On peut écrire les tensions de phase $V_{a,b,c}$ en fonction des signaux de commande S_j ; $j=a,b,c$, et de la tension continue V_{dc} :

$$V_{a,b,c} = S_j \cdot V_{dc} - \frac{V_{dc}}{2} \quad \text{II.17}$$

Les tensions composées sont définies comme suit :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{a0} + V_{0b} = V_{a0} - V_{b0} \\ V_{bc} = V_{0b} + V_{0c} = V_{0b} - V_{c0} \\ V_{ca} = V_{c0} + V_{0a} = V_{c0} - V_{a0} \end{cases} \quad \text{II.18}$$

Considérant que n est le point neutre :

$$\begin{cases} V_{a0} = V_{an} + V_{n0} \\ V_{b0} = V_{bn} + V_{n0} \\ V_{c0} = V_{cn} + V_{n0} \end{cases} \quad \text{II.19}$$

La charge est considérée équilibrée :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad \text{II.20}$$

Donc :

$$V_{a0} + V_{b0} + V_{c0} = 3 \cdot V_{n0} \quad \text{II.21}$$

D'où :

$$V_{n0} = \frac{1}{3} \cdot (V_{a0} + V_{b0} + V_{c0}) \quad \text{II.22}$$

On remplace II-29 dans II-26 et on trouve :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{a0} - \frac{1}{3}V_{b0} - \frac{1}{3}V_{c0} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{a0} + \frac{2}{3}V_{b0} - \frac{1}{3}V_{c0} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{a0} - \frac{1}{3}V_{b0} + \frac{2}{3}V_{c0} \end{cases} \quad \text{II.23}$$

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad \text{II.24}$$

Avec :

V_{a0}, V_{b0}, V_{c0} : Les tensions de sortie de l'onduleur par rapport au point milieu "o" ;

V_{an}, V_{bn}, V_{cn} : Les tensions à la sortie de l'onduleur ;

V_{dc} : La tension aux bornes du condensateur.

A partir de cette modélisation on a obtenu le schéma bloc suivant :

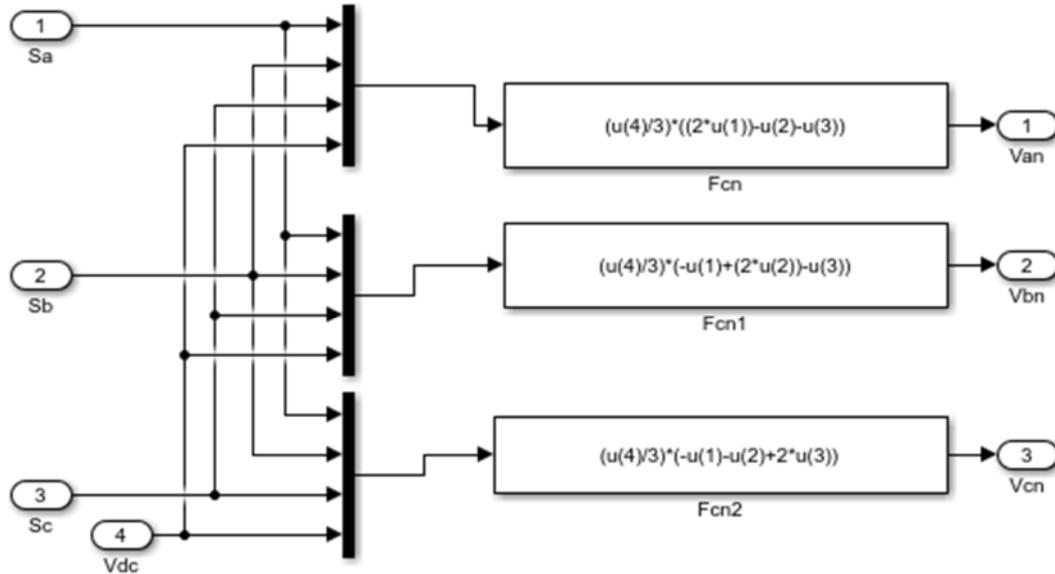


Figure II.10 : Schéma bloc de l'onduleur

Conclusion :

Ce chapitre est consacré à la modélisation de la machine synchrone à aimant permanent, les convertisseurs d'électronique de puissance et le bus continu.

Cette modélisation nous a permis de réaliser des modèles mathématiques sur Matlab/SIMULINK.

Nous avons présenté aussi une brève description de la MSAP, ses avantages et ses inconvénients, et un ensemble d'hypothèses simplificatrices qui nous a permis d'établir le modèle de la MSAP dans le repère classique et celui de Park. A partir de ce dernier, on a réalisé un bloc pour la machine sur Simulink. Le modèle dq sera utilisé dans la commande vectorielle de la machine associée au système de stockage, qui est l'objectif du troisième chapitre.

Chapitre III
Commande vectorielle de la
MSAP associé au système de
stockage

Introduction

La commande des machines à courant alternatif est difficile du fait qu'il existe un couplage complexe entre le flux et le couple. Cette difficulté a encouragé le développement de plusieurs techniques de commande afin que ces machines se comportent comme des machines à courant continu, caractérisées par un découplage naturel du flux et du couple. Parmi ces techniques de commande, la commande vectorielle est la plus connue [24].

La commande vectorielle basée sur une régulation classique Proportionnel –Intégral (*PI*), associe dans sa structure des termes de compensation qui permettent de découpler l'axe *d* (qui sera utilisé pour le réglage du flux), de l'axe *q* (qui sera utilisé pour le réglage du couple). Cette configuration permet de réaliser des systèmes d'actionnement électriques ayant les performances exigées par les domaines d'application.

Ce chapitre présente la commande vectorielle appliquée à la MSAP. La boucle de courant et la boucle de vitesse sont régulées à l'aide de correcteurs *PI*. Des résultats de simulation sont présentés pour montrer les performances de la régulation proposée.

III.1. Commande vectorielle de la MSAP alimentée en tension

III.1.1. Principe de la Commande vectorielle

Le principe du découplage permet de modéliser la machine synchrone comme une machine à courant continu, par application de cette nouvelle technique de commande. Ceci concilie les avantages des propriétés du moteur à courant continu et de l'absence du collecteur mécanique. Le contrôle du couple d'une machine alternative nécessite un contrôle en phase et en amplitude des courants d'alimentation d'où le nom de contrôle vectoriel. Pour réaliser un contrôle similaire à celui des machines à courant continu à excitation séparée, il est nécessaire de maintenir le courant I_d nul et de réguler la vitesse ou la position par le courant I_q via la tension V_q . Physiquement, cette stratégie revient à maintenir le flux de réaction d'induit en quadrature avec le flux rotorique produit par le système d'excitation [25]. En utilisant l'équation (III.1) l'expression du couple devient comme suit :

$$C_e = \frac{3}{2} P \Psi_f i_q \quad (\text{III.1})$$

La commande vectorielle sert alors à contrôler les deux composantes (i_d) et (i_q) du courant statorique en imposant les tensions (V_d) et (V_q) qui conviennent. Pour imposer ces tensions il suffit d'imposer les tensions de référence (V_{dref}) et (V_{qref}) à l'entrée de l'onduleur. A l'aide des régulateurs, nous allons obtenir des courants de référence (i_{dref}) et (i_{qref}).

III.1.2. Découplage par compensation

Le modèle de la machine synchrone dans le référentielles de Park conduit à un système d'équations différentielles où les courants i_d, i_q ne sont pas indépendants l'un de l'autre. Ils sont reliés par des termes non linéaires $L_q\omega i_q$ et $L_d\omega i_d$.

$$\begin{cases} V_d = \left(R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} \right) - \omega L_q i_q \\ V_q = \left(R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} \right) + \omega (L_d i_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Ce couplage est éliminé par une méthode de compensation [3]. Cette dernière méthode consiste à faire ajouter des termes afin de rendre les axes d et q complètement indépendants.

La compensation donc, a pour but de découpler les axes d et q ce découplage permet d'écrire les équations de la machine et de la partie régulation d'une manière simple et ainsi de calculer aisément les coefficients des régulateurs [26]. Le principe de ce découplage revient à définir deux nouvelles variables de commande e_d, e_q représentée dans la figure III.1 telle que :

$$\begin{cases} V_d = V_{d1} - e_d \\ V_q = V_{q1} + e_q \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

Avec :

$$\begin{cases} V_{d1} = L_d \frac{di_d}{dt} + R_s i_d \\ V_{q1} = L_q \frac{di_q}{dt} + R_s i_q \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

$$\text{Et : } \begin{cases} e_d = \omega L_q i_q \\ e_q = \omega (L_d i_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

On a donc les courants i_d et i_q sont découplés. Le courant i_d ne dépend que de V_{d1} et i_q ne dépend que de V_{q1} , à partir de l'équation (III.4) les courant i_d et i_q s'écrivent de la façon suivante :

$$\begin{cases} i_d = \frac{V_{d1}}{R_s + pL_d} \\ i_q = \frac{V_{q1}}{R_s + pL_q} \end{cases} \quad (III.6)$$

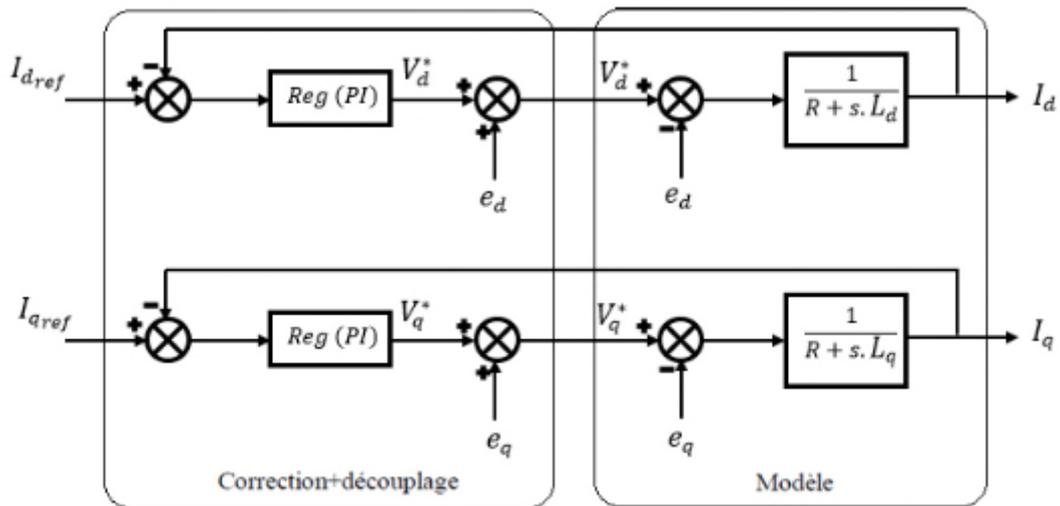


Figure III.1. Découplage par compensation.

Le terme e_q a été compensé du coté commande. Il est utilisé pour éliminer le découplage des deux axes d et q . De la même manière que pour le courant éliminer le découplage.

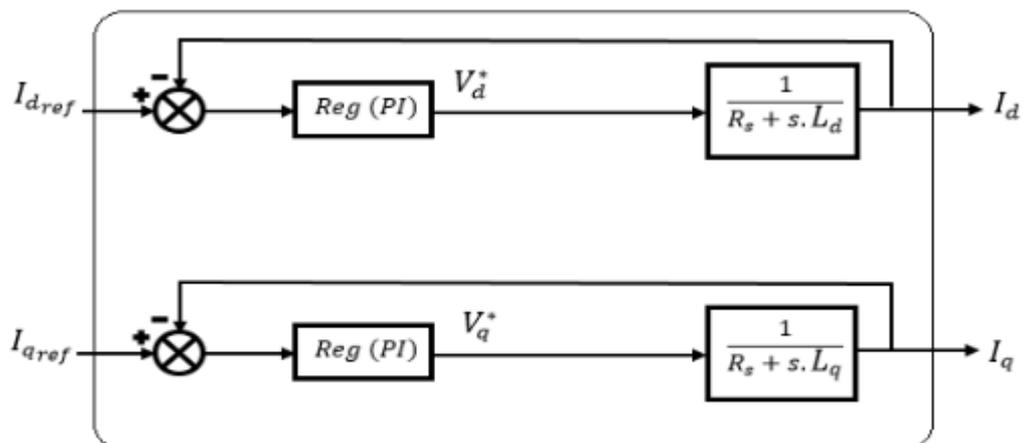


Figure III.2. Commande découplée.

III.1.3. La régulation

Les régulateurs ont, d'une part, la tâche de stabiliser le circuit de réglage, et d'autre part, ils viennent pour assurer une meilleure précision et un temps de réponse meilleure. Les régulateurs standards de type *PI* ou *PID* sont les plus utilisés dans le domaine des réglages industriels [27].

III.1.3.1. Conception des Régulateurs

Soit $Y^*(t)$ le signal à poursuivre, et $Y(t)$ le signal de sortie du système à contrôler.

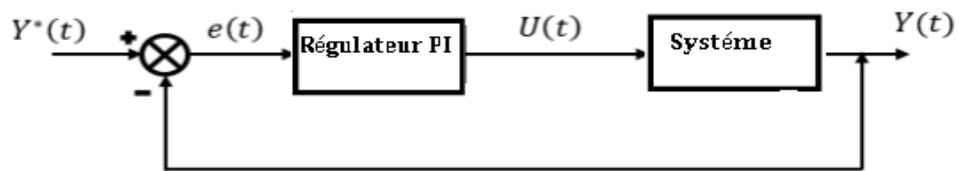


Figure III.3 : Représentation de la commande par PI

La loi de commande est :

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (\text{III.7})$$

a. Action Proportionnelle (K_p)

- Si K_p est grand, la correction est rapide. Le risque de dépassement et d'oscillation dans la sortie s'accroît.
- Si K_p est petit, la correction est lente, il y a moins de risque d'oscillations.

b. Action Intégrale (K_i)

L'action intégrale régit lentement à la variation de l'erreur et assure un rattrapage progressif de la consigne. Tant que l'erreur positive (ou négative) subsiste, l'action $U(t)$ augmente (ou diminue) jusqu'à ce que l'erreur s'annule.

III.1.4. Calcul des régulateurs

III.1.4.1. Régulateur des Courants

Le schéma du contrôle des courants de la commande vectorielle se réduit à deux boucles distinctes comme l'indique la figure suivante :

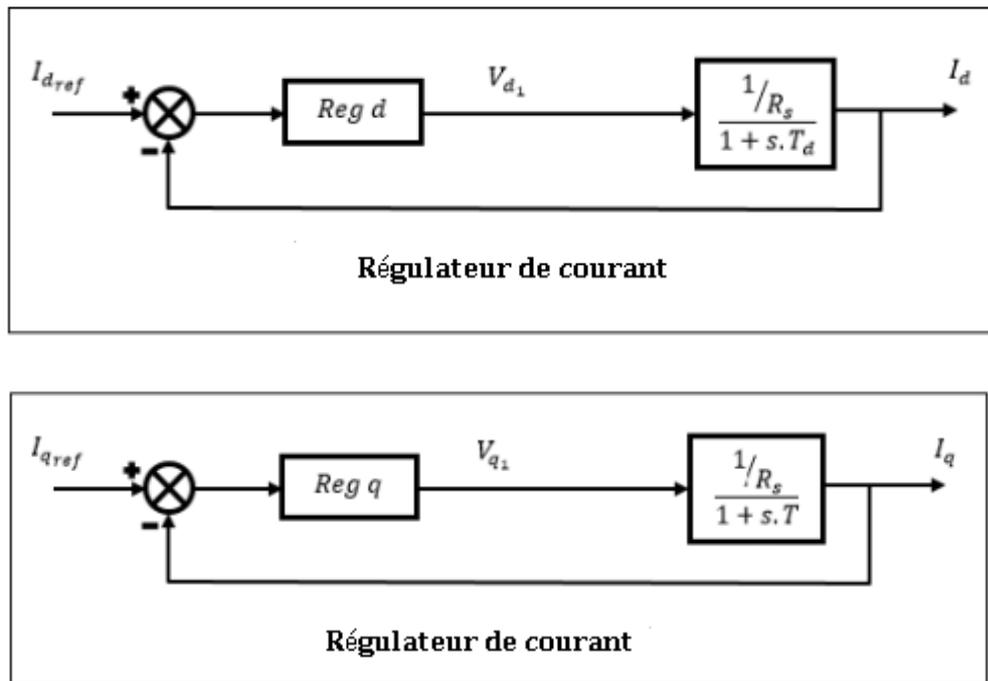


Figure III.4 : commande des courants en deux boucles indépendantes

A partir des équations (III.2), (III.3) (III.4) et (III.5), on peut écrire les fonctions de transfert suivantes :

$$F_d(s) = \frac{\frac{1}{R_s}}{1+T_d s} = \frac{i_d}{V_d} \tag{III.8}$$

$$F_q(s) = \frac{\frac{1}{R_s}}{1+T_q s} = \frac{i_q}{V_q} \tag{III.9}$$

Avec :

$$T_d = \frac{L_d}{R_s} \quad \text{et} \quad T_q = \frac{L_q}{R_s}$$

T_d : est la constante de temps électrique relative à l'axe d .

T_q : est la constante de temps électrique relative à l'axe q .

Les régulateurs (Reg_d) et (Reg_q) sont choisis comme étant des régulateurs proportionnels et intégraux, avec des fonctions de transfert de la forme suivante :

$$Reg_d(s) = \frac{K_{id}}{s} \left(1 + \frac{K_{pd}}{K_{id}} s \right) \tag{III.10}$$

$$Reg_q(s) = \frac{K_{iq}}{s} \left(1 + \frac{K_{pq}}{K_{iq}} s \right) \tag{III.11}$$

K_{pd} et K_{pq} : est le gain de l'action proportionnelle du correcteur de courant i .

K_{id} et K_{iq} : est le gain de l'action intégrale.

T_{id} et T_{iq} : est la constante du temps d'intégration.

Les fonctions de transfert en boucle ouverte sont donnée par :

$$FTBO_d = \frac{K_{id}}{s} \left(1 + \frac{K_{pd}}{K_{id}} s\right) \frac{\frac{1}{R_s}}{1+T_d s} \quad (\text{III.12})$$

$$FTBO_q = \frac{K_{iq}}{s} \left(1 + \frac{K_{pq}}{K_{iq}} s\right) \frac{\frac{1}{R_s}}{1+T_q s} \quad (\text{III.13})$$

La démarche à suivre consiste à procéder à la compensation de la constante de temps du système, en posant :

$$T_d = \frac{K_{pd}}{K_{id}} \quad (\text{III.14})$$

$$T_q = \frac{K_{pq}}{K_{iq}} \quad (\text{III.15})$$

Ce qui ramène les fonctions de transfert des courants en boucle fermée aux expressions suivantes :

$$FTBF_d = \frac{1}{1+\tau_d \cdot s} = \frac{i_d}{i_{dref}} \quad (\text{III.16})$$

$$FTBF_q = \frac{1}{1+\tau_q \cdot s} = \frac{i_q}{i_{qref}} \quad (\text{III.17})$$

Avec :

$$\tau_d = \frac{R_s}{K_{id}} \quad \text{et} \quad \tau_q = \frac{R_s}{K_{iq}}$$

τ : Le constant du temps en boucle fermée.

Les boucles de courants correspondent donc à un premier ordre, il suffit de fixer la dynamique du système à travers un choix approprié de τ_d et τ_q . Celles-ci sont choisies de manière à ce que la constante de temps du système en boucle fermée régulé soit inférieure à la constante de temps en boucle ouverte. On imposant le temps de réponse : $T_r = 3\tau$

$$T_r = \frac{R_s}{K_{id}}$$

➤ Pour le courant i_d :

$$K_{id} = \frac{3R_s}{T_r} \quad \frac{L_d}{R_s} = \frac{K_{pd}}{K_{id}} \quad \text{et} \quad K_{pd} = \frac{L_d K_{id}}{R_s} = \frac{3L_d}{T_r}$$

➤ Pour le courant i_q :

$$K_{iq} = \frac{3R_s}{T_r} \quad \text{et} \quad K_{pq} = \frac{L_q K_{iq}}{R_s} = \frac{3L_q}{T_r}$$

III.1.4.2. Calcul du Régulateur de vitesse

Le régulateur de vitesse permet de déterminer le couple de référence, afin de maintenir la vitesse correspondante. La dynamique de la vitesse est donnée par l'équation mécanique suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f_r \Omega = C_e - C_r \quad \text{alors} \quad \Omega = \frac{C_e - C_r}{J s + f_r} \quad (\text{III.18})$$

Le schéma fonctionnel du contrôle de vitesse est donné par:

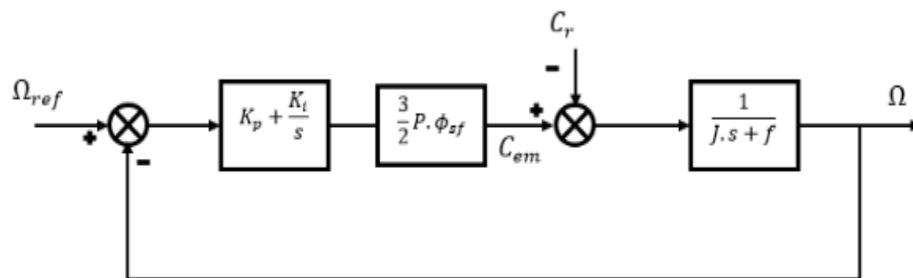


Figure III.5 : Boucle de régulation de vitesse

La fonction de transfert du régulateur de vitesse est donnée par :

$$K_{p\Omega} + \frac{K_{i\Omega}}{s} = \frac{K_{p\Omega}}{s} \left(s + \frac{K_{i\Omega}}{K_{p\Omega}} \right) \quad (\text{III.19})$$

La fonction de transfert de la vitesse en boucle ouverte est donnée par ($Cr=0$)

$$FTBO_{\Omega} = \frac{K_{p\Omega}}{s} \left(s + \frac{K_{i\Omega}}{K_{p\Omega}} \right) \frac{3p\phi_{sf}}{2} \frac{1}{Js+f_r} \quad (\text{III.20})$$

En adoptant la méthode de placement de pôle et la fonction de transfert de la vitesse en boucle fermée est donnée par :

$$FTBF_{\Omega} = \frac{3p\phi_{sf}K_{p\Omega} \left(s + \frac{K_{i\Omega}}{K_{p\Omega}} \right)}{2Js^2 + (2f_r + 3p\phi_{sf}K_{p\Omega})s + 3p\phi_{sf}K_{i\Omega}} \quad (\text{III.21})$$

Après le calcul on trouve :

La $FTBF_{\Omega}$ possède une dynamique de 2ème ordre, par identification à la forme canonique du 2ème ordre dont l'équation caractéristique est représentée comme suit :

$$FTBF_{\Omega} = \frac{1}{w_0^2} s^2 + \left(\frac{2\varepsilon}{w_0} \right) s + 1 \quad (\text{III.22})$$

Avec :

w_0 : Pulsation propre du système,

ε : Coefficient d'amortissement.

Par identification des équations (III.21) et (III.22) on obtient :

$$\frac{2J}{3p\phi_{sf}K_{i\Omega}} = \frac{1}{w^2} \quad \text{et} \quad \frac{3p\phi_{sf}K_{i\Omega} + 2f_r}{3p\phi_{sf}K_{i\Omega}} = \frac{2\varepsilon}{w_0}$$

On déduit K_i et K_p :

$$K_{i\Omega} = \frac{2Jw_0^2}{3p\phi_{sf}} \quad (\text{III.23})$$

$$K_{p\Omega} = \frac{4\varepsilon.J.w_0 - 2f_r}{3p\phi_{sf}} \quad (\text{III.24})$$

III.2. Avantages et inconvénients de la commande vectorielle

III.2.1. Avantages de la commande vectorielle [28]

- Elle est basée sur le modèle transitoire (traiter les régimes transitoires ce que ne permettait pas de faire le variateur classique)
- Elle est précise et rapide.
- Il y a un contrôle du couple à l'arrêt.
- Le contrôle des grandeurs se fait en amplitude et en phase [28].

III.2.2. Inconvénients de la commande vectorielle [28]

Le contrôle vectoriel par orientation du flux rotorique présente un certain nombre d'inconvénients :

- Très chère (encodeur incrémental ou estimateur de vitesse, DSP.).
- Faible robustesse aux variations paramétriques et en particulier à celles de la constante de temps rotorique (pour la commande vectorielle non linéaire).
- Nécessité d'un modulateur pour la commande rapprochée de l'onduleur qui provoque des retards, surtout à basse fréquence de modulation (grande puissance). Ces retards sont responsables d'une augmentation du temps de réponse en couple, ce qui pénalise les variateurs utilisés en traction.
- Présence de transformations de coordonnées dépendant d'un angle ϕ_s estimé.
- la vitesse de rotation intervient explicitement dans l'algorithme de commande. Quand on ne mesure pas cette vitesse (variateur sans capteur de vitesse), les erreurs sur l'estimée de cette vitesse dégradent les performances du variateur.

Ce chapitre est destiné à la simulation du système étudié, et l'interprétation des résultats obtenus lors de simulation.

III.3 Schéma global de simulation

Le schéma global de simulation est présenté sur la (figure III.6), (voir annexe B)

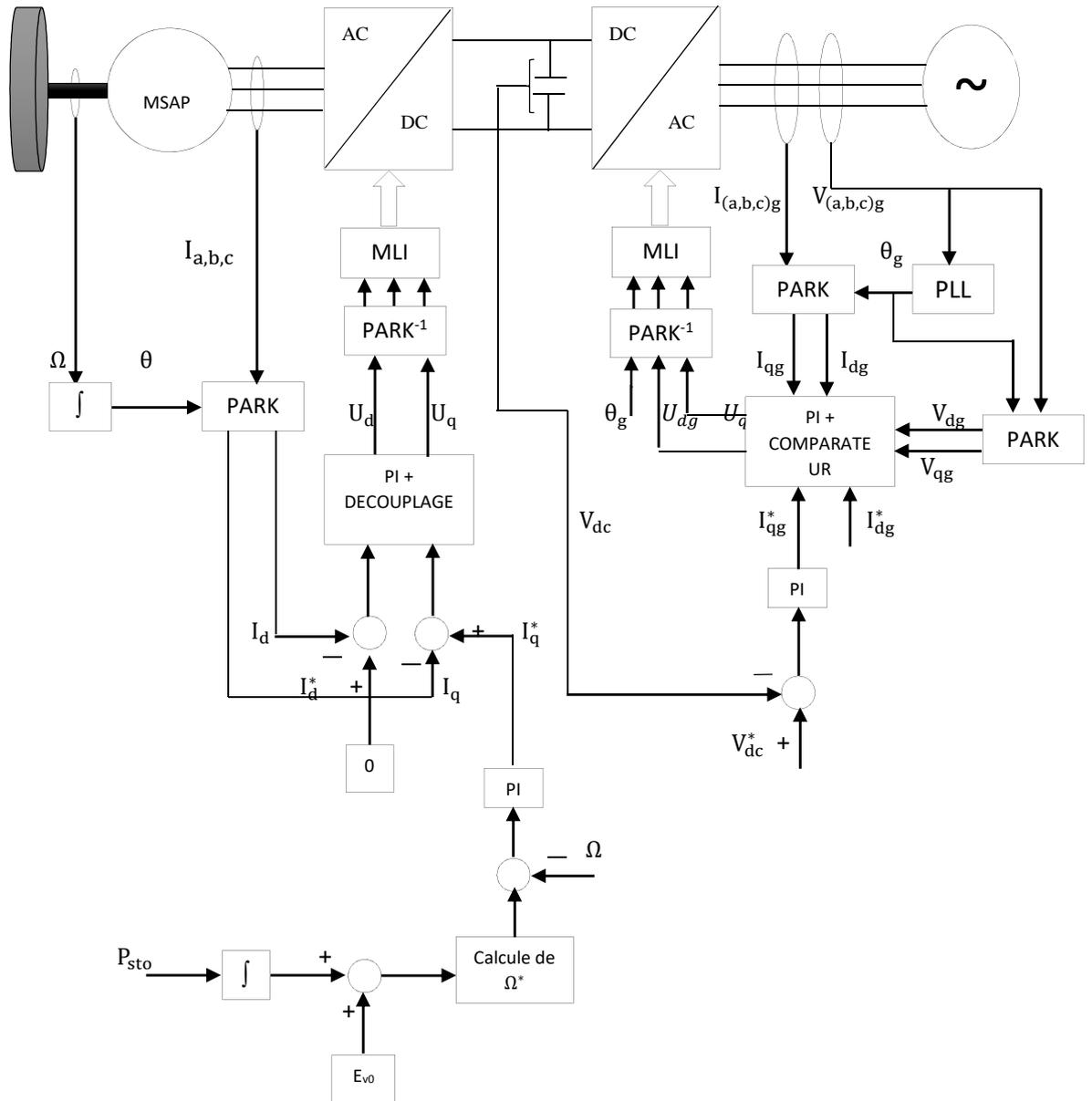


Figure III.6 : Schéma global de simulation

III.3.1 Simulation et interprétation des résultats

Nous présentons dans cette partie les résultats de simulation du système inertiel de stockage d'énergie SISE. Le profil de puissance injecté varie entre -690 W et 690 W, (voir annexe A figure 4)

Les résultats obtenus sont illustrés sur les figures ci-dessous :

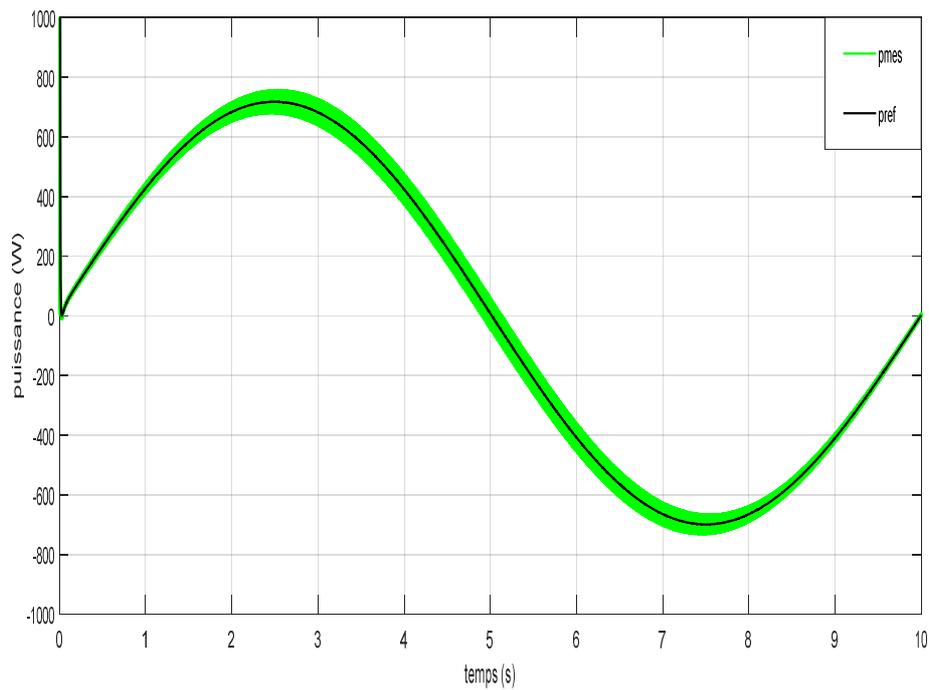


Figure III.7 : Puissance de la MSAP et celle de référence

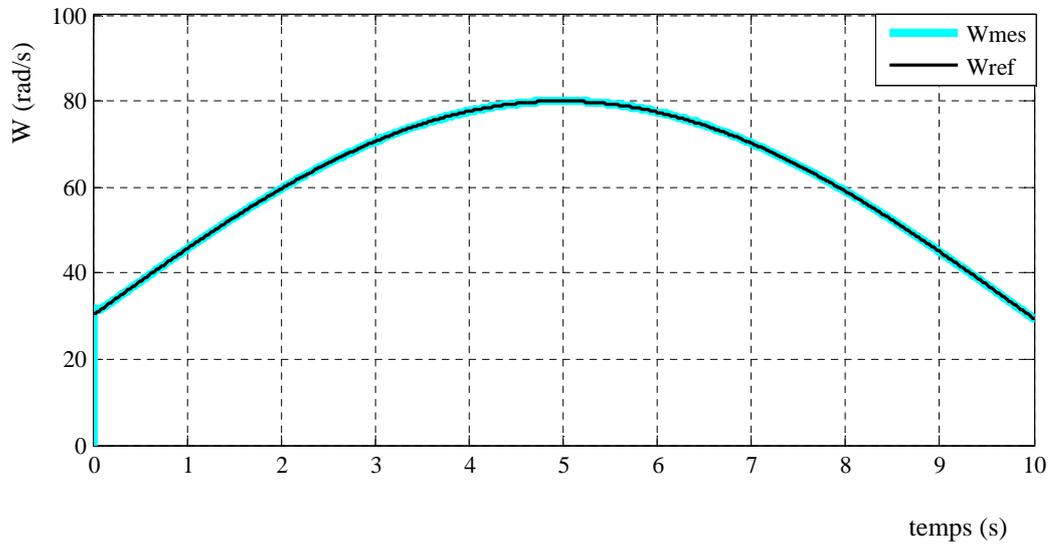


Figure III.8 : Vitesse de la MSAP et sa référence

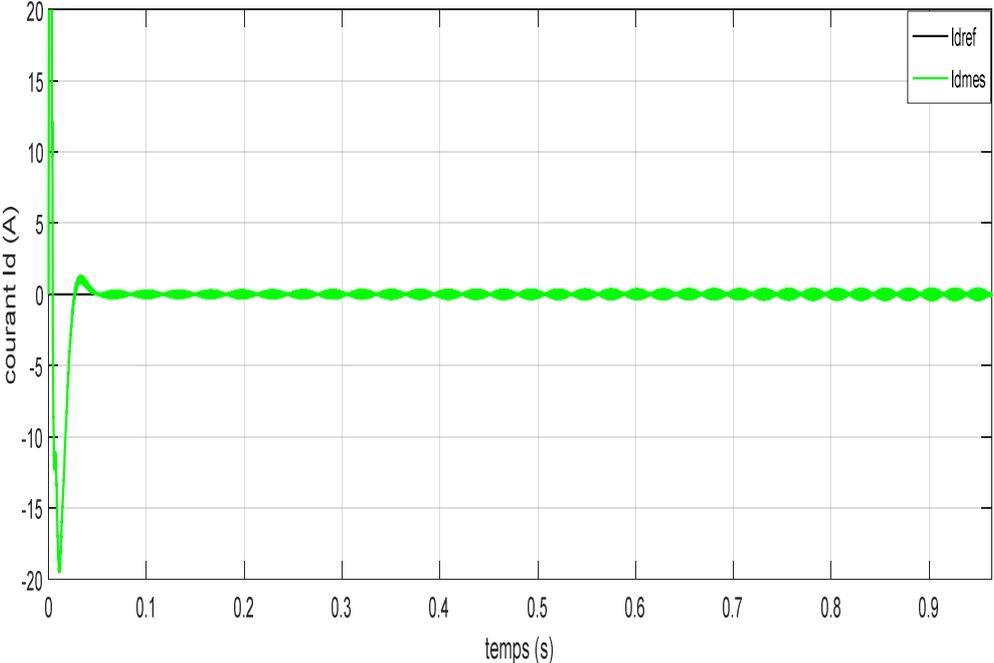


Figure III.9 : Le courant I_d et sa référence

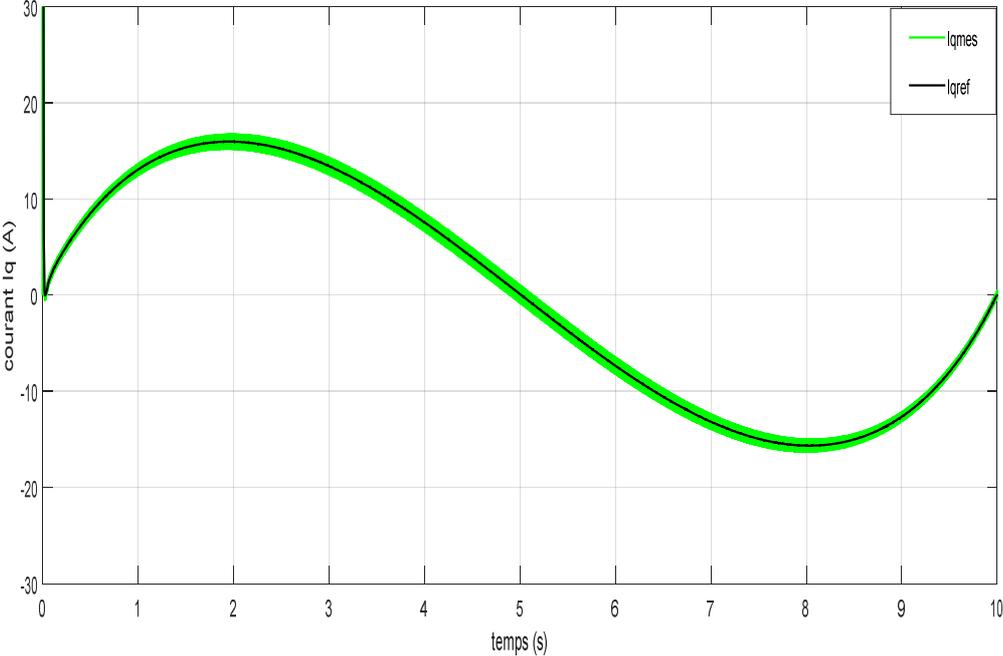


Figure IV.10 : Le courant I_q et sa référence

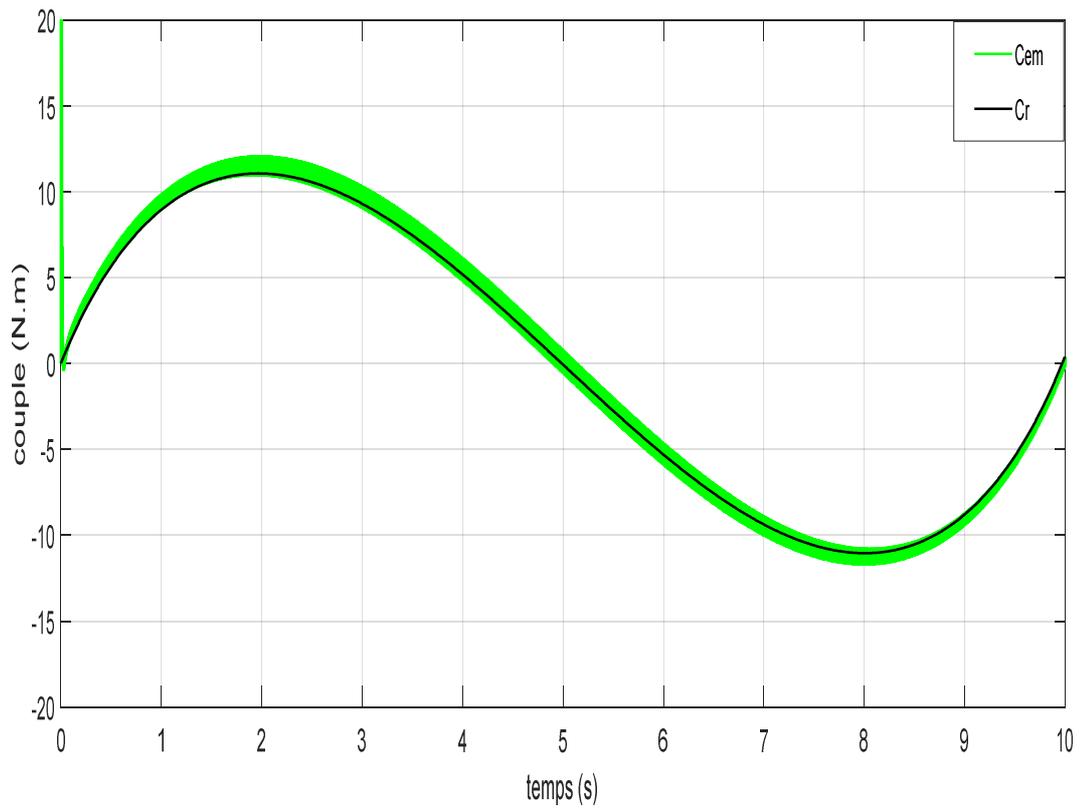


Figure III.10 : Couple électromagnétique et couple résistant de la MSAP

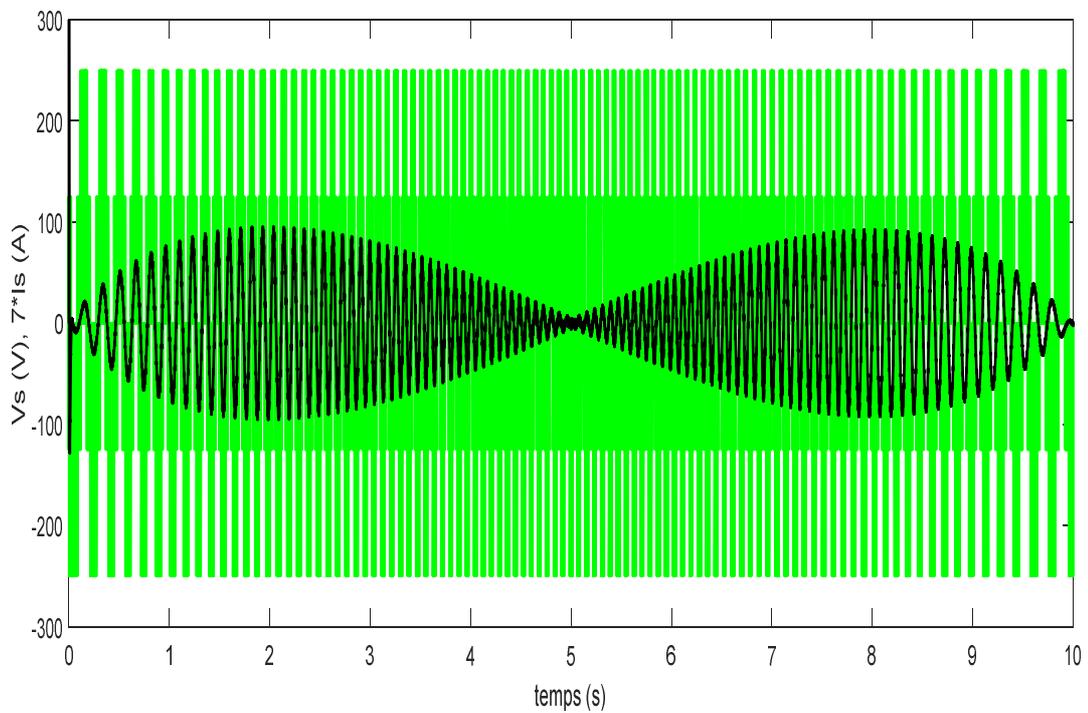


Figure III.11 : Tension et courant d'une phase statorique de la MSAP

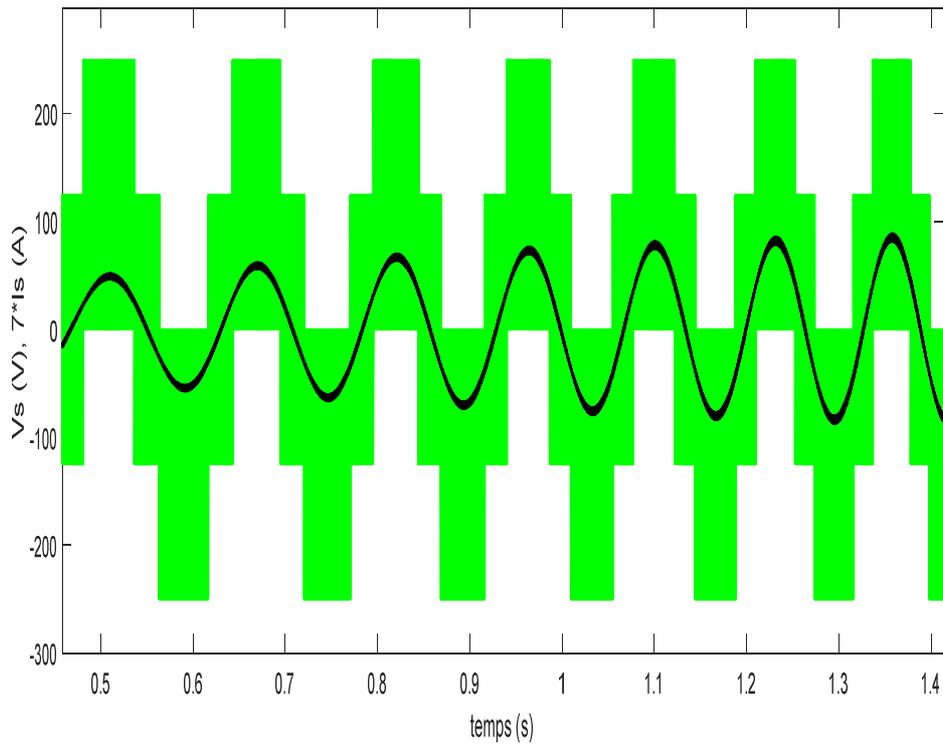


Figure III.12 : Tension et courant du SISE (stockage d'énergie)

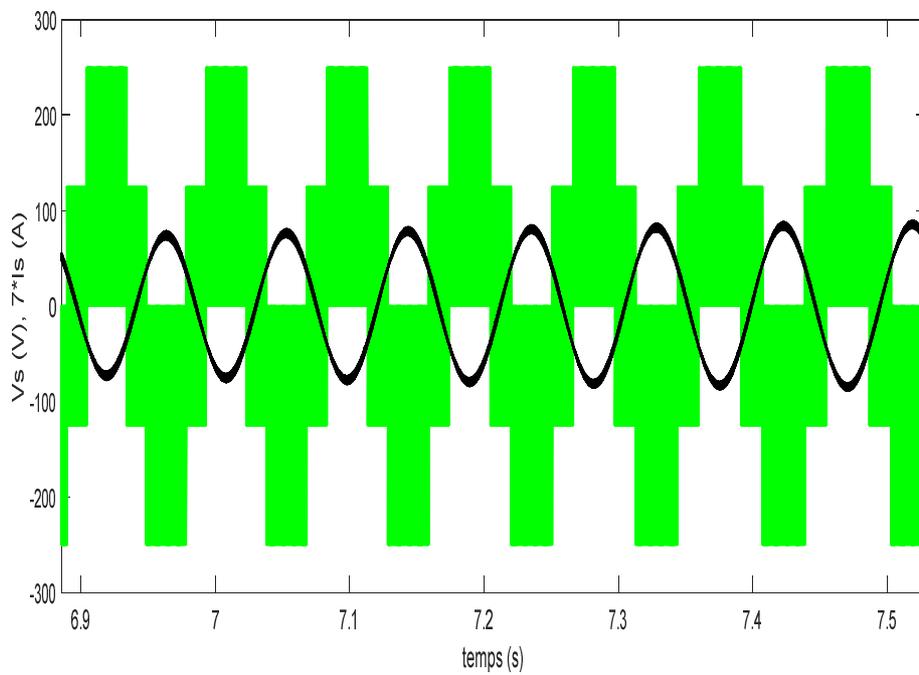


Figure III. 13 : Tension et courant du SISE (restitution d'énergie)

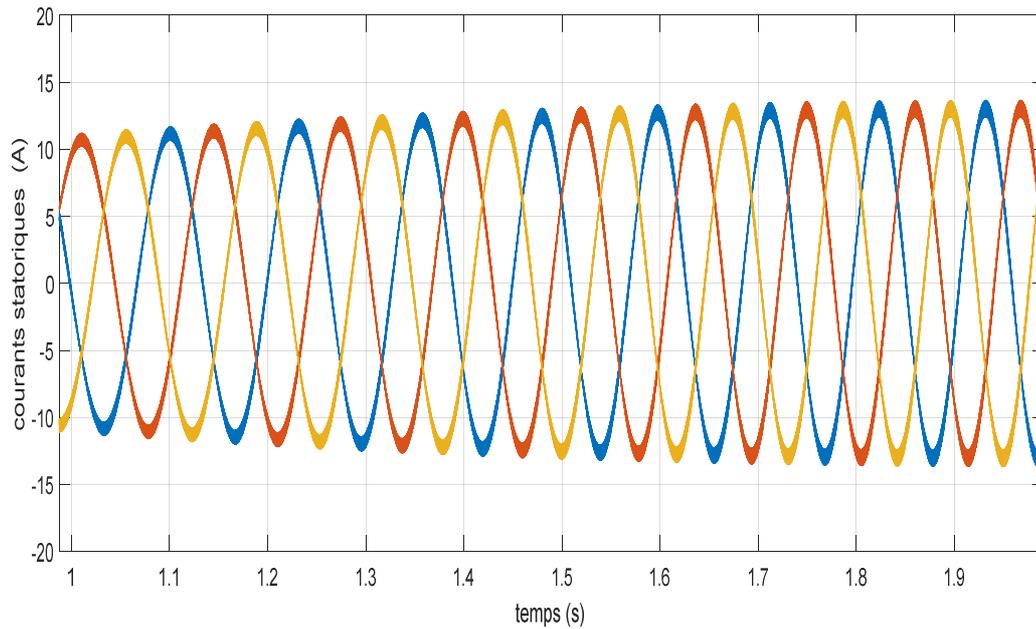


Figure III.14 : Courants des phases statorique

La puissance mesurée suit celle stockée dans le SISE qui est la puissance de référence. Cette dernière varie entre -690 et 690 W comme illustré sur la (figure III.7).

La vitesse du volant est représentée sur la (figure III.8), elle augmente dans la phase de stockage et diminue dans la phase de déstockage. La vitesse de la MSAP suit fidèlement celle de référence qui est la vitesse du volant.

Les (figures III.9) et (figure III.10) montrent les courants I_d et I_q , ils sont identiques avec les courants de référence.

Le signe du couple électromagnétique suit le signe de la puissance du SISE et il est proportionnel au courant I_q comme illustré sur la (figure III.10).

La (figure IV.12) montre que le courant est déphasé d'un angle $\frac{\pi}{2} < \delta < \pi$; par rapport à la tension cela veut dire que la MSAP fonctionne en génératrice (restitution d'énergie).

Lorsque la machine fonctionne en moteur (figure IV.11), le courant et la tension sont déphasés d'un angle $0 < \delta < \frac{\pi}{2}$ (stockage d'énergie).

La (figure IV.13) montre les courants des trois phases statoriques.

Conclusion

Nous avons établi la technique de la commande vectorielle appliquée à la MSAP, cette stratégie permet le découplage entre le couple électromagnétique et le flux de la machine ce qui rend la machine synchrone à aimants permanents similaire à la machine à courant continu. Le réglage de la vitesse avec un régulateur classique (PI) permet d'obtenir des performances dynamiques et statiques satisfaisantes.

Ce chapitre nous a permis d'établir le schéma global de simulation d'un SISE. Le système inertiel de stockage d'énergie est contrôlé par une puissance de référence qui est égale à la différence entre la puissance fournie et celle fixée au réseau.

Nous avons aussi présenté les résultats de simulation sous MATLAB/Simulink et l'interprétation de ces résultats. On peut conclure aussi que les paramètres des régulateurs PI sont bien réglés.

Conclusion générale

Conclusion générale

Nous avons établi dans ce travail l'étude, la modélisation et la simulation d'un système inertiel de stockage d'énergie (SISE) basé sur une machine synchrone à aimants permanents (MSAP). Comme nous venons de le voir, le volant est entraîné par la MSAP, cette dernière est raccordée à un réseau alternatif par l'intermédiaire des convertisseurs statiques commande en MLI.

Les modèles mathématiques des différents composants du SISE ont été présentés, on a commencé tout d'abord par le modèle du volant, ensuite celui de la MSAP et on a terminé par le modèle des convertisseurs d'électronique de puissance et du bus continu.

Nous avons étudié la commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents, et la commande MLI triangulo-sinusoïdale pour le redresseur et l'onduleur. Le système inertiel de stockage d'énergie permet de lisser la puissance fournie au réseau.

Enfin, les modèles mathématiques en question ont été implémentés, et simulé sous l'environnement MATLAB/Simulink. Les résultats obtenus ont été présentés. Ces derniers ont montrés et justifier la fiabilité de la commande du fonctionnement du système étudié.

Nous envisageons en perspectives de remplacer les régulateurs linéaires par d'autres non linéaires a la conduite de renforcer la robustesse et les performances du système de stockage.

Annexes

ANNEXE A

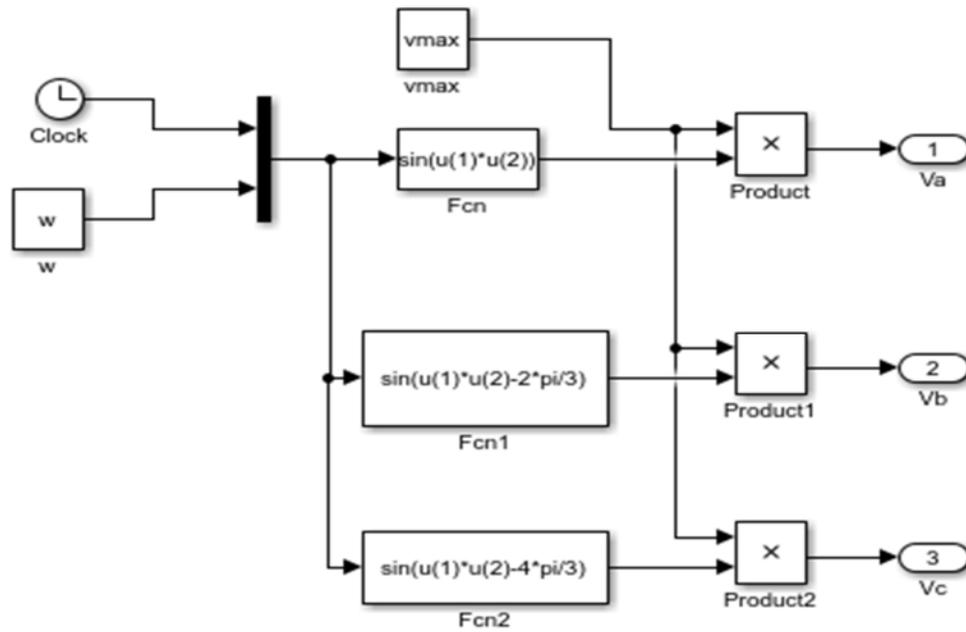


Figure 1 : bloc de l'alimentation triphasé de la MSAP

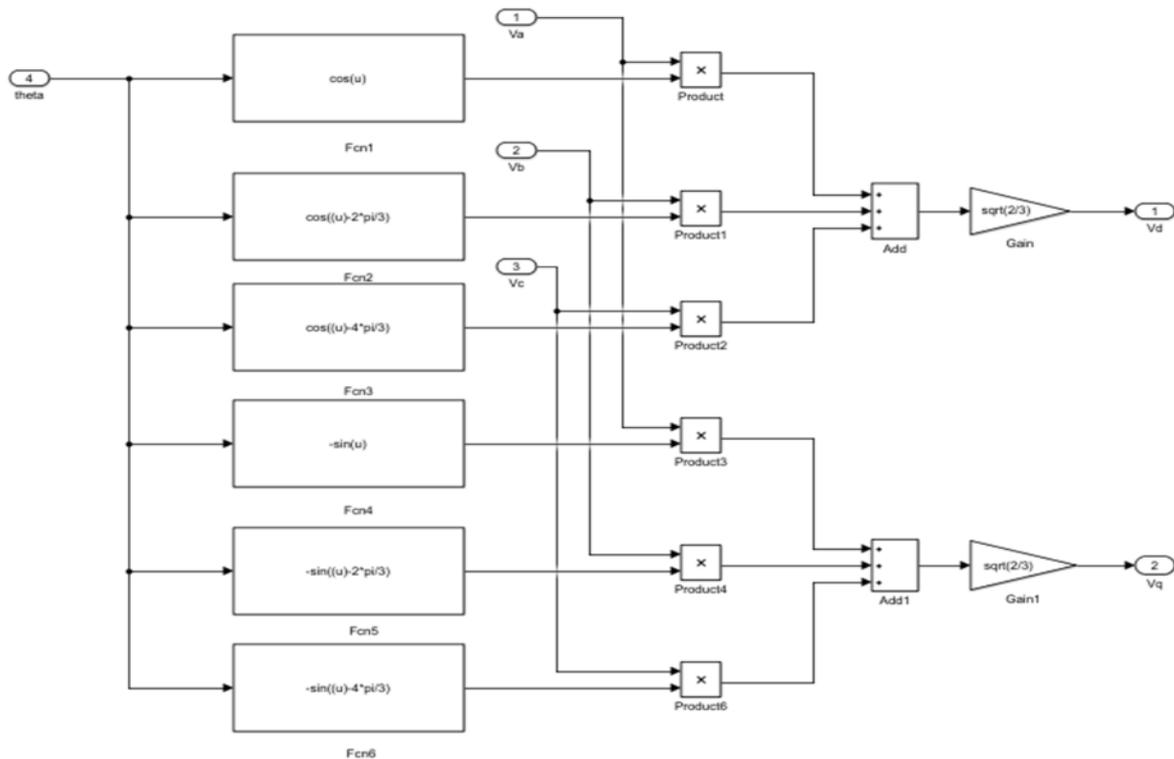


Figure 2 : schéma bloc de la transformation de PARK

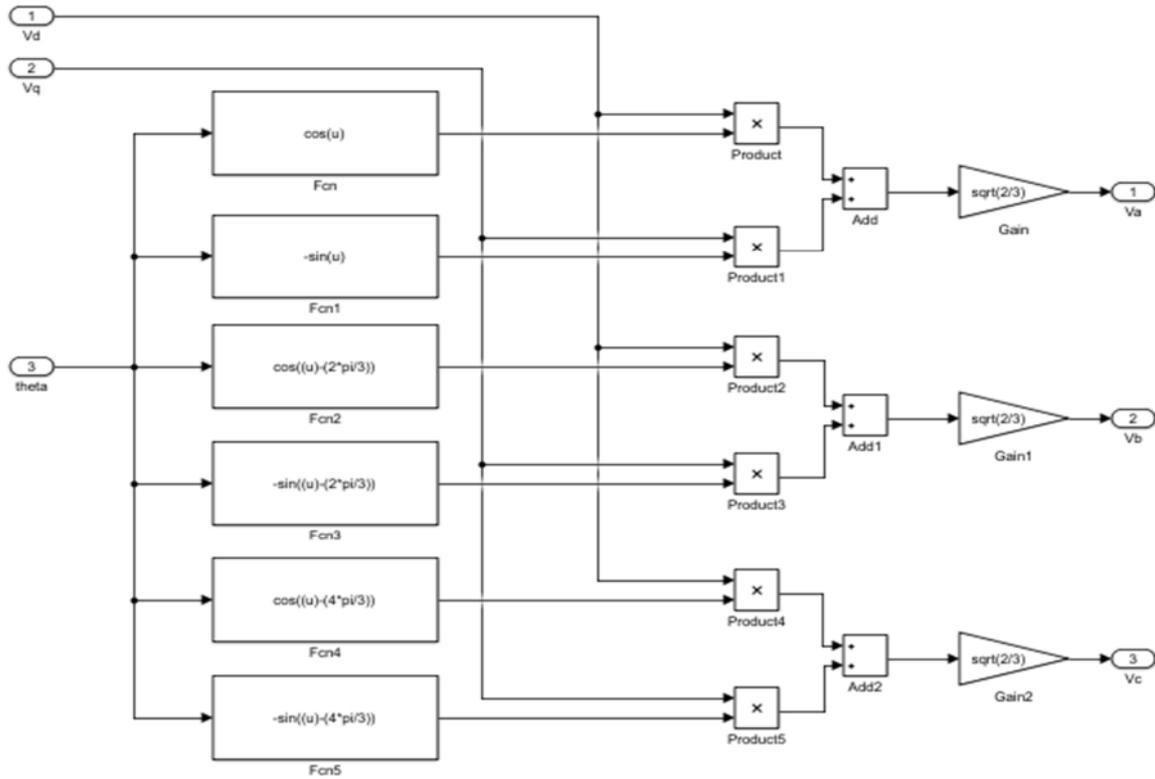


Figure 3 : schéma bloc de la transformation de PARK inverse

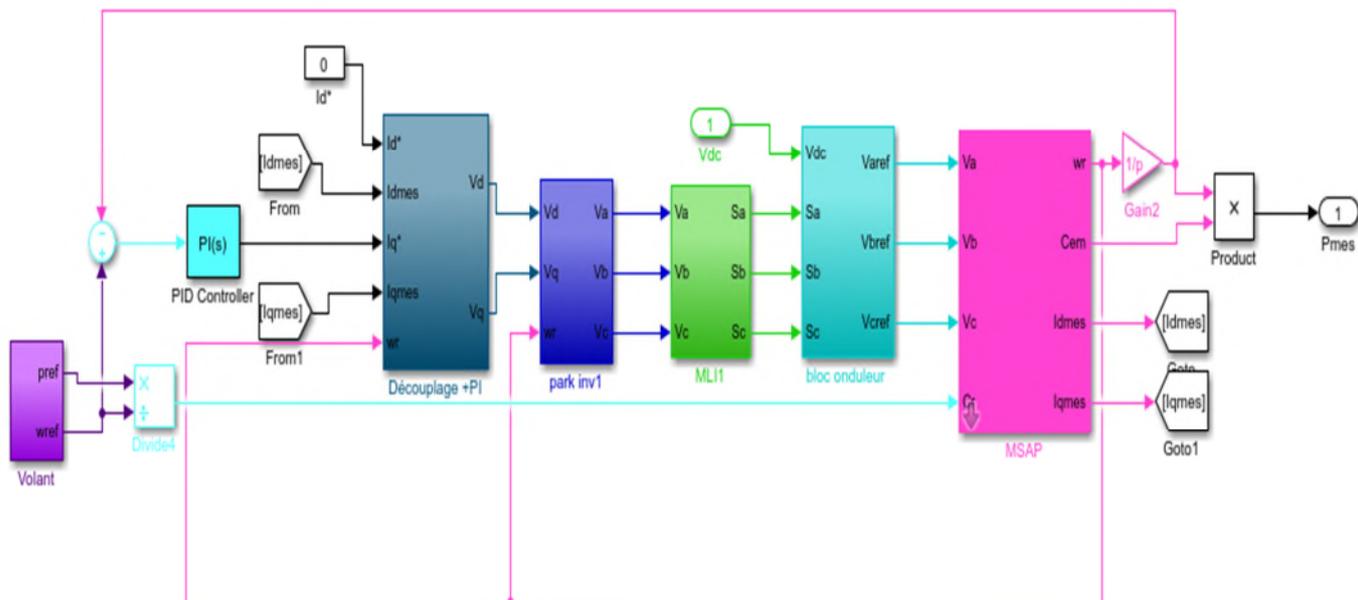


Figure 4 : Schéma de simulation sous MATLAB/Simulink

ANNEXE B**1. Paramètres de la MSAP :**

$$P_n = 750 \text{ W}$$

$$\Omega_n = 750 \text{ tr/min}$$

$$R_s = 0.1738 \Omega$$

$$L_d = 8.524e(-4) \text{ H}$$

$$L_q = 9.515e(-4) \text{ H}$$

$$\varphi_r = 0.11 \text{ wb}$$

$$J = 1.2545 \text{ Kg. m}^2$$

$$f = 0 \text{ N.m. s/rd}$$

$$P = 4.$$

2. Régulateurs PI des courants :

$$k_{id} = 69.1727$$

$$k_{pd} = 0.107409$$

$$k_{iq} = 2453.881$$

$$k_{pq} = 2.0418$$

3. Régulateur de vitesse :

$$k_{i\Omega} = 297.22$$

$$k_{p\Omega} = 11.574$$

Références bibliographiques

- [1] N. Bernard, « *Conception, dimensionnement et commande d'un Moteur/ Générateur synchrone à excitation Homopolaire et à Bobinages dans l'entrefer pour accumulateur électromécanique d'énergie* », Thèse de doctorat, Antenne de Bretagne de l'école Normale supérieure de Cachan, France, 2001.
- [2] G.O. Cimuca, « *Système inertiel de stockage d'énergie associé à des générateurs éoliens* », Thèse de doctorat, Ecole Nationale supérieure d'arts et Métiers, Paris, France, 2005.
- [3] B. Multon et J. Marie Peter, « *Le Stockage de l'énergie électrique Moyens et Application* », Revue 3E N°6 pp. 59-64, 1996.
- [4] F. Faure, « *Suspension magnétique pour volant d'inertie* », Thèse de doctorat, Institut national, polytechnique de Grenoble, France, 2003.
- [5] B. Multon, « *Le stockage associé la production d'électricité en réseau* », Conférence système et applications des technologies de l'information et de l'énergie UMR-8029, France, 2005.
- [6] A. Marquet, C. Levillain, « *Stockage d'électricité dans les systèmes électriques* », Techniques de l'ingénieur D 4 030.
- [7] N. Achaïbou, « *Stockage des énergies renouvelables* », Bulletin des énergies renouvelables, CDER Bouzareah, Algérie, 2004.
- [8] L. Leclercq, « *Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes* », Thèse de doctorat, Université de Lille, France, 2004.
- [9] B. Robyns and M. Nasser, « *Modélisation et simulation d'une éolienne à vitesse variable basée sur une génératrice asynchrone à cage in the Proceeding of Electrotechnique du Futur* » EF'2001, Nancy, France, pp : 77-82, 2001.
- [10] A. Schuster, « *Commande, réglage et optimisation d'un convertisseur matriciel pour entraînements par moteur asynchrone* », Thèse de Doctorat, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse, 1998.
- [11] B. BOUKAIS, « *Contribution A La Modélisation Des Systèmes Couples Machines Convertisseurs : Application Aux Machines A Aimants Permanents (BDCM-PMSM)* », Thèse de Doctorat, Université mouloud mammeri, Tizi-Ouzou, 2012.

- [12] H.Aid, W.Aina «*Synthèse De Lois de Commande Non-Linéaires Pour Un Entraînement Electrique A Vitesse Variable Basé Sur Un Moteur Synchrone A Aimants Permanents* », Mémoire de Master, Université abou bekr belkaid, Tlemcen, 2013.
- [13] M.Oubidar, S.Bendaoud, « *Machine Synchrone/Asynchrone* », Projet de fin d'étude en ingénierie, Université du québec en Abitibi-Témiscamingue, 2010
- [14] M.S.Mahgoun, « *Application De La Commande Aux Systèmes Linéaires Perturbés* », Mémoire de Magister, Université ferhat abbas-Setif (UFAS), 2012.
- [15] S. Hamecha, Ep.Bourekache, « *Etude Et Commande D'une Eolienne A Base D'une Machine Synchrone A aimants Permanents* », Mémoire de Magister, Université mouloud mammeri de Tizi-Ouzou, 2013.
- [16] M.D. Bidart, « *Commande Coopérative Des Systèmes Monoconvertisseurs Multimachines Synchrones* », Thèse de Doctorat, L'Institut national polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), 2011.
- [17] G. Grellet, G. Clerc, « *Actionneurs électriques* », Editions Eyrolles, Paris, France, 1997.
- [18] B. Robyns, « *Synthèse de commandes robustes pour machine asynchrone basée sur une théorie caractérisant la sensibilité paramétrique* », Rapport de synthèse, Université des Sciences et Technologie de Lille, France, 2000.
- [19] J. P. Caron, J. P. Hautier, « *Modélisation et commande de la machine asynchrone* », Edition Technip, Paris, 1995.
- [20] A. Kelemen, M. Imecs, « *Sisteme de reglare cu orientare după câmp ale mașinilor de current alternativ* », Editura Academiei R.S.R., București, 1987.
- [121] I. Boldea, S. A. Nasar, « *Induction Machines Handbook* », CRC Press, Boca Raton, Florida, U.S.A., 2002.
- [22] M.D. Bidart, « *Commande coopérative des systèmes monoconvertisseurs multimachines synchrones* », Thèse de Doctorat, L'Institut national polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), 2001.
- [23] ZIANE. Djamel « *Optimisation de la Commande de la Machine Asynchrone Double Etoile en Fonctionnement Normal et Dégradé* », Thèse Doctorat, Université Abderrahmane Mira de Béjaia, Algérie, 2015.
- [24] R. Sadouni, « *Commande par mode glissant flou d'une machine asynchrone à double étoile* », Thèse de Magister, Université de Sidi Bel Abbès, 2010.
- [25] B. Abde Raouf, « *commande vectorielle de la MSAP* », Mémoire de Magister, Université de Biskra, 2014.

- [26] N. Bounasla, « *Commande par mode de glissement d'ordre supérieur de la machine synchrone à aimants permanents* », Mémoire de Magister, Université de Sétif, 2014.
- [27] H. Mohammed Ilyes, « *Commande sans capteur de vitesse d'un moteur synchrone à aimants permanents par l'utilisation de la commande du couple et d'un observateur de vitesse à mode glissant* », Mémoire de Magister, Université de Biskra, 2012.
- [28] A. Housseem, A. Wafaa, « *Synthèse de lois de commande non-linéaires pour un entraînement électrique à vitesse variable basé sur un moteur synchrone à aimants permanents*», Mémoire de Master, Université de Tlemcen, 2013.