

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 Electrotechnique
Spécialité : Commandes Electriques

Thème :

**Commande d'un système de stockage inertiel à base de la machine synchrone
à aimants permanents**

Préparé par :

BORDJAH Salima,
HADDOUCHE Lamia.

Encadré par :

Mr. S.TARAFT

Année Universitaire : 2017/2018

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et le courage d'accomplir ce modeste travail.

Nous voudrions présenter nos remerciements à notre promoteur *M^r TARAFT Saci* pour son soutien, sa patience et ses conseils durant toute la période de travail.

Nos vifs remerciements vont également aux membres de jury d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

DEDICACES

Je dédie ce mémoire à :

Mes parents

Mes frères

Mes sœurs

Ma binôme

Et tous mes amis

SALIMA

DEDICACES

Je dédie ce mémoire à :

Mes parents

Mes sœurs

Zahir

Ma binôme

Ma famille et mes amies

LAMIA

TABLE DES MATIERES

Table des matières

Liste des figures

Notations et abréviations

Introduction générale1

Chapitre I : Généralités sur les systèmes de stockage

I.	Introduction	2
II.	Les systèmes de stockage d'énergie	2
	1. Stockage d'énergie sous forme électromagnétique	2
	1.1. Super condensateurs	2
	1.2. Supraconducteurs	3
	2. Stockage d'énergie sous forme électrochimique	3
	2.1. Batteries électrochimiques	3
	2.2. Batteries à circulation	3
	3. Stockage sous forme d'énergie thermique	4
	3.1. Par chaleur sensible	4
	3.2. Par chaleur latente	5
	4. Stockage sous forme d'énergie chimique	5
	4.1. Hydrocarbure	5
	4.2. Biomasse	5
	4.3. Piles à combustible à hydrogène	5
	5. Stockage sous forme d'énergie mécanique	6
	5.1. Station de transfert d'énergie par pompage-turbinage (STEP)	6
	5.2. A air comprimé	7
	5.3. Volant d'inertie	7
III.	Conclusion	8

Chapitre II : Modélisation du système de stockage inertiel

I.	Introduction	9
II.	Volant d'inertie	9
	1. Avantages et inconvénients de stockage par volant d'inertie	9
	2. Modélisation du volant	9

III.	Machine synchrone à aimants permanents	10
1.	Description de la machine synchrone à aimants permanents	11
2.	Ses avantages	12
3.	Ses inconvénients	12
4.	Modélisation de la MSAP	13
4.1.	Hypothèses simplificatrices	13
4.2.	Modèle triphasé	13
4.2.1.	Equations électriques	13
4.2.2.	Equations magnétiques	14
4.2.3.	Equation mécanique	15
4.3.	Modèle biphasé	15
4.3.1.	Equations électriques dans le repère de Park	16
4.3.2.	Equations de flux	17
4.3.3.	Equation de couple électromagnétique	17
3.	Convertisseurs statiques	18
1.	Modélisation du redresseur	18
2.	Modélisation du filtre	19
3.	Modélisation de l'onduleur	20
4.	Conclusion	22

Chapitre III : Commande du système de stockage inertiel

I.	Introduction	23
II.	Commande du système de stockage	23
1.	Commande du SISE	23
2.	Principe de la commande vectorielle	24
3.	Commande vectorielle de la MSAP	24
4.	Découplage des courants I_d et I_q	25
5.	La régulation	25
5.1.	Régulateurs des courants	26
5.2.	Régulateur de vitesse	28
6.	Commande des convertisseurs statiques	28
6.1.	Stratégie de la commande MLI	29
6.2.	Principe de la technique MLI triangulo-sinusoidale	30
III.	Conclusion	32

Chapitre IV : Simulation et interprétation des résultats

I.	Introduction	33
II.	Schéma de simulation	33
III.	Interprétation des résultats	34
IV.	conclusion	39
	Conclusion générale	40

Annexes

Bibliographie

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les systèmes de stockage

Figure I.1 : Stockage d'énergie dans les super-condensateurs	2
Figure I.2 : Stockage dans les supraconducteurs	3
Figure I.3 : Stockage dans des batteries à circulation	4
Figure I.4 : Schéma de stockage par chaleur sensible	5
Figure I.5 : Fonctionnement d'une pile à combustible	6
Figure I.6 : Schéma du principe d'une STEP.....	7
Figure I.7 : Technique de stockage à air comprimé	7
Figure I.8 : Composants du SISE	8

Chapitre II : Modélisation du système de stockage inertiel

Figure II.1 : Schéma du SISE	10
Figure II.2 : Structure d'un rotor à pôles saillant	11
Figure II.3 : Structure d'un rotor à pôles lisse	11
Figure II.4 : Représentation de la MSAP	12
Figure II.5 : Axes de repère classique pour la MSAP	13
Figure II.6 : Axes de repère dq pour la MSAP	16
Figure II.7 : Modèle de la MSAP sous Simulink	18
Figure II.8 : Schéma du redresseur	19
Figure II.9 : Schéma d'un filtre	20
Figure II.10 : Schéma de l'onduleur	20
Figure II.11 : Schéma bloc de l'onduleur	22

Chapitre III : Commande d'un système de stockage inertiel

Figure III.1 : Schéma de principe de stockage inertiel	23
Figure III.2 : Représentation de la commande par PI	25
Figure III.3 : Boucle de régulation du courant I_d	26

Figure III.4 : Boucle de régulation du courant I_q	26
Figure III.5 : Boucle de régulation de la vitesse Ω	29
Figure III.6 : Commande MLI sous MATLAB	31
Figure III.7 : Schéma bloc de la porteuse sous MATLAB	31
Figure III.8 : Principe de la MLI	32
Figure III.9 : Signal de sortie	32

Chapitre IV : Simulation et interprétation des résultats

Figure IV.1 : Schéma global de simulation	34
Figure IV.2 : Puissance de la MSAP et celle de référence	35
Figure IV.3 : Vitesse de la MSAP et celle de référence	35
Figure IV.4 : Le courant I_d et sa référence	36
Figure IV.5 : Le courant I_q et sa référence	36
Figure IV.6 : Couple électromagnétique et couple résistant de la MSAP	37
Figure IV.7 : Tension et courant d'une phase statorique de la MSAP	37
Figure IV.8 : Tension et courant du SISE (stockage d'énergie)	38
Figure IV.9 : Tension et courant du SISE (restitution d'énergie)	38
Figure IV.10 : courants des phases statorique	39

Notations

Ω_v : Vitesse de rotation du volant [rad/s] ;

J_v : Moment d'inertie du volant [$Kg.m^2$] ;

P_v : Puissance à fournir [W] ;

ΔE_v : Variation de l'énergie [$Joule$] ;

Δt : Temps nécessaire pour fournir la puissance P_v [s] ;

Ω_{vmax} : Vitesse maximale du volant [rad/s] ;

Ω_{vmin} : Vitesse minimale du volant [rad/s] ;

$[V_s]$: Vecteur des tensions statoriques ;

$[I_s]$: Vecteur des courants statoriques ;

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

$[R_s]$: Matrice des résistances statoriques ;

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

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

P : Nombre de paires de pôles ;

θ : Angle électrique du rotor par rapport au stator [rad] ;

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

C_r : Couple résistant [$N.m$] ;

J : Moment d'inertie de la machine [$Kg.m^2$] ;

f : Coefficient de frottement visqueux [$N.m.s/rad$] ;

Ω : Vitesse angulaire mécanique du rotor [rad/s] ;

$[P(\theta)]$: Matrice de Park ;

I_d, I_q : Courants statoriques [A] ;

V_d, V_q : Tensions statoriques [V] ;

R_s : Résistance d'une phase statorique [Ω] ;

L_d, L_q : Inductances du stator [H] ;

φ_r : Flux de l'aimant permanent [Wb] ;

ω_r : Vitesse angulaire du rotor [rad/s] ;

θ_m : Position mécanique du rotor [rad] ;

V_{dc} : Tension continue aux bornes du condensateur [V] ;

V_a, V_b, V_c : Tensions alternatives à l'entrée du redresseur [V] ;

I_a, I_b, I_c : Courants alternatifs à l'entrée du redresseur [A] ;

C : Capacité du condensateur [F] ;

I_{red} : Courant à la sortie du redresseur [A] ;

I_{ond} : Courant à l'entrée de l'onduleur [A] ;

V_{a0}, V_{b0}, V_{c0} : Tensions de sortie de l'onduleur par rapport au point milieu "o" [V] ;

V_{an}, V_{bn}, V_{cn} : Tensions simples à la sortie de l'onduleur [V] ;

T_d : Constante de temps électrique relative à l'axe d [s] ;

T_q : Constante de temps électrique relative à l'axe q [s] ;

k_{pd}, k_{pq} : Gains de l'action proportionnelle du correcteur du courant I ;

k_{id}, k_{iq} : Gains de l'action intégrale ;

$k_{p\Omega}$: Gain proportionnel de la vitesse ;

$k_{i\Omega}$: Gain intégral de la vitesse ;

τ : Constante de temps en boucle fermée [s] ;

T_r : Temps de réponse [s] ;

ξ : Coefficient d'amortissement ;

ω_n : Pulsation naturelle [rad/s] ;

P_{sto}^* : Puissance électrique de référence stocké dans le SISE [W] ;

P_f : Puissance fournie au réseau [W] ;

$P_{rés}^*$: Puissance injectée au réseau [W] ;

E_{v0} : Energie initiale du volant [*Joule*] ;

r : Coefficient de réglage de tension ;

m : Indice de modulation.

Abréviations

MSAP : Machine Synchrone à Aimants Permanents ;

SISE : Système Inertiel de Stockage d'Energie ;

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion ;

AC : Alternative Current ;

DC : Direct Current ;

PI : Proportionnel-Intégral ;

FTBO : Fonction de Transfert en Boucle Ouverte ;

FTBF : Fonction de Transfert en Boucle Fermée ;

INTRODUCTION GENERALE

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 à circulation, 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 présente des généralités 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 du volant d'inertie, la machine synchrone à aimants permanents, ainsi que les convertisseurs d'électronique de puissance.

Le troisième chapitre est destiné à la commande du système inertiel de stockage d'énergie.

Le quatrième chapitre présente la simulation sous l'environnement MATLAB/Simulink, et l'interprétation des résultats obtenus.

Enfin, on termine par une conclusion générale.

CHAPITRE I

I. Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les technologies de stockage de l'énergie électrique.

Le stockage d'énergie consiste à préserver une quantité d'énergie pour une utilisation ultérieure [2].

II. Systèmes de stockage d'énergie

L'électricité ne peut pas être stockée facilement, il est nécessaire de la transformer sous une autre forme d'énergie [3].

L'énergie peut se présenter sous différentes formes (thermique, mécanique, chimique, électromagnétique, électrochimique) [7].

1. Stockage d'énergie sous forme électromagnétique

Les super-condensateurs et les supraconducteurs sont des systèmes qui stockent de l'énergie sous forme d'énergie électrique.

1.1. Super-condensateurs

Les super-condensateurs sont des composants électriques, permettent de stocker directement l'énergie sous forme d'énergie électrique. Ils sont constitués de deux armatures conductrices stockant des charges électriques (Figure I.1). Ils sont capables de délivrer une forte puissance pendant un temps très court. Les super-condensateurs sont utilisés non seulement pour alimenter de gros moteurs, mais aussi des dispositifs de faible puissance [4].

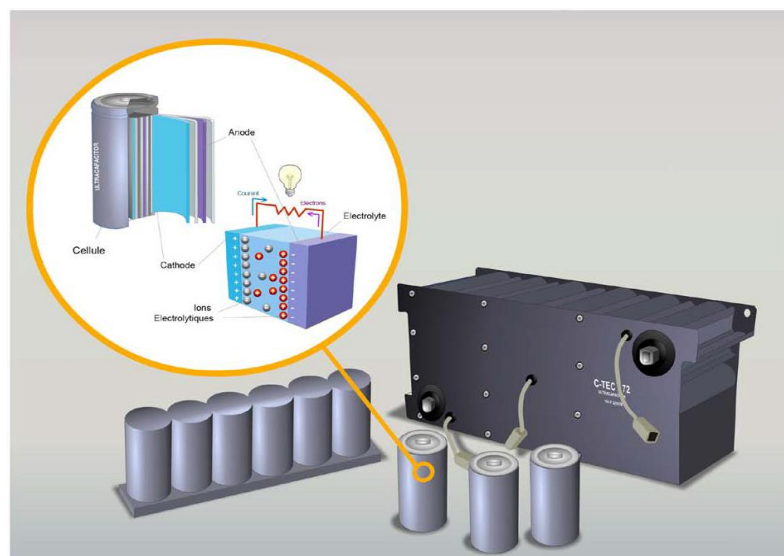


Figure I.1 : Stockage d'énergie dans les super-condensateurs [14]

1.2.Supraconducteurs

L'énergie peut être stockée sous forme d'énergie d'un champ magnétique créé par un courant circulant dans une bobine supraconductrice. Pour maintenir la bobine dans l'état supraconducteur, il faut l'introduire dans un cryostat rempli d'hélium liquide, comme l'indique la (Figure I.2). Ce système est destiné au stockage de grandes quantités d'énergie. Les couts de fabrication et de maintenance sont très élevés [3].

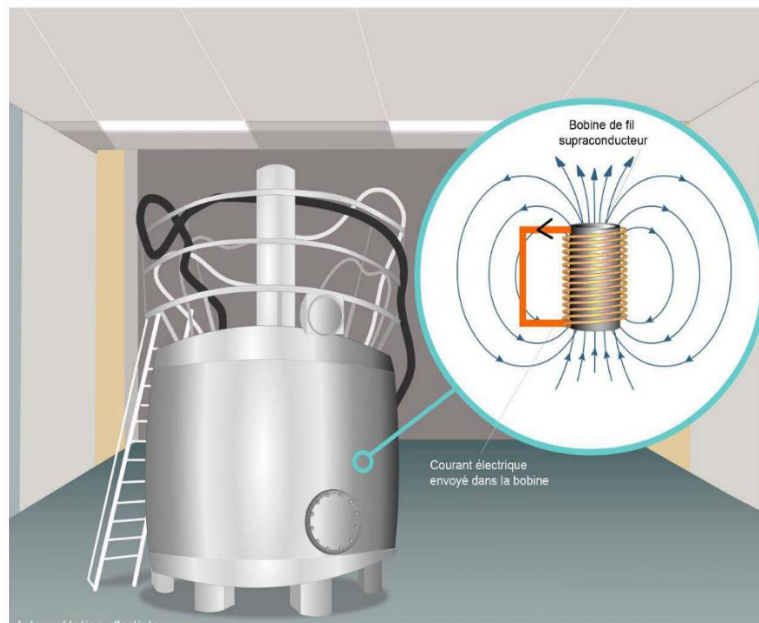


Figure I.2 : Stockage dans les supraconducteurs [14]

2. Stockage d'énergie sous forme d'énergie électrochimique

Ce mode de stockage consiste à stocker l'énergie dans des batteries sous forme chimique et la restituer sous forme électrique [12].

2.1.Batteries électrochimiques

Le stockage d'énergie dans les batteries électrochimiques est la technique la plus répandue. Des réactions chimiques sont provoquées en utilisant l'énergie électrique et en la stockant sous forme d'énergie chimique [3] ; et cela en fonction du type de batterie : c'est la phase de charge de la batterie. Selon la demande, les réactions chimiques inversées produisent ensuite de l'énergie électrique et déchargent le système [4].

2.2.Batteries à circulation

Ces batteries permettent de contourner la limitation des accumulateurs électrochimiques classiques, dans lesquelles les réactions électrochimiques créent des

composants solides qui sont stockés directement sur les électrodes où ils se sont formés. La masse qu'il est possible d'accumuler localement est forcément limitée, ce qui fixe un maximum à la capacité (Figure I.3) [5].

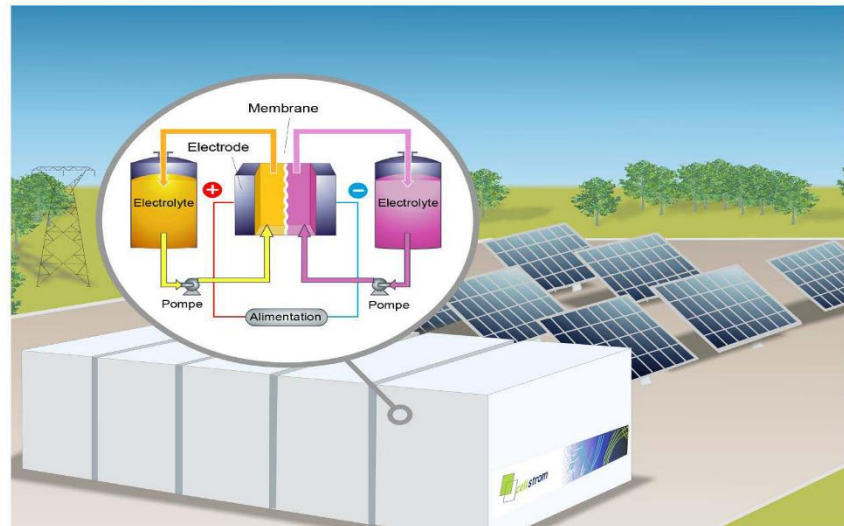


Figure I.3 : Stockage dans des batteries à circulation [14]

3. Stockage sous forme d'énergie thermique

L'énergie peut être stockée sous forme de chaleur et elle peut être restituée ultérieurement [11].

3.1.Par chaleur sensible

L'énergie thermique est stockée en élevant la température d'un matériau. Ce principe est similaire à celui des chauffe-eaux solaire, ils récupèrent la chaleur dans la journée pour la restituer ensuite (Figure I.4) [4].

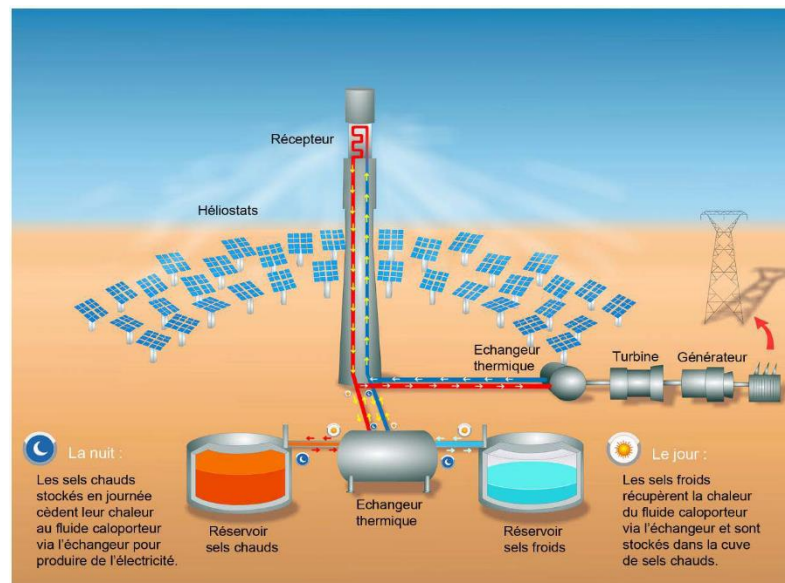


Figure I.4 : Schéma de stockage par chaleur sensible ^[14]

3.2.Par chaleur latente

La chaleur latente est la quantité d'énergie qui est nécessaire pour faire passer un corps dans son état supérieur (solide vers liquide ou liquide vers gazeux). Cette transformation permet de stocker l'énergie. La transformation inverse permet de libérer l'énergie accumulée ^[4].

4. Stockage sous forme d'énergie chimique

Tout combustible peut être considéré comme un stocke d'énergie sous forme chimique ^[6].

4.1.Hydrocarbure

Le combustible (fioul, charbon ou gaz) est brûlé dans la chaudière utilisant la chaleur dégagé par la combustion pour produire de la vapeur de l'eau sous pression.

4.2.Biomasse

C'est la forme d'énergie la plus ancienne. Lorsque le bois ou les biocarburants sont brûlés, ils dégagent une énergie sous forme de chaleur qui peut être récupérée et stockée ^[4].

4.3.Pile à combustible à hydrogène

Cette pile est constituée de deux électrodes (une anode et une cathode) séparées par un électrolyte ^[9]. Ce dernier peut conduire des molécules ionisées d'une électrode

à une autre. L'hydrogène qui est produit par l'électrolyse de l'eau est converti en énergie par la pile à combustible.

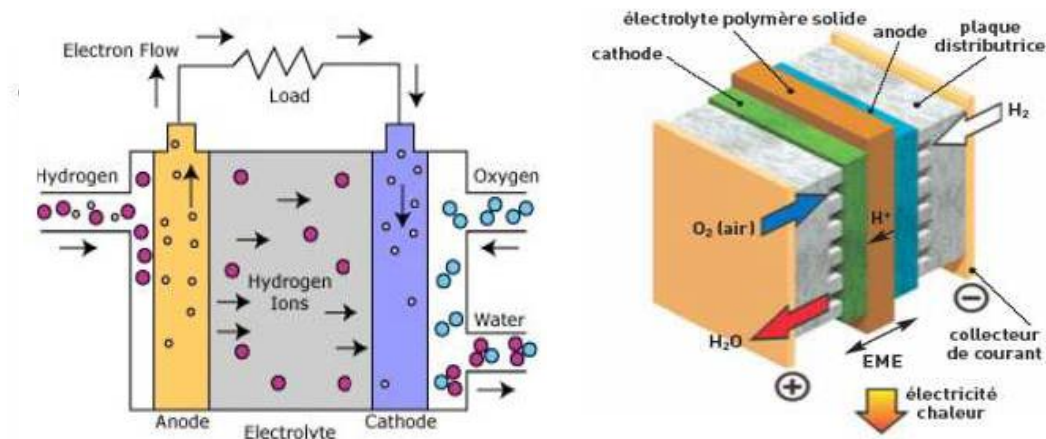


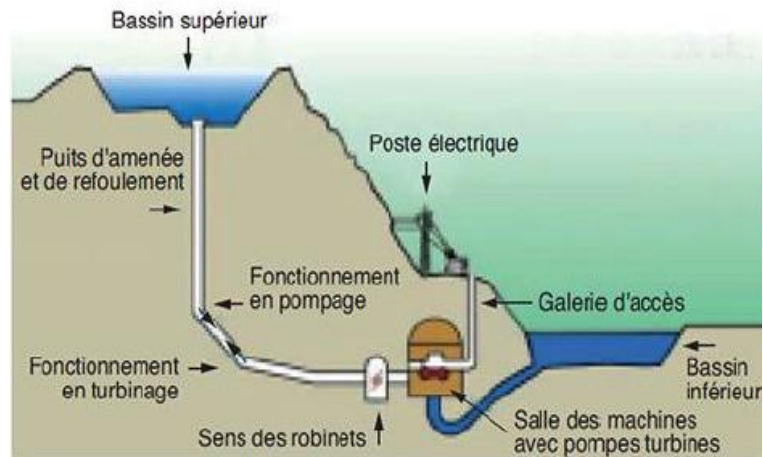
Figure I.5 : Fonctionnement d'une pile à combustible ^[23]

5. Stockage sous forme d'énergie mécanique

Le système de stockage d'énergie mécanique comporte le stockage d'énergie sous forme d'air comprimé, stockage d'énergie par (STEP), et par volant d'inertie ^[10].

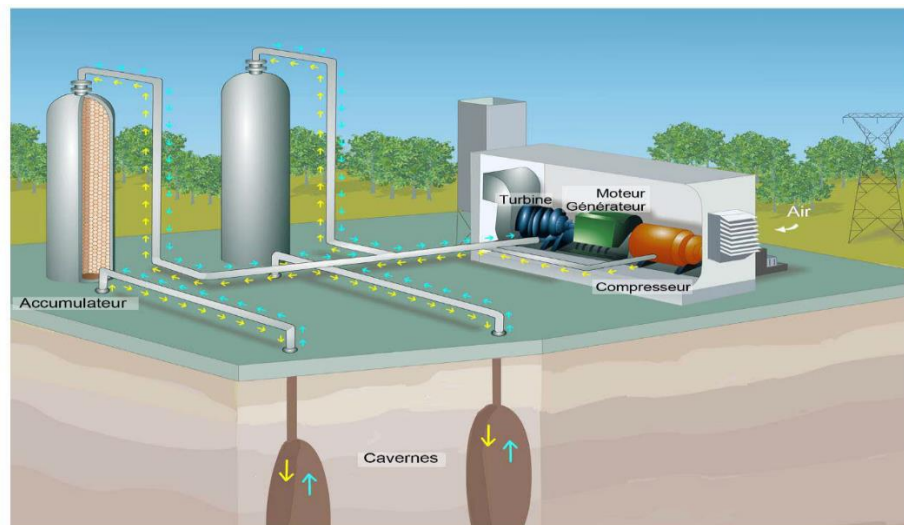
5.1. Station de transfert d'énergie par pompage-turbinage (STEP)

Ce système comporte deux réservoirs à des altitudes différentes. Il consiste à transférer l'eau, par pompage, du réservoir inférieur dans le réservoir supérieur lorsqu'il y a un surplus de l'électricité. La circulation de l'eau est inversée, lorsqu'il y a un manque de la production électrique, en traversant une ou plusieurs turbines, comme le montre la (Figure I.6). Ce type permet de stocker une grande quantité d'énergie électrique ^[6].

Figure I.6 : Schéma du principe d'une STEP ^[13]

5.2. Stockage à air comprimé

Cette technologie comporte un grand réservoir souterrain. Quand la demande d'électricité est importante, l'air comprimé est délivré à une turbine à gaz entraînant un générateur électrique ^[3].

Figure I.7 : Technique de stockage à air comprimé ^[14]

5.3. Stockage inertiel

Ce système comporte une masse tournante qui est le volant d'inertie couplé à une machine électrique réversible ^[3]. Il permet de stocker l'énergie sous forme d'énergie cinétique. La machine électrique lui fournit une énergie cinétique, c'est le fonctionnement moteur. Et la récupère sous forme d'une énergie électrique selon les

besoins, c'est le fonctionnement générateur ^[6]. Ce point sera détaillé dans le deuxième chapitre.

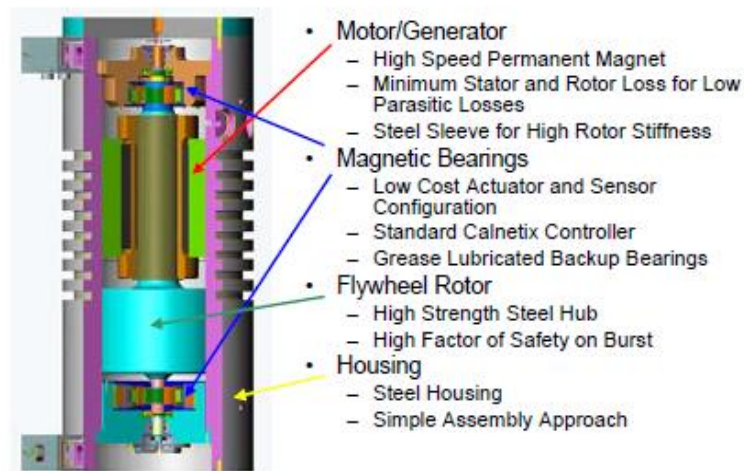


Figure I.8 : Composants du SISE ^[15]

III. Conclusion

Une brève description pour chaque type de stockage a été présentée dans ce chapitre.

Les méthodes de stockage sont nombreuses et différentes. Elles dépendent de plusieurs critères, tel que le type d'énergie.

Le condensateur et l'inductance sont les seuls moyens de stockage direct de l'électricité, les autres moyens sont considérés comme indirects.

CHAPITRE II

I. Introduction

Ce chapitre traite la modélisation des différents composants d'un système inertiel de stockage d'énergie.

Un système inertiel de stockage d'énergie SISE comporte un volant d'inertie, un moteur-générateur électrique, et des convertisseurs statiques.

Dans notre cas, la machine utilisée est la machine synchrone à aimants permanents.

II. Volant d'inertie

1. Avantages et inconvénients de stockage par volant d'inertie ^[8]

Le stockage par volant a plusieurs avantages tels que :

- Grande puissance massique ;
- Rendement énergétique élevé ;
- Rendement de charge élevé ;
- Une grande capacité au cyclage, donc une durée de vie élevée ;
- Connaissance précise du niveau d'énergie stocké ;
- Gestion de la charge simplifiée ;
- Moins de contraintes thermiques.

Et aussi, il présente quelques inconvénients comme :

- Faible durée de stockage ;
- Décharge complète à éviter ;
- Risque de rupture et d'éclatement ;

2. Modélisation du volant

Le volant d'inertie est caractérisé par la quantité d'énergie cinétique E_v , son équation est ^[16] :

$$E_v = \frac{1}{2} \cdot J_v \cdot \Omega_v^2 \quad \text{II.1}$$

Ω_v : Vitesse de rotation du volant ;

J_v : Moment d'inertie du volant.

Pour calculer l'inertie du volant, on se base sur une puissance à fournir durant un temps Δt .

La relation qui lie la puissance à l'énergie est :

$$P_v = \frac{\Delta E_v}{\Delta t} \rightarrow \Delta E_v = P_v \cdot \Delta t \quad \text{II.2}$$

Avec :

P_v : La puissance à fournir ;

ΔE_v : Variation de l'énergie ;

Δt : Le temps nécessaire pour fournir la puissance P_v .

Sachant que :

$$\Delta E_v = \frac{1}{2} \cdot J_v \cdot \Delta \Omega_v^2 \quad \text{II.3}$$

$$\text{Et } \Delta \Omega_v^2 = \Omega_{v\max}^2 - \Omega_{v\min}^2 \quad \text{II.4}$$

D'où :

$$J_v = \frac{2 \cdot P_v \cdot \Delta t}{\Omega_{v\max}^2 - \Omega_{v\min}^2} \quad \text{II.5}$$

$\Omega_{v\max}$: La vitesse maximale du volant ;

$\Omega_{v\min}$: La vitesse minimale du volant.

III. Machine synchrone à aimants permanents

La machine électrique est un élément essentiel du SISE, Plusieurs machines électriques peuvent être intégrées dans ce système ^[3], mais nous, on a choisi la machine synchrone à aimants permanents à pôles saillants.

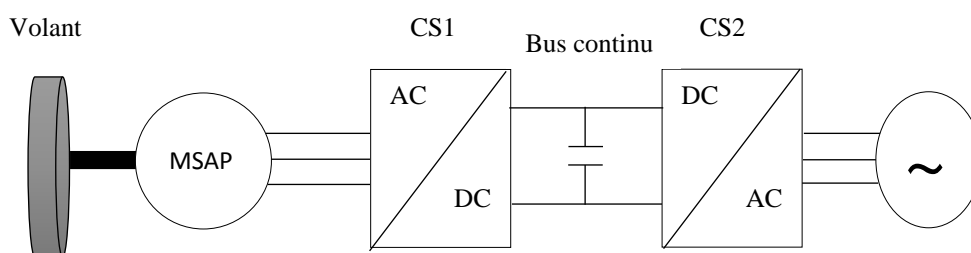


Figure II.1: Schéma du SISE

1. Description de la machine synchrone à aimants permanents

La MSAP est une machine réversible (fonctionnement moteur ou générateur), elle permet de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique et vice versa. Elle est composée d'un stator constitué de trois enroulements identiques décalés de 120° , et d'un rotor porte des aimants ^[8]. La MSAP possède deux types de rotor :

- **Rotor à pôles saillants :** Ce type de rotor est le seul qui présente des saillances. Il comporte plusieurs paires de pôles, il convient pour les alternateurs lents. Les inductances L_d et L_q ayant de valeurs différentes ^[20].

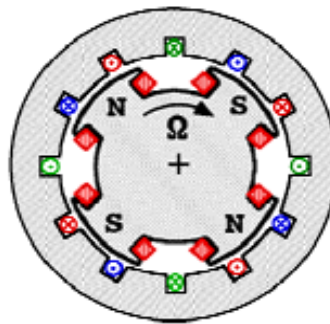


Figure II.2 : Structure d'un rotor à pôles saillants ^[21]

- **Rotor à pôles lisses :** Le rotor est un cylindre plein dans lequel on a usiné des encoches, il est utilisé lorsque la vitesse périphérique du rotor est très élevée. Les deux inductances L_d et L_q sont égales.

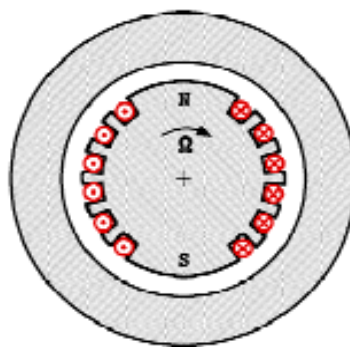


Figure II.3 : Structure d'un rotor à pôles lisses ^[21]

Cette machine est très utilisée dans les SISE.

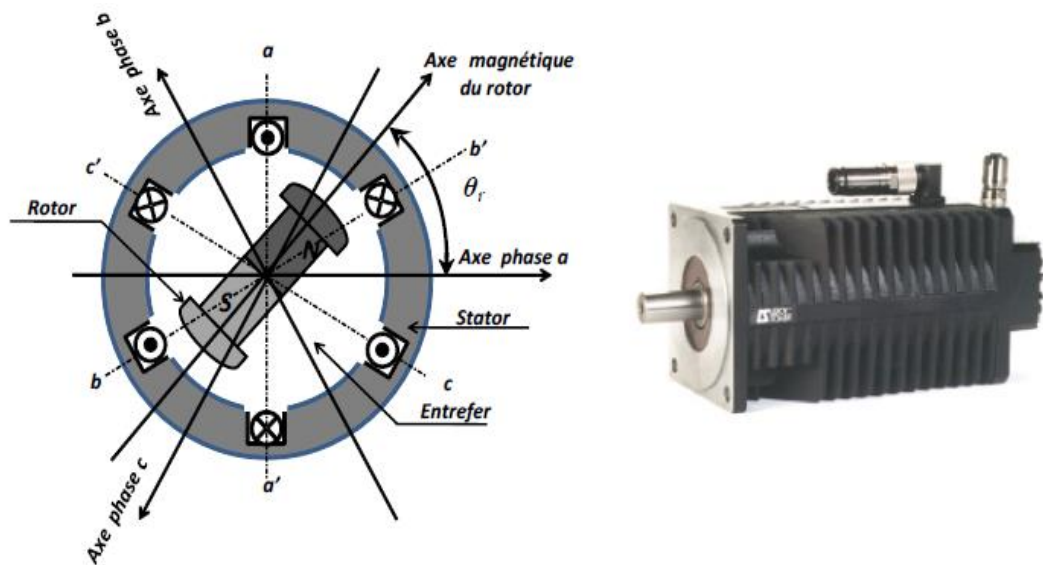


Figure II.4 : Représentation de la MSAP^[10]

2. Avantages de la MSAP

La machine synchrone à aimants permanents présente plusieurs avantages par rapport aux autres types de machines, Parmi ces avantages, on peut citer^[17] :

- L'absence d'enroulement rotorique annule les pertes à effet Joule au niveau du rotor ;
- L'absence des collecteurs / balais et des bagues / balais simplifie la construction et l'entretien ;
- La densité de flux, relativement élevée dans l'entrefer, assure une très bonne performance dynamique ;
- Couples massique et volumique importants ;
- Le facteur de puissance et le rendement sont élevés.

3. Inconvénients de la MSAP

Cette machine possède aussi quelques inconvénients dont les plus importants sont^[17] :

- Coût élevé des aimants ;
- Interaction magnétique due au changement de structure ;
- Influence des vibrations et des chocs sur la structure de la machine ;
- Diminution de l'aimantation selon loi logarithmique en fonction du temps.

4. Modélisation de la MSAP

4.1. Hypothèses simplificatrices ^[10]

La modélisation de la MSAP tient compte des hypothèses simplificatrices suivantes :

- L'hystérésis et l'effet de peau dans les parties magnétiques sont négligeables ;
- Circuit magnétique est supposé non saturé ;
- Harmoniques d'encoche et d'espaces ne sont pas prises en compte ;
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices (F.m.m) entrefer ;
- Circuit magnétique est supposé parfaitement feuilleté.

4.2. Modèle triphasé ^[10]

Dans le repère classique, il y a trois axes orientés suivant les axes des trois enroulements statoriques de la machine ^[3].

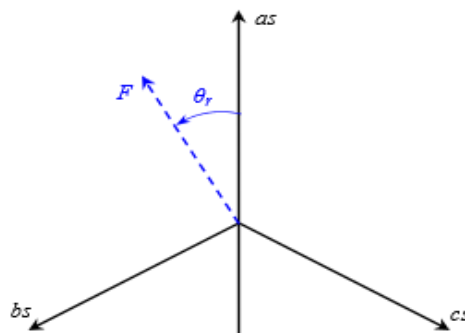


Figure II.5 : Axes de repère classique pour la MSAP

4.2.1. Equations électriques

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

$$\begin{cases} V_a = R_s \cdot I_a + \frac{d\phi_a}{dt} \\ V_b = R_s \cdot I_b + \frac{d\phi_b}{dt} \\ V_c = R_s \cdot I_c + \frac{d\phi_c}{dt} \end{cases} \quad \text{II.6}$$

R_s : Résistance d'une phase statorique.

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d\phi_s}{dt} \quad \text{II.7}$$

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

$[V_s]$: Vecteur des tensions statoriques ;

$[I_s]$: Vecteur des courants statoriques ;

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

$[R_s]$: Matrice des résistances statoriques.

4.2.2. Equations magnétiques

Les équations du flux dans le repère triphasé sont :

$$\begin{cases} \varphi_a = L_s I_a + M I_b + M I_c + \varphi_{ar} \\ \varphi_b = M I_a + L_s I_b + M I_c + \varphi_{br} \\ \varphi_c = M I_a + M I_b + L_s I_c + \varphi_{cr} \end{cases} \quad \text{II.8}$$

Avec :

L_s : Inductance propre d'enroulements statoriques ;

M : Inductance mutuelle entre les enroulements statoriques.

$$[\varphi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [\varphi_{sr}] \quad \text{II.9}$$

Avec :

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

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

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

$$[\varphi_{sr}] = \varphi_r \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad \text{II.10}$$

Avec :

P : Nombre de paires de pôles ;

θ : Angle électrique du rotor par rapport au stator ;

φ_r : Flux généré par les aimants permanents du rotor.

4.2.3. Equation mécanique

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

$$C_{em} - C_r = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega \quad \text{II.11}$$

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.

4.3. Modèle biphasé ^[10]

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) ^[10], comme illustré sur la Figure (II.6).

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

Avec :

x_a, x_b, x_c : Grandeurs du système triphasé ;

x_d, x_q : Grandeurs du système biphasé ;

x_o : Composante homopolaire ;

$[P(\theta)]$: Matrice de Park ;

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{II.12}$$

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

$$[P(\theta)]^{-1} = [P(\theta)]^T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{II.13}$$

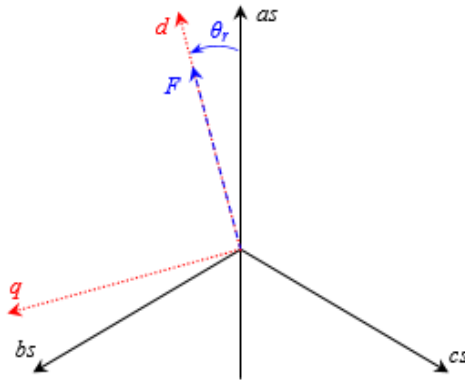


Figure II.6 : Axes de repère dq pour la MSAP [3]

4.3.1. Equations électriques dans le repère de Park

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

$$\begin{cases} V_d = R_s \cdot I_d + L_d \cdot \frac{dI_d}{dt} - L_q \cdot \omega_r \cdot I_q \\ V_q = R_s \cdot I_q + L_q \cdot \frac{dI_q}{dt} - L_d \cdot \omega_r \cdot I_d + \varphi_r \cdot \omega_r \end{cases} \quad \text{II.14}$$

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

Avec :

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

I_d, I_q : Courants statoriques ;

V_d, V_q : Tensions statoriques ;

R_s : Résistance statorique ;

L_d, L_q : Inductances du stator ;

φ_r : Flux de l'aimant permanent ;

ω_r : Vitesse angulaire du rotor ;

$$\omega_r = \frac{d\theta}{dt} = p \cdot \frac{d\theta_m}{dt} \quad \text{II.15}$$

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):

$$\begin{cases} \frac{dI_d}{dt} = \frac{1}{L_d} \cdot (V_d - R_s \cdot I_d + L_q \cdot \omega_r \cdot I_q) \\ \frac{dI_q}{dt} = \frac{1}{L_q} \cdot (V_q - R_s \cdot I_q + L_d \cdot \omega_r \cdot I_d - \varphi_r \cdot \omega_r) \end{cases} \quad \text{II.16}$$

4.3.2. Equations de flux

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

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d \cdot I_d + \varphi_r \\ \varphi_q = L_q \cdot I_q \end{cases} \quad \text{II.17}$$

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

4.3.3. Equation du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique est donné par l'équation suivante :

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot ((L_d - L_q) \cdot I_d \cdot I_q + \varphi_r \cdot I_q) \quad \text{II.18}$$

A partir des équations (II.11), (II.14) et (II.18), on a réalisé le modèle de la MSAP dans le repère de Park sous MATLAB/Simulink :

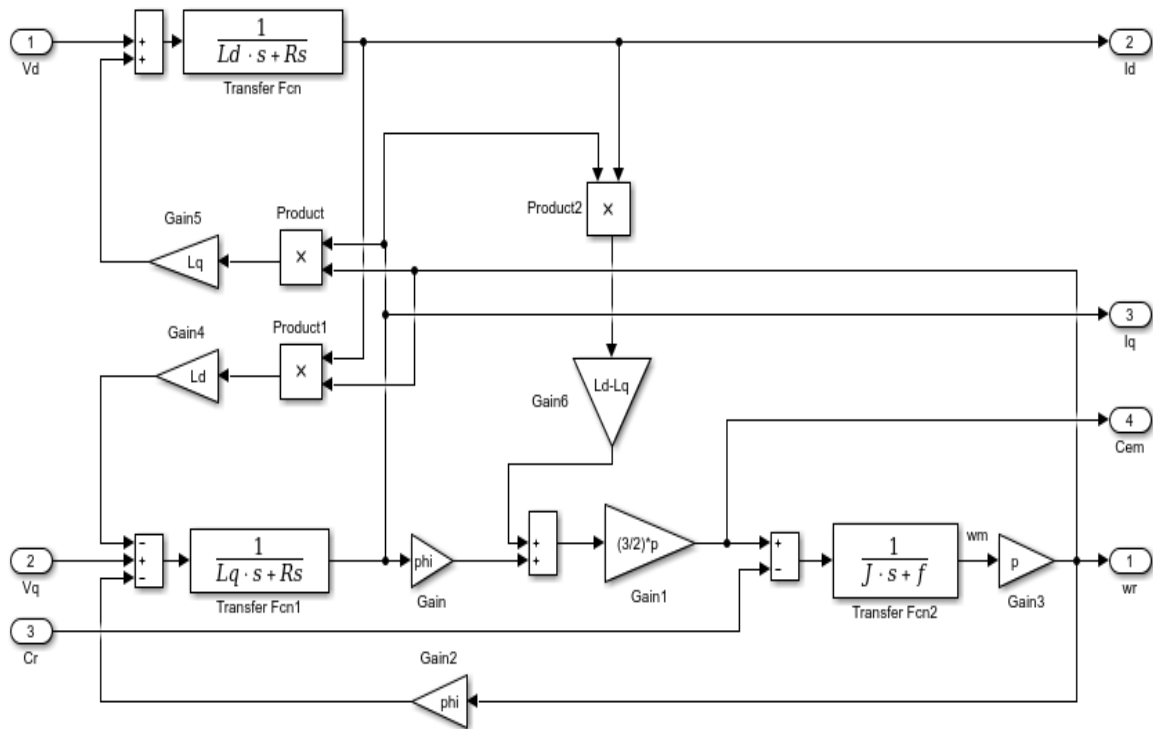


Figure II.7 : Modèle de la MSAP sous Simulink

IV. 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.

1. Modélisation du redresseur ^[8]

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

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

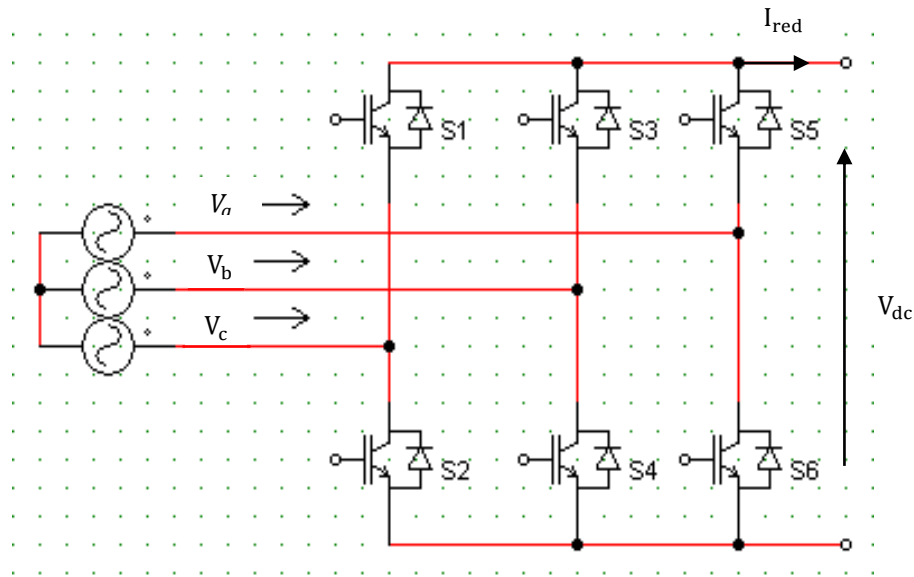


Figure II.8 : Schéma du redresseur

On peut exprimer la tension continue V_{dc} en fonction des interrupteurs S_i ; $i=1,3,5$, et des tensions d'entrée :

$$[V_{dc}] = [S_1 \ S_3 \ S_5] \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad \text{II.19}$$

De même pour le courant continu I_{red} en fonction des courants d'entrée :

$$[I_{red}] = [S_1 \ S_3 \ S_5] \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad \text{II.20}$$

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

V_{dc} : Tension continue ;

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

I_a, I_b, I_c : Courants alternatifs à l'entrée du redresseur ;

S_i : Interrupteurs du redresseur.

2. Modélisation du filtre ^[8]

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) :

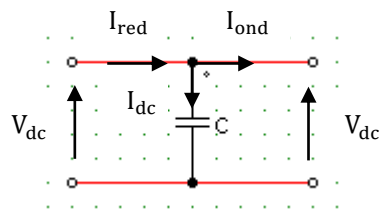


Figure II.9 : schéma d'un filtre capacitif

$$I_{dc}(t) = C \cdot \frac{dV_{dc}(t)}{dt} \tag{II.21}$$

$$V_{dc} = V_0 + \frac{1}{C} \int_{t_1}^{t_2} I_{dc} \cdot dt \tag{II.22}$$

Avec :

C : Capacité du condensateur.

$$I_{dc} = I_{red} - I_{ond} \tag{II.23}$$

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

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

3. Modélisation de l'onduleur ^[24]

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

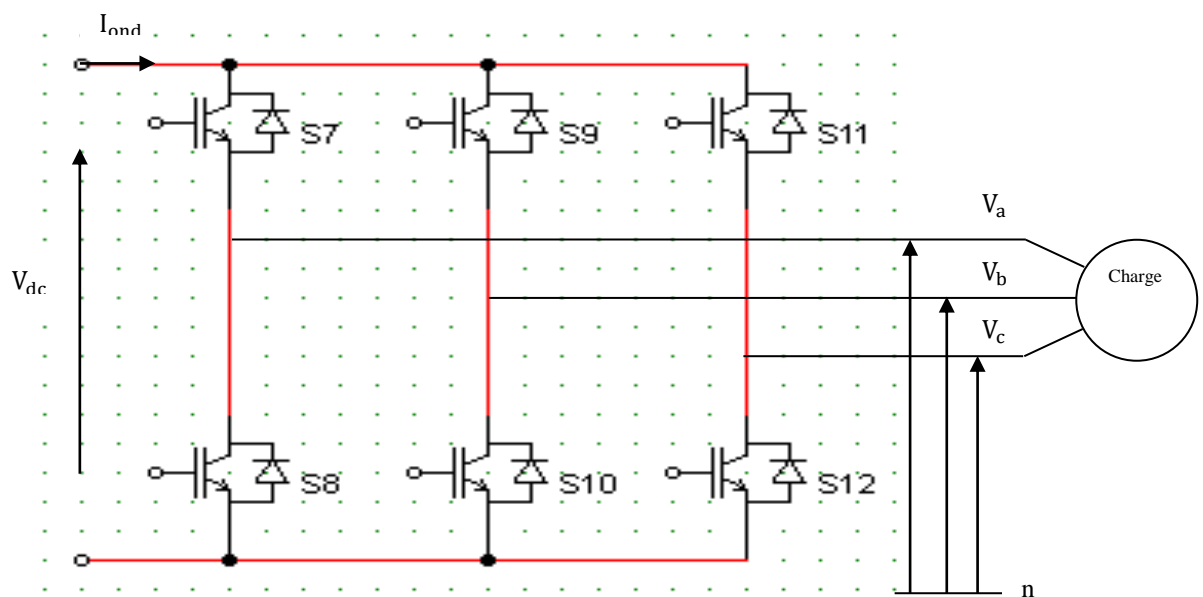


Figure II.10 : Schéma de l'onduleur

On peut écrire les tensions de phase $V_{a,b,c}$ en fonction des signaux de commande S_j ; $j=7,9,11$, et de la tension continue V_{dc} :

$$V_{a,b,c} = S_j \cdot V_{dc} - \frac{V_{dc}}{2} \quad \text{II.24}$$

Les tensions composées sont définies comme suit :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{a0} + V_{0b} = V_{a0} - V_{b0} \\ V_{bc} = V_{0b} + V_{0c} = V_{0b} - V_{c0} \\ V_{ca} = V_{c0} + V_{0a} = V_{c0} - V_{a0} \end{cases} \quad \text{II.25}$$

Considérant que n est le point neutre :

$$\begin{cases} V_{a0} = V_{an} + V_{n0} \\ V_{b0} = V_{bn} + V_{n0} \\ V_{c0} = V_{cn} + V_{n0} \end{cases} \quad \text{II.26}$$

La charge est considérée équilibrée :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad \text{II.27}$$

Donc :

$$V_{a0} + V_{b0} + V_{c0} = 3 \cdot V_{n0}$$

II.28

D'où :

$$V_{n0} = \frac{1}{3} \cdot (V_{a0} + V_{b0} + V_{c0}) \quad \text{II.29}$$

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

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{a0} - \frac{1}{3}V_{b0} - \frac{1}{3}V_{c0} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{a0} + \frac{2}{3}V_{b0} - \frac{1}{3}V_{c0} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{a0} - \frac{1}{3}V_{b0} + \frac{2}{3}V_{c0} \end{cases} \quad \text{II.30}$$

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_7 \\ S_9 \\ S_{11} \end{bmatrix} \quad \text{II.31}$$

Avec :

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

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

V_{dc} : Tension aux bornes du condensateur ;

S_j : Interrupteurs de l'onduleur.

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

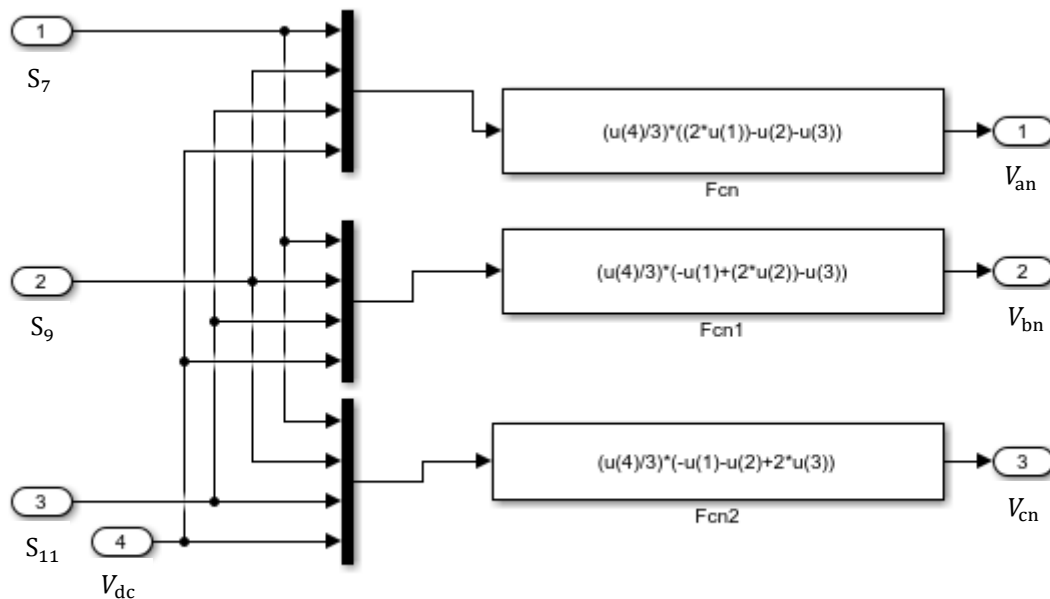


Figure II.11 : Schéma bloc de l'onduleur

V. Conclusion

Ce chapitre est consacré à la modélisation des différents composants du système inertiel de stockage d'énergie tel que : le volant, la machine, 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, qui est l'objectif du troisième chapitre.

CHAPITRE III

I. Introduction

Ce chapitre présente la commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents, ainsi, la commande des convertisseurs d'électronique de puissance par la technique MLI.

Les courants et la vitesse de la MSAP sont régulés à l'aide d'un correcteur PI.

II. Commande du système de stockage

1. Commande du SISE

La puissance fournie au réseau est lissée par le système de stockage qui stocke ou restitue de l'énergie afin que ce réseau reçoive une puissance constante.

Si la puissance qu'il faut délivrer au réseau est plus que celle que le réseau doit recevoir, le reste de cette puissance est transférée directement au système SISE. Ce système stocke le surplus de puissance et la restitue lorsque la puissance désirée du réseau n'est pas assez.

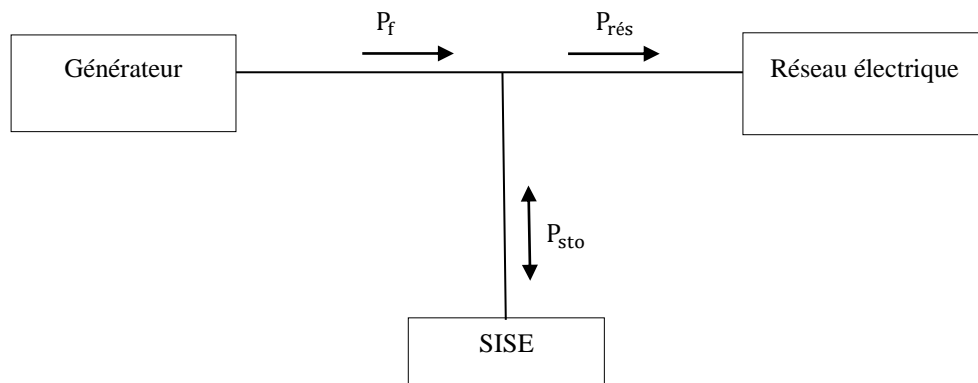


Figure III.1 : Schéma de principe de stockage inertielle

La valeur de la puissance électrique de référence du SISE est calculée par :

$$P_{sto}^* = P_{rés}^* - P_f \quad \text{III.1}$$

Avec :

P_{sto}^* : Puissance électrique de référence stockée dans le SISE ;

P_f : Puissance fournie au réseau ;

$P_{rés}^*$: Puissance injectée au réseau.

Si la puissance P_{sto} est positive, cela veut dire qu'il-y-a un surplus de l'énergie qui doit être stocké. Si elle est négative, on a un manque d'énergie qui doit être couvert par l'énergie stockée [3].

On a l'énergie est l'intégrale de la puissance :

$$E_v^* = E_{v0} + \int_{t1}^{t2} P_{sto}^* \cdot dt \quad \text{III.2}$$

Avec : E_{v0} : Energie initiale du volant.

A partir de l'équation (II.1), on peut écrire :

$$\Omega_v = \sqrt{\frac{2 \cdot E_v}{J_v}} \quad \text{III.3}$$

La vitesse estimée utilisée pour la commande est donc :

$$\Omega_v^* = \sqrt{\frac{2 \cdot E_v^*}{J_v}} \quad \text{III.4}$$

Avec : J_v : Inertie du volant.

2. Principe de la commande vectorielle

La commande vectorielle des machines alternatives consiste à ramener le comportement de ces dernières similaire à celui des machines à courant continu à excitation séparée [18].

Le contrôle vectoriel a pour but d'améliorer les comportements dynamiques et statiques des machines à courant alternatif

La commande vectorielle présente certains avantages dont on peut citer :

- Elle est basée sur le modèle transitoire ;
- 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.

Le contrôle vectoriel par orientation du flux rotorique présente aussi quelques inconvénients tels que :

- Très chère ;
- Faible robustesse aux variations paramétriques et en particulier à celles de la constante de temps rotorique ;

- Nécessité d'un modulateur pour la commande rapprochée de l'onduleur qui provoque des retards, surtout à basse fréquence de modulation ;
- La vitesse de rotation intervient explicitement dans l'algorithme de commande. Quand on ne mesure pas cette vitesse les erreurs sur l'estimée de cette vitesse dégradent les performances du variateur.

3. Commande vectorielle de la MSAP

Le contrôle vectoriel d'une MSAP par orientation du flux rotorique a pour objectif d'orienter le flux suivant l'axe d .

Parmi les stratégies de commande vectorielle appliquées à la MSAP, celle qui impose le courant I_d nul, ceci pour diminuer les pertes à effet joule.

On impose $I_d=0$, le système d'équations devient :

$$\begin{cases} V_d = -L_q \cdot \omega_r \cdot I_q \\ V_q = R_s \cdot I_q + L_q \cdot \frac{dI_q}{dt} + \varphi_r \cdot \omega_r \end{cases} \quad \text{III.5}$$

$$\begin{cases} \varphi_d = \varphi_r \\ \varphi_q = L_q \cdot I_q \end{cases} \quad \text{III.6}$$

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \varphi_r \cdot I_q \quad \text{III.7}$$

4. Découplage des courants I_d et I_q

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

Pour découpler l'évolution des courants I_d et I_q par rapport aux commandes, on va définir les termes de compensation e_d et e_q ^[19] :

$$\begin{cases} V_d = V_d^* + e_d = V_d^* - \omega_r \cdot L_q \cdot I_q \\ V_q = V_q^* + e_q = V_q^* + \omega_r \cdot L_d \cdot I_d + \omega_r \cdot \varphi_r \end{cases} \quad \text{III.7}$$

Avec :

$$e_d = -\omega_r \cdot L_q \cdot I_q$$

$$e_q = \omega_r \cdot L_d \cdot I_d + \omega_r \cdot \varphi_r$$

5. La régulation

Le régulateur utilisé est de type proportionnel intégral (PI).

L'action proportionnelle corrige d'une manière rapide tout écart la grandeur à régler, et pour cela on augmente le gain k_p , mais on est limité par la stabilité se système.

L'action intégrale complète L'action proportionnelle. Elle est utilisée lorsqu'on veut améliorer la précision en régime permanent. On déminu l'action intégrale pour avoir un système plus dynamique.

Le signal de sortie $Y(t)$ suit celui de l'entrée $Y^*(t)$

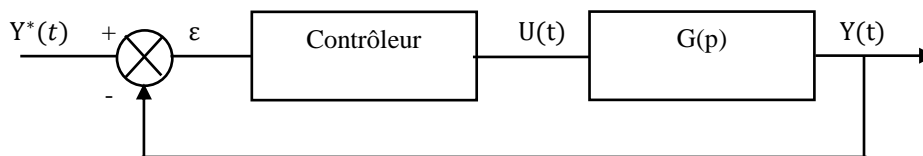


Figure III.2 : Représentation de la commande par PI

5.1.Régulation des courants

Les boucles de régulations des courants I_d et I_q sont présentées dans les figures ci-dessous :

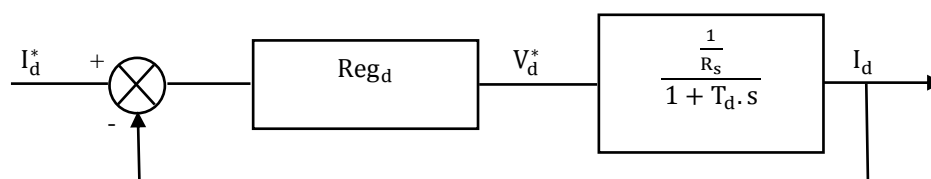


Figure III.3 : Boucle de régulation du courant I_d

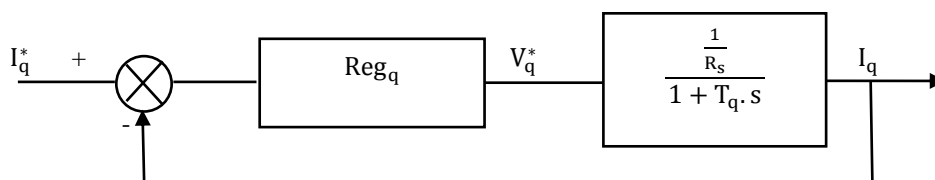


Figure III.4 : Boucle de régulation du courant I_q

A partir des équations de découplage, on peut écrire les fonctions de transfert suivantes :

$$\frac{I_d}{V_d^*} = \frac{1}{R_s + L_d \cdot s} = \frac{\frac{1}{R_s}}{1 + T_d \cdot s} \quad \text{III.8}$$

$$\frac{I_q}{V_q^*} = \frac{1}{R_s + L_q \cdot s} = \frac{\frac{1}{R_s}}{1 + T_q \cdot s} \quad \text{III.9}$$

Avec :

$$T_d = \frac{L_d}{R_s} \quad \text{III.10}$$

$$\text{Et } T_q = \frac{L_q}{R_s} \quad \text{III.11}$$

T_d : Constante de temps électrique relative à l'axe d ;

T_q : Constante de temps électrique relative à l'axe q.

Les régulateurs utilisés sont des régulateurs proportionnels et intégraux. La forme mathématique d'un régulateur PI est donnée par :

$$\text{Reg}_d(s) = k_{pd} + \frac{k_{id}}{s} = \frac{k_{id}}{s} \cdot \left(1 + \frac{k_{pd}}{k_{id}} \cdot s\right) \quad \text{III.12}$$

$$\text{Reg}_q(s) = k_{pq} + \frac{k_{iq}}{s} = \frac{k_{iq}}{s} \cdot \left(1 + \frac{k_{pq}}{k_{iq}} \cdot s\right) \quad \text{III.13}$$

Avec :

k_{pd}, k_{pq} : Gains de l'action proportionnelle du correcteur du courant I ;

k_{id}, k_{iq} : Gains de l'action intégrale.

Les fonctions de transfert en boucle ouverte sont :

$$\text{FTBO}_d = \frac{k_{id}}{s} \cdot \left(1 + \frac{k_{pd}}{k_{id}} \cdot s\right) \cdot \frac{\frac{1}{R_s}}{1 + T_d \cdot s} \quad \text{III.14}$$

$$\text{FTBO}_q = \frac{k_{iq}}{s} \cdot \left(1 + \frac{k_{pq}}{k_{iq}} \cdot s\right) \cdot \frac{\frac{1}{R_s}}{1 + T_q \cdot s} \quad \text{III.15}$$

On pose :

$$T_d = \frac{k_{pd}}{k_{id}} \quad \text{III.16}$$

$$\text{Et } T_q = \frac{k_{pq}}{k_{iq}} \quad \text{III.17}$$

La fonction de transfert en boucle fermée :

$$\text{FTBF}_d = \frac{1}{1+\tau_d.s} = \frac{I_d}{I_d^*} \quad \text{III.18}$$

$$\text{FTBF}_q = \frac{1}{1+\tau_q.s} = \frac{I_q}{I_q^*} \quad \text{III.19}$$

Avec :

$$\tau_d = \frac{R_s}{k_{id}} \quad \text{III.20}$$

$$\tau_q = \frac{R_s}{k_{iq}} \quad \text{III.21}$$

τ : Constante de temps en boucle fermée.

La constante de temps du système en boucle fermée doit être inférieure à la constante de temps en boucle ouverte.

On impose le temps de réponse : $T_r = 3. \tau$

➤ Pour le courant I_d :

$$k_{id} = \frac{3.R_s}{T_r} \quad \text{III.22}$$

$$\frac{L_d}{R_s} = \frac{k_{pd}}{k_{id}} \quad \text{III.23}$$

$$k_{pd} = \frac{L_d.k_{id}}{R_s} = \frac{3.L_d}{T_r} \quad \text{III.24}$$

➤ Pour le courant I_q :

$$k_{iq} = \frac{3.R_s}{T_r} \quad \text{III.25}$$

$$\frac{L_q}{R_s} = \frac{k_{pq}}{k_{iq}} \quad \text{III.26}$$

$$k_{pq} = \frac{L_q.k_{iq}}{R_s} = \frac{3.L_q}{T_r} \quad \text{III.27}$$

5.2. Régulation de la vitesse

Le régulateur de vitesse permet de déterminer le couple estimé. La dynamique de vitesse est donnée par :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega = C_{em} - C_r \quad \text{III.28}$$

On applique la transformée de Laplace sur cette équation :

$$\Omega(J \cdot s + f) = C_{em} - C_r \quad \text{III.29}$$

$$\Omega = \frac{C_{em} - C_r}{J \cdot s + f} \quad \text{III.30}$$

Le schéma de la boucle de régulation est présenté sur la figure (III.5) :

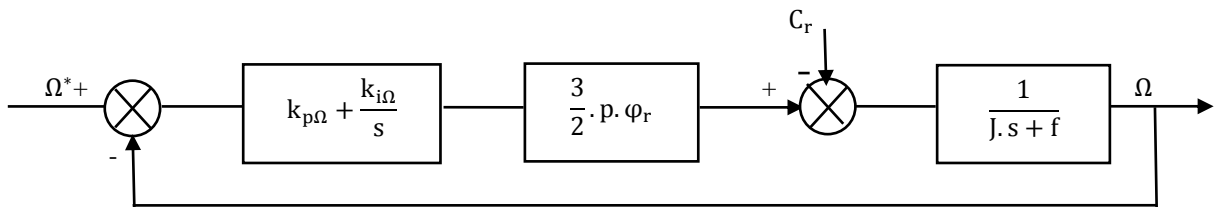


Figure III.5 : Boucle de régulation de la vitesse Ω

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

$$k_{p\Omega} + \frac{k_{i\Omega}}{s} = \frac{k_{p\Omega}}{s} \left(s + \frac{k_{i\Omega}}{k_{p\Omega}} \right) \quad \text{III.31}$$

La fonction de transfert en boucle ouverte est ($C_r = 0$) :

$$\text{FTBO}_{\Omega} = \frac{k_{p\Omega}}{s} \left(s + \frac{k_{i\Omega}}{k_{p\Omega}} \right) \cdot \frac{3}{2} \cdot p \cdot \varphi_r \cdot \frac{1}{J \cdot s + f} \quad \text{III.32}$$

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$\text{FTBF}_{\Omega} = \frac{3p\varphi_r \cdot k_{p\Omega} \left(s + \frac{k_{i\Omega}}{k_{p\Omega}} \right)}{2J \cdot s^2 + (2f + 3p\varphi_r \cdot k_{p\Omega})s + 3p\varphi_r \cdot k_{i\Omega}} \quad \text{III.33}$$

Cette fonction de transfert possède une dynamique de deuxième ordre, par identification à la forme canonique dont l'équation caractéristique est $1 + \frac{2\xi}{w_n}s + \frac{1}{w_n^2}s^2$ on trouve :

$$\begin{cases} \frac{2J}{3p\varphi_r \cdot k_{i\Omega}} = \frac{1}{w_n^2} \\ \frac{2f + 3p\varphi_r \cdot k_{p\Omega}}{3p\varphi_r \cdot k_{i\Omega}} = \frac{2\xi}{w_n} \end{cases} \quad \text{III.34}$$

Donc :

$$\begin{cases} k_{i\Omega} = \frac{2Jw_n^2}{3p\varphi_r} \\ k_{p\Omega} = \frac{4\xi Jw_n - 2f}{3p\varphi_r} \end{cases} \quad \text{III.35}$$

Avec :

$k_{p\Omega}$: Gain proportionnel de la vitesse ;

$k_{i\Omega}$: Gain intégral de la vitesse ;

ξ : Coefficient d'amortissement ;

w_n : Pulsation naturelle.

NB : Les paramètres marqués d'un astérisque sont des paramètres désirés.

6. Commande des convertisseurs statiques

Les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs sont déterminés par la technique MLI (modulation de largeur d'impulsion).

6.1. Stratégie de la commande MLI

Il existe plusieurs types de la commande MLI, dont on peut citer la MLI triangulo-sinusoïdale.

Le schéma ci-dessous montre le modèle de la MLI triangulo-sinusoidale sous MATLAB-Simulink :

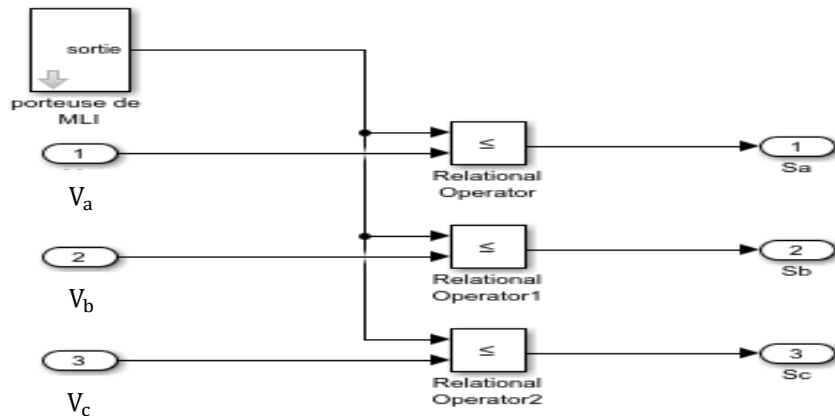


Figure III.6 : Commande MLI sous MATLAB

Le schéma de la porteuse est illustré sur la figure (III.7) :

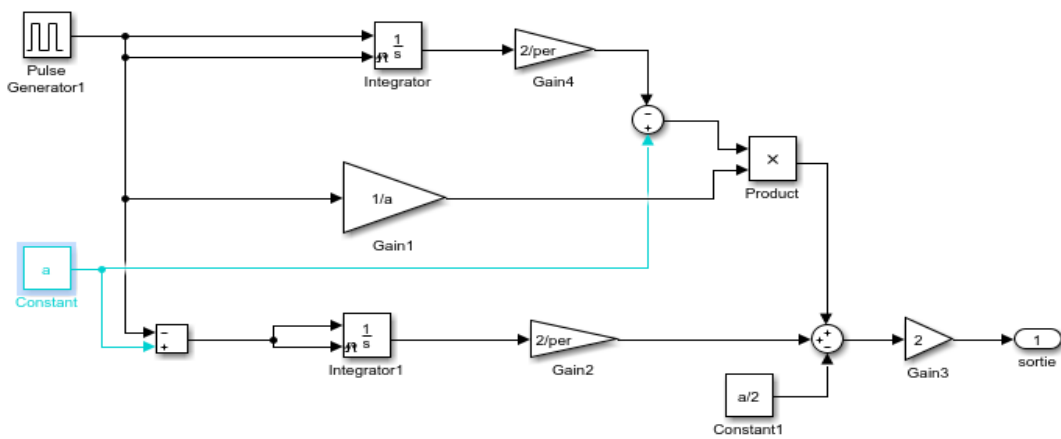


Figure III.7 : Schéma bloc de la porteuse sous MATLAB

6.2.Principe de la technique MLI triangulo-sinusoidale

La tension de sortie est une succession de créneaux, la largeur de créneau est déterminée par la loi de modulation. Cette dernière est une comparaison d'une onde modulatrice sinusoidale, de fréquence f_1 à une onde triangulaire de fréquence f_2 [22].

La figure (III.8) montre le principe de la MLI triangulo-sinusoïdale :

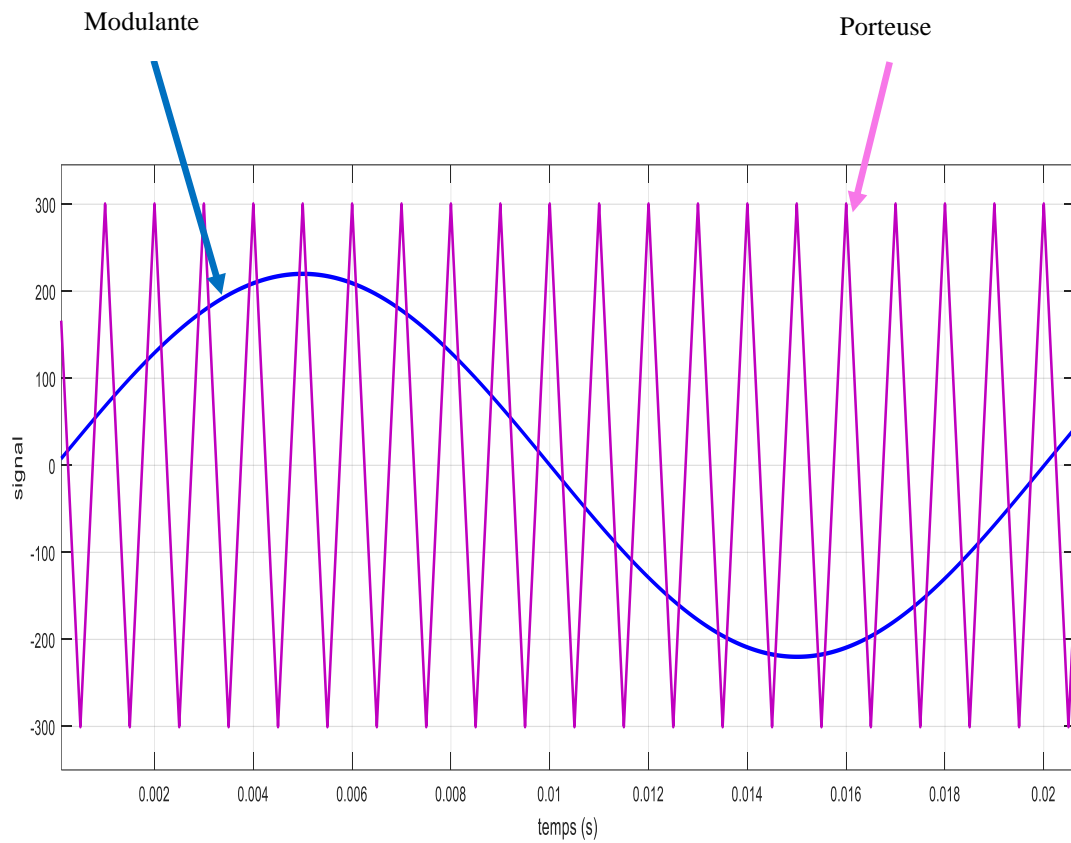


Figure III.8 : Principe de la MLI

Le signal de sortie est sur la figure (III.9) :

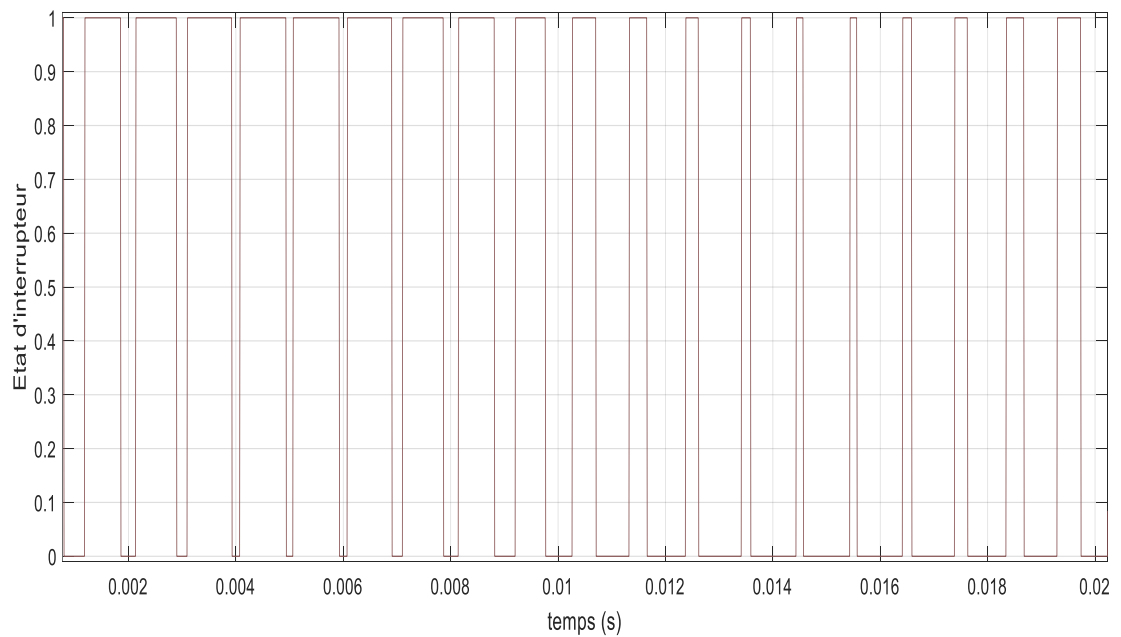


Figure III.9 : Signal de sortie

Les signaux de référence sont déterminés par l'équation suivante :

$$V_{\text{ref}} = r \cdot \sin\left((2 \cdot \pi \cdot f) \cdot t - 2 \cdot (j - 1) \cdot \frac{\pi}{3}\right) \quad \text{III.36}$$

Avec :

$$j=1,2,3$$

Cette commande est caractérisée par :

r : Coefficient de réglage de tension qui donne le rapport de l'amplitude de la modulante à la valeur crête de la porteuse ;

m : Indice de modulation qui définit le rapport entre la fréquence de la porteuse et celle de la référence.

III. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la commande du SISE : la commande vectorielle de la MSAP, et la commande MLI des convertisseurs statiques.

On a défini les termes de compensation pour le découplage, et on a utilisé des régulateur PI pour les courants et la vitesse de la MSAP.

Ensuite, on a utilisé la technique MLI triangulo-sinusoïdale pour commander l'ensemble de convertisseurs.

Dans le quatrième chapitre, nous allons présenter les résultats de simulation du système inertiel de stockage d'énergie.

CHAPITRE IV

I. Introduction

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

II. Schéma global de simulation

Le schéma global de simulation est présenté sur la (figure IV.1) :

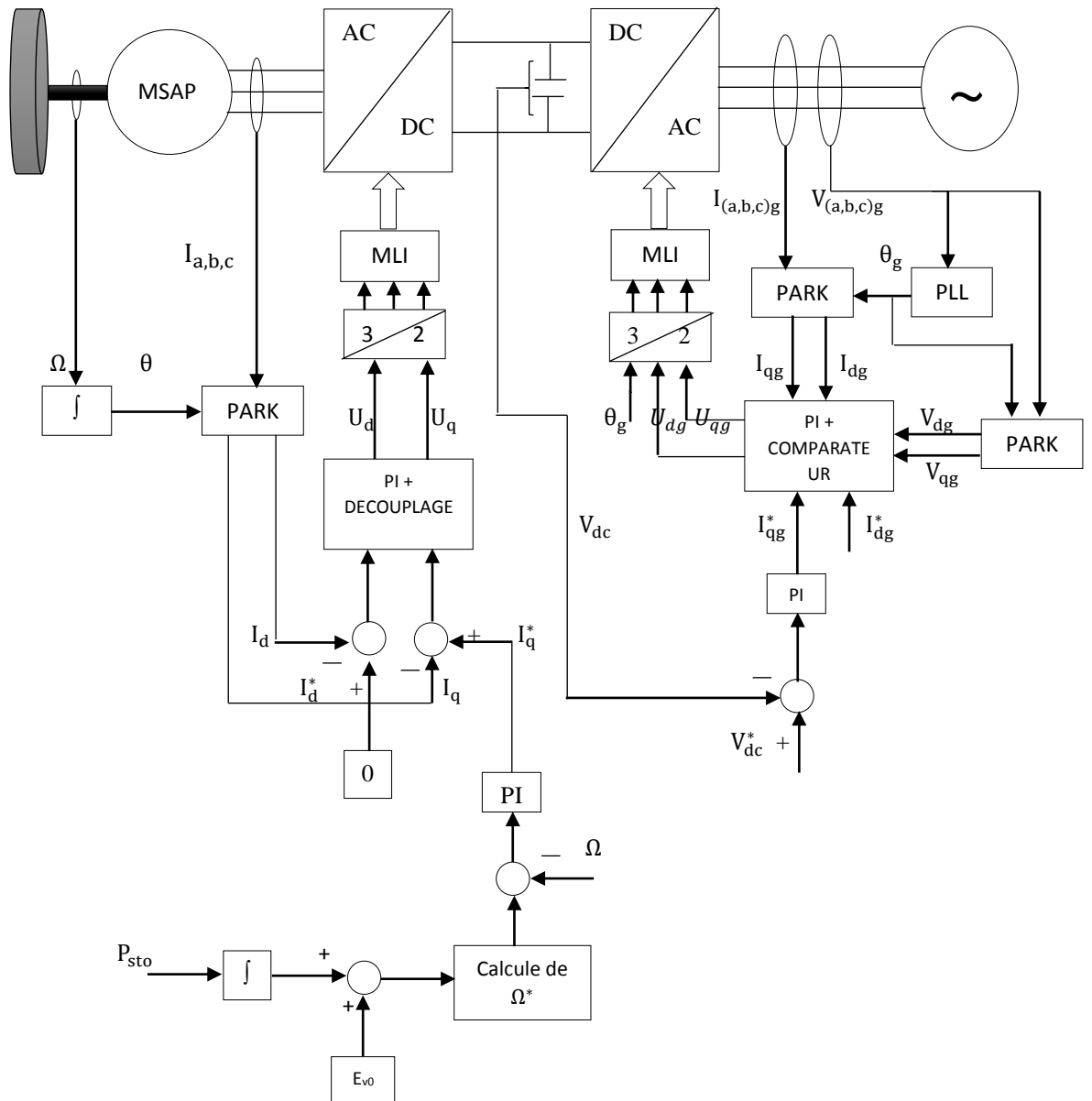


Figure IV.1 : Schéma global de simulation

III. Simulation et interprétation des résultats

Nous présentons dans cette partie les résultats de simulation du système inertiel de stockage d'énergie SISE. La puissance injectée varie entre -690 W et 690 W.

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

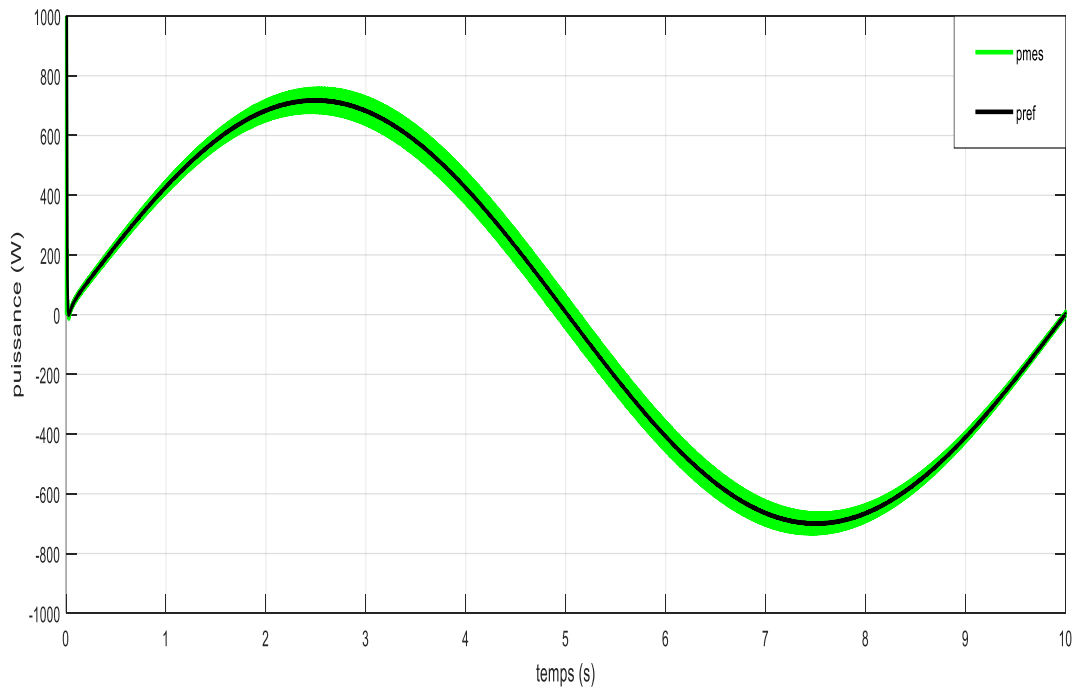


Figure IV.2 : Puissance de la MSAP et celle de référence

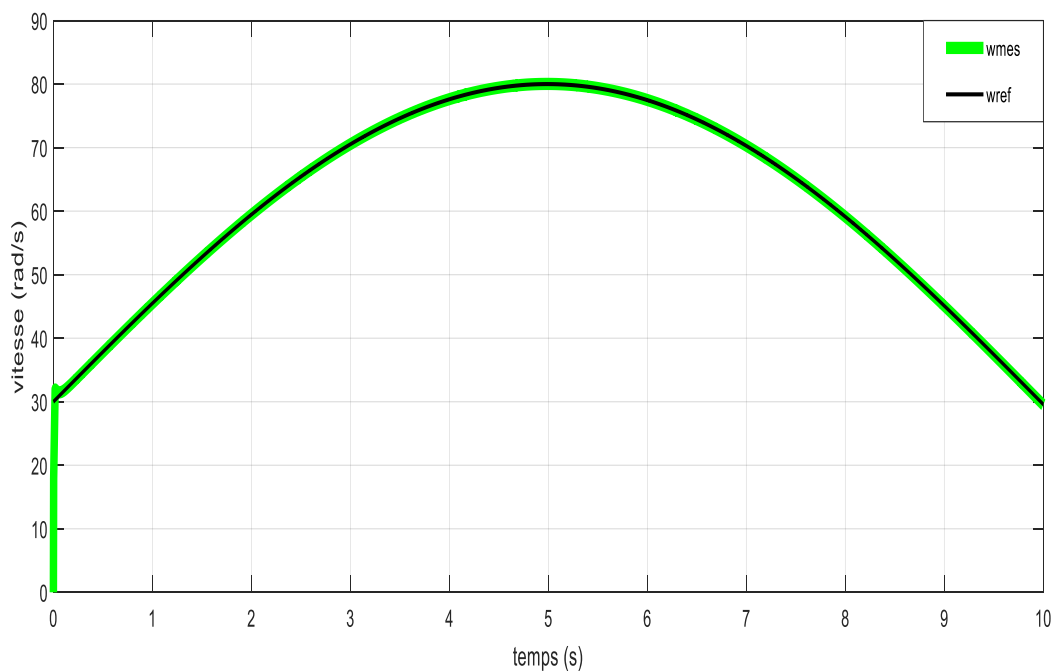


Figure IV.3 : Vitesse de la MSAP et celle de référence

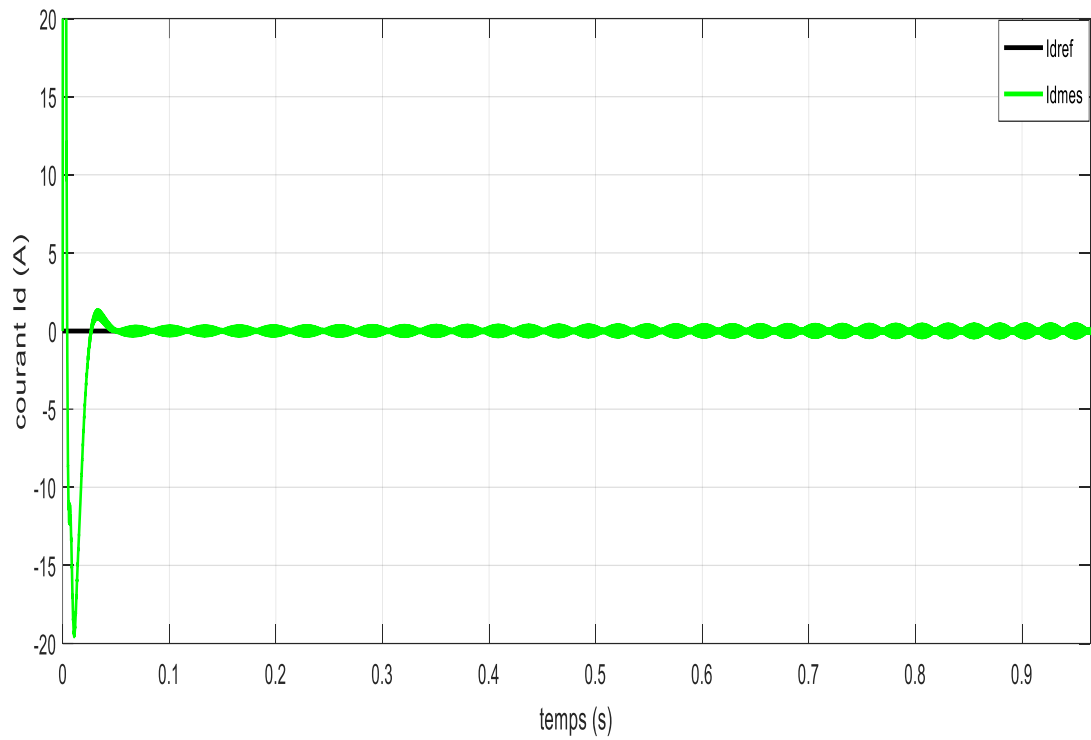


Figure IV.4 : Courant I_d et sa référence

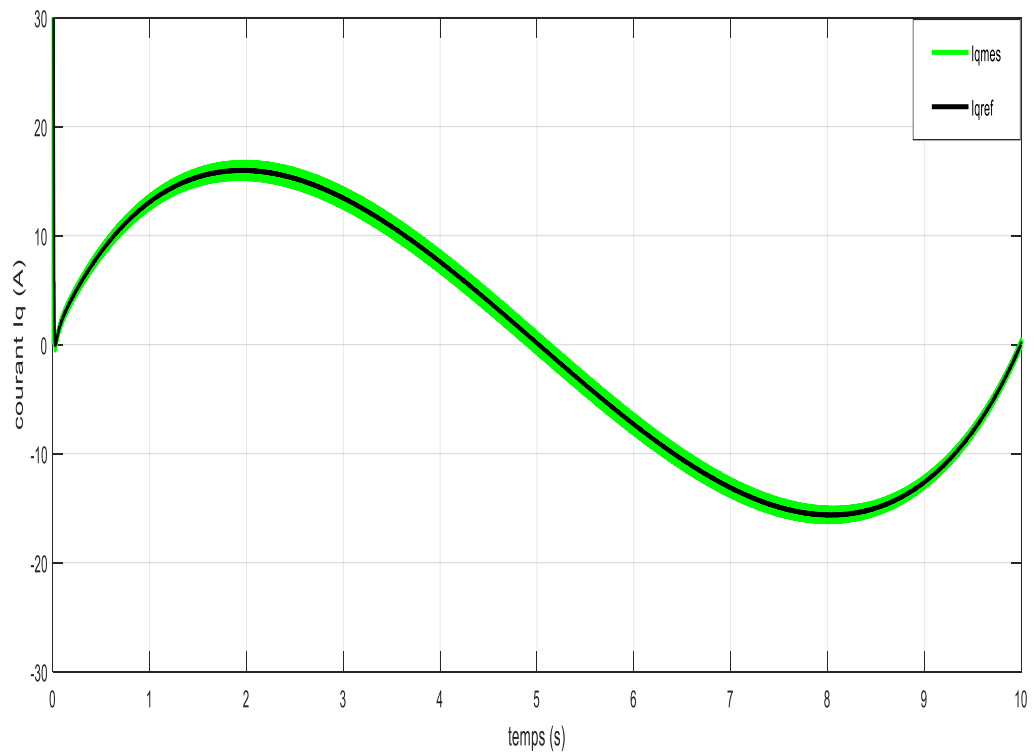


Figure IV.5 : Courant I_q et sa référence

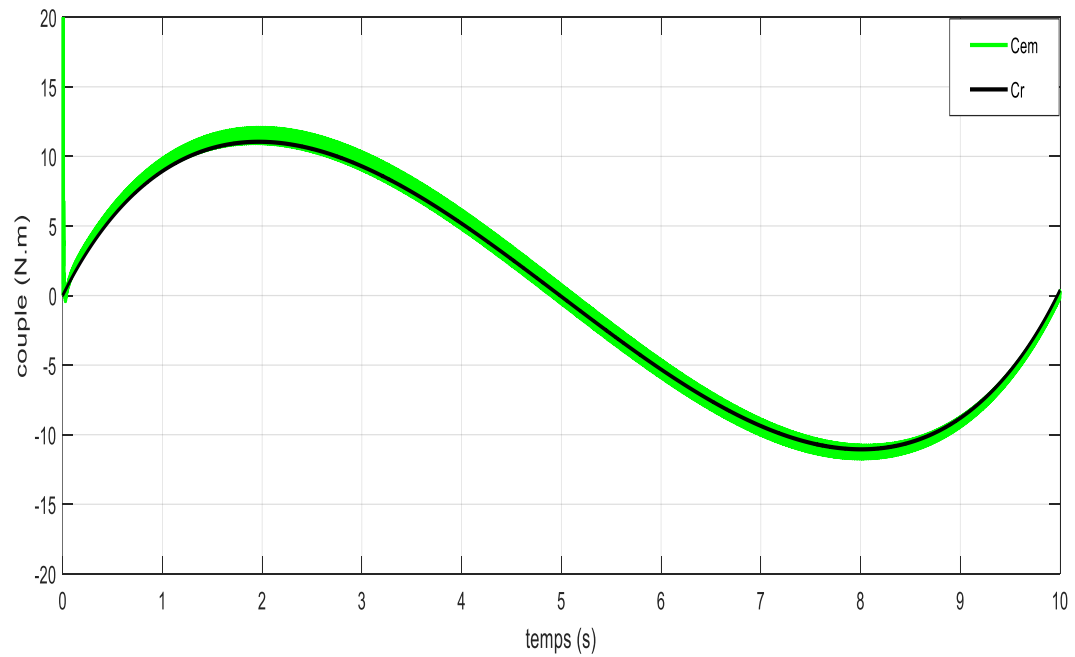


Figure IV.6 : Couple électromagnétique et couple résistant de la MSAP

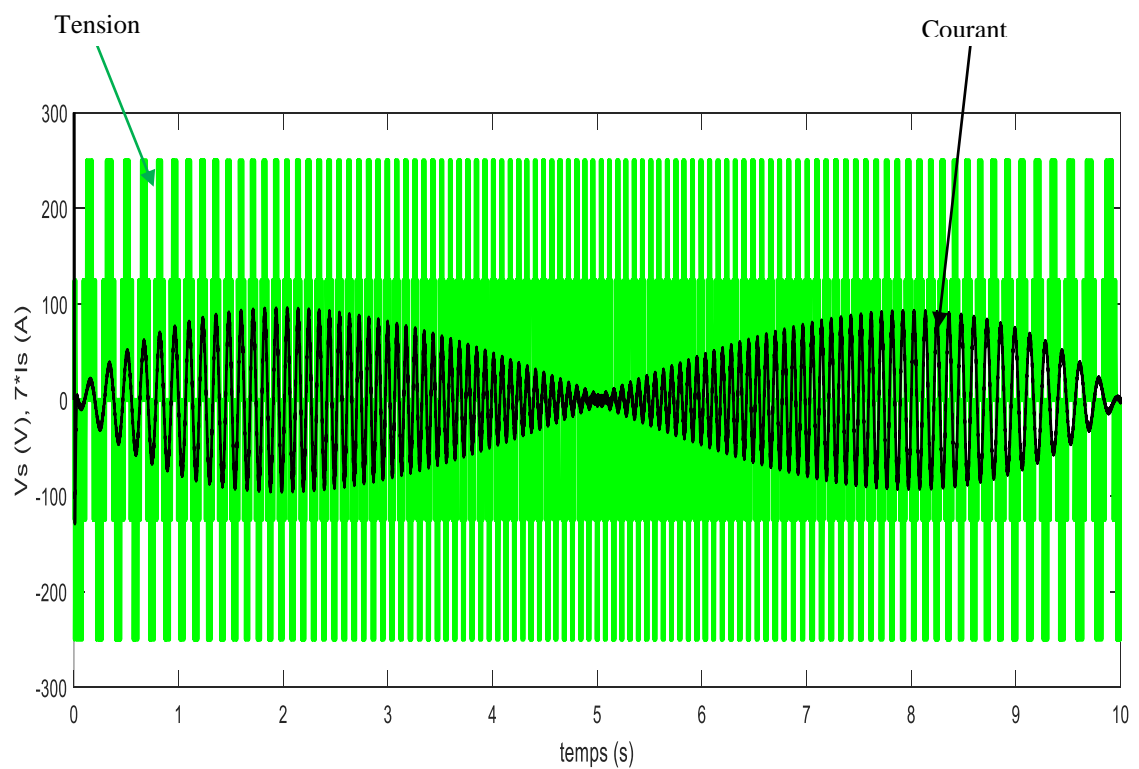


Figure IV.7 : Tension et courant d'une phase statorique de la MSAP

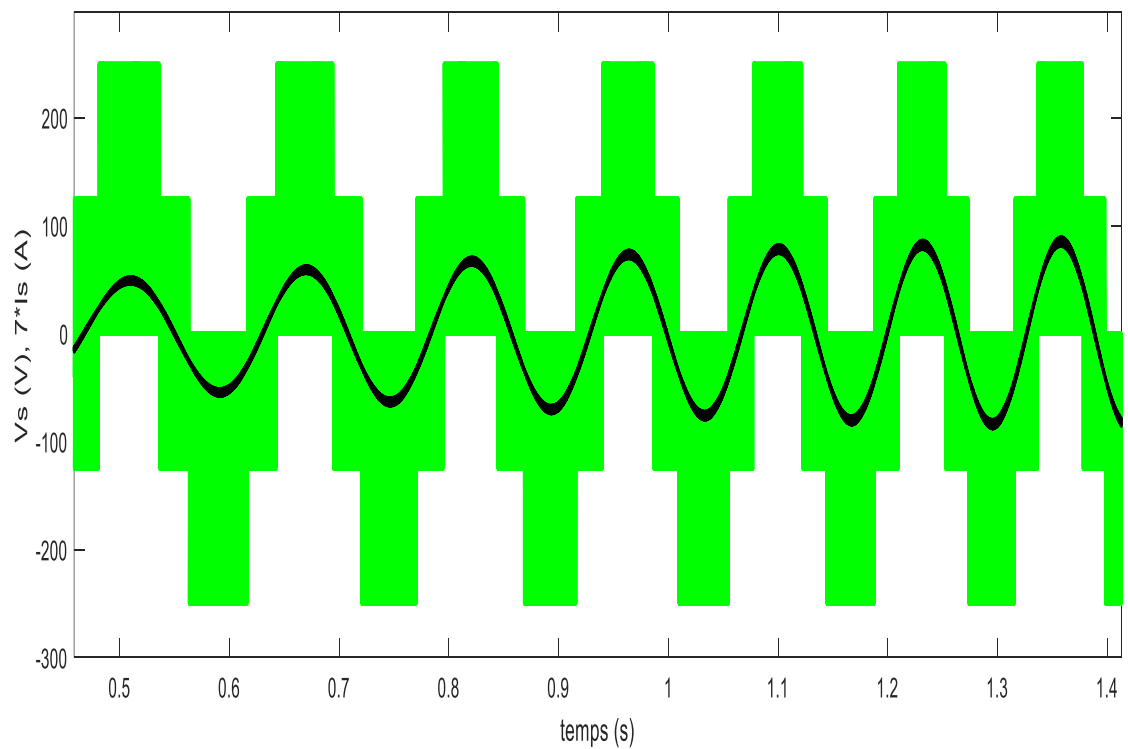


Figure IV.8 : Tension et courant du SISE (stockage d'énergie)

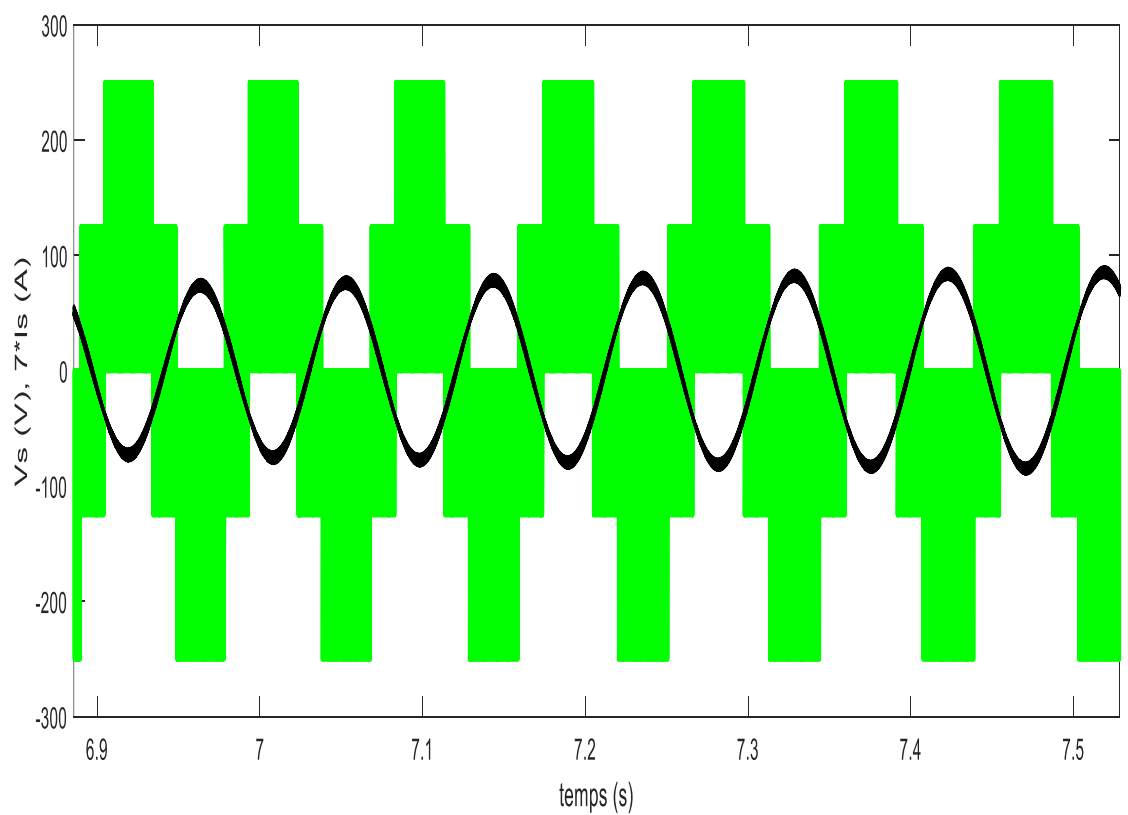


Figure IV. 9 : Tension et courant du SISE (restitution d'énergie)

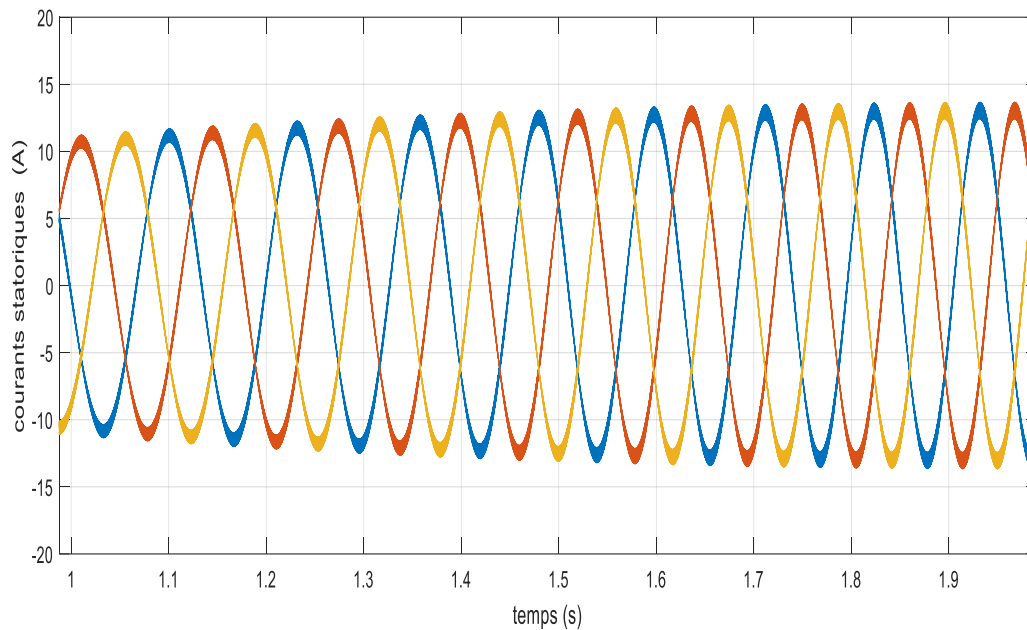


Figure IV.10 : Courants des phases statoriques

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 IV.2), elle est injectée de façon à mettre en évidence les deux modes de fonctionnement.

La vitesse du volant est représentée sur la (figure IV.3), elle augmente dans la phase de stockage pour atteindre la vitesse maximale 80 rad/s, et diminue dans la phase de déstockage jusqu'à la vitesse minimale 30 rad/s. Cette dernière n'est pas nulle à cause de la valeur initiale de l'énergie du volant E_{v0} qu'on a injecté. La vitesse de la MSAP suit fidèlement celle de référence qui est la vitesse du volant.

Les (figures IV.4) et (figure IV.5) 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 : $C_{em} = 0.6 I_q$ comme illustré sur la (figure IV.6).

La (figure IV.8) montre que le courant est déphasé d'un angle $0 < \Phi < \frac{\pi}{2}$; par rapport à la tension cela veut dire que la MSAP fonctionne en moteur (stockage d'énergie).

Lorsque la machine fonctionne en génératrice (figure IV.9), le courant et la tension sont déphasés d'un angle $\frac{\pi}{2} < \Phi < \pi$ (restitution d'énergie).

La (figure IV.10) montre les courants des trois phases statoriques.

IV. Conclusion

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 commande vectorielle à flux orienté.

Nous avons aussi présenté les résultats de simulation sous MATLAB/Simulink et l'interprétation de ces résultats. On a conclu aussi que les régulateurs PI sont bien paramétrés.

Les résultats obtenus sont d'un apport appréciable, ce qui justifie la fiabilité de la commande appliquée.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale et perspectives

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 commandé 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.

Et 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 justifiés la fiabilité de la commande du fonctionnement du système étudié.

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

Bibliographie

- [1] <http://ufe-electricite.fr/IMG/18.pdf>
- [2] **X.Xiaoxi**, "modélisation et analyse du fonctionnement d'un système de stockage intégré au réseau électrique", septembre 2013.
- [3] **G-O.Cimuca**, "Système inertiel de stockage d'énergie associé à des générateurs éoliens" Thèse de doctorat, école nationale supérieure d'arts et métiers centre de Lille, 2005.
- [4] **L.Bridier**, "Modélisation et optimisation d'un système de stockage couplé à une production électrique renouvelable intermittente" Thèse de doctorat, université de la Réunion, France, 2016.
- [5] **B.Multon, G.Rbin, E.Eramber, H.Ben Ahmed**, "Stockage de l'énergie dans les applications stationnaires " Colloque Energie électrique, BELFORT, France, juin 2004.
- [7] **L.Grimault, L.Pellicer, M.Rautureau, V.Salmon, M.Crochet**, "Techniques et moyens de stockage de l'énergie", Groupe esaip – 18 rue du 8 mai 1945, CS 80022 49180 St Barthélémy d'Anjou Cedex
- [8] **S.Taraft**, "Etude du stockage inertiel d'énergie dans une chaîne de conversion éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation", Mémoire de Magister en électrotechnique, 2008.
- [9] www.supercondesateur.com/types-stockage-energie.03/2018.
- [10] **A.Khaief**, "contribution à la commande vectorielle sans capteur mécanique des machines synchrones à aimants permanents (MSAP) ", Thèse de doctorat université d'Aix - Marseille ,2012.
- [11] **A.Kumar, S.K.Shukla**, "A Review on Thermal Energy Storage Unit for Solar Thermal Power Plant Application", International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, TMREES15.
- [12] **M.A.Obadia**, "Le stockage de l'énergie électrique : une dimension incontournable de la transition énergétique", Avis du Conseil économique, social et environnemental, 9 juin 2015.
- [13] <https://moodle.insa-lyon.fr/pluginfile.php>
- [14] Sitelyccejdarc.org›cours›Activite3.

- [15] **Patrick T. McMullen, Lawrence A. Hawkins, Co S. Huynh, Dang R. Dang**, "design and development of a 100 KW energy storage flywheel for UPS and power Conditioning applications", 24th International PCIM Conference Nuremberg, Germany, May 20 - 22, 2003.
- [16] **I.Hamzaoui, F.Bouchafaa, A.Talha**, "Système inertiel de stockage d'énergie associé à des générateurs éoliens", Laboratory of Instrumentation, Faculty of Electronics and Computer, University of Sciences and Technology Houari Boumediene, BP 32 El-Alia 16111 Bab-Ezzouar Algiers, Algeria.
- [17] **D.Aouzellag**, "machines électriques spéciales", cours master 2 génie électrique université de A.MIRA Bejaia ,2018.
- [18] **M.I.Touaimi, M.A.Douaer**, "La commande prédictive généralisée appliqué à la machine synchrone à aimants Permanents", Mémoire de Master en Génie électrique, Université de Djilali BOUNAÂMA Khemis Miliana, 2017.
- [19] **J.M Retif**, "commande vectorielle des machines asynchrones & synchrones", Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Edition 2008.
- [20] **Y.A.Dali, Y.Djemaoun**, "Réalisation de la commande d'un moteur synchrone", mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de master académique.
- [21] http://physiqueev1.free.fr/Documents/STS2/Cours/Presentation/CoursPPT_STS2_15_Machines_synchrones.ppt
- [22] **G.Pasqualini**, "Alimentation par convertisseurs statiques : régimes transitoires", Technique de l'ingénieur.
- [23] **H.Ibrahim, A.Ilinca, J.Perron**, "Solutions de stockage de l'énergie éolienne", Rapport interne Laboratoire de Recherche du *GROUPE ÉOLIEN* LRGE-01 – Janvier 2006.
- [24] **E.Zouggar**, "Développement de l'algorithme de commande de l'onduleur basé sur la séquence alternante de vecteur nul (altenating zero vzctor sequence)", mémoire de magister en électromécanique, université BADJI MOKHTAR-Annaba, 2008.

ANNEXE A**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 :

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

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

ANNEXE B

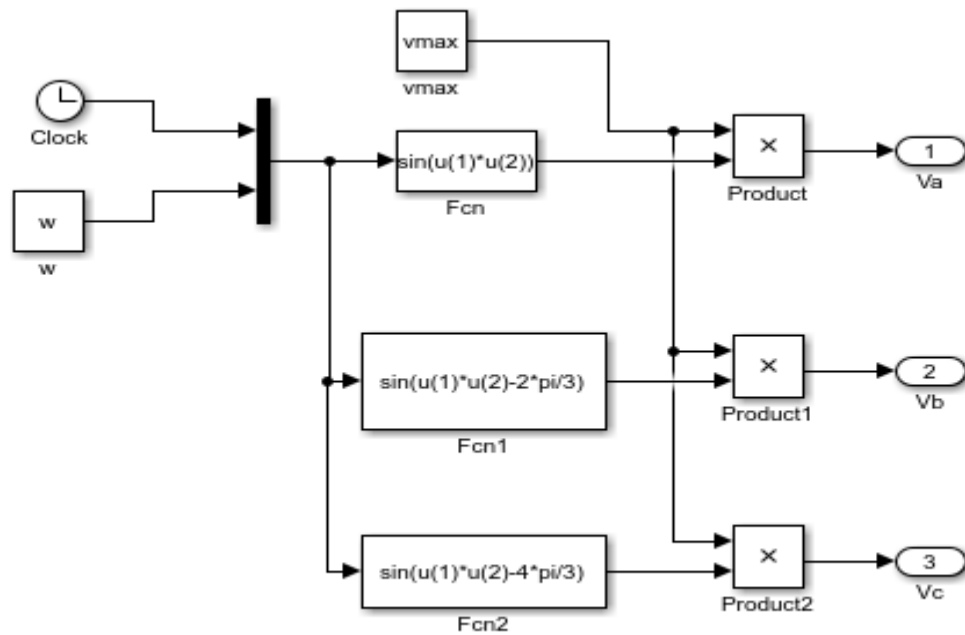


Figure 1 : bloc de l'alimentation triphasé de la MSAP

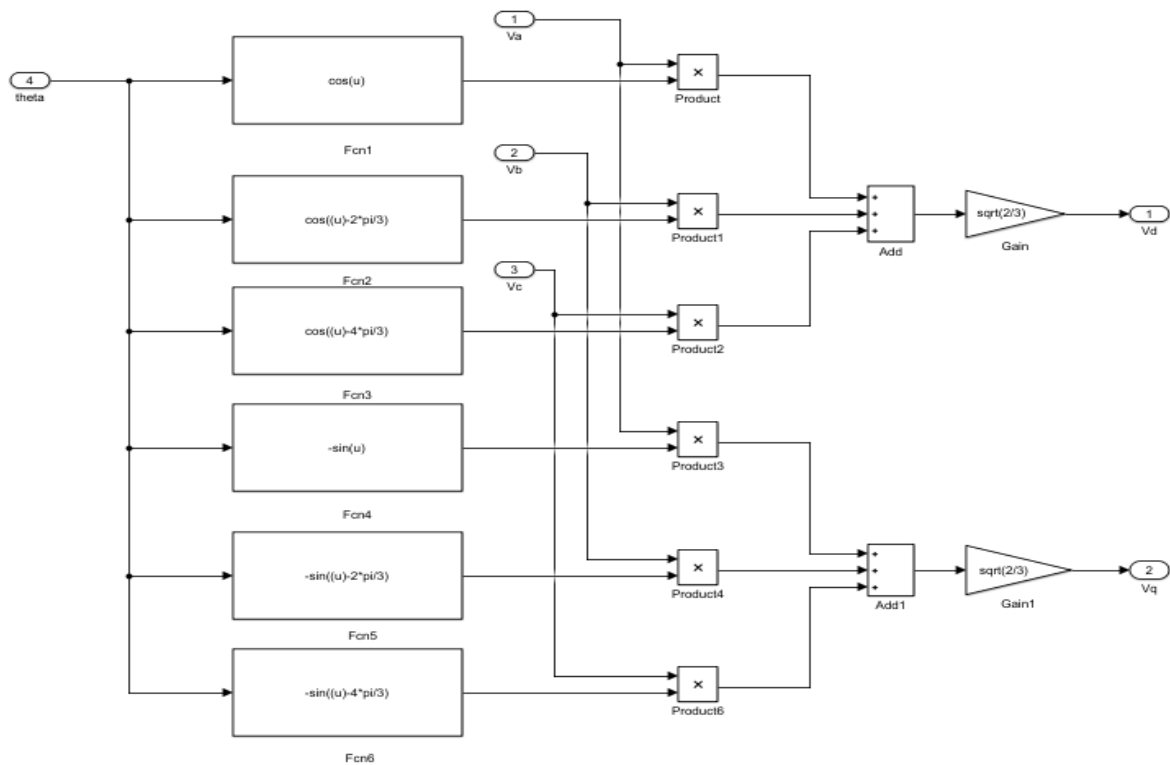


Figure 2 : schéma bloc de la transformation de PARK

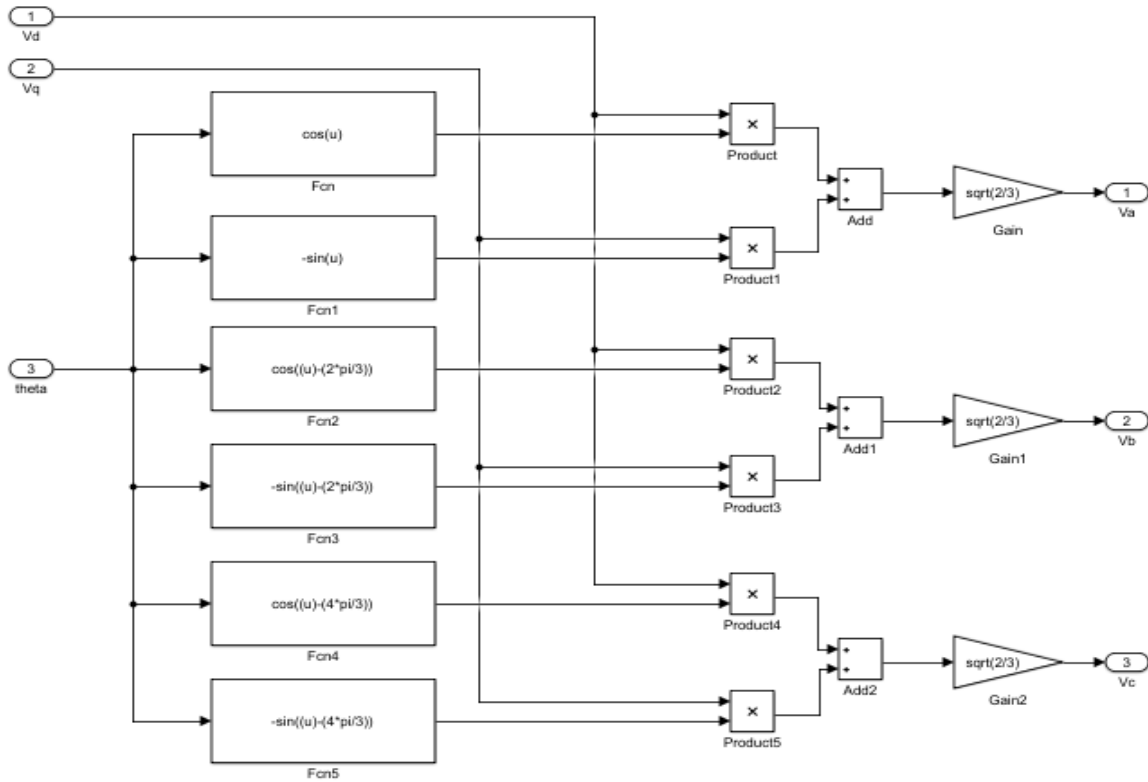


Figure 3 : schéma bloc de la transformation de PARK inverse

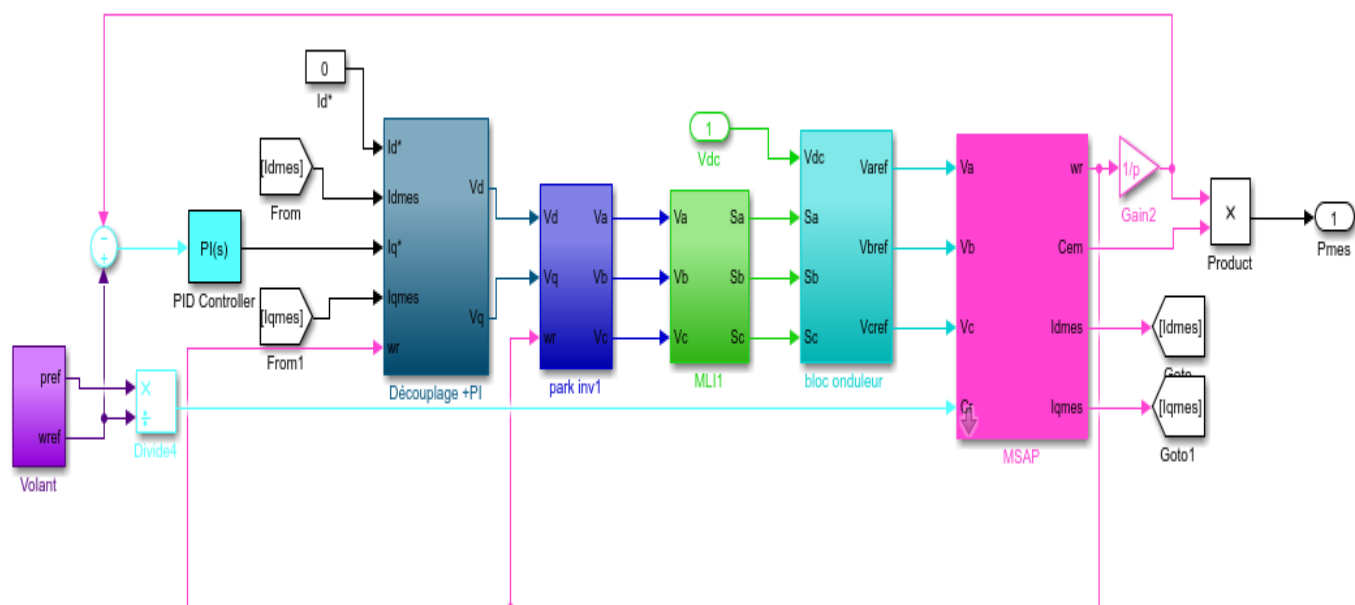


Figure 4 : Schéma de simulation sous MATLAB/Simulink