

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur de la Recherche Scientifique
Université Abderahmanemira de Béjaïa
Faculté de Technologie
Département de Génie Électrique



En vue d'obtention du diplôme de master

Filière : Electrotechnique

Option: Commande Electrique

Thème

**Application d'une commande non
linéaire dans un système de stockage
inertiel**

Réalisé par:

Mr. TARAFT Yanis

Encadré par:

Mr Melahi Ahmed

Promotion 2020/2021

Remerciements

Tout d'abord je tiens à remercier le bon dieu pour m'avoir guidé à bien mener ce travail.

Je tiens à présenter mes plus vifs et chaleureux remerciements à mon promoteur M^r Melahi Ahmed enseignant à l'université de Bejaia, pour acceptation de m'encadrer, sa disponibilité et son soutien.

Mes remerciements les plus respectueux aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

A toute personne qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce modeste travail.

Dédicaces

Au nom de Dieu le Miséricordieux Je dédie ce travail à :

A mes parents :

Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études.

Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers eux.

Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.

A mes sœurs : Khadidja, Akila et Cylia.

A mon frère : Walid

Mes précieux amis (es) : Fafo, Nawel et Sara.

A toute la promotion génie électrique 2020/2021.

T. Yanis

TABLE DES MATIERES

Introduction générale	1
CHAPITRE I Généralités sur les systèmes de stockage	
I. Introduction	2
I.1 Systèmes de stockage d'énergie	
I.1.1 Stockage d'énergie sous forme électromagnétique	2
I.1.2 Super-condensateurs	2
I.1.3 Supraconducteurs	3
I.1.4 Stockage d'énergie sous forme d'énergie électrochimique	3
I.1.5 Batteries électrochimiques	3
I.1.6 Batteries à circulation	4
I.1.7 Stockage sous forme d'énergie thermique	4
I.1.8 Par chaleur sensible	4
I.1.9 Par chaleur latente	5
I.1.10 Stockage sous forme d'énergie chimique	5
I.1.11 Hydrocarbure	5
I.1.12 Biomasse	5
I.1.13 Pile à combustible à hydrogène	6
I.1.14 Stockage sous forme d'énergie mécanique	6
I.1.15 Station de transfert d'énergie par pompage-turbinage (STEP)	6
I.1.16 A air comprimé	7
I.1.17 Stockage inertiel	7
I.2 Constituants	8
I.3 Profondeur de décharge	9
I.4 Machines utilisées	11
I.4.1 Machine synchrone à réluctance variable	11
I.4.2 Machine synchrone à induction homopolaire	11
I.4.3 Machine synchrone à aimants permanents	11
I.4.4 Machine asynchrone	12
I.5 Avantages et inconvénients de la machine asynchrone	12

I.6 Conclusion	13
Chapitre II Modélisation de système de stockage inertielle	
Introduction	14
II.1 Description du fonctionnement des SISES	14
II.2 Avantages et inconvénients des SISEs	14
II.2.1 Avantages des SISE	14
II.2.2 Inconvénients du SISE	15
II.3 Contraintes et vitesse admissible	15
II.4 Modélisation de système de stockage inertielle	15
II.1.1 Modélisation du volant	15
II.2 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents	16
II.2.1 Hypothèses simplificatrices	16
II.2.2 Equations électriques	17
II.2.3 Equation magnétique	17
II.2.4 Equation mécanique	17
II.2.5 Equation électromagnétique	17
II.2.6 Mise sous forme d'équation d'état	18
II.3 Modélisation du convertisseur statique conventionnel	18
II.3.1 Modèle du redresseur	18
II.3.2 Modélisation de filtre	19
II.3.3 Modélisation de l'onduleur	19
II.4 Commande vectorielle	20
II.5 Commande de l'onduleur de tension à MLI naturelle (sinus-triangle)	20
II.6 Conclusion	21
Chapitre III Commande en mode de glissement du système de stockage inertielle	
Introduction	22
III-1 Théorie de la commande par mode de glissement	22
III.1.1 Choix de la surface de glissement	22
III.1.2 Conditions de convergence et d'existence	23
a- Fonction discrète de commutation	23

b- Fonction de LYAPUNOV	23
III.1.3 Détermination de la loi de commande	24
III.2 Application de la commande par mode de glissement d'ordre 1 à la machine à aimant permanents	26
III.2.1 Synthèse du régulateur par mode glissant de la vitesse	26
III.2.2 Synthèse du régulateur par mode glissant du courant en quadrature	27
III.2.3 Synthèses du régulateur par mode glissant du courant direct	28
III.3 Calcul des paramètres K_{Ω} , K_q et K_d	28
III.3.1 Calcul de K_{Ω}	28
III.3.2 Calcul de K_q	29
III.3.3 Calcul de K_d	29
III.4 Simulation et interprétation des résultats	31
Conclusion générale	35
Références Bibliographiques	
Annexes	

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : stockage d'énergie dans les super-condensateurs	2
Figure I.2 :Supraconducteur	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
Figure I.9 Principaux composants d'un accumulateur inertiel	8
Figure I.10 : Variation de la profondeur de décharge (PDC) en fonction du rapport de vitesse	9

Chapitre II

Figure II.1 principe de fonctionnement d'un SISE	14
Fig.II.1 : Cascade redresseur filtre onduleur	18
Fig.II.2 : Filtre passe bas	19
Fig.II.3 : Schéma de principe de MLI sinus_triangle	21

Chapitre III

Fig.III.1 Fonction du signe	24
Fig.III.2 Commande adoucie (sat)	24
Fig.III.3 Schéma bloc de commande vectorielle par mode de glissement	29
Fig.III.4 Puissance active de stockage et sa référence	30
Fig.III.5 Vitesse de rotation du volant et sa référence	30
Fig.III.6 Courants direct I_d et en quadrature I_q et leur références	31
Fig.III.7 Couple électromagnétique et couple résistant	31
Fig.III.8 Puissances actives, produite par ressource renouvelable, puissance injectée à la charge	31
Fig.III.9 Allures tension courant d'une phase, a- Zoom sur une période de stockage,	31
b- Zoom sur une période de déstockage.	31

Tables des Notations et Symboles

Paramètres de modélisation du volant

Ω_v : Vitesse mécanique du volant (rad /s)

J_v : Moment d'inertie du volant (kg.m^2)

E_c : Energie cinétique (joules)

M_v : Est la masse du volant (kg)

Ω_{\min} : vitesse minimal du volant (rad.s^{-1})

Ω_{\max} : vitesse maximal du volant (rad.s^{-1})

s: Facteur de sécurité de fonctionnement du volant d'inertie ;

σ : résistance à la traction ;

ρ : Densité du matériau (kg/m^3) ;

r : Rayon du volant (m).

Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

v_d, v_q : Les tensions statorique dans le repère dq (V)

φ_d, φ_q : Les flux statorique dans le repère dq (Wb)

i_d, i_q : Les courants statorique dans le repère dq (A)

L_d, L_q : Inductances d'axes directe et en quadrature

J: Moment d'inertie de la partie tournante (kg. m^2)

f : Coefficient de frottement visqueux (N.m.s/rad)

C_r : Couple résistant (N.m)

ω : Vitesse mécanique (rad/s)

V_{dc}^- : Tension bus continue potentiel positif (V)

V_{dc}^+ : Tension bus continue potentiel négatif (V)

Si : fonction des états logique des interrupteurs

V_a, V_b, V_c : Tensions a l'entrée du redresseur (V)

V_{dc} : Tension bus continue (V)

i_a, i_b, i_c : Courants alternative (A)

I_{red} : Courant redressé (A)

I_{ond} : Courant onduleur (A)

I_c : Courant traversant la capacité (A)

MLI : Modulation de largeur d'impulsion.

HF : haute fréquence

f : fréquence (Hz)

$V_{\text{aref}}, V_{\text{bref}}, V_{\text{cref}}$: Tensions de références

S_a, S_b, S_c : Fonctions des états logiques des interrupteurs

V_p : Tension de la porteuse

Commande en mode de glissement du système de stockage inertiel

X : Vecteur d'état.

U : Vecteur de commande.

$U_{\text{min}}, U_{\text{max}}$: La commande minimale, maximale.

U_{eq} : La commande équivalente [V].

U_n : La commande discontinue [V].

$S(\Omega)$: La surface de glissement de la vitesse [rad/s].

$S(i_d)$: La surface de glissement du courant i_d [A].

$S(i_q)$: La surface de glissement du courant i_q [A].

I_d^* : Le courant de référence suivant l'axe d [A].

I_q^* : Le courant de référence suivant l'axe q [A].

V_a^*, V_b^*, V_c^* : Tensions de références

V_q^* : Tension de référence

V_d^* : Tension de référence

$i_{(a,b,c)}$: Courants (A)

$V_{\text{deq}}, V_{\text{qeq}}$: Tensions équivalentes (V)

V_q, V_d : Tensions statoriques du repère de Park [V].

$V_{\text{dn}}, V_{\text{qn}}$: Les tensions de commande discontinue suivant l'axe d et q [V].

K_Ω, K_q, K_d : Les paramètres de la commande par mode de glissement.

CMG : commande par modes glissants

MSAP : Moteur synchrone à aimants permanents.

SISE : Système inertiel de stockage d'énergie.

Introduction générale

Introduction générale

De plus en plus le monde se converge vers l'exploitation de l'énergie électrique. Par conséquent la consommation de cette dernière ne cesse de croître en quantité considérable. A l'heure actuelle le réseau est alimenté depuis les centrales de production d'énergie électrique utilisant l'énergie primaire de type fossile. Cette énergie d'une part est limitée dans les stocks, d'autre part pollue l'atmosphère, altération négatif du climat à savoir dégagement des gaz à effet de serre. Il en découlera en conséquence élévation de la température de la planète terre. Ce fait répercute sur la santé humaine et l'équilibre écologique.

L'idéal serait de minimiser l'utilisation de l'énergie fossile. Contribuer à la purification de l'environnement et de répondre à la forte demande en énergie électrique. Cela passe par l'intégration des ressources renouvelable dont les stocks illimités à l'échelle de l'homme au réseau électrique. Elles présentent une solution attractive et alternative aux ressources fossiles. En revanche leur développement est freiné et considérée comme des charges négatives. Cela est dû d'une part leurs sources primaire est de nature stochastique par conséquent ne participent pas aux services systèmes, d'autre part leur taux d'intégration au réseau électrique est limité à 30% de la capacité du réseau [1]. D'où le fonctionnement seul de ce type de générateurs est bloqué. De ces considérations il en ressort que la stabilité du réseau ne dépend pas uniquement du renforcement en énergie électrique mais de la qualité de la puissance injectée au réseau.

Cet état de chose devrait changer et sciemment réfléchi d'intégrer les moyens de stockages dans les ressources intermittentes pouvant lui faire acquérir la propriété de lissage de la puissance injectée au réseau. Par conséquent d'une part franchir la barrière de pénétration au réseau et de participer au service système, d'autre part valoriser les ressources intermittentes. C'est dans cette optique que le travail de ce thème est mené.

Afin de mener à bien notre travail, ce dernier est scindé sur trois chapitres.

Le premier est consacré à la présentation de quelques modes de stockage d'énergies, définition et leurs intérêts. 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. Et à l'implémentation du modèle le régissant le fonctionnement du système en question sous l'environnement MATLAB/Simulink, suivi de l'interprétation des résultats obtenus.

Enfin, on termine par une conclusion générale, suivi de quelques perspectives.

I. Introduction

Le présent chapitre est consacré à la présentation d'un aperçu sur les différents modes de stockage d'énergie. Notamment, le stockage inertiel et ses constituants. Une brève comparaison entre les systèmes de stockage sera présentée. Nous présentons aussi quelques notions sur la suspension magnétique et les machines utilisées.

I.1 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.

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

I.1.1 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.

I.1.2 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.

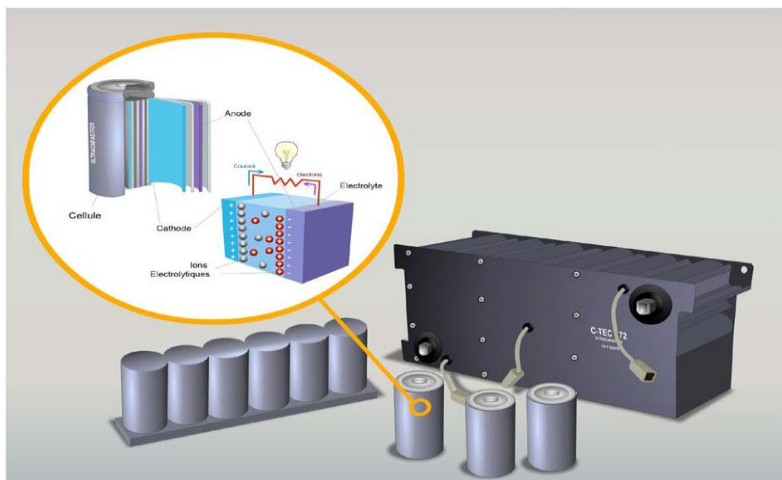


Figure I.1 : stockage d'énergie dans les super-condensateurs

I.1.3 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 coûts de fabrication et de maintenance sont très élevés.

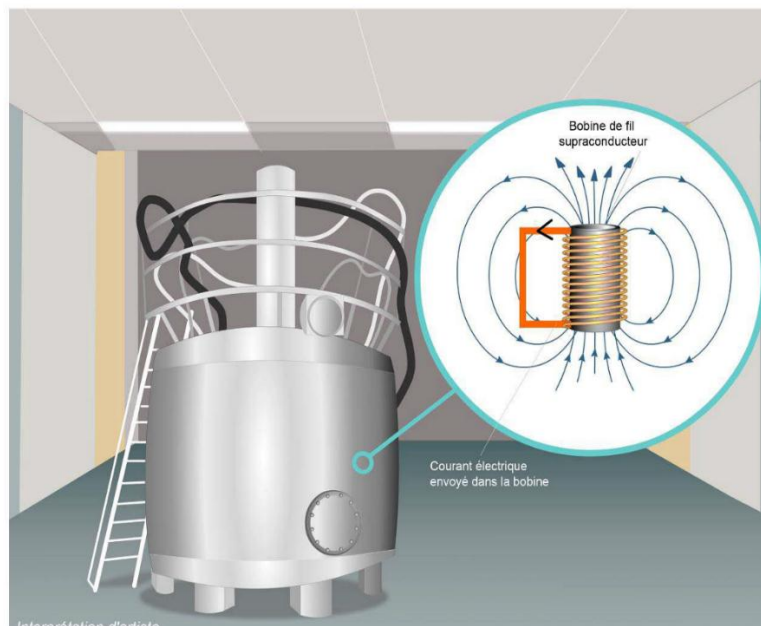


Figure I.2 :Supraconducteur

I.1.4 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.

I.1.5 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; 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.

I.1.6 Batteries à circulation :(flow 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'accumulé localement est forcément limitée, ce qui fixe un maximum à la capacité (Figure I.3).

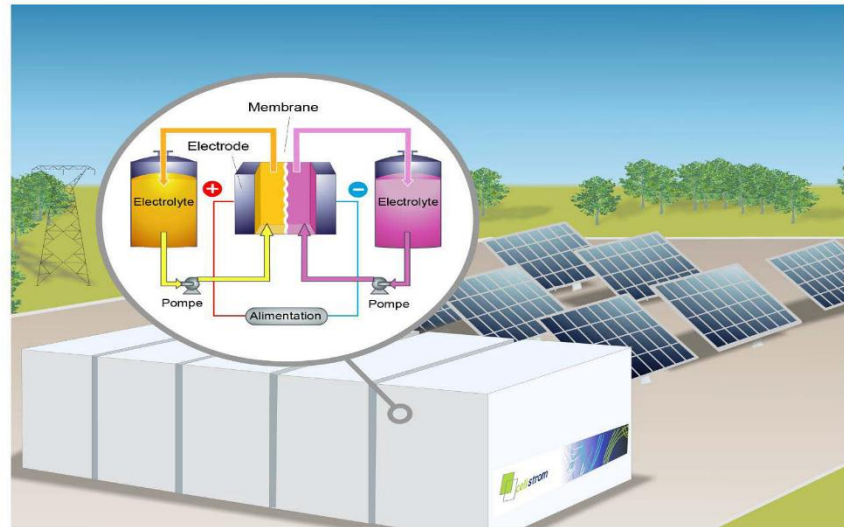


Figure I.3 : Stockage dans des batteries à circulation

I.1.7 Stockage sous forme d'énergie thermique

L'énergie peut être stockée sous forme de chaleur et elle peut être restituée ultérieurement

I.1.8 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).

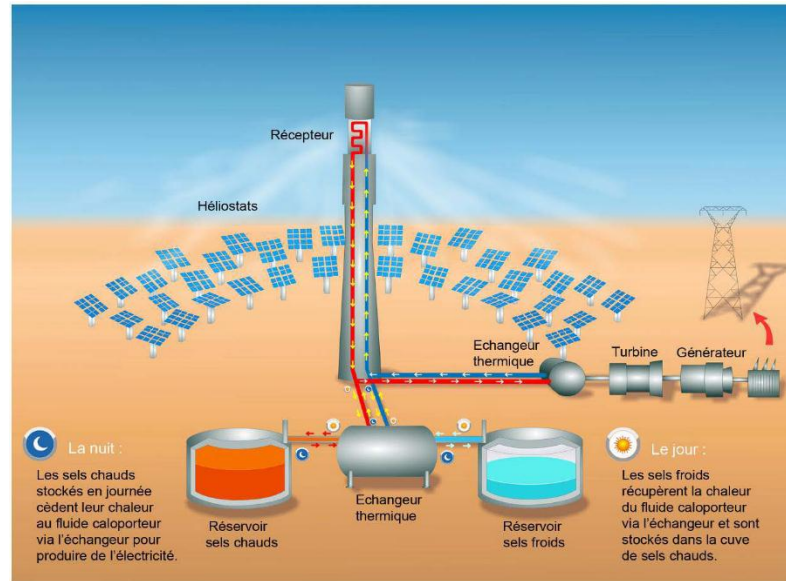


Figure I.4 : Schéma de stockage par chaleur sensible

I.1.9 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.

I.1.10 Stockage sous forme d'énergie chimique

Tout combustible peut être considéré comme un stocke d'énergie sous forme chimique.

I.1.11 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.

I.1.12 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 ^[2].

I.1.13 Pile à combustible à hydrogène

Cette pile est constituée de deux électrodes (une anode et une cathode) séparées par un électrolyte ^[8]. 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.

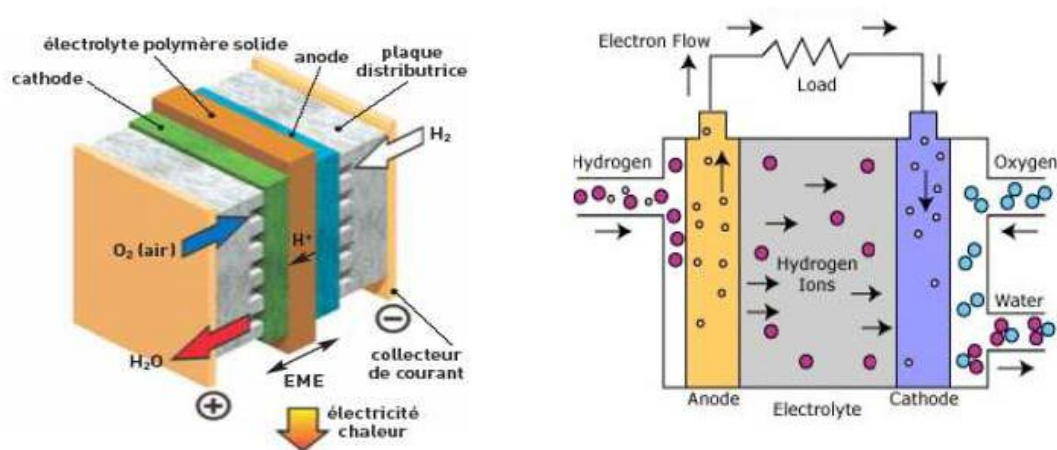


Figure I.5 : Fonctionnement d'une pile à combustible

I.1.14 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.

I.1.15 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.

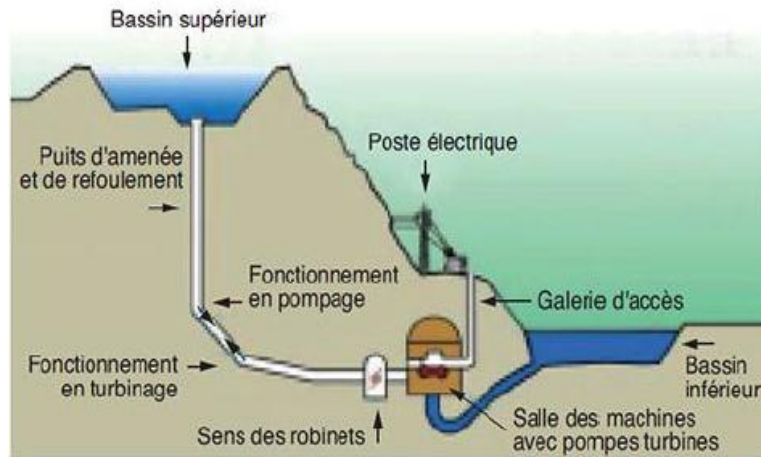


Figure I.6 : Schéma du principe d'une STEP

I.1.16 A 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.

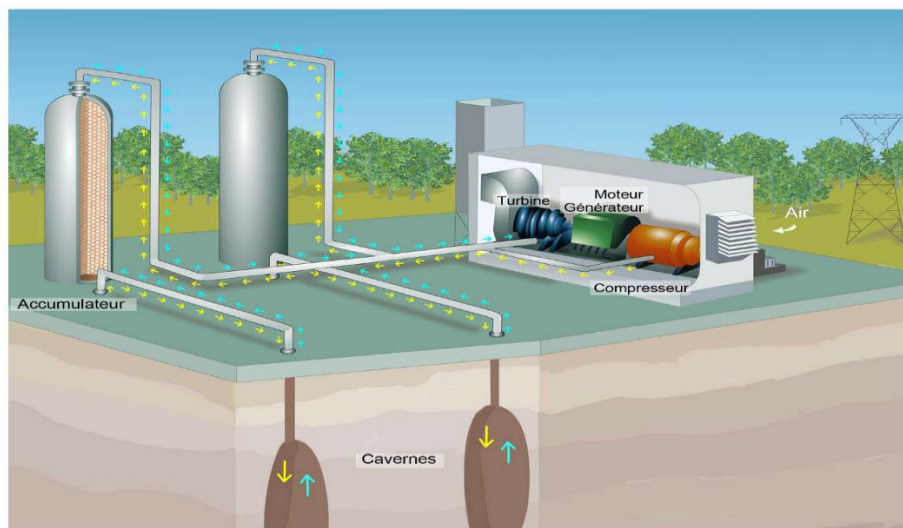


Figure I.7 : Technique de stockage à air comprimé

I.1.17 Stockage inertielle

Ce système comporte une masse tournante qui est le volant d'inertie couplé à une machine électrique réversible. 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. Ce point sera détaillé dans le deuxième chapitre.

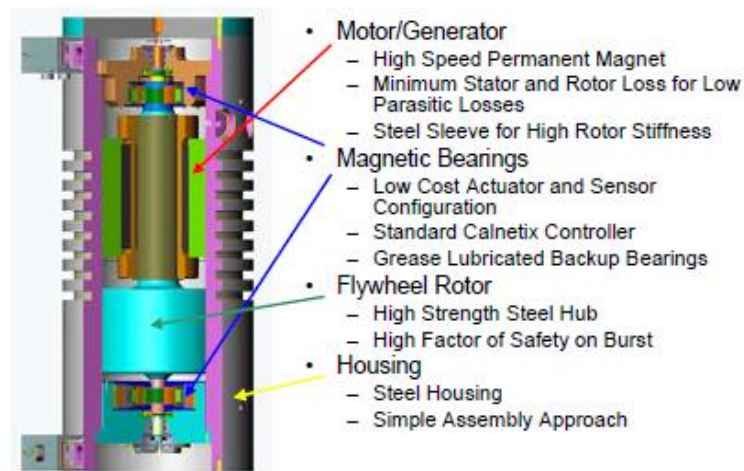


Figure I.8 : Composants du SISE

I.2 Constituants

Les principaux composants d'un dispositif de stockage électromécanique inertiel sont schématisés figure 1. On trouve ainsi en premier lieu le **volant** : élément principal de l'accumulation, puis le moteur-générateur, le tout guidé par des paliers éventuellement magnétiques, un convertisseur électronique de puissance et une enceinte à basse pression.

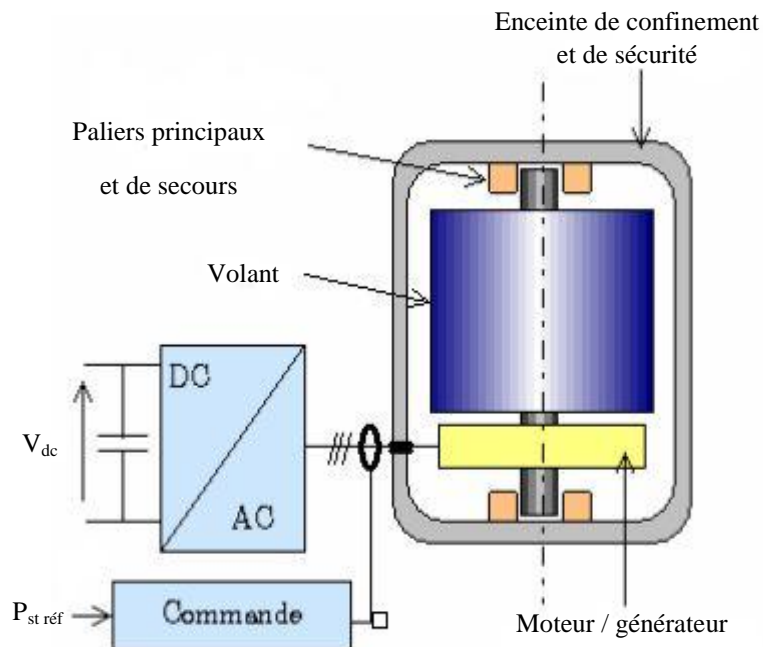


Figure I.9 : Principaux composants d'un accumulateur inertiel

I.3 Profondeur de décharge

La profondeur de décharge est définie comme étant l'énergie extractible par rapport à l'énergie cinétique maximale accumulée, et est exprimée par l'expression I.1

$$\text{PDC} = \frac{W_{\max} - W_{\min}}{W_{\max}} = \frac{r^2 - 1}{r^2} \quad \text{I.1}$$

Avec :

$$r = \frac{\Omega_{V_{\max}}}{\Omega_{V_{\min}}}$$

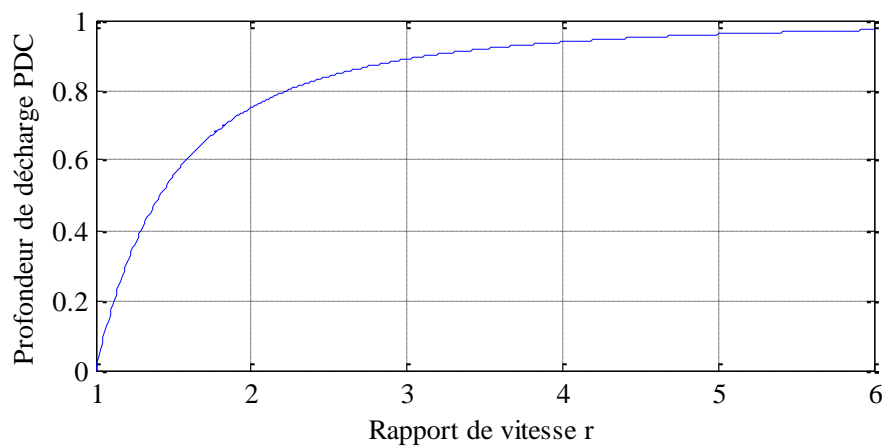
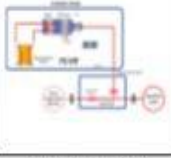


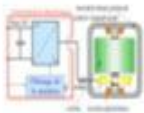
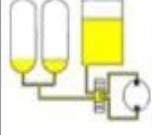



Figure I.10 : Variation de la profondeur de décharge (PDC) en fonction du rapport de vitesse

Tableau I.1 Bilan simplifié des caractéristiques des moyens de stockage

Technologie	Inductif Supra-conducteur	Super-condensateur	Electro-chimique	Volant Inertie	Oléo-pneumatique	Hydrogène PAC réversible
						
Forme d'énergie	magnétique	électrostatique	chimique	mécanique	air comprimé	carburant
Densité d'énergie (accumulateur seul, hors équip. annexes)	1 à 5 Wh/kg	2 Wh/kg → 10 Wh/kg	20 à 120 Wh/kg	1 à 5 Wh/kg	1 à 3 Wh/kg (1 à 200 bars)	300 à 600 Wh/kg (200 à 350 bars) hors PAC
Capacité réalisable ou réalisée	qq kWh	qq kWh	qq Wh à qq MWh	qq kWh à qq 10 kWh	qq 10 kWh peu de réalisations	NA
Constante de temps	qq s à 1 min	qq s à qq min	qq 10 min (NiCd) à qq 10 heures (Pb)	qq min à 1 h	qq min (avec hybridation) à qq jours	1 h à qq jours (peu d'autodécharge)
Cyclabilité	qq 10 000 à qq 100 000 fatigue mécanique	qq 10 000 à qq 100 000	qq 100 à qq 1000 dégradations chimiques	qq 10 000 à qq 100 000 fatigue mécanique	qq 1000 à qq 10 000 fatigue mécanique	??
Rendement électrique	> 0,9	0,8 à > 0,9 selon régime	0,7 à 0,8 selon techno et régime	0,8 à > 0,9 selon régime	0,8 à 0,9 selon hybridation	0,3 à 0,5
Connaissance de l'état de charge	Aisée (courant)	Aisée (tension)	Difficile Paramètres variables	Aisée (vitesse)	Aisée (pression)	Aisée (remplissage H ₂)
Coût énergie €/kWh ⁽¹⁾	500 à 72000	10 000 à 20 000 (dimensionnement en puissance)	Pb-acide : 50 à 200 Lithium : 700 à 1000	150 à 2000 (massif) ≈ 25000 (composite)	300 (cf ⁽¹⁾)	15
Coût puissance €/kW ⁽¹⁾	≈ 300	≈ 300	250 à 1500	300 à 350	400 à 600 (cf ⁽¹⁾)	6000
Remarques	Cryogénie	Grande cyclabilité	Technologie mature	Coût global compétitif sur la durée de vie	Rendement faible	Intéressant si contexte de réseau d'hydrogène

I.4 Machines utilisées

Il existe plusieurs machines utilisées pour la conception et réalisation des systèmes inertiels de stockage d'énergie électrique.

I.4.1 Machine synchrone à réluctance variable

Ce type de machine a été proposé en 1996 par une équipe américaine de Berkeley, Université de Californie, pour des SISEs à volant rapide (48000 T/min). Des études préliminaires ont été faites sur la machine synchrone à réluctance variable en montrant ses avantages par rapport aux autres machines. Les calculs théoriques estiment des performances supérieures pour cette machine par rapport aux machines asynchrones à cage (les plus utilisées), mais à condition d'avoir des rapports de saillance élevés. On estime qu'une machine dont la saillance est autour de 10, donne des performances similaires à une machine asynchrone à cage. Des rapports supérieurs amènent à des performances meilleures par rapport aux machines asynchrones. Par exemple, à un rapport de saillance égal à 16, ce qui permet d'obtenir un rendement d'environ 84% et un facteur de puissance $\cos\phi = 0,91$.

I.4.2 Machine synchrone à induction homopolaire

Il existe deux types de machines :

- ❖ Machine synchrone homopolaire à entrefer radial pour les SISEs à volants rapides (jusqu'à 100000 T/min) [3,4]. Un prototype de 30 kW a été étudié par Nicolas BERNARD et réalisé par LABORATOIRE D'ÉLECTRICITÉ, SIGNAUX ET ROBOTIQUE (LESiR UPRESA CNRS 8029) Antenne de Bretagne de l'ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE DE CACHAN Campus de Ker Lann - 35 170 BRUZ [5]. et les essais ont démontré un rendement d'environ 83% pour une accélération à puissance constante entre 30000 et 60000 T/min.
- ❖ Machine synchrone homopolaire à entrefer axial destinée aux SISEs (jusqu'à 10000 T/min). L'invention a été protégée par un brevet français et les auteurs espèrent réaliser un SISE ayant une puissance nominale de 3 kW, une capacité de 3 kWh et de longs cycles charge / décharge (jusqu'à 24 h).

I.4.3 Machine synchrone à aimants permanents

Ce type de machine est le plus restrictif du point de vue de la plage de vitesse à puissance constante. De plus, pour augmenter la vitesse au-dessus de la vitesse de base, il faut affaiblir le flux de l'aimant permanent, ce qui provoque une diminution du rendement de la machine. Selon certains auteurs, cette machine est plus appropriée pour le fonctionnement au-dessous de la vitesse de base, mais cela n'est pas envisageable pour les SISEs car le fonctionnement à puissance constante n'est plus possible [3].

I.4.4 Machine asynchrone

Actuellement, c'est la machine la plus utilisée dans les SISE. Des réalisations vraiment notables ont été déjà annoncées concernant ce type de machine comportant un système de refroidissement qui permet le fonctionnement continu à la puissance nominale sur une plage de vitesse comprise entre 7500 tr/min et 15000 tr/min. Le volant d'inertie est fabriqué en matériau composite.

➤ I.5 Avantages et inconvénients de la machine asynchrone

a. Avantages

Du fait de sa simplicité de construction, d'utilisation et d'entretien, de sa robustesse et son faible prix de revient, la machine asynchrone est très couramment utilisée comme moteur dans une gamme de puissance allant de quelques centaines de Watts à plusieurs milliers de kilowatts.

Le principe de moteur à double cage, découverte en 1912 par Paul Boucherot a permis de pallier cette seconde difficulté. Grâce aux progrès de l'électronique de puissance, il est maintenant possible de faire fonctionner cette machine avec une vitesse réglable dans une large plage [2].

b. Inconvénients

L'inconvénient principal des moteurs asynchrones est qu'ils sont très difficiles de faire varier leurs vitesses et le fort courant appelé au démarrage.

Ces machines étaient à l'origine uniquement utilisées en moteur mais toujours grâce à l'électronique de puissance elles sont de plus en plus souvent utilisées en génératrices.

I.6 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.

Introduction

Dans ce chapitre on présentera les modèles régissant le fonctionnement des différentes parties constituant le système de stockage inertiel. A savoir le volant d'inertie, la machine à aimant permanent et la baie d'électronique de puissance. La commande vectorielle et le principe de modulation de largeur d'impulsion sera aussi présenté, en vue de la commande du système en question.

II.1 Description du fonctionnement des SISES

Lorsqu'on parle de « système inertiel de stockage d'énergie » (SISE), on comprend un système comportant un volant d'inertie, un moteur-générateur électrique et un convertisseur électronique de puissance. La (figure II.1) montre le principe de fonctionnement du SISE [15]. Comme dans la majorité des systèmes de stockage d'énergie électrique, il y a une transformation réversible d'énergie. Lors du stockage, l'énergie électrique est convertie en énergie mécanique par l'intermédiaire du moteur électrique. L'énergie mécanique est stockée dans le volant d'inertie sous forme d'énergie cinétique d'une masse tournante. Lors de la décharge du SISE, l'énergie mécanique est reconvertie en énergie électrique par l'intermédiaire du générateur électrique. D'habitude, il y a une seule machine électrique qui peut fonctionner en moteur ou en générateur, en fonction du régime de fonctionnement du SISE. Le régime de fonctionnement est imposé par le convertisseur électronique de puissance, qui impose le sens de transfert de l'énergie à travers de la machine électrique.

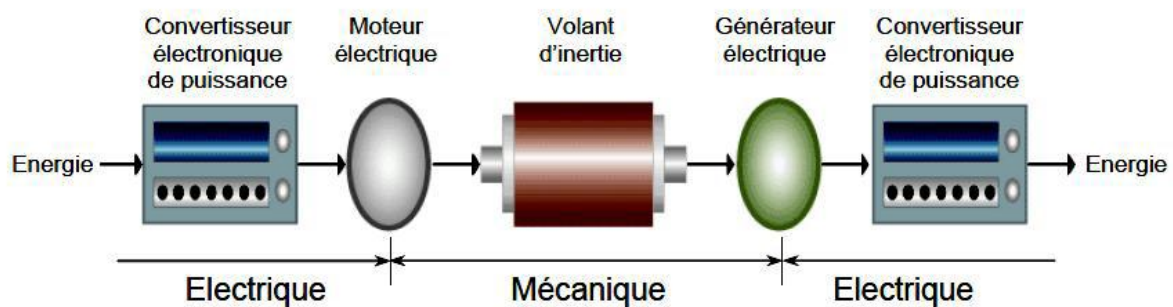


Figure II.1 principe de fonctionnement d'un SISE.

II.2 Avantages et inconvénients des SISEs

II.2.1 Avantages des SISE

Longue durée de vie (>105 cycles ou > 20 ans)

- Coût par cycle faible
- Grande plage de dimensionnement possible (rapp. NRJ/puissance étendu, de qq heures à qlq secondes)

- Contrôle de l'état de charge aisé
- Bon rendement
- Recyclage en fin de vie

II.2.2 Inconvénients du SISE

- Une technologie tournante
- Coût à l'achat très élevé
- Bruit
- Insécurité

II.3 Contraintes et vitesse admissible

La contrainte dans le volant est alors

$$\sigma = \frac{N}{S} = \rho v^2 \quad \text{II.1}$$

On observe, selon la relation que la contrainte dans le volant ne dépend pas de sa section.

Ainsi, on peut déduire facilement la vitesse périphérique admissible du volant :

$$v_{adm} = r_0 \Omega_{adm} = \sqrt{\frac{\sigma_{adm}}{\rho}} \quad \text{II.2}$$

II.4 Modélisation de système de stockage inertiel

II.4.1 Modélisation du volant

Un volant d'inertie est une masse mobile qui est circulaire ou non tournante à Ωv autour d'un axe passant par son centre de gravité ayant une quantité d'énergie cinétique E_c . Cette dernière est donnée par l'expression suivante :

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

Avec

J_v : Inertie du volant.

Le calcul de J_v est basé sur la puissance à fournir pendant un temps t . On souhaite que le stockage inertiel fournisse la puissance nominale P_n pendant ce temps (Δt).

L'énergie nécessaire est alors :

$$\Delta E_c = P_n \Delta t \quad \text{II.4}$$

Avec

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} J_v \Delta \Omega_v^2 \quad \text{et} \quad \Delta \Omega_v^2 = \Omega_{vmax}^2 - \Omega_{vmin}^2$$

$$J_v = \frac{2P_n \Delta t}{(\Omega_{vmax}^2 - \Omega_{vmin}^2)} \quad \text{II.5}$$

La vitesse de rotation maximale du volant dépend des caractéristiques du matériau du volant.

$$\Omega_{vmax} = s \frac{1}{r} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} \quad \text{II.6}$$

s: Facteur de sécurité de fonctionnement du volant d'inertie ;

σ : résistance à la traction ;

ρ : Densité du matériau (kg/m³) ;

r : Rayon du volant.

La vitesse de rotation du volant pendant la période de décharge s'exprime comme suit [15] :

$$\Omega_v(t) = \begin{cases} \Omega_{vmax}, & t < \Delta t \\ \Omega_{vmax} \cdot e^{-\frac{k_0 t}{J_v}}, & t \geq \Delta t \end{cases} \quad \text{II.7}$$

Il en résultera l'expression de la puissance restituée comme suit :

$$P_{st} = \begin{cases} P_n, & t < \Delta t \\ P_n \cdot e^{-\frac{k_0 t}{J_v}}, & t \geq \Delta t \end{cases} \quad \text{II.8}$$

A partir de ces équations, on constate que le choix du volant d'inertie dépend de deux conditions initiales, qu'il faut prendre en compte ; à savoir la vitesse de rotation maximale du volant et sa capacité.

II.5 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

La machine synchrone est choisie en fonction de ses avantages en termes de simplicité, absence de balais, augmentation de vitesse, réduction des pertes par rapport à la machine asynchrone, de plus, elle présente un volume massique intéressant et de contrôle aisé (le flux non estimé).

II.5.1 Hypothèses simplificatrices :

Les hypothèses simplificatrices admises dans le modèle de la machine synchrone à aimants permanents sont : [7] [8] [9] [10] [11] [12].

- * La saturation et l'hystérésis du circuit magnétique sont négligeables ainsi que les pertes par courant de Foucault, ceci permet l'établissement des relations linéaires entre flux et courant ;
- * La distribution des forces électromotrices, le long de l'entrefer, est supposée sinusoïdale ;
- * Les réactances de fuites sont indépendantes de la position du rotor ;
- * La machine synchrone à aimants permanents est supposée symétrique et linéaire.

II.5.2 Equations électriques

Les tensions électriques appliquées au stator de la machine dans le repère de Park sont données par le système d'équations II.7.

$$\begin{cases} v_d = R_s i_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - \omega_s \varphi_q \\ v_q = R_s i_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + \omega_s \varphi_d \end{cases} \quad \text{II.9}$$

II.5.3 Equation magnétique

Les flux direct et en quadrature sont exprimés par :

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d I_d + \psi_f \\ \varphi_q = L_q I_q \end{cases} \quad \text{II.10}$$

L_d, L_q : Inductances d'axes directe et en quadrature ;

φ_d, φ_q : Flux d'axes directe et en quadrature.

II.5.4 Equation mécanique

L'équation mécanique développée par la machine est donnée par la relation suivante :

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

J : Moment d'inertie de la partie tournante (kg. m²) ;

f : Coefficient de frottement visqueux (N.m.s/rad) ;

C_r : Couple résistant (N.m) ;

ω : Vitesse mécanique (rad/s).

II.5.5 Equation électromagnétique

Le couple électromagnétique C_{em} dans le référentiel (\mathbf{d}, \mathbf{q}) est donné par l'expression suivante :

$$C_{em} = P[(L_d - L_q)I_d I_q + \psi_f I_q] \tag{II.12}$$

II.6 Mise sous forme d'équation d'état

Le modèle non linéaire d'état dans le repère **(d, q)** de Park est représenté par le système d'équations II.11.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} i_d + P \frac{L_q}{L_d} i_q \omega \\ -\frac{R_s}{L_q} i_q + P \frac{L_d}{L_q} i_d \omega - P \frac{\psi_f}{L_q} \omega \\ \frac{P}{J} \psi_f i_q + \frac{R_s}{J} (L_d - L_q) i_q i_d - \frac{f}{J} \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_d} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ C_r \end{bmatrix} \tag{II.13}$$

II.6.1 Modèle du redresseur

La relation entre les parties AC et DC du redresseur est donnée par la relation suivante.

II.7 Modélisation du convertisseur statique conventionnel [27][28].

Le convertisseur de puissance bidirectionnel se compose de deux convertisseurs de source de tension conventionnels à modulation de largeur d'impulsion (MLI). Le premier est un redresseur tandis que le second est un onduleur. Ces deux convertisseurs partagent le même circuit intermédiaire (Fig.3).

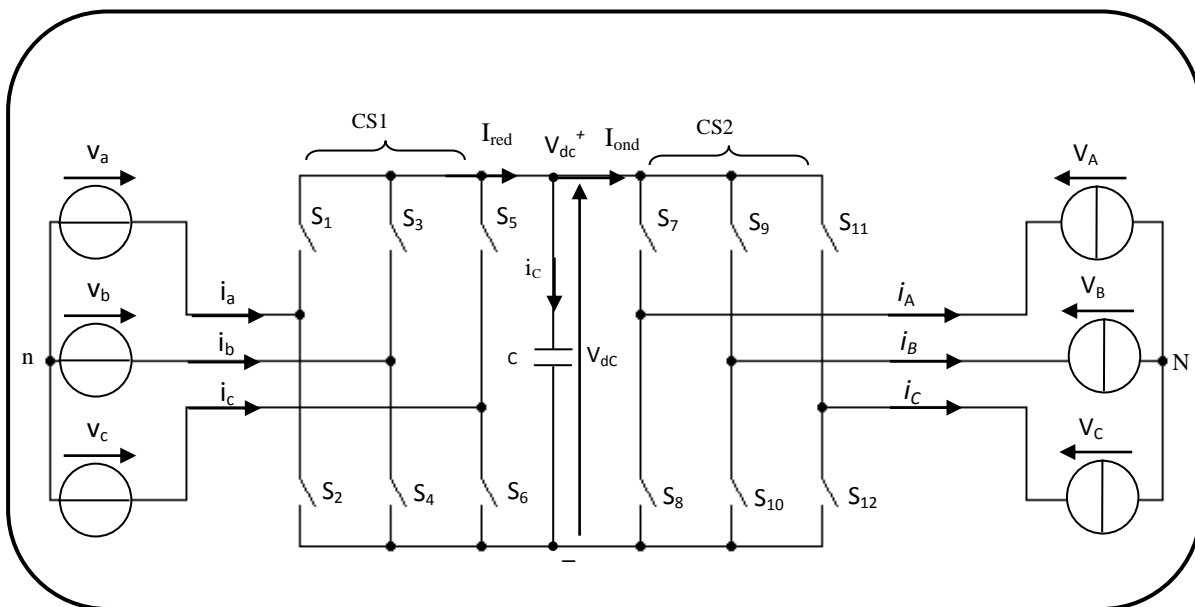


Fig.II.2 : Cascade redresseur filtre onduleur

Avec S_i , $i= 1$ à 6 , une fonction de connexion est associée à chaque interrupteur du redresseur. La tension du circuit intermédiaire est obtenue comme suit :

$$V_c = V_{dc}^+ - V_{dc}^- \tag{II.14}$$

De la même manière on peut exprimer le courant continu i_{red} en fonction des courants alternatifs comme :

$$i_{red} = [S_1 \quad S_3 \quad S_5] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \tag{II.15}$$

II.7.1 Modélisation de filtre

Le filtre utilisé est de type passe-bas. Il est représenté sur la figure II.4.

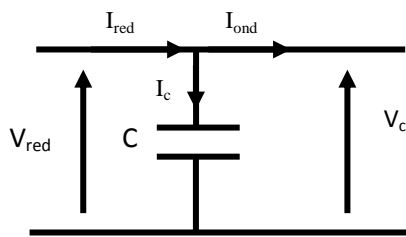


Fig.II.3 : Filtre passe bas

Le modèle du filtre est défini par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} i_{red} - i_{ond} = C \frac{dv_c}{dt} \\ V_c(t) = V_c(0) + \frac{1}{C} \int_{t_1}^{t_2} (i_{red} - i_{ond}) dt \end{cases} \tag{II.16}$$

II.7.2 Modélisation de l'onduleur

L'onduleur de tension assure la conversion de l'énergie continue en courant alternatif (DC/AC). Les tensions de sortie sont régies par l'expression (II.16).

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} = \frac{V_c}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_7 \\ S_9 \\ S_{11} \end{bmatrix} \tag{II.17}$$

Avec

Si, $i=7$ à 12, fonction de connexion associée à chaque interrupteur de l'onduleur.

Les deux convertisseurs, c'est-à-dire le redresseur et l'onduleur sont contrôlés par PWM. Ces convertisseurs sont constitués de trois bras formés d'interrupteurs électroniques choisis essentiellement en fonction de la puissance et de la fréquence de commutation. Chaque bras comporte deux composants de puissance complémentaires munis de diode de roue libre. Cette diode assure la continuité du courant dans la machine une fois l'interrupteur ouvert.

II.8 Commande vectorielle [26]

La commande vectorielle de la machine à courant alternatif consiste à ramener son comportement à celui de la machine à courant continu. Pour effectuer une commande similaire à celle des machines à courant continu à excitation séparée, il faut maintenir à zéro le courant i_d , et régler la vitesse ou la position à l'aide du courant i_q au moyen de la tension v_q .

Le système d'équations (II.7) devient :

$$\begin{cases} v_q = (R_s + sL_q)i_q + \omega_s \psi_f \\ v_d = -\omega_s L_q i_q \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

Et l'expression du couple électromagnétique (II.10) devient :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P \psi_f i_q \quad (\text{II.19})$$

II.9 Commande de l'onduleur de tension à MLI naturelle (sinus-triangle)

La technique de la MLI naturelle repose sur la comparaison entre deux signaux :

Le premier, qui est appelé signal de référence (Modulatrice) représente l'image de la sinusoïde qu'on désire à la sortie de l'onduleur. Ce signal est modulable en amplitude et en fréquence. Le second, qui est appelé signal de la porteuse (triangulaire), définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques de l'onduleur. C'est un signal de hautes fréquences (HF) par rapport au signal de référence.

L'onde en impulsion est meilleure que l'onde rectangulaire si [20]:

$$f_{\text{porteuse}} > 20 f_{\text{référence}}$$

Le schéma de principe de cette technique est donné par la figure II.4

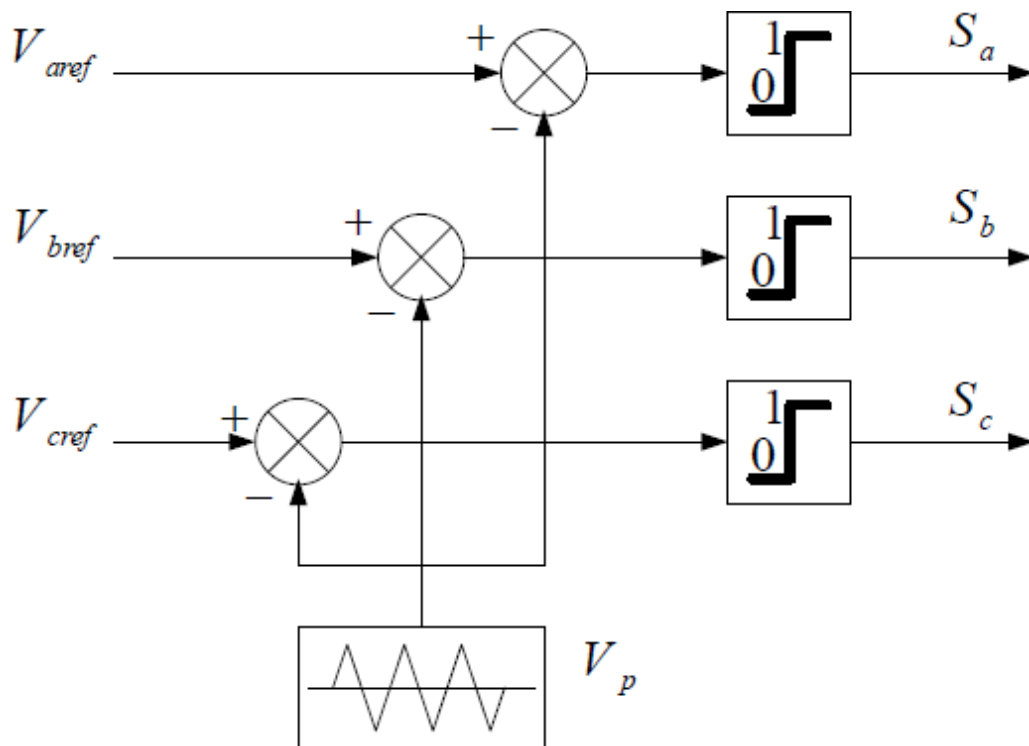


Fig.II.4 : Schéma de principe de MLI sinus_triangle

Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet de la modélisation des différentes parties du système de stockage inertiel. Le modèle de la machine synchrone à aimants permanents dans le repère (d-q), en vue de sa commande, en tenant compte des hypothèses simplificatrices. Le modèle de l'interface d'électronique de puissance et la commande vectorielle sont présentés. Le principe de la commande vectorielle est aussi présenté et cela à la conduite de mieux maîtriser le contrôle du système de stockage.

Introduction

Ce chapitre sera consacré à la simulation et à la présentation de la théorie de la commande en mode glissant, son application à un système de stockage inertiel à base de la machine à aimant permanent. La simulation et l'interprétation des résultats seront présentés à la fin du chapitre et ce pour un système de stockage de un kilowatt.

III-1 Théorie de la commande par mode de glissement

Le principe de la commande par modes glissant consiste à amener la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement. Et en utilisant une loi de commutation, elle est obligée d'y rester au voisinage de cette surface. D'où le phénomène de glissement [13]. La commande par modes glissants (CMG) a été largement utilisée dans la littérature. Et ce suite à sa simplicité de mise en œuvre et à sa robustesse aux variations paramétriques du système et aux perturbations externes.

La conception de la commande par mode de glissement peut être divisée en trois étapes principales dépendantes.

- Choix des surfaces ;
- Etablissement des conditions d'existence et de convergence ;
- Détermination de la loi de commande.

III.1.1 Choix de la surface de glissement

Le choix de la surface de glissement concerne le nombre et la forme des fonctions nécessaires. Pour un système défini par Eq(III.1), le vecteur de surface à la même dimension que le vecteur de commande (U).

$$[\dot{X}] = [A][X] + [B][U] \quad \text{III.1}$$

La forme non linéaire est une fonction de l'erreur sur la variable à régler (x), elle est donnée par [13], [14]:

$$S(x) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \delta \right)^{r-1} e(x) \quad \text{III.2}$$

Chapitre III Commande en mode de glissement du système de stockage inertiel

Avec : δ : Gain positif ;

$e(x) = x_{\text{ref}} - x$: Ecart entre la variable à régler et sa référence ;

r : Degré relatif, il représente le nombre de fois qu'il faut dériver la surface pour faire apparaître la commande.

L'objectif de la commande est de maintenir la surface à zéro.

III.1.2 Conditions de convergence et d'existence

Les conditions de convergence permettent aux différentes dynamiques du système de converger vers la surface de glissement. Nous retenons deux considérations pour assurer le mode de convergence.

➤ Fonction discrète de commutation

Cette condition de convergence est proposée et étudiée par EMILYANOV et UTKIN, qui consiste à donner à la surface une dynamique convergente vers zéro.

$$S(x) \cdot \dot{S}(x) < 0 \quad \text{III.3}$$

➤ Fonction de LYAPUNOV

L'objectif de cette fonction est de garantir l'attraction de la variable à contrôler vers sa valeur de référence.

Fonction de LYAPUNOV est définie comme suit :

$$V(x) = \frac{1}{2} \cdot S^2(x) \quad \text{III.4}$$

La dérivée de cette fonction est exprimée par :

$$\dot{V}(x) = S(x) \cdot \dot{S}(x) \quad \text{III.5}$$

La décroissance de la fonction $V(x)$ est garantie, si sa dérivée est négative.

Ceci n'est vérifié que si la condition (III.3) est vérifiée. Par conséquent le carré de la distance de la fonction Eq III.4 entre un point donné du plan de phase et la surface de glissement décroît tout le temps, contraignant la trajectoire du système à se diriger vers la surface de glissement. Cette condition suppose un régime glissant idéal [15].

III.1.3 Détermination de la loi de commande

Dans la littérature, on trouve trois types de commande, la commande par contre-réaction, la commande par relais, et la commande équivalente. Les deux dernières approches, sont les plus utilisées dans la commande des machines électriques.

Dans notre cas, la méthode choisie est celle de la commande équivalente. Dans ce cas, la structure d'un contrôleur par mode de glissement est constituée de deux parties, une concernant la linéarisation exacte U_{eq} et l'autre stabilisante U_n .

$$U = U_{eq} + U_n \tag{III.6}$$

U_{eq} sert à maintenir la variable à contrôler sur la surface de glissement $S(x) = 0$. La commande est déduite, en considérant que la dérivée de la surface est nulle $\dot{S}(x) = 0$.

La dérivée de la surface $S(x)$ est exprimée par :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x} A(x) + \frac{\partial S}{\partial x} B(x)U_{eq} + \frac{\partial S}{\partial x} B(x)U_n \tag{III.7}$$

Durant la phase de glissement et la phase du régime permanent $U_n = 0$. De ces conditions, on déduit U_{eq} de (Eq III.7).

$$U_{eq} = - \left(\frac{\partial S}{\partial x} B(x) \right)^{-1} \frac{\partial S}{\partial x} A(x) \tag{III.8}$$

Avec $\frac{\partial S}{\partial x} B(x) \neq 0$

En substituant EqIII.8 dans Eq III.7 La dérivée de la surface $S(x)$ devient.

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x} B(x) \cdot U_n \tag{III.9}$$

Chapitre III Commande en mode de glissement du système de stockage inertiel

La commande discrète U_n est déterminée pour vérifier la condition de convergence (III.3) en dépit de l'imprécision sur les paramètres du modèle du système. La condition de convergence exprimée par (III.3) devient :

$$S(x) \frac{\partial s}{\partial x} B(x) \cdot U_n < 0 \quad \text{III.10}$$

Afin de satisfaire la condition III.10, le signe de U_n doit être opposé à celui de l'expression $S(x) \frac{\partial s}{\partial x} B(x)$.

La forme la plus simple que peut prendre la commande discrète est celle d'un relais, représentée sur figure III.1.

$$U_n = k \cdot \text{sign}(S(x, t)) \quad \text{III.11}$$

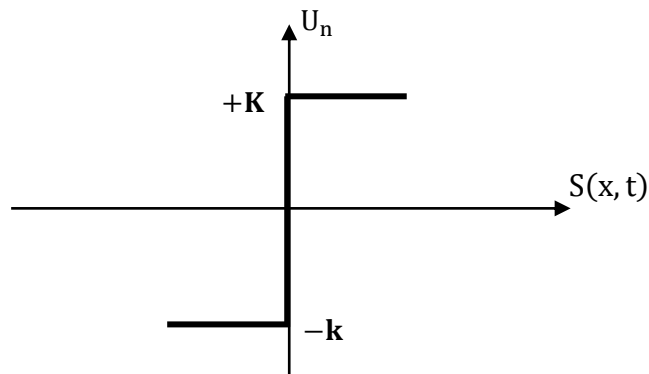


Fig.III.1 Fonction du signe

Toutefois l'utilisation de la commande de type relais peut provoquer des dynamiques indésirables caractérisées par le phénomène de broutement.

Afin de limiter le phénomène de broutement, une commande en mode de glissement dite commande douce à un seul seuil est utilisée voir figure III.2.

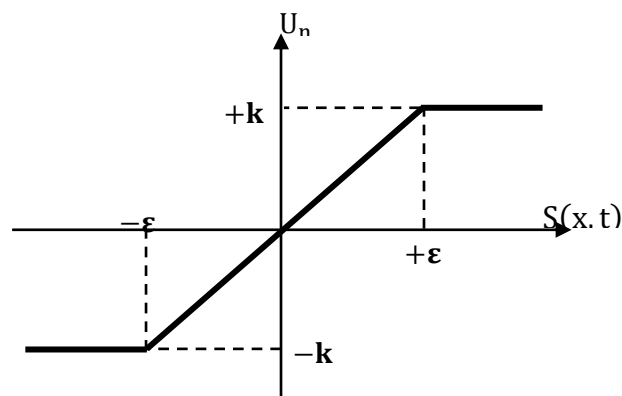


Fig.III.2 Commande adoucie (sat)

$$U_n = \begin{cases} \frac{1}{\varepsilon} K \cdot S(x) & |S(x)| < \varepsilon \\ K \cdot \text{sign}(S(x)) & |S(x)| > \varepsilon \end{cases} \quad \text{III.12}$$

III.2 Application de la commande par mode de glissement d'ordre 1 à la machine à aimant permanents

Nous rappelons les modèles électriques et mécaniques représentant la dynamique de la machine à aimants permanents.

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_d} i_d + P\Omega \frac{L_q}{L_d} i_q + \frac{V_d}{L_d} \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_q} i_q - P\Omega \frac{L_d}{L_q} i_d - P\Omega \frac{\psi_r}{L_q} + \frac{V_q}{L_q} \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{3P(L_d - L_q)i_d + P\psi_r}{2J} i_q - \frac{T_r}{J} - \frac{f}{J} \Omega \end{cases} \quad \text{(III.13)}$$

III.2.1 Synthèse du régulateur par mode glissant de la vitesse

Le degré relatif étant $r=1$, la surface est donc :

$$S(\Omega) = \Omega^* - \Omega \quad \text{(III.14)}$$

La dérivée de la surface $S(\Omega)$ est donnée par l'expression (III.15)

$$\dot{S}(\Omega) = \dot{\Omega}^* - \dot{\Omega} \quad \text{(III.15)}$$

En remplaçant la dérivée de la vitesse par sa valeur, on obtient:

$$\begin{cases} \dot{S}(\Omega) = \dot{\Omega}^* - \frac{3P(L_d - L_q)i_d + P\psi_r}{2J} i_q + \frac{T_r}{J} + \frac{f}{J} \Omega \\ i_q = i_{qeq} + i_{qn} \end{cases} \quad \text{(III.16)}$$

Durant le mode de glissement et on régime permanent, on a $S(\Omega) = 0$, $\dot{S}(\Omega) = 0$ et $i_{qn} = 0$

D'où on tire l'expression de la composante équivalente i_{qeq}

$$i_{qeq} = \frac{2J\dot{\Omega}^* + 2(T_r + f\Omega)}{3P(L_d - L_q)i_d + P\psi_r} \quad \text{(III.17)}$$

Durant le mode de convergence, la dérivée de l'équation de Lyapunov doit être négative.

$$S(\Omega) \cdot \dot{S}(\Omega) < 0 \quad \text{(III.18)}$$

En substituant l'équation (III.17) dans l'équation (III.16) on obtient l'équation (III.19).

$$\dot{S}(\Omega) = -\frac{3}{2} \left[\frac{P(L_d - L_q)i_d}{J} + \frac{P\Psi_r}{J} \right] i_{qn} \quad (\text{III.19})$$

La commande non linéaire est :

$$i_{qn} = K_\Omega \text{sign}(S(\Omega)) \quad (\text{III.20})$$

K_Ω : Gain positif.

III.2.2 Synthèse du régulateur par mode glissant du courant en quadrature

La surface choisie pour le courant est

$$S(i_q) = i_q^* - i_q \quad (\text{III.21})$$

La dérivée de la surface $S(i_q)$ est :

$$\dot{S}(i_q) = \dot{i}_q^* - \dot{i}_q \quad (\text{III.22})$$

$$\begin{cases} \dot{S}(i_q) = \dot{i}_q^* + \frac{R_s}{L_q} i_q + P\Omega \frac{L_d}{L_q} i_d + P\Omega \frac{\Psi_r}{L_q} - \frac{V_q}{L_q} \\ V_q = V_{qeq} + V_{qn} \end{cases} \quad (\text{III.23})$$

Durant le mode de glissement et en régime permanent, on a $S(i_q) = 0$, $\dot{S}(i_q) = 0$ et $V_{qn} = 0$

D'où on tire l'expression de la composante équivalente V_{qeq}

$$V_{qeq} = \left(i_q^* + \frac{R_s}{L_q} i_q + \frac{L_d}{L_q} P\Omega i_d + P\Omega \frac{\Psi_r}{L_q} \right) L_q \quad (\text{III.24})$$

En substituant l'équation III.24 dans l'équation III.23 on obtient on obtient

$$\dot{S}(i_q) = \frac{-1}{L_q} V_{qn} \quad (\text{III.25})$$

Et

$$V_{qn} = K_q \text{sign}(S(i_q)) \quad (\text{III.26})$$

Avec

K_q : Gain positif

III.2.3 Synthèses du régulateur par mode glissant du courant direct

La surface est celle du contrôle du courant i_d . Elle est décrite par :

$$S(i_d) = i_d^* - i_d \tag{III.27}$$

La dérivée de la surface $S(i_d)$ est :

$$\dot{S}(i_d) = \dot{i}_d^* - \dot{i}_d \tag{III.28}$$

$$\begin{cases} \dot{S}(i_d) = \dot{i}_d^* + \frac{R_s}{L_d} i_d - P\Omega \frac{L_q}{L_d} i_q - \frac{V_d}{L_d} \\ V_d = V_{deq} + V_{dn} \end{cases} \tag{III.29}$$

Durant le mode de glissement et on régime permanent, on a $S(i_d) = 0$, $\dot{S}(i_d) = 0$ et $V_{dn} = 0$

D'où on tire l'expression de la composante équivalente V_{deq}

$$V_{deq} = \left(i_d^* + \frac{R_s}{L_d} i_d - \frac{L_q}{L_d} P\Omega i_q \right) L_d \tag{III.30}$$

En substituant l'équation III.30 dans l'équation III.29 on obtient l'expression (III.31)

$$\dot{S}(i_d) = \frac{-1}{L_d} V_{dn} \tag{III.32}$$

$$V_{dn} = K_d \text{sign}(S(i_d)) \tag{III.33}$$

Avec

K_d : Gain positif

III.3 Calcul des paramètres K_Ω , K_q et K_d

Ces paramètres sont calculés pour

- _ Limiter les courants à des valeurs admissibles pour le couple maximal ;
- _ Assurer la rapidité de la convergence ;
- _ Imposer la dynamique en mode de convergence et de glissement.

III.3.1 Calcul de K_Ω

La condition de convergence $S(\Omega). \dot{S}(\Omega) < 0$ est assurée si

- a- Si $S(\Omega) > 0$ et $\dot{S}(\Omega) < 0$

$$\dot{\Omega}^* - \frac{3P(L_d - L_q)i_d + P\Psi_r}{2J} K_\Omega + \frac{T_r}{J} + \frac{f}{j} \Omega < 0 \quad (\text{III.34})$$

$$K_\Omega > \frac{2J\dot{\Omega}^* + 2T_r + 2f\Omega}{3P(L_d - L_q) + P\Psi_r} \quad (\text{III.35})$$

b- Si $S(\Omega) < 0$ et $\dot{S}(\Omega) > 0$

$$K_\Omega > -\frac{2J\dot{\Omega}^* + 2T_r + 2f\Omega}{3P(L_d - L_q) + P\Psi_r} \quad (\text{III.36})$$

De l'expression (III.35) et (III.36) on tire l'expression localisant le paramètre K_Ω

$$K_\Omega > \left| -\frac{2J\dot{\Omega}^* + 2T_r + 2f\Omega}{3P(L_d - L_q) + P\Psi_r} \right| \quad (\text{III.37})$$

III.3.2 Calcul de K_q

La condition de convergence $S(l_q) \cdot \dot{S}(l_q) < 0$ est assurée si

a- Si $S(l_q) > 0$ et $\dot{S}(l_q) < 0$

$$i_q^* + \frac{R_s}{L_q} l_q + P\Omega \frac{L_d}{L_q} l_d + P\Omega \frac{\Psi_r}{L_q} - \frac{K_q}{L_q} < 0 \quad (\text{III.38})$$

$$K_q > L_q \left(i_q^* + \frac{R_s}{L_q} l_q + P\Omega \frac{L_d}{L_q} l_d + P\Omega \frac{\Psi_r}{L_q} \right) \quad (\text{III.39})$$

b- Si $S(l_q) < 0$ et $\dot{S}(l_q) > 0$

$$i_q^* + \frac{R_s}{L_q} l_q + P\Omega \frac{L_d}{L_q} l_d + P\Omega \frac{\Psi_r}{L_q} + \frac{K_q}{L_q} > 0 \quad (\text{III.40})$$

$$K_q > -L_q \left(i_q^* + \frac{R_s}{L_q} l_q + P\Omega \frac{L_d}{L_q} l_d + P\Omega \frac{\Psi_r}{L_q} \right) \quad (\text{III.41})$$

De l'expression (III.39) et (III.41) nous déduisons l'expression localisant le paramètre K_q

$$K_q > \left| -L_q \left(i_q^* + \frac{R_s}{L_q} l_q + P\Omega \frac{L_d}{L_q} l_d + P\Omega \frac{\Psi_r}{L_q} \right) \right| \quad (\text{III.42})$$

III.3.3 Calcul de K_d

La condition de convergence $S(l_d) \cdot \dot{S}(l_d) < 0$ est assurée si

a- Si $S(l_d) > 0$ et $\dot{S}(l_d) < 0$

$$\dot{i}_d^* + \frac{R_s}{L_d} i_d - P\Omega \frac{L_q}{L_d} i_q - \frac{K_d}{L_d} < 0 \tag{III.43}$$

$$K_d > L_d \left(\dot{i}_d^* + \frac{R_s}{L_d} i_d - P\Omega \frac{L_q}{L_d} i_q \right) \tag{III.44}$$

b- Si $S(i_d) < 0$ et $\dot{S}(i_d) > 0$

$$\dot{i}_d^* + \frac{R_s}{L_d} i_d - P\Omega \frac{L_q}{L_d} i_q + \frac{K_d}{L_d} > 0 \tag{III.45}$$

$$K_d > -L_d \left(\dot{i}_d^* + \frac{R_s}{L_d} i_d - P\Omega \frac{L_q}{L_d} i_q \right) \tag{III.46}$$

Le paramètre K_d est localisé à partir des expressions (III.44) et (III.46) dans l'expression (III.47).

$$K_d > \left| -L_d \left(\dot{i}_d^* + \frac{R_s}{L_d} i_d - P\Omega \frac{L_q}{L_d} i_q \right) \right| \tag{III.47}$$

Le schéma bloc de la commande vectorielle par mode de glissement est illustré sur la figure III.3

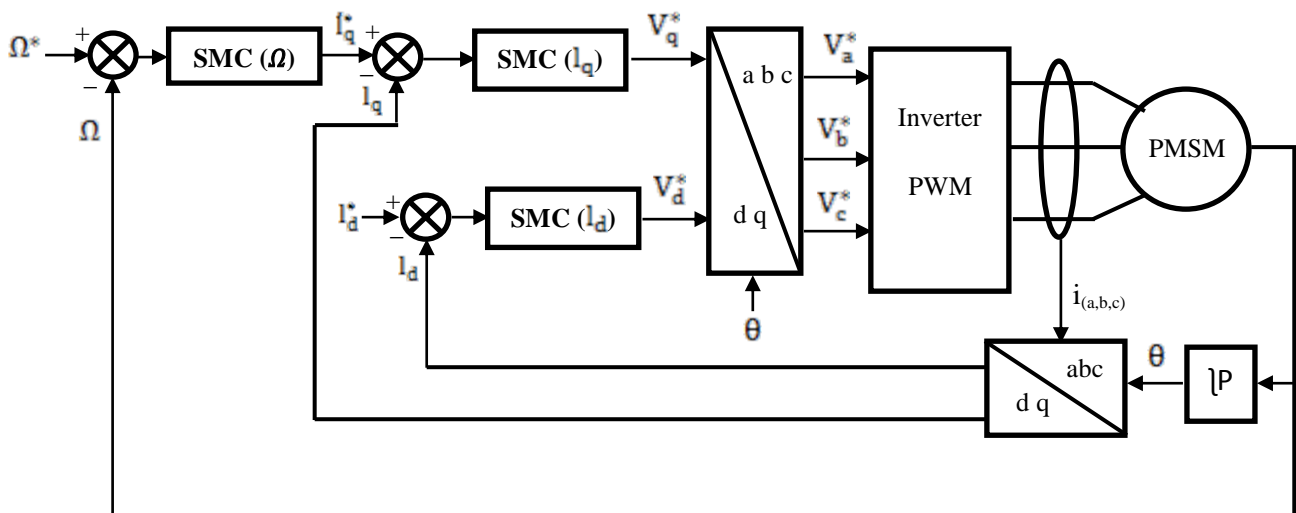


Fig.III.3 Schéma bloc de commande vectorielle par mode de glissement

III.4 Simulation et interprétation des résultats

Nous présentons les résultats de simulation du comportement dynamiques du système de stockage d'énergie inertiel, à base d'une machine à aimant permanent, de puissance de un (01) kW, avec une puissance et une vitesse références

$P_{st_ref} = P_{inj} - P_{int}$, $\Omega_{vol_ref} = \sqrt{\frac{2E_{c.ref}}{J}}$ respectivement. Paramètres de simulation voir annexe 01.

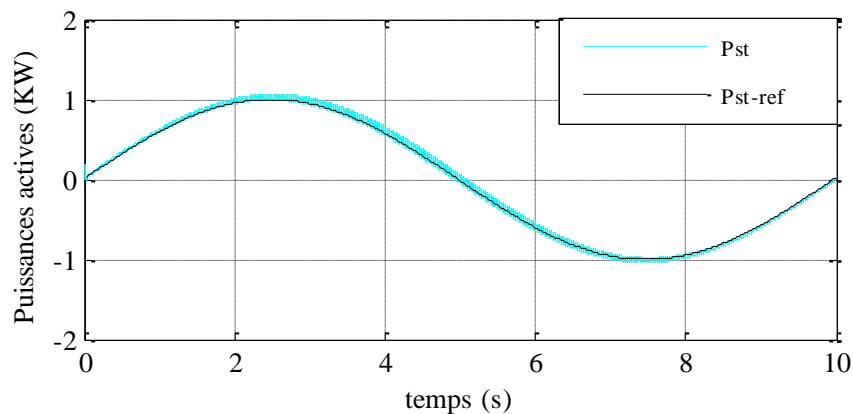


Fig.III.4 Puissance active de stockage et sa référence

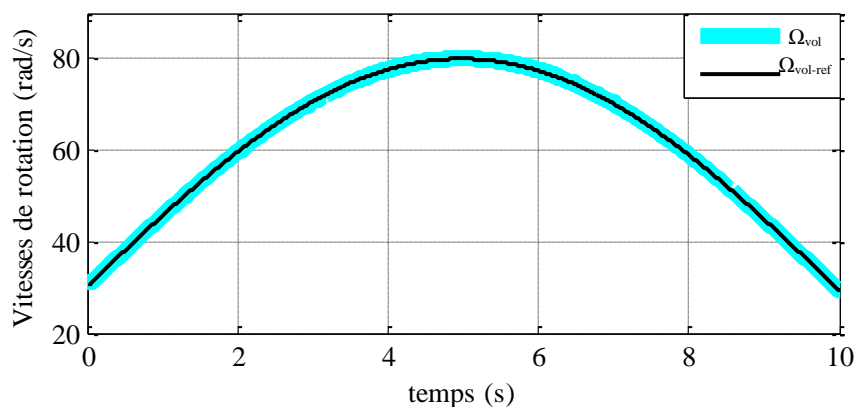


Fig.III.5 Vitesse de rotation du volant et sa référence

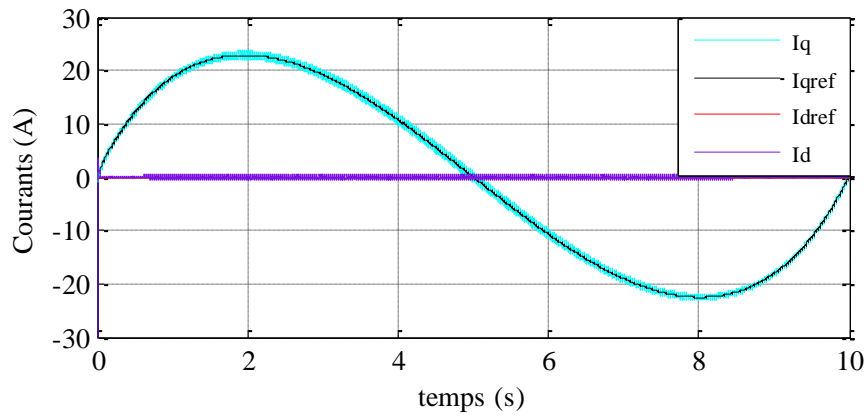


Fig.III.6 Courants direct I_d et en quadrature I_q et leur références

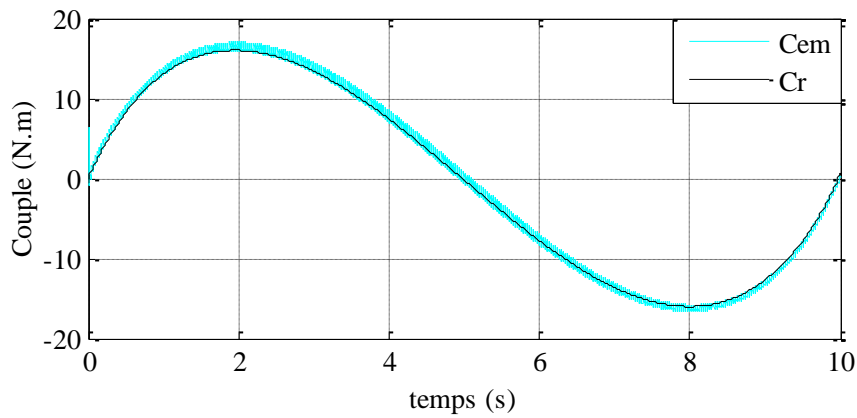


Fig.III.7 Couple électromagnétique et couple résistant

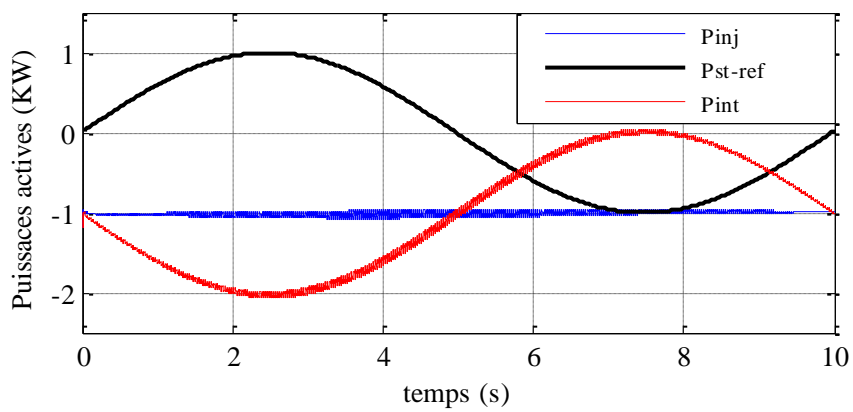


Fig.III.8 Puissances actives, produite par ressource renouvelable, puissance injectée à la charge.

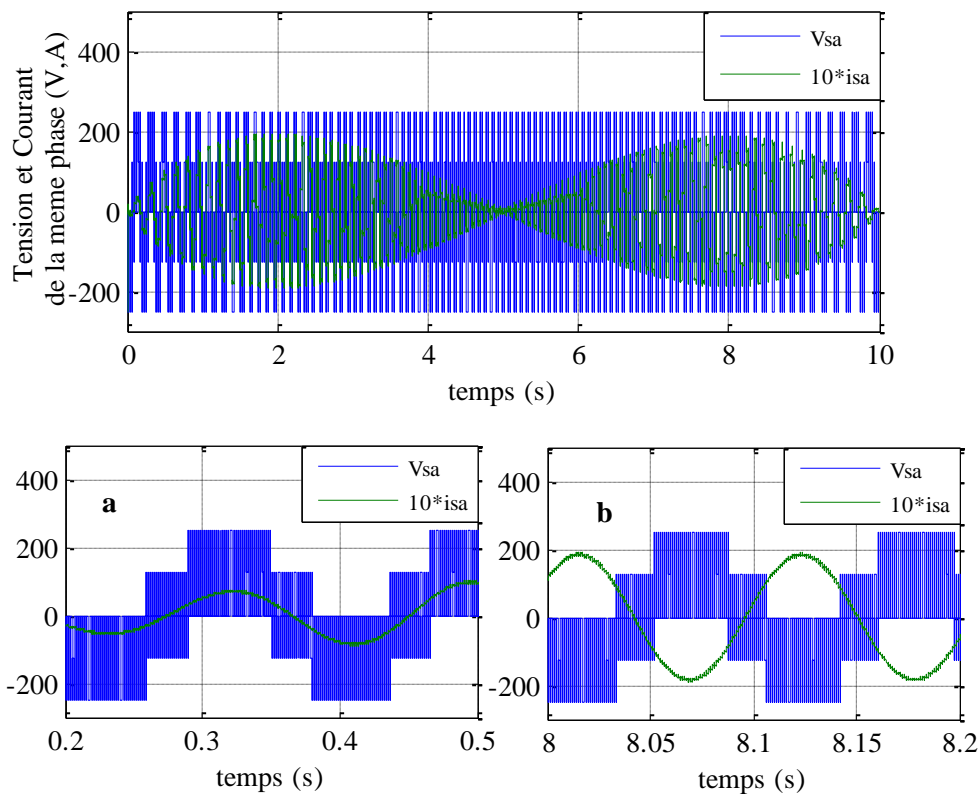


Fig.III.9 Allures tension courant d'une phase, **a-** Zoom sur une période de stockage, **b-** Zoom sur une période de

Sur la figure III.4 est montrée l'évolution de la puissance mise en jeu dans le volant d'inertie, et suit fidèlement sa référence. Elle est de signe positif et négatif, durant les périodes de fonctionnement moteur et générateur respectivement.

L'évolution de la vitesse de rotation du volant est croissante puis décroissante durant les périodes de stockage et déstockage respectivement, et suit conjointement sa référence voir figure III.5.

Sur la figure III.6 sont montrés, d'une part le courant en quadrature qui suit sa référence, d'autre part le courant direct est forcé à zéro par la commande.

De même sur la figure III.7 sont illustrés l'évolution et les signes du couple électromagnétique et du couple résistant qui positif et négatif, en fonctionnement moteur et générateur respectivement.

Chapitre III Commande en mode de glissement du système de stockage inertiel

La puissance injectée à la charge est quasiment constante, ce fait est réalisé par l'intégration d'un système de lissage de puissance, qui absorbe et stock le surplus de production d'énergie provenant de la ressource stochastique, et la restitue durant la phase de déficit de puissance, voir figure III.8.

Sur la figure III.9 sont montrés le courant et la tension de la même phase. Il a été illustré clairement par des zooms a et b les modes fonctionnement moteur et générateur, respectivement. Dans le zoom (a) le courant est déphasé de la tension d'un angle inférieur à 90° et dans (b) supérieur 90° et inférieur à 180° .

Conclusion

Le modèle qui régit le fonctionnement du système en question a été implémenté sous l'environnement MATLAB/Simulink et un code de calcul est obtenu. Il a été montré à travers les résultats de simulation que le comportement dynamique du système étudié est maîtrisé, par l'application de la commande utilisée. En effet on est arrivé à stocker et à restituer de la puissance. D'où la fiabilité de cette commande.

Conclusion générale

Le principal objectif de notre travail est l'application d'une commande non linéaire dans système de stockage inertielle, et ce à la conduite d'améliorer le comportement dynamique du système en question. En effet le système étudié est à structure variable, la maîtrise du comportement dynamique de cette dernière est liée à une commande fiable. Effectivement la commande non linéaire dit mode glissant appliquée dans le système de stockage électromécanique, a montrée à travers les résultats de simulation son efficacité. Le système inertielle de stockage joue un rôle prépondérant qui réside dans le stockage de surplus de puissance et la restituée à la demande. De ces considérations, il en ressort que le système de stockage électromécanique à l'avantage de fonctionner en mode moteur-générateur. Il en résulte que l'application privilégiée du système inertielle de stockage d'énergie est évidemment celui du lissage de la puissance injectée à la charge.

En perspectives nous envisageons:

- De valider par voie expérimentale le modèle régissant le système étudié ;
- De faire la conception du système inertielle de stockage d'énergie basé sur la machine à rotor extérieur ;
- De faire une étude comparative avec d'autre commande non linéaire.

Références bibliographiques

- [1] O.Bouhali, "Contribution des convertisseurs multiniveaux au raccordement de la production d'origine éolienne sur un réseau électrique" ; Thèse de doctorat de l'école nationale polytechnique, école centrale de Lille, France, Avril 2007.
- [2] F.Benchabane "Commande en position et en vitesse par mode de glissement d'un moteursynchrone triphasé à aimants permanents avec minimisation du chattering", Mémoire demagister, Université Mohammed khider de Biskra, 2005.
- [3] J.Chiasson "Modeling and High-Performance Control of Electrical Machines", Wiley-Interscience a John Wiley and Sons, INC Publication, 2005.
- [4] G.O.Cimuca "Système inertiel des stockages d'énergie associé à des générateurs éoliens", Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure D'arts et Métiers Centre de Lille, France, 2005.
- [5] S.Rezgui "Commande de machine électrique en environnement, Matlab/Simulink et Temps Réel", Mémoire de magister, Université Mentouri de Constantine, Algérie, 2009.
- [6] HadeF. M. " Contrôle Direct Du Couple Des Machines synchrones Avec Et SansCapteur Mécanique ". Mémoire de Magister de l'université de Bejaia ,2002.
- [7] Khelfa.S. Commande Vectorielle D'une Machine à Induction ; Mémoire de Magister, Université De Batna, 2001.
- [8] Rogez V. "Modélisation simplifiée de sources de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Application à l'intégration d'une production éolienne dans un réseau de distribution insulaire". Thèse de doctorat, Université d'Artois, 2004.
- [9] J.J.SLOTINE "Sliding controller design for non linéaire system", I.J.C, Vol 4, N°2, pp, 421- 434, 1984.

- [10] Mehari F. "Contribution à la supervision des fermes éoliennes". Thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique El Harrach. 2014.
- [11] Kairous D. "Modélisation, Simulation et Commande d'un Système Éolien a Machine Asynchrone à Double Alimentation". Thèse de doctorat, Université des Sciences et de La Technologie d'Oran- Mohamed Boudiaf.2013.
- [12] Abdelli A. "Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive". Thèse de doctorat, de 'institut National Polytechnique De Toulouse. 2007.
- [13] Slotine J, Li W. "Applied non-linear control". Prentice-Hall Edition.1991.
- [14] Abid M, Mansouri A, Aissaoui A, Belabbes B. "Sliding mode application in position control of an induction machine". J. Eectr.Engin. vol. 59, N° 06 p. 322-327 , 2008.
- [15] Khaldi A. "Diagnostic et commande d'une machine synchrone a aimants permanents" mémoire de magister, ENP Alger, 2006.

Paramètres de volant :

$$\text{Inertie du volant } J_v = 1.66 \text{ Kg}\cdot\text{m}^2$$

$$\text{Inertie totale } J_t = 1.76 \text{ Kg}\cdot\text{m}^2$$

Paramètre de la MSAP :

$$R_s = 0.1738 \text{ } [\Omega] ;$$

$$L_d = 9.515 \cdot 10^{-4} \text{ [H]} ;$$

$$L_q = 9.515 \cdot 10^{-4} \text{ [H]} ;$$

$$\varphi_{sf} = 0.12 \text{ [wb]} ;$$

$$P = 4 ;$$

$$J = 0.1 \text{ [Kg/m}^2\text{]} ;$$

$$f = 0.008 \text{ [N.m/rad]} ;$$

Paramètres des régulateurs des trois surfaces de la commande mode glissant :

$$K_\Omega = 70 ;$$

$$K_d = 50 ;$$

$$K_q = 300 ;$$

DOCUMENT
CREATED
WITH



PDF
COMBINER

PDF Combiner is a free application that you can use to combine multiple PDF documents into one.

Three simple steps are needed to merge several PDF documents. First, we must add files to the program. This can be done using the Add files button or by dragging files to the list via the Drag and Drop mechanism. Then you need to adjust the order of files if list order is not suitable. The last step is joining files. To do this, click button Combine PDFs.

Main features:

secure PDF merging - everything is done on your computer and documents are not sent anywhere

simplicity - you need to follow three steps to merge documents

possibility to rearrange document - change the order of merged documents and page selection

reliability - application is not modifying a content of merged documents.

Visit the homepage to download the application:

www.jankowskimichal.pl/pdf-combiner

To remove this page from your document, please donate a project.