

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Abderrahmane Mira - Bejaia
Faculté de Technologie
Département Génie Electrique
Spécialité : Electrotechnique
Option : Electromécanique

PROJET DE FIN D'ETUDE

Pour l'obtention du diplôme de Master en électrotechnique

Thème

*Etude d'un système inertiel de stockage d'énergie
électrique utilisé a l'unité de production THCN-
LAIT « CANDIA »*

Réalisé par :

Mr. BOUDJEDIA Djamal
Mr. CHAIBI Mohand Arezki

Encadreurs:

Mr. H. Bekka
Mr. S. Taraft

A l'usine Mr. M. Lamriben

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Abderrahmane Mira - Bejaia
Faculté de Technologie
Département Génie Electrique
Spécialité : Electrotechnique
Option : Electromécanique

PROJET DE FIN D'ETUDE

Pour l'obtention du diplôme de Master en électrotechnique

Thème

*Etude d'un système inertiel de stockage d'énergie
électrique utilisé a l'unité de production THCN-
LAIT « CANDIA »*

Réalisé par :

Mr. BOUDJEDIA Djamal
Mr. CHAIBI Mohand Arezki

Encadreurs:

Mr. H. Bekka
Mr. S. Taraft

A l'usine Mr. M. Lamriben

Remerciements

REMERCIEMENTS

Nous remercions Dieu, le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'études.

Nous tenons à remercier les membres du jury d'avoir bien voulu accepter d'examiner et d'évaluer notre travail.

Nos vifs remerciements s'adressent à nos promoteurs Mr H.BEKKA, et Mr S.TARAFI pour nous avoir orientées, conseillées et dirigées durant toute la durée de notre travail.

Des remerciements vont également à tous nos enseignants et tous ceux à qui nous devons notre formation.

Nous tenons à remercier tous les membres de nos familles pour leurs soutiens et leurs encouragements.

Nous remercions nos proches et nos amis et tous ceux qui, d'une quelconque façon, ont contribué à l'élaboration de ce modeste travail.

Sans oublier Mr M.BEKHOUCHE de nous avoir apporté une grande aide, et pour sa disponibilité.

Dédicaces

Sommaire

Introduction générale..... 1

Chapitre I : Généralités sur le stockage d'énergie électrique

Introduction..... 3

I Caractéristiques générales 3

II Différents types de stockages d'énergies 5

 II.1 Stockages à grande échelle 5

 II.1.1 Stockage par systèmes hydrauliques 5

 II.1.2 Stockage sous forme d'aire comprimé (CAES, Compressed Air Energy Storage) 6

 II.1.3 Stockage sous forme d'énergie chimique 6

 II.2 Stockage a faible échelle..... 8

 II.2.1 Stockage magnétique dans des bobinages supraconducteurs(SMES)..... 8

 II.2.2 Stockage électrique dans des super-condensateurs 8

 II.2.3 Stockage cinétique dans une masse tournante appelée le volant d'inertie 8

III Différentes machines électriques utilisées dans les SISEs..... 9

 III.1 Machine synchrone à réductance variable..... 10

 III.2 Machine synchrone a induction homopolaire..... 10

 III.3 Machine synchrone à aimants permanents 10

 III.4 Machine asynchrone 11

IV Avantages et inconvénients de la machine asynchrone 11

 IV.1 Avantages 11

 IV.2 Inconvénients..... 11

V Volant d'inertie..... 11

 V.1 Palier magnétique 12

VI Convertisseur statique 12

 VI.1 Définition..... 12

 VI.2 Constitution du convertisseur 12

 VI.2.1 Redresseur 13

 VI.2.2 Filtre passif 13

 VI.2.3 Onduleur 14

 VI.3 La commande de convertisseur statique..... 14

VI.3.1 La commande MLI	14
VI.3.1.1 MLI à Bande d’hystérésis	14
VI.3.1.2 MLI à échantillonnage périodique	15
VI.3.1.3 MLI à porteuse triangulaire	15
VI.3.1.4 MLI vectorielle	15
Conclusion	16

Chapitre II : Etude et modélisation du système inertiel de stockage d’énergie SISE

Introduction	17
I Description du fonctionnement des SISEs	17
II Avantages et inconvénients des SISEs	18
II.1 Avantages des SISEs	18
II.2 Inconvénients du SISE	18
III Différents types de SISEs	18
VI Calcul sur le volant d’inertie	19
VI.1 Considérations générales	19
VI.1.1 Energie cinématique	19
VI.1.2 Influence des différents facteurs sur la capacité de stockages	19
VI.1.3 Moment d’inertie	20
VI.2 Eléments de calcul de résistance	21
VI.2.1 La force centrifuge	21
VI.2.2 Contraintes et vitesse admissible	24
VI.3 Dimensionnement et modélisation des volants d’inertie pour les SISEs	25
VI.3.1 Dimensionnement du volant	25
VI.3.2 Modélisation du volant	26
VI.4 Les matériaux utilisés et caractéristiques	27
V Machine électrique	28
V.1 Considérations générales	28
V.2 Modélisation de la machine asynchrone	30
V.2.1 Hypothèses simplificatrices	30

Sommaire

V.2.2 Equations dans le repère abc	30
V 2.2.1 Equations électriques	31
V 2.2.2 Équations magnétiques	31
V.2.3 Transformations de Park	32
V.2.3.1 Equations de tensions.....	34
V.2.3.2 Equations de flux	35
VI Modélisation de convertisseurs statique.....	36
VI.1 Modélisation de redresseur.....	36
VI.2 Modélisation d'un filtre.....	37
VI.3 Modélisation de l'onduleur	38
Conclusion.....	39

Chapitre III : Commande du système de stockage

Introduction.....	40
I La commande vectorielle	40
I.1 Choix du référentiel.....	41
I.1.1 Référentiel lié au rotor	41
I.1.2 Référentiel lié au stator.....	41
I.1.3 Référentiels lié au champ tournant	41
I.2 Orientation du flux	42
I.2.1 Orientations du flux statoriques.....	42
I.2.2 Orientation du flux magnétisant	42
I.2.3 Orientations du flux rotoriques.....	42
I.3 Orientations du flux rotoriques	42
I.4 Estimation de Φ_r	43
I.5 Estimation de θ_s et θ_{sr}	44
I.6 Le découplage	45
II Calcul de régulateur PI.....	48
II.1 Calcul de régulateur de flux	48
II.2 Calcul de régulateur de courant	50
III Contrôle du SISE associe au générateur éolien	51
III.1 Introduction sur le contrôle du SISE associe au générateur éolien	51

Sommaire

III.2 Calcul de la vitesse de référence.....	52
III.3 Calcul de flux de référence.....	52
III.4 Calcul de régulateur de vitesse.....	52
Conclusion.....	54

Chapitre IV : Simulation et interprétation des résultats

Introduction.....	55
I Résultats expérimentaux obtenu à l'unité de production TCHIN-LAIT	55
II Simulation du système de stockage.....	56
II.1 Schéma de simulation	56
II.2 Discussions des résultats de simulation	57
Conclusion.....	61
Conclusion générale	62

Annexes

Bibliographie

Nomenclature

- Ω_{vol} : Vitesse mécanique du volant (rad /s)
- J : Moment d'inertie du volant ($kg.m^2$)
- E_c : Energie cinétique (joules)
- m_v : Est la masse du volant (kg)
- R : Est le rayon maximal du volant(m)
- m_1 : Est la masse du cylindre extérieur (kg)
- m_2 : Est la masse du disque faisant la liaison entre le cylindre extérieur et le moyeu du volant (kg)
- m_3 : Est la masse du moyeu du volant et de la partie de l'arabe qui se trouve dans (kg)
- ρ_1, ρ_2, ρ_3 : Les masse volumiques dont les différents partie du volant sont fabriquées (kg /m^3)
- r_i : Est le rayon intérieur du cylindre extérieur (m)
- r_0 : Est le rayon extérieur du cylindre extérieur (m)
- r_b : Est le rayon du moyeu(m)
- h : Est l'épaisseur du volant(m)
- h_2 : est l'épaisseur de la masse du disque faisant la liaison entre le cylindre extérieur et le moyeu du volant (m)
- σ_r : Est la contrainte normale a la distance r de centre du volant (N /m^2)
- σ_t : Est la contrainte tangentielle a la agissant sur l'élément de volant (N /m^2)
- μ : Est le coefficient de poisson pour le matériau dont le volant est fabrique
- σ_{adm} : Représente la contrainte maximal admissible pour le matériau dont le volant est fabrique (N /m^2)
- F_c : Est la force centrifuge(N)
- N : Est la force normale (N)
- σ_v : Contrainte dans le volant (N /m^2)
- v_{adm} : La vitesse périphérique admissible (m/s)
- Ω_{adm} : La vitesse angulaire admissible (rad/s)
- C_s : Couple de frottement sec (N.m)
- B : Est le coefficient de viscosité
- f : Fréquence des courants alternatif (Hz)
- p : Nombre de paire de pôles
- Ω_b : Est la vitesse de base (rad/s)
- Ω : Vitesse mécanique du rotor (rad/s)
- Ω_s : Vitesse mécanique du champ tournant
- ω_r : Pulsation rotorique (rad/s)
- ω_s : Pulsation statorique (rad/s)
- R_s : Resistance d'un enroulement statorique (Ω)
- R_r : Resistance d'un enroulement rotorique (Ω)

- C_{em} : Couple électromagnétique (N.m)
 g : Le glissement
 v_{sa}, v_{sb}, v_{sc} : Les tensions d'entrées dans le repère (a, b, c) de la machine (v)
 i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} : Les courants d'entrées dans le repère (a, b, c) de la machine (A)
 $\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}$: Les flux statorique dans le repère (a, b, c) de la machine (Wb)
 i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} : Les courants rotorique dans le repère (a, b, c) de la machine (A)
 $\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc}$: Les flux rotorique dans le repère (a, b, c) de la machine (Wb)
 M_s : Induction mutuelle stator -stator (H)
 l_s : Est le coefficient d'inductance propre d'un enroulement statorique (H)
 $[L_s]$: Est la matrice d'inductance du stator (H)
 $[M_{sr}]$: Est la matrice d'inductance entre stator-rotor (H)
 M_{sr} : Inductance mutuelle cyclique stator-rotor (H)
 m_{sr} : Est la valeur maximal de l'inductance mutuelle stator-rotor (H)
 L_r : Inductance cyclique rotorique (H)
 σ : Est le coefficient de dispersion de blondel
 τ_s : Est la constante de temps du stator (s)
 τ_r : Est la constante de temps du rotor (s)
 M_r : Inductance mutuelle rotor -rotor (H)
 l_r : Est le coefficient d'inductance propre d'un enroulement rotorique (H)
 $[L_r]$: Est la matrice d'inductance du rotor
 $[M_{rs}]$: Est la matrice d'inductance entre rotor -stator
 $[P]$: Est la matrice directe de Park
 $[P]^{-1}$: Est la matrice inverse de Park
 θ_s : Est l'angle entre l'axe d et l'axe de référence a_s
 θ_r : Est l'angle entre l'axe d et l'axe de référence a_r
 θ_{sr} : Est l'angle entre l'axe de référence a_s et l'axe de référence a_r
 v_{sd}, v_{sq}, v_{so} : Les tensions statorique dans le repère dq (V)
 i_{sd}, i_{sq}, i_{so} : Les courants statorique dans le repère dq (A)
 $\Phi_{sd}, \Phi_{sq}, \Phi_{so}$: Les flux statorique dans le repère dq (Wb)
 v_{rd}, v_{rq}, v_{ro} : Les tensions rotorique dans le repère dq (V)
 $\Phi_{rd}, \Phi_{rq}, \Phi_{ro}$: Les flux rotorique dans le repère dq (Wb)
 i_{rd}, i_{rq}, i_{ro} : Les courants rotorique dans le repère dq (A)
 Φ_{rest} : Le flux rotorique estime (Wb)
 θ_{rest} : Est l'angle estime entre l'axe d et l'axe a_r (degré)

- k_Φ : Est le gain du régulateur du flux
- τ_Φ : Est la constante du régulateur(s)
- α : Est le facteur d'amortissement
- k_{isq} : Est le gain du régulateur du courant
- τ : Est la constante du temps du régulateur(s)
- k, k' : Sont des gains
- τ_1 : Est la constante du temps dominante(s)
- τ_2 : Est la constante du temps non dominante(s)
- τ_q : Est la petite constante du temps du système (rad)
- V_a, V_b, V_c : Tensions a l'entrée du redresseur (V)
- V_s : La tension a la sortie du redresseur(V)
- I_s : Le courant a la sortie du redresseur (A)
- I_c : Le courant traversant le filtre (A)
- I_{s1} : Le courant a l'entrée de l'onduleur(A)
- V_{s1} : La tension a l'entrée de l'onduleur(V)
- $V_{ch1}, V_{ch2}, V_{ch3}$: Tension a la sortie de l'onduleur(V)
- $S_1 \rightarrow S_6$: Interrupteurs du redresseur et de l'onduleur

Liste des Figures

Chapitre I

Figure (I.1)	: Schéma d'un redresseur triphasé	13
Figure (I.2)	: Schéma d'un onduleur triphasé.....	14

Chapitre II

Figure (II.1)	: Principe de fonctionnement d'un SISE.....	17
Figure (II.2a)	: SISEs à basse vitesse, Matériau massif.....	18
Figure (II.2b)	: SISEs à haute vitesse, Matériau composite.....	18
Figure (II.3)	: Paramètres géothermiques du volant d'énergie	21
Figure (II.4)	: Force et contrainte dans un volant à épaisseur uniforme.....	22
Figure (II.5)	: Esquisse explicative au calcul simplifié de résistance.....	23
Figure (II.6)	: Enveloppes de couple et de puissance d'une machine électrique	29
Figure (II.7)	: Représentation spatiale des enroulements de la MAS.....	30
Figure (II.8)	: Axe de repère d et q de la MAS	33
Figure (II.9)	: Schéma de convertisseur statique	36
Figure (II.10)	: Représentation du filtre passe-bas	37

Chapitre III

Figure (III.1)	: Schémas de principe de stockage inertiel	40
Figure (III.2)	: Schéma de découplage.....	47
Figure III.3	: Schéma de régulation de la commande vectorielle.....	48
Figure (III.4)	: Le principe de contrôle d'un SISE associé au générateur éolien.....	51

Chapitre IV

Figure (IV.1)	: Allure de la tension et du courant	55
Figure (IV.1a)	: Zoom de l'allure de tension et du courant (stockage).....	55
Figure IV.1b)	: Zoom de l'allure de tension et du courant (déstockage)	56
Figure (IV.1c)	: Zoom de l'allure de tension et du courant	56
Figure (IV.2)	: Schéma du système contrôlé en puissance.....	57
Figure (IV.3)	: Allure de la puissance de référence et la puissance mesurée.....	57
Figure (IV.4)	: Allure de la vitesse de rotation du volant.....	58
Figure (IV.2)	: Allures de tension et du courant.....	58
Figure (IV.5a)	: Zoom Allures de tension et du courant	59

Figure (IV.5b) : Zoom Allures de tension et du courant	59
Figure (IV.5c) : Zoom Allures de tension et du courant	59
Figure (IV.6) : Allure des flux rotorique de la machine	60
Figure (IV.7) : Allure du couple Cem	60

Introduction générale

Dans le contexte actuel d'une augmentation de la production d'électricité à partir des énergies renouvelables accompagnée d'une décentralisation des moyens de production, les dispositifs de stockage d'énergie électrique trouvent un nouveau champ d'applications propice à leur développement le stockage de l'énergie électrique sous forme stationnaire ou intermittente est appelée à jouer un rôle essentiel dans la production d'énergie électrique [1, 3].

Différents types de stockage d'énergie électrique existes, certains sont déjà utilisés et d'autres sont en cours de développement. Plusieurs types de stockages de l'énergie électrique seront présentés au court de notre étude.

L'objectif de notre travail est consacré à étudier un de ces systèmes qui est le Système Inertiel de Stockage d'Energie Electrique SISE utilisant une machine asynchrone, connu aussi sous le nom de Batterie Electromécanique. En particularité, on abordera la conception et la modélisation du SISE, le volant d'inertie et la machine asynchrone et faire une étude théorique de sa commande.

Le rôle principal des SISEs est la continuité de la puissance active dans des systèmes qui ne tolèrent pas des coupures ou de chutes de tension, ou bien dans la production de l'énergie électrique à base des éoliennes [3]. Car les batteries électrochimiques ne peuvent pas soutenir un grand nombre de cycles ni stocker une grande énergie dans un volume restreint.

Le stockage électromécanique d'énergie, encore peu utilisé, pourrait répondre, grâce à ses caractéristiques, aux exigences des systèmes de production d'énergie électrique à base de générateurs éoliens, et dans l'industrie [3].

Dans le premier chapitre on procédera a donner une perspective générale sur le stockage d'énergie électrique ainsi on donnera ses caractéristiques et les différentes propriétés puis on entamera de donner les composantes constituantes du Le Système Inertiel de Stockage d'Energie Eclectique (SISE).

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de la machine Asynchrone à cage d'écureuil, le convertisseur statique et le volant d'inertie.

Introduction Générale

Dans le troisième chapitre nous allons modéliser la commande vectorielle de la machine asynchrone et le contrôle du SISE.

Le quatrième chapitre est réservé à la simulation sur MATLAB/SIMULINK de la MAS et du système toute en lui injectant une référence de puissance basé sur un modèle généré par une éolienne, puis on discutera les résultats de simulation.

Le travail finit par une conclusion générale réunissant les conclusions des tous les chapitres.

Chapitre I

*Généralités sur les systèmes de
stockage électriques*

Introduction

Ce chapitre présente plusieurs méthodes utilisées pour stocker l'énergie électrique et leurs caractéristiques générales. Le développement des sources de production décentralisée met en évidence des problèmes nouveaux concernant les besoins de systèmes de stockage d'énergie. On a besoin de systèmes de stockage à court terme pour pouvoir assurer la régulation du réseau électrique et on a besoin de systèmes de stockage à long terme pour une meilleure utilisation des centrales électriques, et l'autre objectif est de connaître les différents types de stockage d'énergie, différentes machines utilisées et l'avantage que présente le stockage cinétique (volant d'inertie).

I Caractéristiques générales

Avant de présenter les différents moyens de stockage, nous allons définir leurs caractéristiques fondamentales. Le dispositif de stockage étant destiné à fournir de l'énergie le moment venu [3.7].

- **Capacité énergétique W_{max}**

L'énergie maximale stockable (en J ou en W.h). Elle est supérieure à l'énergie réellement exploitable appelée énergie utile W_u [6]. La capacité énergétique est une grandeur dimensionnée par :

V : le volume.

P : le poids du réservoir.

Lorsque V et P augmente W_{max} augmente.

On définit alors :

- **L'énergie massique E_m**

Il est le rapport entre W_{max} et la masse du système de stockage (en W.h / kg).

$$E_m = \frac{W_{max}}{m} \quad (\text{en W.h / kg}). \quad (I.1)$$

- **L'énergie volumique E_v**

Il est le rapport entre W_{max} et le volume du réservoir (en W.h / m³).

$$E_v = \frac{W_{max}}{V} \quad (\text{en W.h / m}^3). \quad (I.2)$$

Ces deux grandeurs sont primordiales dans les applications embarquées (systèmes portables, transport).

- **L'état de charge SOC (State Of Charge)**

Le SOC du dispositif de stockage est défini comme le rapport de l'énergie stockée sur la capacité énergétique :

- **La profondeur de décharge PDC**

$$\text{Elle est donnée par } PDC (\text{en } \%) = (W_{max} - W_{stock}) / W_{max} \quad (I.3)$$

$$PDC (\text{en } \%) = 1 - SOC.$$

P_{max} (en W) est la puissance maximale pouvant être fournie ($P > 0$ en décharge) ou reçue ($P < 0$ en charge) par le moyen de stockage.

La puissance est un débit d'énergie. Ainsi, à puissance P constante, échangée pendant une durée Δt , l'énergie stockée variera comme suit :

$$\Delta W = - P \cdot \Delta t \quad (I.4)$$

(ΔW en J avec P en W et Δt en s ou ΔW en W.h avec P en W et Δt en h). De la même façon, on définit les puissances massique et volumique.

- **La constante de temps τ**

$$\tau = W_u / P_{max} \quad (\text{en s, avec } W_s \text{ en J et } P_m \text{ en W}) \quad (I.5)$$

τ : c'est la grandeur qui caractérise le type de besoin auquel devra répondre le moyen de stockage :

- τ petit (de quelques secondes à quelques minutes) conviendra à un besoin de puissance (une énergie convertie sur un temps bref, permettant par exemple d'accélérer un véhicule)
- τ grand (de l'heure à quelques jours) conviendra à un besoin d'autonomie (une énergie convertie sur un temps long, permettant par exemple d'effectuer un long trajet).
- **Le rendement**

C'est le rapport de l'énergie restituée W_u sur l'énergie fournie W_f .

$$\eta = W_u / W_f (\%) \quad (\text{I.7})$$

- **La cyclabilité**

C'est le nombre maximal de charge \leftrightarrow décharge que peut effectuer le moyen de stockage.

L'usure est liée à l'amplitude des cycles et à l'état de charge moyen.

- **Le coût d'investissement et de fonctionnement (maintenance)**
 - Il est indiqué en DA / (kW. h) pour les systèmes dimensionnés en énergie (τ_{grand}).
 - Il est indiqué en DA/ kW pour les systèmes dimensionnés en puissance (τ_{petit}).

II Différents types de stockages

II.1 Stockages à grande échelle

II.1.1 Stockage par systèmes hydrauliques

Une partie de l'électricité est produite grâce à des barrages qui utilisent la force motrice de l'eau, source renouvelable d'énergie très concentrée dont un intérêt primordial est qu'elle est quasi immédiatement disponible. En faisant des réserves d'eau dans le barrage, on accumule ainsi de l'énergie qui ne sera transformée en électricité qu'en fonction des besoins instantanés du réseau [4]. C'est ainsi que certains barrages fonctionnent essentiellement aux heures de pointe. On voit ainsi qu'une source renouvelable joue un rôle considérable dans la gestion du réseau.

Il est possible d'aller plus loin en utilisant l'électricité produite durant les heures creuses pour pomper de l'eau depuis la vallée et remplir à nouveau le barrage. On parle alors de Station de Transfert d'Energie par Pompage (STEP).

Le système hydraulique gravitaire, centrale de pompage turbinage déjà très répandu.

L'énergie, stockée sous forme d'énergie potentielle est définie :

$$W_{\text{stock}} \text{ (en J)} = \rho \cdot V \cdot g \cdot h \quad (\text{I.8})$$

ρ : est la masse volumique de l'eau en kg/m³.

V : le volume d'eau en m³

G : la constante de gravitation $g = 9.81 \text{ m.s}^{-2}$

H : le dénivelé entre le bassin supérieur et le bassin inférieur en m.

II.1.2 Stockage sous forme d'air comprimé (CAES, Compressed Air Energy Storage)

Le principe de ces installations est de comprimer de l'air avec un turbocompresseur. L'air comprimé est stocké dans des cavernes situées à grande profondeur. Pour récupérer l'électricité, l'air comprimé est dirigé vers une machine semblable à une turbine à gaz. Pour être exploité, l'air est réchauffé dans une chambre de combustion grâce à un appoint de gaz naturel [4]. Cette technique conduit à stocker de l'énergie sous forme d'air comprimé, soit dans de grandes cavités géologiques (par exemple mine de sel) soit à une échelle plus petite, dans des bouteilles de gaz sous pression.

Les inconvénients de cette technologie sont son rendement, la faible manœuvrabilité (mise en route environ 15 min), l'investissement élevé et la consommation de gaz.

II.1.3 Stockage sous forme d'énergie chimique

Le stockage d'énergie sous forme chimique dans les batteries électrochimiques est de loin la technique la plus répandue pour le stockage de l'énergie électrique. En fonction de type de batteries différentes réactions chimiques sont provoquées en utilisant l'énergie électrique et en la stockant sous forme d'énergie chimique. En fonction de la demande, des

réactions chimiques inversées produisent de l'électricité, le premier et le plus utilisé sur le marché a été l'accumulateur au plomb. Le rendement encore compétitif sur le marché. Etant disponible sur une plage de puissance très étendue (quelques Watts jusqu'aux modules de quelques M-Watts), les batteries électrochimiques peuvent être utilisées dans une large variété d'application [3].

Tableau (I.1) : Le bilan simplifié des caractéristiques des moyens de stockage à grande échelle:

Technologie	Hydraulique gravitaire	Air comprimé en caverne	Batteries électrochimiques
Densité d'énergie	1 kWh/m ³ pour une chute de 360 m	12 kWh par m ³ de caverne à 100 bars	Batterie au Pb: 33 kWh/t Batterie Li-ion: 100 kWh/t
Capacité Réalisable	de 1 à 100 GWh	de 0,1 à 10 GWh	de 0,1 à 40 MWh
Puissance Réalisable	de 0,1 à 1 GW	de 0,1 à 1 GW	de 0,1 à 10 MW
Rendement Electrique	de 65% à 80%	50% (avec l'apport de gaz naturel)	70% ou moins en décharge rapide
Installations existantes	100000 MWh 1000 MW	600 MWh 290 MW	40 MWh 10 MW
Maturité	Très bonne	Plusieurs expériences dans le monde	Plusieurs expériences avec des technologies matures
Remarques	Sites avec dénivelés et retenus d'eau	Sites avec cavernes	Métaux lourds

II.2 Stockages à faible échelle

II.2.1 Stockage magnétique dans des bobinages supraconducteurs (SMES)

L'énergie peut être stockée sous forme d'énergie d'un champ magnétique créée 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. Ces systèmes ont l'avantage d'une dynamique et d'une cyclabilité très élevées. Cependant, les coûts de fabrication et de maintenance sont très élevés et il y en a très peu de SMES de l'ordre de 0 à 100 MW, les systèmes disponibles actuellement sont compris entre 1 et 10 MW [3].

II.2.2 Stockage électrique dans des super-condensateurs

C'est la seule technologie où l'on peut parler vraiment de stockage d'électricité. C'est une technique bien nouvelle qui se trouve encore en phase de recherche. Aujourd'hui, on trouve fréquemment des super-condensateurs dans les produits électroménagers, mais leur puissance ne dépasse pas les 7 à 10 W. Les recherches actuelles ont pour objectif l'obtention de super-condensateurs dont la puissance soit de l'ordre de dizaines ou même de centaines de kW afin d'être utilisés dans des véhicules électriques.

II.2.3 Stockage cinétique dans une masse tournante appelée le volant d'inertie

Les systèmes inertiels de stockage d'énergie SISE ont été découverts depuis quelques années. Un SISE comporte un volant d'inertie couplé avec une machine électrique pouvant fonctionner dans deux régimes :

- Moteurs ou générateurs les SISE ont des constantes de temps de quelques minutes jusqu'à plusieurs heures en fonction de leur conception.
- Les SISE ont trouvé une application spécifique dans le domaine d'améliorations de la qualité de l'énergie électrique pour maintenir la fréquence et la tension de réseau dans les limites imposées par le règlement. En raison de leur dynamique élevée de leur bon rendement et de leurs longues périodes de vie.

Les SISE sont bien adaptés pour stocker l'énergie pendant des périodes courtes ce qui suffit pour améliorer la qualité de l'énergie. Dans une analyse est faite sur la capacité de stockage pour perfectionner les générateurs éoliens dans le réseau. L'article montre que le plus rentable système de stockage est le SISE, si la période de stockage ne dépasse 10 mn.

Tableau (I.2) : Le bilan simplifié des caractéristiques des moyens de stockage à petite échelle

Technologie	Inductif supraconducteur	Super-condensateurs	le volant d'inertie :
Forme d'énergie	Magnétique	Electrostatique	Mécanique
Densité d'énergie (accumulateur seul, hors équipements annexes)	de 1 à 5 Wh/kg	de 10 à 60 Wh/kg	de 1 à 5 Wh/kg
Capacité réalisable ou réalisée	qlq kWh	qlq kWh	de qlq kWh à qlq 10 kWh
Constantes de temps	de qlq s à 1 min	de qlq s à qlq min	de qlq min à 1 h
Cyclabilité	de 10000 à 100000 fatigue mécanique	de 10000 à 100000	de 10000 à 100000 fatigue mécanique
Rendement électrique	> 0,9	de 0,8 à > 0,9 selon régime	> 0,9
Connaissance de l'état de charge	Aisée (courant)	Aisée (tension)	Aisée (vitesse)
Remarques	Cryogénie	Grande cyclabilité	Coût global compétitif sur la durée de vie

III Différentes machines électriques utilisées dans les SISEs

Il existe plusieurs machines utilisées pour la conception et réalisation des systèmes inertiels de stockage d'énergie électrique, [3].

III.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 $\cos\varphi = 0,91$.

III.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).

III.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].

III.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.

IV Avantages et inconvénients de la machine asynchrone

IV.1 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].

IV.2 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.

V Volant d'inertie

Leur principe de base est simple : toute masse en mouvement acquiert de l'énergie cinétique, transformée en énergie électrique à l'aide d'un moteur/générateur. Dans un environnement particulier, cette énergie peut être conservée et restituée en fonction de la demande [14]. Il existe plusieurs types de volants :

- creux
- Iso-contraintes
- plain

V.1 Palier magnétique

Les paliers magnétique assurent la libre rotation de l'ensemble autour de l'axe principal d'inertie et minimise les frottements et les vibrations, source de perte, ils doivent donc assurer les deux fonctions [10] on distingue plusieurs types :

✓ **A billes :**

- Utilisés pour le stockage a courte durée
- Utilisés comme palier de secours pour stockage longue durée

✓ **A fluide :**

- Hydrodynamiques
- Hydrostatiques

✓ **Magnétiques :**

- Magnétiques actifs :
- Magnétiques semi-passifs
- Magnétiques Supraconducteur

VI Convertisseur statique

VI.1 Définition

Un convertisseur de l'électronique de puissance est un dispositif qui représente l'articulation d'un axe de puissance et un axe de commande. son rôle est de régler le transit de puissance électrique de la source vers le récepteur, en modifiant éventuellement la forme sous laquelle cette énergie électrique se présente. [8.9].

VI.2 Constitution du convertisseur

Le convertisseur se constitue de trois blocs, qui sont :

- Un redresseur
- Un filtre
- Un onduleur

VI.2.1 Redresseur

Le redresseur est un convertisseur statique de puissance qui assure la conversion alternative-continue. Etant alimenté par une source alternative et permet d'alimenter un récepteur en continu.

On utilise le pont triphasé (IGBT) alimentés par un système de tension sinusoïdal triphasé schématisé par la figure ci-dessous.

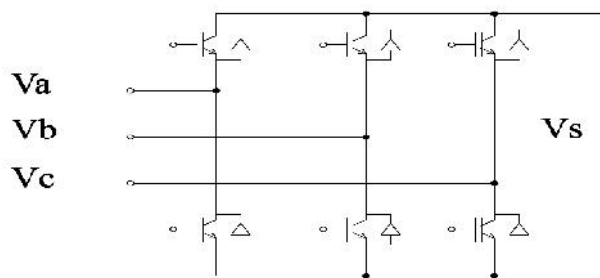


Figure (I.1) : Schéma d'un redresseur triphasé

VI.2.2 Filtre passif

Il existe plusieurs types de filtres passifs, on peut citer par exemple la bobine, condensateur, filtre passe basetc. Ce type filtre se constitue soit d'un condensateur ou d'une bobine ou bien des deux.

VI.2.3 Onduleur

Un onduleur est un convertisseur statique de puissance qui assure la conversion continue-alternative. On l'alimente par une source continue et on obtient une tension alternative.

L'onduleur de tension transforme une tension continue en une tension alternative dont on peut contrôler l'amplitude et la fréquence.

On utilise le pont triphasé (IGBT) alimentés par un système de tension continu schématisé dans figure ci-dessous :

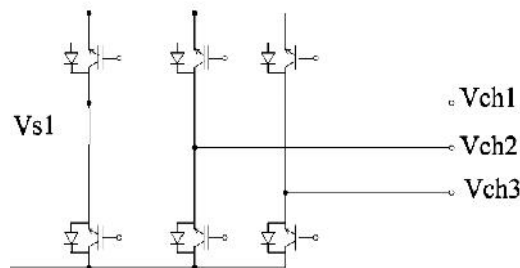


Figure (I.2): Schéma d'un onduleur triphasé

VI.3 Commande du convertisseur statique

Il existe plusieurs commandes qui peuvent assurer le transit de puissance dans les deux directions. Généralement on trouve la commande pleine onde (180°) ou la commande (120°) et la commande par modulation de largeurs d'impulsion. Nous opterons pour une commande de type MLI en raison de meilleures performances de ce type de commande par rapport aux autres commandes.

VI.3.1 Commande MLI

VI.3.1.1 MLI à Bande d'hystérésis

La méthode de la bande d'hystérésis permet la commutation des interrupteurs du convertisseur lorsque l'erreur entre le signal et sa consigne excède une amplitude fixée. Cette amplitude est communément appelée fourchette ou bande d'hystérésis cette technique ne demande qu'un comparateur à hystérésis par phase.

VI.3.1.2 MLI à échantillonnage périodique

La méthode d'échantillonnage périodique permet aux semi-conducteurs constituant le filtre actif de commuter durant les transitions d'une horloge à onde carrée et à fréquence fixe (fréquence d'échantillonnage).

L'avantage principal de cette méthode est que le temps minimal entre les commutations est limité par la période d'échantillonnage de l'horloge. Cependant, la fréquence de commutation actuelle n'est pas clairement définie.

VI.3.1.3 MLI à porteuse triangulaire

La méthode de la MLI à porteuse triangulaire, compare l'erreur entre le signal (courant ou tension) et sa consigne avec une onde triangulaire (porteuse) d'une amplitude et d'une fréquence fixées. L'erreur passe par un correcteur avant d'être comparée avec la porteuse triangulaire.

VI.3.1.4 MLI vectorielle

Dans la MLI vectorielle les vecteurs à appliquer et les temps d'application de ces vecteurs sont calculés analytiquement à travers des équations mathématiques. Chacun des états possibles du convertisseur est représenté par un vecteur de tension. L'ensemble de ces vecteurs forme le diagramme vectoriel des tensions du convertisseur.

La modulation vectorielle diffère, entre d'autres techniques par le fait que les signaux de commandes sont élaborés en tenant compte de l'état des trois bras de redresseur en même temps.

Conclusion

Plusieurs techniques utilisées pour stocker l'électricité existent et que d'autres sont en cours de développement. Chacune d'elles est capable de répondre à un besoin particulier, selon la situation rencontrée.

On a vu que dans de nombreux cas, un stockage est déjà mis en œuvre, signe qu'il est justifié économiquement. En poursuivant un effort de recherche dans ce domaine, nul doute que le champ d'application s'étendra.

Dans le chapitre suivant nous allons faire une étude sur l'un de ces systèmes qui est le Système Inertiel de Stockage d'Energie Electrique.

Chapitre II

*Etude et modélisation du
système inertiel de stockage
d'énergie SISE.*

Introduction

Dans ce chapitre, le système de stockage inertiel d'énergie basé sur un volant d'inertie entraîné par une machine asynchrone sera décrit tout en donnant les bases physiques de ces systèmes et on calcule la résistance pour les volants d'inertie et on propose une démarche analytique concernant leur dimensionnement. L'énergie stockée sera contrôlée par un convertisseur de puissance qui nous permettra de réaliser un contrôle en couple de la machine asynchrone. La modélisation et la commande de ces différents organes seront présentées.

I Description du fonctionnement des SISE_s

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.

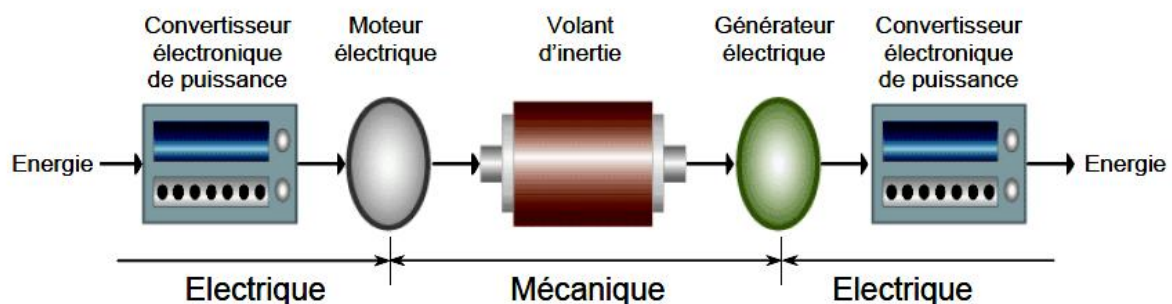


Figure (II.1) : principe de fonctionnement d'un SISE.

II Avantages et inconvénients des SISEs

II.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 Inconvénients du SISE

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

III Différents types de SISEs

Les SISEs peuvent être différenciés en fonction de la plage de vitesse et du matériau dont le volant d'inertie est fabriqué. Ainsi, il y a des SISEs à volants lents et des SISE à volants rapides [2], allant de quelques milliers de tr/mn pour les volants lents utilisant un matériau massif (acier,, titane, aluminium), a quelques dizaines de milliers de tr/mn pour les volants rapides .utilisant un matériau composite (kevlar, carbone, verre, bore).

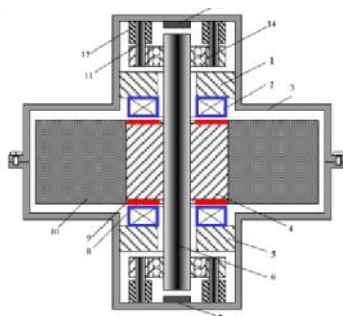


Figure (II.2a) : SISEs à basse vitesse,
Matériau massif.

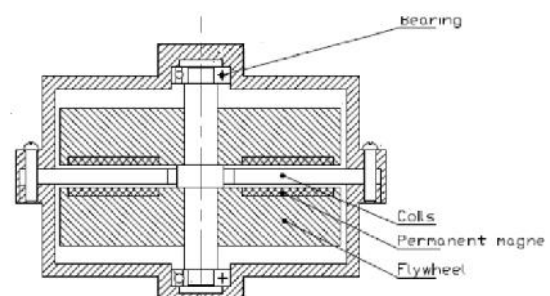


figure (II.2b) : SISEs à haute vitesse,
Matériau composite.

IV Calcul sur le volant d'inertie

IV.1 Considérations générales

IV.1.1 Energie cinématique

Le fonctionnement des SISE est basé sur l'énergie cinétique E_c , du volant d'inertie :

$$E_c = J \frac{\Omega^2}{2} \quad (\text{II.1})$$

J : le moment d'inertie du volant.

Ω : sa vitesse de rotation.

Le moment d'inertie peut être calculé par :

$$J = k * M * R^2 \quad (\text{II.2})$$

M : est la masse tournante.

R : le rayon maximal du volant.

K : est un coefficient de forme qui prend les valeurs :

- $k = 1$, pour un anneau mince;
- $k = 0.5$, pour un disque à épaisseur uniforme;
- $k = 0.4$, pour une bille;
- $k = 2/3$, pour une sphère.

IV.1.2 L'influence des différents facteurs sur la capacité de stockages

L'énergie stockée dans le volant d'inertie est limitée par la résistance du matériau dont celui-ci est fabriqué. La vitesse du volant ne peut pas être augmentée à l'infini en raison de la force centrifuge qui mène à la désintégration du volant, si la vitesse dépasse les limites imposées par le matériau de fabrication. La résistance à la rupture et la masse volumique du matériau de fabrication du volant d'inertie jouent un rôle essentiel dans la détermination de la capacité de stockage de l'énergie. Les matériaux idéaux doivent avoir une résistance à la

rupture la plus grande possible et une petite masse volumique. Actuellement, des volants d'inertie très performants sont fabriqués en Kevlar. Ce matériau a une résistance à rupture d'environ 4,8GPa et une masse volumique d'environ 1800 kg/m³. Avec ce matériau on peut construire des volants d'inertie capables d'emmagasiner l'énergie à une densité d'environ 181 Wh/kg, beaucoup plus grande que dans les batteries électrochimiques [3].

Un volant d'inertie ne peut pas tourner jusqu'à la vitesse maximale, où la force centrifuge devient égale à la résistance du matériau dont il est fabriqué. En raison de la sûreté de l'exploitation, on recommande que la vitesse du volant d'inertie ne dépasse pas 70% de la vitesse maximale. Parce que l'énergie est proportionnelle au carré de la vitesse, l'énergie stockée dans le volant d'inertie ne dépassera pas 50% de l'énergie maximale.

IV.1.3 Moment d'inertie

Dans la (figure II.3) sont présentés les paramètres géométriques du volant d'inertie. Pour augmenter le moment d'inertie, on désire qu'une partie la plus grande possible de la masse du volant soit distribuée vers l'extérieur de celui-ci. L'inertie du volant est donnée par la relation suivante :

$$J = \frac{1}{2} * [m_1 * (r_i^2 + r_o^2) + m_2 * (r_i^2 + r_b^2) + m_3 * r_b^2] \quad (II.3)$$

Où:

m₁ : la masse du cylindre extérieur;

m₂ : la masse du disque faisant la liaison entre le cylindre extérieur et le moyeu du volant;

m₃ : la masse du moyeu du volant et de la partie de l'arbre qui se trouve dedans.

Les trois masses sont calculées comme suit:

$$m_1 = \rho_1 * V_1 = \rho_1 * \pi * h * (r_o^2 - r_i^2) \quad (II.4a)$$

$$m_2 = \rho_2 * V_2 = \rho_2 * \pi * h * (r_i^2 - r_b^2) \quad (II.4b)$$

$$m_3 = \rho_3 * V_3 = \rho_3 * \pi * h * r_b^2 \quad (II.4c)$$

Où:

ρ_1, ρ_2, ρ_3 : sont les masses volumiques dont les différentes parties du volant sont fabriquées.

Si le volant est fabriqué d'un seul matériau (cas des volants en acier), le moment d'inertie peut s'exprimer par :

$$J = \frac{\rho * \pi}{2} * [h * (r_0^4 - r_1^4 + r_b^4) + h_2 * (r_1^4 - r_b^4)] \quad (II.5)$$

En introduisant la relation (II.5) en (II.1), l'énergie cinétique de volant peut s'exprimer par :

$$E_C = \frac{\rho * \pi}{4} * [h * (r_0^4 - r_1^4 + r_b^4) + h_2 * (r_1^4 - r_b^4)] * \Omega^2 \quad (II.6)$$

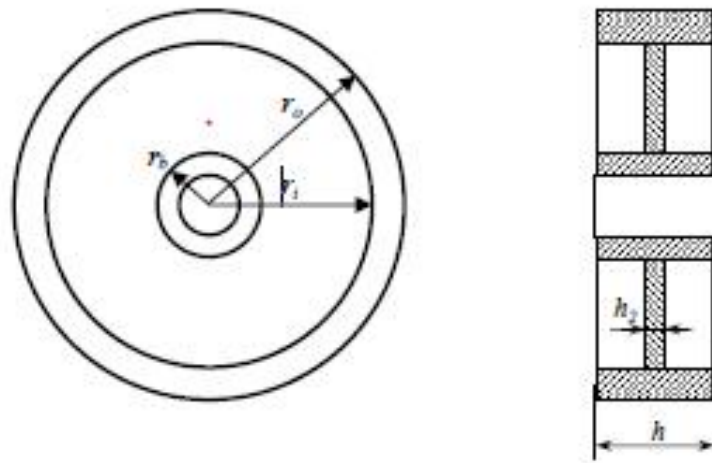


Figure (II.3) : Paramètres géométriques du volant d'inertie

IV.2 Eléments de calcul de résistance

IV.2.1 Force centrifuge

En considérant un volant d'épaisseur uniforme et de masse volumique ρ (Figure II.4), la force centrifuge agissant sur un élément du disque peut être écrite comme suit :

$$dF_c = dm * r * \Omega^2 = \rho * h * r^2 * d\varphi * dr * \Omega^2 \quad (II.7)$$

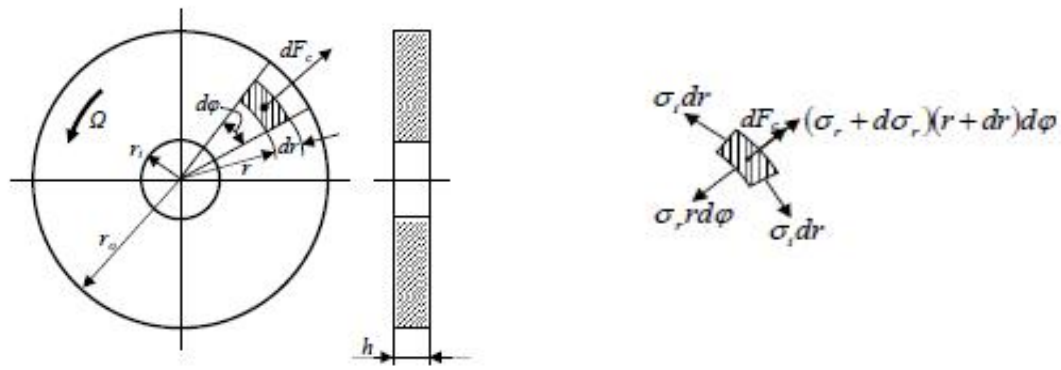


Figure (II.4) : Forces et contrainte dans un volant à épaisseur uniforme

En considérant l'élément séparé du disque (Figure. II.4.b), on obtient la relation suivante:

$$(\sigma_r + d\sigma_r) \cdot (r + dr) \cdot d\phi - \sigma_r \cdot r \cdot d\phi - 2 \cdot \sigma_t \cdot dr \cdot \sin \frac{1}{2} d\phi + \rho \cdot h \cdot r^2 \cdot d\phi \cdot \Omega^2 = 0 \quad (\text{II.8})$$

Où:

σ_r : est la contrainte normale à la distance r de centre du volant;

σ_t : est la contrainte tangentielle agissant sur l'élément de volant.

En faisant les calculs, les contraintes sur un contour de rayon r peuvent s'exprimer:

$$\sigma_r = \frac{3+\mu}{8} \cdot \rho \cdot \Omega^2 \cdot \left(r_i^2 + r_o^2 - r^2 - \frac{r_i^2 \cdot r_o^2}{r^2} \right) \quad (\text{II.9})$$

$$\sigma_t = \frac{3+\mu}{8} \cdot \rho \cdot \Omega^2 \cdot \left(r_i^2 + r_o^2 - \frac{1+3\mu}{3+\mu} r^2 + \frac{r_i^2 \cdot r_o^2}{r^2} \right) \quad (\text{II.10})$$

Où :

μ : est le coefficient de Poisson pour le matériau dont le volant est fabriqué. Sur les contours extérieur ($r = r_o$) et intérieur ($r = r_i$) du volant, les contraintes deviennent:

$$\sigma_{ri} = \sigma_{ro} = 0 \quad (\text{II.11})$$

$$\sigma_{ti} = \frac{3 + \mu}{4} \cdot \rho \cdot \Omega^2 \left(\frac{1 - \mu}{3 + \mu} r_i^2 + r_0^2 \right) \quad (\text{II. 12})$$

$$\sigma_{t0} = \frac{3 + \mu}{4} \cdot \rho \cdot \Omega^2 \left(r_i^2 + \frac{1 - \mu}{3 + \mu} r_0^2 \right) \quad (\text{II. 13})$$

Où:

σ_{ri}, σ_{r0} : sont les contraintes normales sur les contours de rayon r_i , respectivement r_0 .

σ_{ti}, σ_{t0} : sont les contraintes tangentielles sur les contours de rayon r_i et r_0 .

En comparant les relations (II.12) et (II.13) on observe que la contrainte σ_t est plus grande à l'intérieur qu'à l'extérieur. Par conséquent, la condition de résistance pour le volant s'écrit comme suit:

$$\sigma_{max} = \sigma_{ti} \leq \sigma_{adm} \quad (\text{II. 14})$$

Où

σ_{adm} : Représente la contrainte maximale admissible pour le matériau dont le volant est fabriqué.

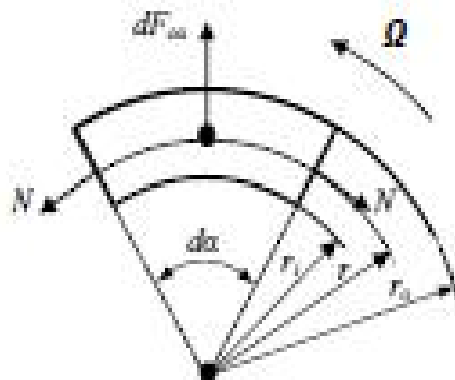


Figure (II.5) : Esquisse explicative au calcul simplifié de résistance

Pour le cas où le volant est de type couronne mince (Figure. II.5), puisque la différence entre les rayons extérieur et intérieur est beaucoup plus petite que le rayon intérieur, le calcul de résistance peut être simplifié, en négligeant les rayons et le moyeu.

Ainsi, en considérant un élément de couronne de largeur h, la force centrifuge agissant sur celui-ci est donnée par :

$$dF_{C\alpha} = dm \cdot r \cdot \Omega^2 = \frac{\rho \cdot h \cdot d\alpha}{2} (r_0 - r_i) \cdot r \cdot \Omega^2 \quad (\text{II.15})$$

Où

$$r = \frac{4 \cdot (r_0^3 - r_i^3) \cdot \sin \frac{d\alpha}{2}}{3 \cdot (r_0^2 - r_i^2) \cdot d\alpha} \quad (\text{II.16})$$

En négligeant le poids propre de l'élément de couronne, on peut écrire l'équation d'équilibre pour les forces agissant sur celui-ci:

$$dF_{C\alpha} = 2N \sin \frac{d\alpha}{2} \approx N \cdot d\alpha \quad (\text{II.17})$$

Il en résulte :

$$N = \frac{d F_{C\alpha}}{d\alpha} = \rho \cdot S \cdot r^2 \Omega^2 = \rho \cdot S \cdot v^2 \quad (\text{II.18})$$

Où:

$S = h \cdot (r_0 - r_i)$: l'aire de la section de la couronne;

$v = r \cdot \Omega$: la vitesse moyenne de la couronne.

IV.2.2 Contraintes et vitesse admissible

La contrainte dans le volant est alors

$$\sigma = \frac{N}{S} = \rho \cdot v^2 \quad (\text{II.19})$$

On observe, selon la relation (II.19), que la contrainte dans le volant ne dépend pas de sa section.

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

$$v_{adm} = r_0 \cdot \Omega_{adm} = \sqrt{\frac{\sigma_{adm}}{\rho}} \quad (II.20)$$

IV.3 Dimensionnement et modélisation des volants d'inertie pour les SISEs

IV.3.1 Dimensionnement du volant

Lorsqu'on veut fabriquer un volant d'inertie pour un SISE, il y a deux conditions initiales dont il faut tenir compte. Premièrement, il faut connaître la vitesse maximale de rotation du volant. Cette vitesse est choisie en fonction de la vitesse maximale de la machine électrique qui entraînera le volant d'inertie, car il est recommandable d'exploiter au maximum la plage de vitesse de la machine électrique. La deuxième condition concerne la capacité du volant d'inertie, c'est-à-dire l'énergie maximale qu'il doit stocker. En partant de ces conditions initiales, une démarche analytique peut être établie pour calculer les dimensions du volant. En considérant un volant d'épaisseur uniforme (Figure. II.4), il faut tout d'abord choisir le rayon Intérieur r_i . Ce rayon est choisi en fonction de l'arbre du volant et des contraintes technologiques concernant la fabrication. L'arbre fait le couplage entre le volant et la machine électrique, et doit supporter le couple maximal de la machine. Ainsi, l'arbre doit soutenir le poids du volant. En connaissant la vitesse maximale de la machine électrique, Ω_{max} , la vitesse maximale que le volant doit supporter est calculée par :

$$\Omega_{vol} = k \cdot \Omega_{max} \quad (II.21)$$

Où

k : représente le coefficient de sûreté pour le volant. D'habitude, $k = 1,4$.

A partir des relations (II.12) et (II.14), le rayon extérieur doit respecter la condition suivante:

$$r_0 \leq r_{0max} = \sqrt{\frac{4 \cdot \sigma_{adm}}{(3 + \mu) \cdot \rho \cdot \Omega_{vol}^2} - \frac{1 - \mu}{3 + \mu} r_i^2} \quad (II.22)$$

Où

σ_{adm} , ρ et μ : les caractéristiques du matériau utilisé pour la fabrication du volant.

On voit qu'il est possible de choisir une multitude de valeurs pour r_0 tant qu'on respecte la condition $r_i < r_0 \leq r_{0max}$. L'expression (II.22) est assez compliquée, mais indispensable si

on veut faire un calcul bien précis. Toutefois, si on envisage un volant de type couronne mince, on peut trouver le rayon extérieur à partir de l'expression (II.22) :

$$r_0 \leq r_{0max} = \frac{1}{\zeta_{vol}} \sqrt{\frac{\sigma_{adm}}{\rho}} \quad (II. 23)$$

L'épaisseur du volant est donnée en fonction de l'énergie maximale qu'il faut y stocker. L'inertie du volant d'épaisseur uniforme est donnée par

$$J = \frac{\rho \cdot \pi \cdot h}{2} (r_0^4 - r_i^4) \quad (II. 24)$$

A partir des équations (II.1) et (II.24), l'épaisseur du volant d'inertie est exprimée par :

$$h = \frac{4 \cdot E_{max}}{\rho \cdot \pi \cdot \Omega_{max}^2 \cdot (r_0^4 - r_i^4)} \quad (II. 25)$$

Où :

E_{max} : l'énergie maximale que l'on veut stocker dans le volant.

IV.3.2 Modélisation du volant

L'équation dynamique fait la liaison entre la partie mécanique et la partie électromagnétique de la machine [23] :

$$J \cdot \frac{d}{dt} \Omega = C_{em} - B \cdot \Omega - C_s \quad (II. 26)$$

Dans le cas des SISEs il n'ya pas de couple de charge pour la machine électrique donc le couple résistant est :

$$C_r = B \cdot \Omega + C_s \quad (II. 27)$$

IV.4 Les matériaux utilisés et caractéristiques

Dans le tableau II.1 sont donnés quelques types de matériaux utilisés pour la construction des volants d'inertie et les caractéristiques de ces volants. En considérant un volant avec la forme donnée dans la (Figure. II.4). et ayant les dimensions $r_o = 25$ cm, $r_i = 20$ cm et $h = 40$ cm, son moment d'inertie aura la valeur. $J=144,9 \cdot 10^{-5}$. ρ [kg.m²].

Pour déterminer les caractéristiques des volants, on a considéré les mêmes dimensions, la différence étant donnée par le matériau dont ils sont fabriqués. On observe que les volants ayant une grande résistance spécifique (le rapport entre la résistance à rupture et la masse volumique) présentent des caractéristiques supérieures.

Tableau (II.1) : Matériaux utilisés pour la construction des volants et caractéristiques de ces volants.

	Kevlar	Fibres de charbon + résine	Fibres de verre + résine	Alliage de titan	Aciers de grande résistance	Alloy (alliage d'aluminium)
Masse volumique ρ [kg/m ³]	1800	1500	2000	4500	7800	2700
Masse du volant [kg]	50,9	42,4	56,5	127,2	220,5	76,3
Résistance à rupture σ [MN/m ²]	4800	2400	1600	1215	1300 – 2100	594
Résistance spécifique [MNm/kg]	2,66	1,6	0,8	0,27	0,16 – 0,27	0,22
Moment d'inertie J [kg·m ²]	2,6082	2,1735	2,898	6,5205	11,3022	3,9123
Vitesse périphérique maximale V_{max} [m/s]	1632,99	1264,91	894,42	519,61	400 – 519,61	469
Vitesse maximale N_{max} [T/min]	62375	48316	34164	19847	15278 – 19847	17914
Vitesse angulaire maximale Ω [rad/s]	6531,96	5059,64	3577,68	2078,44	1600 – 2078,44	1876
Energie cinétique à 70% de la vitesse maximale	27,26 [MJ] 7,57 [kWh]	13,63 [MJ] 3,79 [kWh]	9,08 [MJ] 2,52 [kWh] 6,9 [MJ] 1,92	6,9 [MJ] 1,92 [kWh]	7,08 – 11,96 [MJ] 1,96 – 3,32 [kWh]	3,37 [MJ] 0,93 [kWh]
Densité d'énergie [Wh/kg]	148,7	89,3	44,6	15,1	8,9 – 15,1	12,2

V Machines électriques

V.1 Considérations générales

La machine électrique est une composante essentielle du SISE [1,11], il est donc impératif de choisir la machine électrique pour un dimensionnement adéquat du SISE. Les machines électriques destinées aux SISEs doivent être capables de fonctionner à puissance constante sur une large plage de vitesse. Du point de vue de la plage de vitesse, les machines électriques destinées aux SISEs sont similaires aux machines électriques utilisées dans la traction électrique. Plusieurs types de machines électriques peuvent être intégrées dans un SISE; le choix de la machine est fait en tenant compte de quelques critères:

- le type de SISE: mobile ou stationnaire;
- l'application: amélioration de la qualité de l'énergie électrique, Alimentation Statique
- Inintermittibles (ASI), alimentation des charges isolées, etc. ;
- le coût total du système;
- les performances souhaitées du système;
- la plage de vitesse du système;
- l'environnement où le système sera placé, etc.

Pour les machines électriques alimentées par l'intermédiaire des convertisseurs électroniques de puissance, on n'utilise plus le terme vitesse nominale car « nominal » signifie quelque chose qu'on ne peut pas dépasser en régime normal d'exploitation. Par contre, on utilise le terme vitesse de base qui signifie la vitesse où il faut commencer le défluxage de la machine, si on veut augmenter encore sa vitesse. La vitesse maximale concerne la limitation en vitesse de la machine. Cette limitation peut être imposée par différentes contraintes électromagnétiques ou technologiques [13].

La figure (II.6) montre les enveloppes de couple et de puissance d'une machine électrique. Sur cette figure on distingue deux zones de fonctionnement pour la machine:

- Fonctionnement au-dessous de la vitesse de base, Ω_b . Dans cette zone, le couple nominal de la machine est disponible, mais la puissance maximale est variable, en fonction de la vitesse, et plus petite que la puissance nominale. Cette zone ne présente pas beaucoup d'intérêt pour les SISEs.

- Fonctionnement au-dessus de la vitesse de base, Ω_b . Dans cette zone, le couple est diminué afin de limiter la puissance de la machine à la valeur nominale. C'est la zone de fonctionnement utilisée dans les SISEs parce qu'ici la puissance nominale de la machine est disponible pour n'importe quelle vitesse.

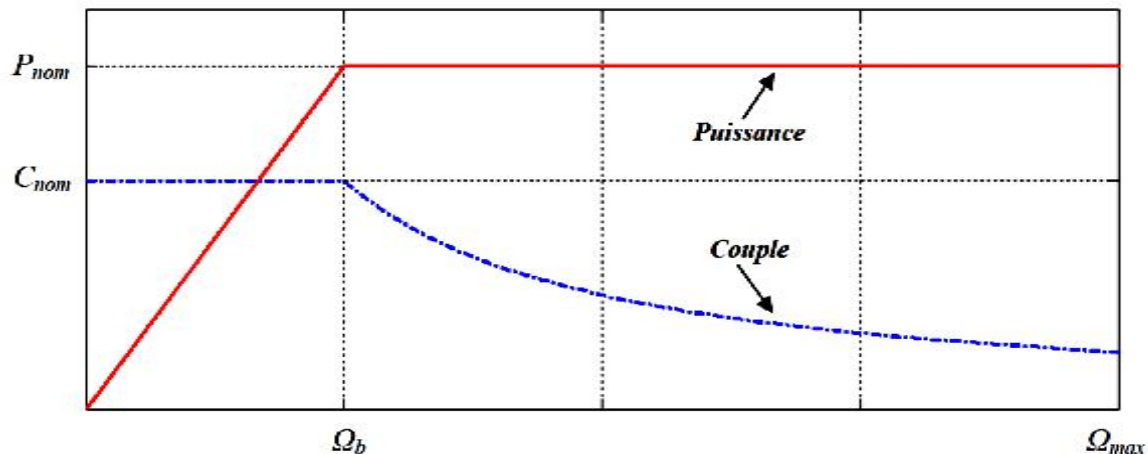


Figure (II.6) : enveloppes de couple et de puissance d'une machine électrique

En considérant la vitesse de base, Ω_b , et la vitesse maximale, Ω_{max} , d'une machine électrique, le Rapport caractérise la machine du point de vue du fonctionnement à puissance constante. Pour les SISEs, il est souhaitable que X soit le plus grand possible afin de profiter au maximum de l'énergie stockée dans le volant tournant à la vitesse maximale. Par exemple:

- Une machine ayant $X = 2$, permet un fonctionnement à puissance constante entre 50% et 100% de la vitesse maximale. Cela veut dire qu'on peut profiter de 75% de l'énergie stockée dans le volant d'inertie, si on veut fonctionner à la puissance nominale de la machine électrique.
- Une machine ayant $X = 5$, permet un fonctionnement à puissance constante entre 20% et 100% de la vitesse maximale. Donc, 96% de l'énergie stockée dans le volant est disponible même si la machine électrique fonctionne toujours à sa puissance nominale.

Il n'y a pas une relation directe entre les dimensions du volant d'inertie et la puissance nominale de la machine électrique. Si les dimensions du volant donnent la capacité du SISE, la puissance nominale de la machine électrique impose la puissance maximale de charge ou de décharge. Donc, le choix de la puissance nominale de la machine électrique est fait seulement en fonction de la puissance nominale du SISE [15].

V.2 Modélisation de la machine asynchrone

V.2.1 Hypothèses simplificatrices

La modélisation est une phase primordiale sur le chemin de la simulation et la réalisation. Le modèle adopté devrait interpréter le plus fidèlement possible l'ensemble des phénomènes que le concepteur cherche à mettre en évidence, pour ainsi prédire le comportement en régime dynamique et stationnaire du système physique. Seulement les machines électriques sont des systèmes très complexes, pour en tenir compte dans leurs modélisations de tous les phénomènes physiques qu'elles contiennent. Il est alors essentiel d'admettre quelques hypothèses simplificatrices conventionnelles, qui tout de même n'altèrent point l'authenticité du modèle de la machine dans le cadre de ce travail [12,16].

Les hypothèses simplificatrices adoptées dans ce travail sont présentées comme suit:

- Répartition spatiale sinusoïdale de l'induction magnétique à travers l'entrefer, ce qui se traduit par une variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre le stator et le rotor, cela implique une variation nulle de la perméance magnétique due aux encoches.
- Les courants induits dans le circuit magnétique (courants de Foucault) sont supposés négligeables, ainsi qu'aux phénomènes de l'hystérésis et l'effet de peau.
- La saturation magnétique ne sera pas prise en compte, ce qui permettra d'écrire les flux propres de la machine comme des fonctions linéaires des courants.
- Les Résistances des enroulements sont considérées comme constantes.

V.2.2 Equations dans le repère abc

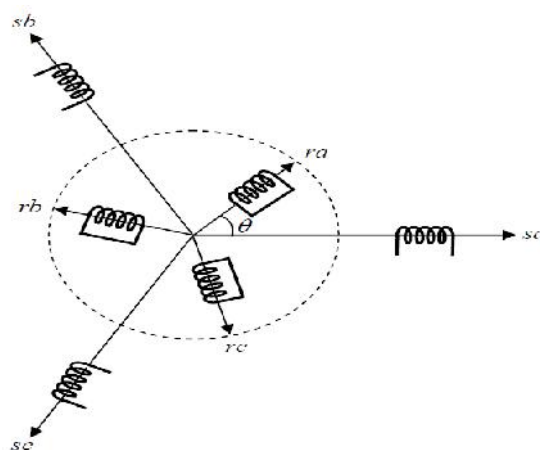


Figure (II.7) : Représentation spatiale des enroulements de la MAS

Dans le repère triphasé, les trois vecteurs S_a, S_b, S_c , sont orientés selon les axes des trois enroulements statoriques de la machine. Il est de même pour le rotor.

L'axe S_a est souvent considéré comme référence, et l'angle θ définit la position du rotor par rapport au stator. En tenant compte des hypothèses mentionnées précédemment les équations électriques des tensions statoriques et rotoriques peuvent s'écrire sous forme matricielle en appliquant la loi d'Ohm.

V.2.2.1 Equations électriques

✓ Enroulements statoriques

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 28})$$

✓ Enroulements rotoriques

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 29})$$

V.2.2.2 Équations magnétiques

✓ Pour le stator

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & m_s & m_s \\ m_s & L_s & m_s \\ m_s & m_s & L_s \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_{sr} \cdot \cos(\theta_r) & m_{sr} \cdot \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & m_{sr} \cdot \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) \\ m_{sr} \cdot \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) & m_{sr} \cdot \cos(\theta_r) & m_{sr} \cdot \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ m_{sr} \cdot \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & m_{sr} \cdot \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) & m_{sr} \cdot \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 30})$$

$$[\Phi_s] = [L_s] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \quad (\text{II. 31})$$

Avec :

$$\begin{cases} m_{sa} = m_{sr} \cdot \cos(\theta_r) \\ m_{sb} = m_{sr} \cdot \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ m_{sc} = m_{sr} \cdot \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (II. 32)$$

m_{sa} : est la valeur maximale de coefficient d'inductance mutuelle stator –rotor obtenu pour

$\theta_r = 0$.

✓ **Pour le rotor**

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & m_r & m_r \\ m_r & L_r & m_r \\ m_r & m_r & L_r \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_{rs} \cdot \cos(\theta_r) & m_{rs} \cdot \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) & m_{rs} \cdot \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ m_{rs} \cdot \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & m_{rs} \cdot \cos(\theta_r) & m_{rs} \cdot \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) \\ m_{rs} \cdot \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) & m_{rs} \cdot \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & m_{rs} \cdot \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad (II. 33)$$

$$[\Phi_r] = [L_r] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s] \quad (II. 34)$$

Avec :

m_{rs} : est la valeur maximale de coefficient d'inductance mutuelle stator –rotor obtenu pour

$\theta_r = 0$

V.2.3 Transformations de Park

Les modèles des machines électrique les plus utilisés sont basés sur la théorie unifiée des machines électrique. Cette théorie est basée sur la transformation de Park qui rapporte les équations électriques statorique et rotoriques à un système d'axes dq [17].

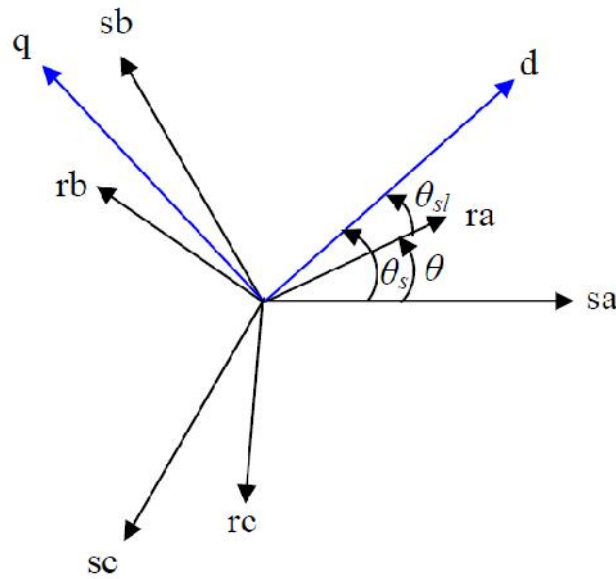


Figure (II.8) : Axe de repère d et q de la MAS.

Les trois enroulements du stator peuvent être remplacés par deux enroulement fictifs a $\frac{\pi}{2}$ dans l'espace et alimentés par des courants a $\frac{\pi}{2}$ dans le temps. Les deux enroulements virtuels sont disposés sur les axes dq.

Dans le cas de la MAS les trois enroulements rotoriques peuvent aussi être remplacés par deux enroulements fictifs disposés sur le même repère dq. ayant toujours l'axe s_a comme référence on définit les angles $\theta_s, \theta_{s1}, \theta$ Comme dans la (figure II.8), pour passer du système abc, au système diphasé dq il faut utiliser les transformations de Park.

La matrice de Park est donnée par :

$$[P] = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} \cos \theta_s & \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (II.35.a)$$

Et la matrice de Park inverse est de donner :

$$[P]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} \cos \theta_s & -\sin \theta_s & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 35.b})$$

Où θ est l'angle entre l'axe d et l'axe de référence dans le système triphasé (as pour les grandeurs statoriques).

Le système dq sera utilisé dans la commande vectorielle de la machine asynchrone. Dans le système dq , les grandeurs électriques sont de type continues, ce qui donne la possibilité de faire une commande similaire à la commande des machines à courant continu et pour les grandeurs rotoriques.

V.2.3.1 Equations de tensions

$$[P(\theta_s)] \cdot [V_s]_{dq0} = [R_s] \cdot [P(\theta_s)] \cdot [I_s]_{dq0} + \frac{d}{dt} [P(\theta_s)] \cdot [\Phi_s]_{dq0} \quad (\text{II. 36.a})$$

$$[P(\theta_r)] \cdot [0] = [R_r] \cdot [P(\theta_r)] \cdot [I_r]_{dq0} + \frac{d}{dt} [P(\theta_r)] \cdot [\Phi_r]_{dq0} \quad (\text{II. 36.b})$$

En multipliant par $[P]^{-1}$ on trouve :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \frac{d}{dt} \Phi_{sd} - \omega_s \cdot \Phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \frac{d}{dt} \Phi_{sq} + \omega_s \cdot \Phi_{sd} \\ V_{s0} = R_s \cdot I_{s0} + \frac{d}{dt} \Phi_{s0} \end{cases} \quad (\text{II. 37.a})$$

Et

$$\begin{cases} 0 = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d}{dt} \Phi_{rd} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \Phi_{rq} \\ 0 = R_r \cdot I_{rq} + \frac{d}{dt} \Phi_{rq} + (\omega_s - \omega_r) \cdot \Phi_{rd} \\ 0 = R_r \cdot I_{r0} + \frac{d}{dt} \Phi_{r0} \end{cases} \quad (\text{II. 37.b})$$

V.2.3.2 Equations de flux

$$[P(\theta_s)] \cdot [\Phi_s]_{dq0} = [L_s] \cdot [P(\theta_s)] \cdot [I_s]_{dq0} + [M_{sr}] \cdot [P(\theta_r)] \cdot [I_r]_{dq0} \quad (\text{II. 38.a})$$

$$[P(\theta_r)] \cdot [\Phi_r]_{dq0} = [L_r] \cdot [P(\theta_r)] \cdot [I_r]_{dq0} + [M_{rs}] \cdot [P(\theta_s)] \cdot [I_s]_{dq0} \quad (\text{II. 38.b})$$

En multipliant par $[P]^{-1}$ on trouve :

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = L_s \cdot I_{sd} + M_{sr} \cdot I_{rd} \\ \Phi_{sq} = L_s \cdot I_{sq} + M_{sr} \cdot I_{rq} \\ \Phi_{s0} = (l_s - 2 \cdot m_s) \cdot I_{s0} \end{cases} \quad (\text{II. 39.a})$$

$$\begin{cases} \Phi_{rd} = L_r \cdot I_{rd} + M_{rs} \cdot I_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r \cdot I_{rq} + M_{rs} \cdot I_{sq} \\ \Phi_{r0} = (l_r - 2 \cdot m_r) \cdot I_{r0} \end{cases} \quad (\text{II. 39.b})$$

Avec :

$$L_s = l_s - m_s$$

$$L_r = l_r - m_r$$

$$M_{sr} = (3/2) \cdot m_{sr}$$

$$M_{rs} = (3/2) \cdot m_{rs}$$

On a pris les coefficients $\sqrt{\frac{2}{3}}$ pour les matrices de Park afin de conserver la puissance pendant le passage entre les deux référentiels .ainsi, la puissance active sera :

$$P = V_a \cdot I_a + V_b \cdot I_b + V_c \cdot I_c \tag{II. 40}$$

$$P = V_d \cdot I_d + V_q \cdot I_q \tag{II. 41}$$

VI Modélisation de convertisseurs statique

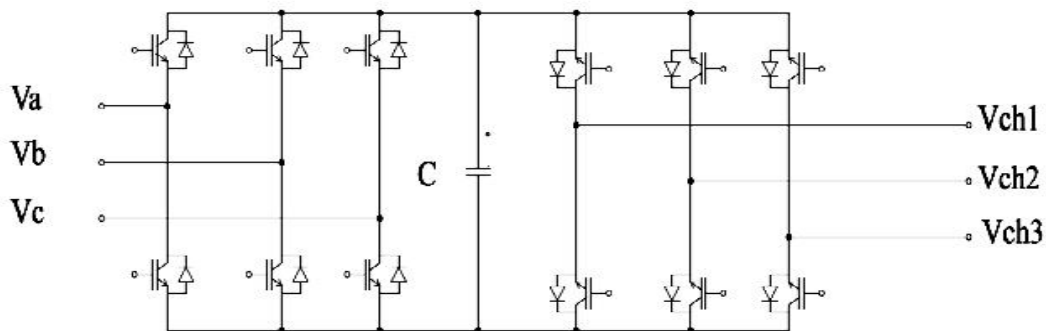


Figure (II.9) : Schéma de convertisseur statique

VI.1 Modélisation de redresseur

La commande du redresseur est réalisée avec la commande MLI. Ce qui revient à commander les transistors IGBTs afin d'obtenir une tension continue au bus, la réalisation se fait par une comparaison de la tension du bus a la tension de référence qui est quasi-continue On a les tensions alternatives $V_{a,b,c}$, aux bornes du pont en fonction de la tension redresser V_s [8,9].

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_1 \\ S_3 \\ S_5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_s \\ 0 \end{bmatrix} \tag{II.42}$$

Ou :

S_i : est l'état des interrupteurs (0 ou 1)

De même on peut exprimer le courant redressé en fonction des courants d'entrée :

$$I_s = [S_1 \quad S_3 \quad S_5] \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{II. 43})$$

VI.2 Modélisation d'un filtre

Pour minimiser l'ondulation de la tension redressée à la sortie du redresseur, on utilise un filtre passe-bas, il existe plusieurs choix, mais le schéma le plus simple est donné en figure (II.10).

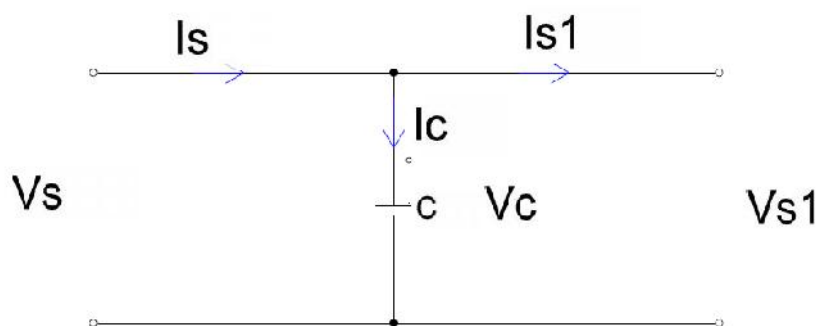


Figure (II.10) : Représentation du filtre passe-bas.

D'après la figure (II.10)

$$I_c = I_s - I_{s1} \quad (\text{II. 44})$$

$$I_c = C \cdot \frac{d}{dt} U_c(t) \quad (\text{II. 45})$$

$$U_c(t) = U_{c0} + \frac{1}{C} \int_{t1}^{t2} i_c \cdot dt \quad (\text{II. 46})$$

VI.3 Modélisation de l'onduleur

Il est représenté par le schéma de la figure (II.9), associé au redresseur les IGBTs constituants sont supposés idéaux. C'est-à-dire qu'on néglige les phénomènes de commutation ainsi que les pertes par conduction On a les tensions alternatives $V_{ch1, 2,3}$ aux bornes de pont en fonction de la tension continue V_{s1} :

$$\begin{bmatrix} V_{ch1} \\ V_{ch2} \\ V_{ch3} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S'_1 & S'_4 \\ S'_3 & S'_6 \\ S'_5 & S'_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_s \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 47})$$

$$I_{s1} = \begin{bmatrix} S'_1 & S'_3 & S'_5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{cha} \\ i_{chb} \\ i_{chc} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 48})$$

Pour déterminer les constants de fermeture et l'ouverture des interrupteurs on fait appelé a la technique de la commande MLI qui consiste a calculer intersections d'une tension de référence sinusoïdale avec celle de modulation triangulaire appelée porteuse les signaux de référence sont donnés par l'équation suivant [18] :

$$V_{ref} = r \cdot \sin \left[(2 \cdot \pi \cdot f) \cdot t - 2 \cdot (j - 1) \cdot \frac{\pi}{3} \right] \quad (\text{II. 49})$$

Avec : $j=1, 2,3$

Lorsque la référence est sinusoïdale, dans ce cas deux paramètres caractérisent la commande ;

- l'indice de modulation « **m** » égal au rapport entre la fréquence de modulation et celle de référence
- le coefficient de réglage en tensions « **r** » égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence a la valeur crête de l'onde de modulation

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait une étude détaillée du système inertiel de stockage d'énergie électrique.

On a fait une présentation des systèmes inertiels de stockage d'énergie (SISEs). Et on a décrit les différents types de SISEs et leurs domaines d'application.

Une autre problématique est traitée dans ce chapitre qui concerne le calcul de résistance des volants d'inertie et on propose une démarche analytique pour le dimensionnement des volants.

Et on a établie les modèles mathématiques des composantes constituantes du SISE, la machine asynchrone, le volant ainsi que le convertisseur électronique de puissance.

Dans le chapitre suivant nous allons étudier la commande vectorielle de la MAS ainsi le control du système inertiel de stockage électrique.

Chapitre III

*Commande du système
système de stockage*

Introduction

Dans ce chapitre, l'étude sur le control de la machine asynchrone qui est la commande vectorielle. Différents types de référentiels seront présentés mais le référentiel lié au champ tournant puis on entamera par calculer les grandeurs de référence, les régulateurs, les estimateurs. Et on associera le système avec une grandeur d'entrée perturbée.

I Commande vectorielle

La commande vectorielle des machines à courants alternatifs est maintenant bien connue. De nombreux industriels commercialisent des variateurs de vitesse pour les machines synchrones et asynchrones utilisant ce mode de contrôle. Le principe de la commande vectorielle est identique à celui de la commande d'une machine à courant continu à excitation séparée. Il faut cependant se placer dans un repère particulier où le couple électromagnétique s'exprime simplement en fonction des composantes des courants suivant les deux axes. De Park d et q. Habituellement, la composante d'axe d du courant statorique joue le rôle de l'excitation et permet de régler la valeur du flux dans la machine. La composante d'axe q joue le rôle du courant d'induit et permet de contrôler le couple. Avec ce type de commande, on obtient des systèmes d'entraînements performants, capables d'imposer le couple nominal de l'arrêt à la vitesse nominale [19].

Volant d'inertie

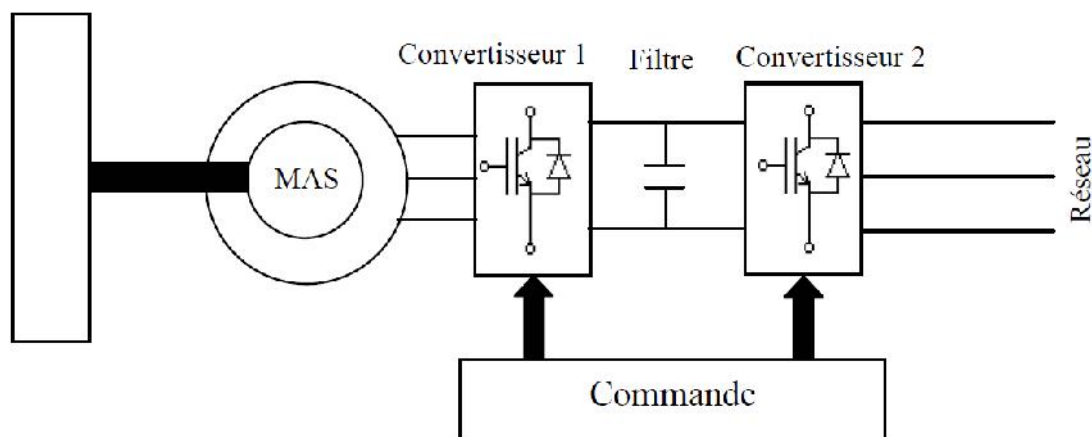


Figure (III.1) : Schémas de principe de stockage inertiel

La figure (III.1) représente le principe de fonctionnement d'un système inertiel de stockage d'énergie électrique.

I.1 Choix du référentiel

Il existe trois référentiels pour la modélisation de la machine asynchrone qui sont :

I.1.1 Référentiel lié au rotor

Il est généralement utilisé dans le cas des régimes transitoires ou la vitesse de rotation est constante :

$$\begin{cases} \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \\ \frac{d\theta_r}{dt} = 0 \end{cases}$$

I.1.2 Référentiel lié au stator

Ce référentiel est utilisé dans cas où la variation de la vitesse de rotation est importante :

$$\begin{cases} \frac{d\theta_s}{dt} = 0 \\ \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \end{cases}$$

I.1.3 Référentiels lié au champ tournant

Il est souvent utilisé dans les problèmes de commande il permet de correspondre des grandeurs continu aux grandeurs sinusoïdales de régime permanent et se traduit par ces conditions :

$$\begin{cases} \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \\ \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r - \omega_r \end{cases}$$

On a opté pour le choix de référentiel lié au champ tournant, puisque notre travail consiste à commander la machine asynchrone à travers un convertisseur statique d'énergie.

I.2 Orientation du flux

L'orientation du flux signifie qu'on souhaite qu'il n'ait qu'une composante sur l'axe direct (d), et ce pour contrôler les termes flux et courant indépendamment pour imposer un couple. il est basé sur l'orientation du flux statorique, rotoriques ou magnétisant selon l'axe d du système de référentiel (dq). Le flux est alors contrôlé par la composante directe du courant statorique I_{sd} . Le couple électromagnétique devient proportionnel à la composante en quadrature I_{sq} . ceci est possible de définir selon les équations magnétisantes trois types de d'orientations [15,13]. qui sont :

I.2.1 Orientation du flux statorique

L'axe d est choisit tel que :

$$\phi_{sd} = \phi_s, \text{ et } \phi_{sq} = 0$$

I.2.2 Orientation du flux magnétisant

L'axe direct d du flux est choisit de façon que :

$$\phi_{md} = \phi_m, \text{ et } \phi_{mq} = 0$$

I.2.3 Orientations du flux rotoriques

L'axe direct d du flux tel que :

$$\phi_{dr} = \phi_r, \text{ et } \phi_{qr} = 0$$

L'étude de ces trois model d'orientations montre que contrôle avec l'orientation du flux statorique et magnétisant fait que le couple tend vers une valeur critique tandis que pour l'orientation du flux rotoriques le couple ne contient pas une valeur critique sauf qu'il faudrait tenir compte de la limitation imposée par le convertisseur statique. D'où la nécessité de choisir le model d'orientation du flux rotoriques.

I.3 Orientations du flux rotoriques

$$C_{em} = p \cdot \frac{M}{L_r} \cdot (\Phi_{rd} \cdot i_{sq} - \Phi_{rq} \cdot i_{sd}) \quad (\text{III.1})$$

L'orientation de flux rotoriques nous donne :

$$\Phi_{rq} = 0 ; \text{ Et } \Phi_{rd} = \Phi_r \quad (\text{III.2})$$

$$C_{em} = p \cdot \frac{M}{L_r} \cdot \Phi_r \cdot i_{sq} \quad (\text{III.3})$$

La stratégie consistera donc à contrôler de façon indépendante le terme Flux et terme Courant pour imposer un couple.

Rappelons que les équations utilisables pour la commande :

$$\begin{cases} \Phi_{rd} = L_r \cdot i_{rd} + M_{rs} \cdot i_{sd} = \Phi_r \\ \Phi_{rq} = L_r \cdot i_{rq} + M_{rs} \cdot i_{sq} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

$$\begin{cases} 0 = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d}{dt} \cdot \Phi_{rd} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \Phi_{rq} \\ 0 = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d}{dt} \cdot \Phi_{rq} + (\omega_s - \omega_r) \cdot \Phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

$$\begin{cases} 0 = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d}{dt} \cdot \Phi_r \\ 0 = R_r \cdot i_{rq} + (\omega_s - \omega_r) \cdot \Phi_r \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

I.4 Estimation de Φ_r

Seules les grandeurs statoriques sont facilement accessibles pour les grandeurs rotoriques, il faut donc l'estimer à partir des grandeurs statoriques.

$$\begin{cases} L_r \cdot i_{rd} + M_{rs} \cdot i_{sd} = \Phi_r \\ R_r \cdot i_{rd} + \frac{d}{dt} \cdot \Phi_r = 0 \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

$$i_{rd} = -\frac{1}{R_r} \cdot \frac{d}{dt} \cdot \Phi_r \quad (\text{III.8})$$

$$\Phi_r = -\frac{L_r}{R_r} \cdot \frac{d}{dt} \cdot \Phi_r + M \cdot i_{sd} \quad (\text{III.9})$$

$$\Phi_r + \frac{L_r}{R_r} \cdot \frac{d}{dt} \cdot \Phi_r = M \cdot i_{sd} \quad (\text{III.10})$$

Avec la transformation de Laplace on aura :

$$\Phi_r \cdot [1 + P \cdot \tau_r] = M \cdot i_{sd} \quad (\text{III.11})$$

$$\Phi_r = i_{sd} \cdot \frac{M}{[1 + P \cdot \tau_r]} \quad (\text{III.12})$$

$$\Phi_{rest} = i_{sd} \cdot \frac{M}{[1 + P \cdot \tau_r]} \quad (\text{III.13})$$

I.5 Estimation de θ_s et θ_{sr} .

$$\begin{cases} R_r \cdot i_{rq} + \omega_{sr} \cdot \Phi_r = 0 \\ L_r \cdot i_{rq} + M \cdot i_{sq} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

$$\omega_{sr} = -\frac{R_r}{\Phi_r} \cdot I_{rq} \quad (\text{III.15})$$

$$I_{rq} = -\frac{M}{L_r} \cdot I_{sq} \quad (\text{III.16})$$

On remplace (III.16) dans (III.15) donne on trouve

$$\omega_{sr} = -\frac{M}{\tau_r \cdot \Phi_r} \cdot I_{sq} \quad (\text{III.17})$$

$$\omega_{sr-est} = \frac{M}{\tau_r \cdot \Phi_r} \cdot I_{sq} \quad (\text{III.18})$$

$$\theta_{sr-est} = \int \frac{M}{\tau_r \cdot \Phi_{rest}} \cdot I_{sq} + \theta_{sr0} \quad (\text{III.19})$$

$$\theta_{sest} = \theta_r + \theta_{sr-est} \quad (\text{III.20})$$

I.6 Le découplage

✓ Pour V_{sd}

$$V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d}{dt} \cdot \Phi_{sd} - \omega_s \cdot \Phi_{sq} \quad (\text{III.21})$$

Nous allons exprimer cette tension en fonction de deux grandeurs utiles à la maîtrise du couple (Φ_r, i_{sq}) .

$$I_{sd} = \frac{[1 + P \cdot \tau_r]}{M} \cdot \Phi_r \quad (\text{III.22})$$

D'autres parts :

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = L_s \cdot i_{sd} + M \cdot i_{rd} \\ \Phi_r = L_r \cdot i_{rd} + M \cdot i_{sd} \end{cases} \quad (\text{III.23})$$

On obtient :

$$i_{rd} = \frac{1}{L_r} \cdot [\Phi_r - M \cdot i_{sd}] \quad (\text{III.24})$$

$$\Phi_{sd} = L_s \cdot i_{sd} + \frac{M}{L_r} \cdot [\Phi_r - M \cdot i_{sd}] \quad (\text{III.25})$$

$$\Phi_{sd} = \left[1 - \frac{M^2}{L_r \cdot L_s} \right] \cdot L_s \cdot i_{sd} + \frac{M}{L_r} \cdot \Phi_r \quad (\text{III.26})$$

$$\Phi_{sd} = L_s \cdot \sigma \cdot i_{sd} + \frac{M}{L_r} \cdot \Phi_r \quad (\text{III.27})$$

Avec :

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_r \cdot L_s} \quad (\text{III.28})$$

$$\begin{cases} \Phi_{sq} = L_s \cdot i_{sq} + M \cdot i_{rq} \\ \Phi_{rq} = L_r \cdot i_{rq} + M \cdot i_{sq} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.29})$$

$$i_{rq} = -\frac{M}{L_r} \cdot i_{sq} \quad (\text{III.30})$$

$$\Phi_{sq} = L_s \cdot \left[1 - \frac{M^2}{L_r \cdot L_s} \right] \cdot i_{sq} \quad (\text{III.31})$$

$$\Phi_{sq} = L_s \cdot \sigma \cdot i_{sq} \quad (\text{III.32})$$

$$V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d}{dt} \cdot \left[L_s \cdot \sigma \cdot i_{sq} + \frac{M}{L_r} \cdot \Phi_r \right] - \omega_s \cdot L_s \cdot \sigma \cdot i_{sq} \quad (\text{III.33})$$

A partir de la transformation de Laplace :

$$V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + P \cdot \left[L_s \cdot \sigma \cdot I_{sd} + \frac{M}{L_r} \cdot \Phi_r \right] - \omega_s \cdot L_s \cdot \sigma \cdot I_{sq} \quad (\text{III.34})$$

$$V_{sd} = R_s \cdot \frac{[1 + P \cdot \tau_r]}{M} \cdot \Phi_r + L_s \cdot \sigma \cdot P \cdot \frac{[1 + P \cdot \tau_r]}{M} \cdot \Phi_r + \frac{M}{L_r} \cdot \Phi_r \cdot P - \omega_s \cdot L_s \cdot \sigma \cdot I_{sq} \quad (\text{III.35})$$

$$V_{sd} = \left[(R_s + L_s \cdot \sigma \cdot P) \cdot \frac{[1 + P \cdot \tau_r]}{M} + \frac{M}{L_r} \cdot P \right] \cdot \Phi_r - \omega_s \cdot L_s \cdot \sigma \cdot I_{sq} \quad (\text{III.36})$$

✓ Pour V_{sq}

$$V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d}{dt} \cdot \Phi_{sq} + \omega_s \cdot \Phi_{sd} \quad (\text{III.37})$$

$$V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d}{dt} \cdot [L_s \cdot \sigma \cdot i_{sq}] + \omega_s \cdot \left[L_s \cdot \sigma \cdot i_{sd} + \frac{M}{L_r} \cdot \Phi_r \right] \quad (\text{III.38})$$

$$V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + L_s \cdot \sigma \cdot I_{sq} \cdot P + \omega_s \cdot \left[L_s \cdot \sigma \cdot \frac{[1 + P \cdot \tau_r]}{M} \cdot \Phi_r + \frac{M}{L_r} \cdot \Phi_r \right] \quad (\text{III.39})$$

$$V_{sq} = [R_s + L_s \cdot \sigma \cdot P] \cdot I_{sq} + \omega_s \cdot \left[L_s \cdot \sigma \cdot \frac{[1 + P \cdot \tau_r]}{M} + \frac{M}{L_r} \cdot P \right] \cdot \Phi_r \quad (III.40)$$

On remarque que même si on orienter le flux, les deux axes directes et quadratiques sont couplés. Pour cela on fait le découplage par la méthode suivante :

$$\Phi_r = A \cdot [V_{sd} + B \cdot I_{sq}] \quad (III.41)$$

$$I_{sq} = C \cdot [V_{sq} - D \cdot \Phi_r] \quad (III.42)$$

$$A = \frac{1}{\left[(R_s + \sigma \cdot L_s \cdot P) \cdot \frac{(1 + \tau_r \cdot P)}{M} + \frac{M}{L_r} \cdot P \right]} \quad (III.43)$$

$$B = \omega_s \cdot \sigma \cdot L_s \quad (III.44)$$

$$C = \frac{1}{(R_s + \sigma \cdot L_s \cdot P)} \quad (III.45)$$

$$D = \omega_s \cdot \left[\sigma \cdot L_s \cdot \frac{(1 + \tau_r \cdot P)}{M} + \frac{M}{L_r} \right] \quad (III.46)$$

La figure montre le schéma de découplage.

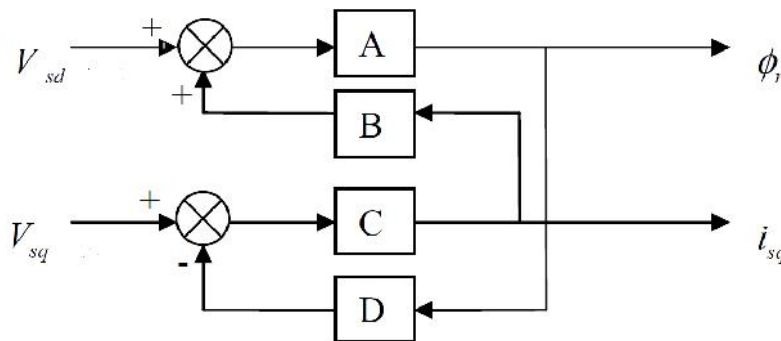


Figure (III.2) : Schéma de découplage.

II Calcul de régulateur PI

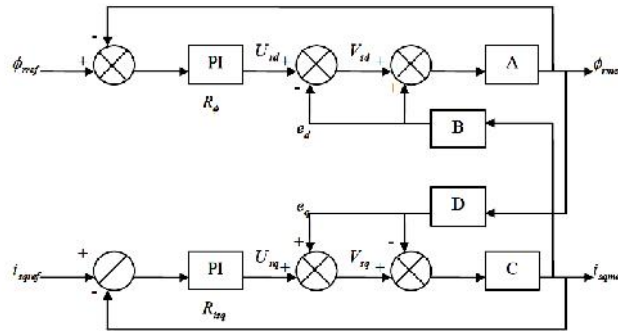


Figure (III.3) : Schéma de régulation de la commande vectorielle

II.1 Calcul de régulateur de flux

$$R_{\Phi} = k_{\Phi} \cdot \frac{1 + \tau_1 \cdot P}{P} \quad (III.47)$$

On a :

$$A = \frac{1}{\left[(R_s + \sigma \cdot L_s \cdot P) \cdot \frac{(1 + \tau_r \cdot P)}{M} + \frac{M}{L_r} \cdot P \right]} \quad (III.48)$$

$$A = \frac{M}{R_s} \cdot \left[\frac{1}{1 + \left(\tau_r + \sigma \cdot \tau_s + \frac{M^2}{L_r \cdot R_s} \right) \cdot P + \tau_r \cdot \tau_s \cdot \sigma \cdot P^2} \right] \quad (III.49)$$

$$A = \frac{M}{R_s} \cdot \left[\frac{1}{(1 + \tau_1 \cdot P) \cdot (1 + \tau_2 \cdot P)} \right] \quad (III.50)$$

Avec

$$\tau_2 = \frac{\left(\tau_r + \sigma \cdot \tau_s + \frac{M^2}{L_r \cdot R_s} \right)}{(\tau_r \cdot \tau_s \cdot \sigma + 1)} \cdot \tau_r \cdot \tau_s \cdot \sigma \quad (III.51)$$

$$\tau_1 = \frac{\left(\tau_r + \sigma \cdot \tau_s + \frac{M^2}{L_r \cdot R_s} \right)}{(\tau_r \cdot \tau_s \cdot \sigma + 1)} \quad (\text{III.52})$$

$$\tau_s = \frac{L_s}{R_s} \quad (\text{III.53})$$

$$\tau_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (\text{III.54})$$

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_r \cdot L_s} \quad (\text{III.55})$$

On adapte ce correcteur de façon à compensé la constante de temps dominantes τ_1

$$R_\Phi \cdot A = \frac{M}{R_s} \cdot \frac{1}{(1 + \tau_2 \cdot P)} \cdot \frac{k_\Phi}{P} = \frac{k}{(1 + \tau_2 \cdot P) \cdot P} \quad (\text{III.56})$$

$$k = \frac{k_\Phi \cdot M}{R_s} \quad (\text{III.57})$$

$$\frac{\Phi_{rmes}}{\Phi_{ref}} = \frac{\frac{k}{(1 + \tau_2 \cdot P) \cdot P}}{1 + \frac{k}{(1 + \tau_2 \cdot P) \cdot P}} = \frac{1}{1 + 2 \cdot \alpha \cdot \tau_\Phi \cdot P + \tau_\Phi^2 \cdot P^2} \quad (\text{III.58})$$

Avec :

$$\tau_\Phi = \sqrt{\frac{\tau_2}{k}} \quad (\text{III.59})$$

$$\alpha = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{k \cdot \tau_2}} \quad (\text{III.60})$$

$$k = \frac{1}{4 \cdot \alpha^2 \cdot \tau_2} \quad (\text{III.61})$$

En imposant $\alpha=1$ on aura la réponse la plus rapide et sans dépassement d'où :

$$k = \frac{1}{4.\tau_2} \quad (\text{III.62})$$

On aura donc :

$$k_\phi = \frac{k.R_s}{M} \quad (\text{III.63})$$

II.2 Calcul de régulateur de courant

$$R_{isq} = k_{isq} \cdot \frac{1 + \tau.P}{P} \quad (\text{III.64})$$

$$C = \frac{1}{R_s + \sigma.L_s.P} = \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + \sigma.\tau_s.P} \quad (\text{III.65})$$

$$\tau = \sigma.\tau_s \quad (\text{III.66})$$

$$R_{isq}.C = \frac{k_{isq}}{R_s.P} = \frac{k'}{P} \quad (\text{III.67})$$

$$k' = \frac{k_{isq}}{R_s} \quad (\text{III.68})$$

$$\frac{i_{sqmes}}{i_{sqref}} = \frac{1}{1 + \tau_q.P} \quad (\text{III.69})$$

$$\tau_q = \frac{1}{k'} \quad (\text{III.70})$$

En impose $\tau_q \ll$ la plus petite constante de temps de ce système $\tau_q = \frac{1}{10}.\tau_s$:

$$k' = \frac{1}{\tau_q} \quad (\text{III.71})$$

Donc on aura :

$$k_{isq} = \frac{R_s}{\tau_q} \quad (\text{III.72})$$

III Contrôle du SISE associe au générateur éolien

III.1 Introduction sur le contrôle du SISE associe au générateur éolien

Dans tous les systèmes générateurs de puissance électrique soit le réseau de distribution d'électricité ou bien avec un générateur éolien, la puissance fournie n'est pas toujours stable [1,9]. Car il existe des phénomènes non désirés au sein des réseaux de distribution d'énergie électrique. Cela exige une présence d'un ou plusieurs dispositifs de stockage afin d'assurer une alimentation sans coupure. en prenant exemple un générateur éolien qui génère une puissance variable cause du aux variations de la vitesse du vent, comme montré dans figure [III.4].ce qui amène a stocker le surplus d'énergie et la déstocker au déficit d'énergie.

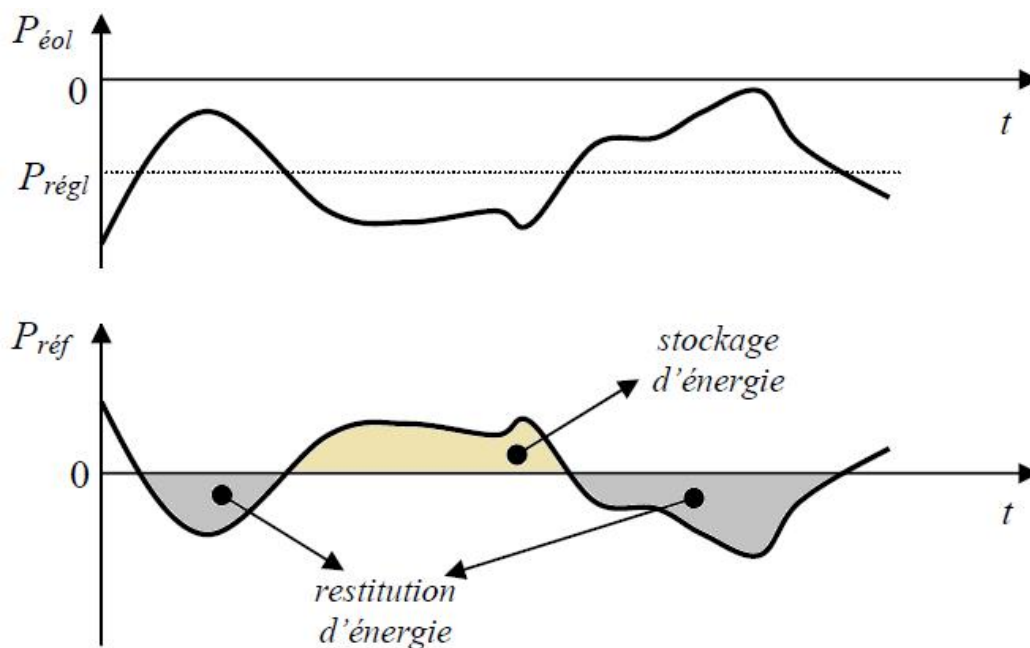


Figure (III.4) : Le principe de contrôle d'un SISE associe au générateur éolien.

$$P_{ref} = P_{reg} - P_{éol} \quad (\text{III-73})$$

III.2 Calcul de la vitesse de référence

L'énergie est l'intégrale de la puissance en fonction du temps, Donc, en intégrant la puissance de référence déterminée par (III.73) on obtient une énergie. En faisant la somme de cette énergie avec l'énergie stockée dans le volant d'inertie, on obtient l'énergie de référence pour le SISE [15] :

$$E_{ref} = E_c^{t1} + \int_{t1}^{t2} P_{ref} . dt \quad (III.74)$$

E_c^{t1} : Représente l'énergie initial du volant d'inertie.

Remplaçant l'expression (III.74) dans (II.1), on obtient la vitesse de référence pour le volant d'inertie et, implicitement, pour la machine électrique du SISE :

$$\Omega_{ref} = \sqrt{\frac{2.E_{cref}}{J}} \quad (III.75)$$

La vitesse de référence est limitée afin de maintenir la MAS dans la zone de fonctionnement à puissance constante et ne pas dépasser la vitesse maximale du volant d'inertie [13.15].

III.3 Calcul de flux de référence

Le flux de référence est calculé à partir de la vitesse :

$$\Phi_{ref} = \begin{cases} \Phi_{nom} \rightarrow \text{if } |\Omega| \leq \Omega_{nom} \\ \Phi_{nom} \cdot \frac{\Phi_{nom}}{|\Omega|} \rightarrow \text{if } |\Omega| > \Omega_{nom} \end{cases} \quad (III.76)$$

Φ_{nom} : Flux nominal de MAS

Ω_{nom} : Vitesse nominale de la MAS

III.4 Calcul de régulateur de vitesse

Nous avons

$$\Omega = \frac{1}{J.P+B} \cdot (C_{em} - C_r) \quad (\text{III.77})$$

Dans le cas de l'utilisation d'un régulateur PI classique, Ω s'écrit alors

$$\Omega = \frac{1}{J.P+B} \cdot \left(\frac{K_i + K_p.P}{P} \right) (\Omega_{ref} - \Omega_{mes}) - \frac{1}{J.P+B} \cdot C_r \quad (\text{III.78})$$

Soit :

$$\Omega = \frac{K_i + K_p.P}{J.P^2 + (K_p + B).P + K_i} \cdot \Omega_{ref} - \frac{P}{J.P^2 + (K_p + B).P + K_i} C_r \quad (\text{III.79})$$

Cette fonction de transfert possède une dynamique de deuxième ordre. En identifiant le dénominateur à la forme canonique $\frac{1}{1 + \frac{2.\xi}{\omega_n}.P + \frac{1}{\omega_n^2}.P^2}$ nous avons à résoudre le système

d'équation suivant :

$$\begin{cases} \frac{J}{K_i} = \frac{1}{\omega_n^2} \\ \frac{2.\xi}{\omega_n} = \frac{K_p + B}{K_i} \end{cases} \quad (\text{III.80})$$

Pour un coefficient d'amortissement ξ de 1 nous avons $\omega_n.t_{rep} \approx 4.75$, t_{rep} représente le temps de réponse en vitesse de système. Tableau(III.1) :

ξ	$\omega_n.t_{rep}(5\%)$
0.4	7.7
0.5	5.3
0.6	5.2
0.7	3
1	4.75

Les paramètres de régulateur PI sont alors les suivant :

$$K_i = J \cdot \left(\frac{4.75}{t_{rep}} \right)^2$$

$$K_p = J \cdot \frac{9.5}{t_{rep}}$$

Conclusion

La machine asynchrone est étudiée et modélisée dans ce chapitre afin d'obtenir des meilleures performances pour l'utilisation voulu toute en en essayons de la comparer a la machine a courant continu en faisant un découplage entre le flux et le couple. Puis calculer toutes les grandeurs de référence d'entrée reçue par le système perturbé afin de calculer les régulateurs nécessaires pour une meilleure commande de l'ensemble du système.

Dans le chapitre suivant, nous allons simplifier l'ensemble du système en le simulant sous MATLAB/SIMULINK.

Chapitre IV

*Simulation et interprétations
des résultats*

Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter la partie expérimentale et la partie de simulation de l'ensemble du système modélisé dans les chapitre précédent (la machine asynchrone, le convertisseur statique ainsi que la commande de tous le système) en utilisant des références variables de puissance et du flux.

I Résultats expérimentaux obtenu à l'unité de production TCHIN-LAIT

Cette partie est réservée pour les résultats expérimentaux obtenu a l'unité de production TCHIN-LAIT (CANDIA), malheureusement on a des problèmes sur les paramètres du SISE, mais on a fait une courbe de courant et de tensions pour un stockage et de déstockage avec des valeurs dans un fichier enregistrés avec le logiciel du système SISE appelé CSView. Par la suite nous avons opté pour étude théorique.

- **Courbes obtenues**

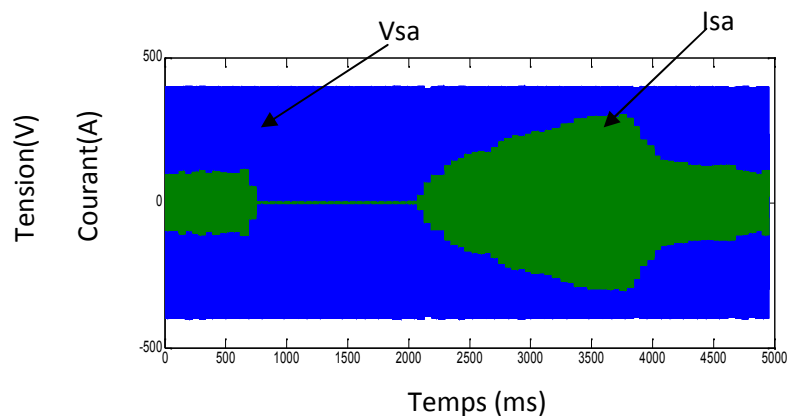


Figure (IV.1):Allure de la tension et du courant

On remarque dans la figure (IV.1) que la machine travail en deux fonctionnements distincts qui sont représentées dans les deux figures ci-dessus

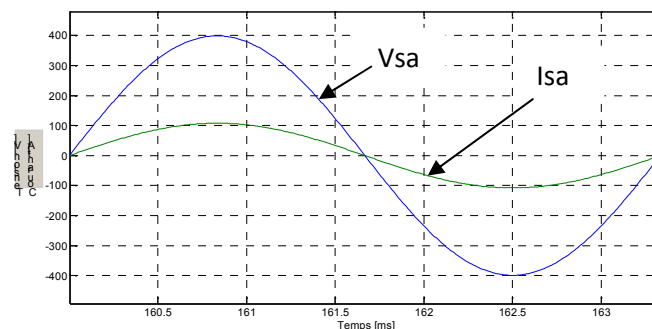


Figure (IV.1a) : Zoom de l'allure de tension et du courant (stockage)

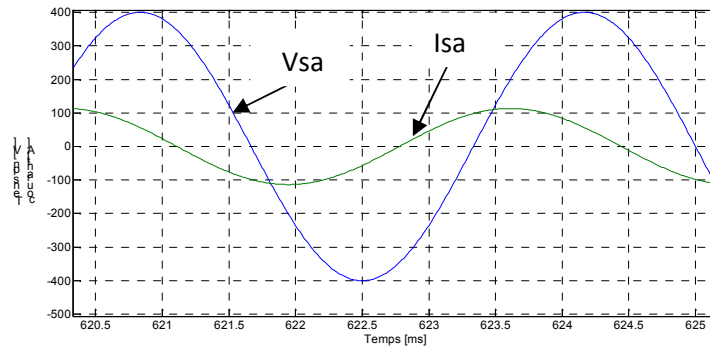


Figure (IV.1b) : Zoom de l'allure de tension et du courant (déstockage)

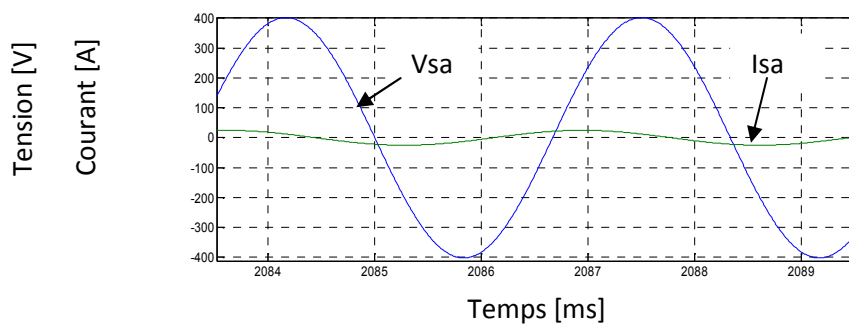


Figure (IV.1c) : Zoom de l'allure de tension et du courant

La figure (IV.1a) représente le zoom de la tension et du courant sur l'intervalle de transition. On remarque bien que la tension et le courant sont en phase. Cela veut dire que la qu'il n'y a ni stockage ni déstockage.

II Simulation du système de stockage

II.1 Schéma de simulation

La figure ci-dessous représente le schéma de simulation du SISEs en boucle fermée. En utilisant des références variables de puissance et du flux.

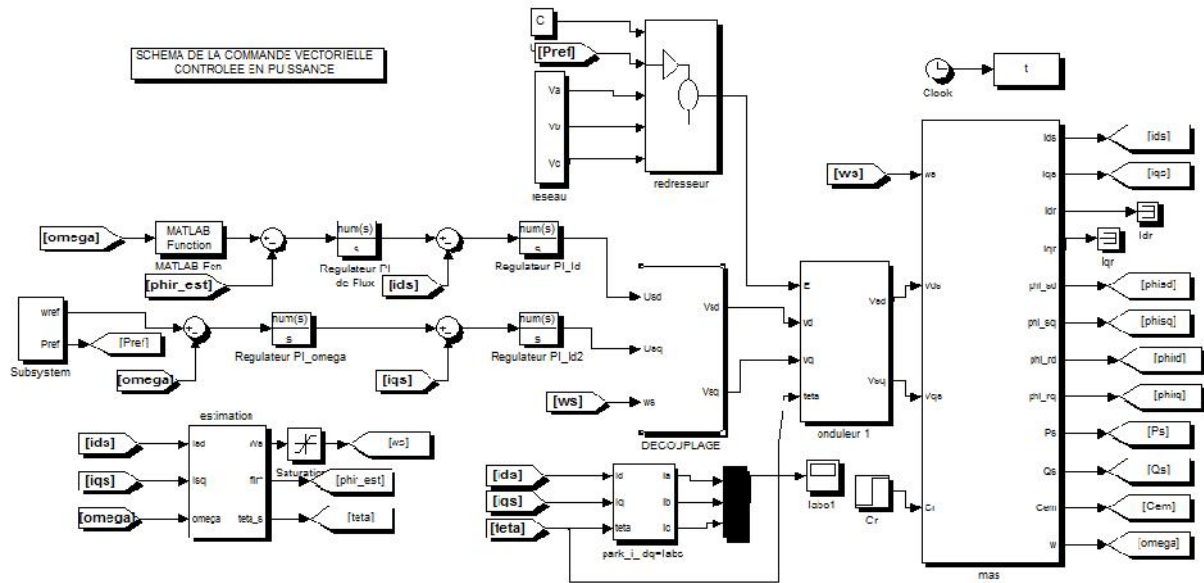


Figure (IV.2) : Schéma du système contrôlée en puissance

II. 2 Discussions des résultats de simulation

Après la simulation de tout le système nous avons relevé les résultats représentés dans les différentes figures suivantes :

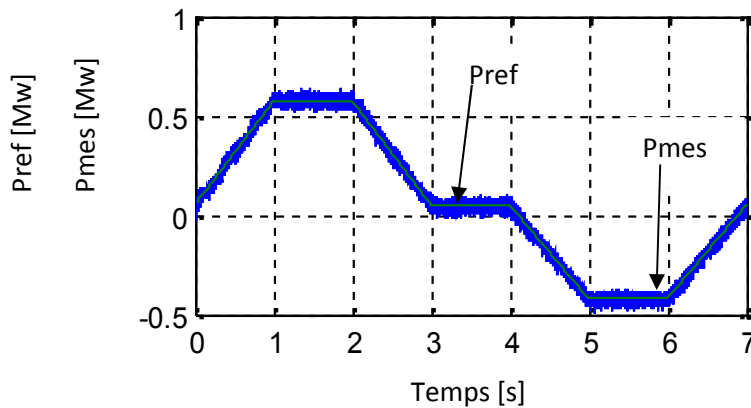


Figure (IV.3) : Allure de la puissance de référence et la puissance mesurée

La figure (IV.3) représente la puissance de référence injectée par éolienne vers le réseau qui sera la grandeur de control du notre système.

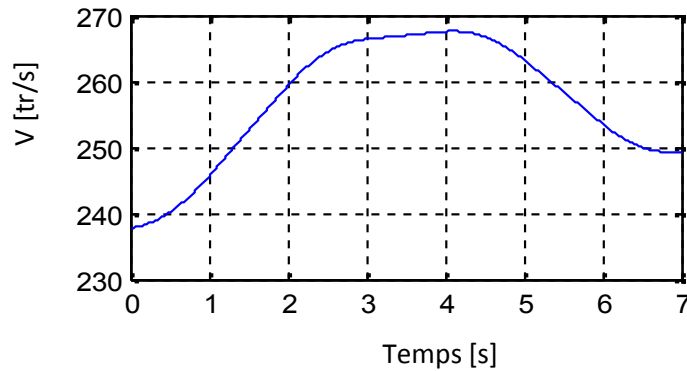


Figure (IV.4) : Allure de la vitesse de rotation du volant

La figure (IV.4) qui représente l'allure de la vitesse du volant après l'injection de la puissance variable de l'éolienne représenté dans la figure (IV.4), On remarque bien que la machine fonctionne en deux régimes distinct (moteur et en générateur), c'est à dire lorsque cette puissance est positive la vitesse de la machine augmente ce qui engendre le stockage de l'énergie dès que cette puissance devient négative la vitesse de la machine diminue ce qui engendre la restitution de l'énergie stockée auparavant.

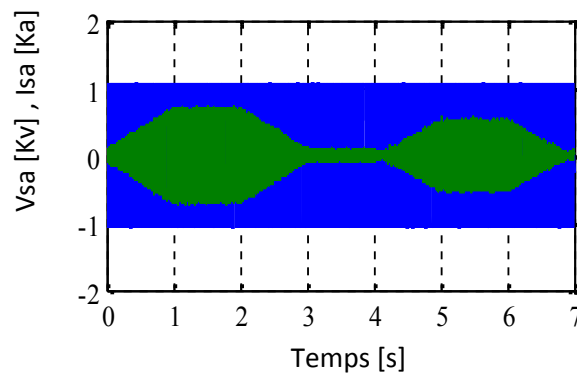


Figure (IV.5) : Allures de tension et du courant

On remarque dans la figure (IV.5) que la machine travail en deux fonctionnements distincts qui sont représentées dans les deux figures ci-dessus

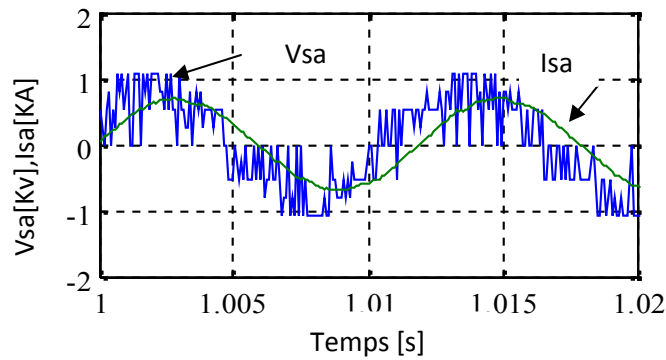


Figure (IV.5a) : Zoom Allures de tension et du courant

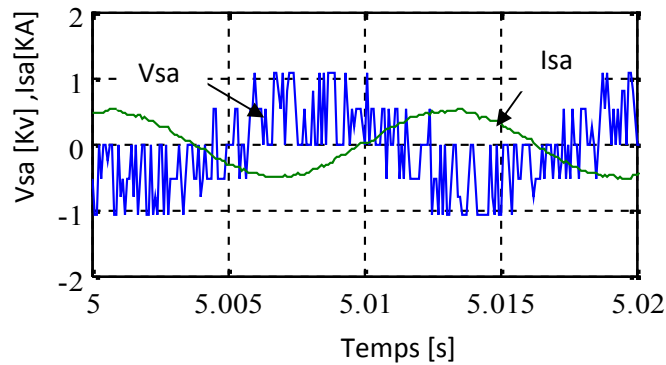


Figure (IV.5b) : Zoom Allures de tension et du courant

La figure (IV.5a) représente le fonctionnement en moteur de la machine c'est à dire que le courant est déphasé d'un angle ϕ par rapport à la tension

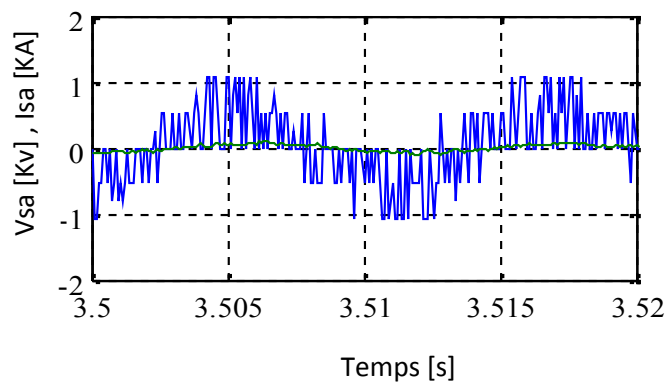


Figure (IV.5c) : Zoom Allures de tension et du courant.

La Figure (IV.5b) représente le zoom sur l'intervalle de transition (stockage déstockage). On remarque bien que, lors de la transition que le courant de et la tension été en phase cela veut dire que il n'y pas de stockage ou déstockage.

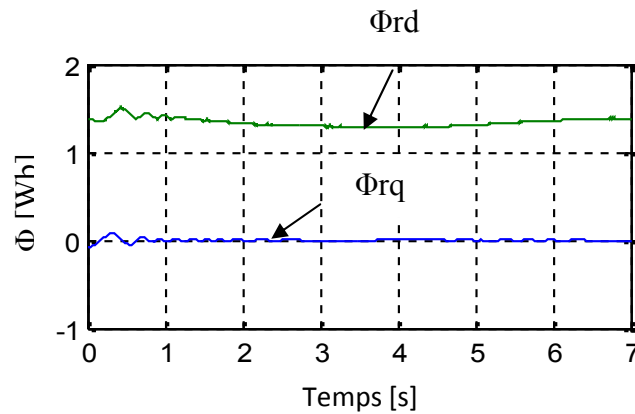


Figure (IV.6) : Allure des flux rotorique de la machine

La figure (IV.6) l'allure du flux rotorique et statorique, on voit bien que le flux Φ_{rq} est pratiquement nul, et le flux Φ_{rd} a suit exactement le flux de référence. Ce qui implique que notre commande travail a flux rotorique orienté.

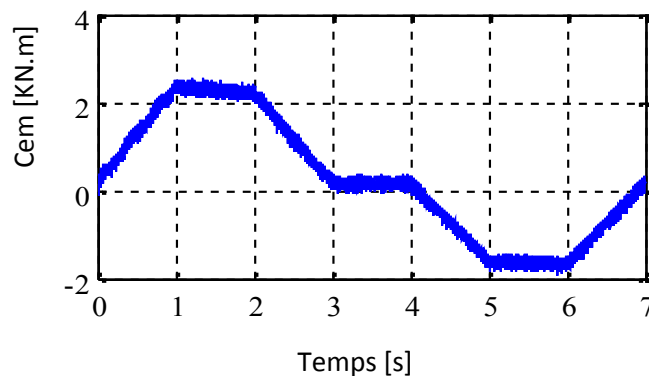


Figure (IV.7) : Allure du couple C_{em}

Cette courbe montre que le couple suit l'allure de la puissance de référence.

- Lorsque la puissance de référence augmente le couple de la machine augmente ce la veut dire que la vitesse augmente la machine fonctionne en moteur donc elle emmagasine de l'énergie.
- Lorsque la puissance de référence diminue le couple de la machine diminue et la vitesse aussi donc la machine restitue de l'énergie.

Conclusion

Le travail, présenté dans ce chapitre est consacré à la simulation du système inertiel de stockage d'énergie électrique avec l'injection d'une puissance de référence.

Les résultats de simulation présentés montrent le bon fonctionnement du système de stockage, en effet comme l'énergie est proportionnelle au carré de la vitesse, le SISE emmagasine de l'énergie par conséquent une augmentation de la vitesse et lors du déstockage la vitesse diminue.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le principal but de ce travail a été de faire une étude sur les systèmes inertiels de stockage d'énergie (SISE). Cette étude porte sur la modélisation du SISE en exploitant la commande en puissance, actuellement la machine asynchrone constitue la meilleure solution pour le choix de la machine électrique du SISE en raison de ses possibilités de fonctionnement à puissance constante sur une large plage de vitesse.

On a commencé par donner les différents types de stockages soit le stockage à long terme ou à court terme qui existent, puis on a présenté les différentes machines qui sont utilisées dans les SISEs, ainsi que le convertisseur utilisé dans ce système.

Le point premier de notre travail nous a permis d'étudier d'une manière générale, la constitution du fonctionnement de chaque bloc du système de stockage d'énergie électrique (machine, convertisseur et le volant).

Le deuxième point de notre travail nous a permis de faire une étude sur le système inertiel de stockage d'énergie SISE. Cette étude porte sur le calcul de résistance, le choix du matériau et la modélisation du volant d'inertie ainsi que la modélisation de la machine asynchrone et du convertisseur de puissance.

Le troisième point nous a permis de commander la machine vectoriellement en choisissant le référentiel et l'orientation du flux approprié. Ensuite, on a opté pour le calcul des références et des régulateurs.

Le dernier point nous a permis de voir la simulation et les résultats de simulation du système de stockage.

En perspectives plusieurs points restent à explorer en détails :

- Le premier point, consiste à faire une étude du bilan énergétique du SISE, ainsi que les différentes pertes dans la MAS et dans le convertisseur statique.
- Le deuxième point est d'établir une stratégie de commande beaucoup plus adaptée pour le système étudié comme la commande optimale.
- Explorer d'autres utilisations des SISEs pour d'autres applications, comme par exemple, leurs utilisations pour les voitures hybrides ou pour les utilisations à UPS.

Références Bibliographiques



Created with

 **nitro**^{PDF} professional

download the free trial online at nitropdf.com/professional

- [1] : L. LECLERCQ : «Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes». Thèse doctorat 2004.
- [2] : N. Bernard Laboratoire IREENA- Saint-Nazaire « Stockage électromécanique d'énergie (cinétique ou inertiel) ». Antenne de Bretagne de l'ENS de Cachan - Bruz, Laboratoire SATIE. Toulouse, 2011.
- [3] : G. CIMUCA. «Système inertiel de stockage d'énergie associée à des générateurs éoliens». Ecole nationale supérieure d'art et métiers, centre de Lille thèse doctorat, 2005.
- [4] : B. Dakyo : « Couplage et stockage de l'énergie électrique».
- [5] : ECRIN entreprise documents www.ecrin.asso.fr
- [6] : Active Power. www.activepower.com
- [7] : CHLORIDE POWER www.chloridepower.com
- [8] : S. L. CAPITANEANU «Optimisation de la fonction MLI d'un onduleur de tension deux-niveaux» l'ENSEEIH, TOULOUSE. 2002
- [9] : R.DRARENI.Z.OUAHRANI. « Commande d'un aérogénérateur à base d'une machine asynchrone à cage connectée au réseau à travers un convertisseur AC-DC-AC ». thèse polytechnique Alger 2009.
- [10] : N. BERNARD. «Conception, dimensionnement et commande d'un moteur/générateur synchrone à excitation homopolaire et à bobinages dans l'entrefer pour accumulateur électromécanique d'énergie» TOULOUSE, 2001.
- [11] : J. Park. Simple Flywheel Energy Storage using Squirrel-Cage Induction Machine for DC Bus Microgrid Systems. University of Colorado Denver, 2010
- [12] : F POITIERS «étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne» Thèse de Doctorat Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, 2003
- [13] : L BEKHOUCHE. «Commande par linéarisation entrées/sorties du couple et du flux de la machine asynchrone». Thèse magister setif 2009 .
- [14] : Salish Samineni: Modeling and Analysis of a Flywheel Energy Storage System for Voltage Sag Correction. Degree of Master College of Graduate Studies University of Idaho 2003
- [15] : 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» thèse magister 2007
- [16] : S. CANAT. FAUCHER «Simulation temporelle d'un démarrage d'une machine asynchrone à cage».

- [17] : B B. Plater: A mechanical battery for power quality flywheel energy storage.
- [18] : F. Kendouli, K. Nabti, K. Abed et H. Benalla «Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation»., Constantine, Algérie 2011
- [19] : S. KHOJET EL KHIL. «Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA). Année 2006.

Annexes

Paramètres de la machine asynchrone :

L'inertie de la machine $J_m = 0.04 \text{ Kg}\cdot\text{m}^2$

Resistance statorique $R_s = 0.7346 \text{ ohm}$

Resistance rotorique $R_r = 0.7633 \text{ ohm}$

Inductance cyclique statorique $L_s = 146.86 * 10^{-3} \text{ H}$

Inductance cyclique rotorique $L_r = 146.02 * 10^{-3} \text{ H}$

Mutuelle inductance $M = 141 * 10^{-3} \text{ H}$

Nombre de paires de pôles $P = 2$

Frottements $f = 0.001 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rd}/\text{s}$

Paramètres de volant :

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

Inertie totale $J = 1.7 \text{ Kg}\cdot\text{m}^2$

Paramètres du réseau :

Tension du réseau $V_{eff} = 220 \text{ V}$

Fréquence du réseau $f = 50 \text{ Hz}$

Resistance du réseau $r = 1 \text{ ohm}$

Inductance du réseau $l = 0.001 \text{ H}$