



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

République **A**lgérienne **D**émocratique et **P**opulaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane MIRA- BEJAIA
Faculté de Technologie
Département de Génie Électrique
Spécialité : Electromécanique

En vue de l'obtention du diplôme master en Electromécanique
Options : Electromécanique

APPLICATION D'UNE
COMMANDE NON LINEAIRE
DANS LE SYSTEME DE
STOCKAGE INERTIEL

Réalisé par :

- ❖ M^r CHABANE Sabri
- ❖ M^r AMMARI Massinissa

Encadré par :

Dr S .TARAFT

Promotion 2023/2024

Remerciement

*Je souhaite avant tout exprimer ma profonde gratitude envers Dieu Le tout puissant, qui m'a accordé le courage, la volonté, la patience et la santé tout au long de ces années, et qui a rendu possible la réalisation de ce travail en me guidant vers sa bonne conduite. Je tiens également à remercier mon promoteur **Dr TARAFT Saci**, enseignant à l'université de Bejaia, pour avoir accepté de m'encadrer, pour sa disponibilité et son soutien.*

Je présente mes respects et ma reconnaissance aux membres du jury qui ont bien voulu évaluer ce travail. Je suis également reconnaissant envers toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'achèvement de ce travail modeste.

Dédicaces

Du profond de mon cœur, je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chères.

A la mémoire de mon grand-père et de ma grand-mère qui m'ont toujours poussé et motivé dans mes études.

A ma chère mère

Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

A mon très cher père

Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager. Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

A mon oncle Baba Idris et sa femme Imma Nadia qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance.

A mon très cher frère Ramzi et ma très cher sœur Chaima.

A mes amis : Kines, Redha, Sifou, Midou, Nadjim.

A tous mes collègues et tous ceux dont les noms ne figurent pas sur cette liste.

SABRI

Dédicaces

En l'honneur de Dieu le Miséricordieux, je dédie ce travail à :

Mes très chers parents :

Leurs encouragements chaleureux et leurs sacrifices inestimables ont créé un environnement propice à la poursuite de mes études. Aucune dédicace ne saurait exprimer pleinement mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers eux. Je prie le Très-Haut de les bénir et de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.

Ma chère grand-mère :

Pour tout l'amour, le soutien et les encouragements que tu m'as apportés tout au long de mon parcours. Ton courage, ta sagesse et ta bienveillance m'ont inspiré à persévérer et à donner le meilleur de moi-même

Mes chères sœurs : Lilia et Fadia.

Mon cher frère : Chihab.

Mes précieux amis : Aimad, Bilel, Lounes et Riad.

A toute la promotion électromécanique 2023/2024.

Que ce travail soit une source de fierté pour tous ceux qui m'ont soutenu dans cette aventure académique.

MASSINISSA

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1 : Coefficient de forme de quelques géométries 13

LISTE DES ABREVIATION

STEP : Station de transfert d'énergie par pompage.

SISE : Système inertiel de stockage d'énergie.

FOC : Commande par orientation de flux.

MSAP : Machine Synchrone à Aimant Permanent.

DSP : Processeur de signal numérique

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsions.

CMG : Commande par modes glissants.

SMC : Sliding mode control.

AC : Courant alternatif.

DC : Courant continu.

a, b, c : Indices correspondants aux trois phases du rotor.

d, q : Composantes de Park directes et quadrature.

LISTE DES FIGURES

Chapitre I :

Figure I.1 : Schéma d'une station de stockage hydraulique.....	2
Figure I.2 : Principe d'une station de stockage à air comprimé	3
Figure I.3 : Principe d'une station de stockage thermique	4
Figure I.4 : Le stockage électrochimique de l'énergie	4
Figure I.5 : Stockage dans des batteries électrochimiques	5
Figure I.6 : Schéma de stockage par chaleur sensible.....	6
Figure I.7 : Stockage dans des batteries à circulation	6
Figure I.8 : Les condensateurs	7
Figure I.9 : Les super condensateurs.....	7
Figure I.10 : Supraconducteur	8
Figure I.11 : Fonctionnement d'une pile à combustible	9
Figure I.12 : Schéma du principe d'une station de transfert d'énergie par pompage	9
Figure I.13 : Principaux composants d'un accumulateur inertiel.....	10

Chapitre II :

Figure II.1 : Principe de fonctionnement d'un système inertiel de stockage d'énergie .	11
Figure II.2 : Schéma global de l'association MSAP- Convertisseur.....	17
Figure II.3 : Redresseur à diodes	18
Figure II.4 : Schéma du filtre	19
Figure II.5 : Onduleur de tension triphasé	20

Chapitre III :

Figure III.1 : Principe de la commande vectorielle	23
Figure III.2 : Schéma de principe de MLI sinus-triangle	24

Chapitre IV :

Figure IV.1 : Fonction du signe	28
Figure IV.2 : Commande adoucie	29
Figure IV.3 : Schéma bloc de commande vectorielle par mode de glissement	33
Figure IV.4 : Vitesse de rotation du volant et sa référence	34
Figure IV.5 : Puissance active de stockage et sa référence	35
Figure IV.6 : Courants direct I_d et en quadrature I_q et leur références	35
Figure IV.7 : Couple électromagnétique et couple résistant	36

LISTE DES NOTATIONS ET SYMBOLES :

Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents :

V_d, V_q : Les tensions statorique dans le repère dq (V)

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

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

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

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

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

C_r : Couple résistant (N.m)

ω : Vitesse mécanique (rad/s)

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

V_{dc} : Tension bus continue (V)

i_a, I_b, i_c : Courants alternative (A)

I_c : Courant traversant la capacité (A)

T : Transformation de Park

C_{em} : Couple électromagnétique (N.m)

L : inductance (H)

C : Condensateur (C)

K : Interrupteur du demi-bras haut

U : la valeur moyenne de la tension (V)

P : Nombre de paires de pôles

φ_{abc} : Les flux statorique dans le repère abc (Wb)

\varnothing_s : flux statorique (Wb)

I_s : courant statorique (A)

V_s : Tension statorique (V)

L_{SS} : Matrice inductance du stator

R_s : Matrice résistance du stator

\varnothing_f : Vecteur flux crée par l'aimant à travers l'enroulement statoriques (Wb)

Paramètres de modélisation du volant :

Ω_v : Vitesse mécanique du volant (rad /s)

J_v : Moment d'inertie du volant (kg.m²)

E_v : Energie cinétique (joules)

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

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

P_v : Puissance maximale délivrable par le système de stockage (égale à la puissance nominale de la machine asynchrone) en [W].

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

ρ : Densité du matériau (kg/m³) ;

R_e : Rayon du volant (m).

Commande vectorielle

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

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

f : fréquence (Hz)

V_p : Tension de la porteuse

Commande en mode de glissement du système de stockage inertiel

X : Vecteur d'état.

U : Vecteur de commande.

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

U_{eq} : La commande équivalente [V].

U_n : La commande discontinue [V].

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

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

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

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

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

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

V_d^* : Tension de référence

V_q^* : Tension de référenc

r : Le degré relatif

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

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

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

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

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

TABLES DES MATIERES

Introduction générale	1
Chapitre I : généralité sur les systèmes de stockage	
Introduction	2
I. Système de stockage d'énergie	2
I.1. Stockage hydraulique	2
I.2. Stockage à air comprimé en réservoir souterrain	3
I.3. Stockage sous forme thermique.....	3
I.4. Stockage électrochimique	4
I.5. Batteries électrochimiques.....	5
I.6. Stockage par chaleur sensible.....	5
I.7. Stockage dans des batteries à circulation.....	6
I.8. Stockage électrostatique	7
I.8.1. Les condensateurs	7
I.8.2. Les super condensateurs	7
I.8.3. Supraconducteurs	8
I.9. Hydrocarbure	8
I.10. Biomasse	8
I.11. Pile à combustible à hydrogène	8
I.12. Station de transfert d'énergie par pompage-turbinage (STEP)	9
I.13. Stockage inertiel	10
Conclusion	10
Chapitre II : Modélisation de système de stockage inertiel	
Introduction générale	11
II.1. Description du fonctionnement des SISES	11
II.2. Modélisation de système de stockage inertiel	12
II.2.1. Modélisation du volant	12
II.3. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents.....	14
II.3.1. Hypothèses simplificatrices de la MSAP	14
II.3.1. Mise en équations	14
II.3.1. Application de la transformation de Park	15
II.3.1. Equations électriques	15
II.3.1. Equation magnétique	15
II.3.1. Equation mécanique	16
II.3.1. Equation électromagnétique	16
II.3.1. Mise sous forme d'équation d'état	16
II.4. Modélisation du convertisseur statique	16
II.5. Modélisation du redresseur	18
II.6. Modélisation de filtre	18
II.7. Modélisation de l'onduleur	20

Conclusion	21
------------------	----

Chapitre III : Commande vectorielle

Introduction	22
III.1. Avantages et Inconvénients de la commande vectorielle	22
III.1.1. Avantages	22
III.1.2. Inconvénients	22
III.2. Principe de la commande vectorielle	23
III.3. Commande de l'onduleur de tension à MLI naturelle (sinus-triangle)	24
Conclusion	24

Chapitre IV : Commande en mode de glissement du système de stockage inertielle

Introduction	25
IV.1. Théorie de la commande par mode de glissement	25
IV.1.1. Choix de la surface de glissement	25
IV.1.2. Conditions de convergence et d'existence	26
IV.1.3. Détermination de la loi de commande	27
IV.2. Application de la commande par mode de glissement d'ordre 1 à la machine à aimant permanents	29
IV.2.1. Synthèse du régulateur par mode glissant de la vitesse	29
IV.2.2. Synthèse du régulateur par mode glissant du courant en quadrature	30
IV.2.3. Synthèse du régulateur par mode glissant du courant direct ..	31
IV.3. Calcul des paramètres : K_{Ω} , K_q et K_d	31
IV.3.1. Calcul de K_{Ω}	32
IV.3.2. Calcul de K_q	32
IV.3.3. Calcul de K_d	33
IV.4. Simulation et interprétation des résultats	34
Conclusion	36
Conclusion générale	37
Références bibliographiques	38
Annexes	40



Introduction générale

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

Le stockage d'énergie est un domaine essentiel pour garantir la stabilité et l'efficacité des systèmes électriques. Dans ce mémoire, nous avons exploré le stockage inertiel, mettant en avant ses avantages tels que la réactivité, la durabilité et la capacité à gérer les fluctuations de charge. Nous avons examiné les composants clés du stockage inertiel et comparé différentes méthodes de stockage d'énergie.

Notre étude a débuté par une analyse des diverses méthodes de stockage d'énergie, en mettant l'accent sur le stockage inertiel et ses composants. Nous avons également effectué une comparaison succincte des différents systèmes de stockage. De plus, nous avons brièvement abordé la suspension magnétique et les machines associées.

Ensuite, nous nous sommes penché sur les modèles régissant le fonctionnement des différentes parties constitutives du système de stockage inertiel, notamment le volant d'inertie, la machine à aimant permanent et la baie d'électronique de puissance.

La complexité de la commande des moteurs à courant alternatif a été abordée dans notre troisième chapitre. Pour surmonter cette difficulté, nous avons exploré plusieurs techniques de commande, dont la commande vectorielle (ou commande par orientation de flux). Cette méthode, introduite par Blaschke en 1972, est désormais utilisée dans diverses applications industrielles, notamment pour la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP).

Enfin, notre dernier chapitre s'est concentré sur la commande par mode glissant (SMC) appliquée aux systèmes de stockage inertiel. Nous avons examiné les principes fondamentaux de la SMC, les modes de trajectoire, la conception de la commande et ses applications spécifiques dans le domaine des systèmes de stockage d'un kilowatt. Les résultats de simulation du comportement dynamique du système de stockage d'énergie inertiel, basé sur une machine à aimant permanent, ont été présentés et détaillés dans l'annexe.

Chapitre I

**Généralités sur les systèmes
de stockage**

Introduction :

Ce chapitre aborde les diverses méthodes de stockage d'énergie, en mettant en avant le stockage inertiel et ses composants. Une comparaison succincte des différents systèmes de stockage sera également offerte. En outre, nous abordons brièvement la suspension magnétique et les machines associées.

I. Systèmes de stockage d'énergie :

L'électricité présente des défis en matière de stockage, mais il existe diverses méthodes pour y remédier, en stockant l'énergie sous une forme convertible en électricité ultérieurement. De nos jours, les systèmes électriques sont utilisés dans une gamme variée d'applications, et les capacités de stockage vont de quelques MWh à plusieurs centaines de MWh [3].

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

I.1. Stockage hydraulique :

Les barrages hydroélectriques, également connus sous le nom de stockage par pompage hydraulique, sont souvent associés à la production d'énergie. Cependant, il est crucial de noter que le stockage sous forme hydraulique gravitaire est un élément inhérent et essentiel de ce processus de production et de stockage d'énergie électrique.

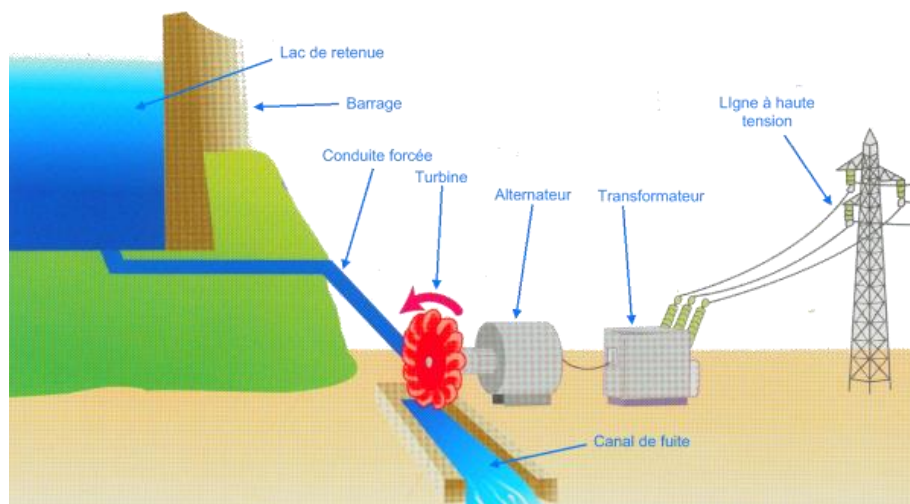


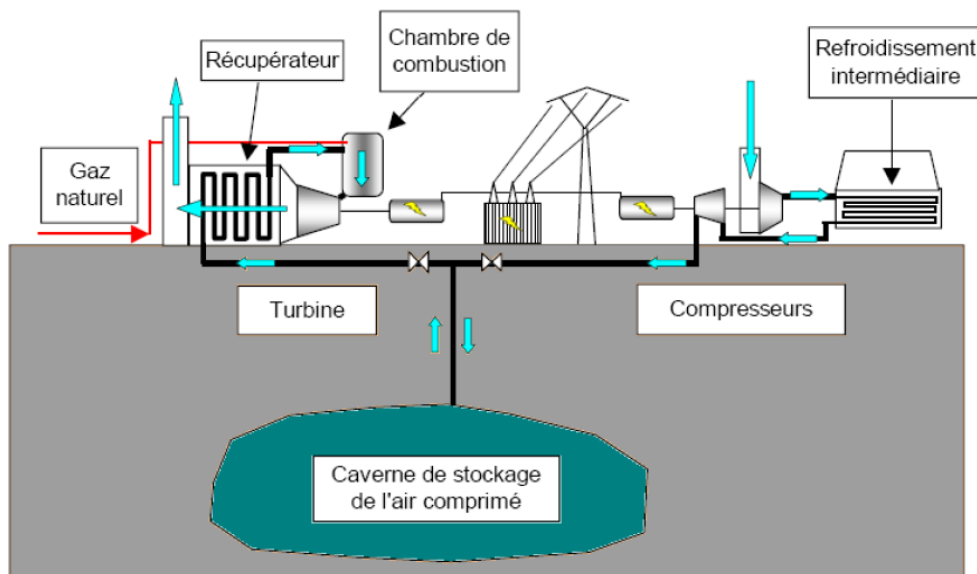
Figure I.1 : Schéma d'une station de stockage hydraulique.

Dans ce système de stockage, il n'est pas possible d'extraire toute l'énergie stockée, car cela impliquerait que la turbine retire complètement l'énergie cinétique de l'eau en mouvement. Cela entraînerait une immobilisation totale du flux hydraulique à la sortie de la turbine.

I.2. Stockage à air comprimé en réservoir souterrain :

Cette méthode est parfois utilisée dans des roches non poreuses. De l'air sous pression est accumulé dans des cavités souterraines qui deviennent ainsi des réservoirs naturels. Lorsque l'énergie est nécessaire, l'air sous pression est relâché, chauffé et détendu à travers une turbine utilisée en générateur.

Le principe de stockage d'énergie à air comprimé est illustré à la Figure I.2. Il consiste à accumuler de l'air sous pression dans des cavernes souterraines qui font office de réservoirs naturels. Le poids des terrains recouvrant la caverne permet de résister à la pression de l'air emmagasiné. Le principe de récupération de l'air comprimé est tel qu'il est dirigé vers une machine semblable à une machine à gaz ; il est ensuite réchauffé dans une chambre de combustion et détendu dans une turbine.



Source: ECRIN, Jacques RUER - SAIPEM

Figure I.2 : Principe d'une station de stockage à air comprimé.

I.3. Stockage sous forme thermique :

Bien que toujours à l'étude, ce mode de stockage d'énergie implique la conversion de l'électricité en chaleur à travers des pertes ohmiques dans des résistances (telles que des plinthes électriques), puis le stockage de cette chaleur dans des matériaux réfractaires. Ultérieurement,

cette chaleur peut être convertie de nouveau en électricité au besoin, grâce à une turbine à gaz. Les matériaux réfractaires nécessaires pour stocker la chaleur à des températures proches de 1400°C sont déjà utilisés dans l'industrie sidérurgique. La Figure I.3 illustre le principe de fonctionnement d'un tel système :

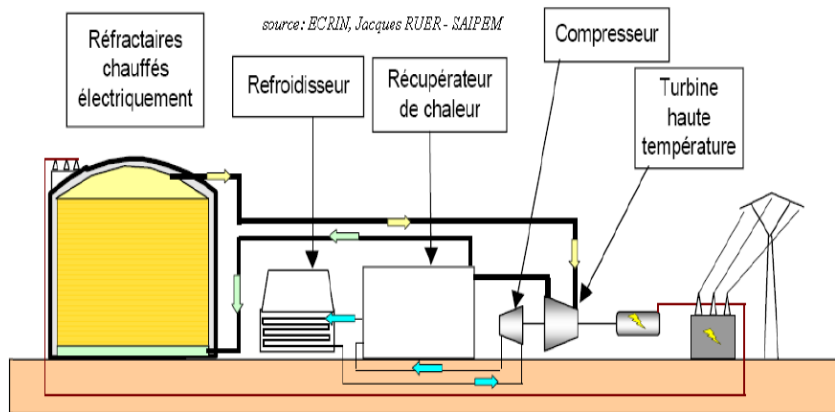


Figure I.3 : Principe d'une station de stockage thermique.

I.4. Stockage électrochimique :

Les composants de ce type de stockage d'énergie consistent en un couple électrochimique, composé de deux électrodes séparées par un électrolyte. Aux interfaces de ces électrodes se produisent des réactions d'oxydation ou de réduction qui libèrent ou absorbent des électrons. Les ions ainsi formés circulent à travers l'électrolyte. Pour obtenir une grande capacité de stockage d'énergie, il est nécessaire d'avoir un grand nombre d'électrons échangés par mole, ainsi qu'une réaction entre un élément très oxydant et un autre très réducteur.

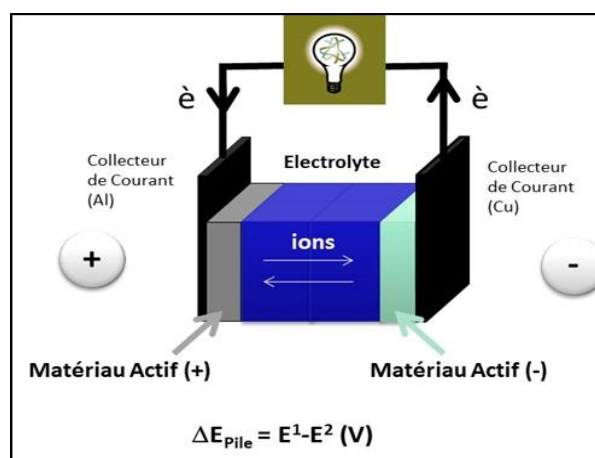


Figure I.4 : Le stockage électrochimique de l'énergie.

I.5. Batteries électrochimiques :

Actuellement, les batteries électrochimiques représentent le symbole du stockage de l'énergie électrique. Ces dernières années, une grande partie des efforts de développement pour le stockage de l'énergie électrique a été concentrée sur les batteries électrochimiques. Les technologies utilisées dans ces accumulateurs sont aussi variées que les capacités d'accumulation envisageables. Des minuscules piles au lithium dans les montres, stockant quelques milliwatts, aux réseaux de batteries au plomb de plusieurs MWh, elles utilisent toutes un principe chimique pour stocker et libérer l'énergie. Leurs principaux avantages résident dans leur portabilité réelle et leur amélioration constante grâce aux efforts continus de recherche.

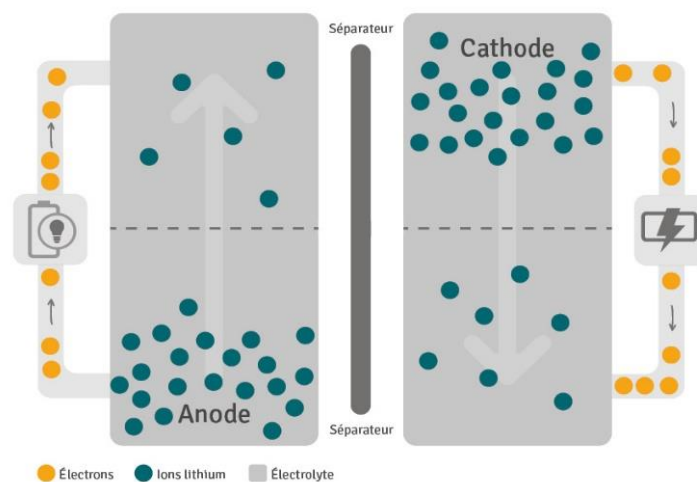


Figure I.5 : Stockage dans des batteries électrochimiques

I.6. Stockage par chaleur sensible :

Le concept de stockage par chaleur sensible est une méthode éprouvée depuis des millénaires. Un exemple simple serait de placer une pierre près du feu, de la déplacer ensuite et de bénéficier de la chaleur qu'elle diffuse progressivement. Cette approche est également utilisée dans des dispositifs modernes tels que les ballons d'eau chaude ou les bouillottes classiques.

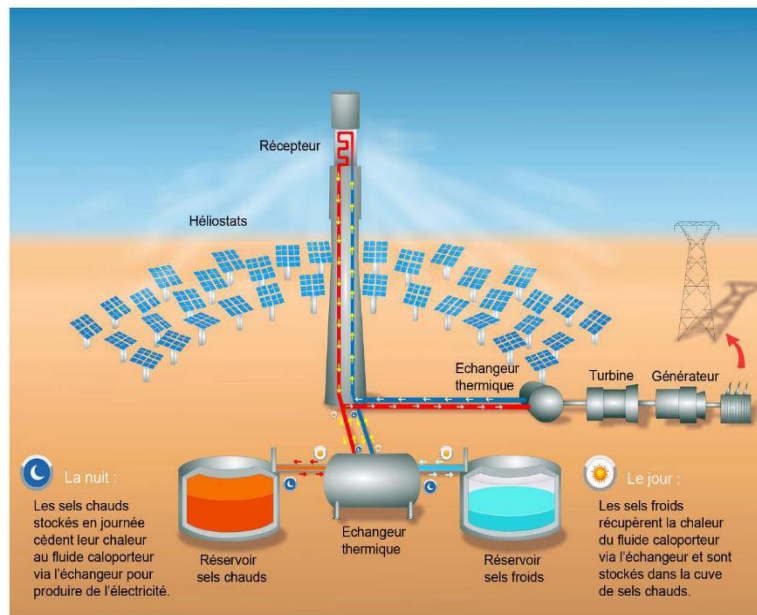


Figure I.6 : Schéma de stockage par chaleur sensible.

I.7. Stockage dans des batteries à circulation :

Ces technologies permettent de contourner la limitation des accumulateurs électrochimiques classiques, où les réactions électrochimiques génèrent des composants solides qui se stockent directement sur les électrodes où ils se forment. Cette accumulation locale est nécessairement limitée en masse, ce qui impose une capacité maximale.

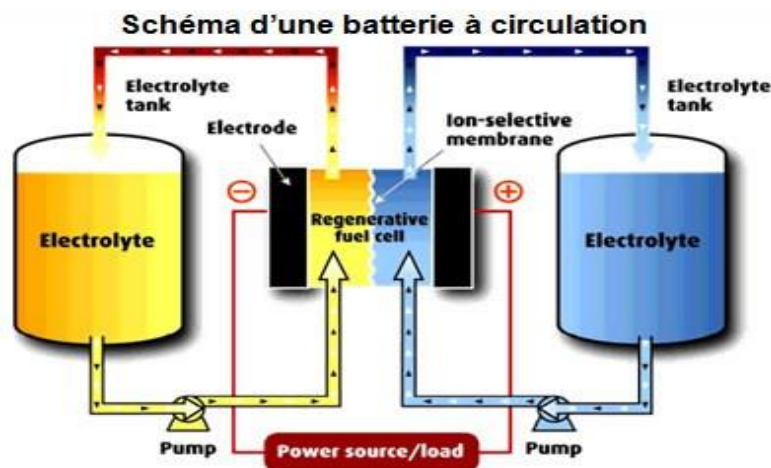


Figure I.7 : Stockage dans des batteries à circulation.

I.8. Stockage électrostatique :

I.8.1. Les condensateurs :

Le condensateur est un composant électrique passif composé de deux électrodes séparées par un film diélectrique. Principalement utilisé dans des circuits électriques et électroniques, il remplit plusieurs fonctions. Il stabilise une tension électrique en se déchargeant pour abaisser sa tension et en se chargeant pour augmenter sa tension. Il est également utilisé pour le traitement des signaux périodiques, comme le filtrage, et pour séparer le courant alternatif du courant continu, ce dernier étant bloqué par le condensateur. De plus, le condensateur peut stocker de l'énergie.

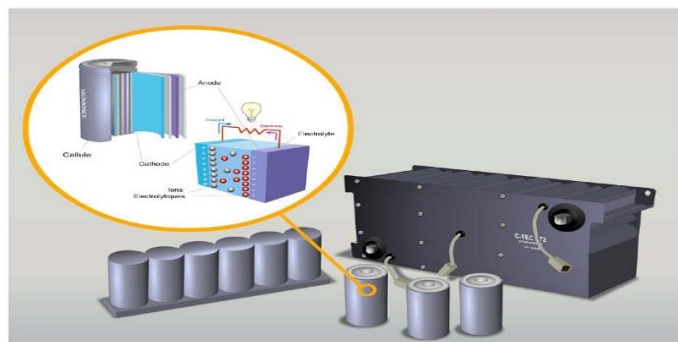


Figure I.8 : Les condensateurs.

I.8.2. Les super condensateurs :

Le fonctionnement d'un super condensateur est similaire à celui d'un condensateur, à la différence près que le film diélectrique entre les armatures du condensateur sont remplacées par un électrolyte conducteur ionique. Dans ce système, le déplacement des ions se fait le long d'une électrode conductrice possédant une très grande surface spécifique.

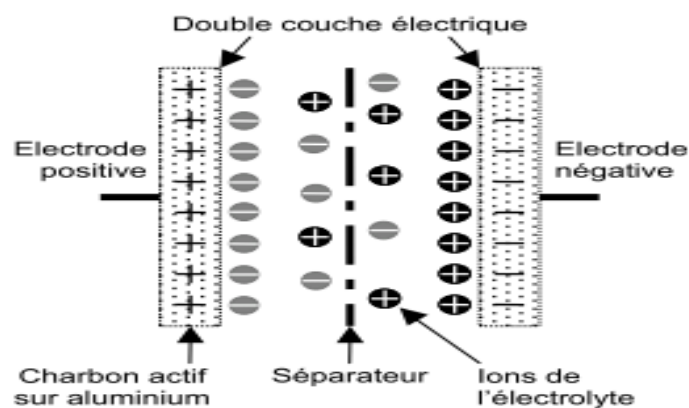


Figure I.9 : Les super condensateurs.

I.8.3. Supraconducteurs :

L'énergie peut être stockée sous forme d'énergie d'un champ magnétique créé par un courant circulant dans une bobine supraconductrice. Pour maintenir la bobine dans un état supraconducteur, elle doit être placée dans un cryostat rempli d'hélium liquide, comme illustré dans la Figure I.10. Ce système est conçu pour stocker de grandes quantités d'énergie. Cependant, les coûts de fabrication et de maintenance sont très élevés.

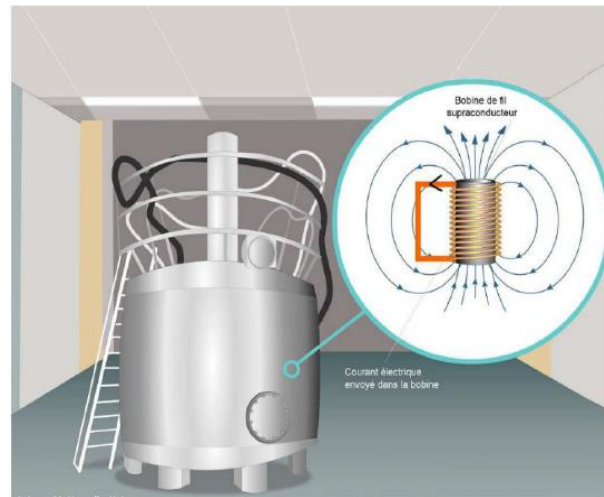


Figure I.10 : Supraconducteur.

I.9. Hydrocarbure :

Le combustible (tel que le fioul, le charbon ou le gaz) est brûlé dans la chaudière, exploitant la chaleur dégagée par la combustion pour générer de la vapeur d'eau sous pression.

I.10. Biomasse :

L'une des plus anciennes sources d'énergie utilisées par l'humanité est la combustion de matières organiques telles que le bois, les végétaux ou les déchets agricoles. Lorsqu'elles sont brûlées, ces matières génèrent de la chaleur. Cette chaleur est alors utilisée pour chauffer de l'eau dans une chaudière, produisant ainsi de la vapeur. En suivant le même principe que les centrales thermiques, cette vapeur actionne une turbine qui fait tourner un alternateur, générant ainsi de l'électricité.

I.11. Pile à combustible à hydrogène :

La pile à combustible se compose de deux électrodes, une anode et une cathode, séparées par un électrolyte. Cet électrolyte est capable de permettre le passage de molécules ionisées d'une électrode à l'autre. L'hydrogène produit par l'électrolyse de l'eau est ensuite converti en énergie par la pile à combustible.

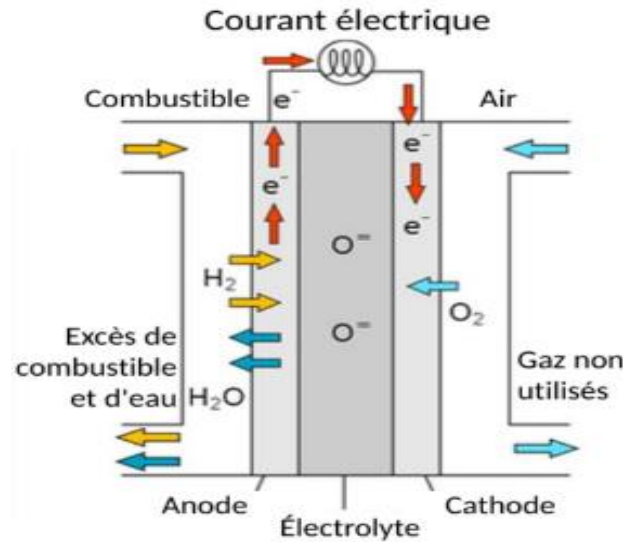


Figure I.11 : Fonctionnement d'une pile à combustible

I.12. Station de transfert d'énergie par pompage-turbinage (STEP) :

Ce système se compose de deux réservoirs situés à des altitudes distinctes. Lorsque l'excédent d'électricité est disponible, l'eau est pompée du réservoir inférieur vers le réservoir supérieur. En cas de déficit de production électrique, l'eau est renvoyée vers le réservoir inférieur en passant par une ou plusieurs turbines, comme illustré à la Figure I.12. Ce procédé permet de stocker une quantité importante d'énergie électrique.

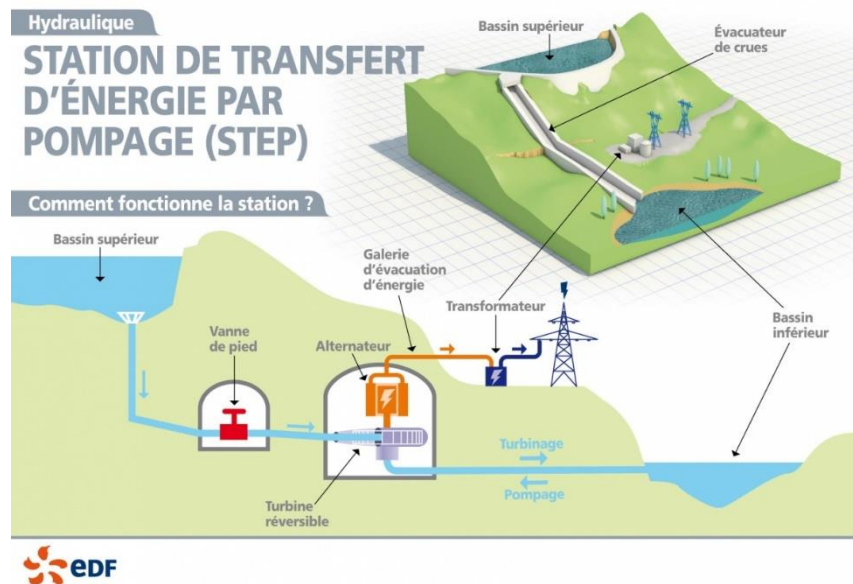


Figure I.12 : Schéma du principe d'une STEP

I.13. Stockage inertielle :

Ce système comprend un volant d'inertie couplé à une machine électrique réversible, permettant de stocker de l'énergie sous forme d'énergie cinétique. La machine électrique transfère de l'énergie cinétique au volant d'inertie lors du fonctionnement moteur, et récupère cette énergie sous forme d'énergie électrique selon les besoins, lors du fonctionnement en mode générateur. Ce sujet sera développé plus en détail dans le deuxième chapitre.

Constituants :

Les principaux composants d'un dispositif de stockage électromécanique inertielle sont illustrés à la figure I.13. On y trouve en premier lieu le volant d'inertie, élément central pour l'accumulation d'énergie, suivi du moteur-générateur. L'ensemble est supporté par des paliers, éventuellement magnétiques, et inclut également un convertisseur électronique de puissance et une enceinte à basse pression.

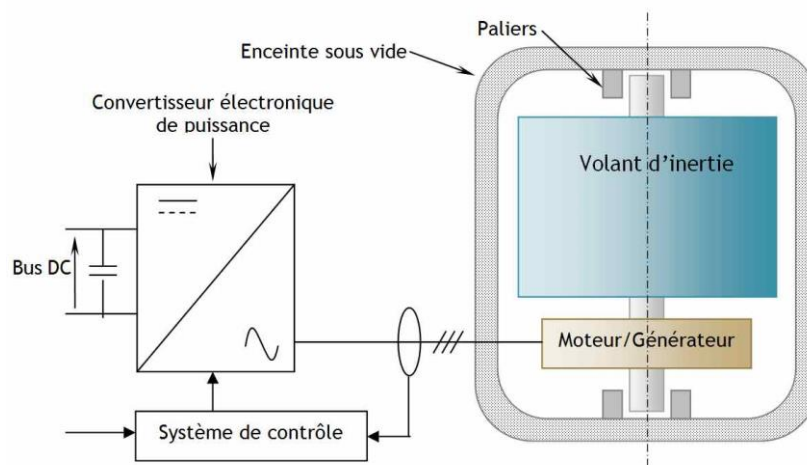


Figure I.13 : Principaux composants d'un accumulateur inertielle

Conclusion :

Ce chapitre présente une brève description de chaque type de stockage. Les méthodes de stockage varient en fonction de plusieurs critères, notamment le type d'énergie. Parmi les moyens de stockage direct de l'électricité, seuls le condensateur et l'inductance sont mentionnés, les autres étant considérés comme des méthodes de stockage indirectes.

Chapitre II

**Modélisation de système de
stockage inertiel**

Introduction :

Dans ce chapitre, nous présenterons les modèles régissant le fonctionnement des différentes parties constitutives du système de stockage inertiel, à savoir le volant d'inertie, la machine à aimant permanent et la baie d'électronique de puissance.

II.1. Description du fonctionnement des SISES :

Lorsque l'on évoque un "système inertiel de stockage d'énergie" (SISE), on fait référence à un système comprenant un volant d'inertie, un moteur-générateur électrique, ainsi qu'un convertisseur électronique de puissance. Le système de stockage d'énergie électrique, comme la plupart des autres systèmes, repose sur le principe de la transformation réversible de l'énergie cinétique en énergie électrique. Lors du stockage, le moteur électrique convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. Cette énergie est stockée dans le volant d'inertie sous forme d'énergie cinétique. Lors de la décharge, l'énergie mécanique est reconvertie en énergie électrique par l'intermédiaire du générateur électrique.

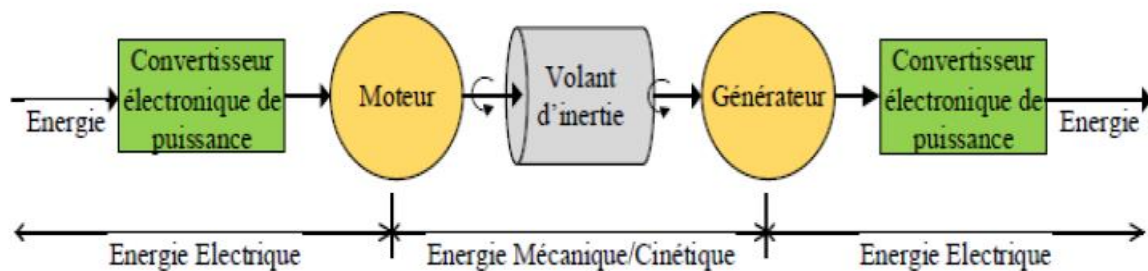


Figure II.1 : Principe de fonctionnement d'un SISE.

✚ Avantages des SISE :

- Bon rendement.
- Recyclage en fin de vie.
- Contrôle de l'état de charge aisé.
- Longue durée de vie (>105 cycles ou > 20 ans).

✚ Inconvénients du SISE :

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

- Insécurité.

II.2. Modélisation de système de stockage inertiel :

II.2.1. Modélisation du volant :

Un volant d'inertie représente un système de stockage d'énergie sous forme d'énergie cinétique de rotation. Typiquement, il se compose d'une masse, souvent un cylindre creux ou plein (bien que d'autres formes soient envisageables), mise en rotation autour d'un axe généralement fixe et contenue dans une enceinte protectrice. Cette masse est connectée à un moteur/générateur électrique permettant de convertir l'énergie cinétique en électricité et inversement. L'énergie, notée E_V , stockée dans un système en rotation à une vitesse angulaire ω et avec un moment d'inertie J , peut être exprimée comme suit :

$$E_V = \frac{1}{2} \cdot J_V \cdot \Omega_V^2 \quad \text{II.1}$$

E_V : L'énergie stockée (J).

J_V : Moment d'inertie du volant exprimé en (kg.m²).

Ω_V : vitesse angulaire de rotation du volant (rad/s).

La valeur de l'inertie du volant, en fonction de la puissance à stocker et pouvant être restituée durant un temps donné, sera déterminée.

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

$$P_V = \frac{dE_V}{dt} \quad \text{II.2}$$

Avec :

P_V : Puissance maximale délivrable par le système de stockage (égale à la puissance nominale de la machine asynchrone) en [W].

dE_V : Variation d'énergie stockée en [J].

dt : Variation de temps pendant la charge ou la décharge pour la puissance maximale en [S].

Ensuite, la relation qui lie l'énergie, l'inertie et la vitesse angulaire est la suivante :

$$\frac{dE_V}{dt} = \frac{1}{2} J_V \frac{d\Omega_V^2}{dt} \quad \text{II.3}$$

Ω_V : Vitesse angulaire du volant en [rad.s⁻¹].

J_V : Inertie du volant en [kg.m²].

En regroupant les deux équations on obtient la relation suivante :

$$P_V = \frac{1}{2} J_V \frac{d\Omega_V^2}{dt} \quad \text{II.4}$$

Supposant qu'on a des petites variations l'équation (III.4) devient :

$$P_v = \frac{1}{2} J_v \frac{\Delta\Omega v^2}{\Delta t} \tag{II.5}$$

$\Delta\Omega_v$: Petite variation de vitesse angulaire autour d'un point de fonctionnement.

Δt : Petite variation de temps.

De (II.5) l'inertie vaut :

$$P_v \cdot \Delta t = \frac{1}{2} J_v \Delta\Omega v^2 \tag{II.6}$$

$$J_v = \frac{2 \cdot P_v \cdot \Delta t}{\Delta\Omega v^2} \tag{II.7}$$

Où : $\Delta\Omega^2 v = \Delta\Omega^2 v_{\max} - \Delta\Omega^2 v_{\min}$ II.8

Remplaçant (II.8) dans (II.7) l'inertie vaut :

$$J_v = \frac{2 \cdot P_v \cdot \Delta t}{\Delta\Omega v^2_{\max} - \Delta\Omega v^2_{\min}} \tag{II.9}$$

$\Delta\Omega^2 v_{\max}$: vitesse angulaire maximale du volant (égale à la survitesse maximale de la machine asynchrone).

$\Delta\Omega^2 v_{\min}$: vitesse angulaire minimale du volant.

Lorsque l'on intègre sur le volume, on constate que la densité d'énergie la plus significative se trouve dans les éléments de masse dm situés à la périphérie du système en rotation. La vitesse tangentielle V est proportionnelle à la fois à la vitesse angulaire ω et au rayon R . Dans le cas d'un cylindre à parois minces (un anneau de faible épaisseur), toutes les masses élémentaires se déplacent à la vitesse maximale. Avec une densité massique constante ρ , la vitesse périphérique maximale est déterminée par la limite de rupture du matériau.

Forme du volant	Anneau simple	Sphère	Cylindre plein	Bille
k	1	0.6	0.5	0.4

Tableau II.1 : Coefficient de forme de quelques géométries

La résistance mécanique de la structure du volant impose une vitesse maximum de :

$$V_{max} = \sqrt{\frac{Re}{\rho}}$$

Ainsi l'augmentation de l'énergie cinétique stockée nécessite des matériaux qui combinent une faible densité (ρ) et une limite de résistance à la rupture (R_e) la plus élevée possible. Les volants les plus performants sont fabriqués en Kevlar.

II.3. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents :

II.3.1. Hypothèses simplificatrices de la machine synchrone à aimants permanents :

Les simplifications hypothétiques intégrées dans le modèle de la machine synchrone à aimants permanents sont les suivantes :

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

II.3.2. Mise en équations :

Les expressions des flux, tensions et courants statoriques sont :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [i_s] + \left(\frac{d}{dt}\right) \cdot [\phi_s] \quad \text{II.10}$$

$$[\phi_s] = [L_{ss}] \cdot [i_s] + [\phi_f] \quad \text{II.11}$$

Vecteur de tension :

$$[V_s] = [V_a \quad V_b \quad V_c]^T \quad \text{II.12}$$

Vecteur de courant :

$$[i_s] = [i_a \quad i_b \quad i_c]^T \quad \text{II.13}$$

Vecteur de flux

$$[\phi_s] = [\phi_a \quad \phi_b \quad \phi_c] \quad \text{II.14}$$

Matrice résistance du stator :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad \text{II.15}$$

Matrice inductance du stator :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_b & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_c \end{bmatrix} \quad \text{II.16}$$

$[\phi_f]$: Vecteur flux crée par l'aimant à travers l'enroulement statoriques.

Pour résoudre les équations (II.10, II.11 et II.12) on applique la transformation de Park, qui permet de décrire le comportement du moteur à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants.

II.3.3. Application de la transformation de Park :

Les machines électriques triphasées présentent trois enroulements statoriques déphasés de 120° les uns par rapport aux autres, alimentés par une source de tension triphasée et parcourus par un courant alternatif. Pour passer du système triphasé à un système biphasé tournant (d q), à une vitesse angulaire ω , nous avons besoin d'effectuer la transformation de Park, qui permet la conversion entre les systèmes triphasé et biphasé, ainsi que leur inverse. Les équations électriques liées à la transformation de Park sont les suivantes :

$$[V_{dq0}] = [T] \cdot [V_{abc}] \tag{II.17}$$

$$[i_{dq0}] = [T] \cdot [i_{abc}] \tag{II.18}$$

$$[\Phi_{dq0}] = [T] \cdot [\Phi_{abc}] \tag{II.19}$$

[T] : Transformation de Park.

$$[T] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \tag{II.20}$$

II.3.4. Equations électriques :

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

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + \frac{d\varphi_d}{dt} + p\omega_r \varphi_q \\ V_q = R_s i_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + p\omega_r \varphi_d \end{cases} \tag{II.21}$$

II.3.5. Equation magnétique :

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d i_d + \varphi_m \\ \varphi_q = L_q i_q \end{cases} \tag{II.22}$$

L_d, L_q : inductance d'axe direct et en quadrature.

Où :

$$\begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 \\ 0 & L_q & 0 \\ 0 & 0 & L_0 \end{bmatrix} = P(\theta) [L_s] P(\theta)^{-1} \tag{II.23}$$

Avec :

$$\begin{cases} L_d = L_0 + \frac{3}{2}L_2 - M_0 \\ L_q = L_0 - \frac{3}{2}L_2 - M_0 \end{cases} \quad \text{II.24}$$

II.3.6. Equation mécanique :

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

$$J \frac{d\omega}{dt} + f\omega = C_{em} - C_r \quad \text{II.25}$$

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

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

C_r : Couple résistant (N.m) ;

ω : Vitesse mécanique (rad/s).

II.3.7. Equation électromagnétique :

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

$$C_{em} = P [(L_d - L_q) I_d I_q + \delta_f I_q] \quad \text{II.26}$$

II.3.8. Mise sous forme d'équation d'état :

Le modèle non linéaire d'état dans le repère (**d**, **q**) de Park est représenté par le système d'équations II.25.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} i_d + P \frac{L_q}{L_d} i_q \omega \\ -\frac{R_s}{L_q} i_q + P \frac{L_d}{L_q} i_d \omega - P \frac{\delta_f}{L_q} \omega \\ \frac{P}{J} \delta_f i_q + \frac{R_s}{J} (L_d - L_q) i_q i_d - \frac{f}{J} \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_d} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ C_r \end{bmatrix} \quad \text{II.27}$$

II.4. Modélisation du convertisseur statique :

L'association des machines synchrones à aimants permanents avec des convertisseurs statiques présente de nombreux avantages :

- Variation de l'amplitude de la tension d'alimentation de la machine.

- Variation de la vitesse de synchronisme par la variation de la fréquence du convertisseur.
- Autopilotage de la fréquence du convertisseur par le capteur de position.

Le réglage de la vitesse (ou de la position) du rotor d'une machine synchrone se réalise généralement en agissant sur la fréquence de la tension (ou du courant) statorique.

Par conséquent, afin de disposer des moyens nécessaires à cette action, il est essentiel de disposer d'une source d'alimentation capable de fournir une tension à fréquence variable.

Dans notre configuration, l'alimentation se compose de trois étages : un redresseur connecté au réseau, un filtre pour réduire les ondulations du courant et de la tension, et un onduleur de tension de type modulation de largeur d'impulsion (MLI).

La MLI est une méthode qui présente deux avantages importants :

- ✚ Elle repousse vers les fréquences plus élevées les harmoniques de la tension de sortie, ce qui facilite le filtrage.
- ✚ Elle permet de faire varier la valeur du fondamental de la tension de sortie.

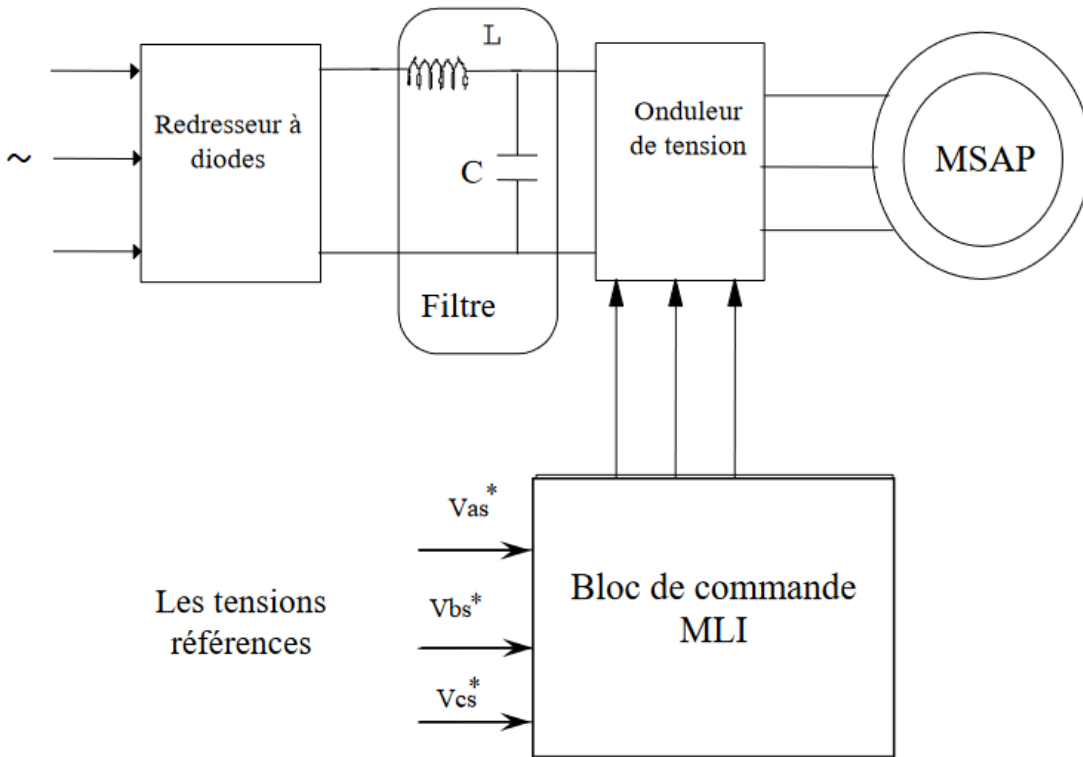


Figure II.2 : Schéma global de l'association MSAP- Convertisseur

II.5. Modélisation du redresseur :

Le redresseur est un pont de Graëtz à diodes, schématisé par figure 11 :

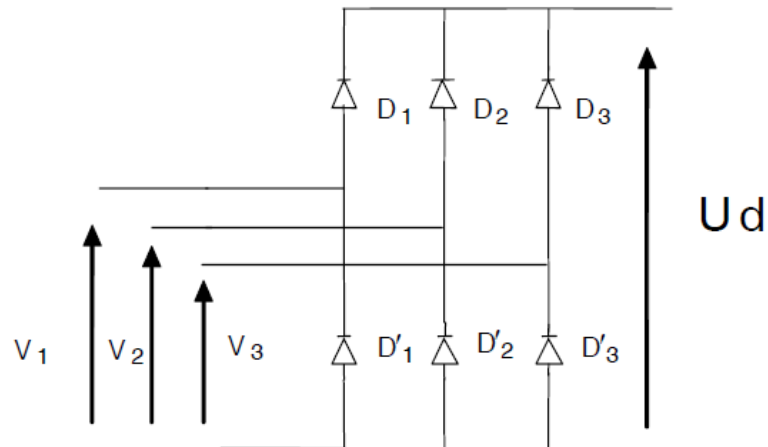


Figure II.3 : Redresseur à diodes

La séquence de conduction des diodes est définie comme suit :

D_i conduit si $V_i = \max(V_j) \quad i=1, 3 \quad j=1, 3$;

D'_i conduit si $V'_i = \min(V_j) \quad i=1, 3 \quad j=1, 3$.

La tension redressée U_d est :

$$U_d = V_i - V_j$$

La valeur moyenne de la tension redressée est donnée par :

$$U_{d\text{moy}} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m$$

II.6. Modélisation de filtre :

Un filtre passe-bas (L C) est placé entre le redresseur et l'onduleur de tension afin d'éliminer les hautes fréquences. Le schéma représentatif est illustré dans la figure suivante :

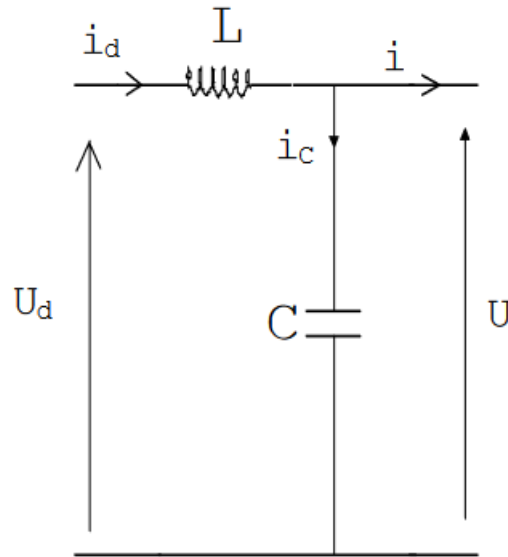


Figure II.4 : Schéma du filtre

Les équations du filtre sont :

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = \frac{1}{L} (U_d - U) \\ \frac{du}{dt} = \frac{1}{C} (i_d - i) \end{cases}$$

La capacité C joue plusieurs rôles : elle garantit le caractère de source de tension à l'entrée de l'onduleur, fournit l'énergie réactive à la machine, et absorbe le courant négatif restitué par la charge. Quant à l'inductance L, son rôle est de lisser le courant i_d .

II.7. Modélisation de l'onduleur :

Un onduleur est un convertisseur statique qui assure la conversion de courant continu en courant alternatif (DC/AC). Il est alimenté par une source de tension continue, ce qui signifie qu'il est connecté à une source présentant une impédance interne négligeable. Ainsi, la tension U à la sortie de l'onduleur n'est pas influencée par les variations du courant i qui le traverse. La source continue impose la tension à l'entrée de l'onduleur et donc à sa sortie. Le courant en sortie dépend de la charge connectée du côté alternatif. Les commandes des interrupteurs des bras sont complémentaires pour chaque bras, ce qui signifie qu'il y a deux états indépendants, pouvant être considérés comme une grandeur booléenne :

$K(1, 2, 3) = 1$, Interrupteur du demi-bras haut (1, 2, ou 3) fermé ;

$K(1, 2, 3) = 0$, Interrupteur du demi-bras bas (1, 2 ou 3) ouvert.

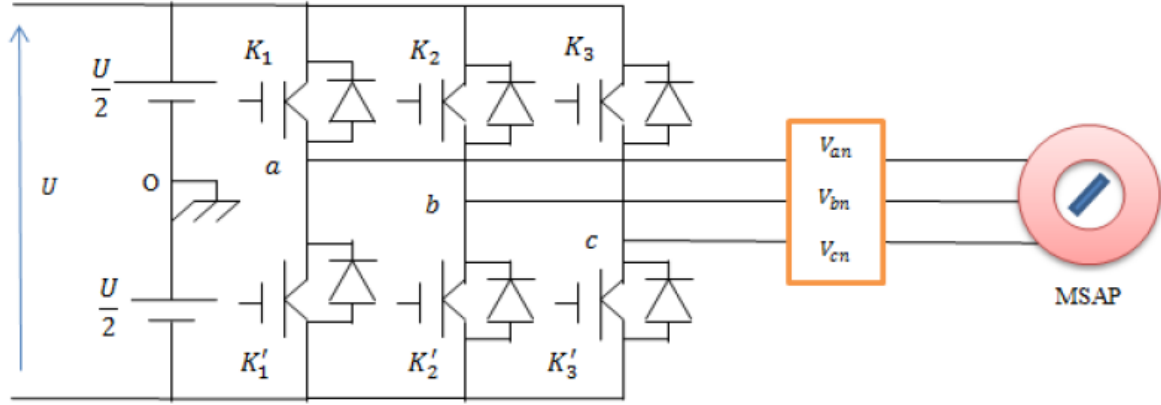


Figure II.5 : Onduleur de tension triphasé

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad \text{II.28}$$

Les tensions V_{ao}, V_{bo}, V_{co} considérées comme des tensions à l'entrée de l'onduleur.

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad \text{II.29}$$

- n : indice de neutre ;
- V_{ao}, V_{bo}, V_{co} : sont les tensions simples de la machine ;
- V_{no} : La tension fictive entre le neutre et la machine synchrone à aimants permanents et le point fictif o (figure II.5).

Sachant que la charge est équilibrée avec un neutre isolé, on aura donc :

$$V_{an} = V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad \text{II.30}$$

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad \text{II.31}$$

En remplaçant (II.31) dans (II.29), on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co} \end{cases} \quad \rightarrow \quad \begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}V_o(2K_1 - K_2 - K_3) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}V_o(-K_1 + 2K_2 - K_3) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}V_o(-K_1 - K_2 + 2K_3) \end{cases}$$

Donc :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} V_0 \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{bmatrix} \quad \text{II.32}$$

Il suffit d'appliquer la transformation de **Concordia** ou de **Clarke** pour passer d'un système triphasé au système biphasé.

Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à la modélisation des différentes parties du système de stockage inertiel. Il présente le modèle de la machine synchrone à aimants permanents dans le repère (d-q), en vue de sa commande, tout en tenant compte des hypothèses simplificatrices.

Chapitre III

Commande vectorielle

Introduction :

La commande des moteurs à courant alternatif est complexe en raison du couplage entre le flux et le couple. Pour surmonter cette difficulté, plusieurs techniques de commande ont été développées afin de rendre ces moteurs semblables aux moteurs à courant continu, qui présentent un découplage naturel du flux et du couple. La commande vectorielle, ou commande par orientation de flux (FOC), est la plus connue de ces techniques. Introduite par Blaschke en 1972, cette méthode a fait l'objet de nombreuses recherches et est désormais utilisée dans diverses applications industrielles. La commande vectorielle se concentre généralement sur des moteurs alimentés en tension et régulés en courant sur les axes d et q, offrant ainsi une meilleure dynamique de contrôle du couple tout en évitant les inconvénients de l'alimentation en courant. Ce chapitre aborde l'application de la commande vectorielle à la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP).

III.1. Avantages et Inconvénients de la commande vectorielle :**III.1.1. Avantages :**

- Basée sur le Modèle Transitoire : Elle permet de gérer les régimes transitoires, une capacité que les variateurs classiques ne possédaient pas.
- Précision et Rapidité : Cette technique se distingue par sa grande précision et sa rapidité de réponse.
- Contrôle du Couple à l'Arrêt : Elle offre la possibilité de contrôler le couple même lorsque le moteur est immobilisé.
- Contrôle en Amplitude et en Phase : Elle permet de réguler les grandeurs à la fois en termes d'amplitude et de phase, assurant ainsi une commande optimale.

III.1.2. Inconvénients :

- Coût Élevé : L'implémentation requiert des composants onéreux tels qu'un encodeur incrémental, un estimateur de vitesse, et un processeur de signal numérique (DSP).
- Dépendance aux Transformations de Coordonnées : Le système repose sur des transformations de coordonnées qui nécessitent l'estimation précise d'un angle θ_s .
- Sensibilité aux Erreurs de Vitesse : La vitesse de rotation joue un rôle essentiel dans l'algorithme de commande. En l'absence de capteur de vitesse, les erreurs dans l'estimation de cette vitesse peuvent entraîner une dégradation des performances du variateur.

III.2. Principe de la commande vectorielle :

L'idée principale de cette stratégie est d'assimiler le comportement du moteur synchrone à celui d'un moteur à courant continu, en utilisant un modèle linéaire et découplé. Cela permet d'améliorer le comportement dynamique du moteur.

L'équation du couple montre que celui-ci dépend de deux variables :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p (\varphi_m i_q + i_q i_d (L_d - L_q))$$

Parmi les stratégies de commande, on privilégie souvent celle qui maintient la composante i_d à zéro. Cette méthode permet d'obtenir une loi de commande simplifiée, caractérisée par une relation linéaire entre le couple et le courant. Ainsi, on retrouve une caractéristique similaire à celle d'un moteur à courant continu à excitation séparée.

En maintenant le courant nul on obtient le couple :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \varphi_m i_q$$

Comme le flux φ_m est constant, le couple est directement proportionnel à i_q .

Donc :

$$C_{em} = K_t \cdot i_q$$

Avec :

$$K_t = \frac{3}{2} p \varphi_m$$

Nous constatons que l'équation du couple est analogue à celle d'un moteur à courant continu à excitation séparée, permettant ainsi un contrôle indépendant du couple et du flux.

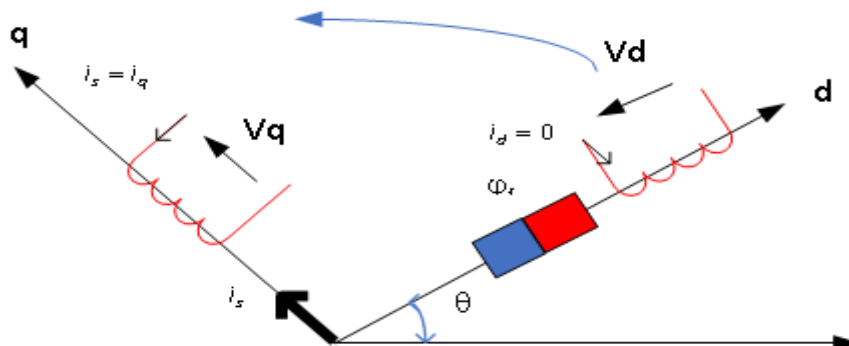


Figure III.1 : Principe de la commande vectorielle.

III.3. Commande de l'onduleur de tension à MLI naturelle (sinus-triangle) :

Il s'agit d'un mode de commande particulier des onduleurs. Les méthodes de Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI) reposent sur l'échantillonnage du signal contenant l'information à transmettre, qui constitue le signal de référence. Cette information est ensuite convertie en une série d'impulsions dont la largeur est déterminée en fonction de l'amplitude du signal modulant aux moments d'échantillonnage. La commande MLI génère des signaux de commande pour les interrupteurs de l'onduleur, visant à reproduire le plus fidèlement possible le signal modulant.

Cette stratégie permet la génération des impulsions de commande à partir de l'instant où on a l'intersection d'une onde de référence généralement sinusoïdale ($V_{ref}(t)$ d'une fréquence f avec une onde triangulaire appelée porteuse $V_p(t)$ d'une fréquence f_p très élevée). [16]

Le schéma de principe de cette technique est donné par la figure III.2.

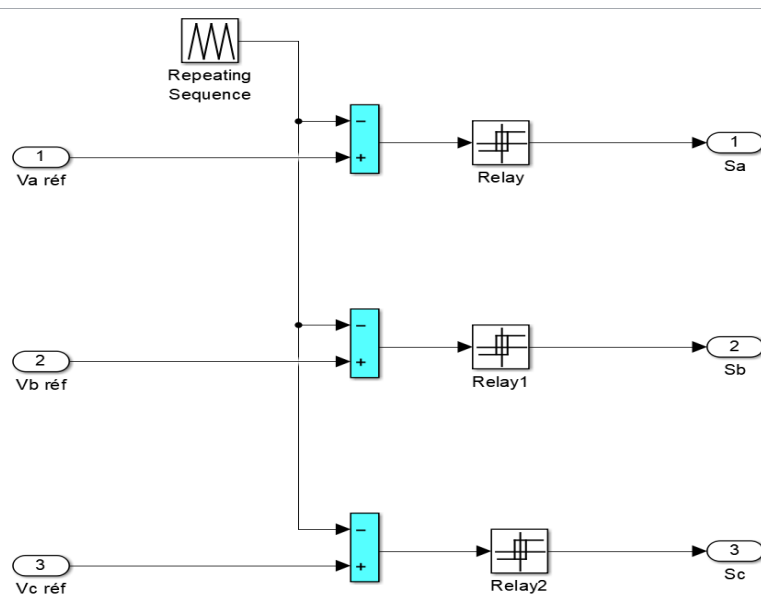


Figure III.2 : Schéma de principe de MLI sinus-triangle.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exploré en profondeur l'application de la commande vectorielle à la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP), en mettant en lumière ses avantages et inconvénients, ainsi que les principes fondamentaux et les méthodes de commande associées.

Chapitre IV

**Commande en mode de
glissement du système de
stockage inertiel**

Introduction :

Dans ce chapitre, nous explorerons en détail la commande par mode glissant (SMC) appliquée aux systèmes de stockage inertiel. Nous aborderons les principes fondamentaux de la SMC, les modes de trajectoire, la conception de la commande et ses applications spécifiques dans le domaine des systèmes de stockage de un kilowatt.

IV.1. Théorie de la commande par mode de glissement :

Le concept de la commande par modes glissants vise à guider la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement. En utilisant une loi de commutation, le système est contraint de demeurer à proximité de cette surface, ce qui entraîne le phénomène de glissement [13].

La commande par modes glissants (CMG) est largement étudiée dans la littérature en raison de sa simplicité de mise en œuvre et de sa robustesse face aux variations paramétriques du système et aux perturbations externes.

La conception de la commande par mode de glissement se décompose en trois étapes essentielles interdépendantes :

1. **Choix des surfaces** : Sélection des surfaces de glissement appropriées.
2. **Établissement des conditions d'existence et de convergence** : Définition des critères pour garantir l'existence et la convergence de la commande.
3. **Détermination de la loi de commande** : Élaboration de la stratégie de commande pour maintenir le système près de la surface de glissement.

IV.1.1. Choix de la surface de glissement :

Le choix de la surface de glissement dépend du nombre et de la forme des fonctions nécessaires. Pour un système défini par l'équation (IV.1), le vecteur de surface doit avoir la même dimension que le vecteur de commande U .

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

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

$$\mathbf{S}(x) = \left(\frac{d}{dt} + \delta\right)^{r-1} \mathbf{e}(x) \quad \text{IV.2}$$

Avec : η : Gain positif

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

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

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

IV.1.2. Conditions de convergence et d'existence :

Les conditions de convergence visent à amener les différentes dynamiques du système à converger vers la surface de glissement. Pour garantir ce mode de convergence, nous retenons deux considérations :

1. Fonction discrète de commutation : Cette condition de convergence, proposée et étudiée par EMILYANOV et UTKIN, consiste à conférer à la surface une dynamique convergente vers zéro

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

2. Fonction de LYAPUNOV : L'objectif de cette fonction est de garantir l'attraction de la variable à contrôler vers sa valeur de référence. Fonction de LYAPUNOV est définie comme suit :

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

La dérivée de cette fonction est exprimée par :

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

La décroissance de la fonction $V(x)$ est garantie, si sa dérivée est négative, pour garantir la vérification de cette condition (IV.3), il est essentiel que le carré de la distance entre un point donné du plan de phase et la surface de glissement (définie par l'équation IV.4) décroisse continuellement. Cette propriété contraint la trajectoire du système à converger vers la surface de glissement. Il est important de noter que cette condition suppose un régime glissant idéal [15].

IV.1.3 Détermination de la loi de commande :

Dans la littérature, on identifie trois types de commandes : la commande par contre-réaction, la commande par relais et la commande équivalente. Parmi ces approches, les deux dernières sont largement utilisées dans la commande des machines électriques.

Dans notre cas, nous avons opté pour la méthode de la commande équivalente. Cette approche se caractérise par une structure de contrôleur en deux parties :

1. **Linéarisation exacte** : Cette partie vise à réaliser une linéarisation précise du système.
2. **Stabilisation** : L'autre partie du contrôleur assure la stabilité du système.

Cela permet d'obtenir un contrôleur par mode de glissement efficace pour notre application spécifique.

$$U = U_{eq} + U_n \quad \text{IV.6}$$

Ce passage concerne la commande par modes glissants et son objectif de maintenir la variable à contrôler sur la surface de glissement $S(x) = 0$.

La commande est déduite en considérant que la dérivée de la surface est nulle. La dérivée de la surface $S(x)$ est exprimée par :

$$\dot{S}(x) = \frac{ds}{dx} A(x) + \frac{ds}{dx} B(x)U_{eq} + \frac{ds}{dx} B(x)U_n \quad \text{IV.7}$$

Cette condition est essentielle pour assurer que le système reste près de la surface de glissement, contribuant ainsi à la stabilité du contrôle.

Durant la phase de glissement et la phase du régime permanent. De ces conditions, on déduit de (Eq IV.7).

$$U_{eq} = - \left(\frac{ds}{dx} B(x) \right)^{-1} \frac{ds}{dx} A(x) \quad \text{IV.8}$$

Avec :

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

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

$$\dot{S}(x) = \frac{ds}{dx} B(x) \cdot U_n \quad \text{IV.9}$$

La commande discrète U_n est calculée pour vérifier la condition de convergence (IV.3), même en présence d'incertitudes sur les paramètres du modèle du système. Cette condition de convergence, exprimée par l'équation (IV.3), se réécrit comme suit :

$$S(x) \frac{ds}{dx} B(x) \cdot U_n < 0 \quad \text{IV.10}$$

Cette inégalité garantit que le carré de la distance entre un point donné du plan de phase et la surface de glissement décroît continuellement, assurant ainsi la stabilité du système.

Afin de satisfaire la condition IV.10, le signe de U_n doit être opposé à celui de l'expression :

$$S(x) \frac{ds}{dx} B(x)$$

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

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

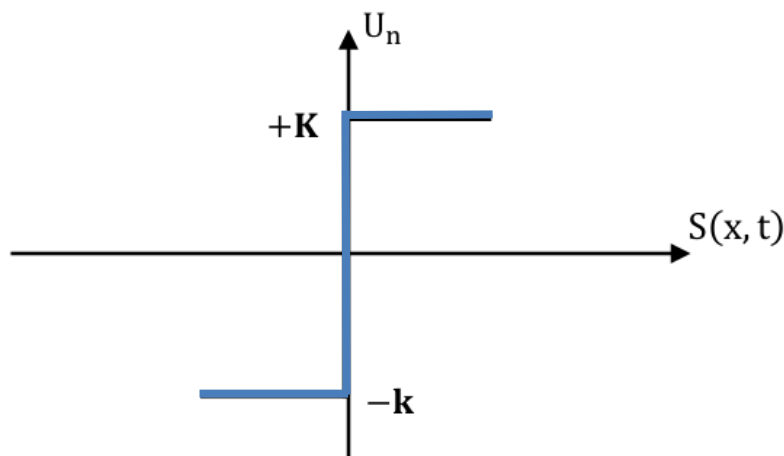


Figure IV.1 : Fonction du signe

Cependant, l'utilisation d'une commande de type relais peut entraîner des comportements indésirables, notamment le phénomène de broutement. Pour atténuer ce phénomène, une approche de commande en mode glissement, appelée "commande douce à un seul seuil", est mise en œuvre (voir figure IV.2).

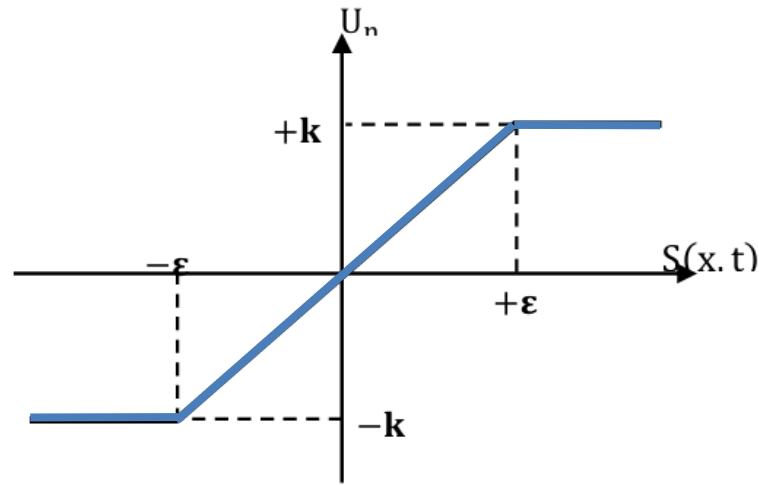


Figure IV.2 : Commande adoucie

$$U_n = \begin{cases} \frac{1}{\epsilon} K \cdot S(x) & |S(x)| < \epsilon \\ K \cdot \text{sign}(S(x)) & |S(x)| > \epsilon \end{cases} \quad \text{IV.13}$$

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

Nous mettons en évidence les modèles électriques et mécaniques qui décrivent la dynamique de la machine à aimants permanents.

$$\begin{cases} \frac{d i_d}{dt} = -\frac{R}{L} i_d + P\Omega \frac{L_d}{L_d} i_q + \frac{V_d}{L_d} \\ \frac{d i_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_q} i_q - P\Omega \frac{L_d}{L_q} i_d - P\Omega \frac{\Psi_r}{L_q} + \frac{V_q}{L_q} \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{3P(L_d - L_q)i_d + P\Psi_r}{2J} i_q - \frac{T_r}{j} - \frac{f}{j} \Omega \end{cases} \quad \text{IV.14}$$

IV.2.1 Synthèse du régulateur par mode glissant de la vitesse :

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

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

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

$$\dot{S}(\Omega) = \dot{\Omega}^* - \dot{\Omega} \quad \text{IV.16}$$

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

$$\begin{cases} \dot{S}(\Omega) = \dot{\Omega}^* - \frac{3P(L_d - L_q)i_d + P\Psi_r}{2J} i_q + \frac{Tr}{j} + \frac{f}{j}\Omega \\ i_q = i_{q\acute{e}q} + i_{qn} \end{cases} \quad \text{IV.17}$$

Durant le mode de glissement et on régime permanent, on a :

$$S(\Omega) = 0, \dot{S}(\Omega) = 0 \text{ et } i_{qn} = 0$$

D'où on tire l'expression de la composante équivalente $i_{q\acute{e}q}$:

$$I_{qnq} = \frac{2J + (Tr + f\Omega)}{3P(L_d - L_q)i_d + P\Psi_r} \quad \text{IV.18}$$

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

$$S(\Omega) \cdot \dot{S}(\Omega) < 0 \quad \text{IV.19}$$

En substituant l'équation (IV.17) dans l'équation (IV.16) en obtient l'équation (IV.19).

$$\dot{S}(\Omega) = -\frac{3}{2} \left[\frac{P(L_d - L_q)i_d}{J} + \frac{P\Psi_r}{J} \right] i_q \quad \text{IV.20}$$

La commande non linéaire est :

$$i_{qn} = K_\Omega \text{sign}(S(\Omega)) \quad \text{IV.21}$$

K_Ω : Gain positif.

IV.2.2 Synthèse du régulateur par mode glissant du courant en quadrature :

La surface choisie pour le courant est :

$$S(I_q) = I_q^* - I_q \quad \text{IV.22}$$

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

$$\dot{S}(I_q) = \dot{I}_q^* - \dot{I}_q \quad \text{IV.23}$$

$$\begin{cases} \dot{S}(I_q) = \dot{I}_q^* + \frac{R_s}{L_q} I_q + P\Omega \frac{L_d}{L_q} I_d + P\Omega \frac{\Psi_r}{L_q} - \frac{V_q}{L_q} \\ V = V_{q\acute{e}q} + V_{qn} \end{cases} \quad \text{IV.24}$$

Durant le mode de glissement et on régime permanent, on a :

$$S(I_q) = 0, \dot{S}(I_q) = 0 \text{ et } V_{qn} = 0$$

D'où on tire l'expression de la composante équivalente :

$$V_{q\acute{e}q} = (I_q^* + \frac{R_s}{L_q} I_q + \frac{L_d}{L_q} P\Omega \frac{\Psi_r}{L_q}) L_q \quad \text{IV.25}$$

En substituant l'équation IV.24 dans l'équation IV.23 on obtient on obtient :

$$S(I_q) = \frac{-1}{L_q} V_{qn} \quad \text{IV.26}$$

Et

$$V_{qn} = K_q \text{sign}(S(I_q)) \quad \text{IV.27}$$

Avec : K_q : Gain positif

IV.2.3 Synthèses du régulateur par mode glissant du courant direct :

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

$$S(I_d) = I_d - I_d^* \quad \text{IV.28}$$

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

$$\dot{S}(I_d) = \dot{i}_d - \dot{i}_d^* \quad \text{IV.29}$$

$$\begin{cases} \dot{S}(I_d) = (I_d^* + \frac{R_s}{L_d} I_d - P\Omega \frac{L_q}{L_d} I_q - \frac{V_d}{L_d}) \\ V_d = V_{deq} + V_{dn} \end{cases} \quad \text{IV.30}$$

Durant le mode de glissement et on régime permanent, on a $S(I_d)=0$, $S'(I_d)=0$, $V_{dn}=0$.

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

$$V_{deq} = (I_d^* + \frac{R_s}{L_d} I_d - \frac{L_q}{L_d} P\Omega I_q) L_d \quad \text{IV.31}$$

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

$$S(I) = \frac{-1}{L_d} V_{dn} \quad \text{IV.32}$$

$$V_{dn} = K_d \text{sign}(S(I_d)) \quad \text{IV.33}$$

Avec

K_d : Gain positive

IV.3 Calcul des paramètres : K_Ω , K_q , K_d :

Ces paramètres sont déterminés dans le but de :

1. Restreindre les courants à des valeurs acceptables pour le couple maximal.
2. Garantir une convergence rapide.
3. Appliquer la dynamique en mode de convergence et de glissement.

IV.3.1 Calcul de $K\Omega$:

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

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

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

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

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

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

De l'expression (IV.34) et (IV.35) on tire l'expression localisant le paramètre $K\Omega$:

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

IV.3.2. Calcul de Kq :

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

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

$$I_q^* + \frac{R_s}{L_q}I_q + P\Omega \frac{L_d}{L_q}I_d + P\Omega \frac{\Psi_r}{L_q} - \frac{K_q}{L_q} < 0 \quad \text{IV.38}$$

$$K_q > L_q \left(I_q^* + \frac{R_s}{L_q}I_q + P\Omega \frac{L_d}{L_q}I_d + P\Omega \frac{\Psi_r}{L_q} \right) \quad \text{IV.39}$$

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

$$I_q^* + \frac{R_s}{L_q}I_q + P\Omega \frac{L_d}{L_q}I_d + P\Omega \frac{\Psi_r}{L_q} + \frac{K_q}{L_q} > 0 \quad \text{IV.40}$$

$$K_q > -L_q \left(I_q^* + \frac{R_s}{L_q}I_q + P\Omega \frac{L_d}{L_q}I_d + P\Omega \frac{\Psi_r}{L_q} \right) \quad \text{IV.41}$$

De l'expression (IV.38) et (IV.40) nous déduisons l'expression localisant le paramètre Kq :

$$K_q > \left| -L_q \left(I_q^* + \frac{R_s}{L_q}I_q + P\Omega \frac{L_d}{L_q}I_d + P\Omega \frac{\Psi_r}{L_q} \right) \right| \quad \text{IV.42}$$

IV.3.3. Calcul de K_d :

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

$$I_d^* + \frac{R_s}{L_d} I_d - P\Omega \frac{L_q}{L_d} I_q - \frac{K_d}{L_d} < 0 \quad \text{IV.43}$$

$$K_d > L_d (I_d^* + \frac{R_s}{L_d} I_d - P\Omega \frac{L_q}{L_d} I_q) \quad \text{IV.44}$$

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

$$I_d^* + \frac{R_s}{L_d} I_d - P\Omega \frac{L_q}{L_d} I_q + \frac{K_d}{L_d} > 0 \quad \text{IV.45}$$

$$K_d > -L_d (I_d^* + \frac{R_s}{L_d} I_d - P\Omega \frac{L_q}{L_d} I_q) \quad \text{IV.46}$$

Le paramètre K_d est localisé à partir des expressions (IV.43) et (IV.45) dans l'expression (IV.46).

$$K_d > | -L_d (i_d^* + \frac{R_s}{L_d} I_d - P\Omega \frac{L_q}{L_d} I_q) | \quad \text{IV.47}$$

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

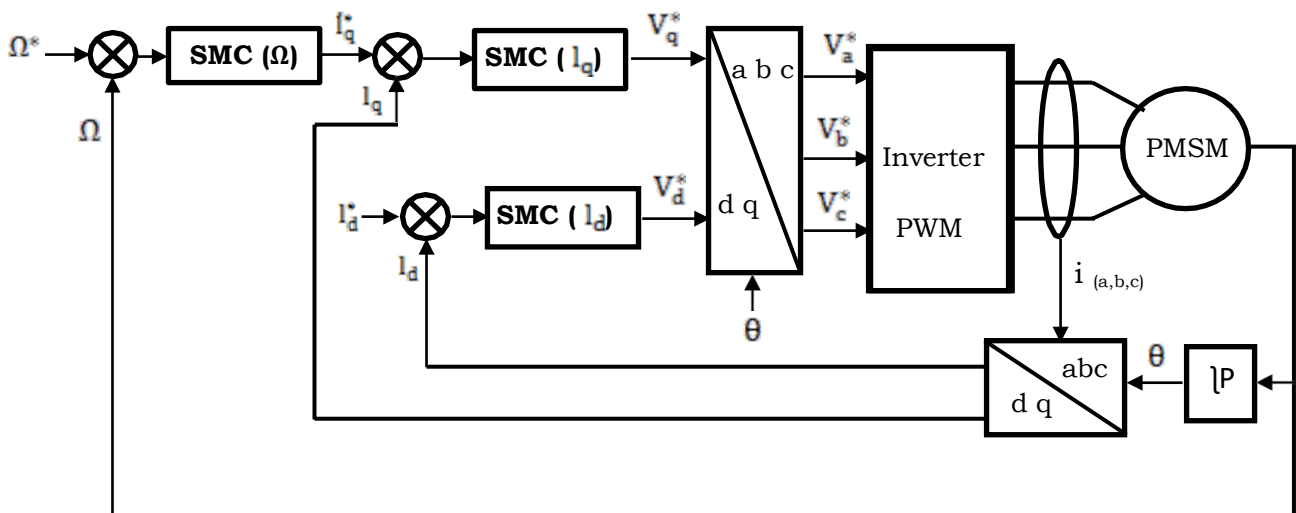


Figure IV.3 : Schéma bloc de commande vectorielle par mode de glissement

IV.4. Simulation et interprétation des résultats :

Nous présentons les résultats de simulation du comportement dynamiques du système de stockage d'énergie inertiel, à base d'une machine à aimant permanent. Paramètres de simulation voir annexe.

1) Vitesse de rotation du volant et sa référence :

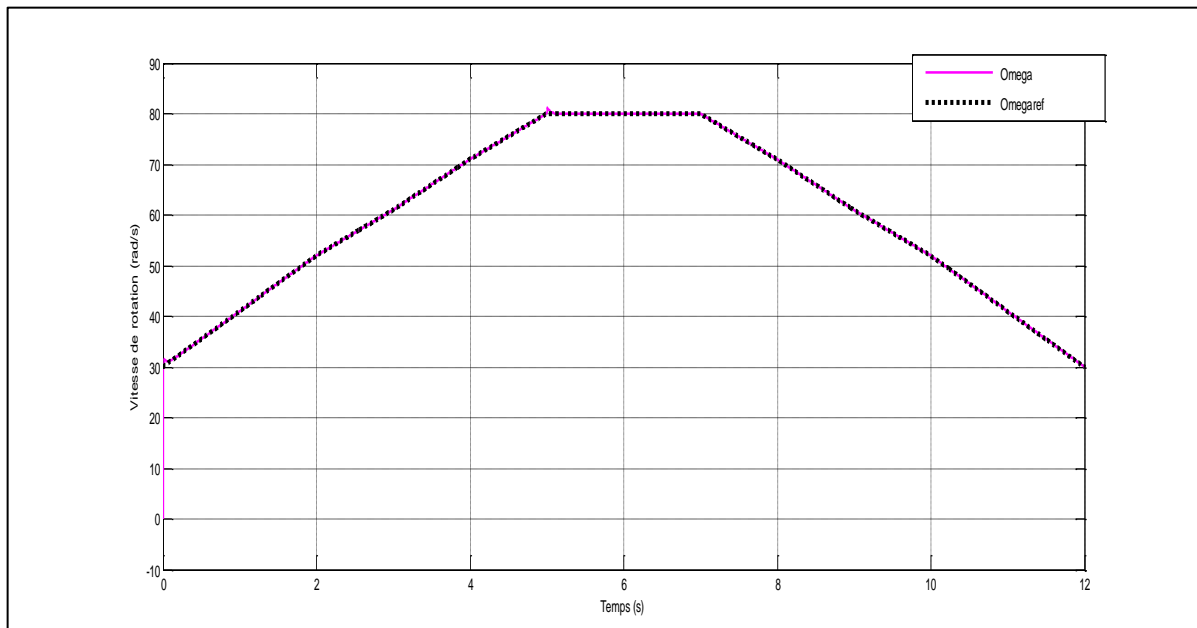


Figure IV.4 : Vitesse de rotation du volant et sa référence

Commentaire :

La vitesse de rotation du volant d'inertie évolue comme suit : elle augmente jusqu'à atteindre une valeur stable de 80 rad/s, puis diminue pendant la période entre 7 et 12 secondes. Ces phases correspondent respectivement aux périodes de stockage, de découplage et de déstockage, et elles suivent fidèlement la référence. Voir figure IV.4

2) Puissance active de stockage et sa référence :

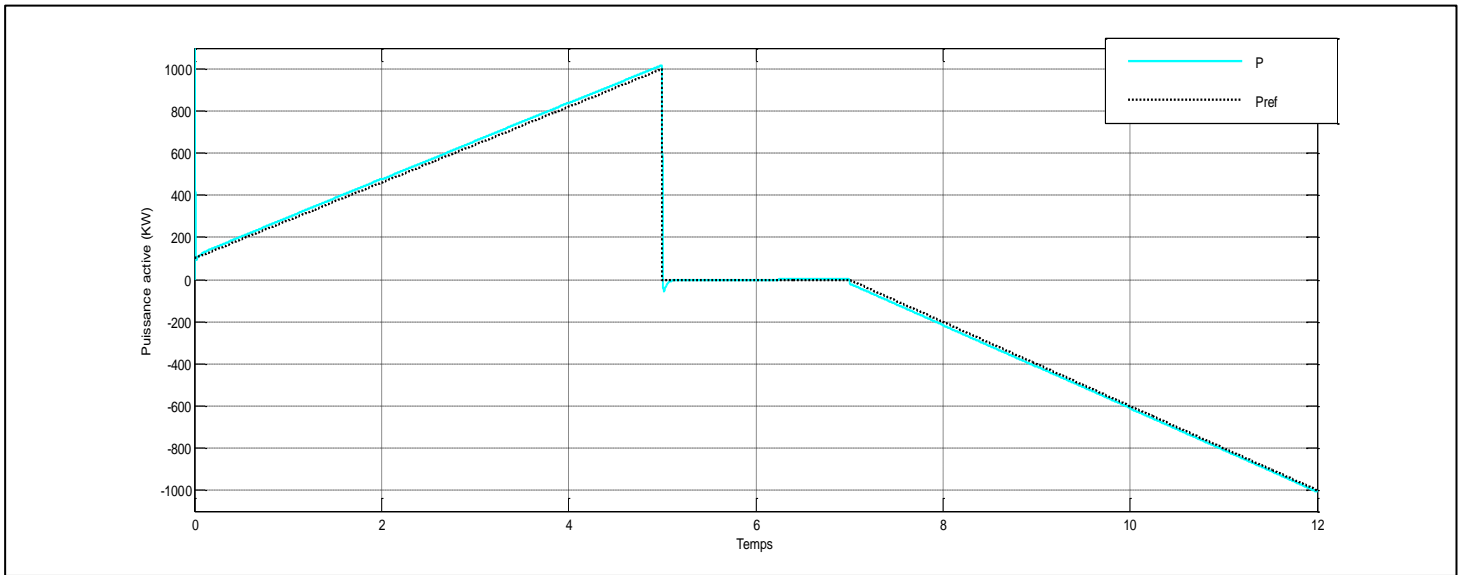


Figure IV.5 : Puissance active de stockage et sa référence.

Commentaire :

La figure IV.5 présente la variation de la puissance absorbée par le volant d’inertie. Cette puissance suit fidèlement la référence et affiche des signes positifs et négatifs pendant les périodes de fonctionnement moteur et générateur, avec un découplage entre ces deux phases. De plus, une erreur par rapport à la référence est observée.

3) Courants direct I_d et en quadrature I_q et leur références :

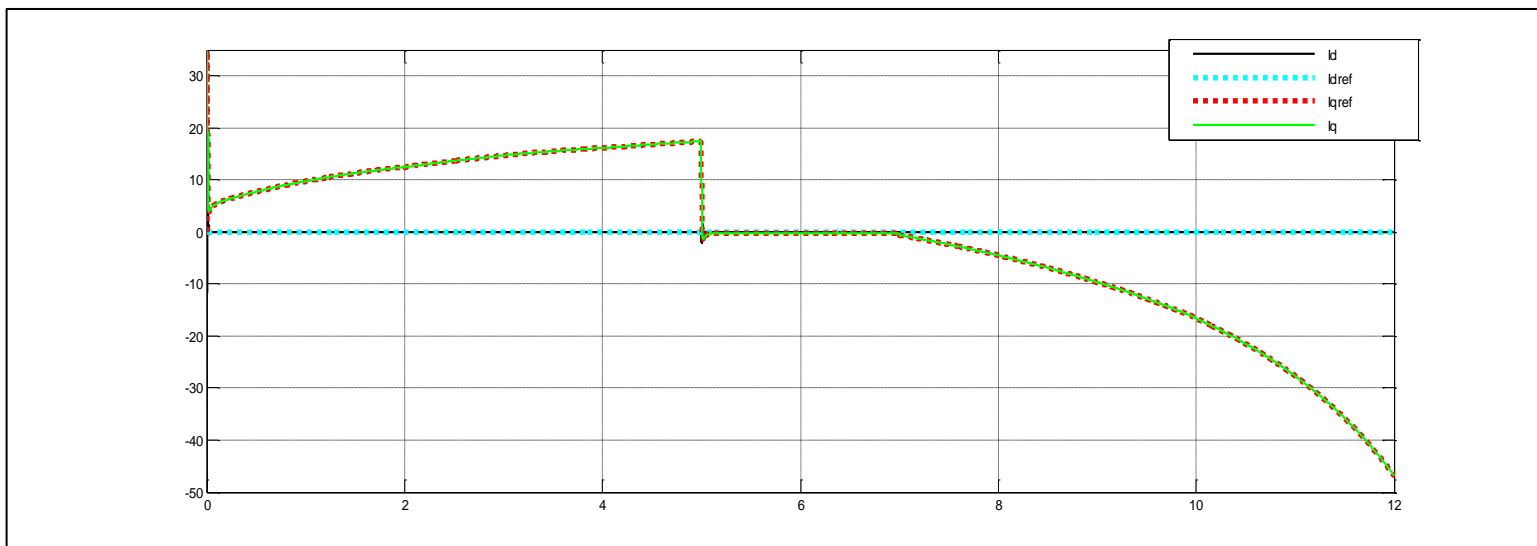


Figure IV.6 : Courants direct I_d et en quadrature I_q et leur références.

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

4) Couple électromagnétique et couple résistant :

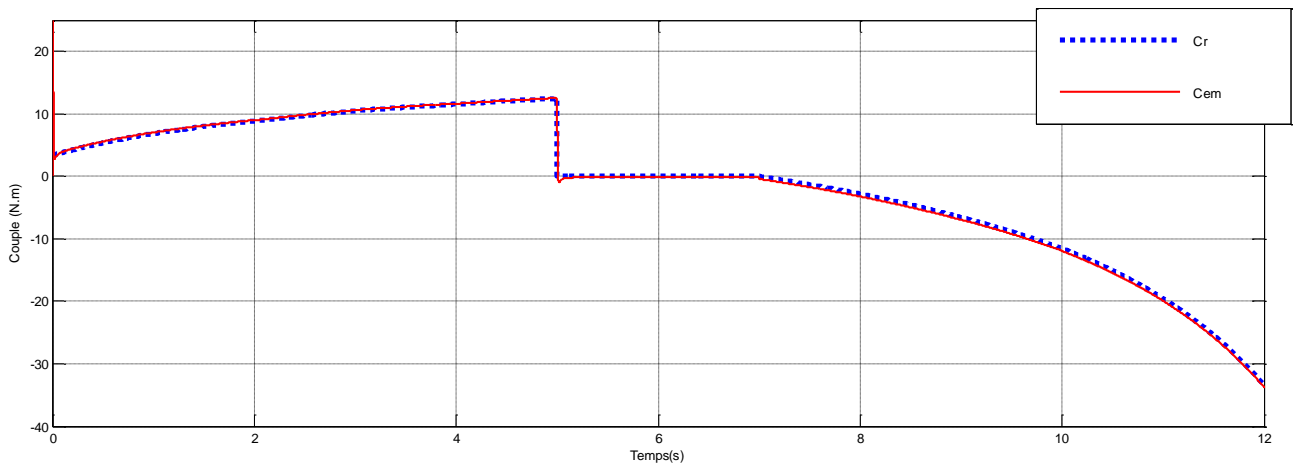


Figure IV.7 : Couple électromagnétique et couple résistant.

Commentaire :

La figure IV.6 représente l'évolution des couples électromagnétique et résistant, avec leurs signes positifs et négatifs correspondant au fonctionnement en tant que moteur et générateur respectivement.

Conclusion :

Le système en question a été modélisé et implémenté dans l'environnement MATLAB/Simulink, générant un code de calcul. Les résultats de simulation ont démontré que le comportement dynamique du système est maîtrisé grâce à l'application de la commande utilisée. En effet, il est possible de stocker et de restituer de la puissance, ce qui confère une grande fiabilité à cette commande.



Conclusion générale

L'objectif principal de cette étude était d'appliquer une commande non linéaire en mode glissant à un système de stockage inertiel afin d'améliorer ses performances dynamiques. Le système étudié, caractérisé par une structure variable, requérait une commande robuste pour maîtriser sa dynamique. Les simulations ont confirmé l'efficacité de la commande non linéaire en mode glissant appliquée au système de stockage électromécanique, qui joue un rôle essentiel dans le stockage et la restitution d'énergie en fonction des besoins. Le système de stockage inertiel fonctionne en mode moteur-générateur et est particulièrement adapté pour lisser la puissance injectée vers la charge.

Les perspectives futures incluent la validation expérimentale du modèle du système, la conception d'un système de stockage inertiel basé sur une machine à rotor extérieur et une comparaison avec d'autres commandes non linéaires. En outre, notre étude a exploré diverses méthodes de stockage d'énergie, mettant en avant les avantages du stockage inertiel tels que la réactivité, la durabilité et la capacité à gérer les fluctuations de charge. Nous avons examiné les composants clés du stockage inertiel, comparé différentes méthodes de stockage d'énergie et abordé brièvement la suspension magnétique et les machines associées.

Notre analyse a également porté sur la complexité de la commande des moteurs à courant alternatif, explorant plusieurs techniques, dont la commande vectorielle, désormais utilisée dans diverses applications industrielles. Enfin, notre dernier chapitre s'est concentré sur la commande par mode glissant appliquée aux systèmes de stockage inertiel, avec une attention particulière aux principes fondamentaux, aux modes de trajectoire et à la conception de la commande. Les résultats de simulation du comportement dynamique du système de stockage d'énergie inertiel ont été présentés et détaillés dans l'annexe. Ces travaux contribuent à façonner un avenir énergétique plus durable et résilient.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] L.BAKAY, “ Dimensionnement et pertes dans un centreur magnétique guidant un volant d’inertie soumis à un balourd : Application au stockage d’énergie de longue durée ” ; Thèse de doctorat de l’Université Laval Québec, Canada, Avril 2012.
- [2] F.FAURE, “suspension magnétique pour volant d’inertie” ; Thèse de doctorat de l’institut national polytechnique de Grenoble, France, juin 2003.
- [3] G-O.CIMUCA, “système inertiel de stockage d’énergie associe à des générateurs éoliens” ; Thèse de doctorat de l’Ecole Nationale Supérieure d’Arts et Métiers Centre de Lille, France, 2005.
- [4] H.BOUTOUCHE et R.OUERDANE, “Modélisation et Commande de la Machine Synchro-Réductance Assistée par des Aimants Permanents” ; Thèse de doctorat de l’Ecole Nationale Polytechnique d’Alger, Algérie, Juin 2017.
- [5] A.KADDOURI, “Etude d'une commande non-linéaire adaptative d'une machine synchrone à aimants permanents” ; Thèse de doctorat de l’Université Laval Québec, Canada, 2000.
- [6] H.HAMOUCHE, “Système inertiel de stockage d’énergie à palier supraconducteur” ; Revue des Energies Renouvelables SMEE’10 Bou Ismail Tipaza, Algérie, 2010.
- [7] A.BOUCHAHED, “Commande non linéaire des Moteurs Synchrones à Aimants Permanents” ; Thèse de doctorat de l’Université Badji Mokhtar –Annaba, Algérie, Avril 2017.
- [8] T.TOUDJA, “Commande non linéaire robuste d’un moteur synchrone à aimant permanent” ; magister en électrotechnique de l’Ecole Nationale Polytechnique d’Alger, Algérie, Juin 2017.
- [9] B.LAHMAR, “commande vectorielle de la machine synchrone à aimant permanents”, master de l’université LARBI BEN M’HIDI Oum el Bouaghi, Algérie ,2017.
- [10] S.REHMA, S-S.MOUMEN, “commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents MSAP” master de l’université Echahide Hamama Lakhdar d’el Oued, Algérie, 2018.
- [11] W.BOUDJTAT, HIMOURA ABDELKADER, “étude et simulation d’une machine asynchrone alimente un onduleur de tension à commande MLI”, master de l’université Badji Mokhtar Annaba, Algérie, juin 2017.

-
- [12] A. BOUDJEMA, “Commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents MSAP”, Mémoire de master de l’université Mohamed Khider Biskra, Algérie, 2014.
- [13] F.BENCHABANE “Commande en position et en vitesse par mode de glissement d’un moteur synchrone triphasé à aimants permanents avec minimisation du chattering”, Mémoire de magister de l’université Mohamed Khider de Biskra, Algérie, 2005.
- [14] A.ABDELLI “Optimisation multicritère d’une chaîne éolienne passive”. Thèse de doctorat de l’institut National Polytechnique De Toulouse, France, 2007.
- [15] M.ABID, A.MANSOURI, A.AISSAOUI, B.BELABBES “Sliding mode application in position control of an induction machine”. J.EECTR.ENGIN vol.59, N° 06 p. 322-327, 2008.
- [16] I.SAKHRAOUI, “Commande avancée d'une machine asynchrone”, Mémoire de master de l’université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie, Juin
- [17] L. BAKAY, “Stockage Inertiel- Recherche bibliographique”, Document interne LEEPCI- Université Laval, Canada, juin 2007

Paramètre de la Machine synchrone à aimant permanent (MSAP) :

Paramètre	Valeur
L_d	$9.515 \cdot 10^{-4}$ [H]
R_s	0.1738 [Ω]
L_q	$9.515 \cdot 10^{-4}$ [H]
P	4
J	0.1 [kg/m ²]
f	0.008 [N.m/rad]
φ_r	0.12 [Wb]

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

Paramètre	Valeur
K_d	50
K_q	300
K_Ω	70

Paramètres de volant :

Paramètre	Valeur
J_v	1.66 kg.m ²
J_t	1.76 kg.m ²

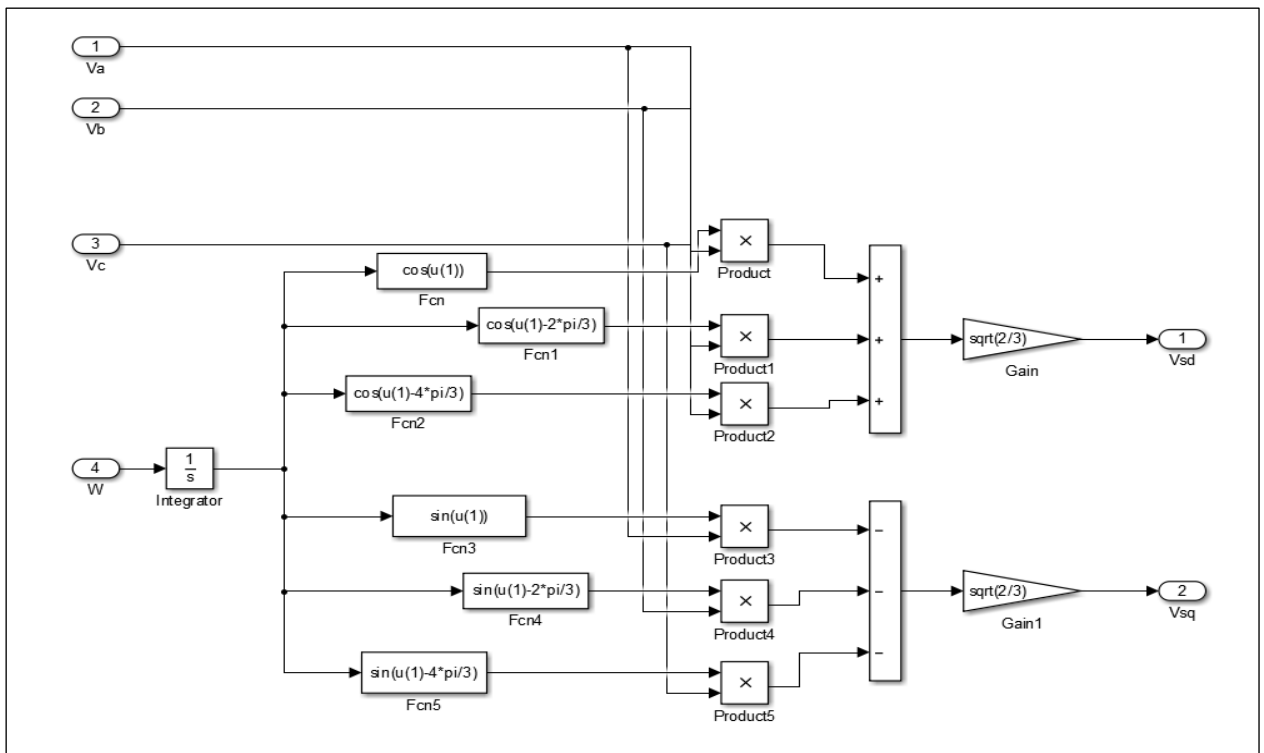


Figure 01 : Schéma bloc de la transformation de Park

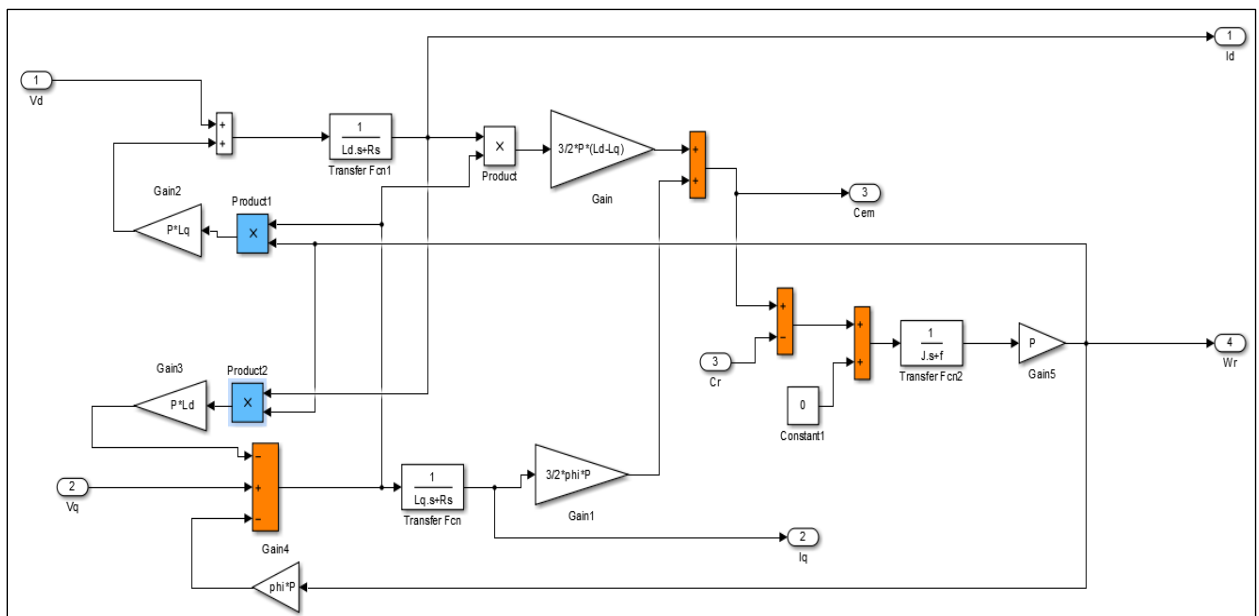


Figure 02 : Schéma de la machine synchrone à aimant permanent

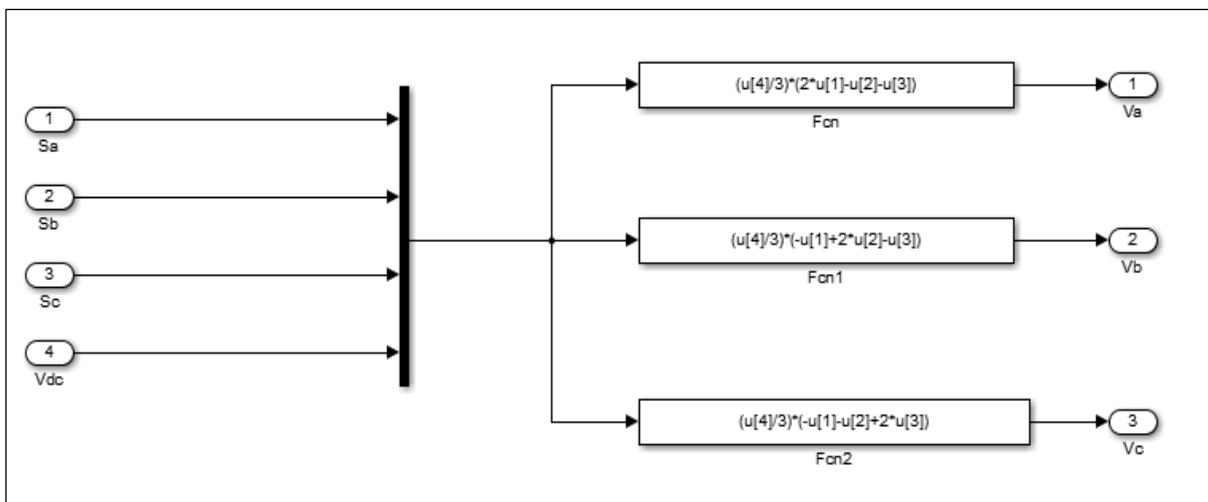


Figure 03 : Schéma bloc de l'onduleur sous MATLAB

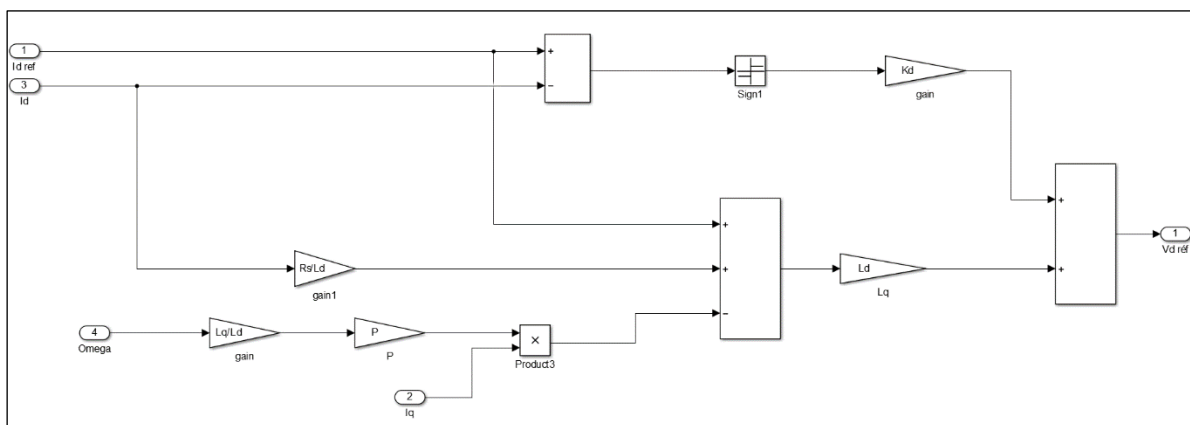


Figure 04 : Schéma du régulateur par mode glissant du courant direct

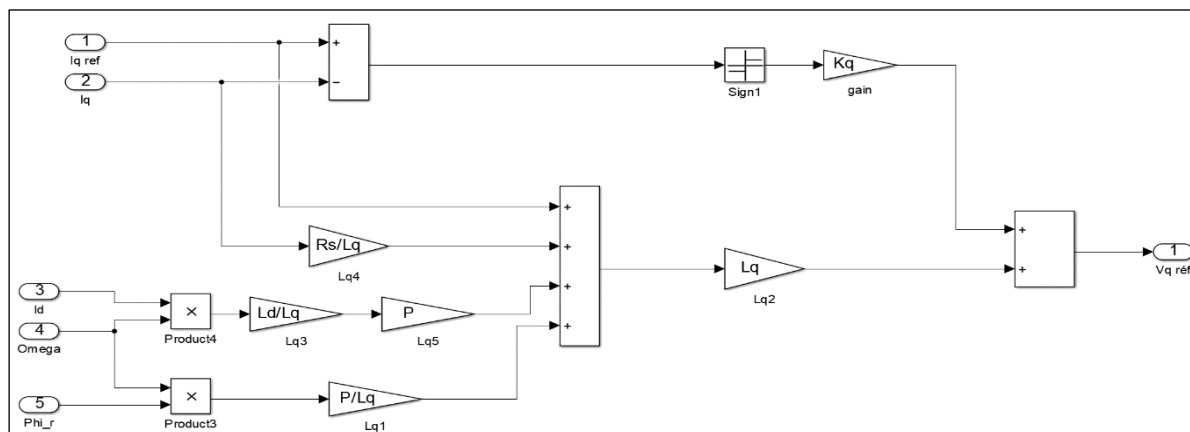


Figure 05 : Schéma de régulateur par mode glissant du courant en quadrature

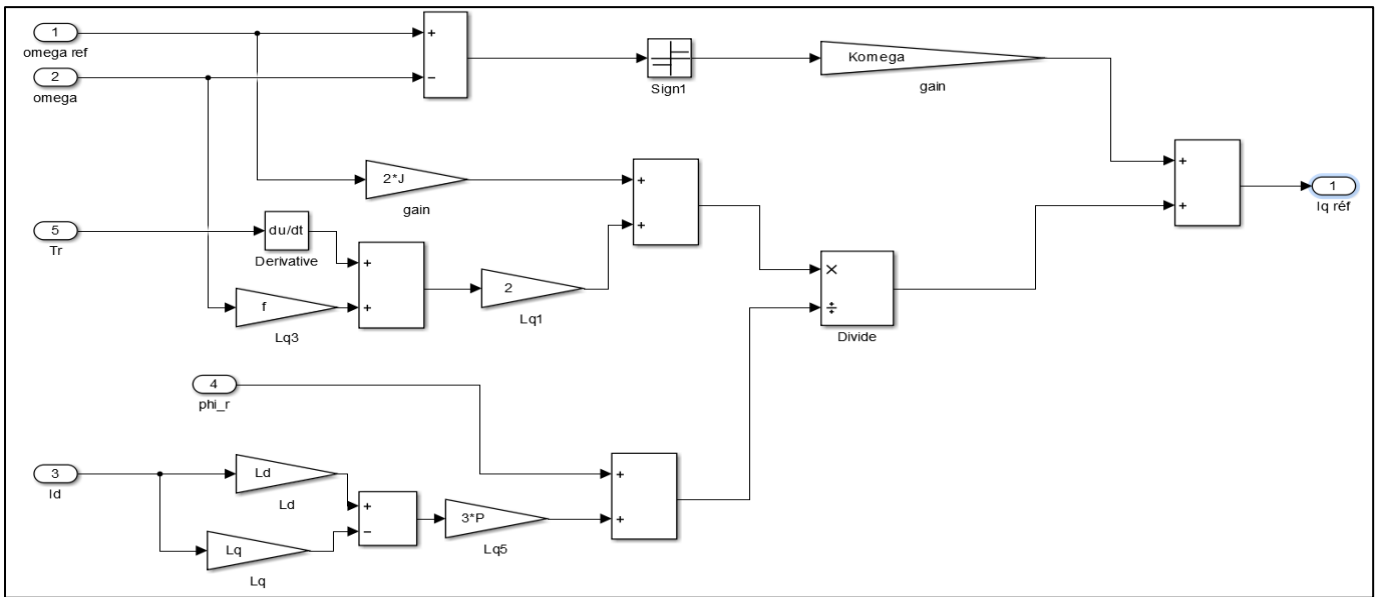


Figure 06 : Schéma de régulateur par mode glissant de la vitesse