

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences de l'ingénierat  
Département : Electrotechnique  
Domaine : Sciences et Technologie  
Filière : Electrotechnique  
Spécialité : commande électrique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**Commande d'une machine asynchrone à double  
alimentation en présence d'asymétrie du réseau  
d'alimentation**

Présenté par : *Ben chabane nour eslam*  
*Diaf Nader Zakaria*

Encadrant : *Chelli Seif elislam*

BADJI MOKHTAR - ANNABA

Jury de Soutenance :

Président	Pr. Omeiri Amar	BADJI MOKHTAR ANNABA
Examineur	Dr. Bouchikha Hocine	BADJI MOKHTAR ANNABA

Année Universitaire : 2024/2025



## Remerciements

*Avant toute chose, je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude à Dieu Tout-Puissant, pour m'avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires tout au long de ce travail.*


*Je souhaite adresser mes sincères remerciements à mon encadrant.*

*Je remercie également l'ensemble des enseignants de département d'électrotechnique pour la qualité de leur enseignement, leur engagement, et les connaissances qu'ils m'ont transmises au fil de mon parcours.*

*Un grand merci à mes camarades et collègues pour leur entraide, leurs encouragements et les échanges constructifs que nous avons partagés, notamment durant la phase de simulation et de rédaction.*

*Je n'oublie pas d'exprimer toute ma reconnaissance à ma famille, en particulier à mes parents, pour leur soutien moral constant, leur amour inconditionnel, et leur confiance en moi. Ce travail leur est dédié.*

*Enfin, à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce mémoire, je dis : merci.*



# *Dédicace*

*A ma chère mère qui pleure avant de pleurer et se réjouit avant de  
Se réjouir À qui elle s'est sacrifiée pour nous et a été patiente avec  
Notre éducation à qui je ne remplis pas son droit (Que Allah  
vous*

*Récompense)*

*A mon chère père, qui m'a toujours soutenu et aidé à affronter les  
difficultés,*

*Pour tous ce qui ont fait pour que je puisse les honorer ;*

*A tous mes chères sœurs et mes chères frères ;*

*A mes tantes et oncles ;*

*A toute ma famille ;*

*A tous mes amis ;*

*A tous les enseignants du département d'électrotechnique ;*

*...je dédie ce modeste travail*

## ملخص

يركز عملنا على التحكم في متجهات الآلات الكهربائية غير متزامنة ثنائية التغذية في حال وجود اختلالات في شبكة إمداد الطاقة. يمكن أن تُسبب هذه الاختلالات آثارًا سلبية، مثل تشوهات الجهد والتيار، بالإضافة إلى تدهور أداء الطاقة (الطاقة الفعالة والتفاعلية). وللتعويض عن هذه الآثار، اعتمدنا استراتيجية تحكم قائمة على تفكيك النظام إلى مكونين منفصلين: نظام التسلسل الموجب ونظام التسلسل السالب. يُتيح هذا النهج معالجة الاضطرابات الناجمة عن اختلال التوازن بشكل منفصل، وتحسين استقرار وأداء آلة الحث ثنائية التغذية، لا سيما من حيث جودة الطاقة ومثانة التحكم.

**الكلمات المفتاحية:** الآلات الكهربائية غير متزامنة ثنائية التغذية، عدم التوازن، التحكم، التحليل، نظامين (نظام موجب ونظام سالب).

## Résumé :

Notre travail porte sur la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) en présence de déséquilibres dans le réseau d'alimentation. Ces déséquilibres peuvent engendrer des effets néfastes tels que des distorsions des tensions et courants, ainsi qu'une dégradation des performances énergétiques (puissances active et réactive). Afin de compenser ces effets, nous avons adopté une stratégie de commande reposant sur la décomposition du système en deux composantes distinctes : le système de séquence positive et le système de séquence négative. Cette approche permet de traiter séparément les perturbations liées au déséquilibre et d'améliorer la stabilité et les performances de la MADA, notamment en termes de qualité de l'énergie et de robustesse de la commande.

**Mots clés :** Machine Asynchrone à Double Alimentation, déséquilibre, contrôle, décomposition, deux systèmes ( système positif et système négatif).

## Abstract :

Our work focuses on the vector control of the Doubly-Fed Induction Generator (DFIG) under unbalanced grid conditions. Such imbalances can cause harmful effects, including voltage and current distortions, as well as a degradation of energy performance (active and reactive power). To mitigate these effects, we adopted a control strategy based on the decomposition of the system into two distinct components: the positive-sequence and the negative-sequence systems. This approach allows for separate treatment of imbalance-related disturbances and enhances the stability and performance of the DFIG, particularly in terms of power quality and control robustness.

**Keywords:** Double-Fed Induction Generator , unbalance, control, decomposition, two systems (positive system and negative system).

# Sommaire

Introduction générale.....	01
<b>Chapitre 1 : La Commande Vectorielle de la MADA (cas d'équilibre)</b>	
1.1 Définition de la machine asynchrone à double alimentation.....	04
1.2 Principe de fonctionnement .....	05
1.3 Avantages de la MADA.....	05
1.4 Inconvénients de la MADA.....	06
1.5 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation.....	06
1.5.1 Hypothèses simplificatrices.....	07
1.5.2 Modélisation de la MADA.....	07
1.5.3 Equations de la MADA.....	08
1.5.3.1 Equations électriques.....	08
1.5.3.2 Equations magnétiques.....	08
1.5.3.3 Application de la transformation de Park à la MADA.....	09
1.5.3.4 Equations des tensions.....	10
1.6 Commande vectorielle de la MADA.....	11
1.6.1 Stratégie de la commande de la machine asynchrone à double alimentation..	11
1.6.2 Relation entre les puissances statorique et courants rotoriques.....	12
1.6.3 Relation entre tensions rotoriques et courants rotoriques.....	13
1.7 Synthèse et conception du régulateur (PI) .....	15
1.8 Conclusion.....	17
<b>Chapitre 2 : Commande vectorielle de la MADA (cas de déséquilibre)</b>	
2.1 Introduction.....	19

2.2 Les conditions qui provoquent l'apparition de déséquilibre.....	19
2.3 Les effets du déséquilibre sur le fonctionnement de la MADA.....	20
2.4 La méthodes d'extraction des deux séquences positive et négative.....	21
2.4.1 La méthode de transformation de Fortescue.....	22
2.5 Modélisation de la MADA en cas de déséquilibre.....	23
2.5.1 La compensation des oscillations 2 .....	25
2.6 La Commande vectorielle dans le cas de déséquilibre.....	26
2.6.1 Les expressions des tensions rotoriques.....	26
2.7 Conclusion.....	28
<b>Chapitre 3 : Résultats et commentaires</b>	
3.1 Partie 1 ( la commande vectorielle standard).....	30
3.2 Partie 2 ( l'approche de décomposition en deux systèmes ).....	35
3.3 Conclusion.....	40
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>41</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>42</b>

## Notations et Symboles

**MADA** : machine asynchrone à double alimentation.

**PI** : régulateur proportionnel intégrale.

**LS**: Inductance cyclique statorique.

**LR**: Inductance cyclique rotorique.

**M** : Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

**$\omega_s$** : pulsation statorique .

**Ps** : puissance statorique active.

**Qs** : puissance statorique réactive.

**$\theta_s$**  = angles de rotation entre le référentiel  $(\alpha, \beta)$  et  $(d, q)$ .

**$\theta$**  : angles de rotation entre le référentiel  $(\alpha, \beta)$  et  $(x, y)$ .

**$d - q$**  : axes correspondants au référentiel lié au champ tournant.

**$v$**  : tension.

**$i$**  : courant.

**$g$**  : le glissement.

**Rs, Rr** : résistances d'enroulements statorique et rotorique par phase.

**Te** : couple électromagnétique.

**$p$**  : nombre de paires de pôles.

**Kp, ki** : gains des régulateurs PI.

**$s$**  : opérateur de Laplace.

**$t$**  : temps.

**$\Phi$**  : Flux.

**$\tau_r$**  : temps de réponse .

**E**: Tension continue.

## Liste des figures

**Figure I.1:** a) Stator

**Figure 1.1:** b) Rotor bobiné

**Figure 1.2 :** Schéma d'alimentation typique de la MADA.

**Figure 1.3** Représentation de l'enroulement triphasé de la MADA

**Figure 1.4** Modèle de la machine après transformation de Park

**Figure 1.5** Représentation de Park d'une machine asynchrone à double alimentation

**Figure 1.6** schéma bloc du système à réguler

**Figure 1.7 :** principe générale de la commande vectorielle de la MADA

**Figure 1.8** Schéma globale

**Figure 1.9** Système régulé par un PI.

**Figure 2.1** Représentation des trois systèmes ; (a) direct, (b) inverse et (c) homopolaire

**Figure 2.2** Schéma blocs des régulateurs

**Figure 2.3** Schéma blocs de la commande globale

**Figure 3.1** Les tensions ( $V_a V_b$  et  $V_c$ ).

**Figure 3.2** Les composantes  $V_{sd}$  et  $V_{sq}$

**Figure 3.3** le courant  $I_{sd}$

**Figure 3.4** le courant  $I_{sq}$

**Figure 3.5** puissance active  $P_s$ .

**Figure 3.6** puissance réactive  $Q_s$

**Figure 3.7** Le réseau d'alimentation

**Figure 3.8** Les composants  $V_{sd+}$   $V_{sq+}$

**Figure 3.9** Les composants  $V_{sd-}$   $V_{sq-}$

**Figure 3.10** le courant  $I_{d+}$  et sa référence

**Figure 3.11** le courant  $I_{q+}$  et sa référence

**Figure 3.12** le courant  $I_{d-}$  et sa référence

**Figure 3.13** le courant  $I_{q-}$  et sa référence

**Figure 3.14** Les puissances active  $P_s$  réactive  $Q_s$ .



## Liste des tableaux

**Tab 1.** Les paramètres de la MADA

**Tab 2.** Les paramètres de régulateur PI.

## Introduction générale :

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) est aujourd'hui la technologie la plus répandue pour la production d'électricité à partir de l'énergie éolienne. Elle présente plusieurs avantages notables, notamment la possibilité de fonctionner à vitesse variable. Un contrôle indépendant de la puissance active et réactive est assuré, tout en permettant l'emploi de convertisseurs de dimensions réduites. La solution la plus fréquemment adoptée — et la plus efficiente en termes de compacité des convertisseurs — consiste à raccorder le stator directement au réseau, tandis que le rotor est couplé au réseau au moyen d'une interface constituée de deux convertisseurs statiques, l'un du côté de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) et l'autre du côté du réseau.

Cependant, cette configuration rend la machine sensible aux perturbations du réseau, telles que les déséquilibres de tension et la présence d'harmoniques, souvent causées par l'alimentation de charges monophasées.

Ces perturbations entraînent, d'une part, des fluctuations du couple électromagnétique générant des vibrations mécaniques importantes, ce qui réduit la durée de vie de la machine. D'autre part, elles provoquent l'apparition d'harmoniques de basse fréquence dans les courants statoriques, dégradant la qualité de l'énergie produite, ce qui restreint l'intégration de la MADA dans les systèmes de production exigeant une conformité rigoureuse aux normes de qualité de l'énergie électrique.

Pour pallier ces contraintes, il est indispensable de développer de nouvelles stratégies de commande visant à améliorer les performances de la MADA lorsqu'elle est alimentée par un réseau perturbé. Dans ce contexte, de nombreuses recherches ont été menées, proposant des améliorations des commandes classiques ou le développement de techniques de commande adaptées pour garantir un fonctionnement optimal de la machine, même en présence de perturbations. [1]

La commande vectorielle, ou commande orientée flux (Field-Oriented Control, FOC), offre la possibilité de piloter une machine asynchrone à double alimentation (MADA) de façon équivalente à une machine à courant continu à excitation séparée. Dans cette configuration, le courant d'excitation régule le flux magnétique, tandis que le courant de l'induit agit sur le couple, assurant ainsi une séparation naturelle entre ces deux variables. Ce découplage assure une réponse dynamique rapide du couple, une large plage de régulation de la vitesse, ainsi qu'un rendement élevé, même sous forte charge en régime permanent.

Pour reproduire ce comportement dans une machine asynchrone, la commande vectorielle est mise en œuvre. Introduite par Blaschke et Hasse au début des années 1970, cette méthode repose sur la décomposition du vecteur de courant statorique ou rotorique en deux composantes orthogonales : l'une générant le flux, l'autre produisant le couple.

Cette stratégie permet de maintenir un angle de  $90^\circ$  entre le vecteur de flux (qu'il soit statorique ou rotorique) et le courant du stator, ce qui donne à la machine asynchrone un comportement dynamique comparable à celui d'une machine à courant continu à excitation indépendante. [2]

Le premier chapitre traite pour sa part l'objectif principal du contrôle vectoriel appliqué à la machine asynchrone à double alimentation (MADA), qui est de réguler indépendamment la puissance active et réactive en modulant les courants du rotor. Cela permet un fonctionnement en vitesse variable, une régulation précise de la puissance injectée dans le réseau, une meilleure performance dynamique, et une intégration optimale aux systèmes comme les éoliennes.

Dans le deuxième chapitre dans un système déséquilibré, la commande vectorielle de la MADA vise à compenser les perturbations pour maintenir un contrôle stable et efficace de la puissance, tout en réduisant les effets négatifs comme les vibrations, les pertes et les chutes de performance.

Dans le troisième chapitre la simulation MATLAB permet de prédire, analyser et améliorer le comportement de la MADA avec commande vectorielle, que le réseau soit équilibré ou non, pour garantir efficacité, stabilité et continuité de service.

# **CHAPITRE I**

## **La Commande Vectorielle de La MADA (cas d'équilibre)**

## 1.1 Définition de la machine asynchrone à double alimentation

Le stator de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) est semblable à celui des machines triphasées à induction classiques, qu'il s'agisse de machines à cage d'écureuil ou de machines synchrones. Ce stator est généralement constitué d'un empilement de tôles magnétiques munies d'encoches, dans lesquelles sont insérés les enroulements triphasés [3].

Ce qui distingue la MADA, c'est la configuration de son rotor : contrairement aux machines à cage classique, où le rotor est une cage en court-circuit moulée dans les encoches, le rotor de la MADA est composé de trois enroulements bobinés, décalés de  $120^\circ$  et connectés en étoile.

Les extrémités libres de ces enroulements sont raccordées à des bagues collectrices, sur lesquelles des balais frottent pendant la rotation pour permettre une alimentation électrique externe du rotor (Figure. 1.1)

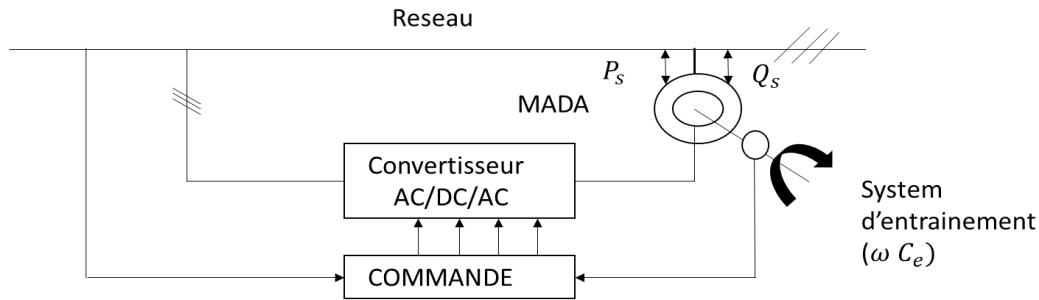


**Figure 1.1:** a) Stator



**Figure 1.1:** b) Rotor bobiné

Une machine est dite à double alimentation lorsqu'elle reçoit de l'énergie électrique à la fois par le stator et par le rotor. Dans les systèmes modernes, l'une des deux alimentations, le plus souvent celle du rotor, est assurée par un convertisseur électronique de puissance. Cette configuration permet de réguler la vitesse de la machine, qu'elle fonctionne en mode moteur ou en mode générateur. Le convertisseur, souvent connecté au rotor, permet une variation de la fréquence et de la tension selon les besoins. En revanche, le stator est généralement relié directement au réseau électrique, qui fournit une tension et une fréquence fixes. [4]



**Figure 1.2** : Schéma d'alimentation typique de la MADA.

## 1.2 Principe de fonctionnement

La machine asynchrone double alimentation (MADA) est un type de moteur électrique asynchrone dont le rotor et le stator sont alimentés séparément par deux sources de tension alternatives. Son principe de fonctionnement repose sur l'interaction entre les champs magnétiques tournants générés par les deux enroulements. Lorsque le rotor est alimenté à une fréquence variable, il permet de contrôler la vitesse de rotation et le couple de la machine, indépendamment de la fréquence du réseau connecté au stator. Cette caractéristique en fait une solution privilégiée pour les applications nécessitant une variation de vitesse, comme les éoliennes à vitesse variable, où la MADA permet une récupération optimale de l'énergie tout en assurant une bonne stabilité du réseau électrique [5].

## 1.3 Avantages de la MADA :

La MADA présente plusieurs atouts majeurs, parmi lesquels on peut mentionner notamment : [2]:

- Accessibilité au rotor et au stator: Cette caractéristique permet de mesurer les courants avec une grande précision, ce qui facilite un contrôle plus précis du flux et du couple électromagnétique.
- Flexibilité et reconfiguration : Grâce à sa double alimentation, la MADA offre une grande adaptabilité, ce qui lui permet de s'appliquer dans un large éventail de secteurs.
- Meilleure densité de puissance : La MADA présente une puissance massique légèrement supérieure à celle des autres machines de grande puissance, ce qui la rend plus efficace pour certaines applications.

- Fonctionnement à couple constant au-delà de la vitesse nominale : Ce fonctionnement permet à la MADA de maintenir des performances optimales même à des vitesses plus élevées que la vitesse nominale, ce qui est un avantage dans des applications spécifiques.
- Dimensionnement optimisé du convertisseur lié au rotor: Le convertisseur alimentant le rotor est conçu pour une puissance équivalente à environ un tiers de la puissance nominale de la machine. Lorsque la machine opère à une vitesse proche de la synchronisation, les pertes dans les composants semi-conducteurs restent limitées, ce qui conduit à un rendement global élevé pour l'ensemble machine-convertisseur.

#### 1.4 Inconvénients de la MADA :

Par rapport à la machine asynchrone à cage, la MADA présente certains inconvénients, essentiellement liés au système brosses-bagues, comme indiqué dans [2] :

- Une taille et un coût plus importants par rapport à la machine à cage en raison de l'existence du système brosses-bague.
- Elle est moins fiable que celle à cage en raison du système balais-bague qui y est intégré.
- Et le bobinage du rotor nécessite un entretien régulier, ce qui entraîne une hausse des dépenses d'exploitation.
- La quantité de capteurs mise en place pour assurer le fonctionnement du système.

#### 1.5 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

La modélisation de la machine asynchrone constitue une phase cruciale pour évaluer ses performances, élaborer des systèmes de contrôle efficaces (comme la commande vectorielle ou la commande directe du couple) et assurer son utilisation optimale dans divers domaines d'application (entraînements industriels, véhicules électriques, énergies renouvelables, etc.). Différentes méthodes de modélisation sont disponibles, parmi lesquelles le modèle en référentiel triphasé et la transformation de Park qui facilite une représentation simplifiée dans

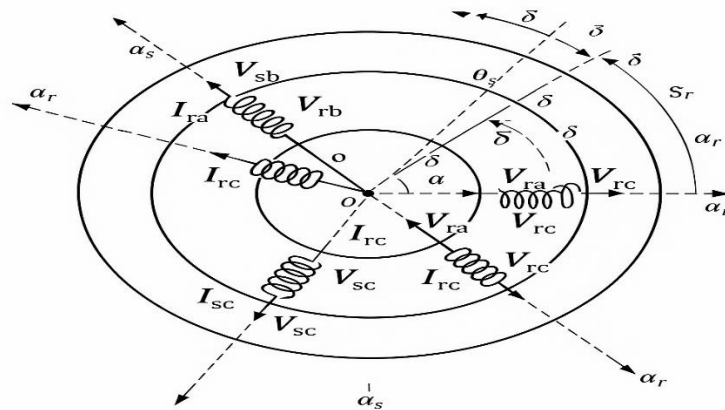
un référentiel tournant, ainsi que des modèles prenant en compte les saturations magnétiques ou les défauts [6].

### 1.5.1 Hypothèses simplificatrices

Le modèle MADA adopté s'appuie sur les suppositions simplificatrices traditionnelles suivantes [7] :

- ✓ Un entrefer constant.
- ✓ Effet des entailles négligé.
- ✓ Distribution sinusoïdale des forces magnétomotrices dans l'espace entrefer.
- ✓ Les effets de la peau et de l'échauffement n'ont pas été considérés.
- ✓ Circuit magnétique non saturé et à perméabilité stable.
- ✓ Il n'y a pas de régime homopolaire, car le neutre n'est pas raccordé.
- ✓ Ainsi, tous les coefficients d'inductance propre restent fixes, tandis que les coefficients d'inductance mutuelle dépendent uniquement de la configuration des enroulements.

### 1.5.2 Modélisation de la MADA :



**Figure 1.3** Représentation de l'enroulement triphasé de la MADA

$a_s, b_s, c_s$  Correspondent aux trois phases du stator

$a_r, b_r, c_r$  Correspondent aux trois phases du rotor

Les deux axes  $O_d$  et  $O_q$ , sont perpendiculaires et serviront à transformer les équations de la machine. Leurs positions peuvent être quelconques vue l'isotropie du stator et du rotor.



$$O_{as}, O_d = \theta_d, O_d = \theta_s, O_{ar} = \theta_s - \theta_r = \theta$$

L'angle  $q$  caractérise la position angulaire du rotor par rapport au stator, d'où la vitesse angulaire :  $\omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt}$

Avec :  $\omega = P\Omega$

### 1.5.3 Equations de la MADA :

#### 1.5.3.1 Equations électriques :

La MADA peut être décrite à l'aide des équations correspondant aux phases du stator et du rotor, telles que :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (2)$$

avec :

$[V_{sa} \ V_{sb} \ V_{sc}]^T, [V_{ra} \ V_{rb} \ V_{rc}]^T$  Vecteurs des tensions statoriques et rotoriques,

$[i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc}]^T, [i_{ra} \ i_{rb} \ i_{rc}]^T$  Vecteurs des courants statoriques et rotoriques,

$[\phi_{sa} \ \phi_{sb} \ \phi_{sc}]^T, [\phi_{ra} \ \phi_{rb} \ \phi_{rc}]^T$  Vecteurs des flux statoriques et rotoriques,

$R_s, R_r$  sont respectivement la résistance statorique et rotorique.

#### 1.5.3.2 Equations magnétiques :

Les expressions des flux en fonction des courants statoriques et rotoriques sont données par :

$$\begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \cdot \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \cdot \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (4)$$

avec :

$L_s, L_r$  : Inductances propres statoriques et rotoriques,

$M_s$  : Inductance mutuelle entre phases statoriques,

$M_r$  : Inductance mutuelle entre phases rotoriques.

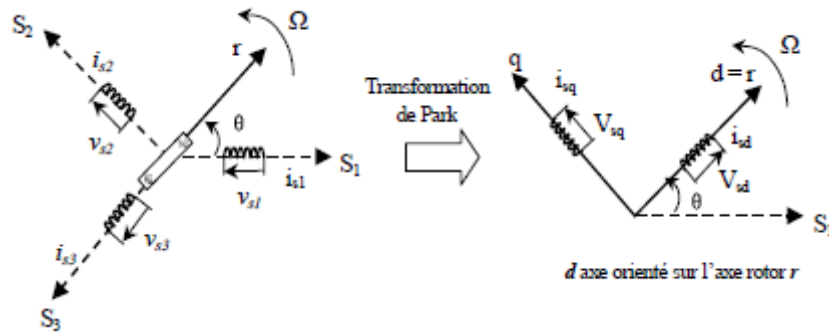
La matrice des inductances mutuelles liant les phases du stator à celles du rotor varie en fonction de l'angle  $\theta$ , qui correspond à la position relative entre les axes du stator et du rotor :

$$[M_{sr}] = M_0 \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

Il est évident que la représentation de  $[V_{as}]$  et  $[V_{ar}]$  en fonction des courants aboutit à un système d'équations dont les coefficients évoluent avec le temps. Pour simplifier l'analyse et surmonter cette complexité, il est nécessaire de recourir à la transformation de Park. Cette méthode permet d'obtenir un modèle équivalent aux coefficients constants, facilitant ainsi l'étude et la commande de la machine asynchrone.

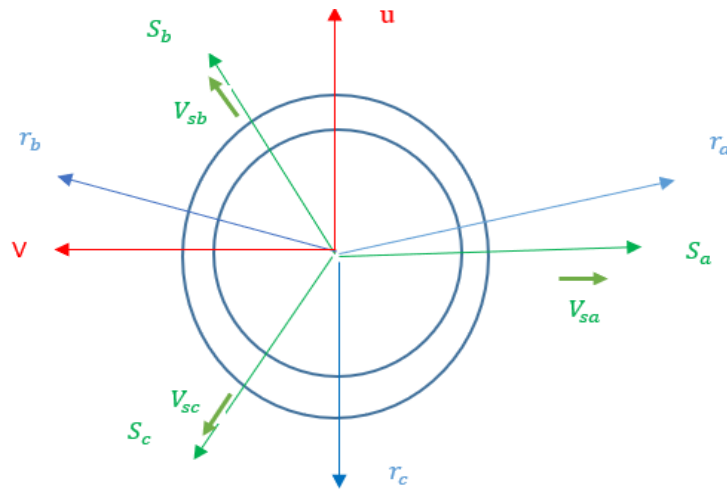
### 1.5.3.3 Application de la transformation de Park à la MADA :

Afin de faciliter l'étude et le contrôle de la MADA, la transformation de Park s'avère être un outil mathématique fondamental. Elle permet de convertir un référentiel triphasé fixe en un référentiel biphasé tournant. Cette transformation consiste à convertir les grandeurs triphasées (courants, tensions, flux) dans un repère biphasé tournant (d-q), aligné selon un axe choisi (statorique, rotorique ou champ tournant).



**Figure 1.4** Modèle de la machine après transformation de Park

Nous mettons en œuvre la transformation de Park sur l'appareil à double alimentation, illustré par la figure 1.5



**Figure 1.5** Représentation de Park d'une machine asynchrone à double alimentation

### 1.5.3.4 Equations des tensions :

Les équations de Park. Statoriques et rotoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \cdot \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r \cdot \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \omega_r \cdot \phi_{rd} \end{cases} \quad (6)$$

Les flux sont donnés dans le système :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s \cdot i_{sd} + M \cdot i_{sq} \\ \phi_{sq} = L_s \cdot i_{sq} + M \cdot i_{sd} \\ \phi_{rd} = L_s \cdot i_{rd} + M \cdot i_{sd} \\ \phi_{rq} = L_s \cdot i_{rq} + M \cdot i_{sq} \end{cases} \quad (7)$$

## 1.6 Commande vectorielle de la MADA

La commande vectorielle pour la machine à double alimentation constitue une solution particulièrement intéressante pour des applications exigeant de hautes performances, telles que les entraînements à vitesse variable ou les systèmes de production énergétique. Elle convient parfaitement aux situations où les variations de vitesse restent proches de la vitesse synchrone. Dans ces entraînements, la puissance échangée par le rotor (puissance liée au glissement) est proportionnelle à ce dernier. Ainsi, la conversion d'énergie peut être réalisée via un convertisseur de puissance situé côté rotor, qui ne traite qu'une fraction réduite de la puissance totale du système [8].

### 1.6.1 Stratégie de la commande de la machine asynchrone à double alimentation:

1) La première approche repose sur la négligence des termes de couplage, en mettant en place un régulateur distinct pour chaque axe, ce qui permet de contrôler séparément la puissance active et réactive. Cette méthode utilise des régulateurs qui agissent directement sur les tensions du rotor, correspondant ainsi à la commande vectorielle en mode direct.

2) La seconde méthode implique la prise en compte des termes de couplage et leur compensation à travers un système comprenant deux boucles qui permettent de contrôler les puissances et les courants rotoriques. Il s'agit de la commande vectorielle par voie indirecte [9].

$$\begin{aligned} V_{sd} &= R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \phi_{sq} \\ V_{sq} &= R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} - \omega_s \cdot \phi_{sd} \\ V_{rd} &= R_s \cdot i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r \cdot \phi_{rq} \\ V_{rq} &= R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} - \omega_r \cdot \phi_{rd} \end{aligned} \quad (8)$$

**Les équations magnétiques :**

$$\phi_{sd} = L_s \cdot i_{sd} + M \cdot i_{sq} \quad (9)$$

$$\phi_{sq} = L_s \cdot i_q + M \cdot i_{sq}$$

$$\phi_{rd} = L_s \cdot i_{sd} + M \cdot i_{sd}$$

$$\phi_{rq} = L_s \cdot i_{sq} + M \cdot i_{sq}$$

**L'équation mécanique :**

$$C_{em} = C_r + f\Omega + J \frac{d\Omega}{dt}$$

avec :

$C_{em}$  Couple électromagnétique

$C_r$  couple résistance

$\Omega$  Vitesse de rotation de la MADA

$J$  : Moment d'inertie

$f$ : Coefficient de frottement visqueux

L'expression du couple électromagnétique en fonction du flux statoriques et courants rotoriques est :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (i_{dr} \phi_{rq} - i_{qr} \phi_{dq}) \quad (10)$$

**1.6.2 Relation entre les puissances statorique et courants rotoriques :**

Dans un repère diphasé arbitraire, les puissances active et réactive du stator d'une machine asynchrone se décrivent par les expressions suivantes :

$$P_s = V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs}$$

$$Q_s = V_{qs} i_{qs} - V_{ds} i_{ds} \quad (11)$$

$$P_r = V_{dr} i_{dr} + V_{qr} i_{qr}$$

$$Q_r = V_{qr} i_{qr} - V_{dr} i_{dr}$$

L'adaptation de ces équations au système d'axe choisi et aux hypothèses simplifiées effectuées dans notre cas  $V_{ds}$  l'équation deviennent :

$$P_s = V_{qs} i_{qs}$$

$$Q_s = V_{ds} i_{ds} \quad (12)$$

En remplaçant  $i_{qs} i_{ds}$  par leurs expressions donner par l'équation (8) nous obtenus la puissance active et réactive comme suit

$$P_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{qr}$$

$$Q_r = \frac{V_s \phi_s}{L_s} - \frac{V_s M}{L_s} i_{dr} \quad (13)$$

En approximant  $\phi_s$  par  $\frac{V_s}{\omega_s}$  l'expression de la puissance réactive Q deviennent alors

$$Q = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{V_s M}{L_s} i_{dr} \quad (14)$$

En tenant compte du repère sélectionné, des hypothèses adoptées et en supposant que l'inductance magnétique M reste constante, le système obtenu établit une relation proportionnelle entre la puissance active et le courant statorique sur l'axe q, ainsi qu'entre la puissance réactive et le courant rotorique sur l'axe da, à une constante proche de  $\frac{V_s^2}{L_s \omega_s}$  près imposée par le réseau [8].

### 1.6.3 Relation entre tensions rotoriques et courants rotoriques :

$$\phi_{dr} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr} + \frac{V_s M}{\omega_s L_s} \quad (15)$$

$$\phi_{qr} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \quad (16)$$

On intègre alors ces formules de flux rotoriques d'axe d et q aux formules des tensions diphasées rotoriques :

$$V_{dr} = R_r i_{dr} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{d}{dt} i_{dr} - g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr}$$

$$V_{dr} = R_r i_{qr} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{d}{dt} i_{qr} - g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr} + \frac{g \omega_s (V_s M)}{\omega_s L_s} \quad (17)$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotorique diphasés disparaissent, nous pouvons alors écrire :

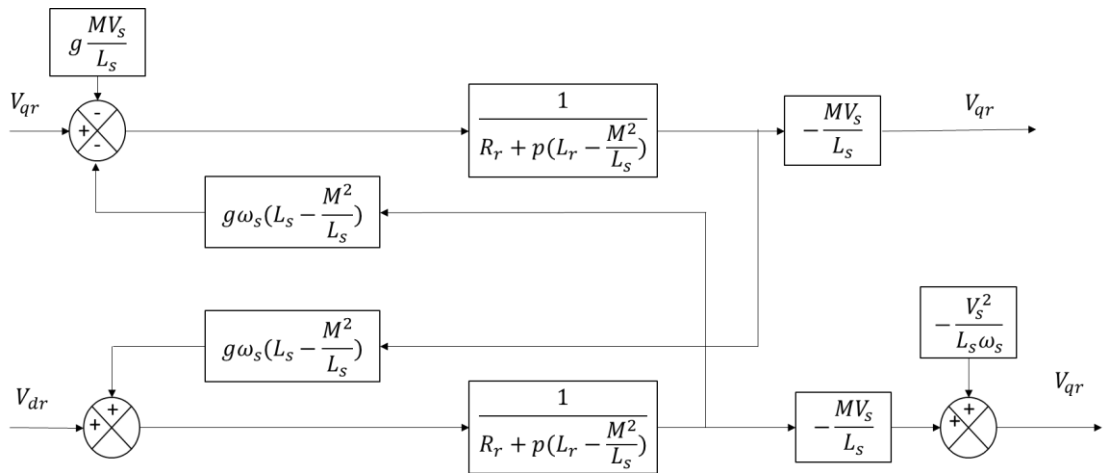
$$\begin{aligned}
 V_{dr} &= R_r i_{dr} - g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \\
 V_{qr} &= R_r i_{qr} + g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr} + \frac{g \omega_s (V_s M)}{\omega_s L_s}
 \end{aligned} \tag{18}$$

$V_{dr}$  et  $V_{qr}$  : Les composantes de déphasage des tensions rotoriques doivent être appliquées à la machine afin d'obtenir les courants rotoriques désirés. L'impact des termes de couplage entre les deux.

L'écart dans  $(L_r - \frac{M^2}{L_s})$  est minimal. Une compensation des régulateurs dans la boucle de commande sera possible grâce à une synthèse appropriée.

En revanche, le terme  $g \omega_s \frac{M V_s}{L_s \omega_s}$  représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. son influence n'est pas négligeable car elle entraîne une erreur de trainage. Le contrôle du système devra donc prendre en compte cette erreur.

Les équations (11), (12) et (13) permet d'établir le schéma bloc du système électrique à réguler.

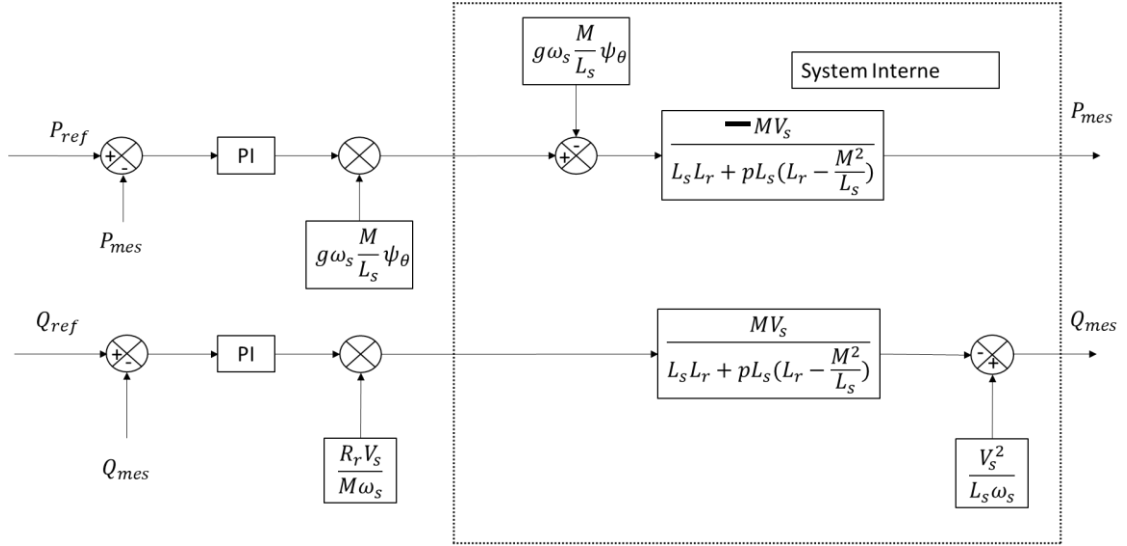


**Figure 1.6** schéma bloc du système à réguler

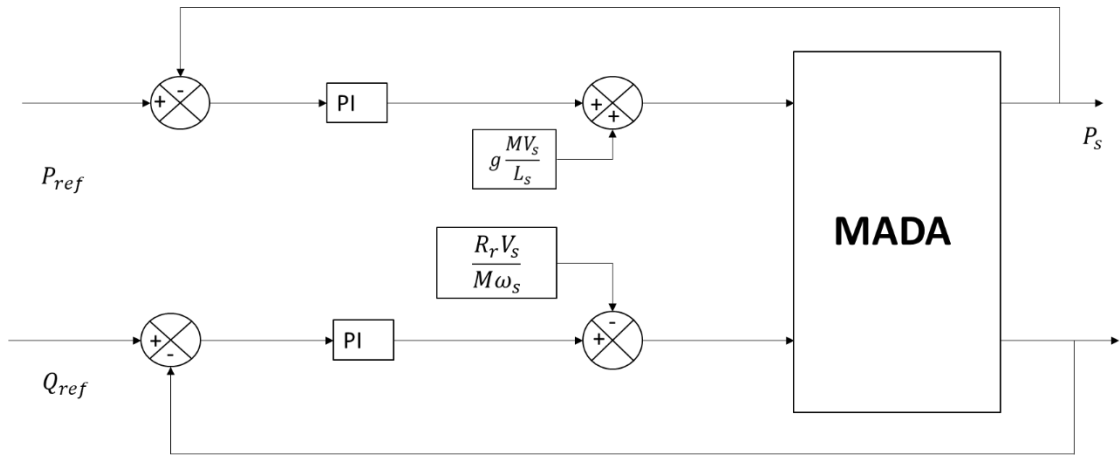
Ce modèle met en évidence des fonctions de transfert du premier ordre pour chacun des deux axes, reliant les tensions du rotor aux puissances active et réactive du stator. Chaque axe bénéficie d'un contrôle indépendant via son propre régulateur dédié. Les consignes de référence portent sur la puissance active sur les axes q et d du rotor. Pour maintenir un facteur de puissance unitaire côté stator et améliorer la qualité de l'énergie injectée dans le réseau, la consigne de puissance active est fixée à zéro. L'objectif de la commande de la MADA est d'assurer le suivi précis de cette consigne de puissance, avec une dynamique électrique optimale, limitée

uniquement par la fréquence de modulation du convertisseur employé. Le diagramme bloc du contrôle vectoriel illustre cette architecture [10].

Dans la figure ci-dessus, les régulateurs (PI) sont utilisés pour l'axe d et l'axe q.



**Figure 1.7** principe générale de la commande vectorielle de la MADA



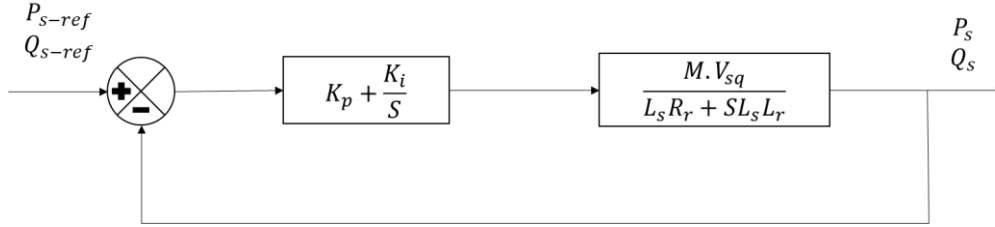
**Figure 1.8** Schéma globale.

## 1.7 Synthèse et conception du régulateur (PI) :

Le régulateur PI, employé pour l'ajustement des puissances actives et réactives, présente divers bénéfices tels que sa mise en application rapide et simple, tout en fournissant des performances satisfaisantes dans la régulation du système concerné.



Plusieurs techniques de conception des régulateurs PI sont présentées dans la documentation. Dans notre recherche, Nous nous concentrons sur une méthode de conception qui consiste à ajuster la constante de temps du régulateur afin qu'elle corresponde à celle du processus de la variable à contrôler [11].



**Figure 1.9** Système régulé par un PI.

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) du système de régulation de s'écrit comme suit :

$$FTBO = \frac{S + \frac{K_i}{K_p} \frac{MV_s}{L_s L_r \sigma}}{\frac{s R_r}{K_p L_r \sigma} + S} \quad (19)$$

La méthode de compensation des pôles consiste à éliminer le zéro de la fonction de transfert et ceci nous conduit à l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{R_r}{L_r \cdot \sigma} \quad (20)$$

Après la compensation, on obtient la fonction FTBO suivante :

$$FTBO = \frac{K_p MV_s}{L_s L_r \sigma S} \quad (21)$$

Ce qui nous donne la fonction de transfert en boucle fermée suivante :

$$FTBO = \frac{1}{1 + \tau_s} \quad (22)$$

Avec :

$$\tau = \frac{L_s L_r \sigma}{K_p MV_s} \quad (23)$$

$\tau$  : est le temps de réponse du système que l'on fixe préalablement. Dans ce cas, les gains des régulateurs PI sont exprimés en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse comme suit

$$\begin{cases} K_p = \frac{L_s L_r \sigma}{\tau M V_s} \\ K_i = \frac{R_r L_s}{\tau M V_s} \end{cases} \quad (24)$$

## 1.8 Conclusion :

La commande vectorielle appliquée à la machine asynchrone à double alimentation (MADA) offre une solution efficace pour améliorer la réactivité du système, en assurant un contrôle séparé et indépendant du couple électromagnétique et du flux magnétique. Cette technique confère à la MADA une grande précision et adaptabilité, même face à des variations rapides de charge ou de vitesse. En isolant ces deux grandeurs, la commande vectorielle permet à la machine de se comporter de manière comparable à une machine à courant continu avec excitation indépendante, facilitant ainsi un contrôle précis des paramètres électriques essentiels. Ce mode de contrôle est particulièrement pertinent pour des applications exigeantes comme la production d'énergie éolienne, où les fluctuations de vitesse sont fréquentes et les exigences dynamiques élevées. Cependant, malgré ses nombreux bénéfices, notamment en termes d'efficacité énergétique, de réduction des pertes et d'amélioration du contrôle, la mise en œuvre de cette commande reste complexe. Elle requiert une modélisation rigoureuse, une estimation précise des paramètres variables, ainsi qu'une expertise avancée en régulation et électronique de puissance.

# CHAPITRE II

## **La Commande Vectorielle de La MADA (cas de déséquilibre)**

## 2.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude du comportement de la MADA (Machine Asynchrone à Double Alimentation) en présence d'un déséquilibre dans le réseau d'alimentation. Nous y analysons l'impact de ce déséquilibre sur les performances de la machine, en particulier sur les tensions, les courants, les puissances et la stabilité globale du système. Afin de maintenir un fonctionnement optimal de la machine dans de telles conditions perturbées, il est nécessaire d'améliorer la stratégie de commande pour qu'elle puisse assurer un comportement proche de celui observé en régime sain.

Dans la littérature, plusieurs approches ont été proposées pour compenser les effets du déséquilibre, notamment : la décomposition du système en composantes symétriques (séquences positive et négative) permettant un contrôle indépendant de chaque composante [12], l'intégration de correcteurs harmoniques dans les boucles de courant pour rejeter les perturbations, la commande par mode glissant (SMC) [13], l'utilisation de techniques d'intelligence artificielle telles que les réseaux de neurones ou la logique floue [14].

Dans cette étude, nous retenons l'approche basée sur la décomposition en séquences positive et négative, en raison de sa simplicité de mise en œuvre et de son efficacité pour traiter les déséquilibres de tension et de courant.

## 2.2 Les conditions qui provoquent l'apparition de déséquilibre

Le déséquilibre dans un réseau électrique triphasé peut apparaître sous diverses conditions, liées aussi bien aux caractéristiques du réseau qu'aux charges connectées. L'une des causes les plus fréquentes est la répartition inégale des charges monophasées entre les phases, notamment dans les réseaux de distribution basse tension. De plus, le fonctionnement de machines ou d'équipements défectueux, présentant des défauts internes (comme un court-circuit partiel ou un défaut d'isolement), peut générer une consommation asymétrique, induisant un déséquilibre. Des conditions transitoires, telles que le démarrage brusque de charges industrielles ou des transferts dynamiques de charge, peuvent également provoquer un déséquilibre temporaire.

Par ailleurs, les opérations de maintenance ou les incidents sur le réseau, comme la déconnexion accidentelle d'une phase ou un court-circuit monophasé, entraînent une rupture de symétrie dans les tensions. Les facteurs environnementaux (vents violents, foudre, chutes d'arbres) peuvent détériorer les lignes électriques de manière inégale, contribuant ainsi au déséquilibre.

À cela s'ajoutent des déséquilibres d'origine structurelle, tels que des différences d'impédance entre les phases dues à des longueurs de câbles inégales ou à des connexions défectueuses.

Enfin, des dysfonctionnements dans les équipements d'électronique de puissance, comme les onduleurs triphasés mal calibrés ou endommagés, peuvent également générer une alimentation déséquilibrée. L'ensemble de ces conditions, qu'elles soient permanentes ou transitoires, compromet la qualité de l'alimentation et peut affecter gravement le fonctionnement des machines électriques, notamment les MADA [15].

### 2.3 Les effets du déséquilibre sur le fonctionnement de la MADA

Le déséquilibre des tensions dans un système triphasé a un impact notable sur le comportement de la machine asynchrone à double alimentation (MADA). Ce phénomène conduit à l'apparition de courants de séquence négative, responsables de la génération d'un champ tournant opposé à celui du rotor dans le stator. Ce champ inverse engendre un couple de freinage non souhaité, réduisant le couple électromagnétique utile tout en accentuant les pertes joules dans les enroulements. Ces effets provoquent une élévation anormale de la température dans les parties actives de la machine, notamment au niveau du rotor et du stator, ce qui peut accélérer le vieillissement des matériaux isolants et compromettre la fiabilité des composants internes sur le long terme.

Par ailleurs, le déséquilibre contribue à une baisse des performances énergétiques de la MADA. La transmission de puissance active devient moins efficace, tandis que la consommation de puissance réactive et les pertes internes augmentent. Le rendement global s'en trouve affecté, accompagné d'un facteur de puissance dégradé. En outre, la dissymétrie des efforts électromagnétiques peut induire des vibrations mécaniques et des variations irrégulières du couple, susceptibles d'endommager la structure mécanique de la machine au fil du temps.

Sur le plan dynamique, ce déséquilibre remet en question l'efficacité des stratégies de commande vectorielle classiques, qui supposent un système triphasé parfaitement équilibré. Dans de telles conditions, le système de commande perd sa capacité à synchroniser correctement les vecteurs de flux et de courant, entraînant une instabilité dans la régulation et une réduction des performances. Pour pallier ces effets, il est impératif d'adopter une approche de commande adaptée, fondée sur la séparation des composantes en séquences positive et négative [16].

## 2.4 La méthodes d'extraction des deux séquences positive et négative

L'extraction des composantes de séquence positive et négative est une étape essentielle pour l'analyse et le contrôle des systèmes triphasés déséquilibrés, notamment dans les applications de commande vectorielle. Plusieurs méthodes ont été développées à cet effet. La méthode classique repose sur la transformation de Fortescue, qui décompose les grandeurs triphasées en composantes symétriques à l'aide de matrices de transformation spécifiques. Cette approche est simple et largement utilisée en régime sinusoïdal stationnaire [17].

Une autre méthode courante est l'utilisation de la transformée de Park appliquée à deux référentiels tournants : l'un synchronisé avec la séquence positive, l'autre avec la séquence négative. Cette double transformation permet une séparation efficace des composantes dans le domaine du temps réel.

En parallèle, des techniques fondées sur des filtres numériques, tels que les filtres passe-bande ou les filtres notch adaptatifs, sont également employées pour isoler les fréquences spécifiques associées à chaque séquence. Plus récemment, des méthodes avancées, basées sur des algorithmes de filtrage adaptatif (comme le filtre de Kalman) ou sur des approches issues de l'intelligence artificielle (réseaux de neurones, logiques floues), ont été proposées pour améliorer la précision de l'extraction, notamment en présence de perturbations non sinusoïdales ou transitoires [18], [19]. Le choix de la méthode dépend principalement de la nature du signal, des exigences de précision et du temps de calcul disponible pour l'application visée.

Dans cette étude, nous avons choisi d'utiliser la méthode de transformation de Fortescue pour extraire les composantes de séquence positive et négative. Cette méthode repose sur le principe de la décomposition symétrique des systèmes triphasés déséquilibrés, en les représentant comme la somme de trois systèmes fictifs : un système équilibré en séquence positive, un autre en séquence négative, et un dernier en séquence nulle.

Cette approche, introduite par Charles L. Fortescue, est largement utilisée en analyse des défauts dans les réseaux triphasés. Cette séparation permet d'analyser et de contrôler indépendamment les effets du déséquilibre, notamment en ajustant les commandes pour rejeter la composante négative indésirable. L'avantage principal de la transformation de Fortescue réside dans sa simplicité de mise en œuvre et sa précision en régime sinusoïdal, ce qui en fait un choix pertinent pour les systèmes nécessitant une commande robuste face aux perturbations asymétriques.

### 2.4.1 La méthode de transformation de Fortescue :

On peut décomposer tout système triphasé déséquilibré en une combinaison d'un système direct, d'un système inverse et d'un système homopolaire [20].

#### a. Système direct :

Le système direct est un système triphasé équilibré suivant l'ordre de phase direct (abc).

$$\text{Système direct} \begin{bmatrix} V_{da} \\ V_{db} \\ v_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_d \\ a^2 \cdot V_d \\ a \cdot V_d \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

#### b. Système inverse :

Le système inverse est un système triphasé équilibré de séquence inverse (acb)

$$\text{Système indirect} \begin{bmatrix} V_{ia} \\ V_{ib} \\ V_{ic} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_i \\ a \cdot V_i \\ a^2 \cdot V_i \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

#### c. Système homopolaire :

Le système homopolaire est un système triphasé où les tensions sont identiques.

$$\text{Système homopolaire} \begin{bmatrix} V_{oa} \\ V_{ob} \\ V_{oc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_o \\ V_o \\ V_o \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Nous fusionnons donc les trois systèmes (direct, inverse, homopolaire) afin de constituer un système complet :

soit  $\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$  un système triphasé déséquilibré

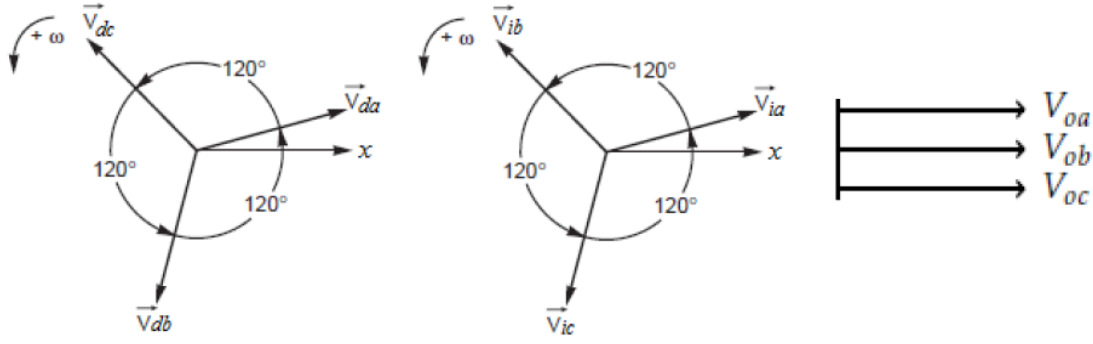
$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_d \\ a^2 \cdot V_d \\ a \cdot V_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_i \\ a \cdot V_i \\ a^2 \cdot V_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_o \\ V_o \\ V_o \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

On peut maintenant calculer les composantes symétriques :

$$V_d = \frac{1}{3}(V_a + a \cdot V_b + a^2 \cdot V_c)$$

$$V_i = \frac{1}{3}(V_a + a \cdot V_b + a^2 \cdot V_c) \quad (2.5)$$

$$V_o = \frac{1}{3}(V_a + a \cdot V_b + a^2 \cdot V_c)$$



**Figure 2.1** Les trois systèmes( direct, inverse, homopolaire).

## 2.5 Modélisation de la MADA en cas de déséquilibre :

Dans le premier chapitre, la modélisation de la MADA reposait sur un système d'équations unique représentant un réseau triphasé équilibré. En revanche, dans ce chapitre, le modèle sera scindé en deux sous-systèmes distincts : l'un associé à la séquence positive et l'autre à la séquence négative, afin de mieux représenter le comportement de la machine en présence de déséquilibre :

### - Les tension statoriques :

$$\begin{cases} V_{sd}^+ = R_s i_{sd}^+ + \frac{d\Phi_{sd}^+}{dt} + \omega_s \Phi_{sq}^+ \\ V_{sd}^- = R_s i_{sd}^- + \frac{d\Phi_{sd}^-}{dt} - \omega_s \Phi_{sq}^- \end{cases} \quad (2.6)$$

$$\begin{cases} V_{sq}^+ = R_s i_{sq}^+ + \frac{d\Phi_{sq}^+}{dt} + \omega_s \Phi_{sd}^+ \\ V_{sq}^- = R_s i_{sq}^- + \frac{d\Phi_{sq}^-}{dt} - \omega_s \Phi_{sd}^- \end{cases} \quad (2.7)$$

### - Les tension rotoriques :

$$\begin{cases} V_{rd}^+ = R_s i_{rd}^+ + \frac{d\Phi_{rd}^+}{dt} + \omega_s \Phi_{rq}^+ \\ V_{rd}^- = R_s i_{rd}^- + \frac{d\Phi_{rd}^-}{dt} - \omega_s \Phi_{rq}^- \end{cases} \quad (2.8)$$

$$\begin{cases} V_{rq}^+ = R_s i_{rq}^+ + \frac{d\Phi_{rq}^+}{dt} + \omega_s \Phi_{rd}^+ \\ V_{rq}^- = R_s i_{rq}^- + \frac{d\Phi_{rq}^-}{dt} - \omega_s \Phi_{rd}^- \end{cases} \quad (2.9)$$

En appliquant le principe de superposition, les puissances active  $P_s$  et réactive  $Q_s$  au niveau du stator de la MADA résultent de la contribution combinée des composantes de séquence



positive et négative. Ainsi, elles peuvent être exprimées comme la somme des puissances associées à chaque séquence, à savoir :

$$\begin{cases} P_s = P_s^+ + P_s^- \\ Q_s = Q_s^+ + Q_s^- \end{cases} \quad (2.10)$$

avec :

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} P_s^+ \\ Q_s^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{sd}^+ i_{sd}^+ + V_{sq}^+ i_{sq}^+ \\ V_{sd}^+ i_{sq}^+ - V_{sq}^+ i_{sd}^+ \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} P_s^- \\ Q_s^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{sd}^- i_{sd}^- + V_{sq}^- i_{sq}^- \\ V_{sd}^- i_{sq}^- - V_{sq}^- i_{sd}^- \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2.11)$$

D'autre part on a :

$$\begin{aligned} P_s &= V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q_s &= V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Où :

$$V_{sd} = V_{sd}^+ + V_{sd}^-$$

$$V_{sq} = V_{sq}^+ + V_{sq}^-$$

$$I_{sd} = I_{sd}^+ + I_{sd}^-$$

$$I_{sq} = I_{sq}^+ + I_{sq}^-$$

La puissance active et réactive devient :

$$P_s = V_{sd}^+ i_{sd}^+ + V_{sq}^+ i_{sq}^+ + V_{sd}^- i_{sd}^- + V_{sq}^- i_{sq}^- + V_{sd}^+ i_{sd}^- + V_{sq}^+ i_{sq}^- + V_{sd}^- i_{sd}^+ + V_{sq}^- i_{sq}^+ \quad (2.13)$$

$$Q_s = V_{sq}^+ i_{sd}^+ - V_{sd}^+ i_{sq}^+ - V_{sq}^- i_{sd}^- + V_{sd}^- i_{sq}^- - V_{sq}^+ i_{sd}^- + V_{sd}^+ i_{sq}^- - V_{sq}^- i_{sd}^+ + V_{sd}^- i_{sq}^+ \quad (2.14)$$

En mutant:

$$\begin{cases} P_a = V_{sd}^+ i_{sd}^+ + V_{sq}^+ i_{sq}^+ \\ P_b = V_{sd}^- i_{sd}^- + V_{sq}^- i_{sq}^- \\ P_c = V_{sd}^+ i_{sd}^- + V_{sq}^+ i_{sq}^- \\ P_d = V_{sd}^- i_{sd}^+ + V_{sq}^- i_{sq}^+ \end{cases} \quad (2.15)$$

$$\begin{cases} Q_a = V_{sq}^+ i_{sd}^+ - V_{sd}^+ i_{sq}^+ \\ Q_b = V_{sq}^- i_{sd}^- - V_{sd}^- i_{sq}^- \\ Q_c = V_{sq}^+ i_{sd}^- - V_{sd}^+ i_{sq}^- \\ Q_d = V_{sq}^- i_{sd}^+ - V_{sd}^- i_{sq}^+ \end{cases} \quad (2.16)$$

Les puissances  $P_c$ ,  $P_d$ ,  $Q_c$ , et  $Q_d$  correspondent à des termes de croisement entre les séquences positive et négative, Ces expressions contiennent des produits mixtes entre les composantes de tension d'une séquence et courants de l'autre séquence [21].

### 2.5.1 La compensation des oscillations 2θ

- Le repère dq tourne à la vitesse synchrone  $\omega$ .
- La séquence positive tourne dans le même sens que le repère : elle est donc vue comme quasi-stationnaire.
- La séquence négative tourne dans le sens opposé : elle est vue comme oscillant à  $2\omega$  dans le repère dq

Ainsi, les produits entre les composantes positive et négative (par exemple  $V^+ i^-$  ou  $V^- i^+$ ) créent des termes variables à double fréquence :

$$V_+(t) \cdot i_-(t) \approx \cos(\omega t) \cdot \cos(\omega t) \approx \cos(2\omega t) \quad (2.17)$$

Cette oscillation se traduit par une pulsation de puissance à  $2\omega$ , soit une oscillation de couple ou de flux à  $2\theta$ , ce qui perturbe : la stabilité mécanique (vibrations, couples pulsés), la qualité de puissance, et le bon fonctionnement des boucles de contrôle. donc il faut contrôler ces derniers à zéro [22].

$$\begin{bmatrix} P_{ref} \\ Q_{ref} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{sd}^+ i_{sd}^+ + & V_{sq}^+ i_{sq}^+ + & V_{sd}^- i_{sd}^- + & V_{sq}^- i_{sq}^- \\ V_{sq}^+ i_{sd}^+ - & V_{sd}^+ i_{sq}^+ - & V_{sq}^- i_{sd}^- - & V_{sd}^- i_{sq}^- \\ V_{sd}^+ i_{sq}^- - & V_{sq}^+ i_{sd}^- - & V_{sq}^- i_{sd}^+ - & V_{sd}^- i_{sq}^+ \\ V_{sd}^+ i_{sd}^- + & V_{sq}^+ i_{sq}^- + & V_{sd}^- i_{sd}^+ + & V_{sq}^- i_{sq}^+ \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$\begin{bmatrix} P_{ref} \\ Q_{ref} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{sd}^+ & V_{sq}^+ & V_{sd}^- & V_{sq}^- \\ V_{sq}^+ & -V_{sd}^+ & V_{sq}^- & -V_{sd}^- \\ V_{sq}^- & -V_{sd}^- & -V_{sq}^+ & V_{sd}^+ \\ V_{sd}^- & V_{sq}^- & V_{sd}^+ & V_{sq}^+ \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd}^+ \\ i_{sq}^+ \\ i_{sd}^- \\ i_{sq}^- \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

On peut maintenant extraire les courants statorique de référence

$$\begin{bmatrix} i_{sd_{ref}}^+ \\ i_{sq_{ref}}^+ \\ i_{sd_{ref}}^- \\ i_{sq_{ref}}^- \end{bmatrix} = inv \begin{bmatrix} V_{sd}^+ & V_{sq}^+ & V_{sd}^- & V_{sq}^- \\ V_{sq}^+ & -V_{sd}^+ & V_{sq}^- & -V_{sd}^- \\ V_{sq}^- & -V_{sd}^- & -V_{sq}^+ & V_{sd}^+ \\ V_{sd}^- & V_{sq}^- & V_{sd}^+ & V_{sq}^+ \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{ref} \\ Q_{ref} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

## 2.6 La Commande vectorielle dans le cas de déséquilibre :

Nous disposerons des courants statoriques de référence, mais cela ne suffit pas, car nous avons également besoin des courants rotoriques de référence. Grâce à la commande vectorielle, nous pouvons obtenir :

$$\Phi_{sd}^{\pm} = \frac{V_{sq}^{\pm}}{\omega_s} = L_s I_{sd}^{\pm} + M I_{rd}^{\pm} \quad (2.21)$$

$$\Phi_{sq}^{\pm} = 0 = L_s I_{sq}^{\pm} + M I_{rq}^{\pm} \quad (2.22)$$

On aura donc les courants rotoriques de référence ( $i_{rd}^+$ ,  $i_{rq}^+$ ,  $i_{rd}^-$ ,  $i_{rq}^-$ )

### 2.6.1 Les expressions des tensions rotoriques :

$$V_{rd}^{\pm} = R_r \cdot I_{rd}^{\pm} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{dI_{rd}^{\pm}}{dt} - (\mp \omega_s - \omega) \cdot \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{rq}^{\pm} \quad (2.23)$$

$$V_{rq}^{\pm} = R_r \cdot I_{rq}^{\pm} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{dI_{rq}^{\pm}}{dt} + (\mp \omega_s - \omega) \cdot \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{rd}^{\pm} + \frac{g M V_{s}^{\pm}}{L_s} \quad (2.24)$$

D'après Laplace on aura :

$$V_{rd}^{\pm} = \left[ R_r + s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \right] I_{rd}^{\pm} - (\mp \omega_s - \omega) \cdot \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{rq}^{\pm} \quad (2.25)$$

$$V_{rq}^{\pm} = \left[ R_r + s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \right] I_{rq}^{\pm} + (\mp \omega_s - \omega) \cdot \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{rd}^{\pm} + \frac{g M V_{s}^{\pm}}{L_s} \quad (2.26)$$

Il est nécessaire d'utiliser quatre régulateurs pour générer les tensions rotoriques ( $V_{rd}^+$ ,  $V_{rq}^+$ ,  $V_{rd}^-$ ,  $V_{rq}^-$ ), tout en prenant en compte les termes de couplage entre les différentes composantes.

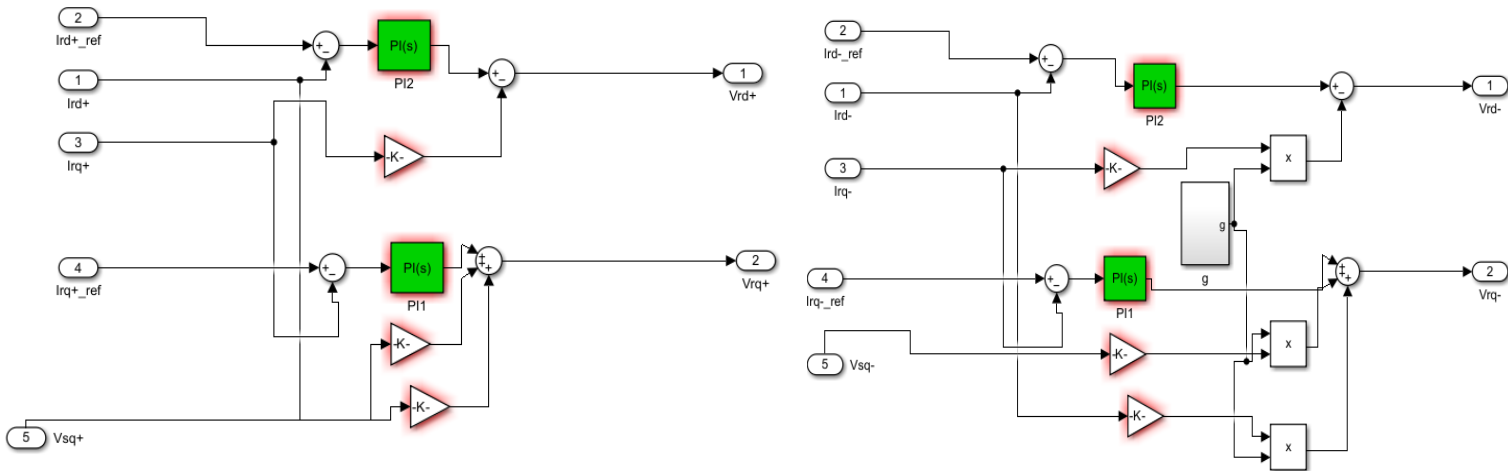


Figure 2.2 Schéma blocs des régulateurs

- La figure suivante illustre le schéma bloc global de la commande du MADA (Machine Asynchrone à Double Alimentation) en présence d'un déséquilibre. Dans cette configuration, une approche de décomposition du système est appliquée, permettant de scinder le système initial en deux sous-systèmes distincts : le système positif et le système négatif. Cette méthode vise à mieux analyser et contrôler les composantes symétriques directes et inverses, qui apparaissent notamment lors d'un déséquilibre de tension ou de courant. Le schéma met en évidence les voies de traitement séparées de ces deux sous-systèmes, permettant une commande plus précise et une meilleure compensation des effets néfastes du déséquilibre sur les performances globales de la machine.

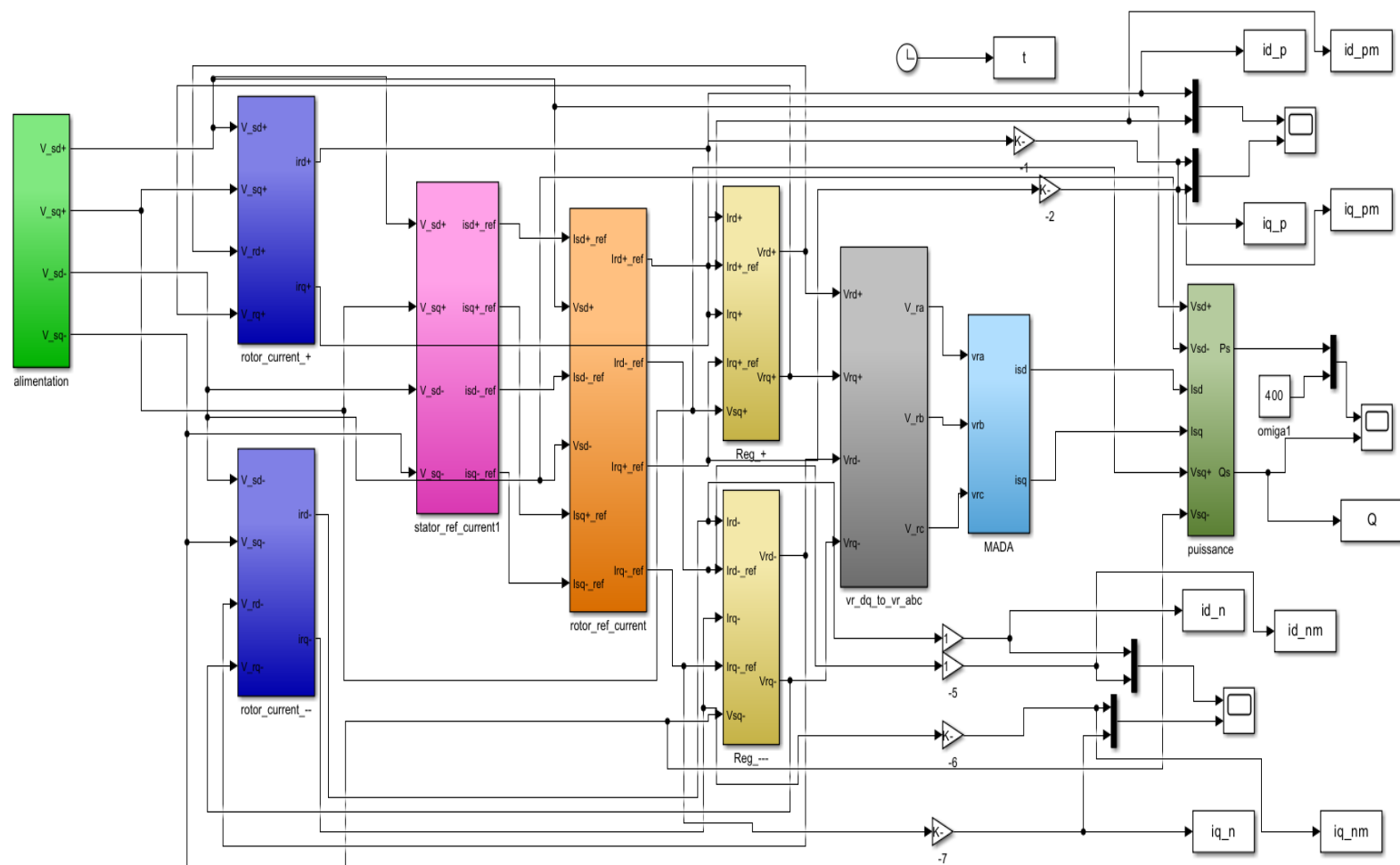


Figure 2.3 Schéma blocs de la commande globale.

## 2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons analysé le comportement de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) soumise à un réseau déséquilibré. Nos études ont montré que ce déséquilibre engendre plusieurs effets indésirables, notamment des pertes énergétiques, un échauffement accru, une dégradation des performances et une usure prématurée des composants.

Pour atténuer ces perturbations, nous avons proposé une approche basée sur la décomposition des grandeurs électriques en séquences positive et négative. Cette méthode permet d'isoler les contributions utiles des harmoniques néfastes, facilitant ainsi un contrôle plus précis et robuste de la machine.

En conclusion, cette stratégie de commande améliore significativement la stabilité et l'efficacité de la MADA, garantissant un fonctionnement optimal même dans des conditions de réseau déséquilibré.

# CHAPITRE III

## **Simulation**

## Simulation :

### 3.1 Partie 1 ( la commande vectorielle standard )

Dans le cadre de cette étude, une simulation numérique a été réalisée à l'aide du logiciel Matlab/Simulink pour étudier l'impact d'un déséquilibre du réseau d'alimentation sur le comportement de la MADA commandée par une stratégie vectorielle. La simulation est menée sur une durée totale de 12 secondes, avec l'introduction d'un déséquilibre entre 6s et 8s, tandis que le système reste équilibré dans les autres intervalles. L'objectif est d'analyser l'évolution des grandeurs électriques (tensions, courants, puissances actives et réactives) pendant et après la perturbation, afin d'évaluer la robustesse de la commande et les éventuelles oscillations induites. La Figure 3.5 présente le réseau d'alimentation et le tableaux suivant montre le paramètre de MADA.

Paramètre	Valeur
<b>La resistance statorique (Rs)</b>	4.7 Ohms
<b>La resistance rotorique (Rr)</b>	0.5 Ohms
<b>L'inductance statorique (Ls)</b>	0.3949 H
<b>L'inductance rotorique (Lr)</b>	0.023 H
<b>L'inductance Mutuelle (M)</b>	0.0896 H
<b>Nombre de paire de pole (p)</b>	2

**Tab 1.** Les paramètre de la MADA.

Paramètre	Valeur
<b>Ki</b>	2.25
<b>Kp</b>	0.0134

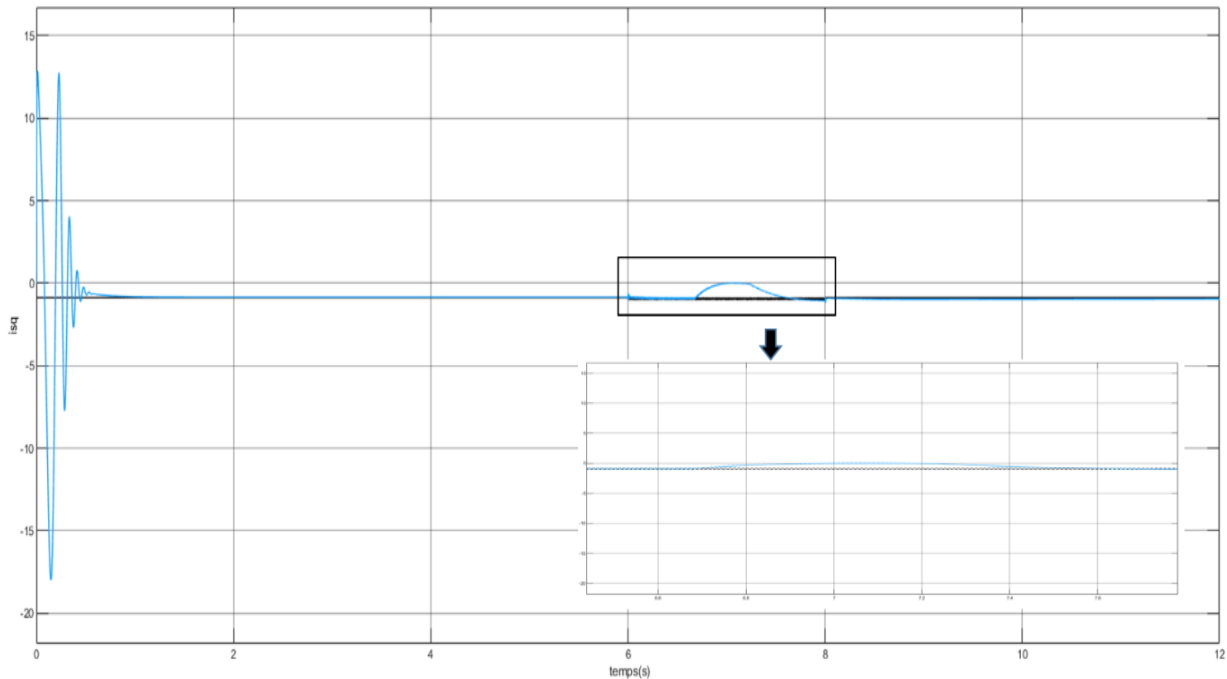
**Tab 2.** Les paramètres de réfulateur PI.





**Figure 3.2** Les composantes  $V_{sd}$  et  $V_{sq}$ .

**Figure 3.3** le courant  $I_{sd}$ .



**Figure 3.4** le courant  $I_{sq}$ .

Les (**Figure 3.3** et **Figure 3.4**) représentent l'évolution des courants  $i_{sd}$  (composante directe) et  $i_{sq}$  (composante quadratique) :

- Pendant les phases équilibrées (0–6s et 8–12s) :

- Le courant ( $i_{sq}$ ) reste stable, ce qui est cohérent avec un fonctionnement normal en régime équilibré.
- Le courant ( $i_{sd}$ ) (courant lié au couple et à la puissance active) est maintenu à zéro pour garantir une puissance réactive nulle, conformément à la stratégie de commande.

- Pendant le déséquilibre (6–8s) :

Une perturbation notable apparaît sur les deux courants, avec des oscillations et une augmentation transitoire de leur amplitude.

**On observe sur la (Figure 3.5) :**

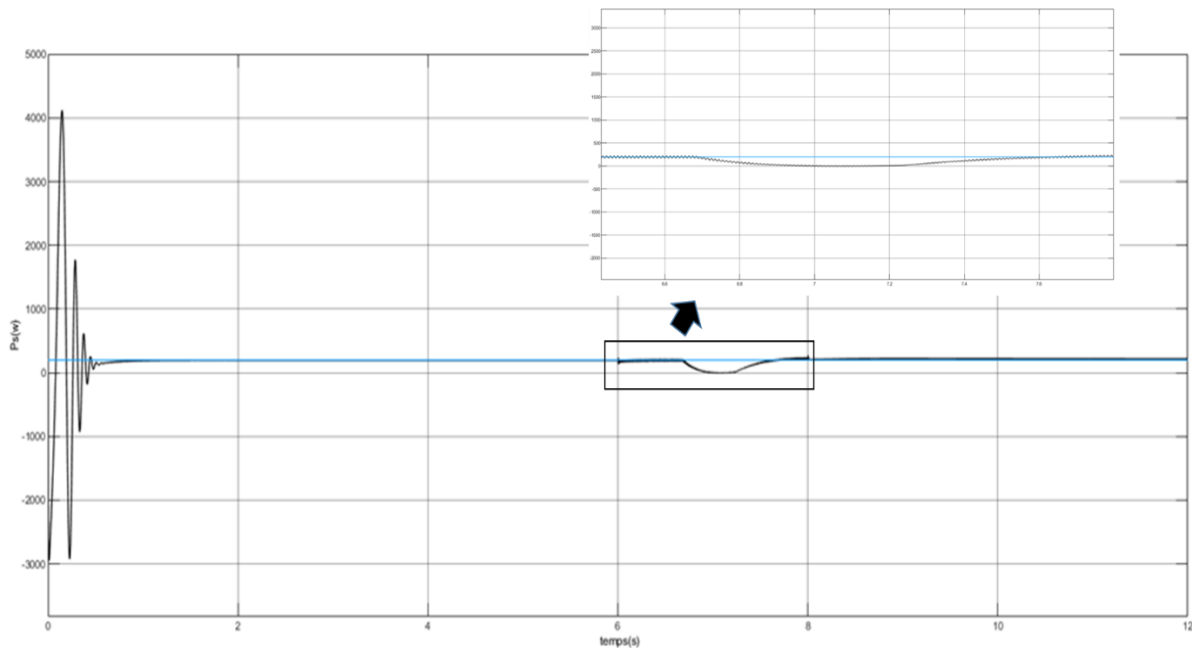
- **Avant 6s :** Après un régime transitoire rapide au démarrage (oscillations amorties), la puissance active se stabilise autour d'une valeur constante, ce qui est le signe d'un fonctionnement équilibré, avec une bonne régulation de la commande vectorielle.

- **Entre 6s et 8s (période de déséquilibre) :**

On observe une légère variation de la puissance active, illustrée par une petite baisse dans la valeur moyenne, mise en évidence dans le zoom. Cette chute temporaire est due à l'impact du déséquilibre sur les tensions et courants d'alimentation, ce qui perturbe légèrement le transfert

de puissance active là . Le déséquilibre peut provoquer des oscillations ou des variations dans la puissance active  $P$ . Cela est dû aux composantes négatives de séquence qui apparaissent dans les courants et les tensions.

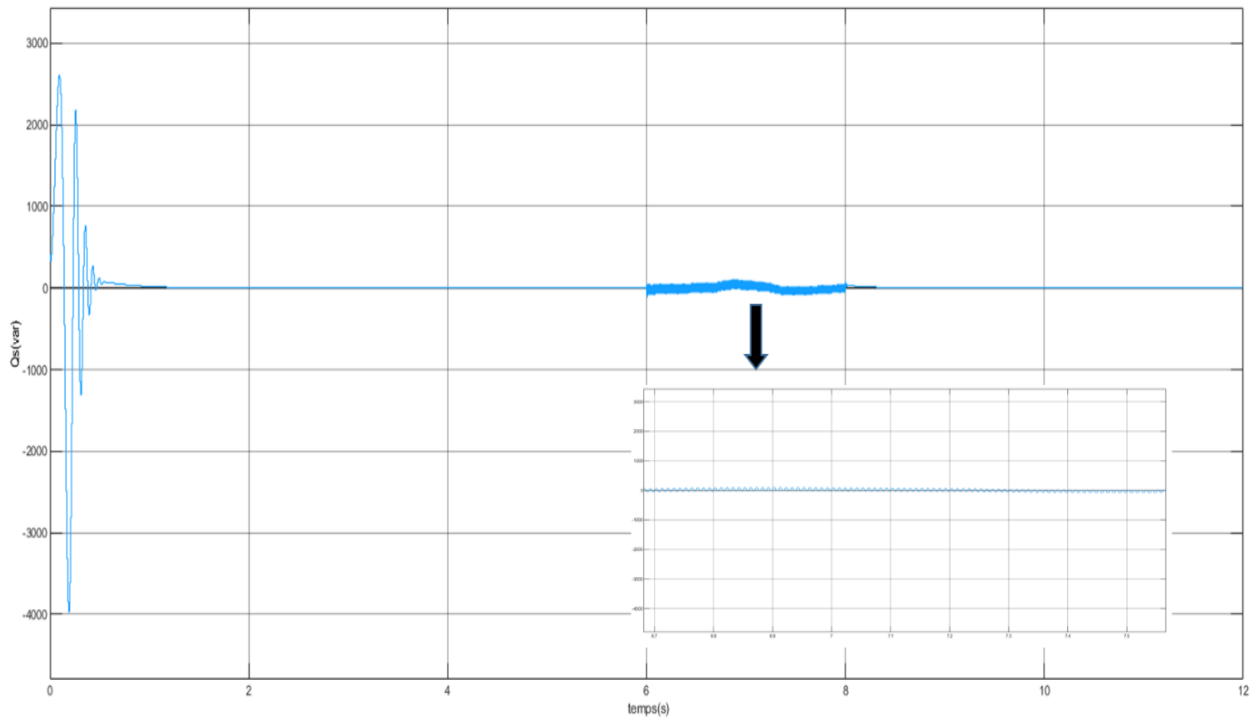
- **Après 8s :** La puissance reprend sa valeur initiale et reste stable jusqu'à la fin de la simulation.



**Figure 3.5** puissance active  $P_s$ .

Pour la (**Figure 3.6**) : la puissance réactive est régulée autour de zéro, conformément à l'objectif de commande. Cela traduit un bon fonctionnement du système en régime équilibré. Lorsque  $Q = 0$ , cela signifie que la machine fonctionne au facteur de puissance unitaire, c'est-à-dire que tout le courant contribue à la puissance active, sans composante réactive inutile. Cela réduit les pertes d'énergie dans le réseau et améliore l'efficacité globale du système.

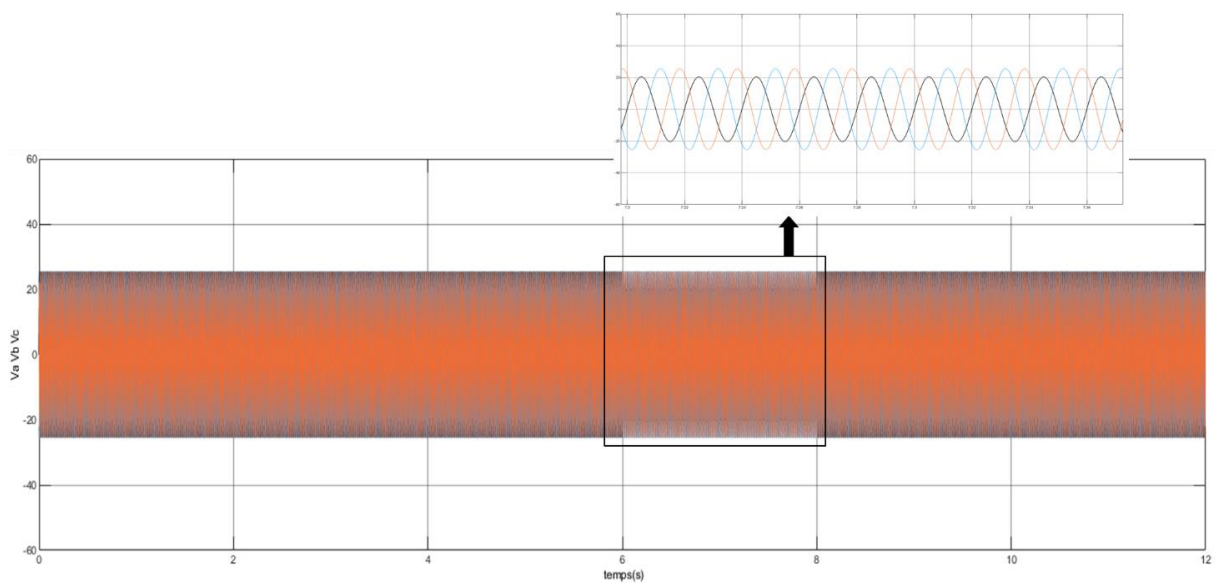
- **Entre 6 s et 8 s :** Malgré la consigne de  $Q = 0$ , on remarque l'apparition d'ondulations autour d'une valeur légèrement négative. Ces oscillations sont plus visibles dans le zoom. Cela indique que le déséquilibre réseau introduit une composante perturbatrice, rendant plus difficile le maintien d'une puissance réactive strictement nulle.



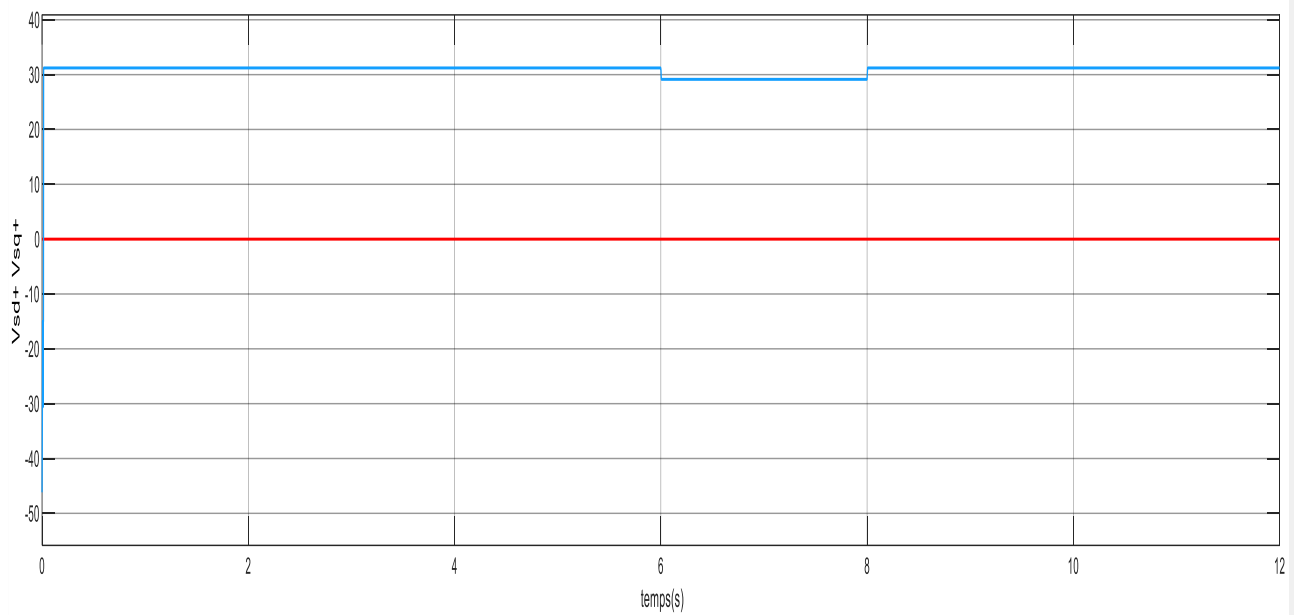
**Figure 3.6** puissance reactive  $Q_s$ .

### 3.2 Partie 2 ( l'approche de décomposition en deux systèmes )

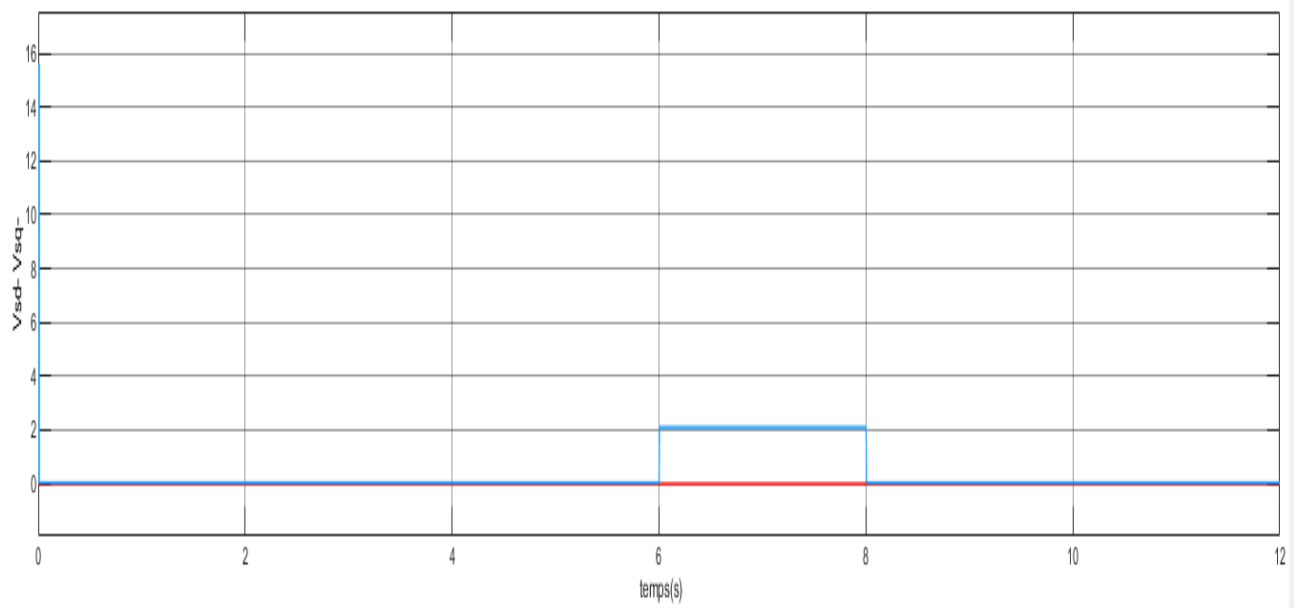
La deuxième phase de la simulation consiste à soumettre la MADA aux mêmes conditions et au même réseau d'alimentation, mais cette fois en appliquant une commande basée sur la décomposition du système en deux séquences : la séquence positive et la séquence négative. Cette approche vise à évaluer et confirmer l'efficacité de cette méthode face aux déséquilibres présents dans le réseau d'alimentation.



**Figure 3.7** Le réseau d'alimentation.



**Figure 3.8** Les composants  $V_{sd}^+$   $V_{sq}^+$ .

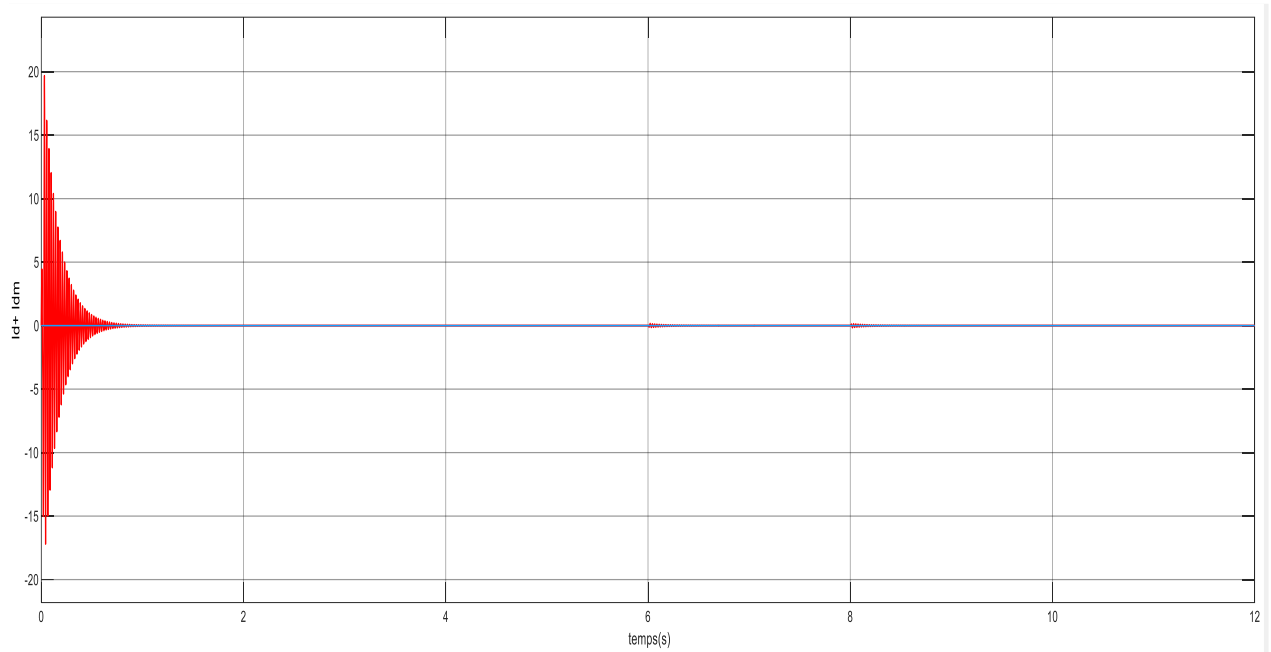


**Figure 3.9** Les composants  $V_{sd}^-$   $V_{sq}^-$ .

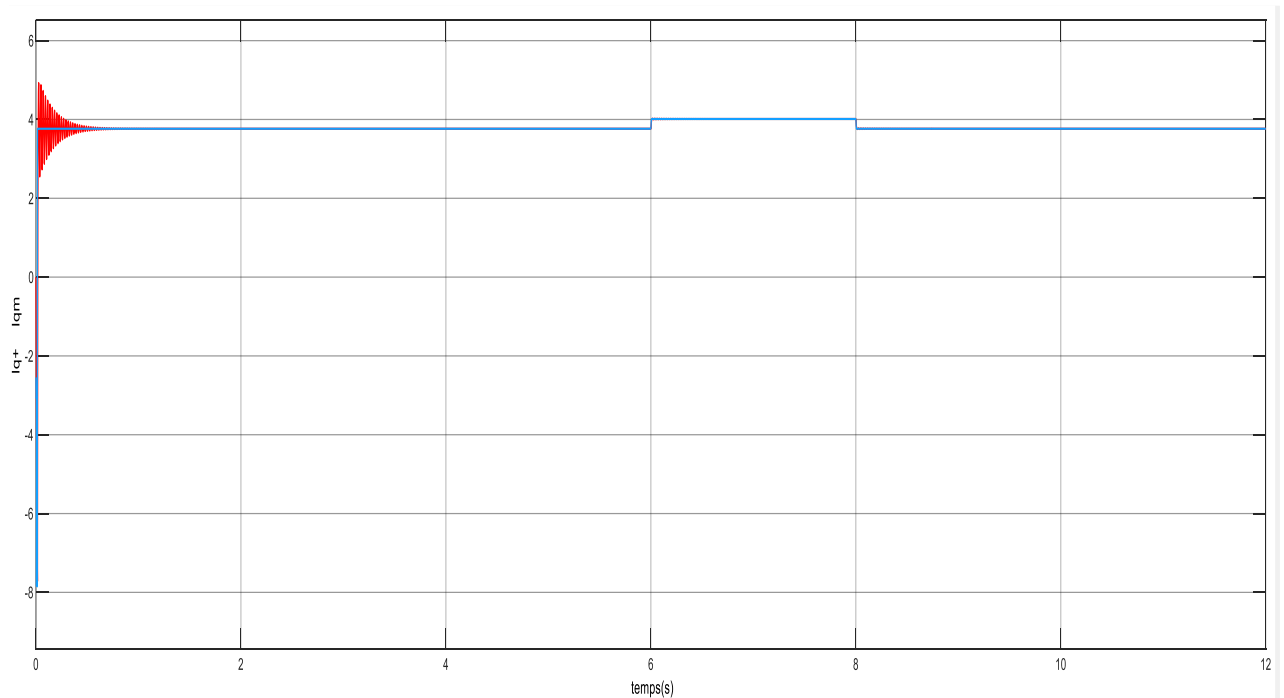
Les composantes de la séquence positive (**Figure 3.8**) sont globalement stables tout au long de la simulation. Cependant, on remarque une légère diminution de la composante  $V_{sd}^+$  entre 6 s et 8 s, période correspondant au déséquilibre du réseau. Cela montre que même la séquence positive est légèrement affectée par les perturbations, mais elle conserve majoritairement son comportement normal. La composante  $V_{sq}^+$ , quant à elle, reste constante et proche de zéro, ce qui est attendu dans un système équilibré correctement orienté selon l'axe d.

Les composantes de la séquence négative (**Figure 3.9**) apparaissent uniquement pendant l'intervalle de déséquilibre (entre 6 s et 8 s). En dehors de cette période, elles sont nulles, ce qui

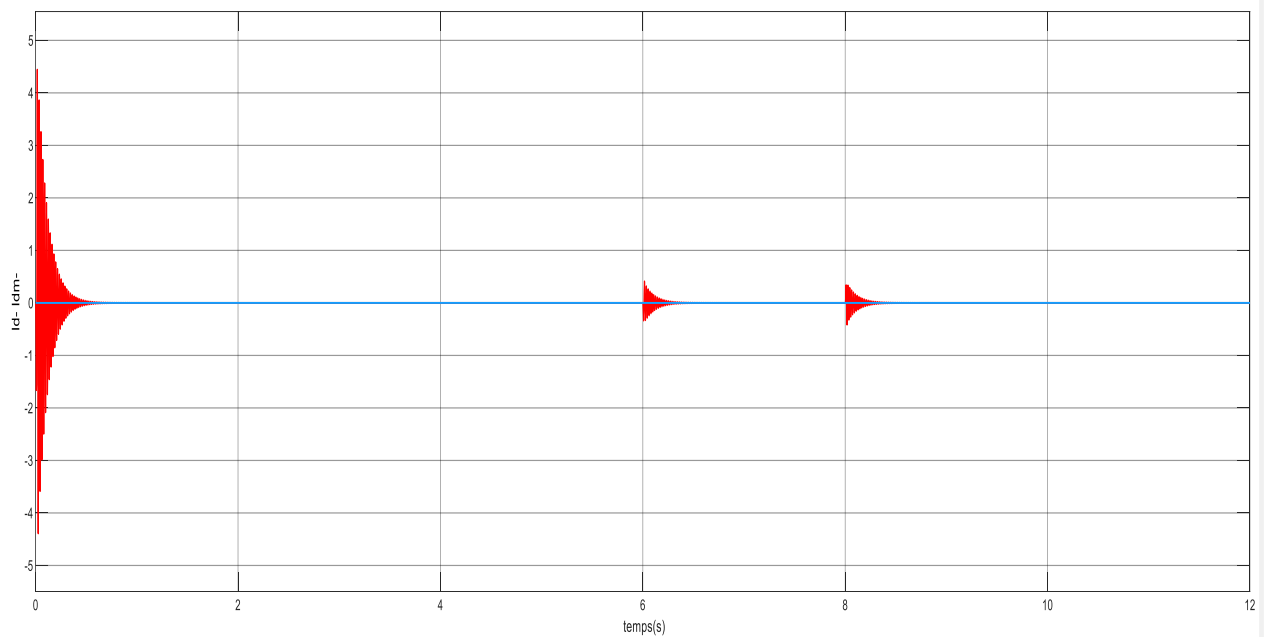
confirme que ces composantes n'existent que lorsque le système est soumis à une perturbation asymétrique. La composante  $V_{sd-}$  atteint une valeur significative (2V), tandis que  $V_{sq-}$  reste nulle.



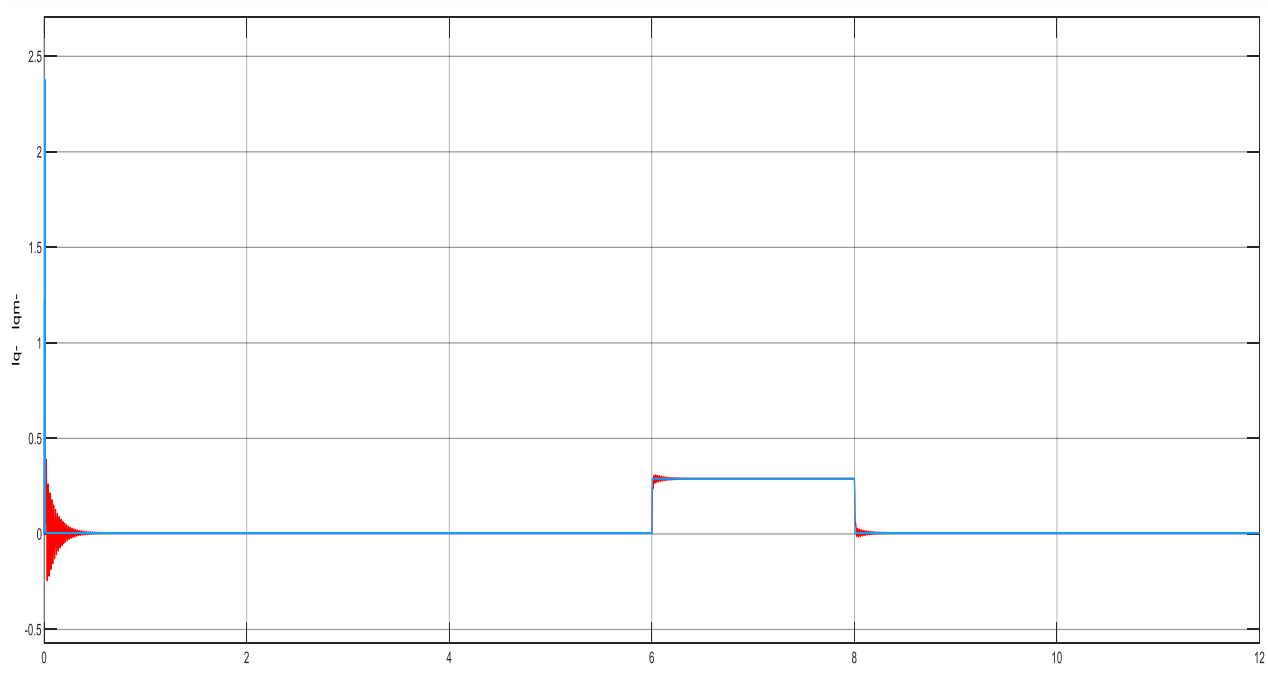
**Figure 3.10** le courant  $I_{d+}$  et sa référence.



**Figure 3.11** le courant  $I_{q+}$  et sa référence.



**Figure 3.12** le courant  $I_d$ - et sa référence.

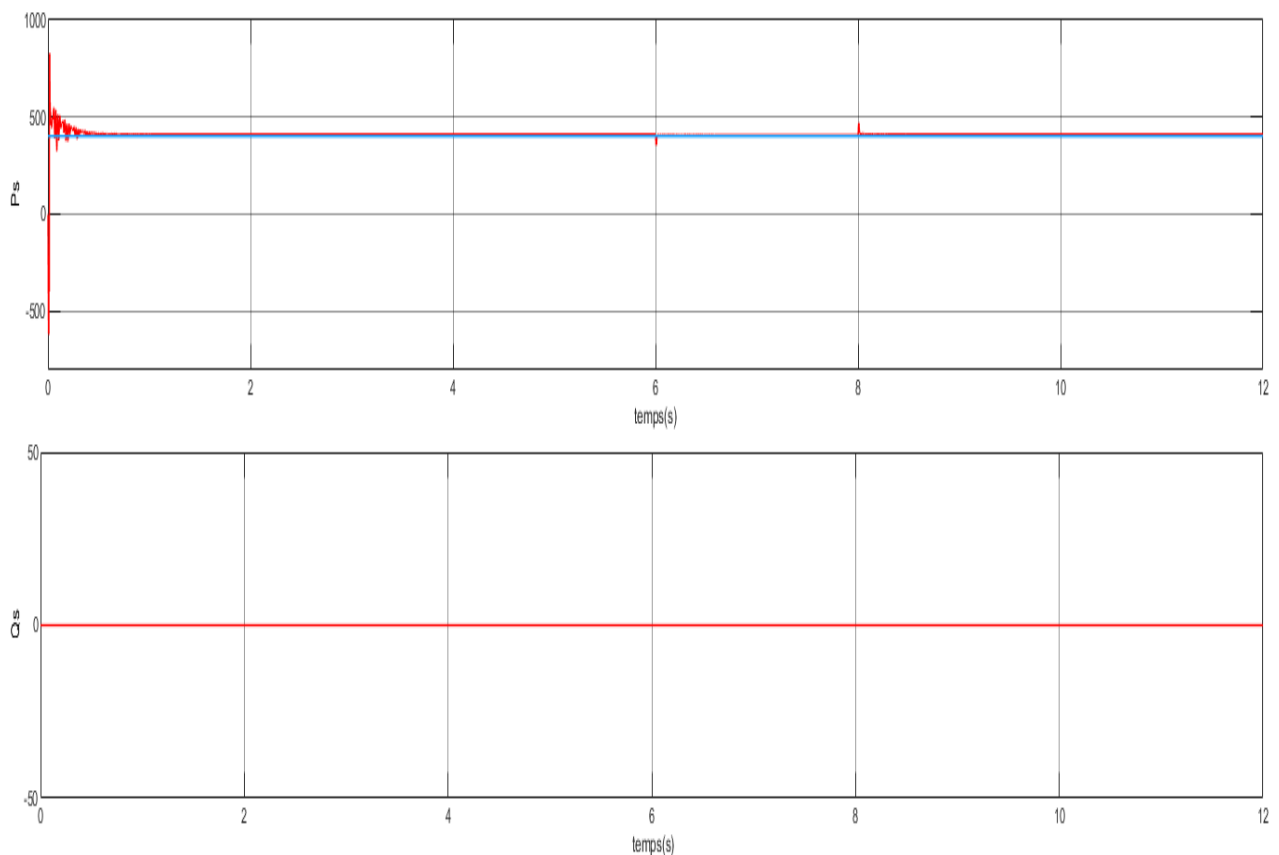


**Figure 3.13** le courant  $I_q$ - et sa référence.

❖ Pour les composantes du courants positif ( Figure 3.10 et Figure 3.11) :

- Avant 6 s (système équilibré) : Les courants suit bien sa référence, ce qui démontre une régulation efficace dans des conditions équilibrées.

- **Entre 6 s et 8 s (déséquilibre appliqué) :** On observe une légère déviation due à l'influence du déséquilibre, mais la commande du système positif parvient à maintenir le courant stable très proche de sa référence.
- **Après 8 s (retour à l'équilibre) :** Le courant reprend exactement son comportement initial, montrant une bonne robustesse face aux perturbations.
- ❖ **Pour les composantes du courants positif ( Figure 3.12 et Figure 3.13) :**
- **Avant 6 s (système équilibré) :** Les courants sont nul ou très proche de zéro, ce qui est cohérent puisque dans un système équilibré, la composante directe négative est inexistante ou négligeable.
- **Entre 6 s et 8 s (déséquilibre appliqué) :** Une composante négative apparaît clairement. On observe une réponse dynamique à l'entrée du déséquilibre, suivie d'un bon suivi de la référence, indiquant que le contrôleur du système négatif compense efficacement les perturbations.
- **Après 8 s (retour à l'équilibre) :** Les composantes négatives décroît rapidement vers zéro, montrant la réactivité et l'efficacité du rejet de perturbation.



**Figure 3.14** Les puissances active  $P_s$  réactive  $Q_s$ .



#### ❖ Partie supérieure de la figure : La puissance active $P_s$

- **Avant 6s (système équilibré) :** La puissance active  $P_s$  (courbe rouge) suit très bien la consigne (courbe bleue), avec un régime dynamique amorti au tout début (entre 0 et 1 s), ce qui est normal au démarrage ou à la mise en régime. La stabilité est rapidement atteinte, ce qui confirme une commande efficace en régime stable.
- **Entre 6s et 8s (déséquilibre introduit) :** Une légère perturbation de la puissance active est visible à l'entrée ( $\approx 6$  s) et à la sortie ( $\approx 8$  s) de la phase de déséquilibre. Cependant, ces perturbations sont très rapidement corrigées, et  $P_s$  retourne immédiatement à sa valeur de référence, ce qui indique une bonne rejection de perturbation de la stratégie de commande. La stabilité de  $P_s$  prouve que l'approche par décomposition (système positif/négatif) permet de maintenir un transfert de puissance actif constant, même en présence de déséquilibre.
- **Après 8s (retour à l'équilibre) :**  $P_s$  reste parfaitement stable et en phase avec sa consigne, ce qui confirme la robustesse de la commande.

Donc on peut dire que : La puissance active est correctement suivie pendant toute la durée du fonctionnement, y compris en présence de déséquilibre. Les transitoires sont très courts, ce qui traduit une excellente performance dynamique.

#### ❖ Partie inférieure de la figure : La puissance réactive $Q_s$

La puissance réactive  $Q_s$  est constamment maintenue à zéro tout au long de l'intervalle de simulation (y compris pendant le déséquilibre). Cela signifie que le système fonctionne avec un facteur de puissance unitaire, ce qui est l'un des objectifs principaux en commande vectorielle (minimisation des pertes, optimisation énergétique). L'absence de déviation de  $Q_s$  pendant le déséquilibre prouve que le contrôle en boucle fermée de la composante quadrature ( $i_q$ ) est très efficace, même sous conditions asymétriques.

On peut conclure pour  $Q_s$  : Le système parvient à annuler complètement la puissance réactive, validant ainsi l'objectif de fonctionnement à facteur de puissance unitaire, même lorsque le réseau est déséquilibré entre 6 et 8 s.

### 3.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les performances de la commande vectorielle appliquée à la machine asynchrone double alimentation (MADA) dans les conditions d'équilibre et de déséquilibre, en mettant en œuvre deux approches distinctes : la commande vectorielle standard et l'approche basée sur la décomposition en deux systèmes (système positif et système négatif).

Les résultats de simulation obtenus en régime équilibré montrent que les deux approches assurent un bon suivi des consignes des grandeurs de commande (courants, tensions et puissances), avec un comportement dynamique satisfaisant. La puissance active est bien suivie, la puissance réactive est maintenue à zéro, assurant ainsi un facteur de puissance unitaire.

Cependant, lorsque le système est soumis à un déséquilibre, des perturbations significatives apparaissent avec l'approche de commande vectorielle standard. Ces perturbations se traduisent par des oscillations notables dans les composantes des courants, des tensions ainsi que dans la puissance active, dégradant ainsi la performance de commande et l'efficacité énergétique de la machine.

En revanche, l'approche de décomposition en deux systèmes permet de compenser efficacement les effets du déséquilibre. Les simulations montrent que, grâce à cette méthode, les courants restent stables, les tensions ne présentent pas d'ondulations notables, et la puissance active continue de suivre sa consigne avec précision. De plus, la puissance réactive est maintenue nulle même en présence du déséquilibre, ce qui confirme la robustesse et l'efficacité de cette approche.

Ainsi, il est clairement démontré que la commande vectorielle basée sur la décomposition en systèmes positif et négatif constitue une solution performante et robuste pour le contrôle de la MADA en présence d'un déséquilibre du réseau, en assurant une meilleure qualité de régulation, une stabilité accrue et un fonctionnement énergétique optimal.

## Conclusion générale :

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) est largement reconnue pour son rôle clé dans la production électrique issue de l'énergie éolienne, notamment en raison de sa capacité à opérer à vitesse variable tout en offrant un contrôle indépendant de la puissance active et réactive. Cette flexibilité permet d'optimiser la capture d'énergie dans des conditions de vent fluctuantes, tout en assurant une meilleure qualité de l'énergie injectée au réseau. Cependant, la MADA demeure vulnérable aux perturbations présentes sur le réseau électrique, telles que les déséquilibres de tension, les variations de fréquence ou la présence d'harmoniques, qui peuvent engendrer des phénomènes indésirables comme des vibrations mécaniques, une dégradation des composants, ou une baisse des performances globales, affectant ainsi la durée de vie de la machine.

Dans ce contexte, ce mémoire met en avant la commande vectorielle comme une solution robuste et efficace pour pallier ces limitations. En séparant précisément le contrôle du flux magnétique et du couple électromagnétique, cette technique améliore la réactivité du système tout en assurant une meilleure stabilité dynamique. Elle permet également une régulation fine de la puissance active injectée dans le réseau, un paramètre crucial pour répondre aux exigences des réseaux modernes, notamment dans les applications éoliennes où la qualité de la puissance est primordiale.

Particulièrement dans les réseaux présentant des déséquilibres, la commande vectorielle joue un rôle compensatoire en atténuant les effets négatifs tels que les oscillations mécaniques ou les pertes énergétiques dues aux courants harmoniques. Les simulations réalisées avec MATLAB ont confirmé que cette méthode optimise les performances de la MADA, qu'il s'agisse de réseaux équilibrés ou déséquilibrés, en maintenant une réponse stable et efficace malgré les perturbations.

En résumé, cette étude démontre que la commande vectorielle constitue une approche fiable et performante pour garantir un fonctionnement optimal de la machine asynchrone à double alimentation dans des environnements réels souvent marqués par des déséquilibres et des perturbations du réseau. Son adoption contribue non seulement à améliorer la durée de vie et la fiabilité de la MADA, mais aussi à assurer une meilleure intégration des énergies renouvelables dans le système électrique.

## Bibliographie :

- [1] Marzouk imad « Contribution à la commande d'une cascade redresseur à Absorption sinusoïdal onduleur multi-niveaux associée a une Machine asynchrone double alimenté : approche qualité d'énergie Côté réseau-optimisation des performances de la machine » 2017 Thèse de doctorat. Université du Djelfa.
- [2] Melle BOUKRA ManelMe OUCHKARA Nour El Houda « La commande vectorielle de la machine asynchrone à Double alimentation » 2022. DIPLOME DE MASTER universite Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib.
- [3] El Khil, Sejir Khojet. *Commande vectorielle d'une machine asynchrone doublement alimentée (MADA)*. Diss. Institut National Polytechnique (Toulouse), 2006.
- [4] Ben sliman haithem hamza akrem « command d'un moteur asynchrone a double alimentation » 2013. DIPLOME DE MASTER universite BADJI MOKHTAR ANNABA.
- [5] SMAILI, Mokrane. *Modélisation et commande d'un aérogénérateur à machine asynchrone à double alimentation en vue de simulation des problèmes de cogénération*. 2013. Thèse de doctorat. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.
- [6] Ghalem, A. F. F. A. N. E. *Contrôle avancé d'un système VSC-HVDC pour améliorer le transport d'énergie électrique: Application à la conversion éolienne*. Diss. Université Ibn Khaldoun-Tiaret-, 2020.
- [7] BOUNADJA, El Hadj. *Commande d'une machine asynchrone a double alimentation en regime sature*. 2017. Thèse de doctorat. Alger, Ecole Nationale Polytechnique.
- [8] Chelli Seif El Islam « Contribution à la Commande d'une Génératrice Asynchrone à Double Alimentation en Présence d'Asymétries d'Excitations Statoriques (modélisation, identification & synthèse de lois de commande) » 2022 Thèse de doctorat. Université des Frères Mentouri de Constantine 1.
- [9] CHAIBA, Azeddine. *Commande de la machine asynchrone à double alimentation par des techniques de l'intelligence artificielle*. 2010. Thèse de doctorat. Université de Batna 2.
- [10] BOUYAHIA, Omar. *Génération électrique tolérante aux défauts à base de structures multiphasées: comparaison, choix d'une technologie, transfert technologique*. 2022. Thèse de doctorat. Université de Picardie Jules Verne.
- [11] Boulefkhad Oualid 'COMMANDE D'UNE GENERATRICE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION EN PRESENCE D'ASYMETRIES DU RESEAU D'ALIMENTATION'. 2016. Thèse de Master 2. Université de Constantine1.
- [12] HU, Jiabing et HE, Yikang. Modeling and enhanced control of DFIG under unbalanced grid voltage conditions. *Electric Power Systems Research*, 2009, vol. 79, no 2, p. 273-281.
- [13] SONG, Yipeng et NIAN, Heng. Modularized control strategy and performance analysis of DFIG system under unbalanced and harmonic grid voltage. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, vol. 30, no 9, p. 4831-4842.

- [14] KARTHIGEYAN, P., RAJA, M. Senthil, SHEEBA, M. S., *et al.* Optimization of power quality problem for a windturbine fixed speed induction generator under asymmetric faults using UPFC fed vector control-PI, hysteresis and fuzzy logic. In : *2015 2nd International Conference on Electronics and Communication Systems (ICECS)*. IEEE, 2015. p. 568-571.
- [15] HEMIANI TAYEB 'MODÉLISATION ET DIAGNOSTIC DE LA MACHINE ASYNCHRONE FONCTIONNANT EN RÉGIME DÉSÉQUILIBRÉ'. 2021. Thèse de Master. Université SAAD DAHLAB de BLIDA 1.
- [16] MELLAK Oussama & DJILALI Mohamed Amine 'Discrimination des défauts d'un Moteur Asynchrone Triphasé'. 2019. Thèse de Master. Université SAAD DAHLAB de BLIDA 1.
- [17] METZ-NOBLAT, B. Cahier technique n°18: Analyse des réseaux triphasés en régime perturbé à l'aide des composantes symétriques. *Rapport technique, Schneider Electric*, 2005.
- [18] ZOGHBI Abderrezzaq. *Développement et implémentation d'un algorithme adaptatif : Application au filtrage actif de puissance*. 2022. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Polytechnique (ENP), Alger, Algérie.
- [19] AMEID, Tarek. *Contrôle et Diagnostic de la Machine à Induction*. 2018. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider–Biskra.
- [20] IGNATOVA, Vanya. *Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique*. 2006. Thèse de doctorat. Université Joseph-Fourier-Grenoble I.
- [21] ZHOU, Yi, BAUER, Paul, FERREIRA, Jan A., *et al.* Operation of grid-connected DFIG under unbalanced grid voltage condition. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2009, vol. 24, no 1, p. 240-246.
- [22] ZANDZADEH, Mohammad Jafar et VAHEDI, Abolfazl. Modeling and improvement of direct power control of DFIG under unbalanced grid voltage condition. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2014, vol. 59, p. 58-65.