

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



Mémoire de Fin d'Étude

Présenté à

L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En Commande Électromécanique

Présenté par

Saoudi ahmed chaouki

Abdelaziz meneceur

Messaoudi Youcef

Atallah Nasser

Thème

**Commande vectorielle d'une génératrice asynchrone double
alimentation autonome connecter aux AC micro-réseaux isoler.**

Sous la supervision du professeur:

Mr.	Maitre de conférences	Président
Mr.	Maitre de conférences	Rapporteur
Mr. Chabani Mohammed Saci	Maitre de conférences	Encadreur

Année Universitaire 2023/2024

Remerciement

Remerciement

Par-dessus tout, nous voudrions remercier Dieu tout-puissant de nous avoir donné l'occasion d'atteindre ce niveau.

Nous adressons nos sincères remerciements à notre superviseur, M. Shaabani Mohamed Sassi, maître de conférences à l'Université de la Vallée, qui n'a ménagé aucun effort pour faire de ce travail une réussite grâce à son expertise et à sa sagesse.

Nous tenons également à exprimer nos sincères remerciements à tous les professeurs et collègues du département de génie mécanique.

Dédicace

Dédicace

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

دَعَوَاهُمْ فِيهَا سُبْحَانَكَ اللَّهُمَّ وَتَحِيَّتُهُمْ فِيهَا سَلَامٌ
وَآخِرُ دَعَوَاهُمْ أَنْ الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ

اهدي هذا النجاح الى نفسي أولاً، فالحمد لله شكراً و امتناناً و اقراراً بفضلته و اعترافاً بعظيم كرمه... و ما توفيقي الا بالله

الى من يزيدي انتسابي له و ذكره فخراً و اعتزازاً، الى من كان سندا و فخراً و عوناً فالحياة، الى من ضحى بالغالي و النفيس من اجلنا...والدي العزيز

ادامك الله لي كل العمر يا سيد الرجال.

الى من احمد الله على وجودها و قربها، الى سندي و مسندي و قوتي و ملجئي و طريقي الى الجنة، الى صاحبة العطاء و القلب الرحيم، الى من جعلت صدرها مسكناً لي و عينها حارسة لي، الى أروع و اعظم امراه في الوجود... امي الغالية

ادامكي الله لي و رزقي الصحة و العافية

الى من بهم يطيب العيش و تحلو الحياة الى من شاركوني جميع افراحي و احزاني... اخوتي

دمتم بخير و لا فرق الله شملنا

و دون ان انسى جميع افراد عائلتي و أصدقائي كل باسمه و كل بمكانته...

بارك الله فيكم جميعاً

و بصفة خاصة و باستثناء الكل اهدي هذا النجاح الى من كان في يوم من الأيام و مازال و سيظل سند و ظلع ثابت لا يميل استند عليه كلما تعثرت بنصحه و ارشاده و توجيهه و طيبة قلبه، الى الذي لن انسى فضله علياً ما حييت الى من كان ابي قبل ان يكون خالي... خالي زين معمر

دمت فخراً و سنداً لي

شوقي

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

اهدي هذا العمل الى كامل عائلتي و أصدقائي

عبد العزيز

قال تعالى: (قل اعملوا فسيرى الله عملكم ورسوله والمؤمنون)

إلهي لا يطيب الليل إلا بشكرك ولا يطيب النهار إلا بطاعتك . ولا تطيب اللحظات إلا بذكرك .. ولا تطيب
الآخرة إلا بعفوك ... ولا تطيب الجنة إلا برويتك

إلى من كلله الله بالهيبه والوقار .. إلى من علمني العطاء بدون انتظار .. إلى من أحمل أسمه بكل افتخار ..
وستبقى كلماتك نجومًا أهتدي بها اليوم وفي الغد وإلى الأبد

والذي العزيز

إلى ملاكي في الحياة ... إلى معنى الحب وإلى معنى الحنان والتفاني .. إلى بسمه الحياة وسر الوجود إلى من كان
دعائها سر نجاحي وحنانها بلسم جراحي إلى أعلى الحبايب

أمي الحبيبة

إلى ضلع الثابت وأماني أيامي إلى ما شددت عضدي بهم فكانوا لي ينباع أرتوي منها إلى خيرة أيامي وصفونها
إلى قرّة عيني

إلى إخواني وأخواتي الغاليين

إلى المرأة التي صنعت أيامي وكللتها بالجمال أهديك هذا البحث لأعبر لك عن مدى امتناني، لكونك دائمة الثقة
بنجاحي إلى رقيقة روعي، أهدي بحثي هذا، فأنت الوحيدة التي احتملت انشغالي وإرهاقي وقلقي، طوال فترة
دراستي

زوجتي العزيزة

لكل من كان عونًا وسندا في هذا الطريق للأصدقاء الأوفياء ورفقاء السنين

إلى الأستاذ المشرف شعباني محمد الساسي الذي كان داعما ومؤطراً لنا في هذا العمل

إلى زملائي في هذه الإنجاز العظيم

منصر عبد العزيز ، سعودي احمد شوقي ، عطاالله نصر

أعلم أن هذه الكلمات لا تكفي للتعبير عن عمق امتناني وشكري، لكنها تمثل محاولة صادقة من قلبي، أشكركم
جميعاً على كل شيء، وأتمنى لكم السعادة أعزائي خلال تخرجي

سبحانه وتعالى الحمد لله

على ما وهبني وأن يجعلني مباركا وأن يعينني أينما كنت فمن قال أنا لها نالها ، فأنا لها وإن أنت رغما عنها
أتيت بها فالحمد لله شكراً وحياءً وامتناناً على البدء والختام وآخر دعواهم أن الحمد لله رب العالمين

يوسف

بسم الله الرحمن الرحيم

بكل الحب والتقدير أقدم هذا العمل إلى من كانوا لي عونًا وسندًا في مسيرتي العلمية...

إلى والدي العزيز:

يا من كنت دائمًا لي قدوة في العطاء والعمل الجاد، شكرًا لك على دعمك اللامحدود وتشجيعك الدائم.

إلى والدتي الغالية:

إلى ينبوع الحنان والتضحية، يا من كانت دعواتك نورًا يضيء طريقي. شكرًا لك على كل لحظة حب واهتمام.

إلى إخوتي الأعزاء:

أنتم الروح التي تعطي لحياتي نكهة خاصة. شكرًا لكم على وقوفكم بجانبني ومساندتكم لي في كل خطوة.

إلى أصدقائي الأعزاء:

إلى من شاركوني الأفراح والأحزان، وكانوا دومًا مصدر إلهام لي. شكرًا لكم على كل لحظة جميلة قضيناها معًا

ناصر

Sommaire

II.5.1. Orientation du flux statorique (Stator field oriented control SFOC).....	27
II.6. Résultats obtenus.....	32
II.6.1. Variation de charge.....	33
II.6.2. Interprétation du résultat de variation de charge :	34
II.6.3. Changement de référence de l'amplitude de la tension statorique.....	35
II.6.4. Interprétation du résultat de changement de référence de l'amplitude de la tension statorique.....	36
II.7. conclusio.....	37
Chapitre III : Commande vectorielle en courant d'une génératrice asynchrone double alimentation autonome	
III.1. Introduction.....	39
III.2. Conception proposée d'un contrôleur à hystérésis HCC pour un GADA autonome....	39
III.2.1. Contrôleurs de courant à hystérésis.....	41
III.2.2. Proposition de conception d'un contrôleur HCC pour un GADA autonome.....	41
III.3. Modèle de simulation.....	42
III.4. Résultats obtenus.....	42
III.4.1. Variation de charge.....	43
III.4.2. Interprétation du résultat de variation de charge.....	44
III.4.3. Changement de référence de l'amplitude de la tension statorique.....	45
III.4.4 Interprétation du résultat de changement de référence de l'amplitude de la tension statorique.....	46
III.5. Conclusion.....	46
Conclusion générale.....	47
Bibliographie.....	50

Liste des Figures

Liste des Figures

Fig.I.1.principe du rotor bobiné.....	7
Fig I.2.Modes de fonctionnement de la machine à doublealimentation	8
Fig.I.3.MADA avec contrôle du glissement par L'énergie dissipée.....	9
Fig.I.4.MADA, structure Kramer.....	9
Fig.I.5.Structure de Scherbius avec Cycloconvertisseur	10
Fig.I.6.Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.....	11
Fig.I.7.Topologies GADA de base : a) GADA connecté au réseau, b) GADA autonome à 4 fils, c) GADA autonome à 3 fils avec transformateur intermédiaire, d) GADA fonctionnant en parallèle dans le réseau autonome à 3 fils avec un transformateur intermédiaire, d) GADA fonctionnant en parallèle dans un micro-réseau.....	13
Fig.I.8.Circuit triphasé du stator et du rotor du GADA.....	16
Fig.I.9.Représentation de l'espace d'état à deux axes des systèmes triphasés (a-b-c) montrant la relation entre les cadres de référence du rotor (α - β) et du synchrone(d-q).....	18
Fig.II.1.Schéma de base des WPGS autonomes basés sur GADA	24
Fig.II.2. Circuit équivalent de GADA dans un référentiel arbitraire par vitesse de rotation de	24
Fig.II.3. À gauche : onduleur de source de tension à deux niveaux ; à droite : vecteurs de tension.....	25
Figure II.4.Vector diagram of the GADA control system.....	27
Figure II.5.Diagramme de phaseur.....	27
Fig.II.6.Schéma de stratégie de contrôle de base du RSC pour le système GADA autonome.....	31
Fig.II.7. Système en boucle fermée du contrôle du courant sur l'axe dq.....	32
Fig.II.8.Système en boucle fermée du contrôle de l'amplitude de tension statorique vs.....	32
Fig.III.1Principes de fonctionnement du contrôle du courant par hystérésis.....	40
Fig.III.2.Schéma de principe du HCC pour RSC.....	42

Liste de tableau

Table II.1 :Vecteurs de tension et états de commutation avec numéro d'index.....26

Glossaire

Glossaire

S_a, S_b, S_c	: Indices des phases statorique.
R_a, R_b, R_c	: Indices des phases rotorique.
d	: Indices de l'axe direct.
q	: Indices de l'axe en quadrature.
o	: Indices de l'axe homopolaire.
[P]	: Matrice de Park.
$[P^{-1}]$: Matrice inverse de Park.
$V_s = [V_{as}, V_{bs}, V_{cs}]^t$: [V] Tensions statoriques triphasées.
$V_{sdq} = [V_{ds}, V_{qs}]^t$: [V] Tensions statoriques biphasés dans le repère tournant de park (d, q).
$V_{s\alpha\beta} = [V_{s\alpha}, V_{s\beta}]^t$: [V] Tensions statoriques biphasés dans le repère fixe de Concordia (α , β).
$I_s = [I_{as}, I_{bs}, I_{cs}]^t$: [A] Courants statoriques triphasées.
$I_{sdq} = [I_{ds}, I_{qs}]^t$: [A] Courants statoriques biphasés dans le repère tournant de park (d, q).
$I_{s\alpha\beta} = [I_{s\alpha}, I_{s\beta}]^t$: [A] Courants statoriques biphasés dans le repère fixe de Concordia (α , β).
$I_r = [I_{ar}, I_{br}, I_{cr}]^t$: [A] Courants rotoriques triphasées.
$I_{rdq} = [I_{rs}, I_{rs}]^t$: [A] Courants rotoriques biphasés dans le repère tournant de park (d, q).
$I_{r\alpha\beta} = [I_{r\alpha}, I_{r\beta}]^t$: [A] Courants rotoriques biphasés dans le repère fixe de Concordia (α , β).
$\varphi_s = [\varphi_{as}, \varphi_{bs}, \varphi_{cs}]^t$: [Wb] Flux statoriques triphasées.
$\varphi_{sdq} = [\varphi_{ds}, \varphi_{qs}]^t$: [Wb] Flux statoriques biphasés dans le repère tournant de park (d, q).
$\varphi_{s\alpha\beta} = [\varphi_{s\alpha}, \varphi_{s\beta}]^t$: [Wb] Flux statoriques biphasés dans le repère fixe de Concordia (α , β).
$\varphi_r = [\varphi_{ar}, \varphi_{br}, \varphi_{cr}]^t$: [Wb] Flux rotoriques triphasées.
$\varphi_{rdq} = [\varphi_{dr}, \varphi_{qr}]^t$: [Wb] Flux rotoriques biphasés dans le repère tournant de park (d, q).
$\varphi_{r\alpha\beta} = [\varphi_{r\alpha}, \varphi_{r\beta}]^t$: [Wb] Flux rotoriques biphasés dans le repère fixe de Concordia (α , β).

$[L_{ss}]$: Matrice d'inductance statorique.
$[L_{rr}]$: Matrice d'inductance rotorique.
$[M_{rs}]$: Matrice inductance mutuelle rotor-stator (influence du stator sur le rotor).
$[M_{sr}]$: Matrice inductance mutuelle stator-rotor (influence du rotor sur le stator).
M_s	: [H] Inductance mutuelle entre deux phases statoriques.
M_r	: [H] Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques.
M_0	: [H] Inductance mutuelle maximum entre rotor et stator.
$L_s = l_s - M_s$: [H] Inductance cycliques statoriques.
$L_r = l_r - M_r$: [H] Inductance cycliques rotoriques.
$M = \frac{3}{2} M_{sr}$: [H] Inductance cycliques mutuelles entre le stator et le rotor.
R_s, R_r	: [Ω] Résistance statorique et rotorique.
l_s, l_r	: [H] Inductances propres d'une phase de la machine.
θ	: [rad] Position angulaire du rotor.
p	: Nombre de pair de pole.
Ω	: [rad/s] vitesse mécanique.
$\omega = p\Omega$: [rad/s] Pulsation mécanique correspondant à la vitesse de rotation Ω .
ω_r	: [rad/s] Pulsation des grandeurs électriques rotoriques.
$\omega_s = \omega_r + p\Omega$: [rad/s] Pulsation des grandeurs électriques statoriques.
$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$: Coefficient de dispersion ou de Blondel.
C_e	: [N.m] Couple électromagnétique.
C_r	: [N.m] Couple résistant inclut le couple de charge.
f	: Coefficient des frottements.

Sigles utilisés :

PI : Régulateur proportionnel-intégral.

IP : Régulateur intégral-proportionnel.

MLI : Modulation de Largeur d'impulsions.

MAS : Machine Asynchrone.

CVD : Commande Vectorielle Directe.

FOC : Field Oriented Control.

OA : Observateur Adaptatif.

MADA : Machine asynchrone à double alimentation

GADA : Génératrice asynchrone à double alimentation

Introduction générale

Introduction générale

La commande vectorielle des génératrices asynchrones double alimentation (GADA) joue un rôle crucial dans l'exploitation efficace des micro-réseaux AC isolés. En permettant un contrôle précis de la puissance active et réactive injectée sur le réseau, cette technique offre plusieurs avantages considérables, notamment :

- Amélioration de la stabilité et de la régulation de la tension du micro-réseau: La commande vectorielle permet de maintenir une tension stable et régulée au niveau des points de couplage de la GADA, même en cas de variations de charge ou de perturbations du réseau.
- Optimisation du partage de puissance entre les sources d'énergie: Dans un micro-réseau composé de plusieurs sources d'énergie renouvelable intermittentes, la commande vectorielle permet de répartir équitablement la charge entre les sources, en maximisant ainsi l'utilisation des énergies renouvelables et en minimisant l'apport des sources d'énergie conventionnelles.
- Amélioration de la qualité de l'énergie: La commande vectorielle permet de réduire les distorsions harmoniques et les fluctuations de tension injectées sur le réseau, contribuant ainsi à améliorer la qualité de l'énergie fournie aux charges connectées.
- Facilitation du fonctionnement en parallèle de plusieurs GADA: La commande vectorielle permet de synchroniser et de contrôler plusieurs GADA connectées en parallèle sur le micro-réseau, assurant une répartition stable de la charge et une exploitation optimale des ressources

La commande vectorielle repose sur la transformation des variables triphasées du stator de la GADA en composantes d'axe d et q dans le repère synchronisé avec le flux statorique. Cette transformation permet de décomposer le comportement de la machine en deux circuits magnétiques découplés, représentant respectivement le flux d'axe d et le flux d'axe q .

En contrôlant indépendamment les composantes d et q des courants statoriques, la commande vectorielle permet de contrôler directement le flux statorique de la GADA, ce qui se traduit par un contrôle précis de la puissance active et réactive injectée sur le réseau.

La commande vectorielle des génératrices asynchrone double alimentation constitue un outil essentiel pour l'exploitation efficace et stable des micro-réseaux AC isolés. En offrant un contrôle précis de la puissance active et réactive injectée sur le réseau, cette technique permet d'améliorer la stabilité, la qualité de l'énergie et l'intégration des sources d'énergie renouvelable, contribuant ainsi au développement durable des microréseaux.

Chapitre I : Modélisation de la génératrice asynchrone double alimentation GADA

Chapitre I

Modélisation de la génératrice asynchrone double alimentation GADA

I.1.introduction

Le générateur à induction doublement alimenté (GADA) est une machine à induction à rotor bobiné dont le stator est connecté au réseau et le rotor via un convertisseur de puissance dos à dos. Cette configuration réduit la puissance nominale du convertisseur, diminuant ainsi le coût, la taille et le poids, ce qui le rend populaire dans les systèmes éoliens et hydroélectriques. Un inconvénient est l'entretien des bagues collectrices, bien que des versions sans balais soient en développement. Les convertisseurs de puissance, passant des thyristors aux IGBT, utilisent souvent des topologies AC/DC/AC pour leur isolation et leur capacité à intégrer le stockage d'énergie. Les convertisseurs multiniveaux sont également utilisés pour les hautes tensions, réduisant les harmoniques et les besoins en filtres inductifs.

I.2.Structure de la machine

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone) constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne [1-2].

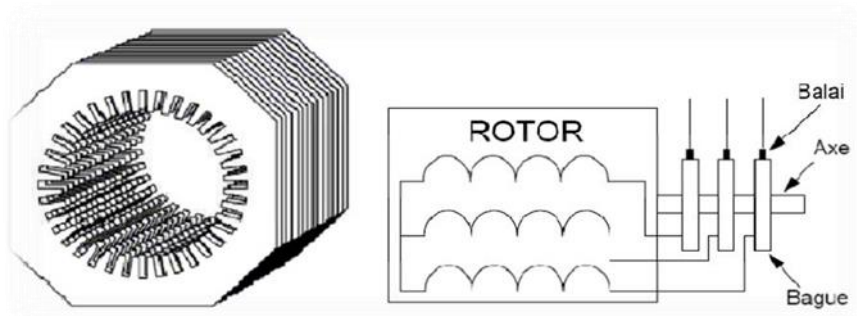


Fig.I.1.principe du rotor bobiné

I.3.Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double Alimentation

Pour un fonctionnement normal de la machine asynchrone en régime établi, il faut que les vecteurs des forces magnétomotrices du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par

rapport à l'autre. Et du moment que le vecteur résultant de f_{mms} des enroulements statorique tourne dans l'espace avec une vitesse Angulaire $\omega_s = 2.\pi.f_s$ et le rotor tourne avec la vitesse ω_r , alors pour que cette condition soit vérifiée, il faut que le vecteur des f_{mms} des enroulements rotorique tourne par rapport au rotor avec une vitesse ω_{gl} telle que :

$$\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r = \omega_s.g \quad (I.1)$$

Où : g est le glissement et ω_{gl} est la vitesse angulaire de glissement. Si la vitesse de la machine est inférieure à la vitesse de synchronisme, les sens de rotation des deux vecteurs sont identiques, dans le cas contraire, quand la vitesse est supérieure à la vitesse de synchronisme les sens seront opposés. Pour que la rotation du vecteur résultant des f_{mms} par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement rotorique doit avoir une fréquence f_r , définie à partir de $\omega_{gl} = 2.\pi.f_r$; c'est-à-dire : [3-4-5].

$$f_r = g.f_s \quad (I.2)$$

I.4.Modes de fonctionnement de la machine à double alimentation

- Lorsque la machine fonctionne en moteur, la puissance est fournie par le réseau. Si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, la puissance de glissement est renvoyée sur le réseau : c'est la cascade hypo synchrone.
- En mode moteur hyper synchrone, une partie de la puissance absorbée par le réseau va au rotor et elle est convertie en puissance mécanique.
En fonctionnement générateur, le comportement est similaire, la puissance fournie à la machine par le dispositif qui l'entraîne est une puissance mécanique
- En mode hypo synchrone, une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.
- En mode hyper synchrone, la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau [6].

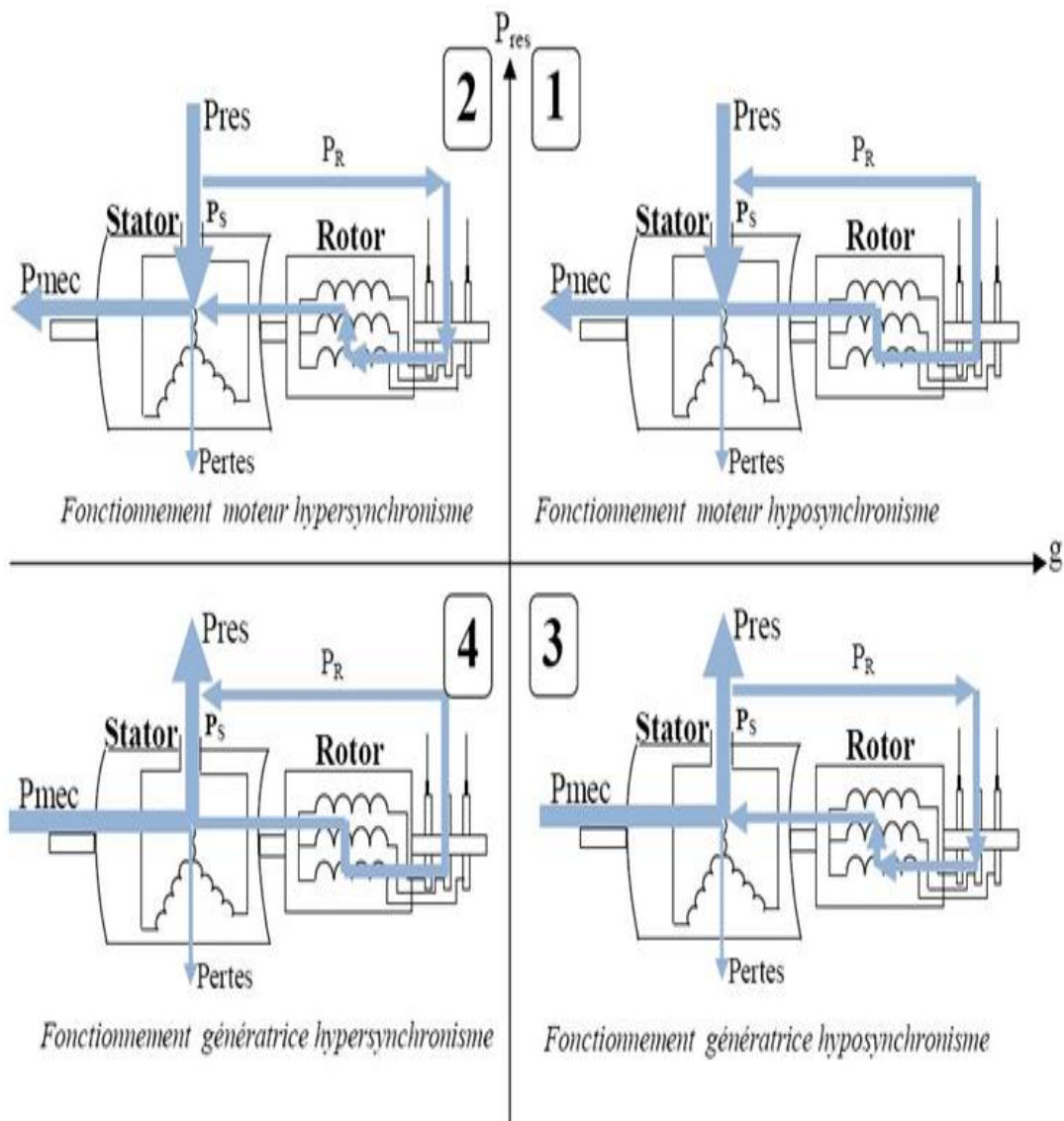


Fig I.2. Modes de fonctionnement de la machine à double alimentation.

I.5. Les différentes structures d'alimentation de la MADA

I.5.1. MADA à énergie rotorique dissipée

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la (Fig I.2), le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO. Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur .

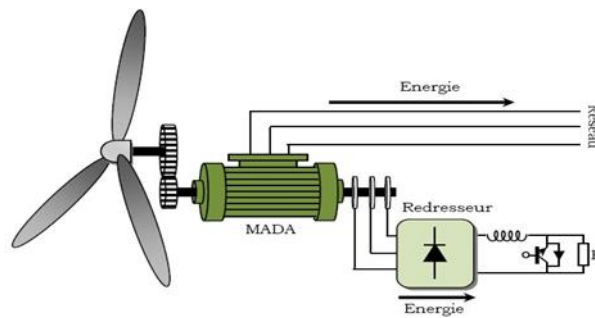


Fig I.3.MADA avec contrôle du glissement par L'énergie dissipée

I.5.2.MADA structure de Kramer

Dans le but d'augmenter le rendement de la structure du système précède, on remplacera le hacheur et la résistance par un onduleur qui va permettre de renvoyer l'énergie de glissement vers le réseau. (Structure de Kramer, Fig (I.4).

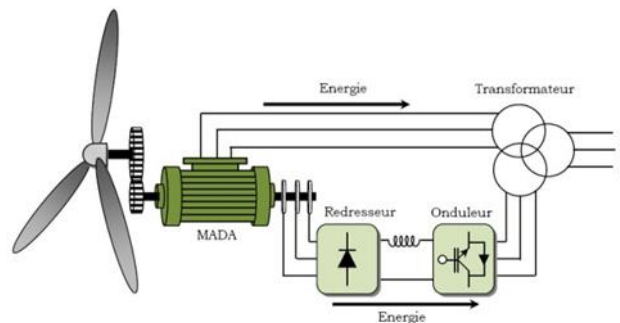


Fig I.4.MADA, structure Kramer

L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine, ce système est avantageux s'il permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. Afin de respecter cette contrainte, le glissement est maintenu inférieur à 30%. le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau) donc le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures au synchronisme. Cette solution n'est plus utilisée au profit de la structure de Scherbius avec convertisseurs à IGBT.

I.5.3.MADA avec cyclo convertisseur

Dans cette configuration, l'échange d'énergie entre le rotor et le réseau est bidirectionnel. Cela permet de doubler la plage de variation de vitesse par rapport à la structure de Kramer. En effet, la variation du glissement inférieur à 30% peut être dans ce (fonctionnement hypo synchrone) ou négative (fonctionnement hyper synchrone).

L'inconvénient noté est la génération de perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif .

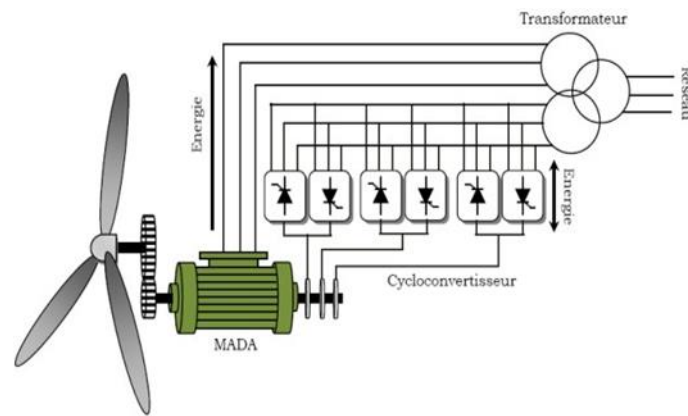


Fig I.5. Structure de Scherbius avec Cycloconvertisseur.

I.5.4. MADA «structure de Scherbius avec convertisseurs MLI »

Une autre structure intéressante figure (II.6) utilise deux ponts triphasés d'IGBT commandable à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO. Le gain se répercute sur des perturbations moins importantes (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées par la commande MLI). En plus la bidirectionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hypo synchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau.

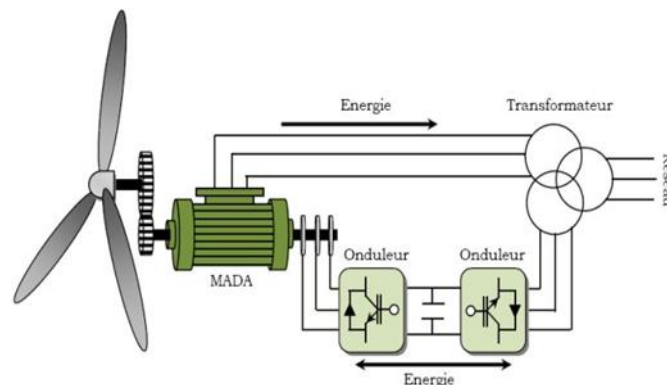


Fig.I.6. Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.

I.6. Les avantages et les inconvénients

I.6.1. Les avantages

- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse de synchronisme.
- A configuration dont les deux convertisseurs alimentant la machine permettent de fonctionner en régime dégradé (l'un des deux onduleurs tombe en panne).
- Transfert bidirectionnel de la puissance rotorique.
- La MADA réunit les avantages de la machine synchrone et de la machine asynchrone, à savoir:

Chapitre I Modélisation de la génératrice asynchrone double alimentation GADA

- Fonctionnement à vitesse de rotation variable.
- Régulation découplée des puissances active et réactive.

I.6.2. Les inconvénient

- Utilisation d'un nombre de convertisseurs statiques plus que celle de la machine classique.
- Le coût total de la machine est plus important par rapport aux autres machines électriques.
- Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à causes des balais.
- La présence des balais nécessite des interventions périodiques, ce qui augmente le coût de la maintenance, [7.8].

I.7. Topologies des systèmes GADA

Il existe quatre topologies GADA de base utilisées dans les systèmes de production, comme le montre la figure 1.1. Dans cette sous-section, ces topologies seront brièvement présentées.

Aujourd'hui, l'application la plus populaire du GADA est une turbine éolienne connectée au réseau, mais les générateurs diesel autonomes sont une solution prometteuse pour les systèmes électriques dans les zones reculées telles que les navires, les îles, les petits villages dans les zones rurales. Les parcs éoliens de grande puissance (5-300 MW) sont connectés au réseau électrique à haute tension à l'aide de transformateurs élévateurs. Dans les réseaux électriques à forte pénétration d'énergies renouvelables, le comportement des parcs éoliens en cas de défaillance du réseau est l'une des principales préoccupations, car la stabilité du réseau électrique ne peut être garantie sans la participation des parcs éoliens à la production de puissance réactive. C'est pourquoi des codes de réseau spéciaux ont été introduits afin de réguler le comportement des générateurs connectés au réseau (une brève introduction aux codes de réseau peut être trouvée dans). Les codes de réseau rendent les éoliennes

Les turbines restent connectées au réseau pendant les pannes, alimentant la puissance réactive pour aider au rétablissement de la tension. Un objectif de contrôle dans le GADA connecté au réseau est généralement la maximisation de l'énergie extraite de la source d'énergie. Cependant, l'objectif principal des deux contrôleurs, que la vitesse du vent soit très faible ou très élevée, est de stabiliser l'énergie de la source d'énergie.

Cependant, le principal objectif des deux contrôleurs, que la vitesse du vent soit très faible ou très élevée, est de stabiliser la vitesse de l'éolienne à la valeur maximale/minimale autorisée afin de ne pas dépasser la zone de fonctionnement sûre du RSC. Les méthodes MPPT sont activées lorsque la vitesse du rotor est dans les limites et, avec le contrôle du décrochage en tangage, elles maximisent la puissance de la turbine disponible à ce moment

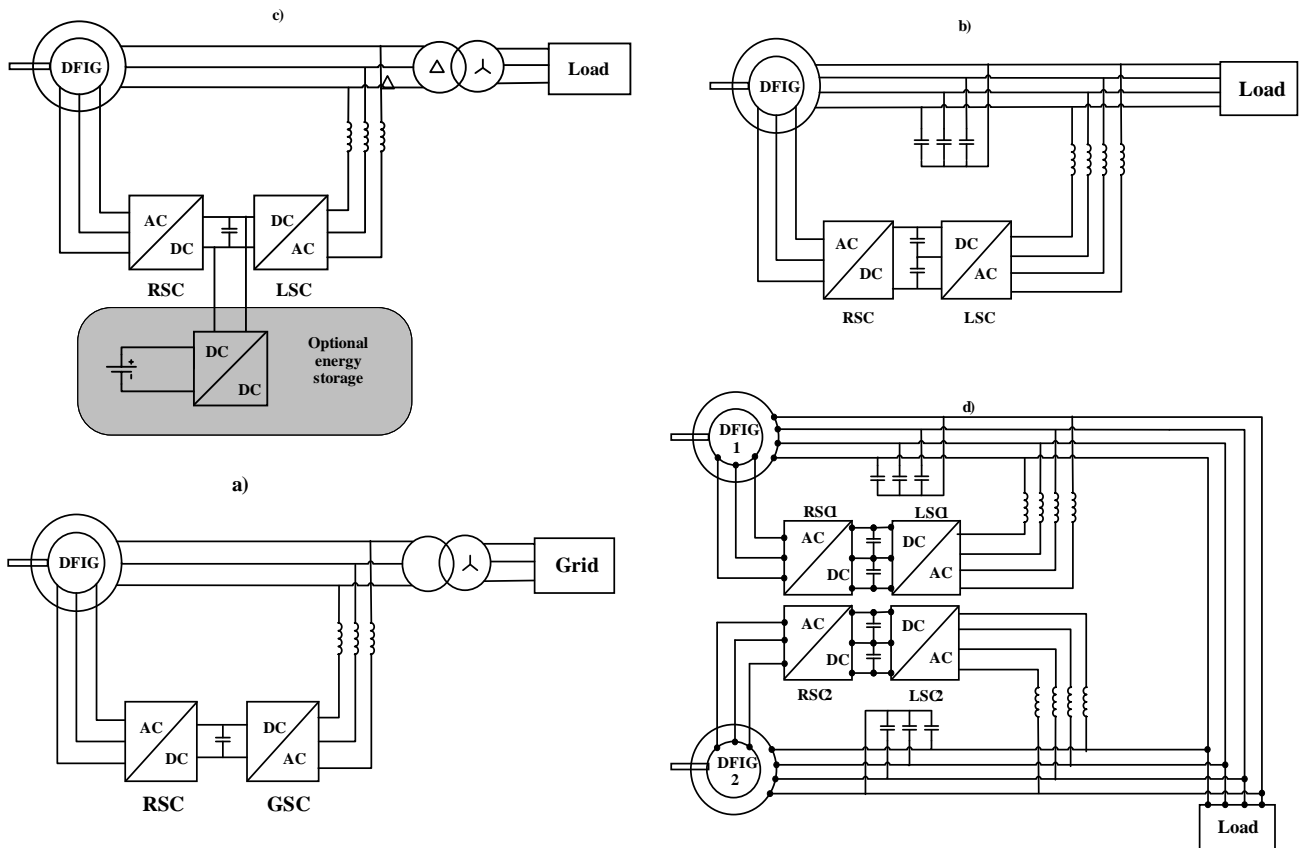


Fig.I.7. Topologies GADA de base : a) GADA connecté au réseau, b) GADA autonome à 4 fils, c) GADA autonome à 3 fils avec transformateur intermédiaire, d) GADA fonctionnant en parallèle dans le réseau autonome à 3 fils avec un transformateur intermédiaire, d) GADA fonctionnant en parallèle dans un micro-réseau.

Actuellement, les principaux sujets de recherche dans le domaine du GADA connecté au réseau sont les suivants :

- - Fonctionnement dans des conditions de tension de réseau déséquilibrée (différents objectifs de contrôleréduction des ondulations de couple, courants rotor/stator sinusoïdaux, annulation des ondulations de puissance, symétrisations du micro-réseau à haute impédance).
- - Soutenir les défauts symétriques ou asymétriques du réseau propriété appelée (Low-Voltage Ride-Through) à l'aide de la protection crowbar et de l'amortissement actif du flux lorsque les défauts induits ont été éliminés. basse tension) en utilisant la protection crowbar et l'amortissement actif du flux lorsque latension induite est dans les limites de contrôle.

Actuellement, peu de GADA autonomes sont utilisés commercialement, alors qu'il existe un grand nombre d'applications éoliennes de GADA connectés au réseau. En fonctionnement autonome, le principal objectif de contrôle est la stabilisation de la tension du micro-réseau. Le GADA autonome doit fournir une tension sinusoïdale à amplitude constante et à fréquence constante en présence de charges non linéaires et déséquilibrées. Il doit donc être

capable de réduire les harmoniques élevées de la tension du stator et de symétriser la tension en présence d'un grand nombre de charges non linéaires et déséquilibrées dans le micro-réseau autonome. D'autre part, la génération d'harmoniques élevées du courant du stator provoque des ondulations du couple, qui affectent négativement les éléments mécaniques du générateur et de la machine motrice. Les harmoniques et la séquence négative du courant de charge doivent être compensées par le convertisseur côté charge LSC dans la mesure du possible. La fonction du LSC est de stabiliser la tension de la liaison CC et éventuellement de réduire le contenu des harmoniques élevées du courant de charge, qui provoqueraient des ondulations de couple électromagnétiques si elles étaient transférées à travers le générateur. Cependant, le LSC ne peut pas toujours compenser la quantité totale d'harmoniques élevées et de séquence négative en raison de ses limites de courant. Le RSC doit garantir une tension sinusoïdale au stator, tandis que le LSC doit compenser les harmoniques élevées et la séquence négative du courant de charge dans la mesure où ses limites de courant le permettent. Dans les micro-réseaux, le fil neutre est généralement présent pour connecter les charges monophasées au réseau. Dans le cas de générateurs autonomes de grande puissance, un transformateur est souvent présent entre les générateurs et la charge afin de faire correspondre les paramètres de tension du générateur de grande puissance et de la charge. Lorsqu'un générateur basse tension est utilisé, il est possible d'éliminer le transformateur d'adaptation et d'utiliser un LSC triphasé à 4 fils.

Les principaux sujets concernant le fonctionnement autonome du GADA sont les suivants :

- Stabilisation de la tension en cas de variations rapides de la charge,
- Fournir une tension sinusoïdale symétrique sous des charges non linéaires et déséquilibrées,
- Limitations du courant des convertisseurs et répartition du courant de charge entre les convertisseurs,
- Détection des défauts et leur isolation (fournir le courant de court-circuit aux dispositifs de protection contre les surintensités afin de leur permettre de rompre la boucle de court-circuit).

pour permettre aux dispositifs de protection contre les surintensités de rompre la boucle de court-circuit).

Le fonctionnement en parallèle (également appelé répartition de la charge) des GADA peut être utilisé dans les micro-réseaux où plusieurs générateurs fournissent de l'énergie à la charge. Une stratégie courante de répartition de la charge entre les générateurs est la configuration maître-esclave, dans laquelle un générateur fonctionne comme source de tension (il stabilise la tension du

Chapitre I Modélisation de la génératrice asynchrone double alimentation GADA

réseau), tandis que les autres fonctionnent comme sources de courant. Le principal problème de la topologie maître-esclave est sa vulnérabilité aux défaillances du générateur maître, ce qui entraîne l'effondrement de l'ensemble du système électrique. En outre, cette topologie nécessite des interconnexions de signaux entre les générateurs, ce qui réduit sa robustesse et augmente le coût du système (dans de nombreux cas, la construction de l'infrastructure d'information peut être tout simplement irréalisable en raison, par exemple, des grandes distances entre les générateurs) ,[9].

I.8. Modélisation de la GADA

La modélisation d'un système quelconque est indispensable pour l'étude et maîtrise de son fonctionnement et lorsqu'on souhaite lui appliquer une commande particulière. D'autre part, elle est une phase primordiale dans le développement de la conception des systèmes.

Dans cette partie sera l'objectif d'une étude de modélisation de la machine asynchrone génératrice à double alimentation dans le référentielle au champ tournant .Ce dernier nous a permet d'obtenir un modèle mathématique adapté de GADA et commander par l'utilisation de la puissance active et réactive mesurer au niveau du rotor de la GADA.

I.8.1. Hypothèses simplificatrices

Afin d'établir un modèle simple de la MADA, nous avons pris en considération certaines hypothèses simplificatrices à savoir :

- La géométrie de la machine est symétrique.
- Le circuit magnétique est parfaitement feuilleté, au stator et au rotor, la saturation est négligeable.
- La densité de courant est considérée uniforme dans la section des conducteurs élémentaires.
- Les résistances des enroulements ne dépendent pas de la température.
- Les forces magnétomotrices créent par le stator ou le rotor a une répartition Sinusoïdale.
- L'épaisseur de l'entrefer est uniforme.

I.9. Modélisation des générateurs à induction doublement alimentés

Le GADA symétrique triphasé illustré à la figure I.8 peut être décrit comme suit :

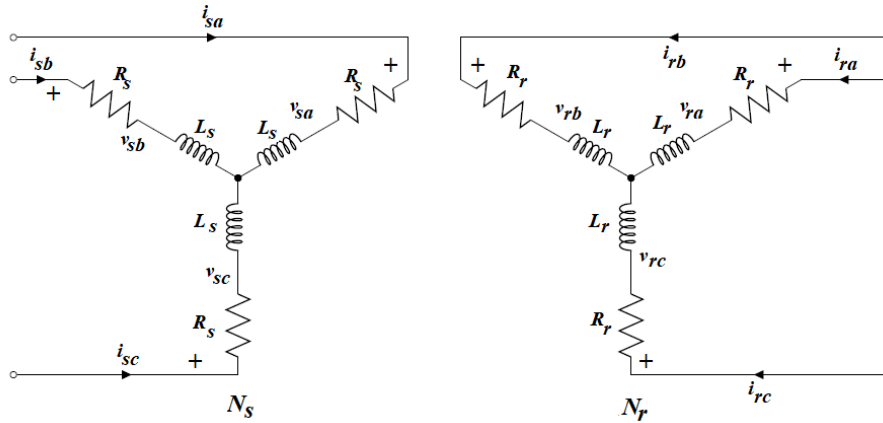


Fig.I.8. Circuit triphasé du stator et du rotor du GADA.

Les relations de tension du côté du rotor et du stator sont obtenues par les lois de Kirchhoff et de Faraday :

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = R_s + \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{as} \\ \psi_{bs} \\ \psi_{cs} \end{bmatrix} \quad (I.3)$$

$$\begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix} = R_r + \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{ar} \\ \psi_{br} \\ \psi_{cr} \end{bmatrix} \quad (I.4)$$

Les indices *r* et *s* désignent respectivement les grandeurs du rotor et du stator. Les indices *a, b* et *c* sont utilisés pour les phases *a, b* et *c*, respectivement. Les symboles *v* et *i* désignent les tensions et les courants, et ϕ représente les liaisons de flux. Les résistances des enroulements du stator et du rotor sont R_s et R_r .

Les liaisons de flux sont couplées aux courants par les inductances :

$$\begin{bmatrix} \psi_{as} \\ \psi_{bs} \\ \psi_{cs} \end{bmatrix} = L_s \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + L_M \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (I.5)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{ar} \\ \psi_{br} \\ \psi_{cr} \end{bmatrix} = L_r \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + L_M^T \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad (I.6)$$

Les matrices d'inductance sont définies par :

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_m & -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & L_{ls} + L_m & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m & L_{ls} + L_m \end{bmatrix} \quad (I.7)$$

$$L_r = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_m & -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & L_{lr} + L_m & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m & L_{lr} + L_m \end{bmatrix} \quad (I.8)$$

$$L_M = L_m \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (I.9)$$

Les indices L_l et L_m correspondent respectivement à l'inductance de fuite et à l'inductance magnétisante. L'amplitude maximale de l'inductance mutuelle entre le stator et le rotor est L_m . Le déplacement angulaire électrique du rotor par rapport au stator est défini par ω_r . La vitesse électrique du rotor est calculée comme suit

$$\theta_r(t) = \int_0^t \omega_r dt + \theta_r(0) \quad (I.10)$$

où $\theta_r(0)$ est la position initiale du rotor à $t=0$. La matrice d'inductance mutuelle L_m dépend du temps. Afin d'éliminer la dépendance temporelle, la transformation dq sera utilisée à la place de la transformation abc. La modélisation du GADA dans le cadre de référence (d-q) est présentée à l'annexe B-2.

La dynamique électrique du GADA a été développée dans le cadre de référence du stator. Le modèle dynamique mécanique du GADA est donné par.

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_e \quad (I.11)$$

où J est l'inertie de la machine, T_m est le couple mécanique et T_e est le couple électromagnétique.

I.10. Représentation vectorielle de l'espace d'état des systèmes triphasés

La représentation vectorielle de l'espace état rend un circuit AC simple à représenter et facile à comprendre et à analyser. Comme nous l'avons déjà mentionné, cette étude considère un moteur à rotor bobiné triphasé, appelé générateur à induction doublement alimenté (GADA), alimenté par une source de courant alternatif triphasé. Il est bien connu que les trois phases (a - b - c) sont situées à 120° l'une de l'autre dans l'espace, comme le montre la figure 2.3. Elles dépendent linéairement les unes des autres, ce qui complique le modèle du système. Pour simplifier la notation des variables électriques triphasées, telles que la tension, le courant et le flux, les variables peuvent être modélisées de manière adéquate à l'aide d'un cadre de référence à deux axes. La représentation à deux axes du système triphasé est appelée "représentation vectorielle de l'espace d'état. Ce cadre de référence à deux axes peut être stationnaire dans le rotor (α - β) ou synchrone (d-q), comme le montre la figure I.9. Pour la représentation vectorielle de l'espace d'état, les composantes d'une variable

particulière le long des coordonnées a - b - c sont projetées sur les coordonnées α - β ou d-q. Les deux coordonnées dans chaque cadre de référence sont mutuellement perpendiculaires l'une à l'autre et linéairement indépendantes. Cette indépendance permet de contrôler indépendamment le flux et le couple d'une machine à courant alternatif, comme pour une machine à courant continu à excitation séparée.

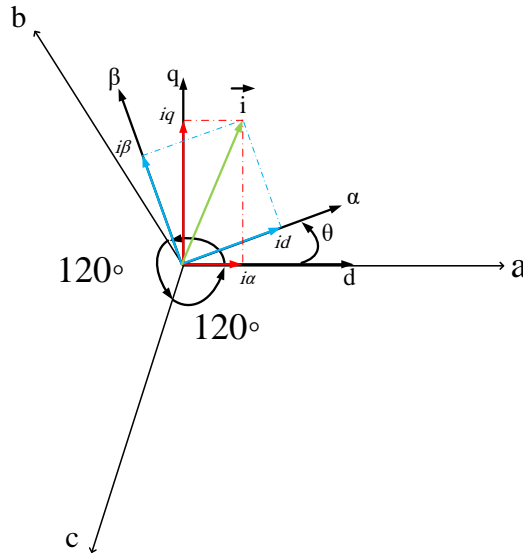


Fig.I.9.Représentation de l'espace d'état à deux axes des systèmes triphasés (a-b-c) montrant la relation entre les cadres de référence du rotor (α - β) et du synchrone (d-q).

En utilisant le courant comme exemple, la transformation du cadre a-b-c en un cadre α - β - connue sous le nom de transformation de Clarke - est exprimée sous forme de matrice comme suit

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

Il est parfois nécessaire de transformer le cadre α - β en un cadre d-q, en particulier dans la conception de la commande vectorielle (c'est-à-dire FOC) pour les entraînements de moteur. La transformation est appelée Park

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r \\ -\sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix}$$

Où θ_r est l'angle entre les cadres de référence α - β et d-q, comme le montre la figure I.9. La transformation directe du cadre a-b-c au cadre d-q (ou vice versa) est également utilisée pour la modélisation dynamique d'un système triphasés. Les composantes de courant i_{α} et i_{β} sont sinusoïdales, car le vecteur de courant tourne à une vitesse constante par rapport au cadre α - β du rotor. En revanche, les composantes i_d et i_q sont normalement constantes ou constantes par

Chapitre I Modélisation de la génératrice asynchrone double alimentation GADA

morceaux, et sont donc linéarisées. Les deux transformations susmentionnées sont également applicables à la tension et au flux, et les transformations sont réversibles. Il est également pratique de pouvoir transformer les courants, les tensions ou les liaisons de flux du cadre de référence α - β (rotor) au cadre de référence d-q (synchrone) et vice-versa. La transformation du cadre de référence d-q au cadre de référence α - β du rotor est généralement appelée transformation de Park inverse et est donnée par la formule suivante

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & -\sin \theta_r \\ \sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}$$

La représentation vectorielle de l'espace d'état des variables IM dans les cadres de référence α - β et d-q est la suivante

$$\text{Tension statorique: } \vec{v}_s = v_{s\alpha} + jv_{s\beta}, \vec{v}_s = v_{sd} + jv_{sq};$$

$$\text{Tension du rotor: } \vec{v}_r = v_{r\alpha} + jv_{r\beta}, \vec{v}_r = v_{rd} + jv_{rq};$$

$$\text{Courant statorique: } \vec{i}_s = i_{s\alpha} + ji_{s\beta}, \vec{i}_s = i_{sd} + ji_{sq};$$

$$\text{Courant du rotor: } \vec{i}_r = i_{r\alpha} + ji_{r\beta}, \vec{i}_r = i_{rd} + ji_{rq};$$

$$\text{Flux statorique: } \vec{\psi}_s = \psi_{s\alpha} + j\psi_{s\beta}, \vec{\psi}_s = \psi_{sd} + j\psi_{sq};$$

$$\text{Flux du rotor: } \vec{\psi}_r = \psi_{r\alpha} + j\psi_{r\beta}, \vec{\psi}_r = \psi_{rd} + j\psi_{rq}.$$

I.11. Modèle vectoriel de l'espace d'état du GADA

Il existe trois cadres de référence préférentiels différents utilisés dans les calculs des axes d et q pour la simulation des machines à induction. La figure I.9 montre les vecteurs spatiaux dans les trois cadres de référence. Ces cadres peuvent être classés en fonction de la vitesse de rotation des axes d et :

- Cadre de référence stationnaire (appelé cadre de référence du stator) : La vitesse de rotation est nulle.
- Cadre de référence synchrone dq : les axes d et q tournent à la vitesse de rotation ω_s du flux ou de la tension du stator.
- Cadre de référence du rotor $\alpha\beta$: Les axes α et β tournent à la vitesse ω_m du rotor.

Le modèle espace-état du GADA dans le cadre de référence α - β du rotor peut être décrit par les équations (I.12)-(I.16) :

$$\text{Équation de la tension statorique: } \vec{v}_s = R_s \cdot \vec{i}_s + \frac{d}{dt} \vec{\psi}_s + j \cdot \omega_m \cdot \vec{\psi}_s \quad (\text{I.12})$$

$$\text{Équation de la tension du rotor: } \vec{v}_r = R_r \cdot \vec{i}_r + \frac{d}{dt} \vec{\psi}_r \quad (\text{I.13})$$

$$\text{Équation du flux statorique: } \vec{\psi}_s = L_s \cdot \vec{i}_s + L_m \cdot \vec{i}_r \quad (\text{I.14})$$

$$\text{Équation du flux rotorique: } \vec{\psi}_r = L_r \cdot \vec{i}_r + L_m \cdot \vec{i}_s \quad (\text{I.15})$$

$$\text{Équation du couple électromagnétique: } T_e = \frac{3}{2} p \Im(\vec{\psi}_r \cdot \vec{i}_r) \quad (\text{I.16})$$

De même, le modèle espace-état d'un moteur à rotor bobiné dans le cadre de référence d-q du rotor peut être décrit par les équations (I.17)-(I.21) :

$$\text{Équation de la tension statorique: } \vec{v}_s = R_s \cdot \vec{i}_s + \frac{d}{dt} \vec{\psi}_s + j \cdot \omega_s \cdot \vec{\psi}_s \quad (\text{I.17})$$

$$\text{Équation de la tension du rotor: } \vec{v}_r = R_r \cdot \vec{i}_r + \frac{d}{dt} \vec{\psi}_r + j \cdot \omega_r \cdot \vec{\psi}_r \quad (\text{I.18})$$

$$\text{Équation du flux statorique: } \vec{\psi}_s = L_s \cdot \vec{i}_s + L_m \cdot \vec{i}_r \quad (\text{I.19})$$

$$\text{Équation du flux rotorique: } \vec{\psi}_r = L_r \cdot \vec{i}_r + L_m \cdot \vec{i}_s \quad (\text{I.20})$$

où \vec{v}_s est le vecteur tension du stator, \vec{i}_s est le vecteur courant du stator, \vec{i}_r est le vecteur courant du rotor, $\vec{\psi}_s$ est le vecteur flux du stator $\vec{\psi}_r$ est le vecteur flux du rotor, R_s et R_r sont les résistances par phase dans le stator et le rotor, respectivement. L_s , L_r sont les inductances par phase dans le stator et le rotor, respectivement. L_m est l'inductance mutuelle, respectivement, et ω_m est la vitesse électrique. L_{is} et L_{ir} sont respectivement les inductances de fuite des enroulements du stator et du rotor. T_e est le couple électromagnétique. La fréquence angulaire du rotor ω_m est directement liée à la vitesse angulaire du rotor Ω_m par le nombre de paires de pôles p comme suit

$$\omega_m = p \cdot \Omega_m \quad (\text{I.21})$$

Où ω_s et Ω_m sont respectivement la vitesse de rotation du cadre de référence synchrone et celle du cadre de référence du rotor, qui sont liées par la relation suivante : $\omega_r = \omega_s - \omega_m$, ω_r représente la fréquence angulaire relative entre le cadre de référence synchrone et le cadre de référence du rotor en rotation, [10].

I.12.conclusion

Les systèmes photovoltaïques stationnaires, utilisés pour produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire, se divisent en deux catégories principales : les systèmes raccordés au réseau et les systèmes autonomes. Les premiers échangent de l'énergie avec le réseau, tandis que les seconds fonctionnent indépendamment en s'appuyant sur l'énergie locale. Chaque type présente des défis spécifiques, comme la coordination avec le réseau pour les systèmes connectés et le stockage d'énergie pour les systèmes autonomes. Les topologies multi générationnelles, combinant diverses sources d'énergie renouvelable, représentent l'avenir de l'énergie durable. Elles nécessitent des études approfondies pour évaluer leur viabilité économique, technique et environnementale, tout en respectant les réglementations locales et internationales.

Chapitre II : Commande vectorielle en tension d'une génératrice asynchrone double alimentation autonome

Chapitre II

Commande vectorielle en tension d'une génératrice asynchrone double alimentation autonome

II.1.Introduction

Le contrôle vectoriel de la tension des générateurs autonomes à double alimentation asynchrone (GADA) permet un contrôle précis et efficace de ces machines dans les systèmes d'énergie renouvelable. En orientant le flux rotorique, il découple les composantes active et réactive du couple électromagnétique, assurant une production d'énergie optimale et un facteur de puissance unitaire. La transformation des équations de la GADA dans le repère de Park simplifie l'analyse vectorielle. Des régulateurs PI sont utilisés pour ajuster les courants statoriques, offrant une réponse stable aux variations. Cette technique est essentielle pour optimiser et gérer divers systèmes d'énergie renouvelable, contribuant ainsi à un réseau électrique plus stable et durable..

II.2.Configuration du système

La structure globale d'une éolienne autonome a été représentée sur la figure II.1. Un convertisseur dos-à-dos comprenant deux convertisseurs alimentés en tension avec des commutateurs IGBT a été utilisé dans cette structure, connus sous le nom de Convertisseur côté charge (CCC) et Convertisseur côté Rotor(CCR). Cette étude concerne uniquement le convertisseur côté rotor (CCR). On suppose que la tension du circuit intermédiaire de bus contenu V_{dc} est déjà fournie au système. Par conséquent, seuls les modèles GADA et CCR sont présentés dans cette section, [11].

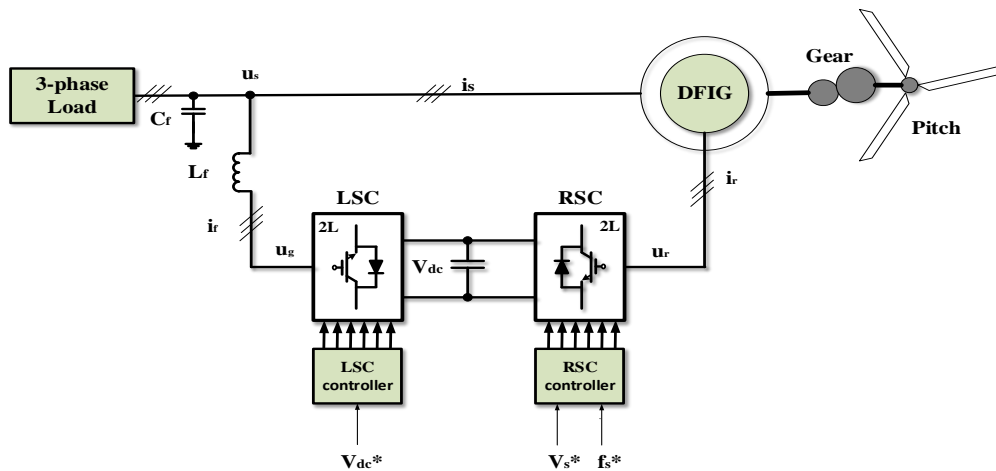


Fig.II.1.Schéma de base des GADA autonomes basés sur turbine éolienne.

II.3.Circuit équivalent GADA autonome

Le circuit équivalent dynamique GADA autonome dans le référentiel synchrone le d q est illustré à la

Fig.II.2.

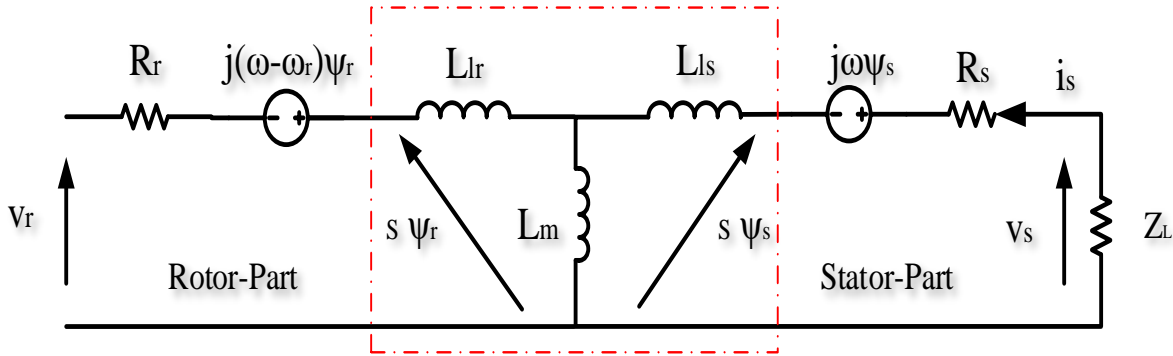


Fig. II.2. Circuit équivalent de GADA dans un référentiel arbitraire par vitesse de rotation de ω .

Où,

$$\begin{aligned} L_s &= L_{ls} + L_m \\ L_r &= L_{lr} + L_m \end{aligned}$$

L_{ls} et L_{lr} sont respectivement les inductances de fuite du stator et du rotor. ω est la vitesse du rotor électrique en rad/s. ω est la vitesse de rotation du référentiel arbitraire en rad/s. ω peut prendre une valeur arbitraire qui entraîne la conversion du référentiel: référentiel stationnaire stator ($\omega=0$), référentiel stationnaire rotor ($\omega=\omega_r$), référentiel tournant synchrone ($\omega=\omega_s$), où ω_s est la vitesse synchrone en rad/sec. Le modèle donné dans (I.17)–(I.21) : est valable pour les conditions stationnaires et transitoires.

La relation entre les flux du stator et du rotor peut être obtenue par la manipulation de (I.19)–(I.20) comme

$$\psi_s = \frac{L_s}{L_m} \cdot (\psi_r - \sigma \cdot L_r \cdot i_r) \quad (II.1)$$

$$\psi_s = \frac{L_m}{L_r} \cdot \psi_r + \sigma \cdot L_s \cdot i_r \quad (II.2)$$

II.4.Modèle mathématique de CCR

Dans ce travail, le CCR est un onduleur à deux niveaux doté de six commutateurs de puissance IGBT destinés à appliquer de la méthode de commande. La structure du CCR et de tous les vecteurs de tension du rotor sont représentés sur la figure II.4. Les séquences de commutation S peuvent être composées comme l'équation suivante :

$$S = \frac{2}{3} \cdot (S_a + a \cdot S_b + a^2 \cdot S_c) \quad (\text{II.3})$$

Où $a = e^{-j2\pi/3}$, $S_i=1$ moyens S_i on, \bar{S}_i moyens dés activé, et $i = a, b, c$. tous les vecteurs de tension du rotor v sont liés à l'état de commutation S_{par}

$$v = v_{dc} \cdot S \quad (\text{II.4})$$

Où V_{dc} est la tension d'entrée du lien CC qui alimente le RSC.

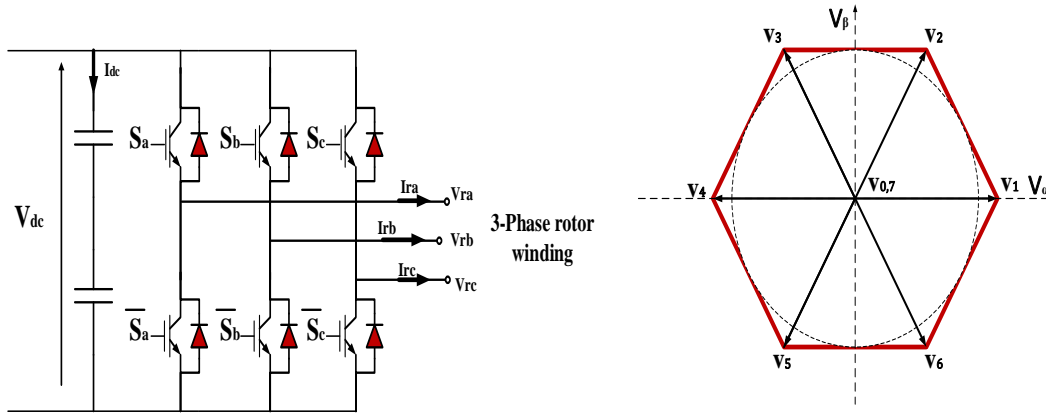


Fig.II.3.À gauche : onduleur de source de tension à deux niveaux ; à droite : vecteurs de tension.

Compte tenu des huit états de commutation S ($S_0 - S_7$) de vecteurs de tension v_i ($v_0 - v_7$) possibles, on obtient comme indiqué dans le tableau 1.

Les états de commutation du RSC sont contrôlés par les impulsions de commutation S_a, S_b, S_c comme suit :

$$S_a = \begin{cases} 1 & \text{if } S_a \text{ sur et } \bar{S}_a \text{ off} \\ 0 & \text{if } S_a \text{ éteint et } \bar{S}_a \text{ on} \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

$$S_b = \begin{cases} 1 & \text{if } S_b \text{ sur et } \bar{S}_b \text{ off} \\ 0 & \text{if } S_b \text{ éteint et } \bar{S}_b \text{ on} \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

$$S_c = \begin{cases} 1 & \text{if } S_c \text{ sur et } \bar{S}_c \text{ désactivité} \\ 0 & \text{if } S_c \text{ éteint et } \bar{S}_c \text{ sur} \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

Table II.1 : Vecteurs de tension et états de commutation avec numéro d'index.

States Switching	Vectors Voltage	Vectors
$S = [S_a S_b S_c]$	$v_i = [v_{i\alpha} v_{i\beta}]$	Number
$S_0 = [0 \ 0 \ 0]$	$v_0 = [0, 0]$	0
$S_1 = [1 \ 0 \ 0]$	$v_1 = [2V_{dc}/3, 0]$	1
$S_2 = [1 \ 1 \ 0]$	$v_2 = [V_{dc}/3, \sqrt{3}V_{dc}/3]$	2
$S_3 = [0 \ 1 \ 0]$	$v_3 = [-V_{dc}/3, \sqrt{3}V_{dc}/3]$	3
$S_4 = [0 \ 1 \ 1]$	$v_4 = [-2V_{dc}/3, 0]$	4
$S_5 = [0 \ 0 \ 1]$	$v_5 = [-V_{dc}/3, -\sqrt{3}V_{dc}/3]$	5
$S_6 = [1 \ 0 \ 1]$	$v_6 = [V_{dc}/3, -\sqrt{3}V_{dc}/3]$	6
$S_7 = [1 \ 1 \ 1]$	$v_7 = [0, 0]$	7

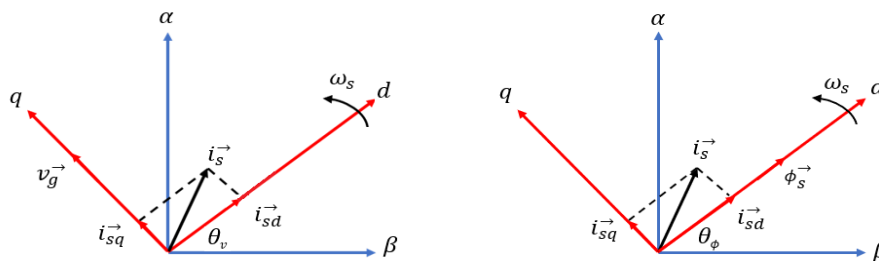
II.5.Stratégie de contrôle de base du CCR pour les systèmes GADA autonomes

Les problèmes des systèmes d'énergie éolienne basée sur un GADA autonomes concernent le maintien de l'amplitude de tension du point de couplage commun (amplitude de tension du stator) et de la fréquence constante puisque ces systèmes sont connectés directement à la charge.

De plus, la qualité de l'énergie dans le système GADA autonome constitue un problème important. Le but de la stratégie de contrôle est de maintenir l'amplitude de tension et la fréquence constantes avec une qualité de puissance élevée, quelle que soit la charge connectée au mode autonome.

Afin d'obtenir les meilleures performances du système GADA autonome, une structure en cascade ainsi que la théorie de commande vectorielle basée sur l'orientation du flux statorique sont utilisées pour l'algorithme de contrôle.

Les diagrammes vectoriels (Stator voltage oriented control SVOC) et (Stator field oriented control SFOC) sont représentés à la figure II.4. [12].



(a) Orientation de la tension statorique (b) Orientation de la flux statorique

FigII.4.diagrammevectorielle du grandeur de la GADA.

II.5.1. Orientation du flux statorique (Stator field oriented control SFOC)

Le schéma SFOC contrôle indépendamment les courants du rotor à deux axes (I_{dr}^* and I_{qr}^*) dans un cadre de référence à rotation synchrone dq aligné avec la position du vecteur de liaison de flux statorique, comme illustré dans le diagramme de phaseur de la figure II.5. Le schéma SFOC dépend de l'estimation correcte de la position du vecteur spatial de liaison de flux statorique. Une approche courante pour estimer la position de la liaison de flux consiste à négliger la chute de tension résistive du stator et à aligner ainsi le vecteur spatial de liaison de flux avec la position qui est en retard de 90° par rapport au vecteur spatial de tension du stator.

Avec l'approche SFOC, le vecteur de liaison de flux est classiquement aligné sur l'axe d du référentiel à rotation synchrone. De plus, son angle θ_s par rapport au référentiel statorique (α_s β_s) peut être simplement obtenu à partir des mesures de tension statorique triphasée. En utilisant la PLL

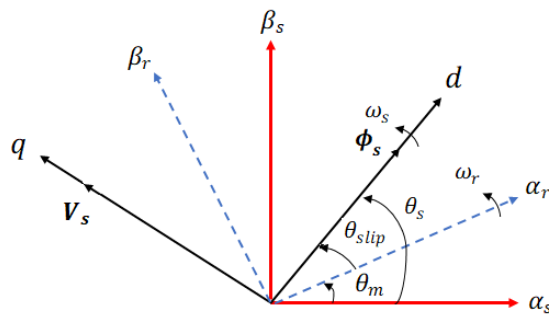


Fig.II.5.Diagramme vectorielle (Orientation du flux statorique).

Le référentiel du rotor (α_r, β_r) position with respect to the stationary reference frame is calculated from the encoder output signals. In combination with θ_s , the rotor reference frame position is used for determining the real-time value of the rotor slip angle, θ_{slip} . La valeur de l'angle de glissement en temps réel est utilisée pour la transformation de toutes les variables pertinentes du rotor vers le cadre de référence à rotation synchrone aligné sur le vecteur de liaison de flux requis pour les algorithmes SFOC en temps réel. Dans le SFOC, le flux statorique est aligné sur l'axe d et maintenu constant.

$$\begin{cases} \psi_{ds} = \psi_s \\ \psi_{qs} = 0 \end{cases} \quad (II.8)$$

Compte tenu du découplage, l'ensemble de l'équation (II.1) des tensions du stator et du rotor est simplifié comme suit :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \psi_{ds} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \psi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \psi_{dr} - \omega_r \psi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \psi_{qr} + \omega_r \psi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

En négligeant la résistance du stator et en référant le GADA au cadre de référence choisi, les équations de tension, de flux et de couple en régime permanent peuvent être simplifiées comme suit :

$$\begin{cases} v_{ds} \cong 0 \\ v_{qs} = \omega_s \psi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

Les équations reliant les courants statorique aux courants rotorique se réduisent comme suit :

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\psi_{ds}}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{L_m}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

Les équations de flux sont :

$$\begin{cases} \psi_{dr} = L_r \sigma I_{dr} + \frac{L_m}{L_s} \psi_{ds} \\ \psi_{qr} = L_r \sigma I_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

Où: $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$

Par conséquent, les équations de tension du rotor sont définies comme :

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} + L_r \sigma \frac{di_{dr}}{dt} - \omega_r L_r \sigma i_{qr} + \frac{L_m}{L_s} \frac{d\psi_{ds}}{dt} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + L_r \sigma \frac{di_{qr}}{dt} + \omega_r L_r \sigma i_{dr} + \omega_r \frac{L_m}{L_s} \psi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

Les équations reliant les courants statorique aux courants rotorique se déduisent comme suit :

$$\begin{cases} \frac{di_{dr}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_r} \left(v_{dr} - R_r i_{dr} + \omega_r L_r \sigma i_{qr} - \frac{L_m}{L_s} \frac{d\psi_{ds}}{dt} \right) \\ \frac{di_{qr}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_r} \left(v_{qr} - R_r i_{qr} - \omega_r L_r \sigma i_{dr} - \omega_r \frac{L_m}{L_s} \psi_{ds} \right) \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

L'équation du couple s'exprime comme suit :

$$T_{em} = -p \frac{L_m}{L_s} \psi_{ds} i_{qr} \quad (\text{II.16})$$

Les puissances actives et réactives côté stator du GADA sont :

$$\begin{cases} P_s = -v_{qs} \frac{L_m}{L_s} i_{qr} \\ Q_s = v_{qs} \frac{\psi_{ds}}{L_s} - v_{qs} \frac{L_m}{L_s} i_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

FigII.6. Présente l'algorithme de contrôle SFOC classique du système GADA autonome. À partir de la FigII.6, la tension et le courant triphasés du stator ainsi que le courant triphasé du rotor sont mesurés. Au lieu de cela, la fréquence angulaire synchrone de référence ω_s est définie par l'utilisateur en fonction de la fréquence de fonctionnement. Ensuite, l'angle angulaire statorique du flux θ_s est déduit de l'intégrale de la valeur de consigne de la pulsation synchrone.

De plus, un codeur est utilisé pour mesurer l'angle mécanique du rotor converti en son équivalent électrique en utilisant le nombre de paires de pôles. Les paramètres triphasés mesurés sont ensuite transformés en un référentiel dq-référence synchrone. Il convient de noter que le courant du rotor triphasé est transformé en un référentiel dq synchrone en utilisant la phase angulaire de glissement $\theta_r = \theta_s - \theta_m$.

La valeur définie de l'amplitude de la tension du stator $|V_s^*|$ est comparée à l'amplitude de tension statorique mesurée $|V_s|$ obtenu par $\sqrt{(v_{ds}^2 + v_{qs}^2)}$.

L'erreur dans l'amplitude de la tension du stator est l'entrée du contrôleur PI externe. La sortie du contrôleur PI externe est la référence de courant du rotor de l'axe D. La référence de courant du rotor sur l'axe D est ensuite comparée au courant du rotor sur l'axe D à l'aide du contrôleur PI interne. La référence de tension du rotor sur l'axe d est obtenue à partir de la soustraction de la sortie du contrôleur PI par les termes de compensation, comme le montre la figure II.6. D'autre part, la référence de courant sur l'axe q est choisie pour forcer le flux sur l'axe d. liaison pour s'aligner le long de l'axe d du cadre

de référence dq synchrone. La référence de courant du rotor de l'axe q est ensuite comparée à sa valeur mesurée pour former le signal d'erreur qui entre dans le contrôleur PI interne. La sortie du contrôleur PI est ensuite ajoutée aux conditions de compensation comme illustré dans FigII.6 pour obtenir la tension de rotor de référence sur l'axe q. Les références de tensions de rotor sur l'axe d et l'axe q sont ensuite transformées dans le cadre de référence abc/dq. Ces quantités de tension de rotor de référence sur l'axe d et l'axe q sont entrées dans la fonction PWM afin d'obtenir les signaux d'actionnement.

D'après la Fig. II.6, les termes de découplage sont utilisés dans les deux boucles de contrôle de courant afin de contrôler le i_d et i_q indépendamment. Les termes du découplage, $\omega_r L_{d'i_d}$ et $\omega_r L_{q'i_q}$, sont représentées à partir des deux équations de tension du GADA (I.10) -(I.11). Les deux équations de tension du rotor sont couplées par les termes de découplage, $\omega_r (L_m/L_s \psi_s + \sigma L_r i_{dr})$ et $\omega_r \sigma L_r i_{qr}$. En soustrayant/ajoutant ces termes dans les boucles de contrôle de courant, les deux courants i_d et i_q peuvent être contrôlés indépendamment. Cela simplifie également la fonction de transfert du GADA dans les deux boucles de contrôle de courant. Après quelques manipulations mathématiques, la fonction de transfert suivante du GADA pour les- et-les boucles de courant sont obtenues :

$$G_d(s) = \frac{1}{\delta L_r s + R_r} = \frac{1}{R_r(\tau_r s + 1)} \quad (II.18)$$

$$G_q(s) = \frac{1}{\delta L_r s + R_r} = \frac{1}{R_r(\tau_r s + 1)} \quad (II.19)$$

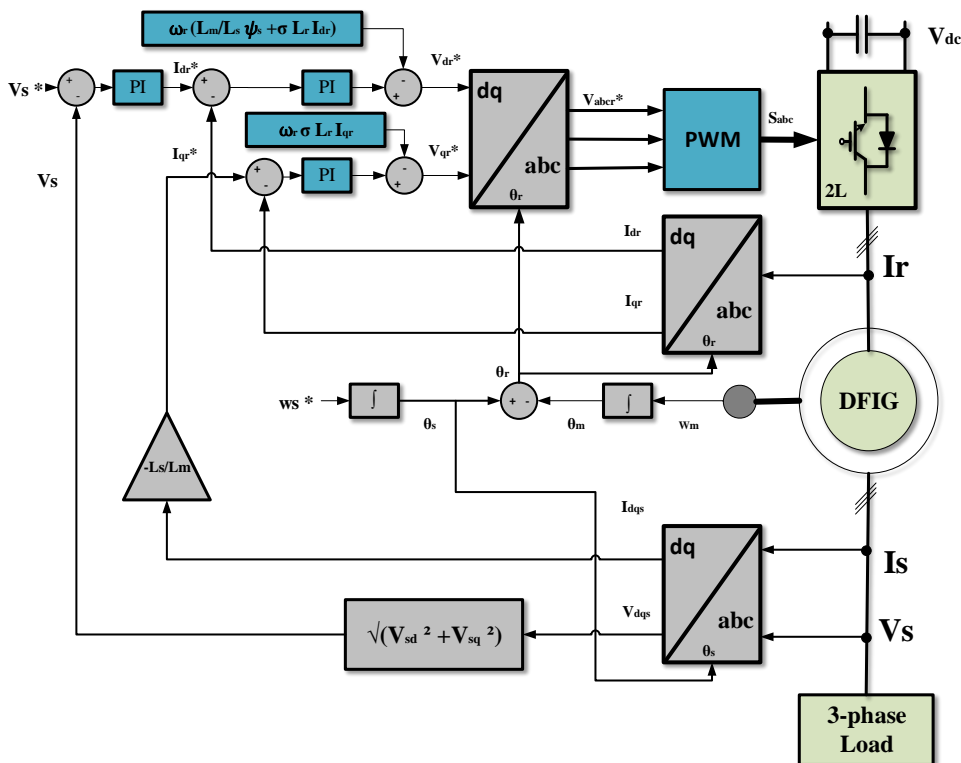


Fig.II.6.Schéma de stratégie de contrôle de base du CCR pour le système GADA autonome.

Ou $\tau_r = \frac{\delta L_r}{R_r}$ sont les constantes de temps électriques le long des axes d et q, respectivement, et s est la variable de Laplace. Les systèmes en boucle fermée du contrôle de courant le long des axes d et q

sont illustrés à la Fig.II.8. Le RSC est généralement inclus dans la procédure de conception des systèmes en boucle fermée comme un retard égal à

$$T_d = \frac{T_s}{2}$$

Où T_s est le temps d'échantillonnage.

Dans le splane, le retard introduit par le RSC peut être approximé par un système de premier ordre comme

$$v_{dq}(s) = e^{-sT_s} v_{dq}^*(s) \approx \frac{1}{(1+sT_d)} v_{dq}^*(s) \quad (II.20)$$

Également à partir de la figII.7, le FOC est appliqué au GADA autonome pour réaliser le contrôle de découplage de courant. Le vecteur de flux du stator est orienté le long de l'axe d, tandis que le vecteur de tension du stator doit s'aligner le long de l'axe q pour obtenir un contrôle de découplage de tension .

En forçant, le flux statorique ψ_{sq} et stator voltage v_{sd} pour être nul, l'orientation est atteinte.

Cela conduit à une fonction de transfert dynamique du premier ordre avec un temps de dérivée égal à τ_s comme ci-dessous :

$$\psi_{sd} = |\psi_s| = \frac{L_m}{\tau_s s + 1} \cdot i_{rd} \quad (II.20)$$

Où constante de temps du stator $\tau_s = \frac{L_s}{R_s}$, et par ensemble $v_{sq} = \omega_s \psi_{sd}$, les systèmes en boucle fermée de contrôle de tension du stator le long de l'axe d sont illustrés sur la Fig.II.8.,

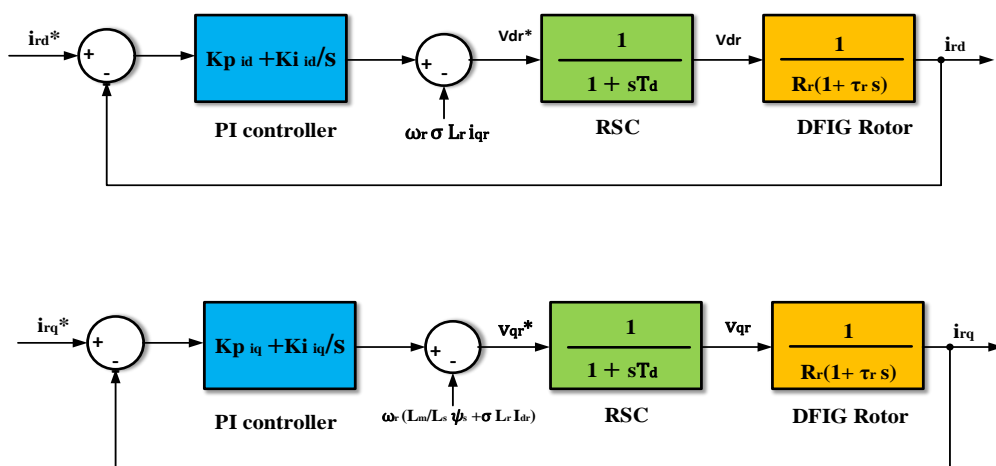


Fig.II.7.Système en boucle fermée du contrôle du courant sur l'axe dq.

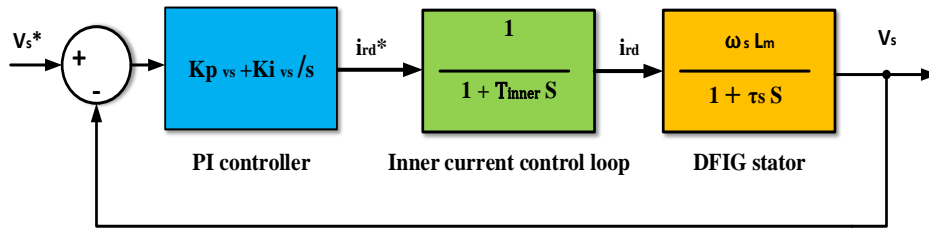


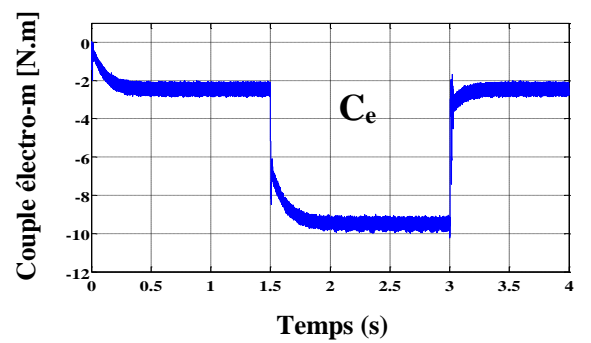
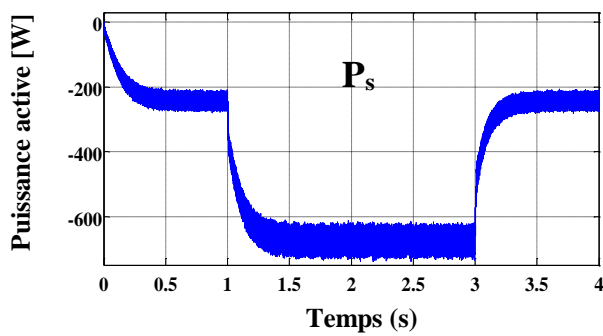
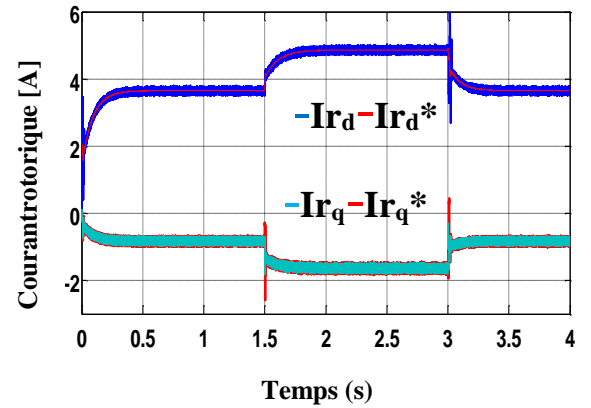
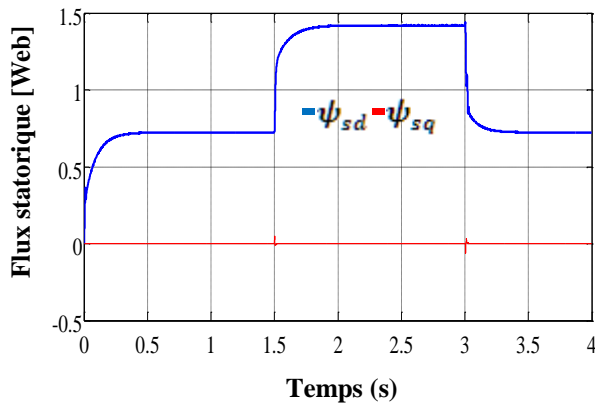
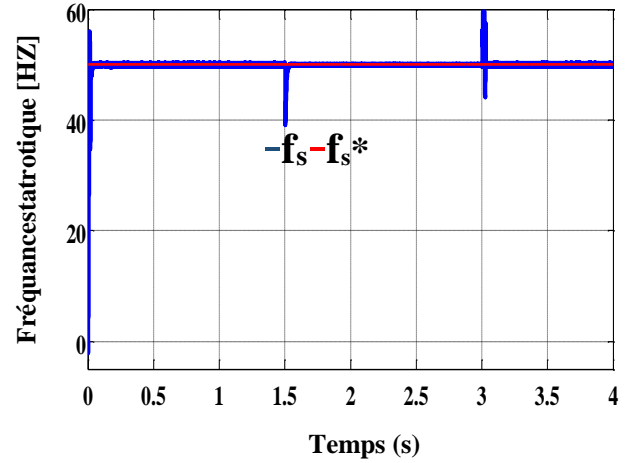
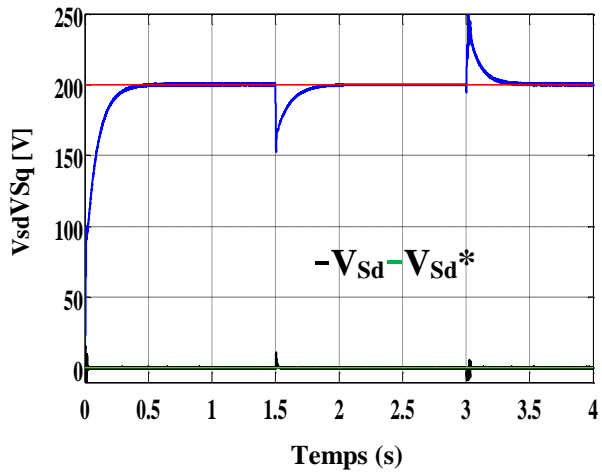
Fig.II.8. Système en boucle fermée du contrôle de l'amplitude de tension statorique V_s .

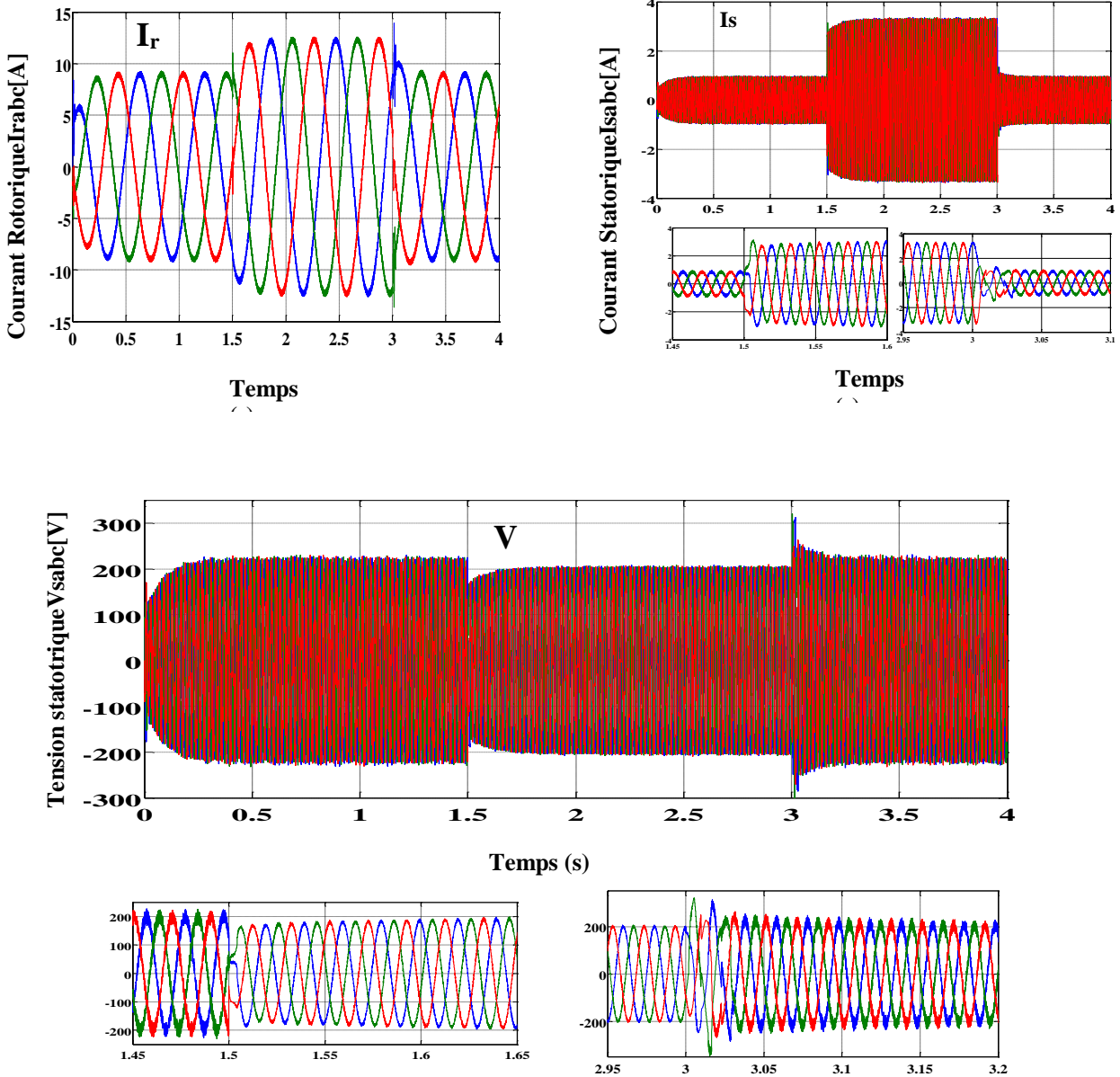
La conception des paramètres de courant et de tension statorique des contrôleurs PI peut généralement être réalisée en utilisant la méthode optimale d'amplitude ou la méthode de placement des pôles. Les stratégies de contrôle pour le générateur GADA autonome basé sur SFOC peuvent être divisées en deux catégories principales. : contrôle orienté champ direct et contrôle orienté champ indirect . Dans les chapitres suivants, ces catégories de stratégies de contrôle seront améliorées et leurs coûts réduits. [13-14].

II.6. Résultats obtenus

pour déterminer les performances des méthodes de contrôle proposées, le comportement du système contrôlé est évalué dans les conditions de fonctionnement suivantes :

II.6.1. Variation de charge



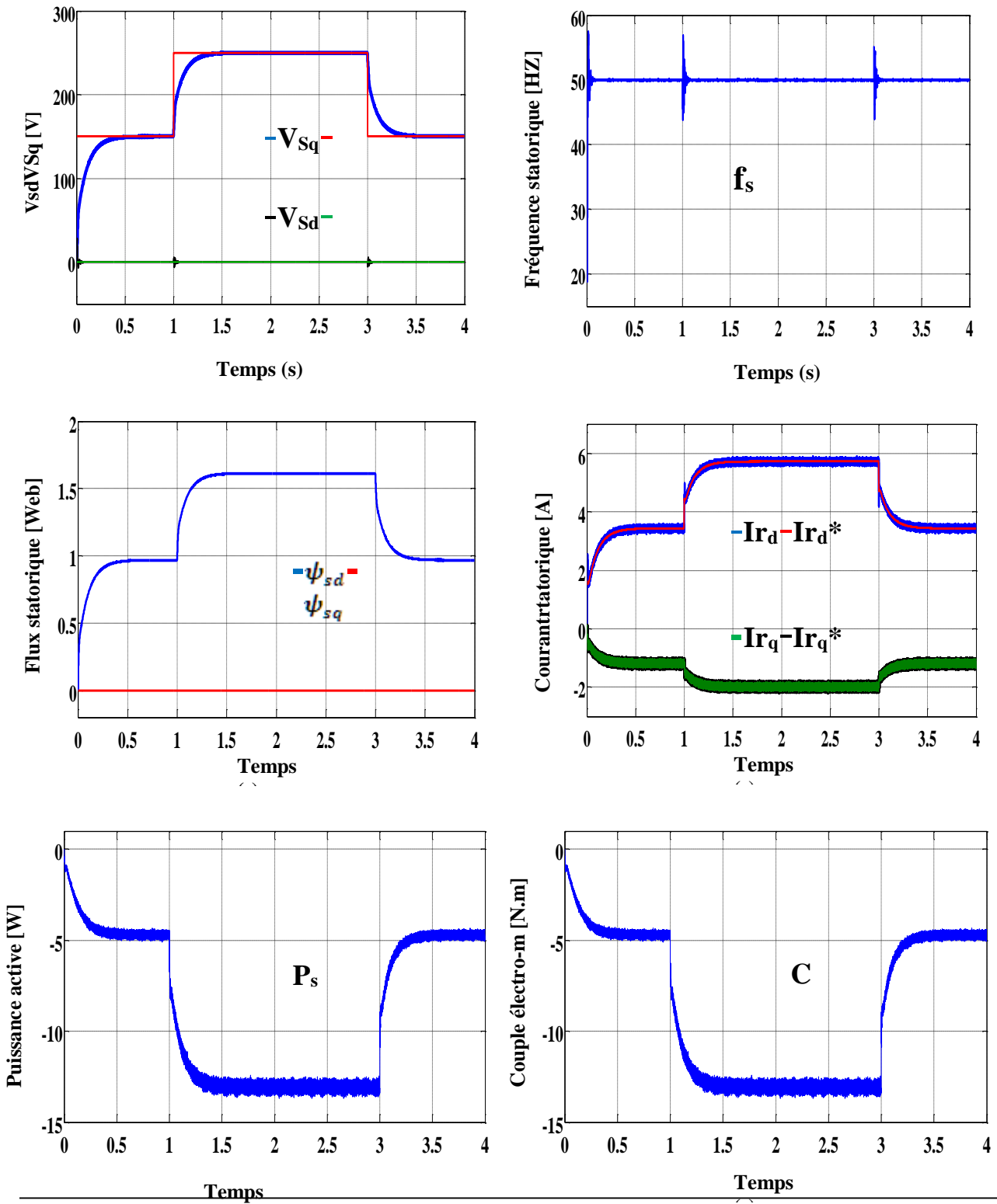


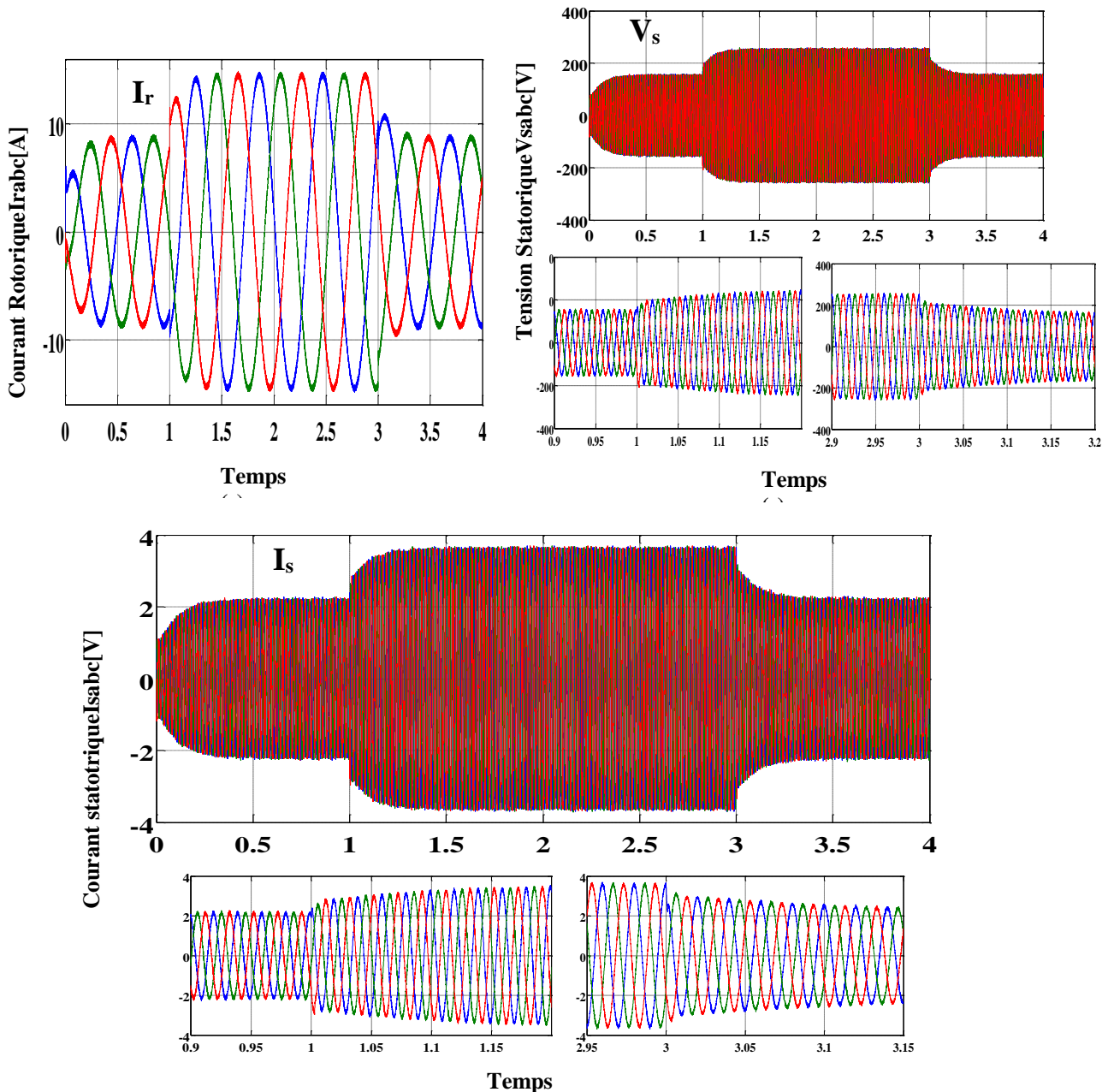
II.6.2. Interprétation du résultat de variation de charge :

Pour étudier l'impact de la variation de la charge, qui est connectée au stator du GADA, la charge est augmentée de 2 kW à 4 kW à 1,7 s et est réduite de 4 kW à 2 kW à 3,7 s lorsque le GADA fonctionne avec une vitesse de rotor constante de 1450 r/min. Les différents résultats de simulation obtenus avec la stratégie de contrôle proposée dans le cadre de la variation de la valeur de la charge sont illustrés dans les figures président illustrent l'amplitude de la tension statorique de référence et mesurée, le courant statorique et le courant rotorique. Il est évident que l'amplitude de la tension statorique a été affectée par l'application de la charge, en montrant un sous-dépassement, puis l'amplitude a été récupérée rapidement en raison de la boucle de régulation. De même, l'augmentation et la diminution du courant du stator et du rotor sont dues à l'augmentation et à la

diminution de la valeur de la charge. Les résultats présentés montrent que la tension du stator reste fixe à la valeur souhaitée de 250 V malgré les variations de la charge. Les résultats présentés montrent que la variation de la puissance active du stator et du couple du générateur électromagnétique est évidente en raison de la variation de la charge. La valeur négative indique que la quantité fournie se rapproche de la charge.

II.6.3. Changement de référence de l'amplitude de la tension statorique :





II.6.4. Interprétation du résultat de changement de référence de l'amplitude de la tension statorique :

Tout d'abord, le GADA est entraîné à une vitesse constante de 1 450 tr/min et alimente une charge résistive fixe de 2 kW. Pour montrer les performances dynamiques de la technique proposée, une variation de la référence de la tension de sortie a été appliquée. La référence de l'amplitude de la tension du stator a été modifiée de 150 V à 250 V à 1 s de 250 à 150 à 3 s. Les différents résultats de la simulation sont présentés dans les figures précédentes. Les figures précédentes illustrent l'amplitude de la tension statorique de référence et réelle, la tension de phase du stator et le courant de phase du rotor. La simulation montre que la tension du stator et le courant du rotor ont une bonne forme d'onde sinusoïdale grâce à l'application de la commande vectorielle. De même, les figures précédentes

montrent la variation de la tension statorique et du courant rotorique. En plus montrent la variation de la puissance active du stator et du couple électromagnétique du générateur avec de faibles ondulations lorsque l'amplitude de la tension statorique est modifiée en augmentant et en diminuant l'amplitude de la tension statorique.

II.7.conclusion

Dans ce chapitre, les stratégies de modélisation et de contrôle du GADA en mode autonome basées sur SFOC sont présentées. La fonction de contrôle au sein du schéma de control est généralement réalisée à l'aide de contrôleurs PI. L'un des défis consiste à régler les paramètres des boucles de contrôle PI pour fournir des performances optimales du système. De nombreuses études ont réglé/calculé les paramètres du contrôleur PI à l'aide de méthodes conventionnelles et il est difficile de trouver les paramètres optimaux du contrôleur sur la base de ces méthodes. Par conséquent, le prochain chapitre se concentrera sur les algorithmes de contrôle avancés pour obtenir le contrôleur optimal pour le CCR du GADA autonome.

Chapitre III

Commande vectorielle en courant d'une génératrice asynchrone double alimentation autonome

Chapitre III : Commande vectorielle en courant d'une génératrice asynchrone double alimentation autonome

III.1.Introduction

Le contrôle à flux orienté (SFOC) est une méthode traditionnelle pour les systèmes GADA, utilisant des contrôleurs PI et la modulation de largeur d'impulsion (PWM) pour un contrôle précis du courant. Cependant, cela augmente la complexité et le coût du système. Récemment, les contrôleurs de courant à hystérésis (HCC) ont été adoptés pour les GADA autonomes, éliminant le besoin de régulateurs PI et de PWM. Cette approche améliore le contrôle de la tension et de la fréquence du stator, même à des vitesses de vent et charges variables. Les simulations montrent que cette stratégie offre des performances excellentes en régime transitoire et permanent.

III.2.Conception proposée d'un contrôleur à hystérésis HCC pour un GADA autonome

La manière la plus efficace de générer des signaux de commande PWM pour l'onduleur est d'utiliser des contrôleurs de courant à hystérésis (HCC). Ce type de contrôle, également connu sous le nom de contrôle bang-bang, est destiné au contrôle direct des courants de phase AC, étant très simple d'un point de vue conceptuel et assez facile à mettre en œuvre. [15].

III.2.1.Contrôleurs de courant à hystérésis

La stratégie de commutation est réalisée à l'aide de trois comparateurs à hystérésis, chacun étant chargé de contrôler séparément le courant dans sa phase correspondante, comme le montre la figIII.1.[16].

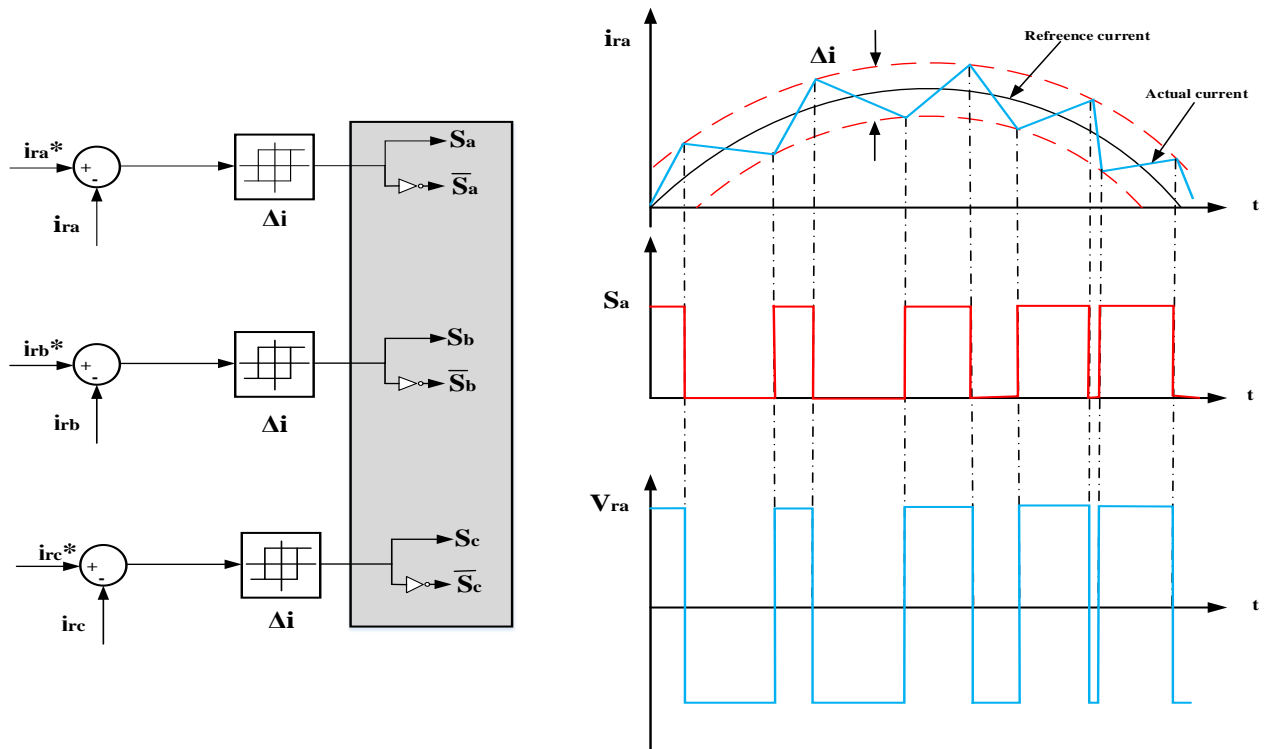


Fig. III.1.Principes de fonctionnement du contrôle du courant par hystérésis.

Chaque contrôleur détermine les états de commutation des semi-conducteurs dans chaque bras de l'onduleur de manière à ce que le courant de phase correspondant soit maintenu dans une bande d'hystérésis définie Δi . de telle sorte que le courant de phase correspondant soit maintenu dans une bande d'hystérésis définie Δi . sont soustraits à leurs signaux de référence et l'erreur qui en résulte est transmise aux comparateurs d'hystérésis.

Comparateurs d'hystérésis. Si cette erreur tend à dépasser la limite inférieure de la bande d'hystérésis, le commutateur de puissance supérieur de la phase correspondante est désactivé. de la phase correspondante est désactivé et le commutateur de puissance inférieur est activé. Au contraire, si l'erreur tend à être supérieure à la limite supérieure, l'interrupteur de puissance supérieur est activé et l'interrupteur inférieur est désactivé. De cette façon, les courants de phase du moteur seront d'autant plus sinusoïdaux que la bande d'hystérésis sera petite. la bande d'hystérésis. Cependant, cela conduit à l'augmentation de la fréquence de commutation des semi-conducteurs et par conséquent, les pertes de puissance de l'onduleur.

La performance dynamique de cette approche est considérée comme excellente puisque des valeurs de tension maximales sont appliquées pour minimiser les erreurs et qu'Ellen 'est limitée que par la vitesse de commutation et la constante de temps de la charge. Entoure, cette technique est

également très simple, présente une robustesse exceptionnelle, l'absence d'erreurs de suivi et est très indépendante des paramètres de la charge. Ses principaux inconvénients sont sa fréquence de commutation variable, le fait que sa mise en œuvre discrète ne garantit pas que l'erreur est strictement limitée dans la bande d'hystérésis, le manque d'interaction entre les trois phases qui limite la génération de vecteurs de tension nulle et les pertes de commutation accrues à des valeurs de modulation ou de vitesse de moteur plus faibles.

III.2.2. Proposition de conception d'un contrôleur HCC pour un GADA autonome

La figure III.2. Présente le schéma fonctionnel de cette stratégie de contrôle vectoriel appliquée à un GADA autonome, en utilisant des contrôleurs de courant pour générer les signaux de commande de la porte CCR. La tension de sortie au stator du GADA est régulée en contrôlant le courant du rotor de l'axe direct (i_{rd}). Le courant de référence du rotor de l'axe direct (i_{rd}^*) est obtenue traitant l'erreur de tension terminale entre la tension terminale de référence et la tension terminale estimée (v_{an}^* and v_{an}) par le biais du contrôleur PI (Proportionnel Intégral). Comme le stator du GADA est connecté en mode Y, la magnitude $|V_s|$ de la tension du stator est calculée comme suit :

$$|V_s| = \sqrt{(v_{sd}^2 + v_{sq}^2)} \quad (III.1)$$

Ici, le GADA génère autant de puissance que nécessaire à la charge. Le système ne fonctionne donc pas en condition MPPT. La vitesse est donc ajustée de manière à générer la quantité de puissance requise. La composante de puissance active du courant du rotor (i_{rq}) est calculée à partir de la composante de puissance active du courant du stator (i_{sq}) comme suit

$$i_{rq}^* = -\frac{L_s}{L_m} i_{sq}^* \quad (III.2)$$

Les composantes de référence des axes d et q du rotor (i_{rd}^* and i_{rq}^*) sont converties en courants de référence triphasés du rotor i_{rabc}^* à l'aide de la transformation inverse de Park avec l'angle de glissement (θ_r).

$$\text{Où,} \quad \theta_r = \theta_s - \theta_m \quad (III.3)$$

Où θ_s est l'angle calculé en intégrant la vitesse électrique fixe ω_e (314 rad/sec). Le θ_m est l'angle électrique du rotor calculé à partir des impulsions du codeur. Ces courants de référence du rotor (i_{ra}^* , i_{rb}^* , i_{rc}^*) sont comparés aux courants détectés du rotor (i_{ra} , i_{rb} , i_{rc}) l'erreur de courant est calculée et les impulsions sont générées vers le CCR en conséquence à l'aide d'un contrôleur de courant à hystérésis. [17-18].

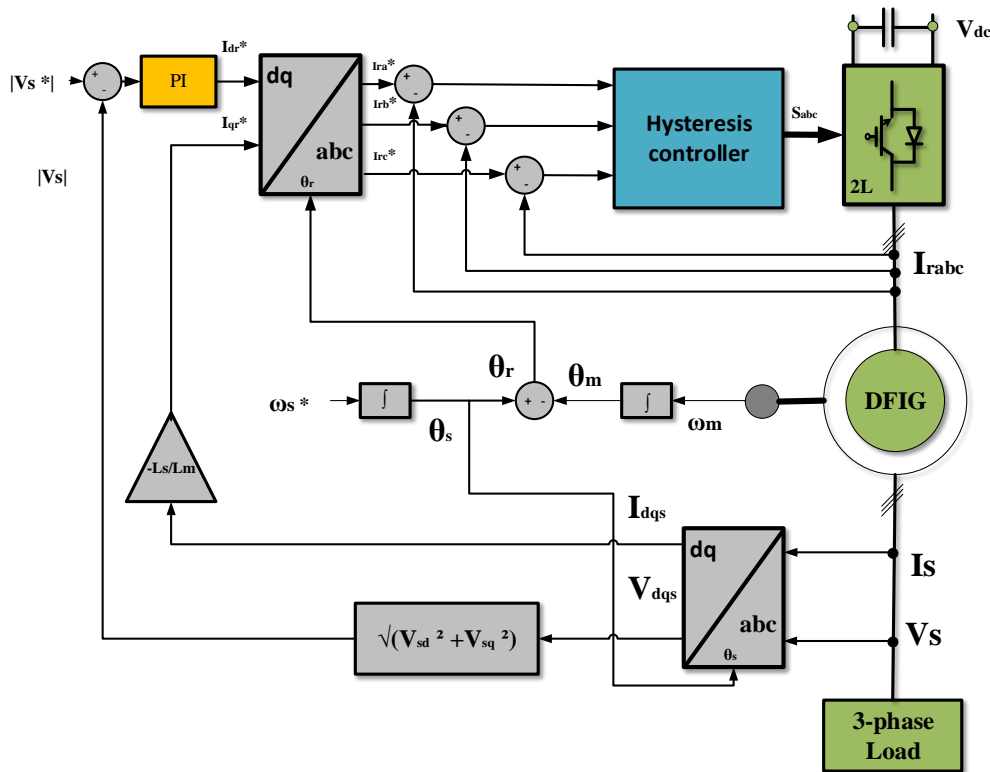


Fig. III.2..Schéma de principe du HCC pour CCR.

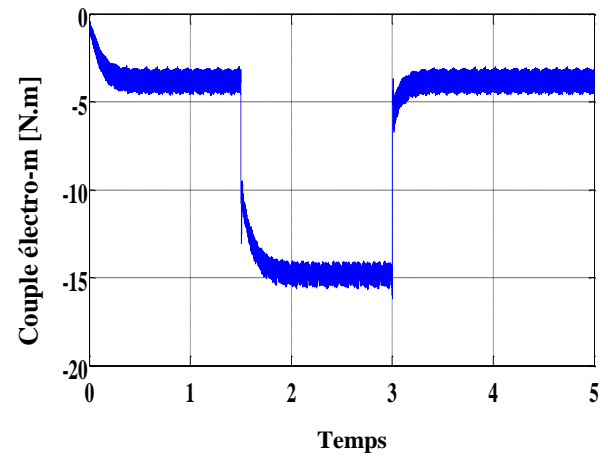
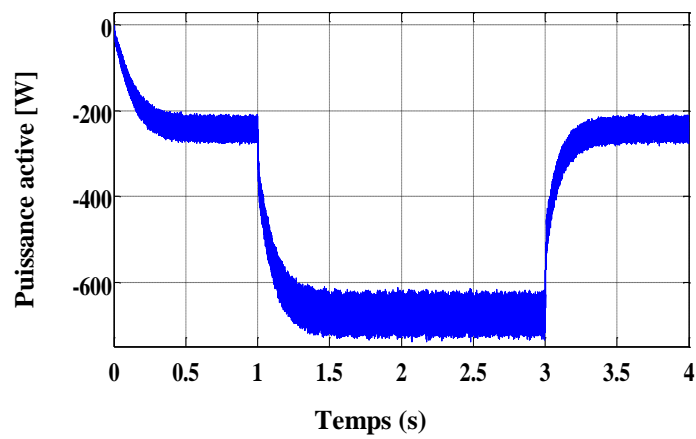
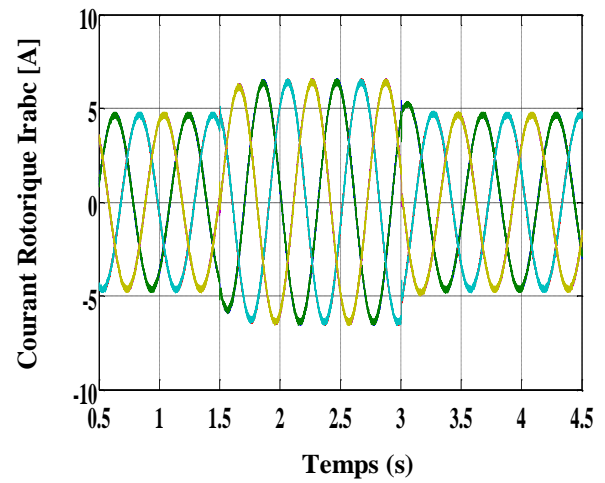
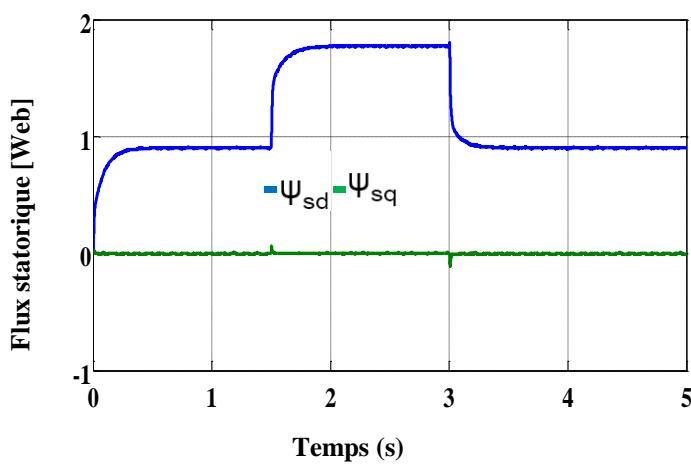
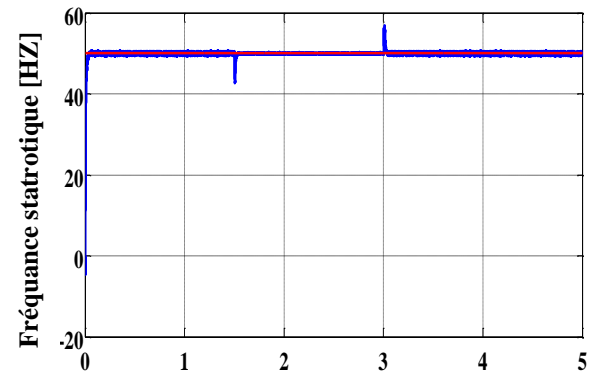
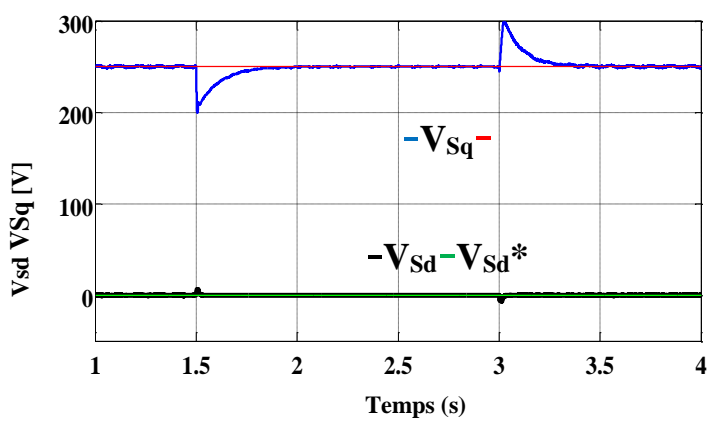
III.3.Modèle de simulation

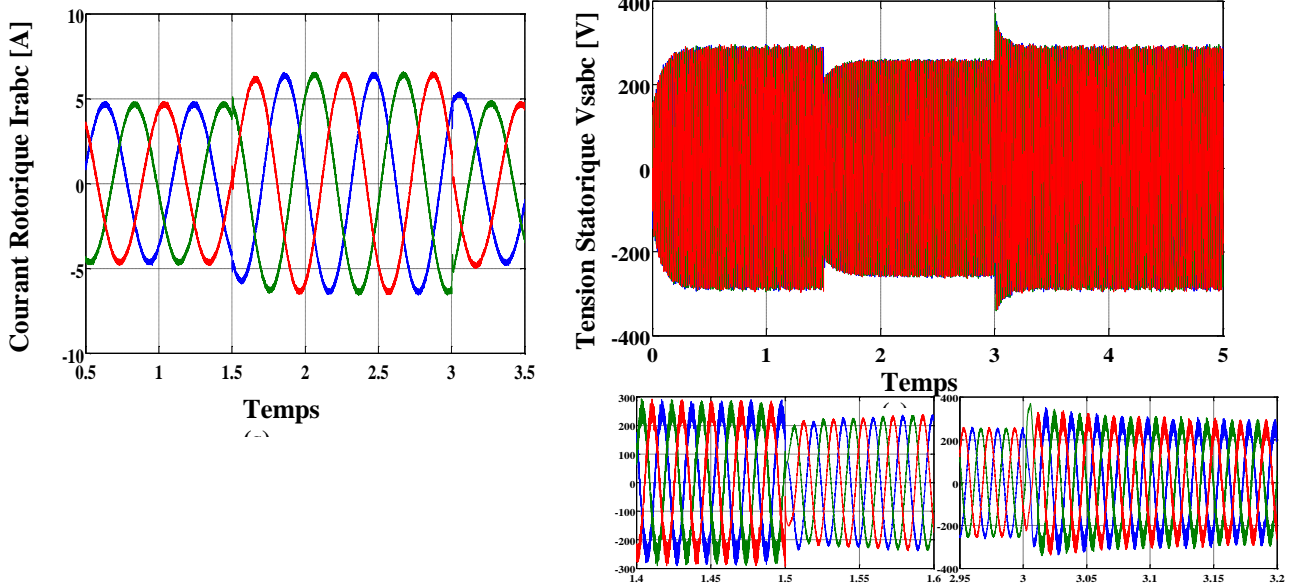
Le modèle de simulation a été construit dans Matlab/Simulink avec le logiciel Sim Power Systems. Entoure, Les caractéristiques du GADA utilisé pour la simulation ont présentées dans l'annexe (A). Avec un temps d'échantillonnage de 100 μ s. [19].

III.4.Résultats obtenus

Pour déterminer la performance des méthodes de contrôle proposées, le comportement du système contrôlé est évalué dans les conditions de fonctionnement suivantes :

III.4.1 Variation de charge

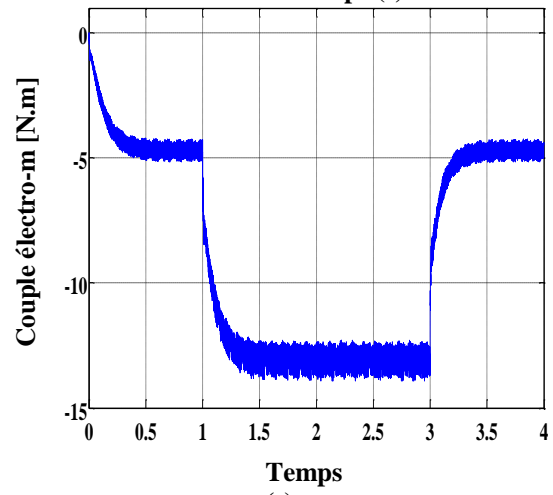
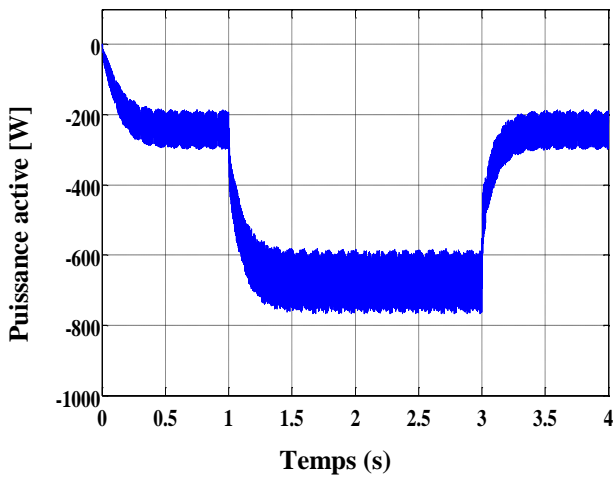
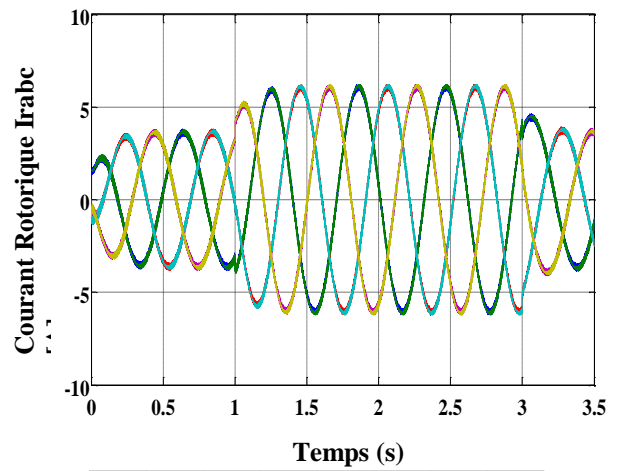
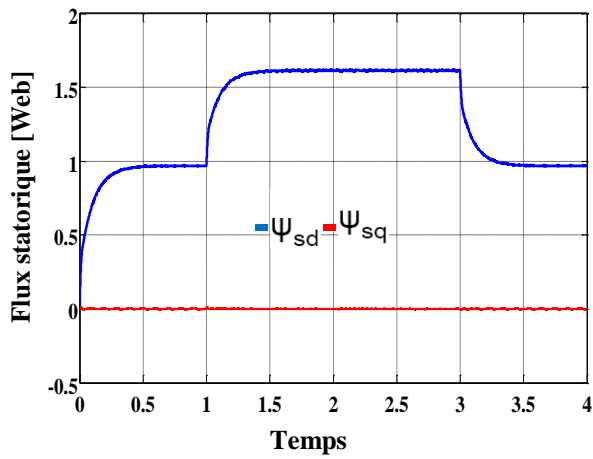
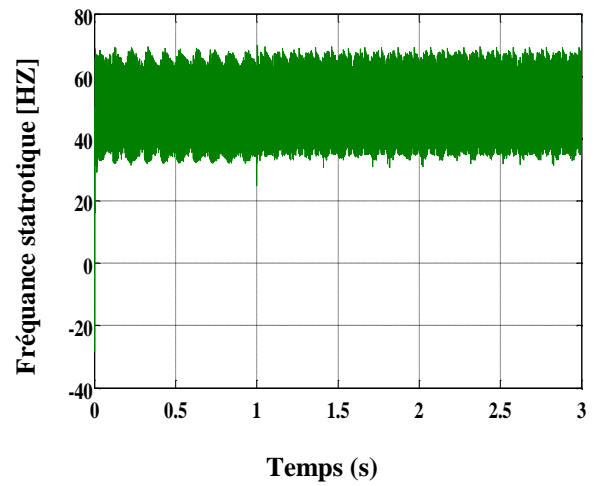
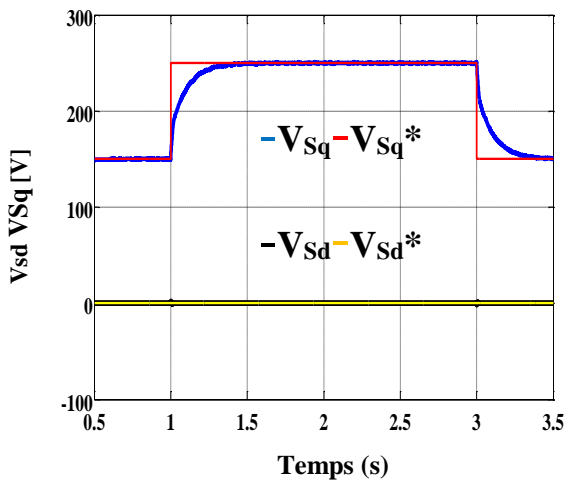


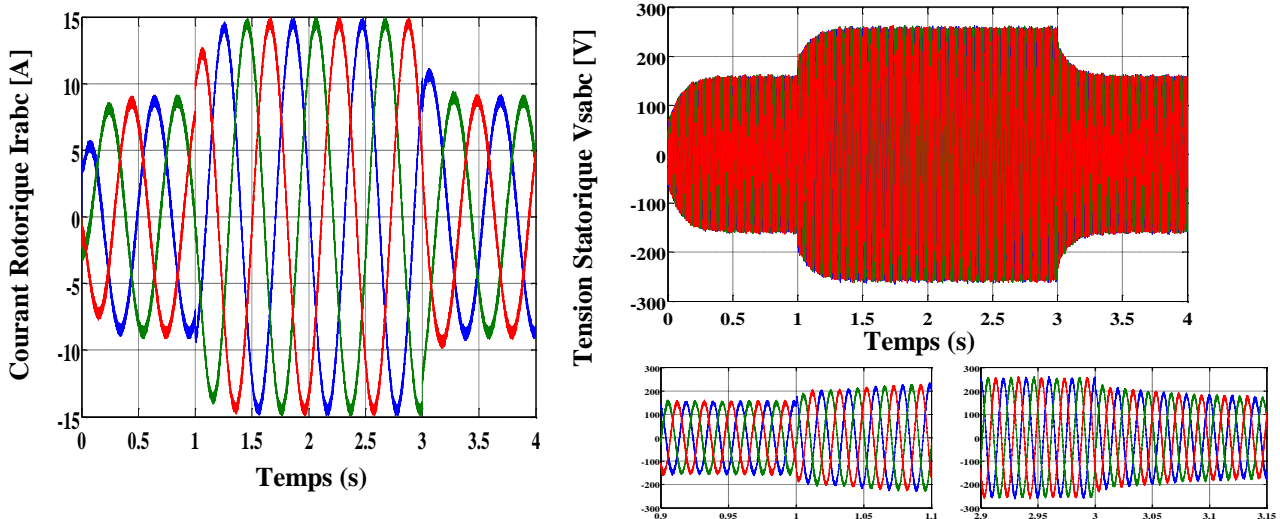


III.4.2 Interprétation du résultat de variation de charge :

Dans ce test, la capacité de la méthode de contrôle proposée à rejeter les perturbations de la charge a été étudiée à une magnitude de tension de référence de 200 V et à une vitesse de rotor de 1450 tr/min. L'effet de l'application d'une augmentation de la charge (de 20 % à 75 % de la charge résistive nominale de 4 kw), puis de la suppression du dernier ajout de charge après 1,5 seconde a été étudié. La réponse du système du HCC proposé avec le contrôleur PI est présentée à la figure précédent. On peut voir que le PI offre une réponse beaucoup plus rapide avec un dépassement et un sous-dépassement plus faibles. La réponse du PI est limitée à ± 45 V. Les systèmes de courants de rotor présentent un dépassement et des ondulations acceptables. La capacité du système HCC proposé à rejeter les perturbations de la charge est illustrée.

III.4.3 Changement de référence de l'amplitude de la tension statorique :





III.4.4 Interprétation du résultat de changement de référence de l'amplitude de la tension statorique :

Dans cet essai, la réponse du système GADA autonome à un changement progressif de la magnitude de la tension statorique de commande (à charge et vitesse fixes) est étudiée. La figure 3.4. (a), (b) présente les résultats d'une variation par paliers de l'amplitude de la tension du stator de 150 V à 250 V à 1 s, puis de 250 V à 150 à 3 s, lorsque les GADA sont entraînés à une vitesse constante de 1450 tr/min et alimentent une charge résistive fixe de 2 Kw. L'analyse de la réponse des systèmes montre que les systèmes ne dépassent pas la magnitude de la tension de commande. Cependant, par rapport au contrôleur PI classique, l'optimisation des gains PI peut garantir une réponse nettement plus rapide de la magnitude réelle de la tension du stator aux variations par paliers de la valeur de référence, en termes de temps de montée et de stabilisation. Ce test illustre la capacité de la méthode de contrôle proposée à suivre l'amplitude de la tension du stator.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, un algorithme HCC simple et efficace pour le contrôle de la tension du stator et de la fréquence pour un GADA autonome a été développé. Les contrôleurs proposés ne nécessitent pas de contrôleur PI interne ni d'étape de modulation complexe, ce qui simplifie grandement le processus de conception. Entoure, il est facile à mettre en œuvre sur le banc expérimental, ce qui permet à l'algorithme de contrôle proposé de rester simple pour la gestion des contraintes. Les résultats des tests de simulation confirment les algorithmes de contrôle proposés et montrent la faisabilité et l'efficacité du contrôleur à hystérésis proposé dans différentes conditions de fonctionnement.

Conclusion générale

Conclusion générale

La commande vectorielle des génératrices asynchrones double alimentation (GADA) s'impose comme une technologie clé pour l'exploitation efficace et durable des micro-réseaux AC isolés. En offrant un contrôle précis et flexible de la puissance active et réactive injectée sur le réseau, cette approche présente des avantages considérables pour la stabilité, la qualité de l'énergie et l'intégration des sources d'énergie renouvelable au sein de ces systèmes. Ces avantages comprennent :

- Maintenir une tension stable et régulée aux points de couplage du DGA, même en cas de variations de charge ou de perturbations du réseau, contribuant ainsi à une stabilité globale du micro-réseau.
- Répartir équitablement la charge entre les sources d'énergie connectées au micro-réseau, tout en maintenant un facteur de puissance unitaire au niveau du DGA, ce qui réduit les pertes par effet Joule et améliore l'efficacité énergétique du système.
- Réduire les distorsions harmoniques et les fluctuations de tension injectées sur le réseau, améliorant ainsi la qualité de l'énergie fournie aux charges connectées, protégeant les équipements sensibles et garantissant une alimentation électrique fiable.
- Synchroniser et contrôler plusieurs DGA connectés en parallèle sur le micro-réseau, assurant une répartition stable de la charge et une exploitation optimale des ressources énergétiques disponibles.
- Intégrer efficacement les sources d'énergie renouvelable intermittentes, telles que les éoliennes et les panneaux photovoltaïques, au micro-réseau, en permettant un contrôle précis et dynamique de leur injection d'énergie. Les avantages du contrôle vectoriel ne se limitent pas à ces points, mais s'étendent à d'autres avantages, notamment :
 - Améliorer la vitesse de réponse aux variations de charge et aux perturbations du réseau.
 - Réduire la taille et le poids de l'équipement de contrôle.
 - Améliorer la facilité d'installation, d'exploitation et de maintenance.
 - Possibilité d'extension à d'autres applications, comme le contrôle des moteurs à propulsion électrique.

Avec les progrès continus dans les domaines de l'électronique de précision et de l'intelligence artificielle, la technologie de contrôle vectoriel devrait devenir plus accessible et abordable, ouvrant la voie à une application plus large dans les micro-réseaux AC isolés.

En conclusion, la technologie de contrôle vectoriel d'un générateur asynchrone à double alimentation autonome connecté aux micro-réseaux AC isolés est une technologie prometteuse avec un fort potentiel pour contribuer à la construction d'un avenir énergétique plus durable et plus efficace

Bibliographie

Bibliographie

- [1] "Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation" de R. Pena, J.C. Clare et G.M. Asher.
- [2] "Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation and Industrial Applications" édité par Haitham Abu-Rub, Mariusz Malinowski et Kamal Al-Haddad.
- [3] "Modeling and Control of Doubly Fed Induction Generator for Wind Power"
- [4] "Machines électriques" de Hubert Razik et Jean-Claude Vannier.
- [5] "Électrotechnique : machines électriques et transformateurs" de Philippe Le Moigne et Daniel Roger.
- [6] Electric Power Systems Research.
- [7] Livre sur les moteurs à induction synchrones de W. Leon Hurd
- [8] Livre sur les systèmes d'énergie éolienne de R. K. Singh
- [9] "Micro-réseaux basés sur des générateurs asynchrones à double alimentation" par M. G. Simoes, P. C. K. Leung, B. K. Panda, et N. Martins
- [10] "Analyse des performances d'un générateur asynchrone à double alimentation dans un système d'alimentation à micro-réseau" par le China Electric Power Research Institute (CEPRI)
- [11] Sepasi, H. R. Bahrami, M. Ebrahimi, et A. Yazdani, Conférence internationale sur l'électronique de puissance et les applications (IEEE), 2010
- [12] "Analyse et commande d'un générateur asynchrone à double alimentation connecté au réseau pour les applications d'énergie éolienne" par R. Pena, J. C. Clare, J. M. Asher, G. M. Jolly, et A. M. Kernick, Conférence européenne sur l'électronique de puissance (IEEE), 2005.
- [13] Le livre « Modélisation et contrôle des machines à induction » de A. n'importe lequel. Fitzgerald et Aminon.

- [14] "Stratégies de contrôle avancées pour un générateur asynchrone à double alimentation autonome" par D. Yazici, M. Moallem, M. Kazemi, et A. Yazdani, Conférence internationale sur l'électronique de puissance et les applications (IEEE), 2009.
- [15] Le livre "Modélisation et commande des machines à induction" par A. E. Fitzgerald, C. Kingsley, et S. D. Umanski
- [16] Le livre "Full Author Search Machines" de F. Blabjerg
- [17] Le livre "Machines à induction à double alimentation" par F. Blabjerg
- [18] "Analyse et commande d'un générateur asynchrone à double alimentation connecté au réseau pour les applications d'énergie éolienne" par R. Pena
- [19] Le livre "Systèmes de commande à rétroaction" par K. Ogata