



Université Sidi Mohamed Ben Abdellah

Faculté des Sciences et Techniques Fès

Département Génie Electrique



Préparé par

EL KARKARI YASSIR

LEMHADRI RAJAE

Pour l'obtention du diplôme

Master Sciences et Techniques

Electronique, Signaux et Systèmes Automatisés

(E.S.S.A)

Intitulé

Impact des défauts réseaux transport sur les parcs
éoliens- Cas parc éolien de TAZA

Encadré par :

Pr Najiba EL AMRANI EL IDRISSE.

Mr ABOUBAKR EL MAKRINI (ONEE).

Soutenu le **13 Juin 2016**, devant le jury composé de :

Pr N.EL AMRANI EL IDRISSE..... : Encadrant

Pr H.EL MARKHI..... : Examineur

Pr N. ECHATOUI : Examineur

Dédicace

À nos parents, pour leur amour inestimable, leur confiance, leur soutien leurs sacrifices et toutes les valeurs qu'ils ont su nous apprendre. Que ce modeste travail soit témoignage de notre reconnaissance et de notre amour sincère et fidèle.

À M^r Hassane El MARKHI, Cette humble dédicace ne saurait exprimer notre grand respect et notre profonde gratitude, que dieu vous procure bonne santé et long vie.

À M^{me} NAJIBA EL AMRANI EL IDRISSE, pour son aide, et ses conseils. Veuillez trouver ici l'expression et le témoignage de notre gratitude ressentie.

À M^r Hassan EL MOUSSAOUI, Qui n'a pas cessé de nous encourager et nous conseiller. Cette humble dédicace ne saurait exprimer notre grand respect et notre profonde estime.

À M^r Younes BOUKHRISSE, En témoignage de nos sincères remerciements, et profonde reconnaissance pour votre aide.

À nos aimables familles, à nos amis, on leur souhaite une vie pleine de succès et de bonheur.

À tous les enseignants qui ont contribué à notre formation, nous vous serons éternellement reconnaissants.

Remerciements

Nous adressons nos sincères remerciements dans un premier temps à **M^r H. EL MARKHI**, pour son encadrement, ses conseils pertinents, sa disponibilité permanente, et ses remarques toujours constructives.

Nous remercions profondément **M^r H. EL MOUSSAOUI**, pour son savoir, sa gentillesse et sa grande disponibilité. Nos discussions ont toujours été très enrichissantes.

Nous présentons nos vifs remerciements à **M^r Y. BOUKHRIS**, pour son savoir sa disponibilité. Il nous a guidés dans notre travail et nous a aidés à trouver des solutions pour avancer.

Merci à **M^r A. EL MAKRINI**, Ingénieur d'État et Chef de la Division de l'Office National d'Électricité, pour son accueil dans sa division.

Nous remercions notre professeur **M^{me} N. EL AMRANI EL IDRISI** de la Faculté des Sciences et Techniques, qui a bien voulu assurer l'encadrement de ce projet.

Merci à **M^r N. ECHATOU** et **M^r H. EL MARKHI** d'avoir accepté de juger notre travail.

Nous présentons enfin nos remerciements à tout le corps professoral du département Génie Electrique de la Faculté des Sciences et Techniques de Fès.



Résumé

Dans le domaine éolien, la machine asynchrone à double alimentation (MADA) présente bien des avantages. Ceux-ci sont possibles grâce à sa capacité à fournir de la puissance à tension et à fréquence constantes tandis que la vitesse du rotor varie. Ce qui permet une meilleure capture du vent, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe. La sensibilité élevée de la MADA vis-à-vis des défauts électriques fait apparaître de nombreuses difficultés en termes de respect des spécifications imposées par les opérateurs des réseaux électriques. En effet en cas d'un défaut dans le réseau, les stations d'énergie éolienne sont débranchées automatiquement pour éviter tous avaries au niveau des éoliennes. Mais actuellement les exigences de connexion au réseau imposent une réglementation plus stricte sur les parcs éoliens en particulier en termes de Tenue Aux Creux de Tension (TACT), et des capacités de soutien du réseau.

Afin de garantir le respect de ces exigences, il est crucial pour les éoliennes de reconcevoir un contrôle avancé, où les éoliennes doivent lors de la détection d'une tension anormale, rester connectées pour fournir une puissance réactive garantissant un fonctionnement sûr et fiable du réseau pendant et après le défaut.

L'objectif de ce travail est de proposer des solutions, qui permettent aux génératrices éoliennes de rester connectées, après un creux de tension aussi sévère soit-il.

Nous avons réussi à apporter une amélioration du contrôle classique, dont l'efficacité a été vérifiée pour les faibles creux de tension. Pour les importants creux de tension, nous avons proposé des circuits de protection (SDBR, DC CHOPPER). Pour terminer, nous avons développé une stratégie qui consiste à combiner les solutions proposées, et en fonction de la profondeur du creux, le choix de la solution optimale est effectué.

Mots clés : MADA, TACT, contrôle modifié, SDBR, DC CHOPPER, méthode combinée...

Abstract

In the wind power area, Doubly Fed Induction Generator (DFIG) has many advantages, This is possible because of its ability to provide power to voltage and constant frequency while the rotor speed varies, which allows better wind capture, compared to fixed-speed turbines. The high sensitivity of the DFIG towards electrical faults brings up many challenges in terms of compliance with requirements imposed by the operators of electrical networks. Indeed in case of a fault in the network, wind power stations are switched off automatically to avoid damage in wind turbines. But now the network connection requirements impose stricter regulations on wind farms in particular in terms of Low Voltage Ride Through (LVRT), and network support capabilities.

To ensure compliance with these codes, it is crucial for wind turbines to redesign advanced control, for which wind turbines must, when detecting an abnormal voltage, stay connected to provide reactive power ensuring a safe and reliable operation of the network during and after the fault.

The objective of this work is to offer solutions that enable wind turbines remain connected generators, after such a severe voltage dips may be.

We managed to make an improvement of classical control, whose effectiveness has been verified for low voltage dips. For voltage dips, we proposed protection circuits (SDBR, DC CHOPPER). Finally, we developed a strategy of combining the solutions, and depending on the depth of the sag, the choice of the optimal solution is performed.

Index terms: DFIG, LVRT, improved control, SDBR, DC CHOPPER, combined strategy...

Table des matières

Table des matières	5
<i>Introduction Générale</i>	12
Chapitre 1 :	14
Présentation de l'Office National de l'Electricité	14
1- PRESENTATION DE L'ONE :	15
2- FICHE TECHNIQUE :	15
3- MISSIONS :	15
4- ACTIVITES :	15
Chapitre 2 :	17
Etat de l'art sur la conversion éolienne	17
1- INTRODUCTION :	18
2- CONSTITUTION D'UNE EOLIENNE :	18
3- CLASSIFICATION D'EOLIENNES:	19
3-1 Eoliennes à axe vertical :	19
3-2 Eoliennes à axe horizontal :	19
4- EOLIENNES A VITESSE FIXE ET VARIABLE :	19
4-1 Eoliennes à vitesse fixe :	19
4-2 Eoliennes à vitesse variable :	20
4-2-1 Eoliennes à vitesse variable équipées de génératrices synchrones, pilotées par le stator : 20	
4-2-2 Eolienne à vitesse variable basée sur une génératrice asynchrone à double alimentation commandée par le rotor :	21
Chapitre 3 :	23
Modélisation et dispositif de commande d'un système éolien à base de la MADA	23
1- DESCRIPTION :	24
2- MODELE DE LA TURBINE EOLIENNE :	25
2-1 Modèle aérodynamique	25
2-2 Stratégie de commande de la turbine éolienne :	26
▪ Maximisation de puissance MPPT :	27
▪ Limitation de puissance:	29
3- LA MODELISATION DE LA MADA :	29
3-1 Structure de la MADA :	29
3-2 Modes de fonctionnement de LA MADA	30

3-3	Modèle mathématique de la MADA :	31
3-4	Modèle diphasé de la MADA.....	32
4-	COMMANDE VECTORIELLE DE LA MADA :	34
4-1	PRINCIPE DE LA COMMANDE VECTORIELLE :	34
4-2	Application de la commande vectorielle à tension statorique orientée :	34
5-	CONTROLE DE LA MADA :	36
5-1	Contrôle de convertisseur côté MADA :	37
5-2	Contrôle de convertisseur côté réseau :	39
Chapitre 4:		42
Influence d'un réseau sur l'éolienne		42
1-	GENERALITE SUR LES RESEAUX ELECTRIQUES :	43
1-1	Insertion de l'éolien dans le réseau électrique :	43
1-2	Les défauts dans les réseaux:	45
1-2-1	Type des défauts :	45
1-2-2	Caractéristiques des défauts:	46
2-	COMPORTEMENT DE L'EOLIENNE A BASE DE LA MADA FACE A UN CREUX DE SA TENSION D'ALIMENTATION : .	46
2-1	Caractérisation des creux de tension :	46
2-1	Impact des creux de tension sur les grandeurs de la MADA:.....	47
2-2-1	Simulation :	47
2-2-2	Conclusions :	50
Chapitre 5 : Stratégies de contrôle de la MADA en cas de creux de tension		51
1-	ANALYSE DYNAMIQUE DE LA MADA LORS D'UN CREUX DE TENSION :	52
2-	STRATEGIES DE CONTROLE :	55
2-1	Méthode active : Stratégie de contrôle modifiée.....	55
2-1-1	Théorie :	55
2-1-2	Simulation :	59
2-1-3	Faisabilité de la stratégie de contrôle modifiée :	61
2-2	Méthodes passives:	65
2-2-1	Résistance dynamique SDBR en série avec le stator :	65
2-2-2	DC Chopper :	70
2-2-3	Combinaison des méthodes :	72
<i>Conclusion générale</i>		78
<i>Annexe A : Les paramètres du système simulé</i>		81
<i>Annexe B : Schéma Simulink</i>		82

Table de figures

Figure 1: Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique	18
Figure 2: Aérogénérateur à vitesse fixe [2]	19
Figure 3 : Aérogénérateur à machine synchrone [2].....	20
Figure 4: Système éolien à vitesse variable basé sur une MADA.....	21
Figure 5: Système éolien à vitesse variable basé sur une MADA.....	24
Figure 6: Schéma bloc de la turbine éolienne	26
Figure 7: La caractéristique puissance en fonction de la vitesse de vent [3].....	27
Figure 8: Caractéristique puissance mécanique en fonction de la vitesse de rotation	28
Figure 9: Schéma bloc du contrôle MPPT.....	28
Figure 10: Schéma représentatif de la MADA.	29
Figure 11: Modes de fonctionnement de la MADA.....	30
Figure 12: Modèle de Park de la MADA.	32
Figure 13: Etablissement des angles de transformation de Park à l'aide d'une PLL.....	33
Figure 14: Orientation du repère de Park. Conséquence sur la tension Vs-dq.....	35
Figure 15: Schéma bloc de la MADA.	36
Figure 16: Schéma de la MADA.	37
Figure 17: Vue d'ensemble du contrôle CCM.....	37
Figure 18: Schéma bloc de commande de CCM.....	38
Figure 19: Vue d'ensemble du contrôle CCR.....	39
Figure 20: Schéma bloc du contrôle du CCR	41
Figure 21: Gabarits de creux de tension dans différents pays.....	44
Figure 22: Les différents types de défauts	45
Figure 23: Tension réseau durant un défaut.....	47
Figure 24: Représentation du courant rotorique pour des creux de tension allant de 0% à 100%.....	48
Figure 25: Représentation de la puissance réactive pour des creux de tension allant de 0% à 100%.....	48
Figure 26: Représentation de la puissance active pour des creux de tension allant de 0% à 100%.....	49
Figure 27: Représentation du couple électromagnétique pour des creux de tension allant de 0% à 100%.....	49
Figure 28: Différence entre flux rotorique et flux statorique sans contrôle, durant le creux de tension	56
Figure 29: Organigramme de commande de la stratégie de contrôle modifiée.....	59
Figure 30: Schéma bloc de la stratégie de contrôle modifiée.....	59
Figure 31: Différence entre flux rotorique et flux statorique avec la stratégie de contrôle modifiée, durant le creux de tension	60
Figure 32: Comparaison du comportement de la MADA durant une chute de tension de 30 % pendant 0.2s, avec (a) et sans (b) la stratégie proposée.	61
Figure 33: la puissance réactive pour creux de 30% et de durée 0.3s et 0.4s respectivement	63
Figure 34: la puissance réactive pour un creux de 25% et de durée de 1s.	64
Figure 35: la puissance réactive pour un creux de 23% et de durée de 1.5s	64
Figure 36: Code Grid.....	64

Figure 37: Schéma bloc de résistance dynamique en série avec le stator	65
Figure 38: Représentation de Fresnel de la tension statorique, durant le défaut, avec SDBR	65
Figure 39: Organigramme de commande de SDBR	68
Figure 40: Comparaison du comportement de la MADA durant une chute de tension de 100 % pendant 150ms, (a) avec et (b) sans la SDBR.	69
Figure 41: MADA avec DC Chopper et SDBR	70
Figure 42: Organigramme de contrôle de DC CHOPPER	71
Figure 43: Comparaison de l'évolution de la tension du bus continu durant une chute de tension de 100 %, (a) SDBR et (b) SDBR+DC CHOPPER	71
Figure 44: Organigramme de contrôle de la méthode combinée.....	72
Figure 45 : schéma de la commande combinée des deux méthodes	73
Figure 46: Profil du 1er creux de tension	74
Figure 47: Simulation du comportement de la MADA, durant le 1er profil du creux de tension, (a) avec et (b) sans la stratégie	75
Figure 48: Profil du 2ème creux de tension	75
Figure 49: Simulation du comportement de la MADA, durant le 2ème profils de creux de tension, (a) avec et (b) sans la stratégie	76

Liste des symboles

- F_S : Fréquence électrique du réseau ou du stator (Hz).
- L_f : Inductance de fuite (H).
- L_m : Inductance magnétisante(H).
- L_R : Inductance cyclique rotor MADA(H).
- L_S : Inductance cyclique stator MADA(H).
- T_{em} : Couple électromagnétique de la MADA (N.m ou pu).
- β : Angle de calage des pales de la turbine éolienne (rad).
- λ_t : Ratio de vitesse.
- θ : Angle mécanique (rad).
- ω : Pulsation électrique (rad).
- C_p : Coefficient de puissance de la turbine éolienne.
- g : Glissement.
- Ω_m : Vitesse de rotation mécanique du rotor de la MADA (rad/s).
- Ω_t : Vitesse de rotation de la turbine éolienne (rad/s).
- ω_r : Pulsation rotorique (rad/s).
- ω_s : Pulsation statorique (rad/s).
- θ : Angle électrique entre les bobinages rotorique et statorique de la MADA (rad).
- θ_r : Angle de Park des grandeurs rotoriques de la MADA (rad).
- θ_s : Angle de Park des grandeurs statoriques de la MADA (rad).
- P_m : Puissance captée par la turbine (W).
- ρ : La masse volumique de l'air (1.225 kg/m à la pression atmosphérique).
- v : Vitesse du vent (m/ s).
- R : Rayon de la turbine en (m).
- C_{ar} : Couple aérodynamique (N.m).
- G : Gain du multiplicateur.
- C_{mec} : Couple mécanique sur l'axe du générateur en (N. m).
- Ω_{mec} : La vitesse de rotation de la génératrice en (tr/mn).
- J_T : Inertie totale (kg.m²).
- f_v : Coefficient de frottements visqueux total.
- I_{sa}, I_{sb}, I_{sc} : Courants dans les phases statoriques (A).
- I_{ra}, I_{rb}, I_{rc} : Courants dans les phases rotoriques (A).
- I_{sd} : Courant statorique sur l'axe d (pu).
- I_{sq} : Courant statorique sur l'axe q (pu).
- I_{rd} : Courant rotorique sur l'axe d (pu).
- I_{rq} : Courant rotorique sur l'axe q (pu).
- I_{gd} : Composante directe du courant dans le filtre (A).

I_{gd} : Composante en quadrature du courant dans le filtre (A).

I_c : Courant traversant le condensateur (A).

V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} : Tension des phases statoriques (V).

V_{ra}, V_{rb}, V_{rc} : Tension des phases rotoriques (V).

V_{rd} : Tension rotorique sur l'axe d (pu).

V_{rq} : Tension rotorique sur l'axe q (pu).

V_{sd} : Tension statorique sur l'axe d (pu).

V_{sq} : Tension statorique sur l'axe q (pu).

V_{SDBR} : Tension aux bornes des résistances SDBR (pu).

V_{DC} : Tension bus continu (V).

$\phi_{sa}, \phi_{sb}, \phi_{sc}$: Flux statorique (Wb).

$\phi_{ra}, \phi_{rb}, \phi_{rc}$: Flux rotorique (Wb).

ϕ_{sd} : Flux statorique sur l'axe d (Wb).

ϕ_{sq} : Flux statorique sur l'axe q (Wb).

ϕ_{rd} : Flux rotorique sur l'axe d (Wb).

ϕ_{rq} : Flux rotorique sur l'axe q (Wb).

R_f : Résistance du filtre LF (Ω).

L_f : Inductance du filtre LF (H).

R_s : Résistance d'une phase statorique (Ω).

R_r : Résistance d'une rotorique (Ω).

R_{SDBR} : Résistance SDBR (Ω).

M_s, M_r Inductances mutuelles cycliques entre une phase statorique et une phase rotorique, vue du stator et vue du rotor (H).

L_s Inductance propre d'une phase statorique (H).

L_r Inductance propre d'une phase rotorique (H).

P_s : Puissance active au stator (pu).

Q_s : Puissance réactive au stator (pu).

Liste des acronymes

BT : Basse Tension.

CCM : Convertisseur du côté de la MADA.

CCR : Convertisseur du côté du réseau.

HTA : Haute Tension A.

HTB : Haute Tension B.

IGBT : Insulated gate bipolar transistor (transistor bipolaire à grille isolée).

LVRT : Low Voltage Ride Through.

MADA : Machine asynchrone à double alimentation.

MAS : Machine Asynchrone.

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion.

MPPT : Maximum Power Point Tracking.

MS : Machine synchrone.

MT : Moyenne Tension.

PI : Proportionnel Intégrateur.

PLL : Boucle à verrouillage de phase.

SDBR : Series Dynamic Braking Resitances.

Introduction Générale

L'augmentation importante de la consommation d'électricité produite à partir des énergies fossiles ou nucléaires et également la conscience écologique naissante ont fortement augmenté l'intérêt pour les énergies renouvelables. L'énergie éolienne est l'une des plus importantes et les plus prometteuses des sources d'énergie renouvelable à travers le monde en termes de développement. Notamment car elle est non polluante et économiquement fiable.

Actuellement le système éolien à vitesse variable basé sur la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) est le plus utilisé, surtout dans les unités de production éoliennes supérieures à 1 MW. La MADA est une machine asynchrone à rotor bobiné dont les enroulements du stator sont directement reliés au réseau électrique, alors que les enroulements du rotor sont reliés au réseau électrique par l'intermédiaire de deux convertisseurs statiques de fréquence réversibles en puissance (onduleur/redresseur). Avec un système de commande du convertisseur, l'éolienne est contrôlée de manière à maximiser en permanence la puissance produite en recherchant à chaque fois le point de fonctionnement à maximum de puissance.

Cependant, la MADA est très sensible aux perturbations du réseau à cause de sa connexion directe avec le réseau, et son électronique de puissance et plus particulièrement durant des chutes de tensions du réseau. Les chutes brutales de la tension du réseau causent des pointes de courant dans le circuit électrique du rotor de la machine et une surtension dans le bus continu. Sans protections, cela entraîne la détérioration des convertisseurs de puissance et leurs possibles destructions. De plus, elles s'accompagnent d'une survitesse de la turbine menant à une détérioration de son fonctionnement normal, il en résulte la déconnexion de l'éolienne du réseau.

Une nouvelle stratégie est introduite « LVRT » (Low Voltage Ride Through) de la MADA durant les chutes de tension du réseau. Cette stratégie « LVRT » a pour objectif de maintenir l'éolienne connectée au réseau, d'assurer la sûreté de fonctionnement du système éolien et la bonne qualité de l'énergie fournie au réseau, durant les chutes de tension. Cette

stratégie est divisée en deux classes : méthodes actives par l'amélioration de la stratégie de commande, et passives par l'ajout de protections matérielles.

Le premier chapitre porte sur la société d'accueil, l'ONEE-Fès, qui nous a acceptés comme stagiaires dans le cadre de notre projet de fin d'études.

Le deuxième chapitre est consacré aux notions générales sur l'énergie éolienne. Nous avons présentés brièvement les différents composants constituant l'aérogénérateur ainsi que les technologies d'éoliennes. Ensuite, nous avons étudié les différentes machines électriques utilisées pour la conversion éolienne, afin de montrer les avantages de la machine asynchrone à double alimentation MADA.

Dans le troisième chapitre, nous avons modélisé la turbine éolienne, et nous avons détaillé deux méthodes de son contrôle, la première qui consiste à maximiser la puissance captée du vent pour des fonctionnements à vent faible appelée MPPT (M.P.P.T: Maximum Power Point Tracking), et une deuxième qui est utilisée pour des vents forts appelée calage variable des pales (PITCH-STALL). Ensuite nous avons présenté le fonctionnement de la MADA, sa modélisation dans un repère diphasé lié au champ statorique. Par la suite, nous avons détaillé les différentes lois de commande permettant le fonctionnement optimal de l'éolienne et le contrôle indépendant des puissances active et réactive.

Le chapitre 4, expose une présentation du réseau électrique, les contraintes de raccordement de l'éolien au réseau électrique, et les différents types de défaut survenant sur le réseau électrique. Nous nous sommes intéressés aux creux de tension, qui sont les perturbations les plus importantes et les plus fréquentes. Afin d'étudier l'influence des creux de tension sur le fonctionnement normal, nous avons appliqué un creux de tension à la MADA, les résultats obtenus par simulation sous Matlab ont été interprétés.

Dans le chapitre 5, nous avons fait une étude du fonctionnement de la MADA pendant les défauts. Ensuite nous avons proposé des solutions afin d'améliorer le maintien de la production en régime perturbé durant les chutes de tension. Les différentes solutions ont été implémentées et simulées sous Matlab, et les résultats obtenus ont été discutés et interprétés.

Chapitre 1 :

Présentation de l'Office National de l'Electricité

1- PRESENTATION DE L'ONE :

Crée par Dahir en août 1963 l'Office National de l'Electricité et de l'Eau Potable été substitué à la Société Electrique du Maroc pour prendre en main le secteur électrique : production, transport et distribution. C'est un établissement public ayant un caractère industriel et commercial et possédant une autonomie financière.

2- FICHE TECHNIQUE :

Raison social : Office national d'électricité.

Statut juridique : Etablissement public à caractère industriel et commercial.

Directeur General : Ali FASSI FIHRI.

Siège social : 65 rus Otman ben Affan 2000 Casablanca-Maroc.

Activité : Production, transport, et distribution d'énergie électrique au Maroc.

Date de création : 1963.

3- MISSIONS :

Les missions de l'ONE résident essentiellement en :

- La garantie d'un service public de la production et du transport de l'énergie électrique, ainsi que celui de sa distribution dans les zones où l'Office intervient.
- La garantie de la demande en électricité du pays en énergie électrique dans les meilleures conditions de coût et de qualité de service.
- La gestion et le développement du réseau de transport.
- La planification et la généralisation de l'électrification rurale.
- Le développement des énergies renouvelables.

4- ACTIVITES :

L'ONE assure la production, le transport et la distribution de l'électricité, à travers tout le territoire marocain.

❖ Production :

En tant que producteur national, l'ONE a la responsabilité de fournir sur tout le territoire marocain et à tout instant une énergie de qualité.

❖ Transport :

Ayant pour mission d'assurer le transport de l'énergie électrique et la sécurité d'alimentation du pays, l'ONE développe et renforce son réseau de transport, qui couvre aujourd'hui presque la quasi-totalité du territoire national, et est constitué de lignes de 400 kV, 225 kV, 150 kV et 60kV.

❖ **Distribution :**

Etant le premier distributeur d'électricité au Maroc, l'ONE met tout en œuvre afin que la clientèle soit satisfaite, ainsi l'ONE ne cesse d'améliorer la qualité de service : externalisation des points d'encaissement, promotion du prépaiement, mise en place de "SIRIUS ", progiciel intégré de gestion commerciale, télé conduite régionale...

Chapitre 2 :

Etat de l'art sur la conversion éolienne

1- INTRODUCTION :

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission, puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

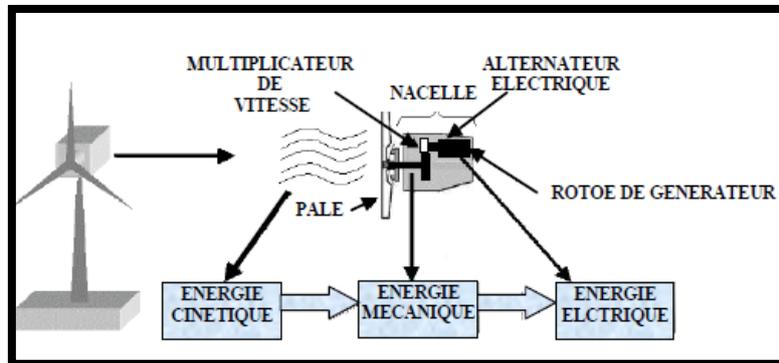


Figure 1: Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique

2- CONSTITUTION D'UNE EOLIENNE :

Une éolienne classique est généralement constituée de trois éléments principaux :

- ❖ **Le mat** : Généralement un tube d'acier, qui supporte la nacelle et le rotor de la turbine. Il doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations et les obstacles près du sol et aussi du fait de l'augmentation de la vitesse du vent en hauteur.
- ❖ **Les pales** : Qui permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Le nombre de pales varie de 1 à 3.
- ❖ **La nacelle** : Qui regroupe tous les éléments mécaniques essentiels: arbres, multiplicateur, le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge, le générateur, les appareils de mesure, une girouette qui indiquera la direction du vent, l'anémomètre qui indiquera la vitesse du vent...

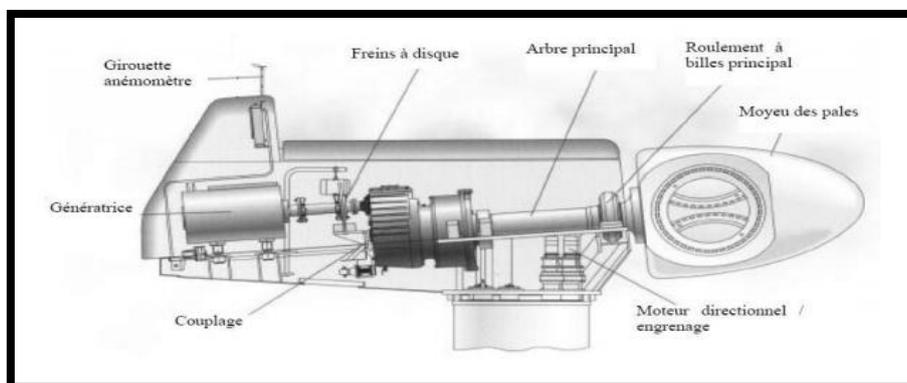


Figure 2: Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne [1]

3- CLASSIFICATION D'ÉOLIENNES:

Il existe deux grandes familles d'éoliennes :

- Les turbines éoliennes à axe horizontal.
- Les turbines éoliennes à axe vertical.

3-1 Eoliennes à axe vertical :

Ce type d'éolienne présente l'avantage de ne pas nécessiter un système d'orientation des pales, et de posséder une partie mécanique (multiplication et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance. En revanche, Le rotor se situant très près du sol, les vents sont donc très faibles, ce qui limite le rendement.

3-2 Eoliennes à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal sont largement employées, même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales, et sont moins simples, elles présentent un rendement aérodynamique plus élevé, et sont plus solides.

Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal.

4- ÉOLIENNES A VITESSE FIXE ET VARIABLE :

4-1 Eoliennes à vitesse fixe :

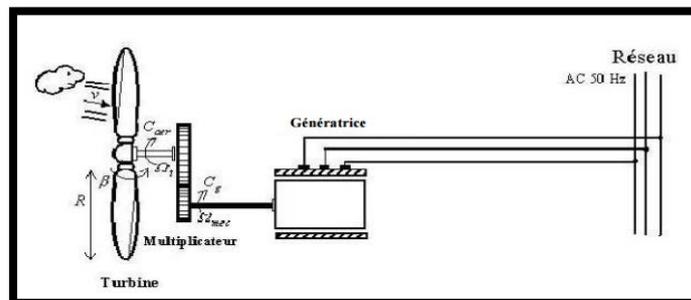


Figure 2: Aérogénérateur à vitesse fixe [2]

Dans cette technologie, la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) est reliée directement au réseau sans convertisseur de puissance. Pour assurer le bon fonctionnement de cette machine, la génératrice doit fonctionner à une vitesse proche de la vitesse de synchronisme imposée par la fréquence du réseau. Le couplage entre la turbine et le générateur se fait par le biais d'un multiplicateur mécanique de vitesse, qui adapte la vitesse de la turbine à celle de la génératrice.

Les éoliennes de ce type sont équipées d'un dispositif de réglage de l'orientation des pales, qui est souvent en action, pour pallier les variations de vitesse de vent, assurer un fonctionnement au voisinage du synchronisme et une cohérence de fréquence avec le réseau.

✓ Avantages :

Il s'agit en particulier :

- Système simple.
- Moins cher et moins exigeantes en termes d'entretien.
- Pas de convertisseurs statiques.

✓ Inconvénients :

Parmi lesquels on trouve :

- La présence du multiplicateur, introduit des coûts supplémentaires de maintenance, en particulier pour les projets offshore.
- En conséquence de la connexion générateur-réseau, les fluctuations du couple capté par l'aérogénérateur se propagent jusqu'à la puissance électrique produite.
- Rendement très faible.
- Il est bruyant à cause du système d'orientation des pales.
- Puissance non optimisée pour des vitesses de vents élevées.

4-2 Eoliennes à vitesse variable :

Vu les problèmes causés par un fonctionnement à vitesse fixe (Systèmes d'orientation, maintenance périodique, rendement médiocre,...), une autre technologie est utilisée, pour contrôler la puissance injectée sur le réseau électrique en fonction de la vitesse du vent appliquée sur les pales de l'éolienne. Cette optimisation de la production peut s'effectuer par l'introduction et la commande des convertisseurs statiques de puissance.

4-2-1 Eoliennes à vitesse variable équipées de génératrices synchrones, pilotée par le stator :

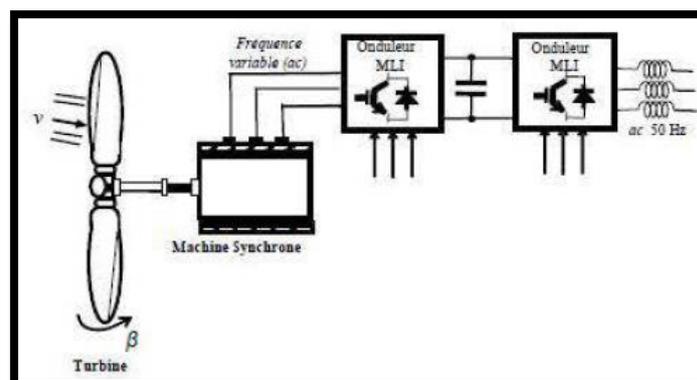


Figure 3 : Aérogénérateur à machine synchrone [2]

Dans cette configuration un dispositif d'électronique de puissance est utilisé pour adapter la fréquence (variable) de la machine synchrone à la fréquence du réseau. Les enroulements du stator sont connectés aux convertisseurs de puissance. Ce dispositif est composé de deux convertisseurs et d'un bus DC continu comme indiqué sur la figure 3.

Les deux convertisseurs, par le biais du bus continu permettent de découpler la fréquence du réseau de la fréquence du stator de la machine synchrone. Les variations de puissance produite par l'éolienne sont filtrées par le condensateur du bus DC.

Certaines variantes des machines synchrones peuvent fonctionner à faibles vitesses de rotation (à grand nombre de paires de pôles), elles permettent ainsi à l'éolienne de s'affranchir du multiplicateur de vitesse, qui demande un travail auxiliaire de maintenance.

L'inconvénient de cette structure est qu'elle nécessite des convertisseurs de puissance dimensionnés pour la puissance nominale de la génératrice, donc un coût élevé et des pertes énormes.

4-2-2 Eolienne à vitesse variable basée sur une génératrice asynchrone à double alimentation commandée par le rotor :

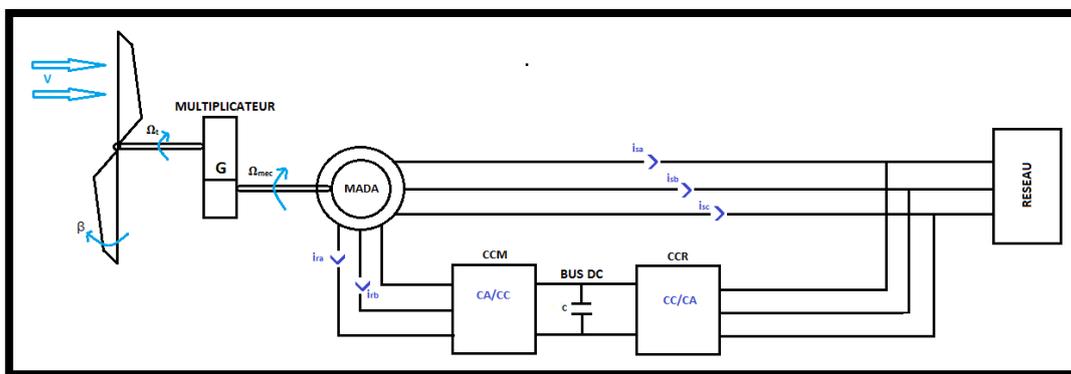


Figure 4: Système éolien à vitesse variable basé sur une MADA

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) est une génératrice asynchrone à rotor bobiné. Le stator de la machine est directement connecté au réseau qui va imposer sa tension et sa pulsation ω_s . Le rotor est bobiné avec des enroulements accessibles raccordés à deux convertisseurs IGBT permettant de faire transiter la puissance de façon bidirectionnelle entre le rotor et le réseau. Donc il est possible de faire varier la pulsation rotorique ω_r et autoriser le fonctionnement de la machine dans une grande plage de vitesse autour du synchronisme.

La majeure partie de la puissance électrique est diffusée dans le réseau par le biais du stator. Une faible partie (environ 30% de la puissance nominale) de la puissance électrique est diffusée dans le réseau par le biais du rotor. La puissance active passant par les convertisseurs de puissance est donc faible, et on peut donc utiliser des convertisseurs de puissance ayant un faible coût.

Ce type d'éoliennes nécessite un système d'orientation des pales simplifié. En effet, la possibilité de contrôler la vitesse du générateur via le couple électromagnétique permet de réduire le rôle du système d'orientation des pales, qui interviendra essentiellement pour limiter la vitesse de la turbine et la puissance générée en présence de vitesses de vent élevées.

La structure utilisant la machine asynchrone à double alimentation présente le meilleur avantage en termes de production de puissance élevée, en fonctionnement à vitesse variable, tout en réduisant le dimensionnement des convertisseurs de puissance. C'est la génératrice étudiée dans la suite de ce travail.

Chapitre 3 :
Modélisation et dispositif de
commande d'un système
éolien à base de la MADA

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la modélisation et la commande des principaux composants de la chaîne de conversion d'un système éolien à vitesse variable basé sur une MADA. En premier lieu nous avons exposé le modèle aérodynamique de la turbine. Puis nous avons présenté deux méthodes de contrôle : la première MPPT permettant à l'éolienne d'extraire le maximum de puissance disponible dans le vent, et la 2eme sert à protéger l'éolienne contre les vents forts.

En second lieu, nous avons décrit le fonctionnement de la MADA, et développé le modèle de la MADA dans le repère de Park, qui sera soumis aux lois de commande vectorielle en puissance active et réactive, nous avons également détaillé les différentes commandes des Convertisseur Côté MADA (CCM) et Convertisseur Côté Réseau (CCR), garantissant le fonctionnement optimal de l'éolienne.

1- DESCRIPTION :

Le système de conversion éolienne à base de la MADA de la figure 5 est constitué d'une turbine éolienne, une génératrice asynchrone à double alimentation, un bus DC continu, deux convertisseurs statiques de puissance : CCM et CCR. La turbine éolienne entraîne la MADA à une vitesse de rotation variable à travers le multiplicateur de vitesse. Le stator de cette dernière est directement connecté au réseau électrique, tandis que le rotor est connecté au réseau via deux convertisseurs statiques bidirectionnels mis en cascade à travers le bus continu.

Les deux convertisseurs, par le biais du bus continu permettent de découpler la fréquence du réseau de la fréquence du stator de la machine asynchrone. Les variations de puissance produite par l'éolienne sont filtrées par le condensateur du bus DC.

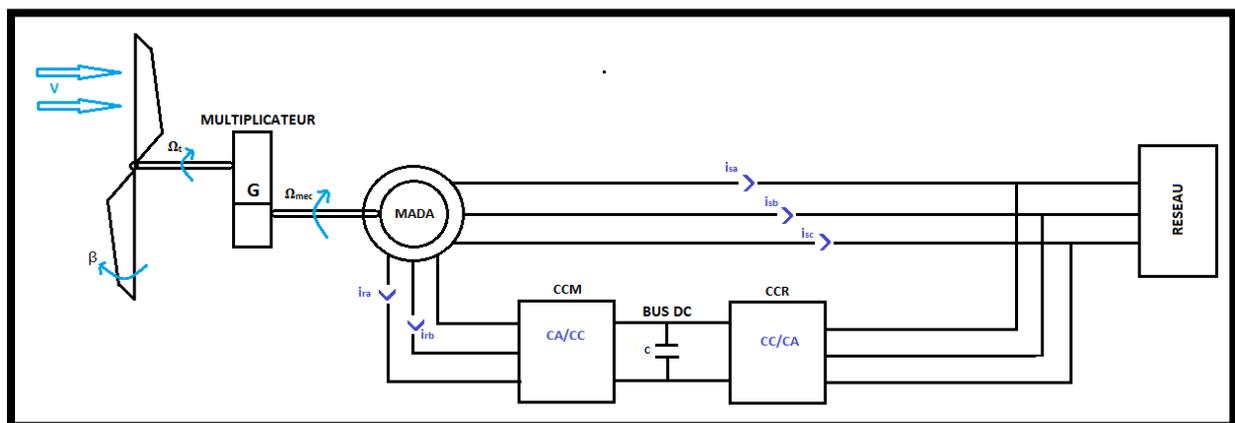


Figure 5: Système éolien à vitesse variable basé sur une MADA

2- MODELE DE LA TURBINE EOLIENNE :

2-1 Modèle aérodynamique

Le vent appliqué sur les pales de l'éolienne, entraîne la mise en rotation du rotor de la turbine, et crée une puissance mécanique sur l'arbre de la turbine. Cette puissance s'exprime de la façon suivante [3]:

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot C(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3 \quad (I. 1)$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R}{v} \quad (I. 2)$$

Où :

ρ : La masse volumique de l'air (1.225 kg/m³ à la pression atmosphérique).

v : Vitesse du vent [m/s]

Ω_t : Vitesse de rotation de la turbine (rad/s).

R : Rayon de la turbine en (m).

λ : Ratio de la vitesse, défini comme le rapport de vitesse de la pale et la vitesse de vent.

$C(\lambda, \beta)$ Coefficient de puissance représentant le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Ce coefficient présente une limite théorique appelée limite de Betz égale à 0.593. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance, exprimé en fonction de la vitesse relative λ , et de l'angle d'orientation des pales β .

Connaissant la vitesse de rotation de la turbine, le couple C_{ar} produit par cette éolienne est alors déduit :

$$C_{ar} = \frac{P_m}{\Omega_t} = \frac{1}{2\Omega_t} \cdot C(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3 \quad (I. 3)$$

La génératrice est entraînée à travers un multiplicateur de gain G , En considérant que le multiplicateur est idéal, il est alors modélisé par l'équation suivante :

$$\Omega_{mec} = G\Omega_t \quad (I. 4)$$

Où :

Ω_{mec} : La vitesse de rotation de la génératrice en (tr/mn).

Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport de multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur, on obtient alors :

$$C_{mec} = \frac{1}{G} C_{ar} \quad (I. 5)$$

Où :

C_{mec} : Couple mécanique sur l'axe du générateur en (N. m).

L'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la MADA est décrite par :

$$J_T \frac{d\Omega_{méc}}{dt} + f_v \Omega_{méc} = C_{méc} - C_{em} \quad (I. 6)$$

Où :

J_T : Inertie totale (kg.m²).

f_v : Coefficient de frottements visqueux total.

La Figure 6 montre le synoptique global du modèle de l'éolienne :

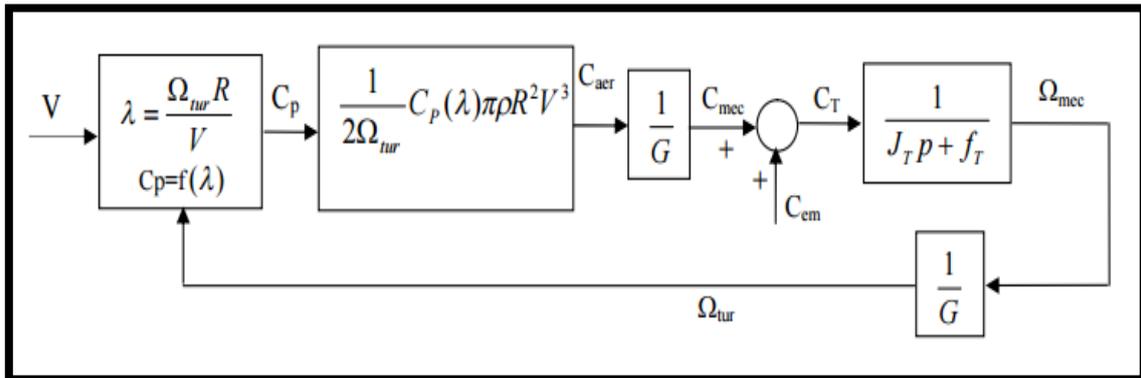


Figure 6: Schéma bloc de la turbine éolienne

2-2 Stratégie de commande de la turbine éolienne :

Le fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable est défini selon quatre zones, décrites par la figure 7, qui représente la puissance transmise de l'aérogénérateur en fonction de la variation de vitesse de vent.

- La zone I: Le vent est insuffisant pour permettre le démarrage de l'éolien, la vitesse de rotation et la puissance mécanique sont nulles.
- La zone II: Le vent atteint une vitesse minimale V_{min} pour permettre le démarrage, une fois le démarrage est effectué, la vitesse de rotation évolue en fonction de la vitesse de vent de sorte à se maintenir dans le point de fonctionnement de rendement maximale.
- La zone III: Le vent atteint des vitesses élevées supérieures à la vitesse nominale V_n , la vitesse de rotation et la puissance mécanique doivent être maintenues à leurs valeurs nominales afin de ne pas abimer le système.
- La zone IV: Le vent atteint sa valeur maximale, une procédure d'arrêt est effectuée pour ne pas détériorer l'éolienne, les pales de la turbine sont mises en drapeaux.

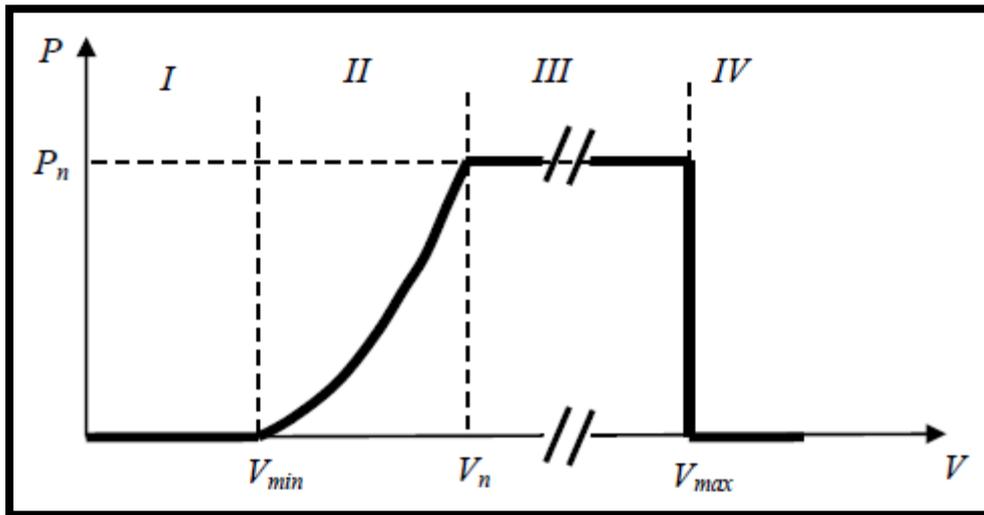


Figure 7: La caractéristique puissance en fonction de la vitesse de vent [3]

V_{min} : Vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine, elle varie entre 2.5m/s et 4m/s pour les éoliennes de forte puissance.

V_n : Vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice, elle varie entre 11.5m/s et 15m/s.

V_{max} : Vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales. Pour la grande majorité des éoliennes, elle vaut 25m/s.

Il existe deux stratégies de commande suivant les zones de fonctionnement de l'éolienne :

- **Maximisation de puissance MPPT :**

Utilisée dans la zone II du fonctionnement de l'éolienne, son principe est de suivre le point de puissance maximale pour chaque vitesse de vent. Lorsque l'on trace les courbes donnant la puissance extraite en fonction de la vitesse de rotation de la génératrice, pour différentes vitesses de vent, on s'aperçoit qu'elles passent chacune par un unique maximum (figure 8). L'ensemble des points optimaux recherchés définit une courbe de puissance optimale définie par l'équation $P_{m,opt}$: [4]

$$P_{m,opt} = \frac{1}{2} \cdot C_{opt}(\lambda_{opt}, \beta) \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (I.7)$$

Un fonctionnement idéal du système éolien nécessite un suivi parfait de cette courbe. Pour ce faire, une commande connue par : Maximum Power Point Tracking (MPPT), est utilisée.

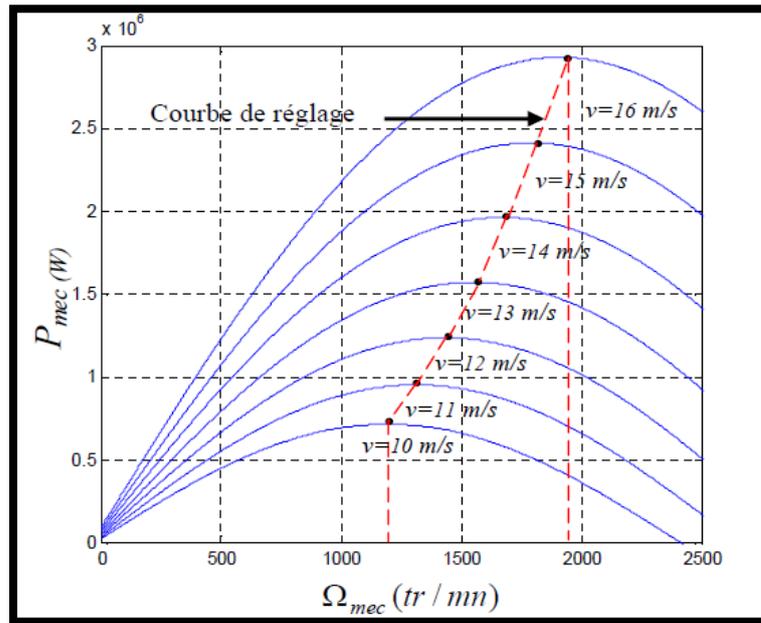


Figure 8: Caractéristique puissance mécanique en fonction de la vitesse de rotation

La stratégie utilisée considère que la courbe optimale de puissance est connue, il suffit de suivre la courbe optimale de puissance pour que l'éolienne soit dans les conditions optimales.

La puissance est mesurée et la vitesse de rotation de référence, correspondante obtenue de la caractéristique optimale de puissance, est utilisée comme une grandeur de référence pour un régulateur de type PI. Ce dernier détermine la consigne de commande qui est le couple électromagnétique qu'on devrait appliquer à la machine pour faire tourner la génératrice à sa vitesse optimale. Le couple ainsi déterminé par le régulateur est utilisé comme grandeur de référence.

Le contrôle MPPT est schématisé par la figure 9 :

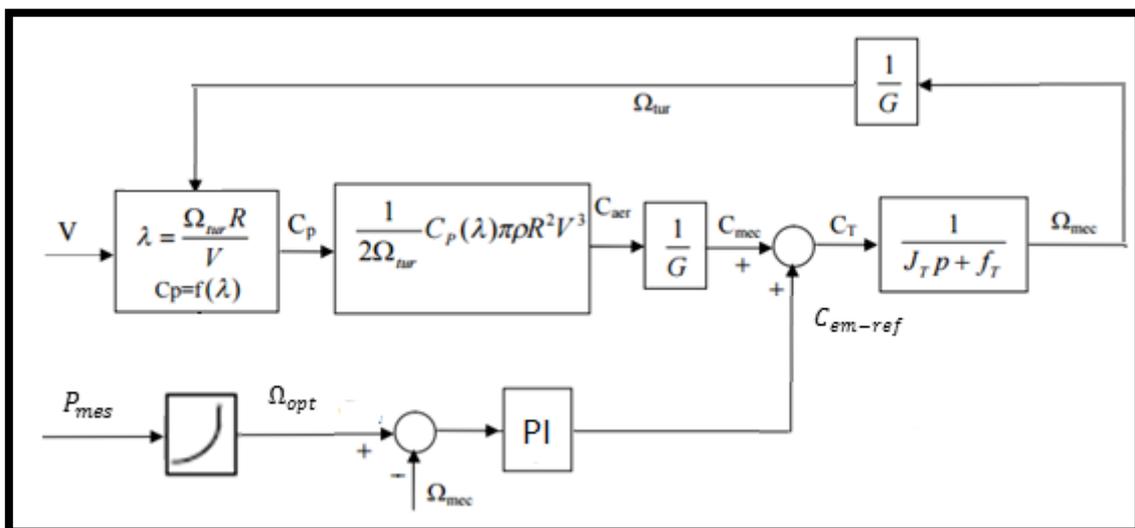


Figure 9: Schéma bloc du contrôle MPPT.

▪ **Limitation de puissance:**

❖ **PITCH :**

Ce dispositif permet de positionner les pales suivant un angle β choisi. Généralement, on conserve un calage d'angle minimal pour les vitesses de vent faibles jusqu'à nominales. Au-delà, on peut augmenter l'angle β , ce qui va entraîner la dégradation de C_p , et la réduction de la puissance.

❖ **STALL :**

L'angle des pales est fixe, mais celles-ci sont conçues de façon à créer des turbulences lorsque le vent atteint des vitesses élevées. Ces turbulences réduisent la portance des pales et donc la puissance transmise au rotor. Ce procédé, bien que simple et relativement fiable manque de précision car il est tributaire de la masse volumique de l'air et de l'état de rugosité des pales qui est fonction de la propreté et de l'usure de celles-ci.

3- LA MODELISATION DE LA MADA :

3-1 Structure de la MADA :

La MADA est une machine asynchrone à double alimentation triphasée à courant alternatif avec deux enroulements triphasés accessibles. Son stator comporte un enroulement triphasé (S_A, S_B, S_C) et son rotor est constitué d'un bobinage triphasé (R_a, R_b, R_c), la MADA est schématisée sur la figure ci-dessous.

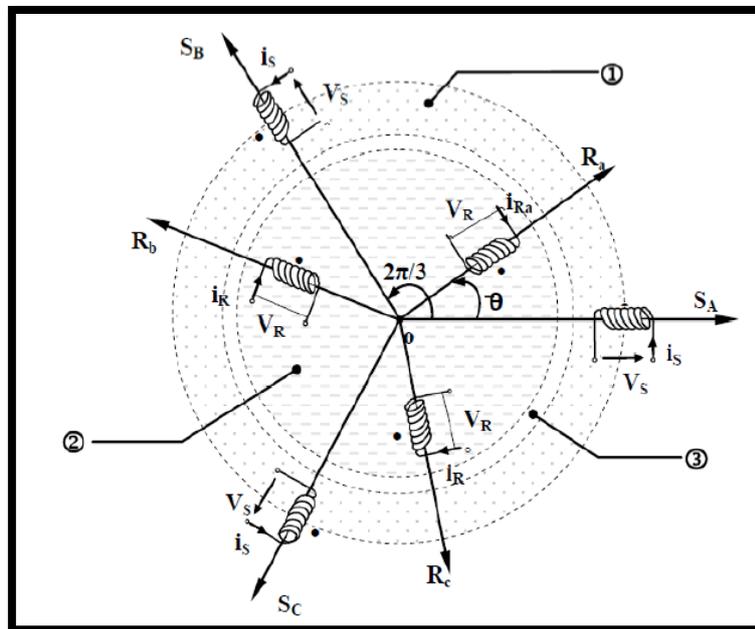


Figure 10: Schéma représentatif de la MADA.

3-2 Modes de fonctionnement de LA MADA

Dans la MADA, la commande des tensions rotorique permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine [5], offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper synchronisme ou en hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. On a donc quatre modes opérationnels caractéristiques de la machine (figure 11) :

- Lorsque la machine fonctionne en moteur, la puissance est fournie par le réseau au stator. Si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, la puissance P_r «Puissance de glissement» est renvoyée sur le réseau, c'est le fonctionnement moteur hyper synchronisme ($g > 0$).
- En mode moteur hyper synchronisme ($g < 0$), une partie de la puissance absorbée par le réseau va au rotor et est convertie en puissance mécanique. La puissance est donc fournie à la machine par le stator et le rotor
- En fonctionnement générateur hypo synchronisme, la puissance fournie à la machine par le dispositif qui l'entraîne est une puissance mécanique. La puissance est fournie au réseau par le stator et une partie de cette puissance transitant par ce dernier est réabsorbée par le rotor.
- En mode génératrice hyper synchronisme, la puissance rotorique est positive, la puissance est transmise du rotor au réseau à travers le convertisseur. La vitesse de rotation mécanique est supérieure à la vitesse de synchronisme.

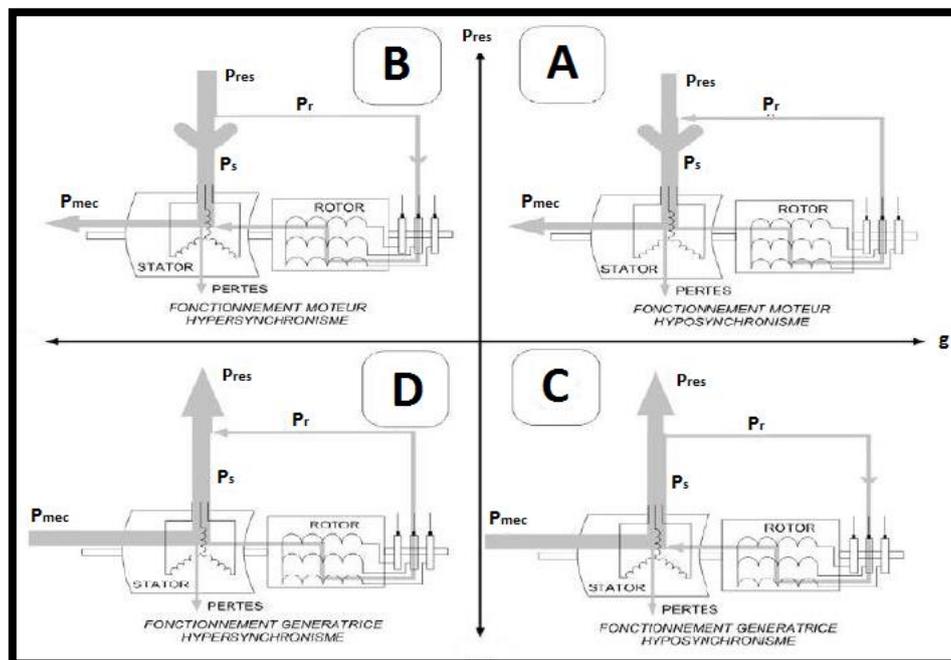


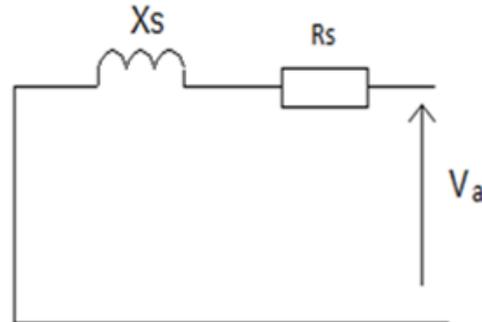
Figure 11: Modes de fonctionnement de la MADA

3-3 Modèle mathématique de la MADA :

Chaque enroulement peut être représenté par un circuit électrique équivalent suivant le schéma de la figure : [6]

La force électromotrice développée au niveau
De l'inductance :

$$-e = \frac{d\phi}{dt} = V_{sa} - R_S I_{sa}$$



En appliquant la loi des mailles aux trois enroulements du stator, on obtient:

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_S & 0 & 0 \\ 0 & R_S & 0 \\ 0 & 0 & R_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (I.8)$$

Une relation similaire est obtenue pour les trois enroulements du rotor :

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (I.9)$$

En l'absence de saturation, les flux sont supposés linéairement dépendants des courants.

Le flux total dans chaque enroulement est donné par la somme de :

- Flux propre (lié par l'inductance pour un flux statorique).
- Flux de couplage au niveau du stator (lié par les mutuelles inductances pour un flux statorique).
- Flux de couplage avec le rotor (lié par des mutuelles inductances variables selon la position du rotor).

Les équations du flux sous forme matricielles sont les suivantes :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + M[R(\theta)] \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} \quad (I.10)$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + M[R(\theta)] \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad (I.11)$$

M_s, M_r Inductances mutuelles entre deux phases respectivement statoriques et rotoriques.

l_s, l_r Inductances propres d'une phase statorique et rotorique.

$$\text{Avec } [R(\theta)] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (I.12)$$

3-4 Modèle diphasé de la MADA

Pour mieux représenter le comportement d'une machine asynchrone, et réduire la complexité, il est nécessaire de faire appel à un modèle précis et suffisamment simple. Au lieu de considérer les trois phases fixes (a,b,c) du stator et (A,B,C) du rotor de la machine, on considère le schéma équivalent formé de deux enroulements en quadrature d et q, et ceci par le biais de la transformation de Park.[7]

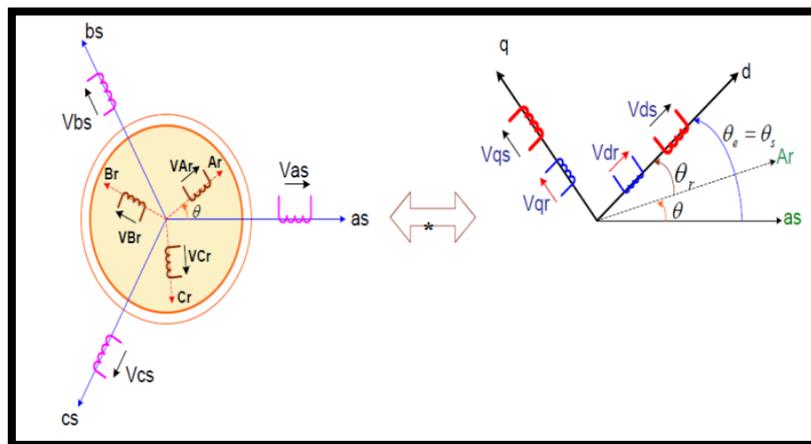


Figure 12: Modèle de Park de la MADA.

Le nouveau modèle est obtenu en multipliant les équations des courants, des flux et des tensions par la matrice de Park donnée par l'équation (I.13):

$$P[\theta] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (I.13)$$

Le changement de variables relatifs aux (courants, tensions et flux) est défini par la transformation :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = P[\theta] \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (I.14)$$

Pour déterminer les angles nécessaires aux transformations de Park pour les grandeurs statoriques (θ_s) et pour les grandeurs rotoriques (θ_r), une boucle à verrouillage de phase (PLL) est utilisée. Cette PLL permet d'estimer avec précision la fréquence et l'amplitude de la tension du réseau.

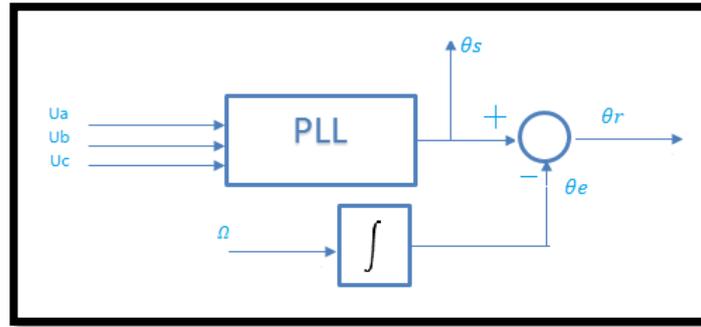


Figure 13: Etablissement des angles de transformation de Park à l'aide d'une PLL.

La phase rotorique forme un angle électrique θ_e avec la phase statorique (Figure 12). Ainsi, l'angle θ_r nécessaire aux transformations rotoriques est le résultat de la soustraction des angles θ_s et θ_e .

θ_e Obtenu en intégrant la vitesse mesurée par un capteur, et la θ_s est obtenue par la PLL. U_a, U_b et U_c Les tensions des trois phases a, b et c respectivement.

θ : Angle électrique entre les bobinages rotorique et statorique de la MADA (rad).

θ_r : Angle de Park des grandeurs rotoriques de la MADA (rad).

θ_s : Angle de Park des grandeurs statoriques de la MADA (rad).

Après l'application de transformation de Park aux équations (I.8) et (I.9), et avec un repère lié au champ tournant, les expression des tensions statoriques et rotoriques suivant l'axe (d,q) sont :

$$\begin{aligned}
 V_{sd} &= R_s I_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \phi_{sq} \\
 V_{sq} &= R_s I_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \phi_{sd} \\
 V_{rd} &= R_r I_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r \phi_{rq} \\
 V_{rq} &= R_r I_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \omega_r \phi_{rd}
 \end{aligned} \tag{I.15}$$

Où :

$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$: Pulsation statorique (rad/s).

$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$: Pulsation rotorique (rad/s).

Le système matriciel du flux peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{cases}
 \phi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{dr} \\
 \phi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{qr} \\
 \phi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{ds} \\
 \phi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{qs}
 \end{cases} \tag{I.16}$$

L'expression du couple électromagnétique de la MADA en fonction des flux et courants statoriques s'écrit comme suit :

$$C_{em} = \frac{M}{L_s} (\varphi_{sq} I_{dr} - \varphi_{sd} I_{rq}) \quad (I.17)$$

Les puissances actives et réactives statoriques et rotoriques de la MADA s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} P_s = 1.5(V_{ds}I_{sd} + v_{qs}I_{qs}) \\ Q_s = 1.5(v_{qs}I_{sd} - v_{ds}I_{qs}) \\ P_R = 1.5(v_{dr}I_{rd} + v_{qr}I_{qr}) \\ Q_R = 1.5(v_{qr}I_{rd} - v_{dr}I_{qr}) \end{cases} \quad (I.18)$$

4- COMMANDE VECTORIELLE DE LA MADA :

4-1 PRINCIPE DE LA COMMANDE VECTORIELLE :

Afin de simplifier les équations de la MADA, nous allons maintenant procéder à un choix d'orientation pour le repère dq de PARK.

Dans le présent travail, nous utiliserons la méthode de commande vectorielle par orientation de la tension statorique, le choix de ce repère rend le couple électromagnétique produit par la machine et par conséquent la puissance active uniquement dépendante du courant rotorique d'axe d. La puissance réactive est proportionnelle au courant rotorique d'axe q à constante près. Ainsi, ces puissances statoriques peuvent être contrôlées indépendamment l'une de l'autre.

4-2 Application de la commande vectorielle à tension statorique orientée :

La première simplification qui découle du choix d'orientation suivant le flux statorique est :

$$\phi_{sd} = 0 \quad \text{Donc} \quad \frac{d\phi_{sd}}{dt} = 0 \quad (I.19)$$

Le flux statorique est imposé par le réseau. On peut donc considérer φ_{sq} comme constant (sa dérivée sera nulle) et égale au module du vecteur flux statorique φ_s

$$\begin{cases} \varphi_{sq} = \varphi_s \\ \phi_{sd} = 0 \end{cases} \quad (I.20)$$

Il est d'usage pour les génératrices de fortes puissances utilisées dans les éoliennes actuelles de négliger la résistance statorique R_s , Si nous supposons que $R_s=0$, les équations de tensions statoriques (I.15) deviennent alors :

$$\begin{cases} V_{sq} = 0 \\ V_{sd} = V_s = -\omega_s \phi_s \end{cases} \quad (I.21)$$

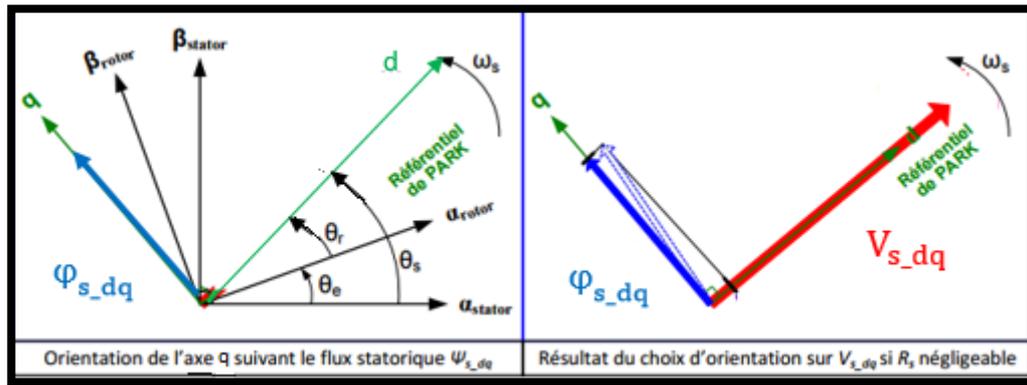


Figure 14: Orientation du repère de Park. Conséquence sur la tension V_{s-dq}

Le couple électromagnétique de l'équation (I.17) s'écrit alors :

$$C_{em} = \frac{M}{L_s} (\phi_{sq} I_{dr}) \quad (I.22)$$

Et l'équation des flux statoriques (I.16) d'après (I.19) devient :

$$\begin{cases} \phi_{sq} = \phi_s = L_s I_{sq} + M I_{qr} \\ \phi_{sd} = 0 = L_s I_{sd} + M I_{dr} \end{cases} \quad (I.23)$$

En considérant (I.23), Les courants statoriques peuvent être exprimés en fonction des courants rotoriques :

$$\begin{aligned} I_{qs} &= \frac{1}{L_s} (\phi_{sq} - M I_{qr}) \\ I_{ds} &= \frac{-M}{L_s} I_{dr} \end{aligned} \quad (I.24)$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs expressions de l'équation (I.24), les flux rotoriques de (I.16) deviennent :

$$\begin{aligned} \phi_{rd} &= (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} \\ \phi_{rq} &= (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rq} + \frac{M \phi_s}{L_s} \end{aligned} \quad (I.25)$$

Afin de pouvoir contrôler correctement la machine, il faut alors établir la relation entre les courants et les tensions rotoriques appliquées à la machine.

Les expressions des flux rotoriques d'axe d et q de l'équation (I.25) sont alors intégrées aux expressions des tensions rotoriques de l'équation (I.15), on obtient alors:

$$\begin{aligned} V_{rd} &= R_r I_{rd} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{rd}}{dt} - \omega_r (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rq} - \omega_r \frac{M \phi_s}{L_s} \\ V_{rq} &= R_r I_{rq} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{rq}}{dt} + \omega_r (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} \end{aligned} \quad (I.26)$$

En appliquant la transformation de la place à l'équation (I.26), on obtient :

$$\begin{aligned} V_{rd} &= (R_r + pL_r\sigma)I_{rd} - g\omega_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})I_{rq} - g\omega_s \frac{M\phi_s}{L_s} \\ V_{rq} &= (R_r + pL_r\sigma)I_{rq} + g\omega_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})I_{rd} \end{aligned} \quad (I.27)$$

La puissance réactive et la puissance active statorique (I.18) s'écrivent alors :

$$Q_s = -\frac{v_s}{L_s} \left(\frac{v_s}{\omega_s} - MI_{qr} \right) \quad ; \quad P_s = -\frac{v_s}{L_s} (MI_{dr}) \quad (I.28)$$

Le schéma bloc représentant le modèle mathématique ainsi simplifié de la MADA est illustré par la figure 15.

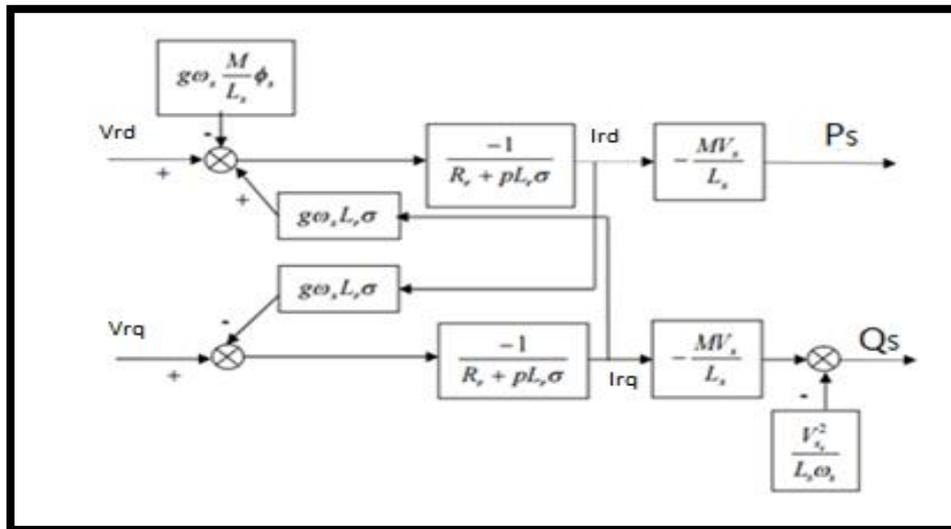


Figure 15: Schéma bloc de la MADA.

Ce schéma montre que nous pouvons mettre en place un contrôle des courants rotoriques, étant donné que le terme de couplage entre l'axe direct et l'axe quadrature, pour des faibles glissements, peut être négligé pour avoir un découplage parfait entre les deux axes, et chaque courant peut être commandé indépendamment avec son propre régulateur, et le contrôle découplé des puissances est ainsi réalisé.

5- CONTROLE DE LA MADA :

Dans la chaîne de conversion électromécanique du système éolien, les convertisseurs CCM et CCR, séparés par un bus continu, sont des éléments essentiels, ils offrent des possibilités de contrôle extrêmement utiles au pilotage de l'ensemble: contrôle de la qualité des courants et des puissances active et réactive injectées au réseau.

La commande de la MADA est constituée de 2 blocs :

- Bloc de contrôle du CCM.
- Bloc de contrôle du CCR.

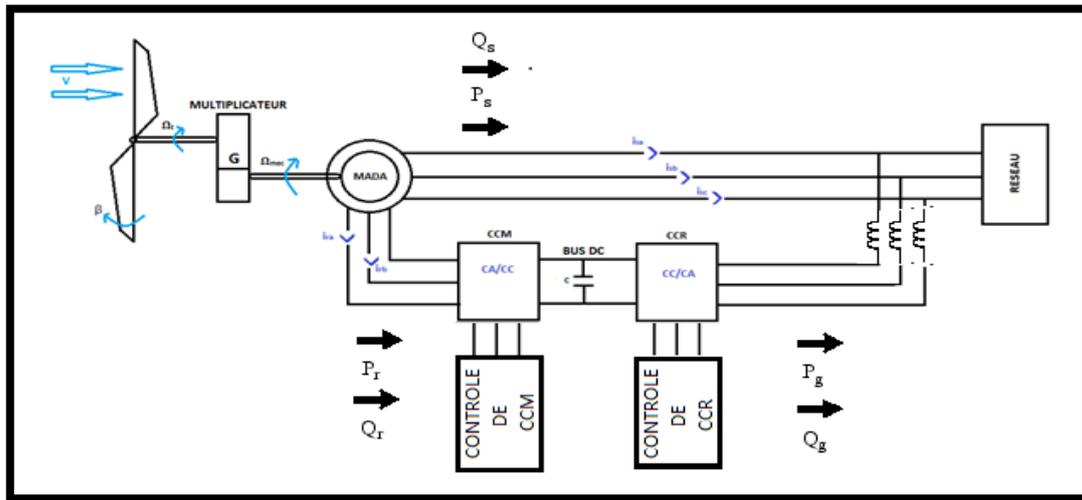


Figure 16: Schéma de la MADA.

5-1 Contrôle de convertisseur côté MADA :

Le rôle principal du dispositif de contrôle du convertisseur coté MADA est de régler le transfert des puissances active et réactive à travers le stator de la MADA vers le réseau électrique, en imposant des tensions rotoriques adéquates à la MADA.

La figure 17 représente une vue générale du contrôle de CCM, le bloc de commande reçoit les références du couple et de la puissance réactive, et calcule les tensions rotoriques de contrôle. Le bloc de commande est détaillé ci-après.

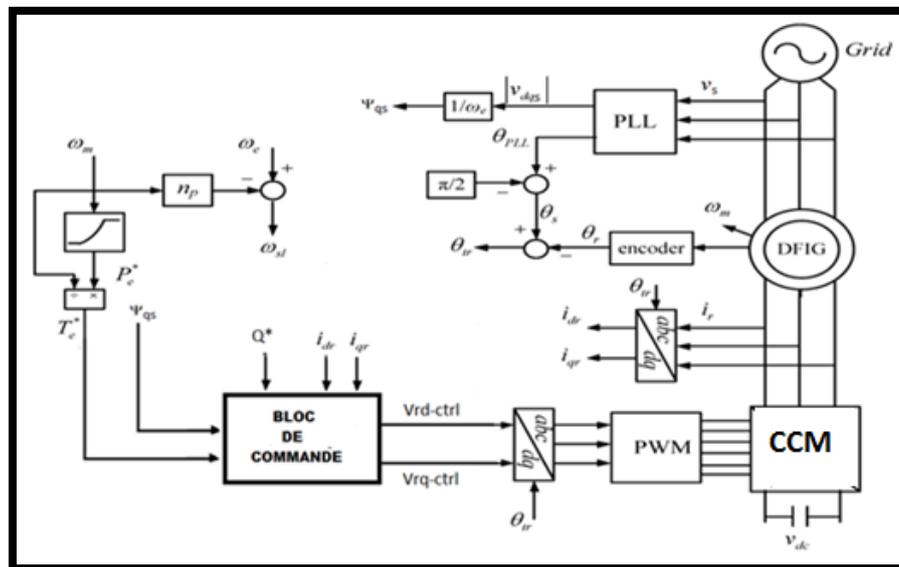


Figure 17: Vue d'ensemble du contrôle CCM

A partir de l'équation (I.22), il est clair que le couple peut être contrôlé par action sur la composante directe du courant rotorique de la MADA I_{dr}

$$I_{dr-ref} = \frac{L_s}{M} \phi_{sq} C_{em-ref} \quad (I.29)$$

La composante en quadrature du courant rotorique est utilisée pour contrôler la puissance réactive générée (I.28). On peut donc écrire ce qui suit :

$$I_{qr-ref} = \frac{L_s}{M\omega_s\phi_s} Q_{s-ref} + M\phi_s \quad (I.30)$$

Après la mesure des courants rotoriques, ils subissent la transformation de Park avant d'être à leurs valeurs de référence. Le contrôle des deux composantes directe et en quadrature des courants rotoriques est assuré par deux régulateurs PI comme il est montré dans la figure 18. Les tensions rotoriques de référence sont évaluées à partir de l'équation (I.31). Suivant les tensions de référence, des ordres de commande (impulsions aux interrupteurs), seront envoyés au convertisseur.

Des équations (I.15) et (I.23), nous obtenons les tensions rotoriques de référence :

$$\begin{aligned} V_{rd-ctrl} &= R_r I_{rd-ref} - \omega_r L_r I_{rq-ref} - M\omega_r I_{sq} + V_{d-ref} \\ V_{rq-ctrl} &= R_r I_{rq-ref} + \omega_r L_r I_{rd-ref} + M\omega_r I_{sd} + V_{q-ref} \end{aligned} \quad (I.31)$$

Avec :

$$\begin{aligned} V_{d-ref} &= C_{PI d} (I_{rd-ref} - I_{rd}) \\ V_{q-ref} &= C_{PI q} (I_{rq-ref} - I_{rq}) \end{aligned} \quad (I.32)$$

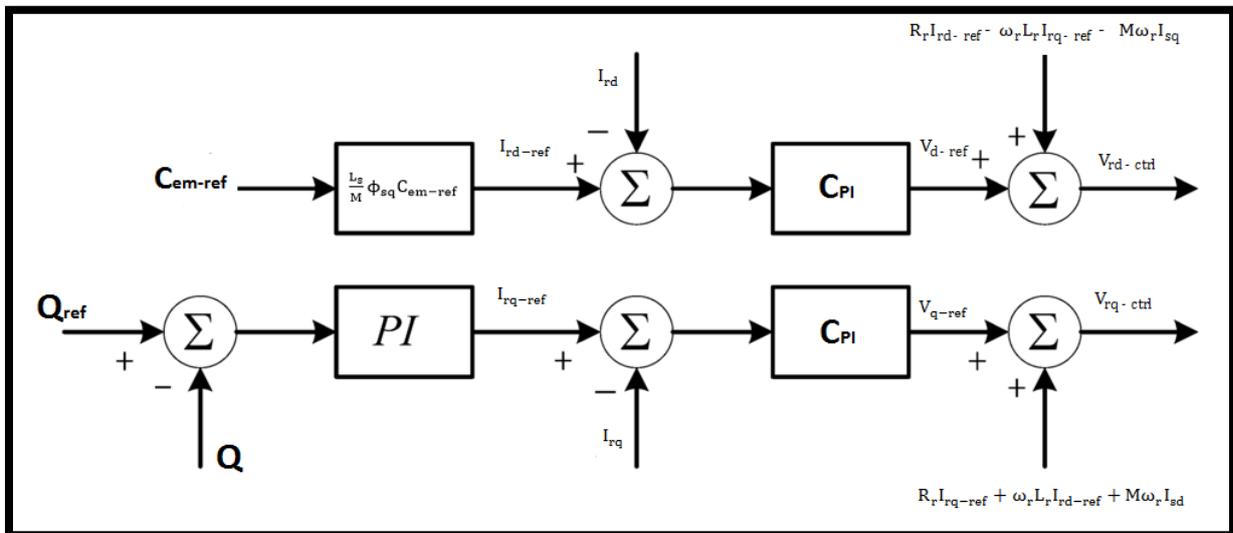


Figure 18: Schéma bloc de commande de CCM

Le système de contrôle reçoit les références du couple et de la puissance réactive, calcule les courants de références images des puissances actives et réactives de référence. Les deux composantes directe et en quadrature des courants sont contrôlées par deux correcteurs de type PI, qui génèrent les références des tensions rotorique à appliquer. Les signaux de commande sont déterminés par la modulation MLI, et sont envoyés aux interrupteurs des convertisseurs du système éolien.

5-2 Contrôle de convertisseur côté réseau :

L'objectif du contrôle du convertisseur côté réseau consiste à réguler la tension du bus continu et à contrôler le facteur de puissance. Celui-ci peut être fixé à 1 en imposant simplement une puissance réactive nulle.

La figure 19 représente une vue générale du contrôle de CCR, le bloc de commande reçoit la référence de tension V_{dc} , et la référence nulle de puissance réactive, et à la sortie nous obtenons, les tensions rotoriques de contrôle. Le bloc de commande est détaillé ci-après.

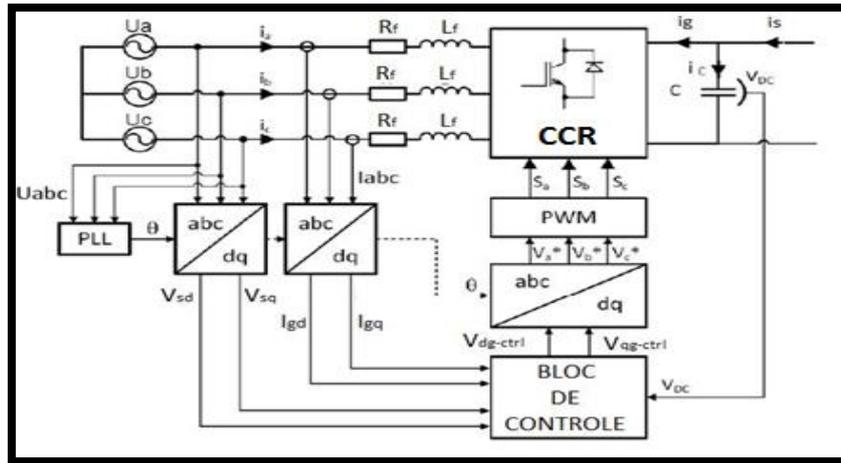


Figure 19: Vue d'ensemble du contrôle CCR

Un contrôle vectoriel avec l'orientation du repère de Park selon le vecteur de tension réseau est utilisé, pour permettre un découplage entre le contrôle de la puissance active et réactive. Ceci conduit à écrire :

$$\begin{cases} V_{gd} = V_g \\ V_{gq} = 0 \end{cases} \quad (I.33)$$

Les puissances active et réactive transitant à travers le convertisseur coté réseau, peuvent être exprimées par :

$$\begin{aligned} P_g &= V_{gd} I_{gd} + V_{gq} I_{gq} \\ Q_g &= V_{gd} I_{gq} - V_{gq} I_{gd} \end{aligned} \quad (I.34)$$

Tenant compte de (I.33), les expressions des puissances active P_g et réactive Q_g peuvent être simplifiées comme suit :

$$\begin{aligned} P_g &= V_{gd} i_{gd} \\ Q_g &= -V_{gd} i_{gq} \end{aligned} \quad (I.35)$$

Les courants de référence (i_{gd-ref} , i_{gq-ref}) qui permettent d'imposer les puissances de référence (P_{g-ref} , Q_{g-ref}) sont alors donnés par :

$$\begin{aligned} i_{gd-ref} &= \frac{P_g}{V_g} \\ i_{gq-ref} &= \frac{Q_{g-ref}}{V_g} \end{aligned} \quad (I.36)$$

La tension aux bornes du condensateur du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant circulant dans le condensateur :

$$V_{DC} = \frac{1}{C} \int I_C dt \quad (I.37)$$

V_{DC} : Tension bus continu (V)

I_C : Courant du condensateur (A).

Le courant du condensateur est donné par l'expression suivante :

$$I_C = I_s - I_g \quad (I.38)$$

I_s et I_g sont respectivement les courants modulés par les convertisseurs côté MADA et côté réseau.

D'après la Figure 19, nous pouvons écrire dans le repère triphasé, selon les lois de Kirchhoff, les équations électriques du filtre (R_f , L_f) connecté au réseau, et par application de la transformation de Park, nous obtenons :

$$\begin{aligned} V_{gd} &= R_f I_{gd} + L_f \frac{dI_{gd}}{dt} - \omega_s L_f I_{gq} + V_{sd} \\ V_{gq} &= R_f I_{gq} + L_f \frac{dI_{gq}}{dt} - \omega_s L_f I_{gd} + V_{sq} \end{aligned} \quad (I.39)$$

Les tensions de contrôle sont alors :

$$\begin{aligned} V_{gd-ctrl} &= V_d + R_f I_{gd-ref} - \omega_s L_f I_{gq-ref} + V_{sd} \\ V_{gq-ctrl} &= V_q + R_f I_{gq-ref} + \omega_s L_f I_{gd-ref} + V_{sq} \end{aligned} \quad (I.40)$$

Avec

$$\begin{aligned} V_d &= C_{PI d} (I_{gd-ref} - I_{gd}) \\ V_q &= C_{PI q} (I_{gq-ref} - I_{gq}) \end{aligned} \quad (I.41)$$

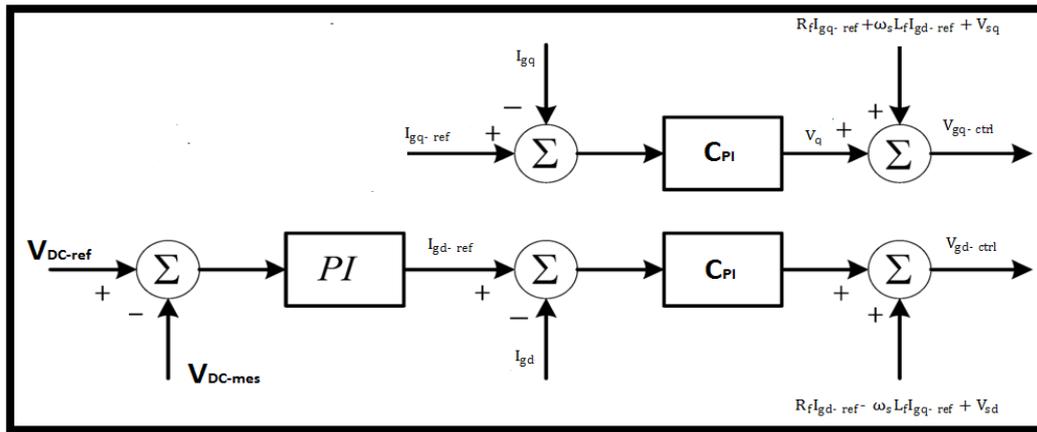


Figure 20: Schéma bloc du contrôle du CCR

La tension de référence du bus continu est comparée à celle mesurée aux bornes du condensateur. Le correcteur PI permet de maintenir une tension constante du bus continu en générant la référence du courant à injecter dans le condensateur.

Les composantes directe et en quadrature du courant de filtre sont contrôlées par deux correcteurs de type PI qui génèrent les références des tensions à appliquer $V_{gd-ctrl}$ et $V_{gq-ctrl}$. La composante directe est utilisée pour réguler la tension du bus continu tandis que la composante en quadrature est utilisée pour réguler la puissance réactive.

Chapitre 4:

Influence d'un réseau sur l'éolienne

1- GENERALITE SUR LES RESEAUX ELECTRIQUES :

Le réseau électrique est hiérarchisé par le niveau de tension, celui-ci est fractionné en trois principales subdivisions à savoir le réseau de transport, de répartition et de distribution.

L'énergie électrique produite est directement injectée sur le réseau de transport maillé à très haute tension (de 150kV à 800 kV, 225 kV et 400 kV) pour être transporté sur de grandes distances avec un minimum de pertes. Elle "descend" ensuite sur les réseaux de répartition (de 30 kV à 150 kV, 63 kV et 90 kV), puis de distribution (**MT**: 3 kV à 33 kV, 20 kV) d'où elle est distribuée aux gros consommateurs et aux réseaux de distribution à basse tension (**BT** : 110V à 600V, 230/400 V).

1-1 Insertion de l'éolien dans le réseau électrique :

Les modalités de raccordement au réseau électrique des installations de production, et notamment les contraintes techniques, sont définies par des textes réglementaires. Les contraintes techniques dépendent principalement de la puissance à raccorder qui définit le réseau de connexion.

La variabilité et la fluctuation de la production éolienne, pourrait impacter la stabilité de fonctionnement du système. Donc les systèmes doivent avoir la faculté de faire face aux multiples aléas susceptibles de perturber le fonctionnement et à en limiter les conséquences. Une fois raccordés au réseau électrique, les systèmes de productions d'énergie éolienne doivent respecter des engagements en termes de qualité de l'électricité débitée sur le réseau, et de contribuer à la garantie de fiabilité de la production et de sûreté de fonctionnement.

La loi présente quelques considérations générales sur ces contraintes de raccordement [8]:

- Les installations de production doivent fonctionner d'une manière continue pour des variations de fréquences et de tensions qui restent dans des plages prédéfinies, et aussi dans des conditions en dehors des plages prédéfinies, pour une durée limitée.
- Les installations de production doivent contribuer au soutien du système électrique lorsqu'il est en régime perturbé, pour garantir la sûreté du fonctionnement.

La figure 21 présente un diagramme des exigences qui sont imposées dans certains pays européens. Les gabarits de la figure 21 représentent respectivement les spécifications du code réseau Allemand, Danois, Espagnol, Américain, et Anglais. Dans les pays respectifs, les éoliennes doivent rester connectées pour une chute de tension au-dessus de la ligne critique limitée par son propre gabarit.

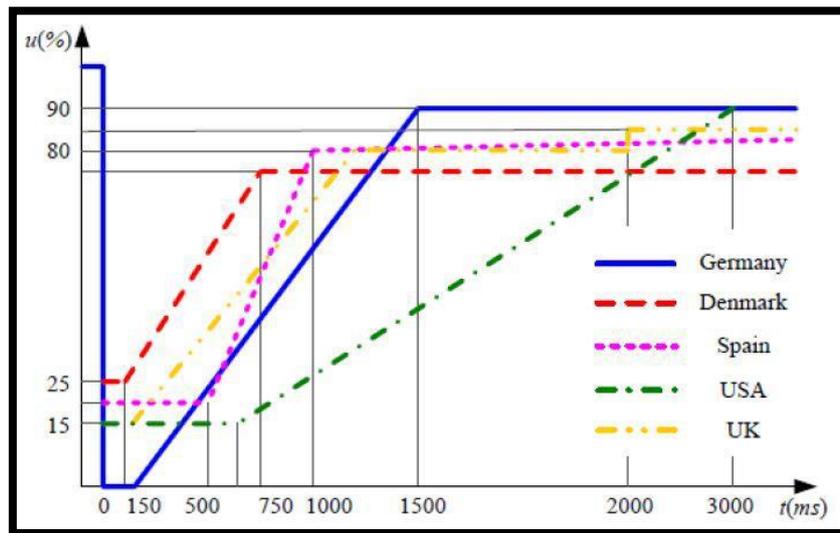


Figure 21: Gabarits de creux de tension dans différents pays

Parmi les exigences de raccordement au réseau électrique des aérogénérateurs imposées :

❖ **Régulation en fréquence :**

Le contrôle de puissance active des groupes de production est lié étroitement au réglage de la fréquence. En effet tout déséquilibre entre la production et la consommation entraîne une variation de vitesse (déséquilibre entre le couple moteur fourni par la turbine et le couple résistant correspondant à la charge du réseau) et donc de fréquence. La fréquence doit être tenue dans une plage de ± 0.1 Hz. Les limites de fréquences extrêmes sont de 47 Hz, 53 Hz.

Les installations éoliennes devront disposer des équipements nécessaires afin de régler la puissance, en réponse à une variation de fréquence, pour le maintien de la fréquence. Les aérogénérateurs doivent éviter la baisse de fréquence en augmentant la puissance produite, pour rétablir l'équilibre production-consommation. En revanche, lors d'un excès de production dans le réseau, les aérogénérateurs devront réduire leur production.

❖ **La régulation de tension :**

La problématique de tension imposée par les parcs éoliens dépendra du type de réseau auquel le parc éolien est raccordé et de la technologie installée. Les effets seront donc différents selon que le parc éolien est connecté à un réseau de transport, à un réseau de répartition, à un réseau de distribution.

TENUE AUX VARIATIONS DE LA TENSION :

Pour 400 KV : $\pm 5\%$.

Pour 225 KV : $+8.8\% / -10\%$.

Pour 60% KV : $\pm 10\%$.

Les variations de tension sont essentiellement induites par les transits de puissance réactive, c'est pourquoi, il est demandé aux éoliennes actuellement connectées au réseau de transport de participer au réglage de la tension via un réglage de la puissance réactive.

L'inconvénient majeur des systèmes éoliens connectés à un réseau est leur sensibilité aux perturbations provenant du réseau. Les défauts dans le système d'alimentation, même très loin de la génératrice peuvent avoir comme conséquence des perturbations sur la tension. Pour un système électrique avec une production élevée d'énergie éolienne, ceci n'est pas toléré car ces défauts peuvent nuire à la stabilité du réseau.

1-2 Les défauts dans les réseaux:

Un défaut réseau est physiquement, un court-circuit se produisant quelque part dans le réseau. Les courts-circuits peuvent avoir diverses origines :

- **Electriques** : Défauts d'isolement suite à une dégradation des isolant des matériels de réseau.
- **Atmosphériques** : Les lignes aériennes sont soumises aux perturbations extérieures telles que la foudre, les tempêtes ou le givre.
- **Mécaniques** : C'est la chute d'un corps sur un conducteur.
- **Humaines** : Ce sont les fausses manœuvres telles l'ouverture d'un sectionneur en charge.

1-2-1 Type des défauts :

Nous pouvons distinguer sur un réseau triphasé les défauts suivants :

- **Monophasés** : Une phase est en contact avec la terre.
- **Biphasés** : Deux phases sont en contact entre elles, avec ou sans contact à la terre.
- **Triphasés**: Les trois phases sont en contact entre elles, avec ou sans contact à la terre.

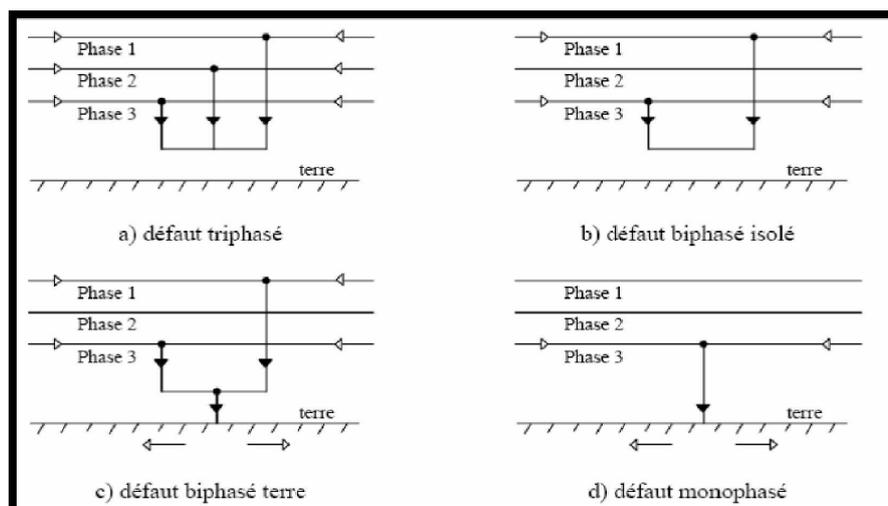


Figure 22: Les différents types de défauts

L'existence de défauts multiples, en particulier les défauts monophasés, engendre des phénomènes ou d'autres types de défaut en fonction de la localisation et du temps. Il peut s'agir de :

- **Défaut double** : Ce sont deux défauts d'isolement phase terre simultanés entre deux phases différentes d'un même réseau alimenté par un même transformateur HTB/HTA sur des terres différentes éloignées géographiquement. Les deux défauts peuvent se trouver sur le même départ HTA ou sur deux départs HTA différents. Les défauts doubles font circuler dans les terres, à l'endroit des deux défauts, des courants élevés, provoquant par la même des montées en potentiel importantes.
- **Défaut évolutif** : C'est un défaut d'un type donné qui évolue vers un nouveau type dans un temps variable de quelques millisecondes à plusieurs centaines de millisecondes.

1-2-2 Caractéristiques des défauts:

- **Défaut auto-extincteur** : Un défaut auto-extincteur monophasé est un défaut qui s'élimine seul, sans coupure de l'alimentation ou fermeture du disjoncteur shunt.
- **Défaut réamorçant** : Un défaut réamorçant est un défaut monophasé auto-extincteur, qui réapparaît périodiquement (dans environ 90% de cas, le défaut monophasé auto-extincteur est constitué d'un seul amorçage).
- **Défaut en régime établi à 50Hz** : Un défaut en régime établi 50Hz comporte un courant ayant essentiellement une composante à 50Hz après son apparition.

2- COMPORTEMENT DE L'EOLIENNE A BASE DE LA MADA FACE A UN CREUX DE SA TENSION D'ALIMENTATION :

2-1 Caractérisation des creux de tension :

Un creux de tension (sag ou dip en anglais), est une baisse brutale de la tension en un point du réseau électrique à une valeur comprise (par convention) entre 90% et 10% par rapport à la tension nominale du réseau, suivie d'un rétablissement de cette tension après un court laps de temps déterminé selon le code de réseau du raccordement. Les coupures brèves sont un cas particulier des creux de tension de profondeur supérieure à 90% et de durée allant jusqu'à 1 minute.

Les creux de tension ont pour principale origine les courts-circuits affectant le réseau électrique ou les installations raccordées, et le démarrage des moteurs de forte

puissance. Ils sont caractérisés par leur durée et la valeur efficace moyenne, maximum et/ou minimum de la tension pendant le défaut.

❖ **L'amplitude:**

L'amplitude du creux de tension est conditionnée par la structure du réseau, notamment la puissance de court-circuit et par la distance entre le point de défaut et le point où est situé le client sur le réseau. Ainsi, plus la puissance de court-circuit en amont est élevée ou plus le défaut est éloigné du point de raccordement du client, moins l'amplitude du creux de tension ressentie est importante.

❖ **La durée:**

La durée du creux de tension est conditionnée par le temps de maintien du défaut. Cette durée dépend du temps de détection et de localisation du défaut, des temporisations éventuelles mises en œuvre avant l'envoi de l'ordre d'ouverture des disjoncteurs et du temps nécessaire à l'ouverture des disjoncteurs. La durée d'un creux de tension est prise conventionnellement supérieure à 10ms (les phénomènes de durée inférieure sont considérés comme des phénomènes transitoires). La figure 23 représente les caractéristiques d'un creux de tension :

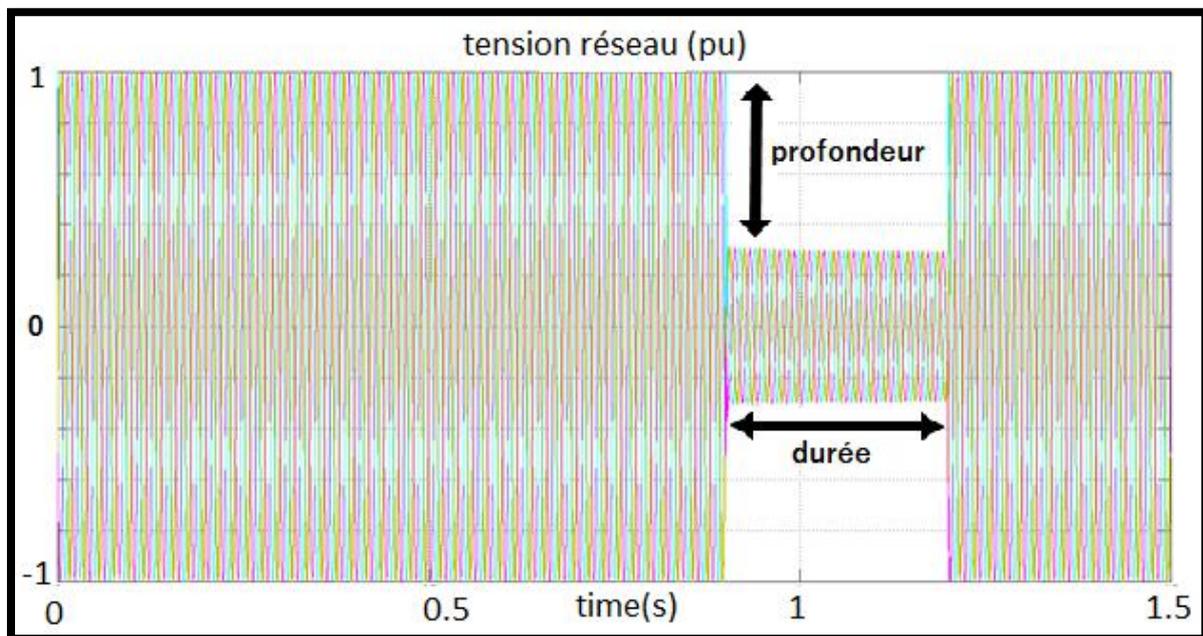


Figure 23: Tension réseau durant un défaut

2-1 Impact des creux de tension sur les grandeurs de la MADA:

2-2-1 Simulation :

Le modèle du système et de sa commande a été simulé à l'aide de Matlab Simulink. Les paramètres de simulation utilisés sont représentés dans l'annexe A. Les blocs utilisés pour la réalisation du modèle sont définis à l'Annexe B.

Pour mieux observer l'influence de la profondeur des creux, nous avons appliqué des creux de durée constante mais de profondeurs variables. Nous superposons les courants rotoriques, couple, puissance actives et réactives, pour différents creux de tensions appliqués.

Les creux de tensions ont été appliqués à l'instant $t=0.9s$, pour une même durée d'application de 300ms et des amplitudes de 0%, 20%,40% ,70%, 100%.

✚ Courants rotoriques : Figure 24

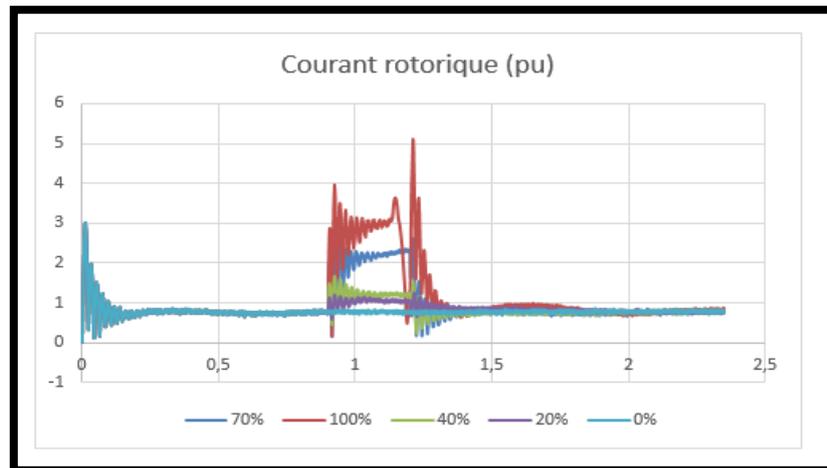


Figure 24: Représentation du courant rotorique pour des creux de tension allant de 0% à 100%

- Il y a apparition de deux pics, le premier juste après 0.9s (instant d'application du creux), et le second juste après 1.2 s (instant de disparition du défaut).
- Plus l'intensité des creux de tension augmente plus l'amplitude de creux de tension augmente plus l'amplitude des pics de courant rotorique augmente.

✚ Puissance réactive : Figure 25

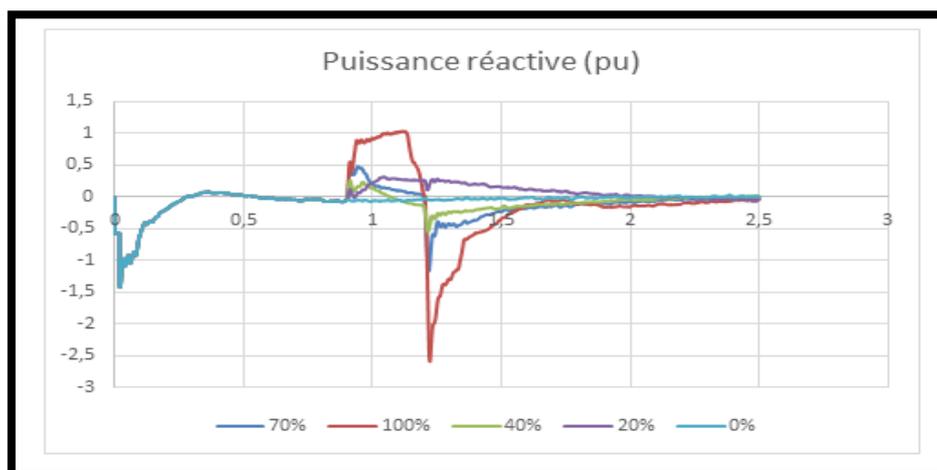


Figure 25: Représentation de la puissance réactive pour des creux de tension allant de 0% à 100%

- Juste après 0.9s (instant d'application du creux), une quantité de puissance réactive est fournie, et juste après 1.2 s (instant de disparition du défaut), la puissance réactive est absorbée du réseau.
- Plus l'intensité des creux de tension augmente plus la quantité de puissance réactive absorbée au moment de la disparition du défaut.

✚ Puissance active : Figure 26

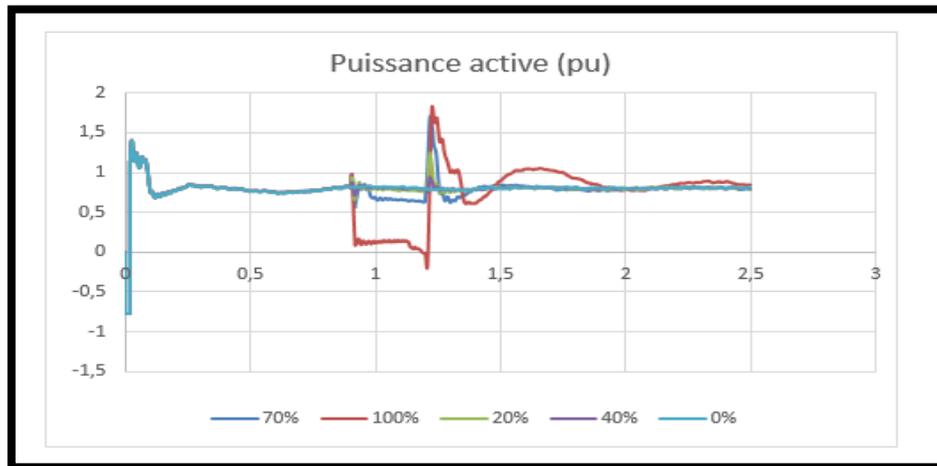


Figure 26: Représentation de la puissance active pour des creux de tension allant de 0% à 100%

- Juste après 0.9s (instant d'application du creux), la puissance active est réduite, et juste après 1.2 s (instant de disparition du défaut), la puissance active augmente.
- Plus l'intensité des creux de tension augmente plus la puissance active est minime durant le défaut.

✚ Couple électromagnétique : Figure 27

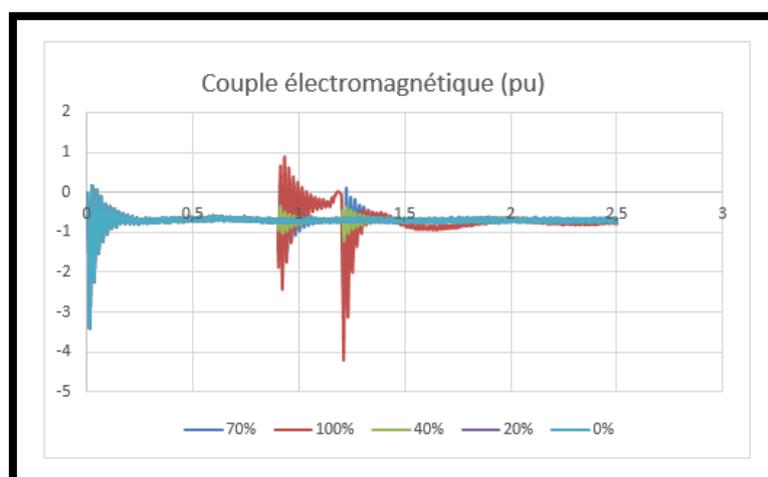


Figure 27: Représentation du couple électromagnétique pour des creux de tension allant de 0% à 100%

- Il y a apparition de deux pics, le premier juste après 0.9s (instant d'application du creux), et le second juste après 1.2 s (instant de disparition du défaut).
- Plus l'intensité des creux de tension augmente l'amplitude des oscillations du couple augmente.

2-2-2 Conclusions :

Sans aucun système de protection, de la connexion directe du stator au réseau, les perturbations du réseau peuvent conduire à de grands courants de défaut dans le stator. En raison du couplage magnétique entre le stator et le rotor, la perturbation du stator est par conséquent transmise au rotor. Des tensions élevées seront induites dans les enroulements du rotor, qui à leurs tour provoquent des courants excessifs dans le rotor. Or le dimensionnement du convertisseur de puissance est relativement faible par rapport à la MADA, donc il ne serait pas possible d'atteindre la tension désirée afin de commander les courants élevés de rotor, ceci signifie que le convertisseur atteint rapidement ses limites et par conséquent, il perd la commande du générateur pendant le défaut dans le réseau. Comme la tension du réseau chute dans le cas de défaut, le CCR ne peut pas transférer la puissance à partir du CCM au réseau et donc l'énergie supplémentaire charge le condensateur, la tension V_{dc} augmente rapidement.

La protection du convertisseur de la MADA est donc nécessaire pour couper les forts courants et les flux d'énergie incontrôlable traversant le RSC vers le condensateur, et minimiser les effets indésirables causés par les défauts.

Chapitre 5 : Stratégies de contrôle de la MADA en cas de creux de tension

Un creux de tension intervenant sur le réseau provoque la perturbation des grandeurs de la MADA et par la suite la déconnexion de l'éolien.

Des solutions sont mises en place pour permettre aux éoliens de rester connectés pendant les défauts tels que les creux de tension. Ces solutions permettent d'envisager ce que l'on retrouve dans la littérature tenue face aux creux de tension «Low Voltage Ride Through ». Cette possibilité n'est envisageable qu'à condition que les grandeurs électriques et mécaniques de la MADA, soient contrôlées de manière fine pendant le défaut.

Nous avons proposé différentes stratégies de protection durant les défauts, et nous avons simulé et interprété les résultats obtenus.

1- ANALYSE DYNAMIQUE DE LA MADA LORS D'UN CREUX DE TENSION :

D'après les figures 24, 25, 26, 27, nous avons saisi les conséquences des défauts sur les grandeurs de la MADA, et nous avons conclu qu'un contrôle est nécessaire [9].

Pour voir le comportement de la MADA, l'évolution de ses grandeurs durant les creux de tension, pouvoir déterminer les causes et par la suite proposer des solutions, nous avons fait une étude sur la réponse dynamique de la MADA durant les creux de tensions.

Les équations de tension statorique et rotorique exprimées dans un référentiel lié au stator et au rotor respectivement.

$$\vec{v}_s^s = R_s \vec{i}_s^s + \frac{d\vec{\phi}_s^s}{dt} \quad (II.1)$$

$$\vec{v}_r^r = R_r \vec{i}_r^r + \frac{d\vec{\phi}_r^r}{dt} \quad (II.2)$$

Les expressions de flux statorique et rotorique s'expriment par :

$$\phi_s = L_s i_s + M i_r \quad (II.3)$$

$$\phi_r = L_r i_r + M i_s \quad (II.4)$$

L'expression du courant i_s est déduite de (II.3) :

$$i_s = \frac{\phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_r \quad (II.5)$$

En remplaçant le courant statorique i_s par son expression, l'équation (II.4) devient :

$$\phi_r = \frac{M}{L_s} \phi_s + \sigma L_r i_r \quad (II.6)$$

En remplaçant le flux rotorique par son expression dans (II.2), on obtient :

$$\vec{v}_r^r = \frac{M}{L_s} \frac{d\vec{\phi}_s^s}{dt} + (R_r \vec{i}_r^r + \sigma L_r \frac{d\vec{i}_r^r}{dt}) \quad (II.7)$$

$$\vec{v}_r^r = \vec{e}_r^r + (R_r + \sigma L_r \frac{d}{dt}) \vec{i}_r^r \quad (II.8)$$

Avec :

$$\vec{e}_r = \frac{M}{L_s} \frac{d\vec{\phi}_s^r}{dt} \quad (II.9)$$

En fonctionnement normal, le vecteur de tension statorique est d'amplitude fixe V_s , et tourne à la vitesse de synchronisme ω_s

$$\vec{v}_s^s = V_s e^{j\omega_s t} \quad (II.10)$$

En négligeant la résistance R_s , et en remplaçant \vec{v}_s^s par son expression dans (II.1), le flux magnétique du stator est calculé en intégrant la tension statorique, On obtient :

$$\vec{\phi}_s^s = \frac{V_s}{j\omega_s} e^{j\omega_s t} \quad (II.11)$$

En appliquant un changement de référentiel, l'expression du flux statorique s'écrit :

$$\vec{\phi}_s^r = \vec{\phi}_s^s e^{-j\omega_r t} \quad (II.12)$$

Avec:

$\vec{\phi}_s^r$: Flux statorique exprimé dans un référentiel lié au rotor.

$\vec{\phi}_s^s$: Flux rotorique exprimé dans un référentiel lié au rotor.

L'expression (II.9) devient alors :

$$\vec{e}_r = \frac{M}{L_s} \frac{d}{dt} \left(\frac{V_s}{j\omega_s} e^{j\omega_s t} e^{-j\omega_r t} \right) \quad (II.13)$$

$$\vec{e}_r = \frac{M}{L_s} V_s g e^{j\omega_{sr} t} \quad (II.14)$$

Avec :

$$g = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$$

$$\omega_{sr} = \omega_s - \omega_r$$

En fonctionnement normal, et de l'expression (II.14) on observe que la tension est proportionnelle au glissement, donc d'une amplitude faible.

Dans l'hypothèse qu'un creux de tension, symétrique et partiel, survient à l'instant t_0 , l'amplitude de la tension statorique change de V_1 à V_2 .

$$\vec{v}_s = \begin{cases} V_1 e^{j\omega_s t} & t < t_0 \\ V_2 e^{j\omega_s t} & t > t_0 \end{cases} \quad (II.15)$$

V_1 Tension avant la défaillance, alors que V_2 est la tension après l'apparition du défaut.

L'évolution du flux pendant le creux de tension s'écrit :

$$\vec{\phi}_s = \begin{cases} \frac{V_1}{j\omega_s} e^{j\omega_s t} & t < t_0 \\ \frac{V_2}{j\omega_s} e^{j\omega_s t} & t > t_0 \end{cases} \quad (II.16)$$

Le flux ne peut pas changer d'une valeur ϕ_1 à une autre ϕ_2 instantanément, il doit y avoir une continuité, ainsi pour garantir un changement progressif du flux, une composante DC du flux apparaît.

En utilisant l'équation (II.5) et (II.1), la tension statorique devient :

$$\vec{v}_s^s = \frac{R_s}{L_s} \vec{\phi}_s + \frac{d\vec{\phi}_s}{dt} - \frac{R_s M}{L_s} \vec{i}_r \quad (II.17)$$

Compte tenu des faibles valeurs des grandeurs de la MADA, le dernier terme peut être négligé, on obtient alors :

$$\vec{v}_s^s = \frac{R_s}{L_s} \vec{\phi}_s + \frac{d\vec{\phi}_s}{dt} \quad (II.18)$$

L'expression du flux est calculée par la résolution de l'équation différentielle précédente :

$$\vec{\phi}_s = \frac{V_2}{j\omega_s} e^{j\omega_s t} + \frac{V_1 - V_2}{j\omega_s} e^{-t/\tau_s} \quad (II.19)$$

Avec :

$$\tau_s = \frac{L_s}{R_s}$$

En remplaçant le flux statorique par son expression dans (II.9), on trouve :

$$\vec{e}_r^r = \frac{M}{L_s} V_2 g e^{j\omega_s r t} - \frac{M}{L_s} \frac{V_1 - V_2}{j\omega_s} (j\omega_r + \frac{1}{\tau_s}) e^{-t/\tau_s} e^{-j\omega_r t} \quad (II.20)$$

En négligeant le terme $\frac{1}{\tau_s}$, l'équation précédente devient :

$$\vec{e}_r^r = \frac{M}{L_s} V_2 g e^{j\omega_s r t} - \frac{M}{L_s} (V_1 - V_2) \frac{\omega_r}{\omega_s} e^{-t/\tau_s} e^{-j\omega_r t} \quad (II.21)$$

Or :

$$g = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = 1 - \frac{\omega_r}{\omega_s}$$

Donc :

$$\vec{e}_r^r = \frac{M}{L_s} V_2 g e^{j\omega_s r t} - \frac{M}{L_s} (V_1 - V_2) (1 - g) e^{-t/\tau_s} e^{-j\omega_r t} \quad (II.22)$$

L'amplitude maximale de \vec{e}_r^r apparaît au début du creux de tension :

$$e_{r,\max} = \frac{M}{L_s} (V_2 g - (V_1 - V_2)(1 - g)) \quad (II.23)$$

On observe de l'expression précédente que la tension induite par le flux statorique est la somme de deux termes, le 1er terme est proportionnel au glissement, donc d'une amplitude faible, alors que le 2ème terme son amplitude peut être grande ou faible, selon la profondeur du creux ($V_1 - V_2$).

Durant les creux de tensions, l'apparition de la composante continue au niveau du flux, engendre des surtensions au niveau du rotor, si le convertisseur côté rotor, n'est pas en mesure de les contrôler, des sur-courants vont apparaître dans le rotor, et le convertisseur risque d'être endommagé.

2- STRATEGIES DE CONTROLE :

Les stratégies de contrôle appliquées durant les défauts réseaux peuvent être divisées en deux catégories principales :

- 1- **Méthode active** : Qui consiste en l'amélioration de la stratégie du contrôle. Elle ne nécessite pas un matériel supplémentaire, mais elle est limitée par le dimensionnement relativement faible du convertisseur du côté rotor par rapport au générateur, cette méthode n'est valable que pour les faibles profondeurs du creux.
- 2- **Méthode passive** : Qui nécessite des protections matérielles telles que : crowbar, résistance dynamique SDBR, DC Chopper...

2-1 Méthode active : Stratégie de contrôle modifiée

2-1-1 Théorie :

Le principal objectif du contrôle durant une défaillance réseau est de limiter le courant de défaut. La méthode proposée est simple à mettre en œuvre, basée sur le contrôle du flux rotorique. Une fois le creux est détecté, le flux rotorique est commandé pour suivre une fraction du flux statorique, et de cette manière, le courant du défaut peut être efficacement réduit.

Les expressions du flux rotorique et statorique sont :

$$\phi_s = L_s i_s + M i_r \quad (II. 24)$$

$$\phi_r = L_r i_r + M i_s \quad (II. 25)$$

On déduit l'expression du courant i_s de (II.24), en la remplaçant dans (II.25) on obtient :

$$\phi_r = \frac{M}{L_s} \phi_s + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_r \quad (II. 26)$$

$$i_r = \frac{1}{L_s L_r - M^2} (-M \phi_s + L_s \phi_r) \quad (II. 27)$$

Puisque $\frac{L_s}{M} \approx 1$, l'équation précédente peut être simplifiée, on obtient alors :

$$i_r \approx \frac{M}{L_s L_r - M^2} (\phi_r - \phi_s) \quad (II. 28)$$

Lorsque la chute de tension survient, des composantes DC et négatives apparaissent dans le flux statorique, dès lors, le flux rotorique ne peut plus suivre le flux du stator (Figure 28), et la différence entre le flux rotorique et le flux statorique tend à s'élargir, donnant naissance à des sur courants rotoriques. Pour cette raison, afin de limiter le courant de défaut, le flux rotorique doit être contrôlé pour suivre le flux statorique.

La figure 28 représente la différence entre flux rotorique et statorique durant le creux de tension. :

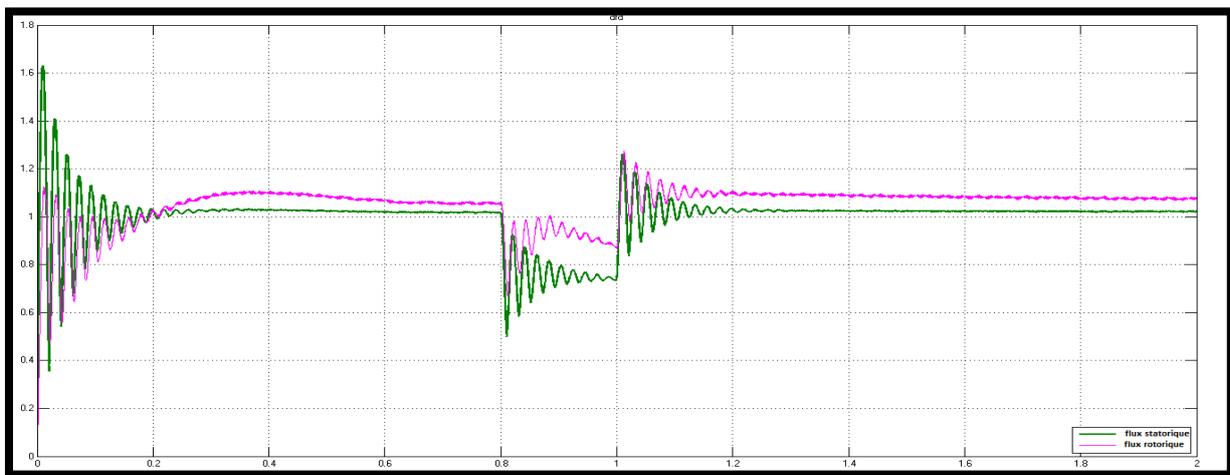


Figure 28: Différence entre flux rotorique et flux statorique sans contrôle, durant le creux de tension

L'expression de la tension rotorique s'écrit :

$$V_r = R_r i_r + \frac{d\phi_r}{dt} \quad (II. 29)$$

Si la résistance R_r est négligée, l'expression de la tension rotorique devient :

$$V_r = \frac{d\phi_r}{dt} \quad (II. 30)$$

De l'expression précédente, on déduit que la tension rotorique est proportionnelle à la dérivée du flux rotorique, et si ce dernier est contrôlé pour être égal au flux statorique, et puisque durant le défaut le flux statorique contient en plus une composante DC, la tension rotorique risque de dépasser la tension maximale acceptée par le convertisseur côté rotor, par conséquent il n'est pas possible de contrôler le courant rotorique comme requis.

Pour faire face à ce problème, il vaut mieux que le flux rotorique soit plutôt une fraction du flux statorique, ainsi la tension V_r reste limitée et le courant rotorique contrôlé.

Le modèle de la stratégie est composé de 3 blocs :

❖ **Calcul des flux statoriques rotoriques :**

Le calcul des flux est basé sur les équations suivantes :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_S I_{sd} + M I_{dr} \\ \varphi_{sq} = L_S I_{sq} + M I_{qr} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{ds} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{qs} \end{cases} \quad (II.31)$$

❖ **Calcul de la référence du flux rotorique :**

Comme expliqué précédemment, afin de réduire la tension de rotor requise pour le contrôle, le flux rotorique est commandée pour être une fraction du flux statorique. Ainsi, la référence du flux rotorique est déterminée par :

$$\phi_r^* = k_T \phi_s \quad (II.32)$$

Avec $0 < k_T < 1$

Les expressions du courant et tension rotorique, s'obtiennent en substituant (II.32) dans (II.31) et (II.30) respectivement :

$$i_r \simeq \frac{k_T - 1}{L_{lS} + L_{lR}} \phi_s \quad (II.33)$$

$$V_r = k_T \frac{d\phi_s}{dt} \quad (II.34)$$

Les équations (II.33) et (II.34) démontrent que, pour une faible valeur de k_T , la tension rotorique requise est faible mais l'intensité du courant rotorique est grande, par contre pour une grande valeur k_T la tension rotorique est large, mais le courant rotorique est réduit. Donc le comportement de cette stratégie est influencé par la valeur de k_T , un choix judicieux permettra un contrôle performant.

Lorsque le défaut survient, le flux statorique $\phi_s(0)$ à cet instant est maximal, si le courant rotorique est dans les limites pour le maximum du flux statorique, il ne va surement pas dépasser le maximum du courant, pendant tout le défaut, donc k_T devrait satisfaire :

$$\frac{(k_{T_{min}} - 1)}{L_{lS} + L_{lR}} \phi_s(0) \leq I_{r_{max}} \quad (II.35)$$

Avec :

$$\phi_s(0) \simeq \frac{V_S}{\omega_S}$$

L'expression de $k_{T_{min}}$ est exprimé par :

$$k_{T_{min}} \simeq 1 - I_{r_{max}} \omega_S (L_{lS} + L_{lR}) / V_S \quad (II.36)$$

$$k_{T_{min}} = 0.37$$

On prend $k_{T_{min}} < k_T < 1$ à condition de ne pas dépasser la valeur maximale de tension rotorique.

On prend $k_T = 0.9$

❖ **Unité de contrôle du flux rotorique :**

Un régulateur de type proportionnel est utilisé, pour que le flux rotorique suive la référence.

L'expression de la tension rotorique est :

$$\begin{aligned}\frac{d\phi_{rd}}{dt} &= \frac{R_r M}{L_s L_r - L_s^2} \phi_{sd} - \frac{R_r L_s}{L_s L_r - L_s^2} \phi_{rd} + \omega_{sr} \phi_{qd} + V_{rd} \\ \frac{d\phi_{rq}}{dt} &= \frac{R_r M}{L_s L_r - L_s^2} \phi_{sq} - \frac{R_r L_s}{L_s L_r - L_s^2} \phi_{rq} - \omega_{sr} \phi_{rd} + V_{rq}\end{aligned}\quad (II.37)$$

On pose :

$$\begin{aligned}V_{rd} &= V_d + V_{rdc} \\ V_{rq} &= V_q + V_{rqc}\end{aligned}\quad (II.38)$$

Avec :

$$\begin{aligned}V_d &= \frac{d\phi_{rd}}{dt} + \frac{R_r L_s}{L_s L_r - L_s^2} \phi_{rd} \\ V_q &= \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \frac{R_r L_s}{L_s L_r - L_s^2} \phi_{rq}\end{aligned}\quad (II.39)$$

$$\begin{aligned}V_{rdc} &= \frac{R_r M}{L_s L_r - L_s^2} \phi_{sd} + \omega_{sr} \phi_{qd} \\ V_{rqc} &= \frac{R_r M}{L_s L_r - L_s^2} \phi_{sq} - \omega_{sr} \phi_{rd}\end{aligned}$$

Ainsi, on procède à une régulation du flux et on ajoute les termes de compensation V_{rdc} et V_{rqc} , pour avoir les tensions de contrôle.

❖ **Détection de défaut et commutation :**

Le modèle combine deux méthode de contrôle, la méthode classique appliquée dans le fonctionnement normale, si un défaut est détecté, une commutation est effectuée, et le système est contrôlé par la stratégie de contrôle modifiée pendant les défauts.

La détection de défaut repose sur la comparaison de l'amplitude du courant rotorique, pour une valeur de courant rotorique supérieure à 1.1 pu, le switch est activé et le contrôle est effectué par la stratégie de contrôle modifiée.

Le contrôle du système est donné par l'organigramme de la figure 29 :

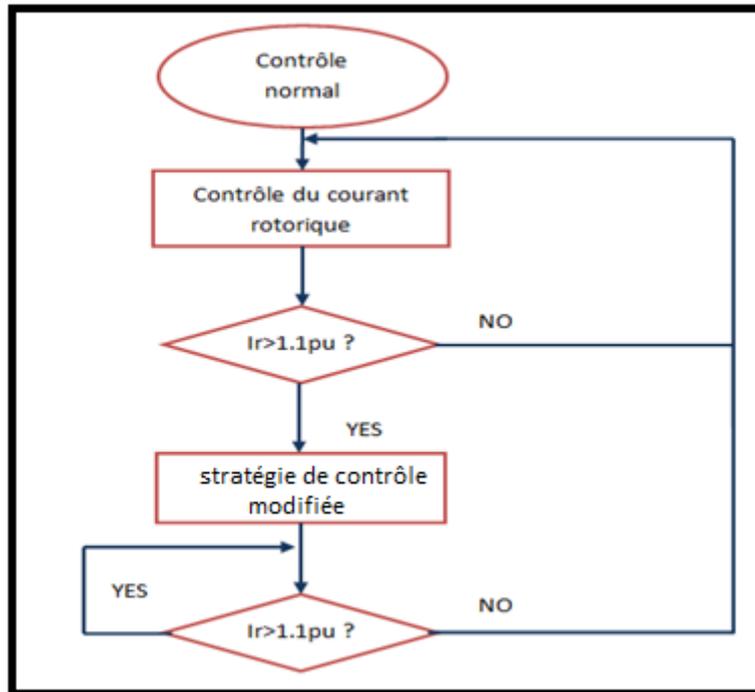


Figure 29: Organigramme de commande de la stratégie de contrôle modifiée

Le modèle de contrôle est décrit par la figure 30 :

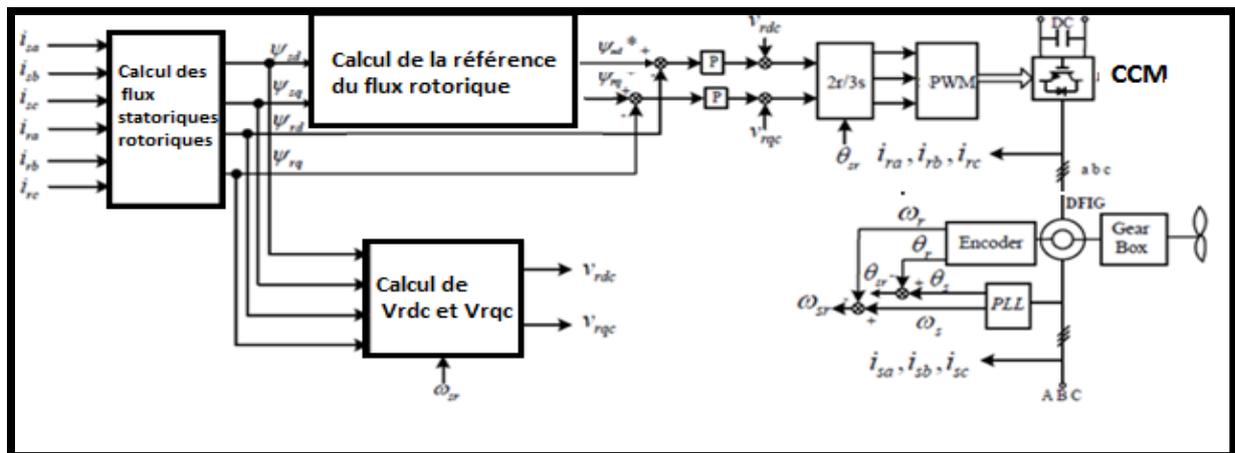


Figure 30: Schéma bloc de la stratégie de contrôle modifiée

2-1-2 Simulation :

Pour cette simulation nous considérons un creux de tension de profondeur 30%, et de durée 200ms, appliqué à l'instant 0.7s. Les blocs utilisés pour la réalisation du modèle sont défini à l'Annexe B.

La différence entre le flux statorique et rotorique durant le défaut est donnée par la figure 31 :

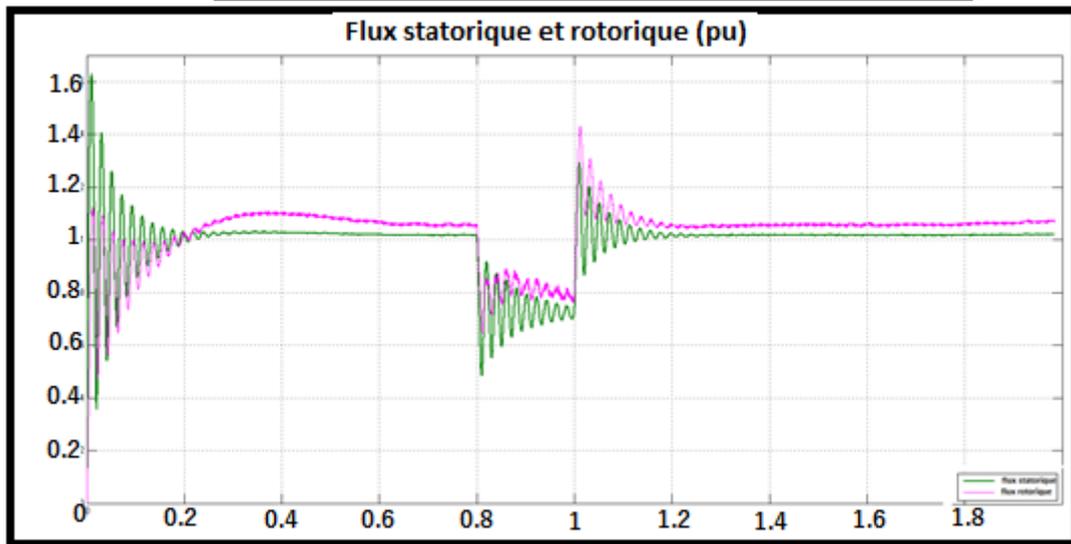
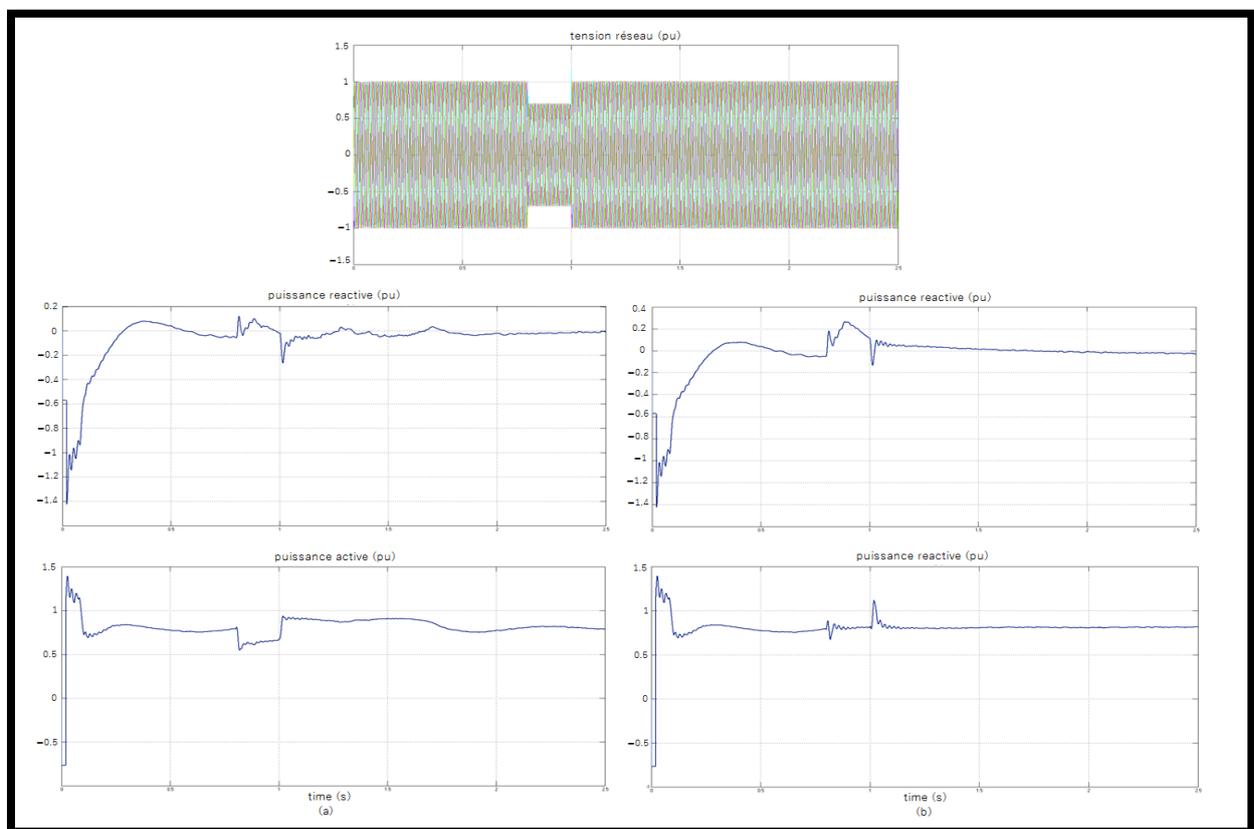


Figure 31: Différence entre flux rotorique et flux statorique avec la stratégie de contrôle modifiée, durant le creux de tension

D'après la figure 31, On observe que la différence entre le flux rotorique et statorique est minime.

Les résultats obtenus sous Matlab/Simulink sont donnés par la figure 32 :



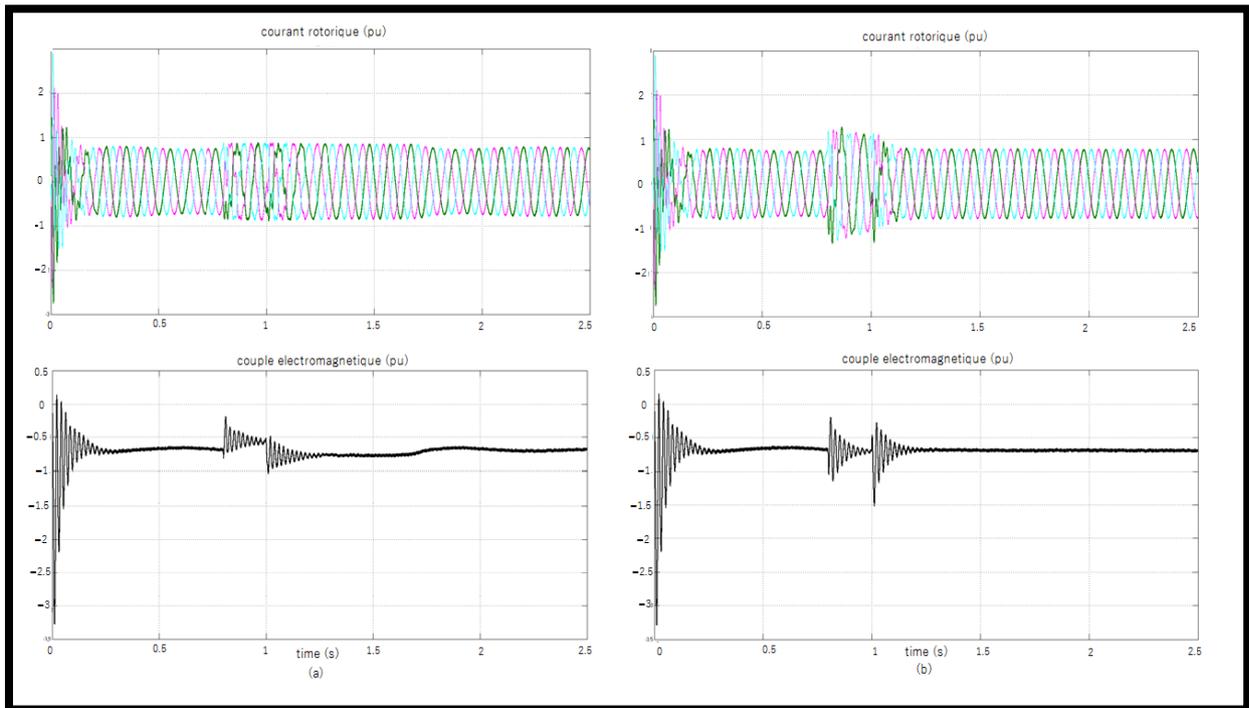


Figure 32: Comparaison du comportement de la MADA durant une chute de tension de 30 % pendant 0.2s, avec (a) et sans (b) la stratégie proposée.

Les oscillations du couple sont importantes sans la stratégie proposée (b) sont importants, alors qu'avec la stratégie(a), l'oscillation du couple est réduite. Les courants rotoriques sont limités dans les deux cas, mais sans la stratégie (b) la forme des courants rotoriques est déformée. Le pic de la puissance réactive au moment du défaut est réduit avec la stratégie de contrôle modifiée(a). Le pic de la puissance active au moment du rétablissement de la tension est éliminé avec la stratégie de contrôle modifiée.

2-1-3 Faisabilité de la stratégie de contrôle modifiée :

Malheureusement, le maintien de la production en régime perturbé du contrôle proposé est limité par le dimensionnement relativement faible des convertisseurs de puissance par rapport à l'ensemble du système. L'effet du contrôle est affecté par la gravité du défaut, c'est la raison pour laquelle nous avons étudié le domaine de faisabilité de la stratégie proposée de la MADA contre les creux de tension.

En effet un creux de tension est caractérisé par deux paramètres: l'amplitude et la durée. L'amplitude maximale est prouvée théoriquement, alors que la durée du creux maximale est obtenue par simulation.

Le critère utilisé est que la puissance réactive statorique doit rester dans les limites imposées par le code Grid durant le défaut. En effet durant les défauts, seule une absorption ou fourniture de puissance réactive de 0.3 pu est tolérée.

- Amplitude maximale du creux :

L'expression de la puissance réactive :

$$Q_s = 1.5(v_{qs}I_{sd} - v_{ds}I_{qs}) \quad (II.40)$$

Avec

$$I_{qs} = \frac{1}{L_s L_r - M^2} (L_r \phi_{sq} - M \phi_{rq}) \quad (II.41)$$

Avec $\frac{L_s}{M} \approx 1$ et $\phi_{rq} = k_t \phi_{sq}$, l'équation précédente peut être simplifiée, obtient alors :

$$I_{qs} \approx \frac{M}{L_s L_r - M^2} (1 - k_t) \phi_{sq} \quad (II.42)$$

En substituant (2) dans (1), l'expression de la puissance réactive devient :

$$Q_s = 1.5 \frac{M}{L_s L_r - M^2} (1 - k_t) \phi_s v_s \quad (II.43)$$

L'expression de flux durant le défaut :

$$\vec{\phi}_s = \frac{V_2}{j\omega_s} e^{j\omega_s t} + \frac{V_s - V_2}{j\omega_s} e^{-t/\tau_s} \quad (II.44)$$

Avec :

$$V_2 = pV_s$$

V_2 : la tension après l'apparition du défaut.

P : le degré du creux.

En substituant (II.42) dans (II.40), l'expression de la puissance réactive devient :

$$\overline{Q}_s = 1.5 \frac{M}{L_s L_r - M^2} (1 - k_t) \frac{pV_s}{j\omega_s} e^{j\omega_s t} + \frac{(1 - p)V_s}{j\omega_s} e^{-\frac{t}{\tau_s}} \quad (II.45)$$

Pour trouver l'amplitude maximale du creux de tension que la MADA peut gérer avec la stratégie proposée, un contrôle de puissance réactive est étudié. En effet les variations de la puissance réactive durant l'apparition et la disparition du défaut doivent être limitées, pour assurer un fonctionnement stable du système. La quantité de puissance réactive fournie durant l'apparition du défaut, doit être inférieure à une valeur limite de $Q=0.3$ pu.

Dans l'hypothèse que le creux de tension survient à $t=0s$, l'expression (II.45) devient :

$$Q_s(t = 0) = -1.5 \frac{M}{L_s L_r - M^2} (1 - k_t) \frac{(p)V_s^2}{j\omega_s}$$

$$Q_s(t = 0) < 0.3 \Rightarrow p > 0.6998$$

Donc la stratégie de contrôle modifiée reste valable pour des amplitudes de creux inférieure à 0.3=30%

- Durée du creux :

Nous avons fait des simulations, en appliquant un creux de tension de 30 %, pour déterminer la durée maximale du creux, qu'au-delà la quantité de puissance réactive absorbée durant la disparition du défaut, dépasse la valeur maximale $Q=0.3$ pu.

D'après la figure 33, nous avons constaté que :

- Pour un creux de 30% et de durée 0.4s, la puissance réactive dépasse la valeur maximale à l'instant de disparition du défaut.
- La durée optimale pour un creux de tension de 30% est de 0.3s.

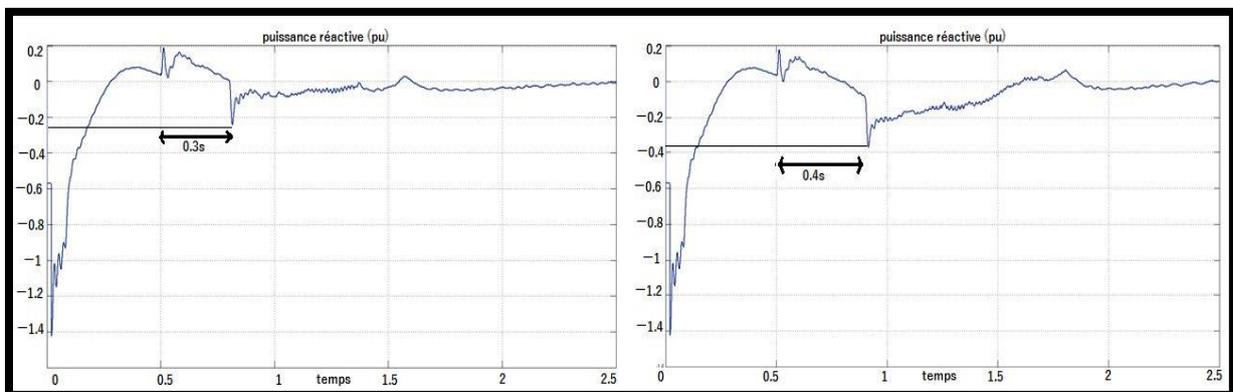


Figure 33: la puissance réactive pour creux de 30% et de durée 0.3s et 0.4s respectivement

Nous avons diminué la gravité du creux de tension à : 25%, 23%, pour voir son effet sur la durée maximale acceptable. Les figures 34 35 représentent les simulations obtenues.

Pour un creux de 25% la durée maximale=1s.

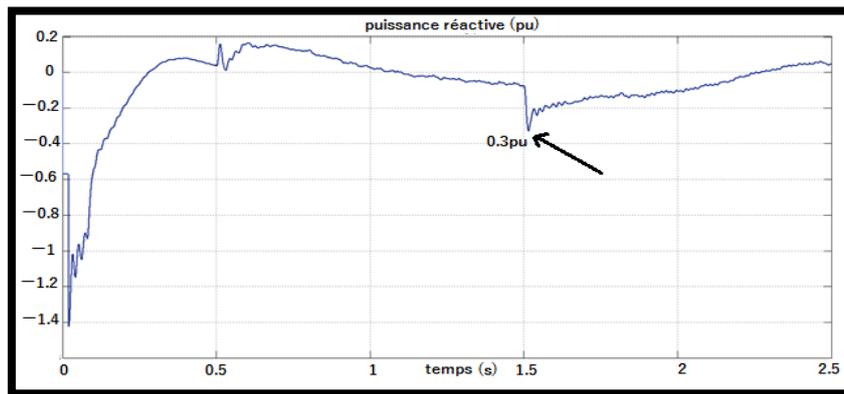


Figure 34: la puissance réactive pour un creux de 25% et de durée de 1s.

Pour un creux de 23% la durée limite=1.5s.

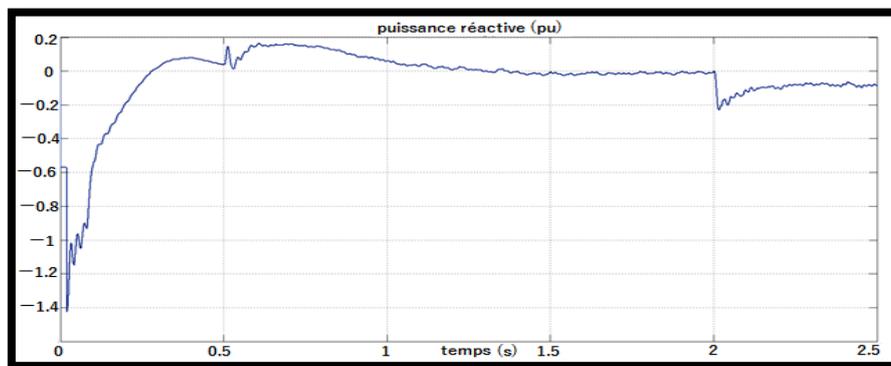


Figure 35: la puissance réactive pour un creux de 23% et de durée de 1.5s

- La durée maximale du creux varie en fonction du degré du creux, en effet pour les faibles creux de tension la durée maximale du creux est grande par rapport aux importants creux.

Le tableau suivant illustre pour une amplitude et une durée de creux de tension, les différents codes grid, que respecte la solution de contrôle modifiée.

Creux	Durée	Code grid
30%	0.3s	---
25%	1s	Spain – Danemark-UK
23%	1.5s	Spain – Danemark-UK- allemand
<23%	>1.5s	Spain – Danemark-UK- allemand

Figure 36: Code Grid

2-2 Méthodes passives:

2-2-1 Résistance dynamique SDBR en série avec le stator :

❖ Fonctionnement :

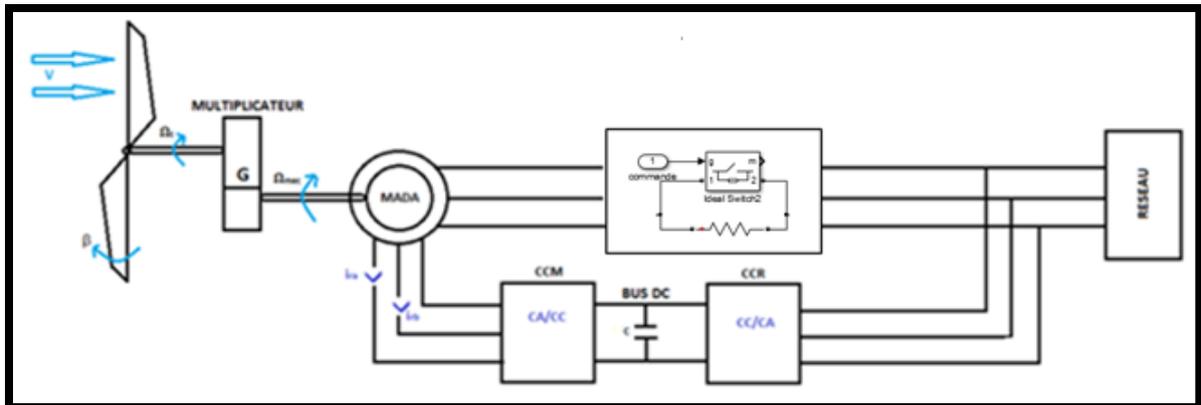


Figure 37: Schéma bloc de résistance dynamique en série avec le stator

La méthode consiste à insérer des résistances en série avec le stator, pour augmenter la tension statorique et par la suite réduire la composante continue au niveau du flux, durant les creux de tension. Cela permettrait de réduire les surtensions au niveau du rotor et par conséquent éviter les pics de courant rotorique. De plus la limitation du courant rotorique peut également réduire les surtensions au niveau de V_{dc} qui pourrait endommager le convertisseur.

La tension statorique après défaut devient la somme de la chute de tension et la tension aux bornes des résistances, comme indiqué dans la figure 38 :

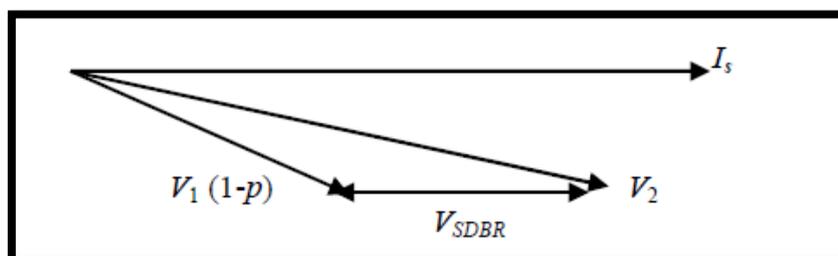


Figure 38: Représentation de Fresnel de la tension statorique, durant le défaut, avec SDBR

V_{SDBR} : La tension aux bornes des résistances dynamiques.

P : degré du creux de tension.

V_2 : Tension statorique.

Le choix de la valeur de la résistance dynamique est important, une résistance de grande valeur se traduira par une large dissipation d'énergie, et des tensions moins élevées aux bornes du rotor. Au contraire, une résistance de faible valeur ne pourra pas limiter le courant de défaut.

Le dimensionnement de la résistance est déterminé selon 2 critères :

- Les résistances doivent être suffisamment grandes pour limiter la tension du rotor à la tension d'entrée maximale tolérée par le convertisseur, évitant ainsi sa détérioration.
- Les résistances doivent être suffisamment petites pour éviter que la tension du stator dépasse la tension du stator maximale.

Durant les défauts, l'évolution de la tension du rotor est donnée par :

$$e_{r0,max}^r = \frac{M}{L_s} \{V_2 |g| + (V_1 - V_2)(1 - g)\} \quad (II.46)$$

Avec :

V_2 : Tension statorique après défaut.

V_1 : Tension statorique avant défaut.

La tension statorique après défaut est la somme de la chute de tension et la tension aux bornes des résistances.

$$V_2 = V_1(1 - p) + V_{SDBR} \quad (II.47)$$

Avec :

V_{SDBR} : La tension aux bornes des résistances dynamiques.

p : degré du creux de tension.

En remplaçant V_2 par son expression, l'expression (II.40) devient :

$$e_{r0,max}^r = \frac{M}{L_s} [V_1 |g|(1 - p) + (1 - g)pV_1 - V_{SDBR}(1 - g - |g|)] \quad (II.48)$$

La tension aux bornes du circuit rotorique nécessaire pour contrôler les différentes grandeurs électriques, ne doit pas dépasser la tension maximale que le convertisseur côté rotor peut générer.

D'où la condition suivante doit être remplie :

$$e_{r0,max}^r \leq V_{RSC,max} \quad (II.49)$$

Etant donné que le convertisseur côté rotor ne peut produire qu'une tension inférieure à la tension continue V_{dc} , sa sortie maximale $V_{RSC,max}$ est calculée de la façon suivante :

$$V_{RSC,max} = \frac{V_{dc}}{2\sqrt{\frac{2}{3}}} \quad (II.50)$$

L'équation (II.49) devient donc:

$$\frac{M}{L_s} [V_1 |g|(1-p) + (1-g)pV_1 - V_{SDBR}(1-g-|g|)] \leq \frac{V_{dc}}{2\sqrt{\frac{2}{3}}} \quad (II.51)$$

Donc :

$$V_{SDBR} \geq V_1 |g|(1-p) + (1-g)pV_1 - \frac{M}{L_s} \frac{V_{dc}}{2\sqrt{\frac{2}{3}}} \quad (II.52)$$

En effet de (II.47), la tension V_{SDBR} est limitée par la tension maximale V_{Smax} , et nous avons :

$$V_{SDBR,max} \leq V_{Smax} - V_1(1-p) \quad (II.53)$$

Donc de (II.52) et (II.53), nous avons les limites inférieures et supérieures de la tension V_{SDBR} :

$$V_1 |g|(1-p) + (1-g)pV_1 - \frac{M}{L_s} \frac{V_{dc}}{2\sqrt{\frac{2}{3}}} \leq V_{SDBR} \leq V_{Smax} - V_1(1-p) \quad (II.54)$$

En remplaçant V_{SDBR} par $V_{SDBR} = R_{SDBR} I_s$, dans (II.54), il en résulte :

$$\frac{1}{I_s} \left\{ V_1 |g|(1-p) + (1-g)pV_1 - \frac{M}{L_s} \frac{V_{dc}}{2\sqrt{\frac{2}{3}}} \right\} \leq R_{SDBR} \leq \frac{1}{I_s} \{V_{Smax} - V_1(1-p)\} \quad (II.55)$$

Pour le calcul de la valeur de la résistance R_{SDBR} , nous avons considéré le pire des cas $p=1$. Ainsi, l'équation (II.55) devient :

$$\frac{1}{I_s} \left\{ (1-g)V_1 - \frac{M}{L_s} \frac{V_{dc}}{2\sqrt{\frac{2}{3}}} \right\} \leq R_{SDBR} \leq \frac{V_{Smax}}{I_s} \quad (II.56)$$

Par application numérique, nous avons trouvé :

$$0.05 \leq R_{SDBR} \leq 1.25 \text{ pu} \quad (II.57)$$

$$R_{SDBR,max} = 1.25 \text{ pu} = 0.275 \Omega$$

$$R_{SDBR,min} = 0.058 \text{ pu} = 0.013 \Omega$$

❖ Contrôle de SDBR :

La stratégie de contrôle est simple et facile à mettre en œuvre, en fonctionnement normal, l'interrupteur est fermé et les résistances sont en mode by-pass, une fois la tension du stator passe en dessous de la valeur nominale, l'interrupteur est ouvert pour laisser passer le courant à travers les résistances.

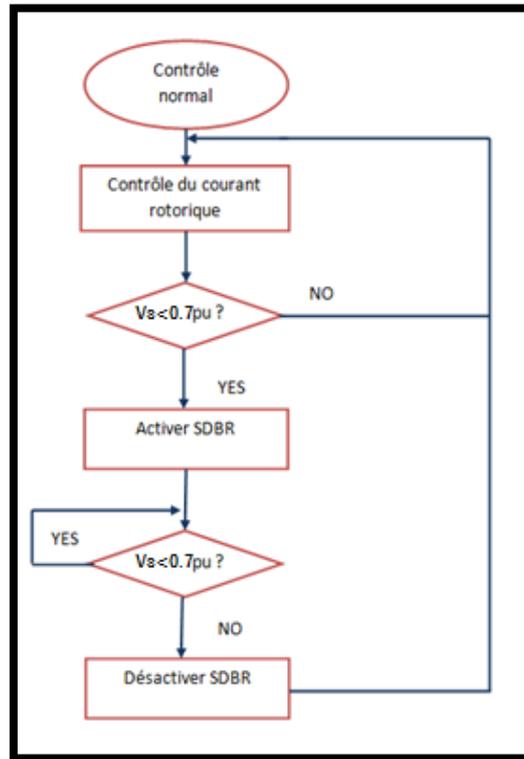


Figure 39: Organigramme de commande de SDBR

❖ Simulation:

Pour cette simulation nous considérons un creux de tension de profondeur 100%, et de durée 150ms, appliqué à l'instant 1s avec $R_{SDBR} = 0.25\Omega$. Les blocs utilisés pour la réalisation du modèle sont défini à l'Annexe B.

La figure 36 représente une comparaison entre le comportement de la MADA durant le défaut, avec la solution SDBR (a), et sans la SDBR (b).

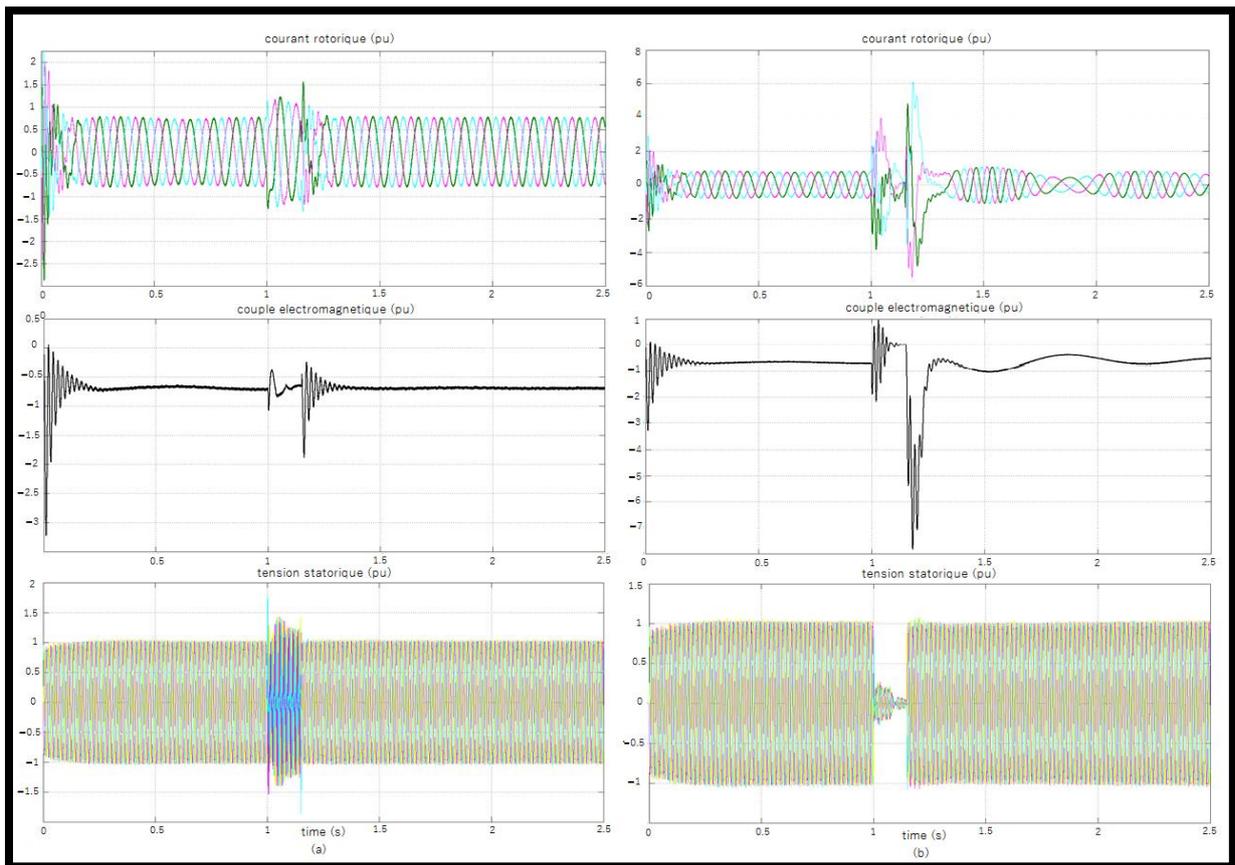
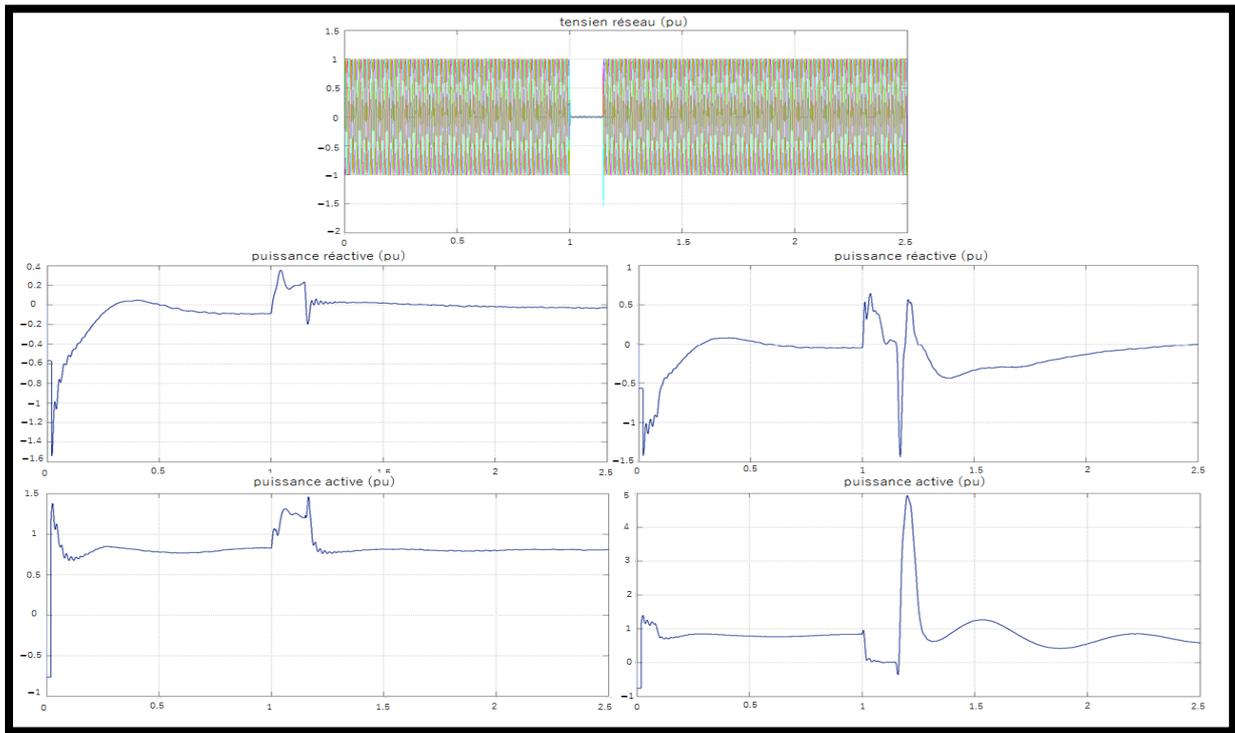


Figure 40: Comparaison du comportement de la MADA durant une chute de tension de 100 % pendant 150ms, (a) avec et (b) sans la SDBR.

La puissance réactive, pour (a) augmente durant le défaut, avec une toute petite quantité $Q=0.2$ pu absorbée au moment de la disparition du défaut, et elle revient rapidement à zéro. Alors que pour (b) durant le défaut, l'énergie réactive augmente jusqu'à 0.5 pu, et une grande quantité absorbée $Q=1.5$ pu durant la disparition du défaut, l'énergie ne revient pas instantanément à son état initial.

La puissance active, pour (a) augmente durant le défaut et revient rapidement à son état initial, une fois le défaut est terminé. Tandis que pour (b) la puissance active est réduite durant le défaut, avec un pic important au moment de la disparition du défaut.

Le courant rotorique, pour (a) est limité, il reste inférieur à la valeur maximale 2pu. Alors que pour (b), le courant n'est pas limité il dépasse 2pu, et atteint 3 fois la valeur maximale durant la disparition du défaut, la forme des courants reste perturbée après le rétablissement de la tension. Les oscillations du couple électromagnétique pour (b) sont importantes, alors que pour (a) les oscillations sont acceptables.

Pour (a) durant le défaut la tension statorique est maintenue constante grâce à l'ajout des résistances, limitant ainsi les perturbations causées par le défaut. Alors que pour (b) la tension statorique s'annule.

Les résultats obtenus ont prouvé l'efficacité de la SDBR, et la capacité du système à lutter contre les défauts est améliorée. Nous avons remarqué que la tension V_{dc} augmente brusquement et dépasse la valeur acceptable avec la SDBR (figure 43), nous avons proposé d'ajouter avec la SDBR, un DC chopper aidant à limiter la tension V_{dc} , cette stratégie est détaillée dans la partie suivante.

2-2-2 DC Chopper :

❖ Fonctionnement :

Le circuit de limitation de tension du bus continu DC Chopper (figure 42) se compose d'un interrupteur et d'une résistance qui sont insérés en parallèle avec le condensateur, pour limiter sa tension V_{dc} , pendant les creux de tension.

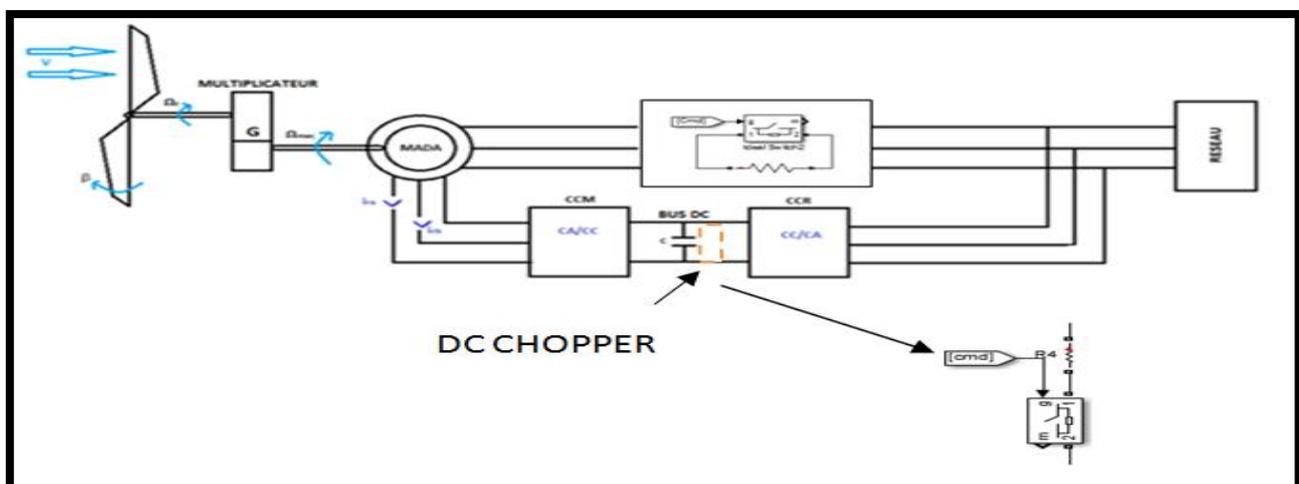


Figure 41: MADA avec DC Chopper et SDBR

❖ **Commande de DC CHOPPER :**

En fonctionnement normal, l'interrupteur est ouvert, une fois une surtension de V_{dc} est détectée, l'interrupteur se ferme, et l'excès d'énergie est dissipé à travers la résistance, limitant ainsi la tension V_{dc} .

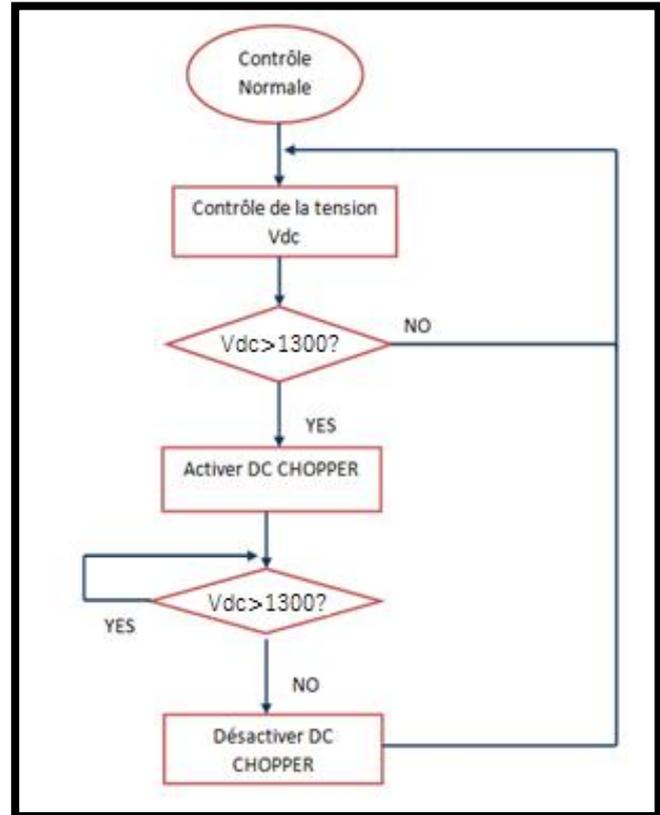


Figure 42: Organigramme de contrôle de DC CHOPPER

❖ **Simulation :**

Pour cette simulation nous considérons un creux de tension de profondeur 100%, et de durée 150ms, appliqué à l'instant 1s. Les blocs utilisés pour la réalisation du modèle sont défini à l'Annexe B.

La figure 43 représente une comparaison entre l'évolution de la tension du bus continu avec (a) SDBR, (b) SDBR+DC CHOPPER.

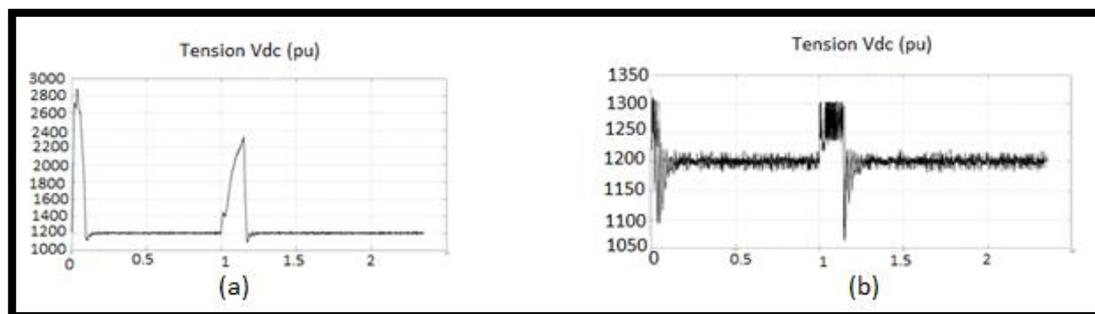


Figure 43: Comparaison de l'évolution de la tension du bus continu durant une chute de tension de 100 %, (a) SDBR et (b) SDBR+DC CHOPPER

La tension du bus continu est limitée avec l'ajout de DC CHOPPER.

2-2-3 Combinaison des méthodes :

D'après les résultats obtenus précédemment nous avons conclu que pour la stratégie de contrôle modifiée CM, elle n'est valable que pour les faibles creux de tensions, et nous avons trouvé que l'amplitude maximale du creux est 30% de la tension nominale. Alors que la stratégie SDBR utilisée avec le contrôle classique, donne des meilleurs résultats, même lorsque la chute de tension est totale (100% du creux).

L'idée de cette stratégie est de pouvoir disposer d'un outil permettant de faire un lien entre la profondeur du creux et la solution optimale. La méthode est basée sur la combinaison de deux solutions citées précédemment pour remédier aux défauts.

Pour les faibles niveaux de creux (entre 10-30 %) la stratégie de contrôle modifiée est utilisée, désactivant le contrôle classique ainsi que l'utilisation la protection matérielle SDBR. Alors que pour les importants creux (supérieure à 30%), la stratégie de contrôle modifiée est désactivée, et la SDBR est utilisée avec le contrôle classique.

La figure 44 représente l'organigramme de contrôle de la méthode combinée.

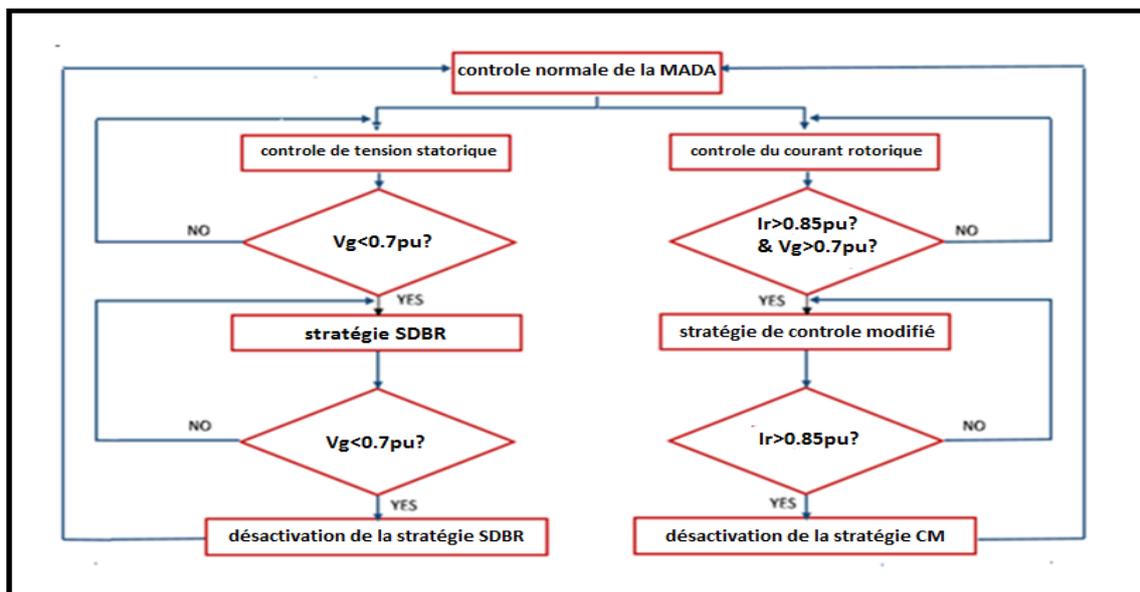


Figure 44: Organigramme de contrôle de la méthode combinée

La commande de contrôle modifiée est déclenchée en cas de sur courants sur les enroulements rotoriques ($I_r > 0.85 \text{ pu}$), avec condition que la profondeur du creux est supérieure à 30% ($V_g > 0.7$). La détection de la profondeur du creux est déterminée par la tension V_s .

La commande de la stratégie SDBR est déclenchée en cas d'une baisse inférieure à 30% de la tension nominale ($V_g < 0.7$).

La figure 45 représente le contrôle éclaté de la combinaison des méthodes

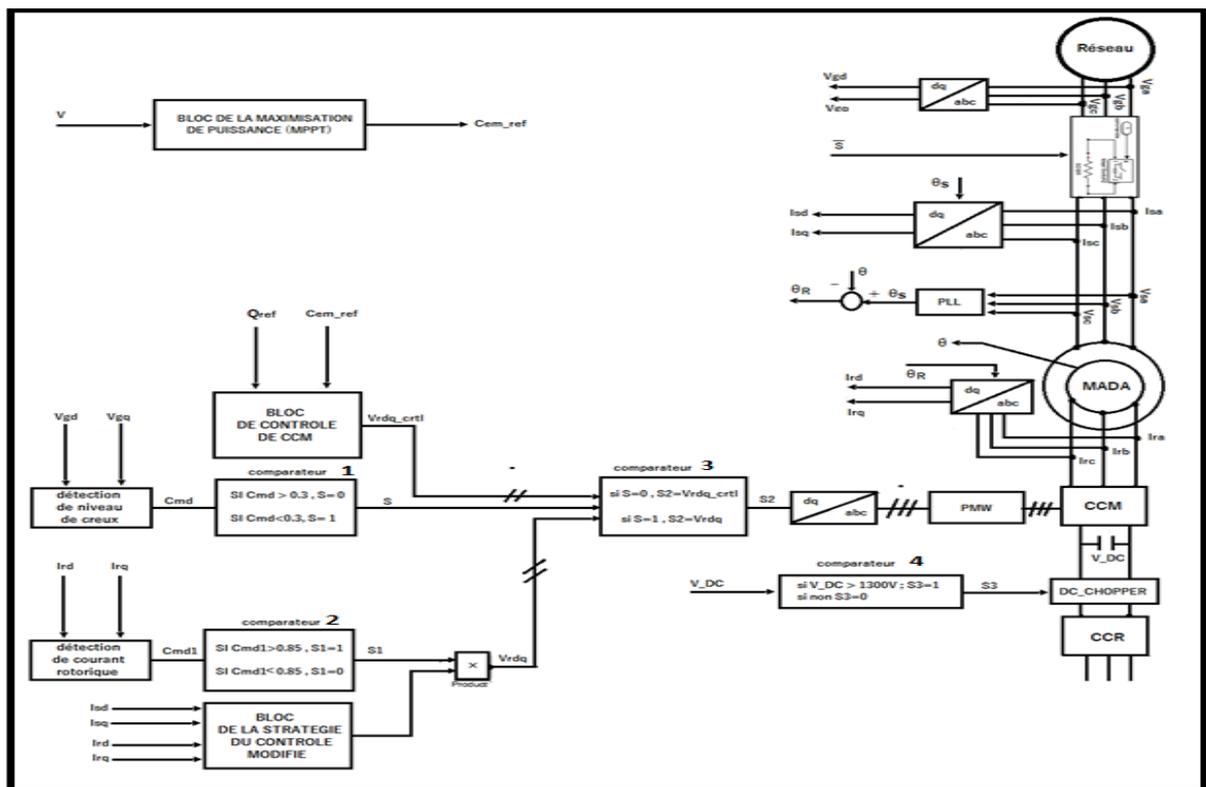


Figure 45: Contrôle de la méthode combinée

Le bloc de détection de creux est prévu pour envoyer la profondeur du creux de tension, au comparateur 1, qui délivre en sortie le signal de commande S, l'entrée du comparateur 3, et ce signal qui gère l'activation ou la désactivation de la SDBR. Le bloc de détection de courant rotorique mesure l'amplitude du courant rotorique, et l'envoie au comparateur 2, qui détermine soit l'activation soit la désactivation de la stratégie de contrôle modifiée.

Le comparateur 3 c'est lui qui sélectionne la solution à choisir, selon la profondeur du creux, le contrôle classique avec la SDBR, ou la stratégie de contrôle modifiée.

Le DC CHOPPER est activé lorsqu'une surtension de la tension Vdc, est détectée par le comparateur 4.

- **Simulation :**

Pour vérifier l'efficacité de la stratégie, nous avons appliqué des différents profils de creux de tensions. Les blocs utilisés pour la réalisation du modèle sont défini à l'Annexe B. Les simulations sont obtenues par Matlab se présentent ainsi selon les cas:

- 1^{er} profil du creux de tension :

Une série de creux de tension est appliquée (figure 45).

Le premier est appliqué à partir de $t=0.7s$, sa durée est 150ms, et sa profondeur 100%.

Le deuxième creux de profondeur 30%, et de durée 200ms est appliqué à $t=1.2s$.

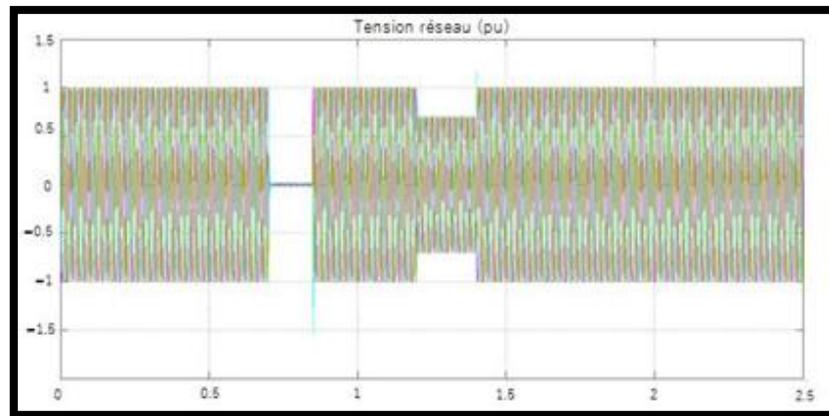
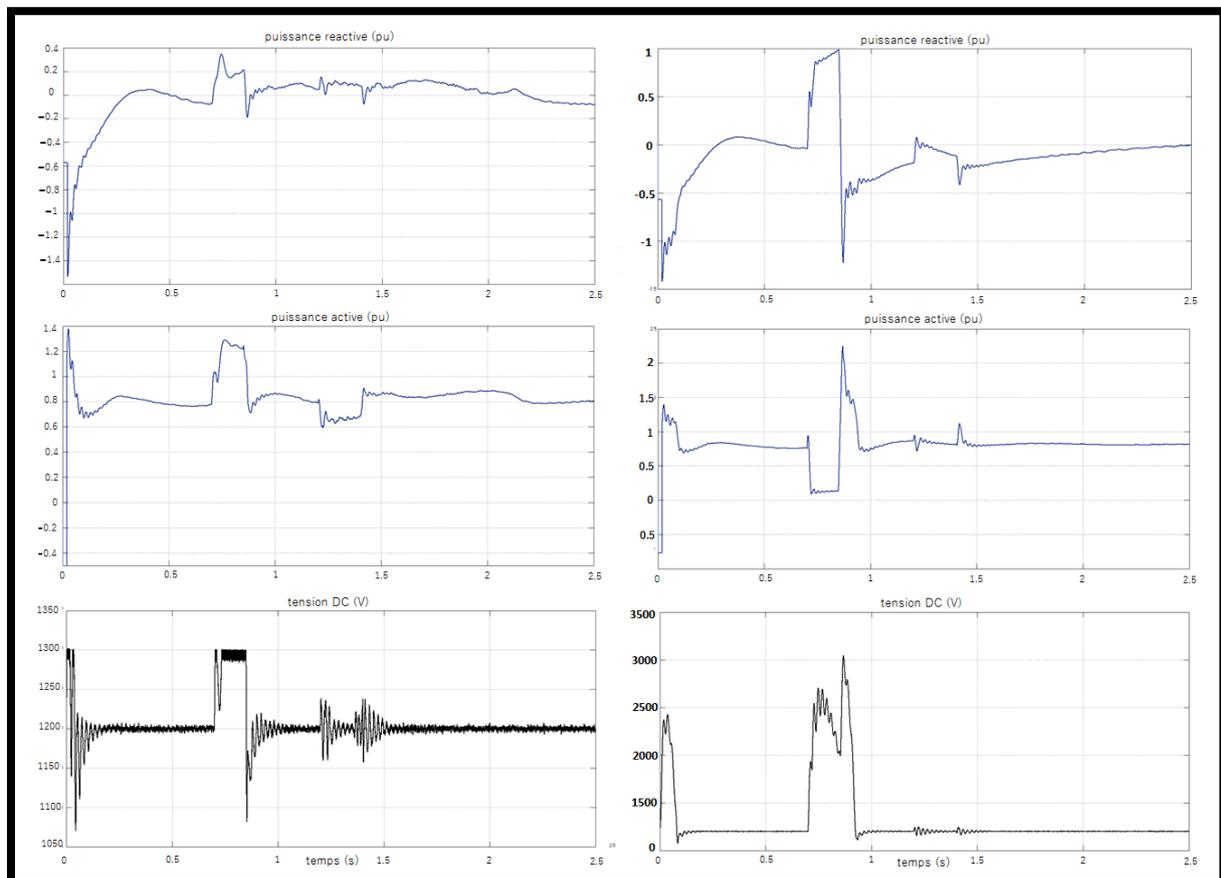


Figure 46: Profil du 1er creux de tension

La figure 46 représente les résultats obtenus :



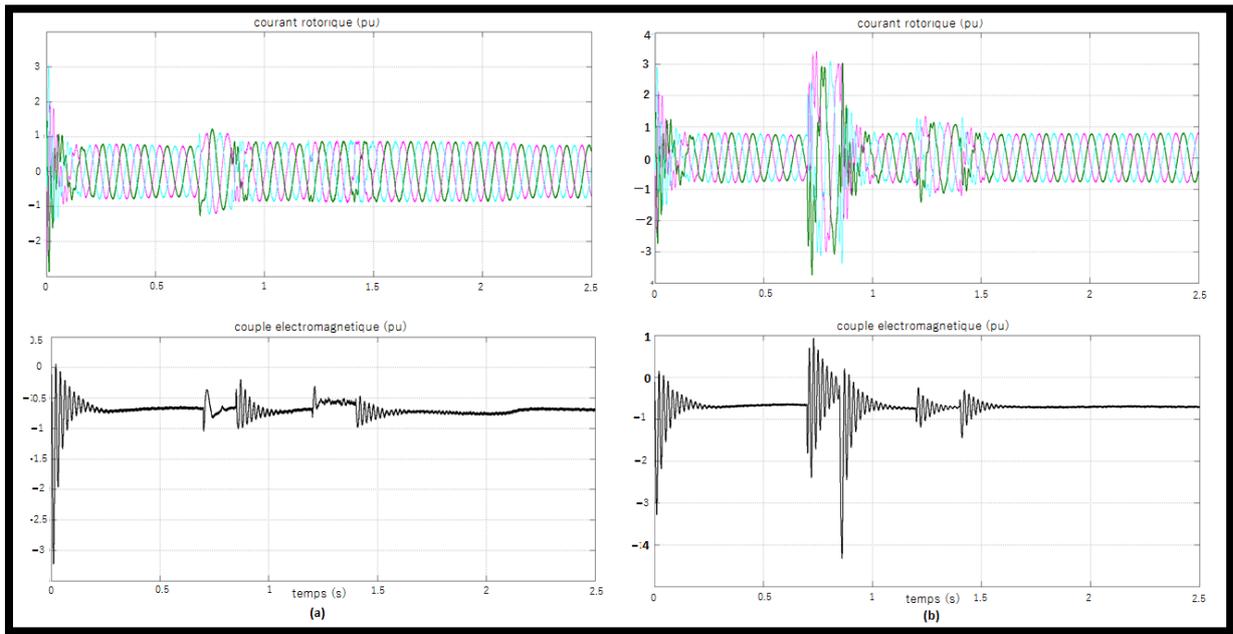


Figure 47: Simulation du comportement de la MADA, durant le 1er profil du creux de tension, (a) avec et (b) sans la stratégie

- 2ème profil de creux de tension :

Une série de creux de tension est appliqué, (figure 48).

- Le premier est appliqué à partir de $t=1s$, sa durée est 150ms, et sa profondeur 100%.
- Le deuxième creux de profondeur 25%, et de durée 250ms est appliqué à $t=1.15s$.
- Le troisième creux de profondeur 50%, et de durée 500ms est appliqué à $t=1.4s$.

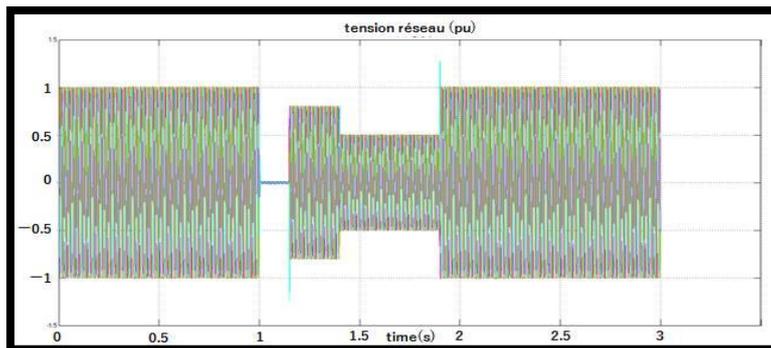


Figure 48: Profil du 2ème creux de tension

La figure 49 représente les résultats obtenus :

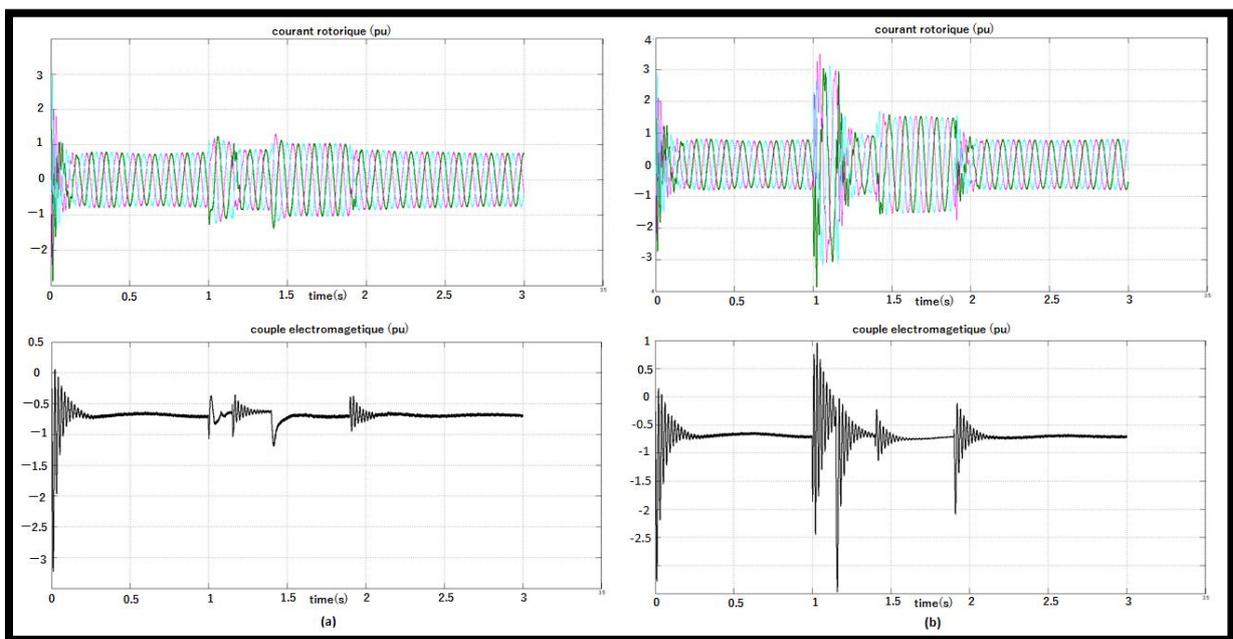
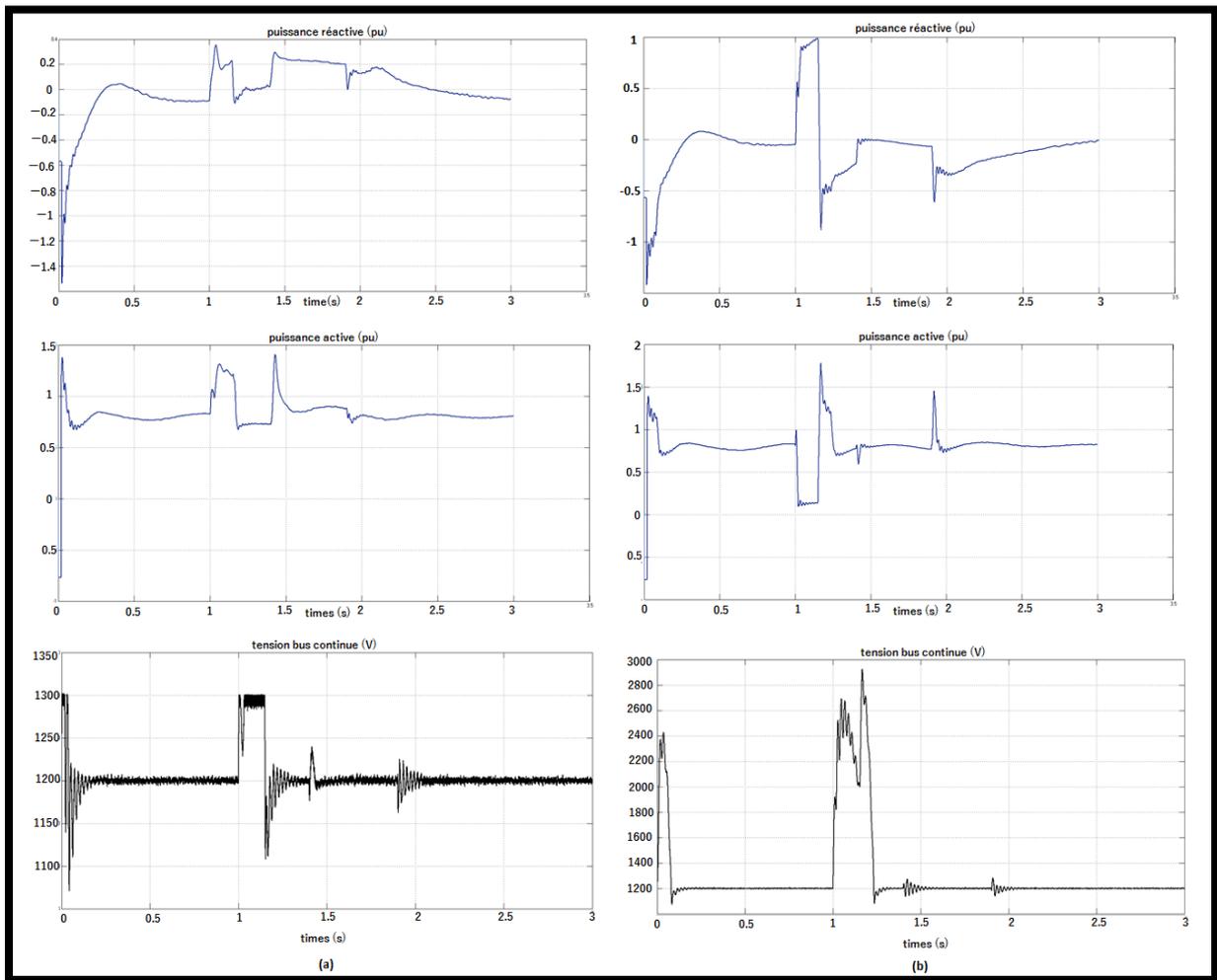


Figure 49: Simulation du comportement de la MADA, durant le 2^{ème} profils de creux de tension, (a) avec et (b) sans la stratégie

D'après les résultats obtenus pour le 1^{er} profil de creux de tension, nous avons constaté que la combinaison a été bien vérifiée. Pour le 1^{er} creux de 100%, les perturbations du défaut ont été éliminées par la solution SDBR, tandis que pour le 2^{ème} creux de 30%, la stratégie de contrôle modifiée est employée.

Les résultats obtenus pour le 2^{ème} profil constitué de trois creux de tension liés, prouvent la performance de la combinaison, elle reste valable quelle que soit la forme du creux de tension. Les grandeurs électriques sont contrôlées et limitées ; le courant rotorique ne dépassant pas 2 pu, la tension Vdc est limitée, les variations des puissances active et réactive sont contrôlées.

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail est de proposer des solutions aux contraintes imposées en termes de tenue aux creux de tension appliqués aux systèmes éoliens à base de la MADA.

L'état de l'art des différentes structures de conversion éolienne utilisant les machines électriques a été focalisé sur les éoliennes à vitesse variable à base de la MADA, compte tenu de leurs avantages.

Avant de procéder à la synthèse d'un système de commande, nous avons établi pour chacun des constituants du système éolien à base de la MADA un schéma bloc.

Ensuite nous avons détaillé les stratégies qui assurent la commande du système éolien; Parmi ces stratégies on cite : la stratégie MPPT qui consiste en l'action sur le couple électromagnétique qui va permettre d'obtenir une vitesse de rotation optimale et ainsi maximiser la puissance extraite. Ensuite nous avons présenté la commande des convertisseurs de puissance, qui sont contrôlés en utilisant la commande vectorielle, ce qui permet la commande découplée des puissances active et réactive. Le dernier contrôle s'appuie sur la limitation de puissance extraite lorsque la vitesse de vent devient trop forte, pour protéger le système éolien.

A travers des simulations, nous avons saisi le déséquilibre et l'instabilité causés par un creux de tension sur le système éolien, et nous avons conclu qu'une protection était nécessaire, pour répondre aux nouvelles normes imposées aux parcs éoliens, comme pouvoir assurer la continuité de fourniture de l'énergie électrique durant les défauts.

Nous avons proposé des solutions, la 1^{ère} qui consistait en l'amélioration du contrôle classique du système éolien durant le défaut, la performance de cette solution a été évaluée à travers des simulations sous Matlab/Simulink, en effet, grâce à la stratégie proposée le courant de défaut et la surtension dans le bus continu sont limités, et la capacité de la MADA à lutter contre les défauts a été amélioré.

Toutefois, nous avons montré que cette solution est limitée, elle ne peut être applicable que pour faibles creux de tension. Pour remédier à ce problème, nous avons proposé la deuxième solution qui consiste à insérer des résistances en série avec le stator,

pour augmenter la tension statorique et par la suite réduire la composante continu au niveau du flux, durant les creux de tension. Cela permettrait de réduire les survoltages au niveau du rotor et par conséquent éviter les pics de courant rotorique. Ensuite nous avons proposé l'ajout d'un circuit de limitation de tension du bus continu DC Chopper inséré en parallèle avec le condensateur, pour limiter la tension V_{dc} , pendant les creux de tension importants. La solution a été implantée sous Matlab/Simulink, et les résultats obtenus sont très satisfaisantes.

Nous avons proposé une stratégie qui regroupe deux solutions, et permet la sélection de la solution optimale en fonction de degré du creux. La stratégie a été vérifiée pour différents profils de creux, et les résultats obtenus sont très satisfaisantes.

Comme suite à ce travail nous proposons la mise en œuvre d'un banc éolien comportant une MADA entraînée par une MCC (Machine à Courant Continu), et assurer le contrôle commande des convertisseurs CCM et CCR (développé sous Matlab) par le biais du D.S.P.

Bibliographie :

- [1] S. Mekhtoub « Etude du générateur asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne », Ecole Nationale Polytechnique Département de Génie Electrique Spécialité Electrotechnique, 2007.
- [2] A.TELLI « Etude et commande d'une éolienne à vitesse variable intégrée au réseau MT. », Thèse de Magister en Electrotechnique. Faculté de Génie Electrique d'Oran, 2012.
- [3] N.LAVERDURE « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires », Thèse de Doctorat d'Etat en Electronique, Electrotechnique, Automatique et Traitement du signal. Institut National Polytechnique de Grenoble, 2005.
- [4] T.GHENNAM « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation », Thèse de Doctorat d'Etat en Génie Electrique. Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, 2011.
- [5] H.BENNANI "Machine asynchrone à double alimentation, les lois de commande en régime permanent". Département de Génie Électrique, Université LAVAL Québec 2011.
- [6] M.ARHOUDAM, W.ELMAJDOUB "Détection des défauts électriques et mécaniques dans la machine asynchrone par l'analyse du courant statorique" Ecole Normale Supérieure de l'enseignement Technique RABAT 2014.
- [7] K. BEDOUD "Modélisation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne Basée sur une machine asynchrone à double alimentation". Département d'Électrotechnique, Université Badji Mokhtar. Annaba 2013.
- [8] T.Medalel Masaud, "Modeling and control of doubly fed induction generator for wind power" IEEE Transactions on Power Systems 2007.
- [9] Présentation du système électrique Marocain, ONE, 2014.
- [10] J.Lopez, P.Sanchis, X.Roboam, L.Marroyo, Dynamic behavior of the doubly fed induction generator during three-phase voltage dips, 2006.

Annexe A : Les paramètres du système simulé

- **Paramètres de la turbine 1.5 MW**

Vitesse du vent à vitesse nominale et à C_p max : 11 m/s.
vitesse du vent initial : 4m/s.

- **Les paramètres du générateur :**

- Stator (Couplage étoile):
Tension nominale : $V_{sn} = 575V$.
 $R_s = 0.023$ PU.
 $L_s = 0.18$ PU.
- Rotor (Couplage étoile) :
Tension nominale : $V_{rn} = 1975$ V.
 $R_r = 0.016$ PU.
 $L_r = 0.16$ PU.
Mutuelle inductance : $M_{sr} = 2.9$ PU.
- Grandeurs Mécaniques :
Nombre de paires de pôles : $P = 3$.
Moment d'inertie : $J = 0.685s$.
Coefficient de frottement : $f = 0.01$ PU.

- **Les paramètres des convertisseurs :**

Courant maximal du convertisseur coté réseau : 0.8 PU.
 $L_r = 0.3$ PU
 $R_r = 0.003$ PU.
 $V_{dc} = 1200V$.
Capacité du bus continue $C = 10^{-2} F$

Annexe B : Schéma Simulink

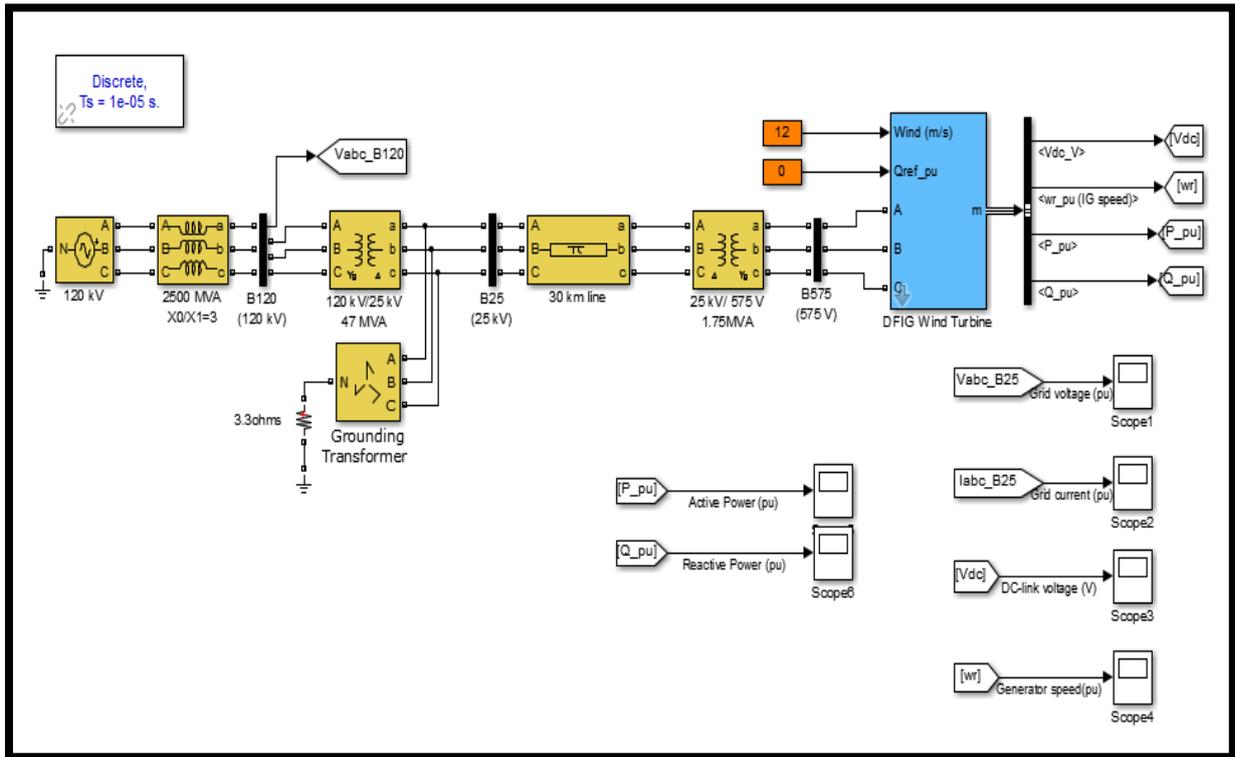


Figure 1 : La connexion entre la MADA et le réseau

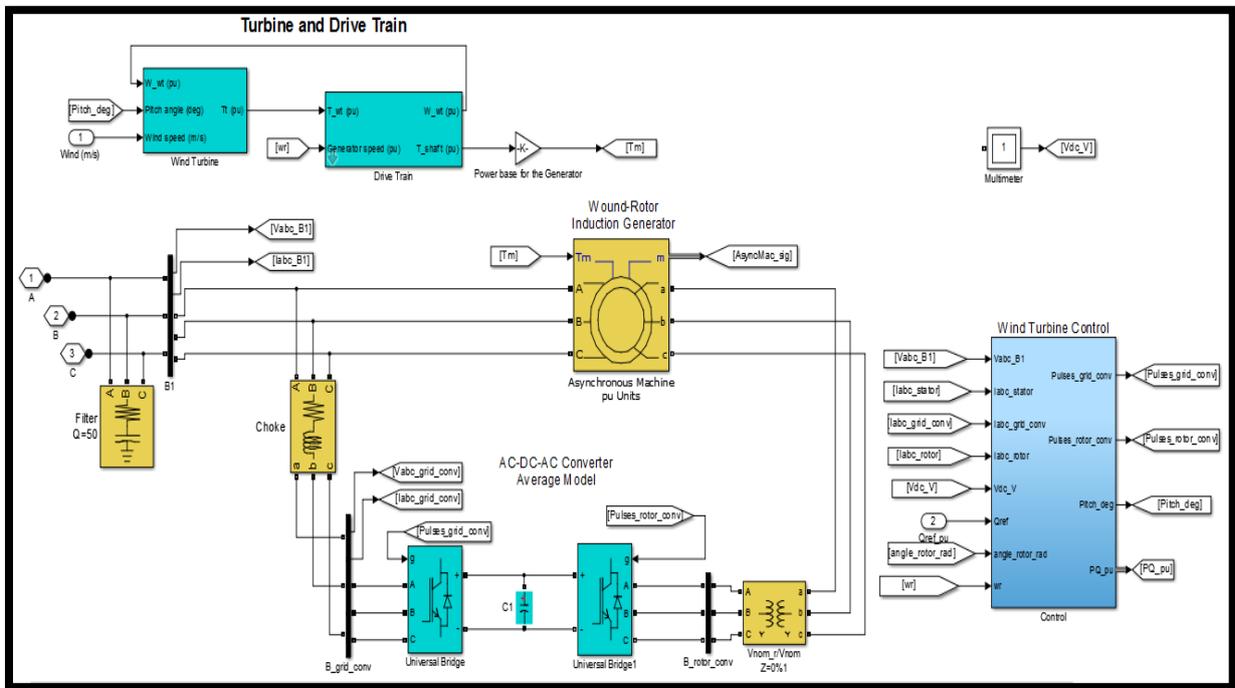


Figure2 : Bloc intérieur de "DFIG Wind turbine "

- Le bloc contrôle contient le bloc des mesures et les deux blocs de contrôle des convertisseurs côté MADA et côté réseau

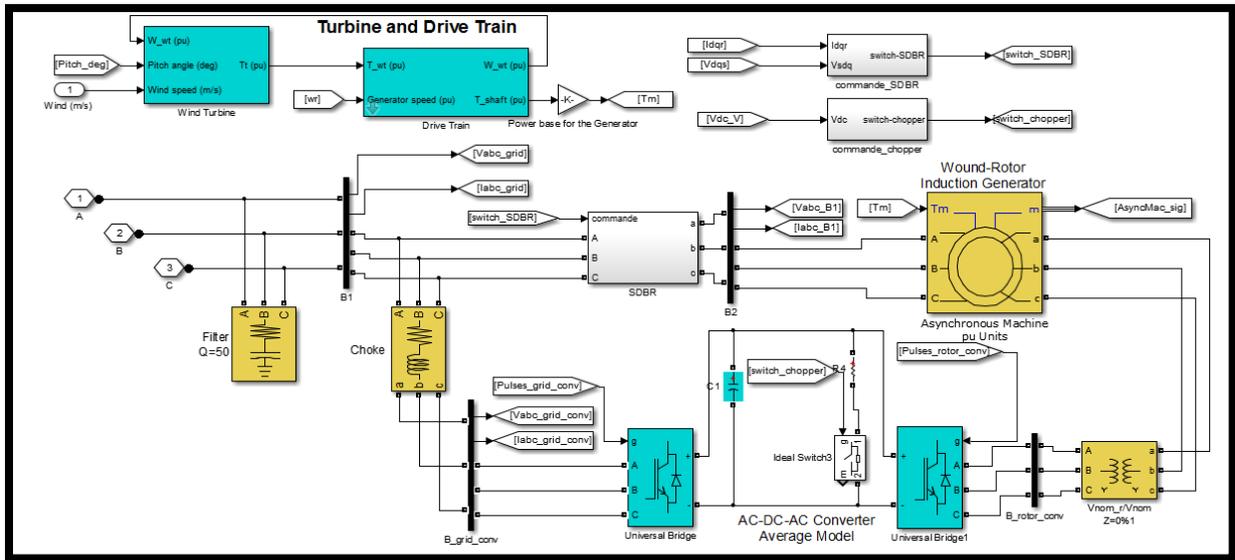


Figure3 : MADA avec SDBR et DC-CHOPPER

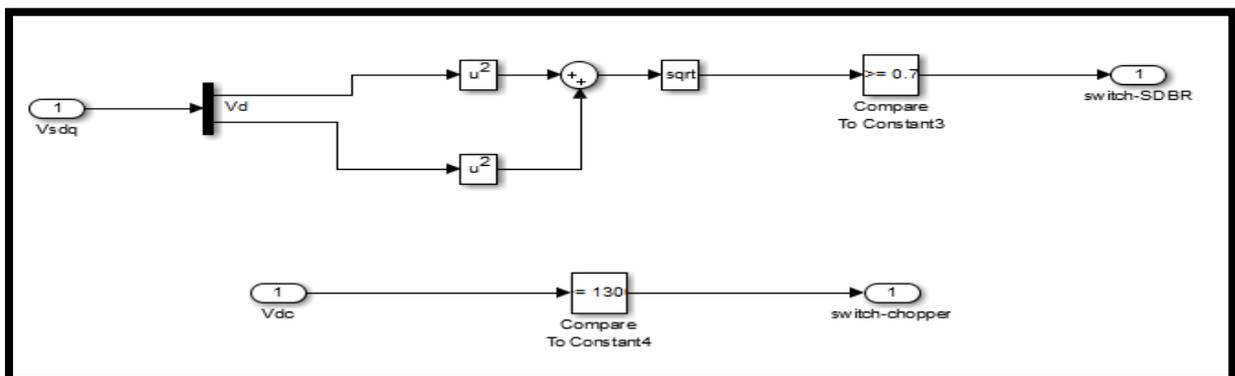


Figure 4 : Commande de SDBR et DC-CHOPPER

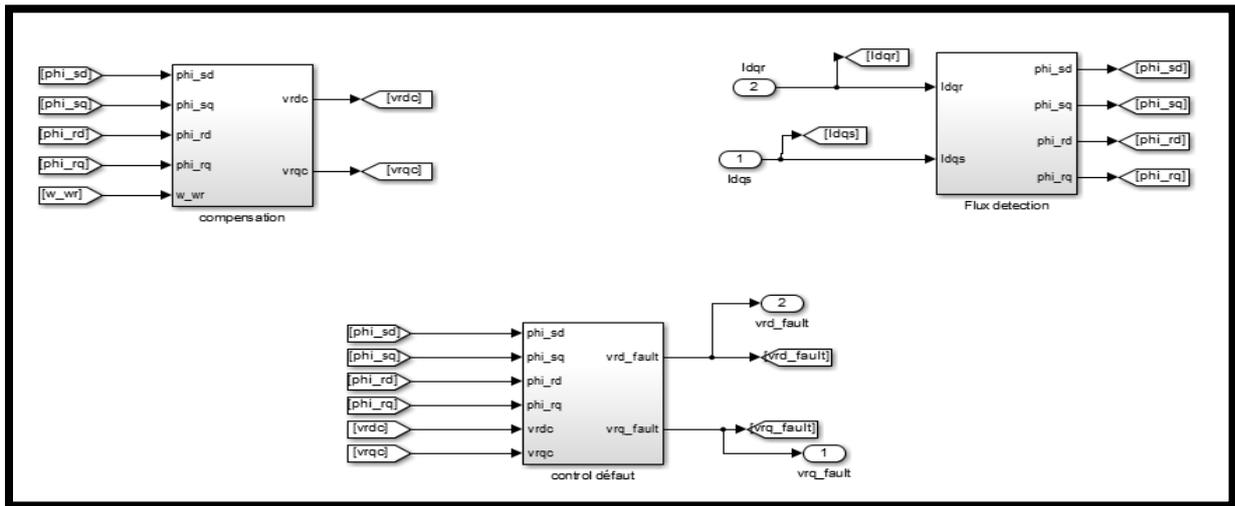


Figure 5: Bloc de la stratégie de contrôle modifiée

- Bloc de la stratégie de contrôle modifiée contient les trois blocs : (calcul de flux – calcul de Vrdc et Vrqc – contrôle de flux)

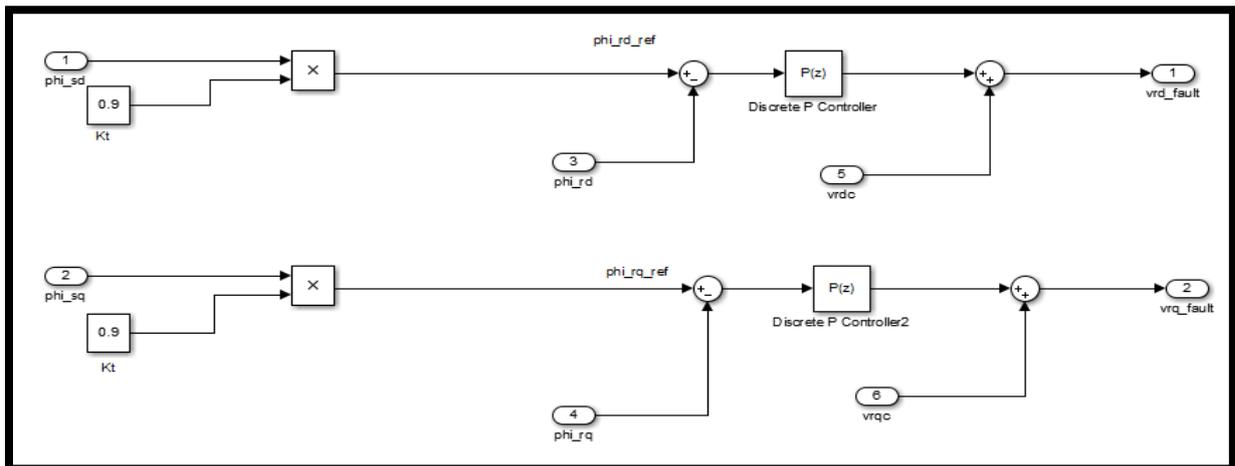


Figure 6: Bloc de contrôle de flux pour la stratégie de contrôle modifié

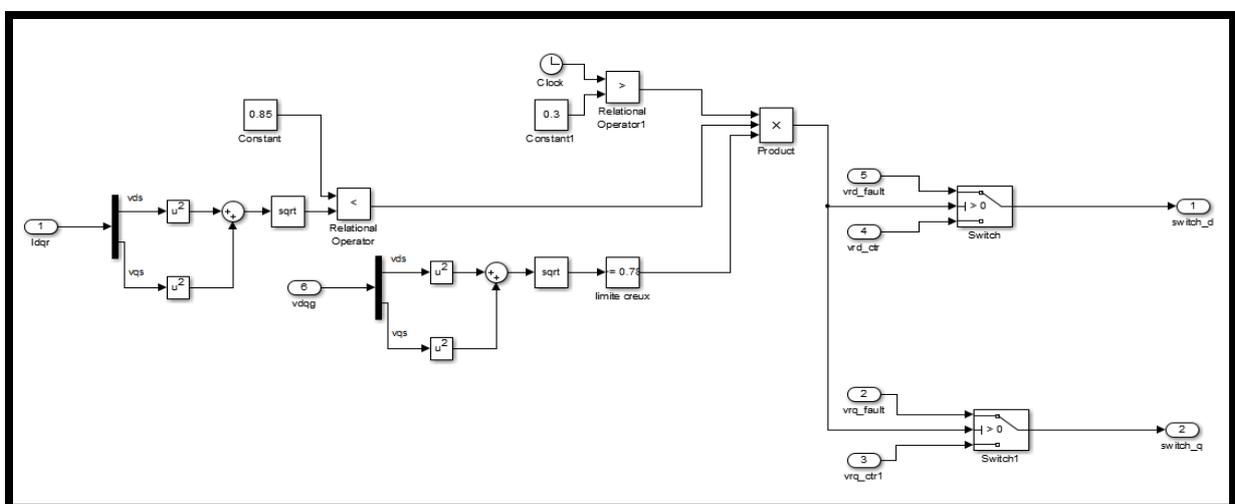


Figure 7: Commande de la stratégie de contrôle modifié