

## **UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET**

**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES**

**DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**



# **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

**Pour l'obtention du diplôme de Master**

**Domaine : Sciences et Technologie**

**Filière : Électrotechnique**

**Spécialité : Commandes Électriques**

## **THÈME**

**Contrôle et Diagnostic du convertisseur DC/AC d'une  
chaîne de conversion éolienne basée sur une GSAP  
connectée au réseau**

**Préparés par : OGUIBA Serra et HEROUALA Manal  
Devant le Jury :**

<b>Noms et prénoms</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
<b>Y.MIHOUB</b>	<b>MCA</b>	<b>Président</b>
<b>S.HASSAINE S.LARIBI</b>	<b>Pr MCA</b>	<b>Examineurs</b>
<b>D.TOUMI A.ABDELLAH M.LARBI</b>	<b>MCB Doctorant Pr</b>	<b>Encadrants</b>

# *Remerciements*

*Au début, nous tenons à remercier et d'exprimer notre gratitude à Allah de m'avoir donnée le courage et la santé durant toutes ces années d'étude, pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.*

*Nous remercions notre encadrant Monsieur Larbi Mohamed, pour son soutien tout au long de cette mémoire.*

*Nous remercions aussi notre encadreur Monsieur Toumi Djilali et Abdellah Abderrahmane pour son précieux aide dans le cheminement de cette étude.*

*Nous tenons également à remercier tous les membres de jury d'avoir.*

## ***Dédicace***

*Nous dédions ce modeste travail*

*A nos très chers familles d'abord à nos chers parent, que  
dieu les protège pour leurs patiences, leurs  
Amours, leurs soutiens et leurs encouragements.*

*A nos chères sœurs et frères.*

*A tous nos amis et à ceux qui nous connaissent.*

# Notations symboliques

GSAP	Génératrice Synchrones à Aimant Permanent
DC / AC	Continu / Alternatif
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
MLI	Modulation de largeur d'impulsions
M.P.P.T	Maximun Power Point traking
PI	Proportionnel Intégral.
PLL	Phased Locked Loop
ACPV	Average Current Park's Vector

## Notion générale

$v$	Vitesse de vent.
$C_{aér}$	Couple aérodynamique de l'éolienne
$\beta$	Angle d'orientation des pales
$R$	Rayon de la pale
$C_g$	Le couple mécanique sur l'arbre de la génératrice après multiplicateur,
$\Omega$	Vitesse angulaire
$\Omega_t$	Vitesse angulaire de la turbine
$\Omega_{méc}$	Vitesse mécanique de la génératrice
$\Omega_g$	La vitesse de rotation de la génératrice.
$\Omega_{ref}$	Vitesse mécanique de référence
$G$	Le gain du multiplicateur de vitesse.
$J$	Moment d'inertie totale.
$J_t$	Le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des 3 pales de l'éolienne,
$J_g$	Le moment d'inertie de la génératrice,
$P_v$	Puissance de l'éolienne
$\rho$	Masse volumique de l'air $1,225 \text{ kg.m}^{-3}$
$S$	Surface circulaire balayée par la turbine.
$\lambda$	Le coefficient de vitesse spécifique
$\lambda_{opt}$	Vitesse relative optimale de l'éolienne
$P_{éol}$	la puissance captée par la turbine éolienne (W).
$P_{Betz}$	Puissance maximale de l'éolienne
$C_p$	Coefficient de puissance
$C_{pBetz}$	Coefficient de puissance maximal théorique
$C_{éol}$	Couple aérodynamique de la turbine éolienne
$C_t$	Couple de la turbine.

$C_{méc}$	Couple mécanique total appliquée au rotor de l'éolienne
$C_{em}$	Couple électromagnétique.
$C_f$	le couple de frottement visqueux.
$f_v$	Coefficient de frottement visqueux.
$P_{aér}$	Aérodynamique disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur
$P_{élec}$	Puissance électrique produite
$K_p$	Coefficient de l'action proportionnelle du régulateur
$K_i$	Coefficient de l'action intégrale du régulateur.
$V_a, V_b, V_c$	Tensions statoriques dans le repère (abc)
$d$	l'axe direct dans le repère de Park.
$q$	l'axe quadratique dans le repère de Park.
$V_{dqo}$	Tension dans le repère de Park.
$[P(\theta)]$	Matrice de passage dans le repère de Park.
$i_a, i_b, i_c$	Les courants de phase statorique repère triphasé
$\varphi_f$	La valeur crête du flux à vide à travers l'entrefer
$i_d, i_q$	Les courants dans le repère de Park.
$\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$	Vecteur des flux traversant les bobines statoriques.
$R_s$	la résistance d'une phase statorique.
$M_S$	l'inductance propre et l'inductance mutuelle entre les enroulements statoriques.
$P$	nombre de pair de pôles.
$\omega$	vitesse électrique de rotor.
$L_d, L_q$	Les inductances cycliques dans le repère de Park
$\theta_e$	L'angle électrique
$\theta$	L'angle mécanique.
$i_{sd}, i_{sq}$	Les courants dans le repère de Park
$U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$	les tensions d'entrée a l'onduleur
$S_a, S_b, S_c$	signaux de commande MLI des onduleurs
$m$	L'indice de modulation.
$F_p$	Fréquence de la porteuse.
$F_r$	Fréquence du signal de référence.
$r$	Taux de modulation.
$U_r$	Amplitude de la tension de référence
$U_p$	Amplitude de la tension de porteuse.
$V_{dc}$	Tension de bus continu.
$v_{ref}$	Tension de référence.
$C$	la capacité de condensateur de bus continu
$i_s$	le courant de bus continu coté générateur
$i_g$	le courant de bus continu coté réseau
$\omega_g$	la vitesse angulaire électrique du réseau.
$R_t, L_t$	la résistance et l'inductance du filtre
$p, Q$	Les puissances active et réactive débitées au réseau à travers le convertisseur.

## TABLE DES MATIERES

Remerciements	
Dédicace	
Liste symboliques	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale.....	01

### CHAPITRE –I–

#### Modélisation d'une chaîne de conversion Eolienne

I.1 Introduction.....	05
I.2 Définition de l'énergie éolienne.....	05
I.2.1 Descriptif d'une éolienne .....	05
I.2.1.1 Éolienne à vitesse fixe .....	05
I.2.1.2 Éolienne à vitesse variable.....	05
I.2.2 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne .....	06
I.2.2.1 Avantages.....	06
I.2.2.2 Inconvénients .....	06
I.2.3 Différents types d'éoliennes .....	07
I.2.3.1 Les éoliennes à axe vertical .....	07
I.2.3.2 Les éoliennes à axe horizontal .....	07
I.3 Modélisation du système de production éolienne .....	08
I.3.1 Modélisation du vent et de la turbine.....	08
I.3.1.1 Modélisation du vent.....	08
I.3.1.2 Puissance extraite du vent .....	09
I.3.1.3 Loi de Betz.....	09
I.3.1.4 Coefficient de vitesse spécifique .....	11
I.3.1.5 Coefficient de puissance ( $C_p$ ).....	11
I.3.2 Modélisation de la partie mécanique .....	13
I.3.3 Modélisation du multiplicateur .....	14

I.3.4	Modèle de l'arbre de transmission.....	14
I.4	Stratégies de commande MPPT .....	15
I.4.1	Maximisation de puissance avec asservissement.....	15
I.5	Résultats de simulation et interprétation.....	16
I.5.1	les résultats de simulation à vitesse variable.....	17
I.5.2	Les résultats de simulation à vitesse fixe.....	18
I.6	Conclusion .....	19

## **CHAPITRE –II–**

### **Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents**

II.1	Introduction .....	21
II.2	Génératrice à aimants permanents .....	21
II.3	Les avantages et les inconvénients .....	21
II.3.1	Avantages .....	22
II.3.2	Inconvénients.....	22
II.4	Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents.....	22
II.4.1	Hypothèses simplificatrices de la GSAP.....	22
II.4.2	Mises en équation électrique et magnétique dans le repère triphasé.....	22
II.4.2.1	Équation électrique .....	22
II.4.2.2	Equation magnétique .....	23
II.4.2.3	Equation mécanique .....	24
II.4.3	Mises en équation électrique et magnétique dans le repère dq.....	24
II.4.3.1	Transformation de Park .....	24
II.4.3.2	Equations électriques .....	25
II.4.3.3	Equations magnétiques .....	25
II.4.3.4	Équations mécaniques .....	26
II.4.3.5	Expression du couple électromagnétique .....	26
II.5	Modélisation du convertisseur statique .....	26
II.5.1	Convertisseur statique continu-alternatif.....	27
II.5.1.1	Définition de l'onduleur .....	27
II.5.1.2	Modélisation de l'onduleur de tension .....	27
II.5.2	MLI sinus triangle .....	29
II.5.3	Modèle du bus continu .....	30

II.6	Modèle du filtre coté réseau .....	31
II.7	Principe de commande vectorielle.....	31
II.7.1	Modelé de la machine a commandée.....	32
II.7.2	Commande vectorielle direct par compensation .....	32
II.7.2.1	Technique de découplage .....	32
II.7.2.2	Découplage par compensation.....	32
II.8	Détermination des régulateurs .....	34
II.8.1	Calcul des régulateurs de courant.....	34
II.8.2	Calcul du Régulateur de vitesse.....	37
II.8.3	Régulateur de la tension de bus continue .....	38
II.8.4	limitation de courant.....	39
II.8.5	Synthèse du régulateur des courants du filtre .....	40
II.8.6	La boucle de verrouillage de phase .....	41
II.9	Stratégie de commande des puissances injectées au réseau .....	41
II.10	Résultats de simulation et Interprétation .....	42
II.11	Conclusion.....	45

## **CHAPITRE –III–**

### **Contrôle et diagnostic aux défauts des convertisseurs**

III.1	Introduction .....	47
III.2	Définition .....	47
III.3	Etapes de diagnostic .....	47
III.4	Définition et classification des défauts.....	48
III.5	Défauts interne du convertisseur .....	48
III.5.1	Défaut de type court-circuit.....	48
III.5.2	Défaut de type circuit-ouvert.....	49
III.6	Méthodes de détections des défauts .....	50
III.6.1	Approche des vecteurs de Park .....	50
III.6.2	L'analyse de la trajectoire du vecteur courant .....	51
III.6.3	Analyses des défauts par la FFT .....	51
III.6.4	Méthode de la tension de pôle estimée et mesurée .....	52
III.6.5	Diagnostic par logique floue .....	52
III.7	Analyse des conséquences du défaut de circuit ouvert .....	53
III.8	Détection des défauts de circuit ouvert .....	54

III.8.1 Diagnostic par module et angle du vecteur de Park moyen .....	54
III.9 Conception d'un système de diagnostic flou sous Matlab .....	61
III.9.1 Structure du système d'inférence floue (SIF) .....	61
III.9.2 Fuzzification des variables d'entrées et de sorties.....	61
III.9.2.1 Fuzzification de la variable d'entrées (Amplitude) .....	61
III.9.2.1 Fuzzification de la variable d'entrées (Angle) .....	62
III.9.2.2 Fuzzification de la variable de sortie.....	62
III.9.3 L'inférence .....	63
III.9.4 Défuzzification .....	64
III.10 Résultats de simulation.....	65
III.11 Conclusion.....	66
Conclusion générale .....	67
Références bibliographique.....	76

## Liste des figures

Figure I.1 : Types d'éolienne .....	07
Figure I.2 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	08
Figure I.3: Bloc de simulation de la vitesse du vent .....	09
Figure I.4 : Evolution de profil du vent.....	09
Figure I.5 : Tube de courant autour d'une éolienne.....	10
Figure I.6 : Coefficient de puissance pour différents types de turbine.....	12
Figure I.7 : Modèle aérodynamique de la turbine éolienne.....	13
Figure I.8 : Modèle mécanique de la turbine.....	13
Figure I.9 : Schéma bloc du modèle de la turbine.....	15
Figure I.10 : Schéma bloc de la maximisation de puissance extraite avec asservissement de la vitesse.....	16
Figure I.11 : Coefficient de puissance $C_p$ en fonction de $\lambda$ pour différents $\beta$ .....	16
Figure I.12 : Coefficient $C_p$ .....	17
Figure I.13 : Coefficient de vitesse $\lambda$ .....	17
Figure I.14 : puissance aérodynamique à vitesse variable .....	18
Figure I.15 : Couple du multiplicateur à vitesse variable. ....	18
Figure I.16 : puissance aérodynamique à vitesse fixe.....	19
Figure I.17 : couple du multiplicateur à vitesse fixe .....	19
Figure II.1 : Structure du générateur éolien étudié.....	21
Figure II.2 : Passage de système triphasé au système biphasé.....	24
Figure II.3 : Alimentation avec un onduleur. ....	27
Figure II.4 : Schéma d'un onduleur de tension triphasé.....	27
Figure II.5 : principe de la MLI sinus-triangle.....	30
Figure II.6 : Schéma électrique du bus continu.....	31
Figure II.7 : Schéma électrique de filtre de liaison au réseau. ....	31
Figure II.8 : Principe de dé couplages par compensation. ....	34
Figure II.9 : Commande des courants $i_d$ et $i_q$ en deux boucles indépendantes.....	35
Figure II.10 : Boucle de régulateur de vitesse.....	37
Figure II.11 : Boucle de régulation de vitesse.....	37
Figure II.12 : Boucle de régulation de la tension de bus continu.....	39
Figure II.13 : Régulateur PI avec anti-windup.....	40
Figure II.14 : Boucle de régulation du courant direct coté réseau .....	40
Figure II.15 : Schéma fonctionnel de la boucle verrouillage de la phase (PLL).....	41
Figure II.16 : Vitesse de rotation et couple électromagnétique de la GSAP.....	43

Figure II.17 : Courants direct et quadratique de GSAP .....	43
Figure II.18 : Courants statorique et puissance électromagnétique de GSAP. ....	43
Figure II.19 : Tension du bus continu $V_{dc}$ . ....	44
Figure II.20 : Courants et tension injectés au réseau.....	44
Figure II.21 : Courants direct et quadratique injectés au réseau. ....	45
Figure II.22 : Puissance active et réactive injectés au réseau .....	45
Figure III.1 : Court-circuit sur un interrupteur d'un bras .....	49
Figure III.2 : Circuit ouvert sur un interrupteur d'un bras .....	50
Figure III.3 : Courant triphasé injecté au réseau dans le cas de défaut de circuit ouvert d'interrupteur K4.....	53
Figure III.4 : Puissance active injecté au réseau dans le cas de défaut de circuit ouvert d'interrupteur K4.....	53
Figure III.5 : Courant triphasé injecté au réseau dans le cas de défaut de circuit ouvert d'interrupteur K5.....	54
Figure III.6: Puissance active injecté au réseau dans le cas de défaut de circuit ouvert d'interrupteur K5.....	54
Figure III.7 : Schéma globale pour la localisation d'un interrupteur ouvert.....	56
Figure III.8 : Algorithme pour la détection d'un cas de défaut circuit ouvert. ....	56
Figure III.9 : La valeur moyenne du courant triphasée .....	57
Figure III.10 :L'amplitude de courant en repère de Park.....	57
Figure III.11 : L'angle du vecteur de Park .....	58
Figure III.12 : Phase d'interrupteur de défaut .....	58
Figure III.13 : Interrupteur en défaut .....	58
Figure III.14 : La valeur moyenne du courant triphasée .....	59
Figure III.15 :L'amplitude de courant en repère de Park.....	59
Figure III.16 : L'angle de vecteur de Park. ....	60
Figure III.17 : Phase d'interrupteur de défaut .....	60
Figure III.18 : Interrupteur en défaut. ....	60
Figure III.19 : schéma bloc du SIF.....	61
Figure III.20 : Fuzzification de la variable d'entrée « Amplitude » .....	62
Figure III.21 : Fuzzification de la variable d'entrée «Angle ».....	62
Figure III.22 : Fuzzification de sortie « détection ».....	62
Figure III.23 : présentation des règles d'inférence.....	64
Figure III.24 : Exemple de défuzzification en cas de défaut K5 .....	65
Figure III.25 : Exemple de défuzzification en cas de défaut K2.....	65
Figure III.26 : Cas de défaut dans interrupteur K5 .....	66
Figure III.27 : Cas de défaut dans interrupteur K2 .....	66

## Liste des tableaux

Tableau I.1: Coefficients définissant l'évolution de $C_p$ .....	12
Tableau III.1: Diagnostic du défaut d'ouverture d'IGBT utilisant le vecteur de Park.....	55
Tableau III.2 : Table d'inférence.....	63

# *Introduction générale*

---

L'humanité utilise l'énergie du vent depuis des centaines d'années, mais la conversion en énergie électrique est plus récente. Cette conversion a connu une croissance vertigineuse au cours des trois dernières décennies en raison de l'augmentation de la demande énergétique mondiale, des problèmes d'environnement liés à la production des énergies fossiles et nucléaires et de la politique des gouvernements encourageant la forte pénétration des ressources énergétiques renouvelables dans le domaine énergétique national. Par ailleurs, les parcs éoliens atteignent de nos jours les capacités des centrales électriques traditionnelles, ce qui implique la même réglementation pour le raccordement au réseau national afin de répondre aux normes de connexion des parcs d'éoliens [1].

Le choix du type d'aérogénérateur est toutefois difficile. En fait, le choix du générateur électrique pour l'énergie éolienne dépend principalement de plusieurs critères : structure, topologie du convertisseur, environnement (emplacement d'installation de la turbine), performances et coût. Par conséquent, la sélection du générateur électrique le plus approprié pour une éolienne est une tâche ardue

La commande vectorielle permet à la génératrice synchrone à aimants permanents d'avoir une similarité à la génératrice à courant continu qui concerne la linéarité et le découplage. Cependant, cette structure de commande nécessite que les paramètres de la machine soient précis, ceci exige une bonne identification des paramètres.

Les défaillances d'un convertisseur statique dans les systèmes de conversion d'énergie éoliens, proviennent de sa commande rapprochée, il peut être un des composants de puissance ou un des capteurs mis en œuvre et qui conduisent à la perte totale ou partielle du contrôle des courants de phase donc des puissances injectées sur le réseau. En outre, si le défaut n'est pas rapidement détecté, il peut dans certains cas mettre en danger tout le système de conversion d'énergie. Par conséquent, afin d'empêcher la propagation de défauts aux autres composants du système des méthodes de détection et de compensations de défaut doivent être mises en œuvre.

Pour mener notre étude, le mémoire est organisé de la manière suivante :

Le premier chapitre consacré l'état de l'art de l'énergie éolienne ensuite la modélisation du système de production éolienne, et aborde la mise en œuvre de la stratégie du *MPPT* (Maximum Power Point Tracking).

Dans le second chapitre nous présenterons le modèle mathématique basé sur des hypothèses simplificatrices dans le repère (d, q) de la GSAP. Par la suite nous traiterons la modélisation de l'onduleur de tension commandée par la technique MLI et la commande vectorielle à la génératrice synchrone à aimants permanents, La vitesse et les courants sont réglés par des régulateurs de type PI, et à la fin de ce chapitre les résultats de la simulation seront précisés et

annotés.

Dans le troisième chapitre nous avons traité l'étude de la panne de l'onduleur ainsi que ses fonctionnements, parmi ces défauts des onduleurs triphasés que nous avons évoqués : un défaut de type court-circuit et un défaut de type circuit ouvert, dans la deuxième partie une simulation unique réalisant un test de diagnostic classique (exemple du modèle vectoriel de Park), et diagnostic Technologie intelligente de logique floue moderne, avec transformation de Park appliquée, cette technologie appliquée pour un diagnostic plus efficace. Les résultats obtenus ont montré l'efficacité de cette technique pour détecter les défauts (circuit ouvert) en temps réel et même la sévérité du défaut.

Finalement, le travail sera clôturé par une conclusion générale, ainsi que par des suggestions et quelques perspectives pour les travaux de recherches futurs dans ce domaine.

## *Chapitre –I–*

---

Modélisation d'une chaîne de conversion Eolienne

## **I.1 Introduction**

Ces dernières années, l'environnement a été au centre des préoccupations mondiales conduisant à un intérêt grandissant pour l'utilisation des énergies renouvelables.

Parmi celles-ci, on trouve l'énergie éolienne. Cette dernière sert à transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique [2]. Pour cela, l'objectif principal de nos travaux de mémoire est d'étudier les techniques de commande de la génératrice associée avec une éolienne pour la production de l'énergie électrique. Par optimisation, nous entendons non seulement l'amélioration de la qualité de l'énergie produite et de l'efficacité énergétique, mais également la réduction des charges mécaniques qui conduit à la fabrication d'aeroturbines plus légères, améliorant ainsi la productivité [3].

## **I.2 Définition de l'énergie éolienne**

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière. De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps, et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [4].

### **I.2.1 Descriptif d'une éolienne**

Le système d'orientation, fait pivoter la nacelle face au vent avec un moteur électrique ou hydraulique. Un contrôleur électronique est chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne, par un dispositif de contrôle avec arrêt automatique en cas de besoin. Les deux familles d'éoliennes raccordées aux réseaux électriques peuvent être classifiées selon leur vitesse : à savoir des turbines à vitesse fixe et d'autres à vitesse variable.

#### **I.2.1.1 Éolienne à vitesse fixe**

Les éoliennes peuvent être fabriquées avec des pales à pas fixe. Elles sont initialement moins chères et leur incapacité à régler l'angle des pales, les rendent moins populaires dans le domaine des grandes éoliennes. Le contrôle de cette surface par la méthode Stall [5] ; qui consiste en la variation de l'angle d'orientation de pale, mène à un décrochage aérodynamique et à un freinage des pales ; permettant la dégradation du rendement de la turbine au-delà d'une certaine vitesse. En outre, ces turbines génèrent des fluctuations considérables de la tension et de la puissance du réseau, lors des rafales du vent.

#### **I.2.1.2 Éolienne à vitesse variable**

Le fonctionnement des éoliennes à une vitesse variable, réduit les contraintes physiques sur les pales, causées par les rafales de vent et améliore l'efficacité aérodynamique du système. Ainsi, la production annuelle d'énergie d'une éolienne à vitesse variable, est accrue de 5 à 10 % par

rapport à une éolienne à vitesse fixe [5]. La turbine à vitesse variable change constamment sa vitesse de rotation, suivant la vitesse du vent. Une maximisation de la puissance permet alors, de fonctionner sur une plage de vitesse de vent exploitable. Ceci permet donc, une production d'énergie électrique élevée. Cependant, la plupart des éoliennes connectées au réseau électrique, nécessitent une vitesse de rotation fixe pour des raisons de cohérence de fréquence avec le réseau. Ce qui impose l'intégration d'une interface d'électronique de puissance dans la chaîne de conversion. L'un des facteurs qui limite ce type d'éolienne, réside dans le choix de la technologie du générateur. Traditionnellement, il existe trois principaux types de générateurs qui peuvent être envisagés pour les différents systèmes d'éoliennes.

- Les générateurs à courant continu (DC),
- Les générateurs à courant alternatif (AC) synchrones et asynchrones.

## **I.2.2 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne**

### **I.2.2.1 Avantages**

- ✓ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier [6].
- ✓ Contrairement à l'énergie nucléaire, elle ne présente pas de risque et ne produit Pas de déchets toxiques ou radioactifs.
- ✓ Les parcs éoliens se démontent très facilement sans laisser de traces.
- ✓ C'est une énergie dotée d'un potentiel énergétique élevé.
- ✓ Les coûts d'installation ne sont pas très élevés.
- ✓ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable fiable économique qui respecte l'environnement.

### **I.2.2.2 Inconvénients**

- ✓ Sur les sites peu exposés au vent, le rendement est faible et le coût est élevé.
- ✓ Impact visuel : les éoliennes installées sur terre ont tendance à défigurer le paysage [7].
- ✓ Le bruit : la source essentielle du bruit dans les éoliennes c'est le multiplicateur.
- ✓ ce dernier commence à disparaître après l'apparition des éoliennes à attaque directe.
- ✓ influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour les gérants des réseaux.

## I.2.3 Différents types d'éoliennes

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. En effet, les turbines éoliennes sont classées selon la disposition géométrique de leur arbre sur lequel est montée l'hélice, en deux types : les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal (Figure(I.1)).

### I.2.3.1 Les éoliennes à axe vertical

L'axe de rotation de ce type d'éoliennes est vertical par rapport au sol et perpendiculaire à la direction du vent. Ce type de turbine peut recevoir le vent de n'importe quelle direction, ce qui rend inutile tout dispositif d'orientation. Elles ont été les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. De nombreuses variantes technologiques ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, à savoir le rotor de Savonius et le rotor de Darrieus [8].

### I.2.3.2 Les éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles comportent généralement des hélices à trois pales. Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical ; elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques [9]. La plupart des technologies éoliennes décrites aujourd'hui impliquent des éoliennes à axe horizontal. La raison est simple : toutes les éoliennes commerciales connectées au réseau ont aujourd'hui un rotor de type hélice monté sur un axe horizontal.



1) à axe verticale



2) à axe horizontal

**Figure I.1** : Types d'éolienne.

### I.3 Modélisation du système de production éolienne

La chaîne de conversion d'énergie d'éolienne proposée est constituée principalement d'une turbine éolienne, qui est appelé aérogénérateur c'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.

Le couplage mécanique peut être soit direct si la turbine et la génératrice ont des vitesses du même ordre de grandeur, soit réalisé par l'intermédiaire d'un multiplicateur dans le cas contraire, et d'une génératrice synchrone à aimants permanents et d'un convertisseur à commande MLI. (Voir figure(I.2)).

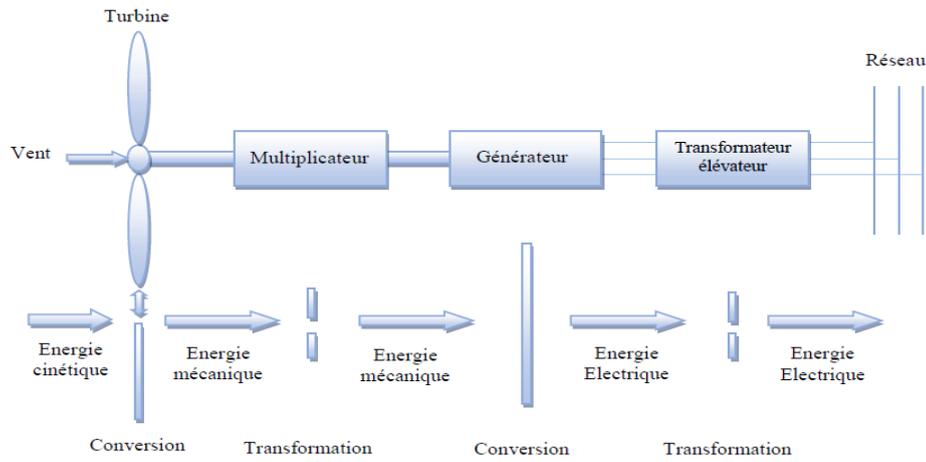


Figure I.2 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

#### I.3.1 Modélisation du vent et de la turbine

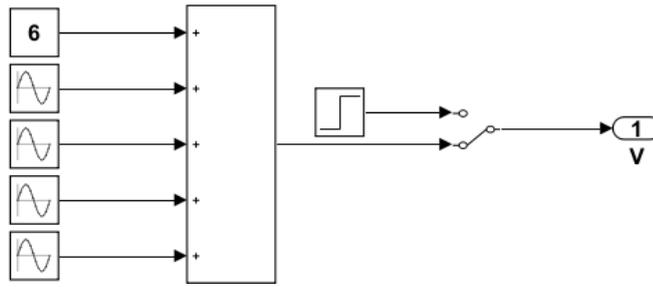
##### I.3.1.1 Modélisation du vent

La ressource éolienne, du point de vue de sa répartition fixe, est essentielle dans une maquette éolienne est donc cruciale pour le calcul de la production et de la rentabilité de l'électricité.

Les propriétés dynamiques du vent sont essentielles pour étudier l'ensemble du système de conversion d'énergie car l'énergie éolienne, dans des conditions optimales, est le cube de la vitesse du vent. Vecteur tridimensionnel de la vitesse du vent. Cependant, la direction de la vecteur vitesse du vent considéré dans ce modèle est limitée à une dimension [10], la vitesse du vent est généralement représentée par une fonction numérique qui évolue dans le temps [11]. La mesure exacte de la vitesse du vent à hauteur de turbine est très complexe, la vitesse du vent sera modélisée sous forme déterministe par la somme de plusieurs harmoniques voire la figure (I.3) :

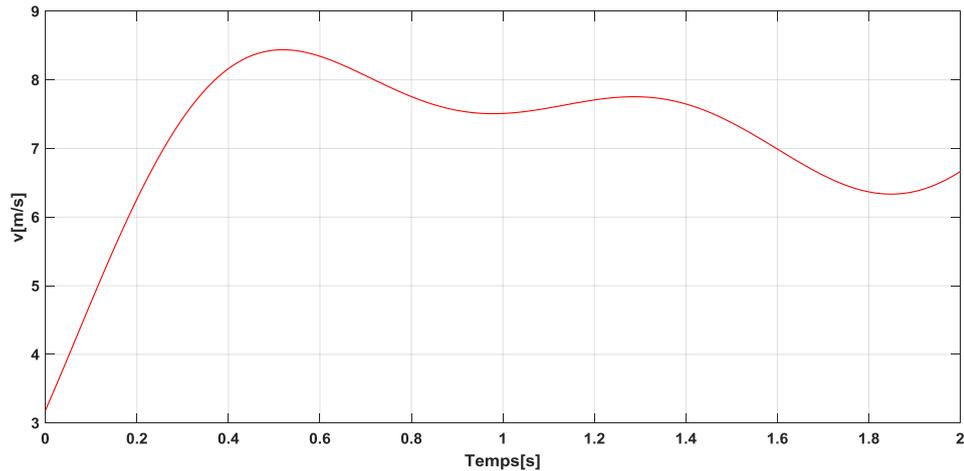
$$V(t) = A + \sum^i (a_k) \sin(\omega t + \varphi) \quad (I.1)$$

$$V(t) = 6 + 2 \cdot \sin(1.5t - \pi/5) + 2 \cdot \sin(4t - \pi/3) + 1.5 \cdot \sin(5.4t + \pi/12) + 0.5 \cdot \sin(2.5t + \pi/5) \quad (I.2)$$



**Figure I.3 :** Bloc de simulation de la vitesse du vent.

La simulation du profil du vent est représentée sur la figure (I.4).



**Figure I.4 :** Evolution de profil du vent.

### I.3.1.2 Puissance extraite du vent

A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passant par la section de la surface active  $S$  de la voileure, la puissance de la masse d'air qui traverse la surface équivalente à la surface active  $S$  de l'éolienne est donnée par :

$$P_V = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (I.3)$$

Avec

$\rho$  : représente la masse volumique d'air ( $\text{Kg/m}^3$ ).

$V$  : représente la vitesse du vent (m/s).

$S$  : La surface utile traversée par le vent a pour expression.

$$S = 2R \cdot H \quad (I.4)$$

$R$  : représente le Rayon de la voileure (m).

$H$  : représente hauteur de la voileure (m).

### I.3.1.3 Loi de Betz

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure (I.5) sur lequel on a représenté la vitesse du vent  $V_1$  en amont de l'aérogénérateur et la vitesse  $V_2$  en aval. En

supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne  $V_1$  et la vitesse du vent après passage à travers le rotor. Soit  $(V_1 + V_2)/2$ , la masse d'air en mouvement de densité  $\rho$  traversant la surface  $S$  des pales en une seconde est [11] :

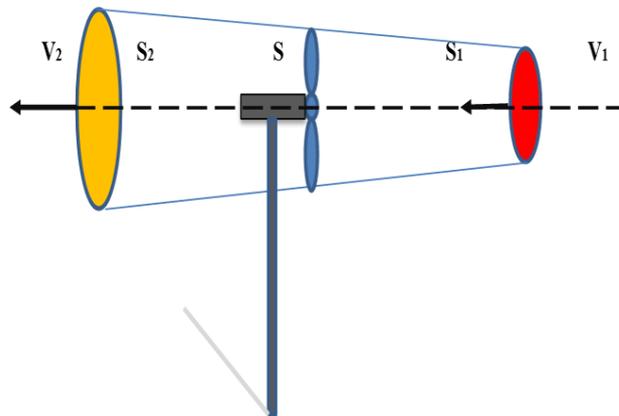
$$m = \frac{\rho * S * (V_1 + V_2)}{2} \quad (I.5)$$

La puissance  $P_m$  alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_m = \frac{m * (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (I.6)$$

Soit en remplaçant  $m$  par son expression dans (I.6) :

$$P_m = \frac{\rho * S * (V_1 + V_2) * (V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (I.7)$$



**Figure I.5 :** Tube de courant autour d'une éolienne.

Le vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface  $S$  sans diminution de vitesse, soit à la vitesse  $V_v$ , la puissance  $P_{Betz}$  correspondante serait alors :

$$P_{Betz} = 0.5 \rho S V_v^3 C_{P\ Betz} \quad (I.8)$$

Avec :

$C_{P\ Betz}$  : coefficient de puissance de Betz.

Par conséquent, même si l'extraction de puissance sans pertes est possible, seulement 59% de l'énergie éolienne pourrait être utilisée par une éolienne.

### I.3.1.4 Coefficient de vitesse spécifique

Le coefficient de vitesse  $\lambda$  est un facteur spécifique des aérogénérateurs est défini comme étant le rapport de la vitesse tangentielle en bout de pales  $RV \Omega$  sur la vitesse instantanée du vent  $V$  [12] :

$$\lambda = \frac{\Omega.R_v}{V} \quad (\text{I.9})$$

Où

$R$  : Longueur d'une pale de la turbine éolienne ( $m$ ).

$\Omega_t$  : Vitesse angulaire de la turbine éolienne ( $rad/sec$ ).

### I.3.1.5 Coefficient de puissance ( $C_p$ )

Au cours de ce mémoire, nous avons appris à connaître les notions de puissance d'une éolienne et coefficient de puissance ou coefficient de performance. Alors à cause des vitesses non nulles de l'aire derrière l'éolienne la puissance récupérée sur une éolienne est inférieure à la puissance du vent.

On définit alors ce qu'on appelle un coefficient de puissance comme le rapport de la puissance éolienne divisé par la puissance du vent. La  $C_p$  dépend du nombre des pales du rotor et de leurs formes géométrique et aérodynamique (longueur et profile de section) par la relation suivante :

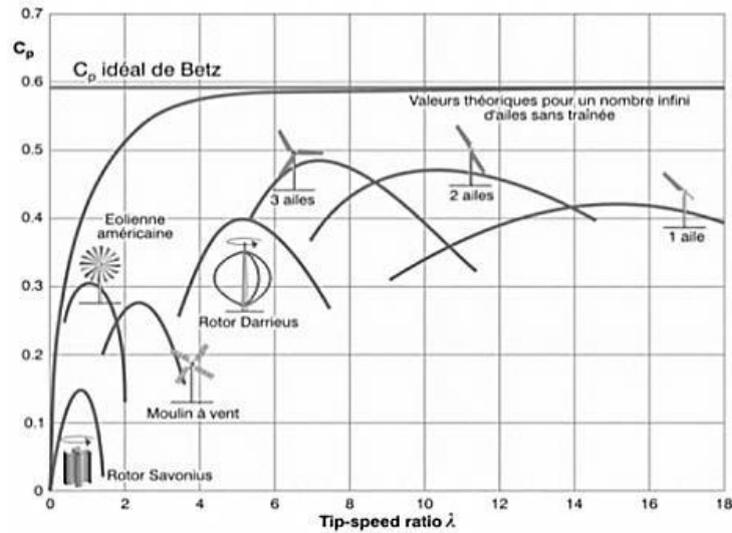
$$C_p = \frac{P_{éol}}{P_v} \quad (\text{I.10})$$

Avec :  $P_{éol}$  est la puissance captée par la turbine éolienne ( $w$ ).

La valeur maximale théorique possible de  $C_p$  et appelée limite de **Betz**, alors il faut garder à l'esprit théorie de **Betz** qui dit qu'on ne peut pas récupérer 100 % de l'énergie mais qu'on maximum on va pouvoir récupérer 0.59 fois la puissance de vent :

$$P_{Betz} = 0,59.P_{Vent} \quad (\text{I.11})$$

La turbine éolienne choisie dans cette étude est une turbine tripale. Ses propriétés sont données dans l'annexe. Le facteur de puissance peut être utilisé sous la forme de tables de consultation sous forme d'une fonction. La deuxième approche est présentée ci-dessous, où la fonction générale du coefficient de puissance est définie en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$  [12].



**Figure I.6 :** Coefficient de puissance pour différents types de turbine.

Le coefficient de puissance de la turbine utilisé dans notre étude est donné comme suit [13] :

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \cdot \left( C_2 \frac{1}{\lambda_i} - C_3 \cdot \beta - C_4 \right) \cdot \exp\left(\frac{-C_5}{\lambda_i}\right) + C_6 \cdot \lambda \quad (I.12)$$

Dans cette formule, le paramètre  $\lambda_i$  dépend également de  $\lambda$  et  $\beta$ .

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \cdot \beta} - \frac{0.035^2}{1 + \beta^3} \quad (I.13)$$

Les six coefficients définis,  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$  dépendent de la turbine considéréesont présenté dans le tableau (I.1) [14].

**Tableau I.1 :** Coefficients définissant l'évolution de  $C_p$ .

Coefficient	Valeur
$C_1$	0.5176
$C_2$	116
$C_3$	0.4
$C_4$	5
$C_5$	21
$C_6$	0.0068

En négligeant les pertes mécaniques, le couple mécanique disponible sur l'arbre de la turbine éolienne peut être exprimé comme suit :

$$C_{\acute{e}ol} = \frac{P_{\acute{e}ol}}{\Omega} = \frac{1}{2} \rho S \frac{V_v^3}{\Omega} C_p \quad (I.14)$$

Le schéma synoptique du modèle aérodynamique de la turbine éolienne, défini par les équations (I.14), est illustré par la Figure (I.7)

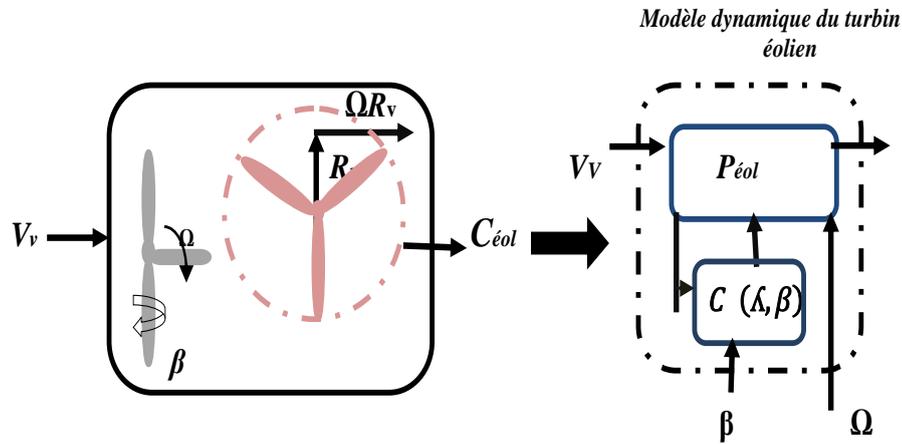


Figure I.7 : Modèle aérodynamique de la turbine éolienne.

### I.3.2 Modélisation de la partie mécanique

La partie mécanique de la turbine qui sera étudiée comprend trois pales orientables et de longueur R. Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse  $\Omega_{\text{turbine}}$  qui est relié à un multiplicateur de gain G. Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique [15] (Figure (I.8)).

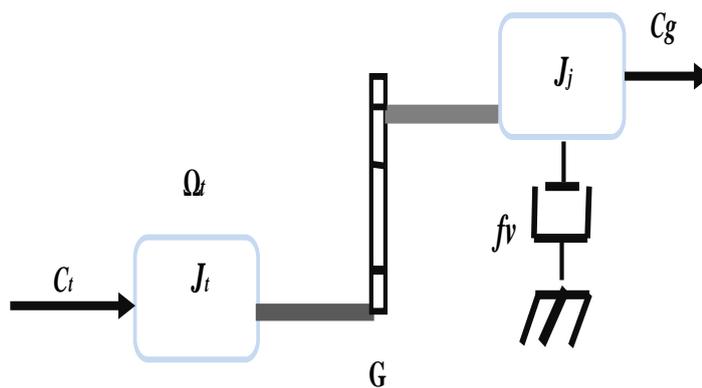


Figure I.8 : Modèle mécanique de la turbine.

Avec :

$J_t$  : Le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des 3 pales de l'éolienne.

$J_g$  : Le moment d'inertie de la génératrice.

$f_v$  : Le coefficient dû aux frottements visqueux de la génératrice.

$C_g$  : Le couple mécanique sur l'arbre de la génératrice après multiplicateur.

$\Omega_g$  : La vitesse de rotation de la génératrice.

$G$  : Le gain du multiplicateur de vitesse.

### I.3.3 Modélisation du multiplicateur

Le rôle du multiplicateur est de transformer la vitesse mécanique de la turbine en vitesse de la génératrice, et le couple aérodynamique en couple du multiplicateur selon les formules mathématiques suivantes :

$$G = \frac{\Omega_g}{\Omega_t} \quad (\text{I.15})$$

$$C_g = \frac{C_t}{G} \quad (\text{I.16})$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega_g}{G} \quad (\text{I.17})$$

Avec  $C_t$  : Couple de la turbine.

### I.3.4 Modèle de l'arbre de transmission

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie ( $J_{turbine}$ ). Cette inertie comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique retenu, considère l'inertie totale ( $J$ ) constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice [16] :

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (\text{I.18})$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total  $C_{mec}$  appliqué au rotor :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (\text{I.19})$$

Ou :

$J$  : l'inertie totale ramenée sur l'arbre de la génératrice, comprenant l'inertie de la turbine, de la génératrice, des deux arbres et du multiplicateur.

Le couple mécanique déduit de cette représentation simplifiée est la somme de tous les couples appliqués sur le rotor :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f \quad (\text{I.20})$$

$C_{em}$  : le couple électromagnétique ;

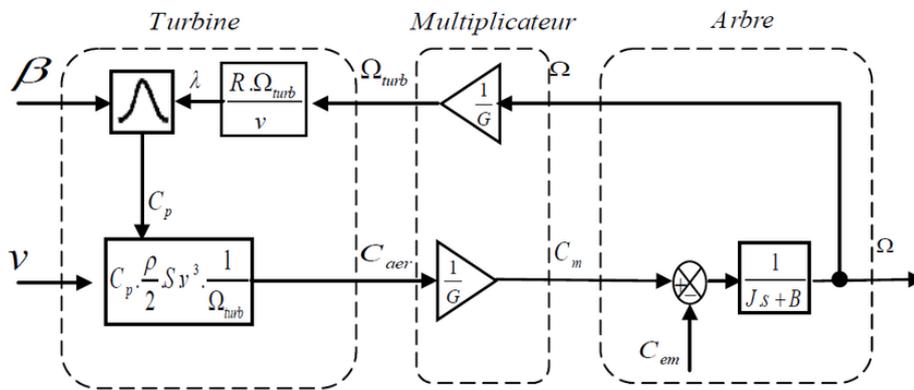
$C_{mec}$  : le couple mécanique développé par la génératrice ;

$C_g$  : le couple issu du multiplicateur ;

$C_f$  : Le couple résistant dû aux frottements modélise par un coefficient de frottement visqueux  $f$ .

$$C_f = f \Omega_{mec} \quad (I.21)$$

Les variables d'entrée de l'arbre de transmission sont donc : le couple issu du multiplicateur  $C_g$  et le couple électromagnétique  $C_{em}$ . A partir des équations précédentes, on établit le schéma bloc fonctionnel du modèle de la turbine représenté par la figure (I.9) [3].



**Figure I.9** : Schéma bloc du modèle de la turbine.

La turbine génère le couple aérodynamique, qui est appliqué au multiplicateur. Ce dernier transforme :

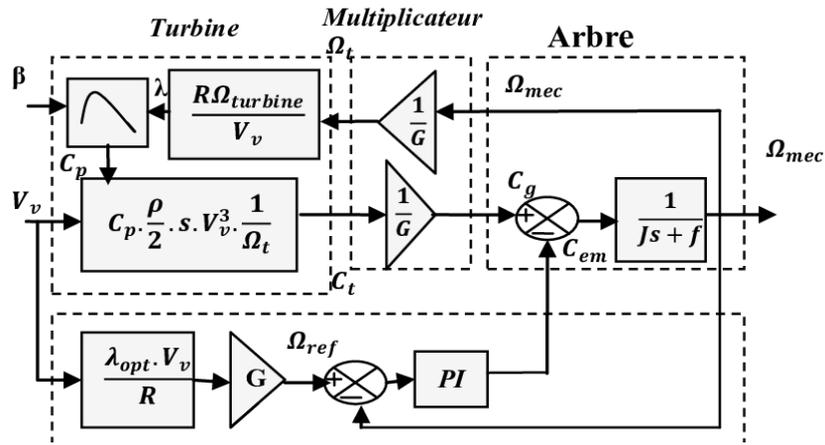
- la vitesse mécanique et le couple aérodynamique respectivement en vitesse de rotor de la machine et en couple de multiplicateur,
- le modèle de l'arbre décrit la dynamique de la vitesse mécanique.

## I.4 Stratégies de commande MPPT

Pendant le fonctionnement à charge partielle d'une éolienne à vitesse variable, la maximisation de l'énergie capturée du vent est assurée par la stratégie de commande MPPT. Ainsi, pour assurer la maximisation de la puissance électrique générée, deux structures de commande sont proposées [17].

### I.4.1 Maximisation de puissance avec asservissement

Dans la structure présentée par la figure (I.10) ; la vitesse de rotation de référence est définie comme consigne à appliquer au régulateur du couple électromagnétique, pour traquer en permanence et efficacement la puissance maximale. Le correcteur de vitesse est de type proportionnel-intégral (PI).



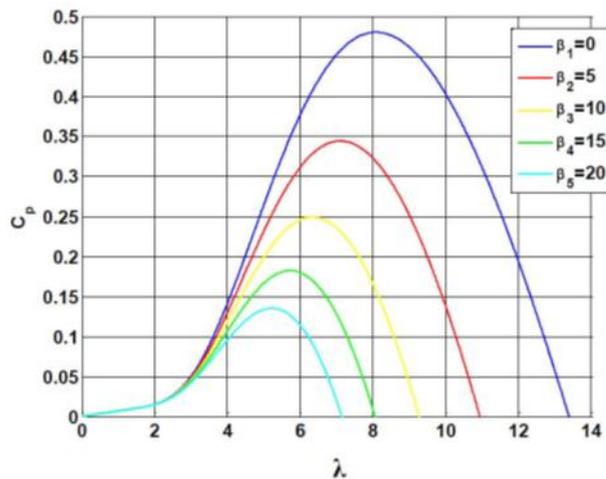
**Figure I.10:** Schéma bloc de la maximisation de puissance extraite avec asservissement de la vitesse.

La vitesse de rotation de référence est donnée par la relation suivante :

$$\Omega_{ref} = \frac{\lambda_{opt} V_v}{R} \tag{I.22}$$

La vitesse spécifique optimale, permet donc de dresser la relation optimale entre la puissance maximale et la vitesse de rotation de la turbine de référence  $\Omega_{ref}$ .

La caractéristique du coefficient de puissance permet de déterminer les valeurs maximales. La caractéristique du coefficient de puissance  $C_p(\lambda, \beta)$ , est une fonction non linéaire de la vitesse spécifique  $\lambda$  et de l'angle d'orientation  $\beta$ . Le fonctionnement optimal de la turbine est déterminé pour un coefficient de puissance maximal. Celui-ci atteint cette valeur pour une vitesse relative  $\lambda = \lambda_{opt} = 8,1$  (Figure( I.10)).



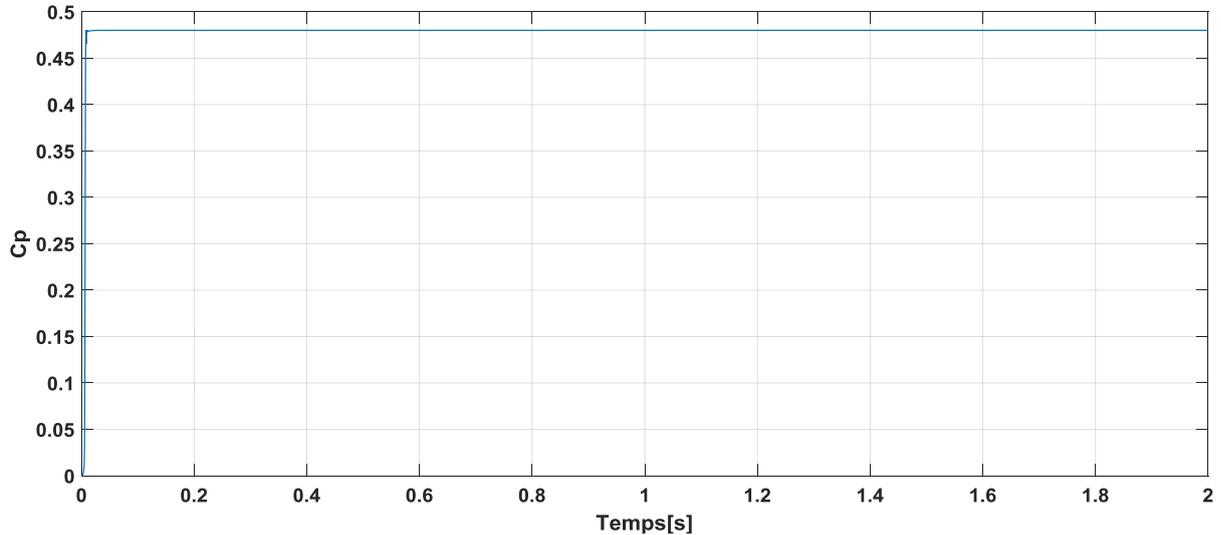
**Figure I.11:** Coefficient de puissance Cp en fonction de  $\lambda$  pour différents  $\beta$ .

### I.5 Résultats de simulation et interprétation

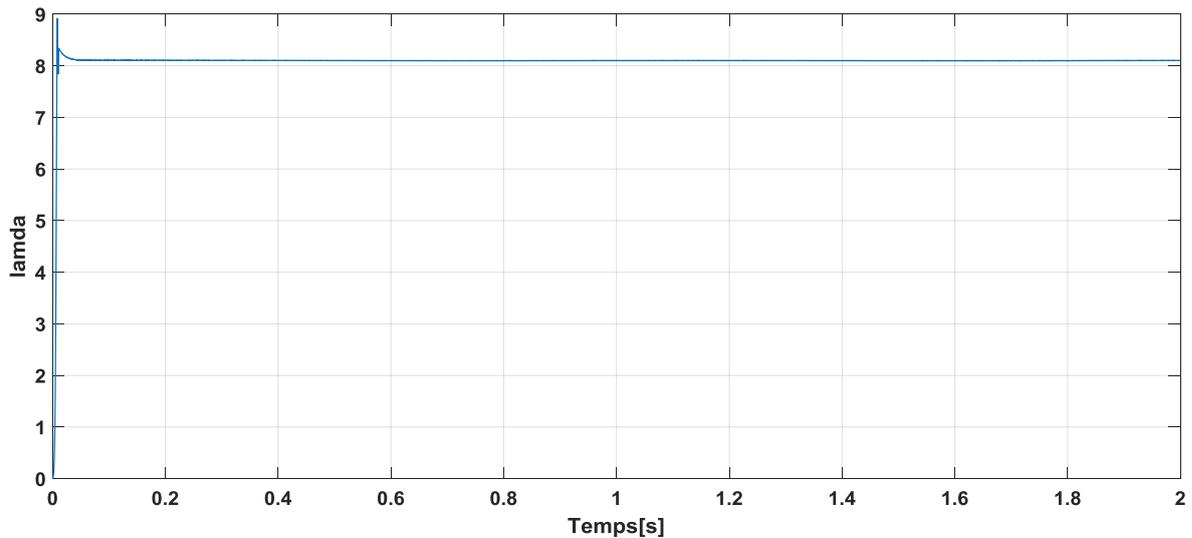
Pour compléter l'étude théorique présentée précédemment, une simulation numérique est indispensable. La simulation a été effectuée sous l'environnement Matlab/Simulink. Les paramètres de la machine sont présentés dans l'annexe.

La référence de la tension de bus continu est ajustée à 630 V, l'injection de la puissance se fait sur un réseau triphasé équilibré de 220V, 50 Hz, Le profil de la variation du vent employés pour les simulations sont de deux vitesse : vitesse fixe et vitesse variable.

### I.5.1 Résultats de simulation à vitesse variable

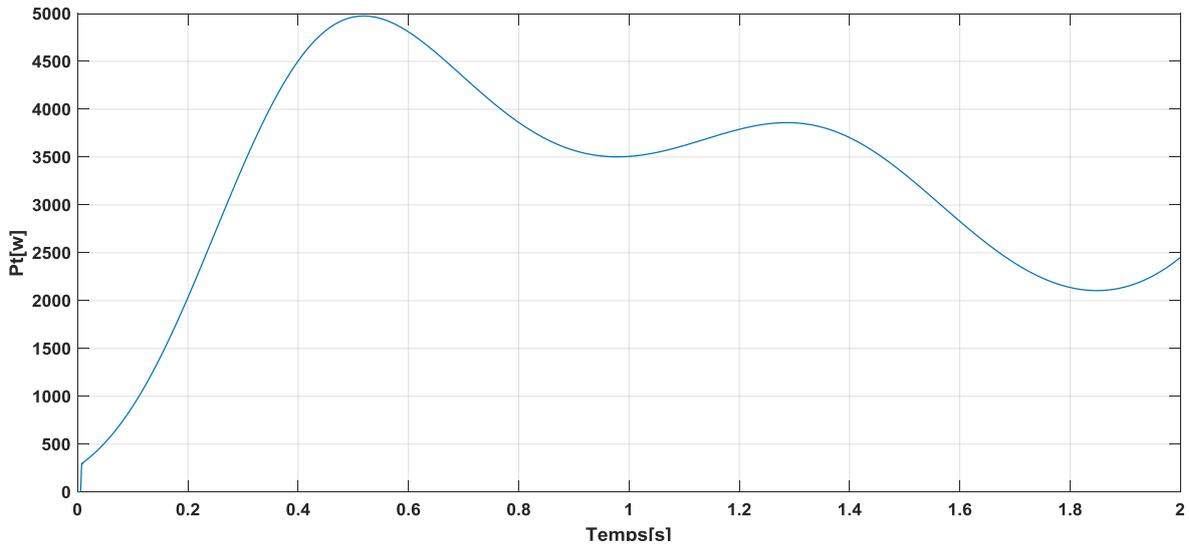


**Figure I.12 :** Coefficient  $C_p$ .

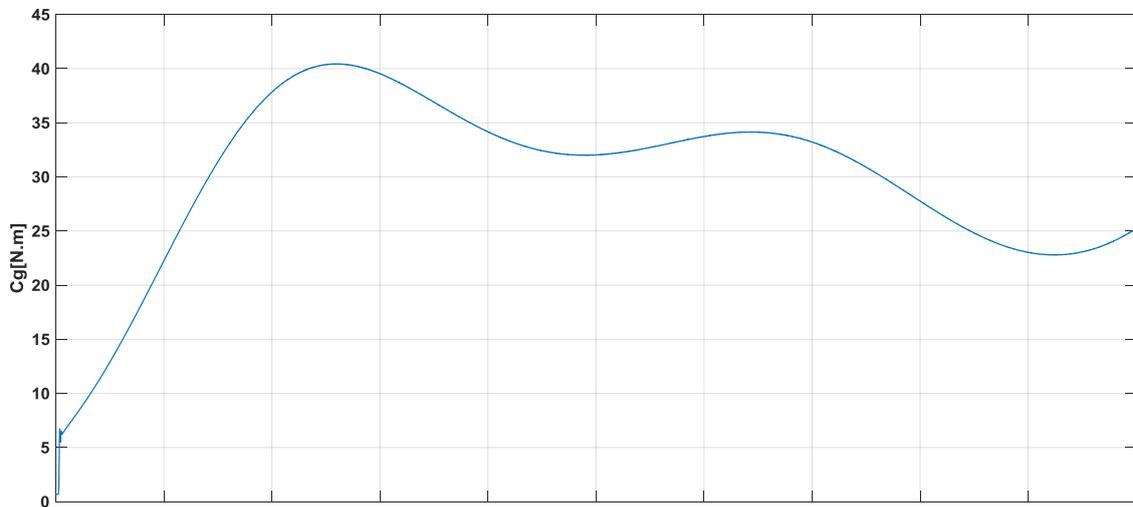


**Figure I.13 :** Coefficient de vitesse  $\lambda$ .

D'après les figures ( I.12) ( I.13), on ne constate que la commande par asservissement de la vitesse a permis de maintenir la valeur du coefficient de puissance à sa valeur maximale qui est de 0.48 et la vitesse spécifique à sa valeur optimale de 8,1.



**Figure I.14:** puissance aérodynamique à vitesse variable.

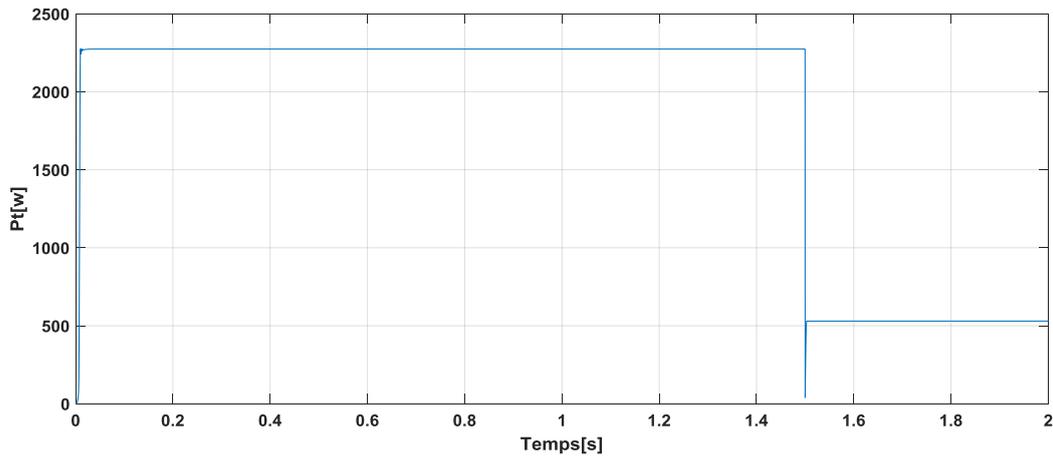


**Figure I.15 :** Couple du multiplicateur à vitesse variable.

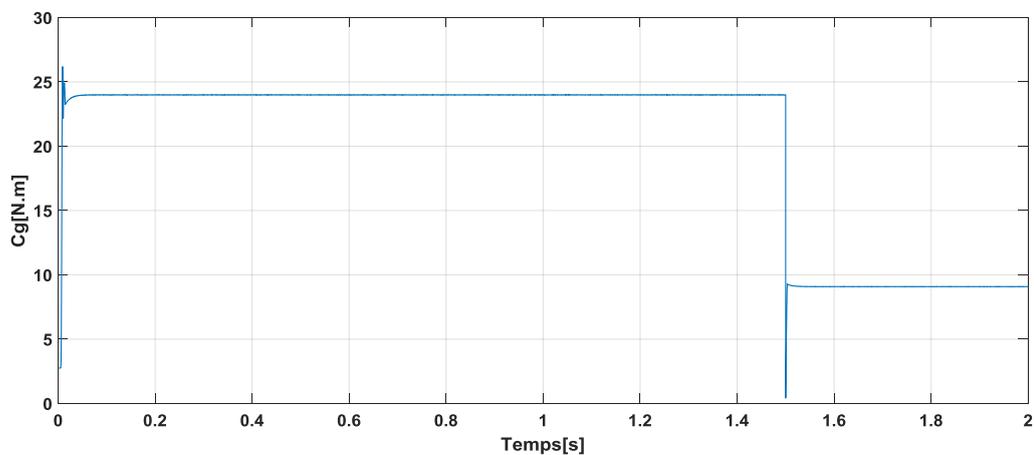
Les figures (I.14) et (I.15) représentent l'allure de la puissance aérodynamique et le couple issu du multiplicateur et présente des valeurs variables, puisque la vitesse du vent est variable et le coefficient  $C_p$  est maintenu à sa valeur maximale.

### I.5.2 Les résultats de simulation à vitesse fixe

Quand on a fixé la vitesse du vent, on remarque que le coefficient  $C_p$  et la vitesse spécifique garde les mêmes allures présentant des valeurs correspondantes à la puissance maximale identiquement au fonctionnement à vitesse variable.



**Figure I.16 :** puissance aérodynamique à vitesse fixe.



**Figure I.17 :** couple du multiplicateur à vitesse fixe.

Les figures (I.16) et (I.17) représentent l'allure de la puissance aérodynamique et le couple du multiplicateur. Puisque le coefficient  $C_p$  est maintenu à sa valeur maximale alors on peut extraire le maximum de la puissance aérodynamique.

## I.6 Conclusion

Essentiellement dans ce chapitre, nous avons modélisé les éléments de base d'un système éolienne. Ce système est basé sur des composants mécaniques et électriques. Ce sont des éoliennes, des GSAP ainsi que des multiplicateurs mécaniques. En plus des différents types d'éoliennes, nous avons ensuite commencé à modéliser le système de production éolienne. A la fin de notre chapitre, nous avons présenté quelques Techniques d'extraction de puissance maximale.

## *Chapitre –II–*

---

Modélisation et commande du système éolien connecté au réseau

## II.1 Introduction

Dans la chaîne de conversion de l'énergie éolienne, la turbine et la génératrice sont les éléments les plus importants, puisque la turbine assure une transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique qui permet de tourner le rotor de la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP), ce dernier est la composante qui assure la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique [18].

Dans ce chapitre nous allons étudier la modélisation GSAP du redresseur à MLI, puis on termine par la commande vectorielle de la génératrice synchrone à aimants permanents.

## II.2 Génératrice à aimants permanents

La Générateur à aimants permanents ou MSAP produisent un courant et une tension de fréquence proportionnelle à la vitesse de rotation donc à la vitesse du vent. Lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation reste fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau.

Le rotor est constitué d'aimants, les aimants en tournant créent une variation de champs dans la bobine (stator) ce qui induit un courant récupérable à la sortie de la bobine.

Les fabricants d'éoliennes ont tendance à utiliser ce type de machines de plus en plus car elle peut fonctionner en mode autonome.

Ce type de génératrice est très souvent utilisé dans le petit éolien (le générateur à aimant permanent est plus simple et moins cher) [19].

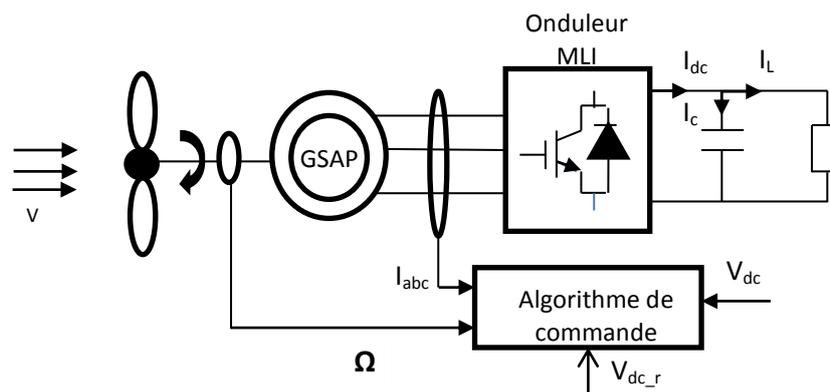


Figure II.1 : Structure du générateur éolien étudié.

## II.3 Les avantages et les inconvénients

La machine synchrone à aimants permanents possède plusieurs avantages et inconvénients par rapport aux autres machines à courant continu, asynchrone, synchrone à excitation électrique [20].

### **II.3.1 Avantages**

- rendement et facteur de puissance élevés.
- Puissance massique et volumique important.
- Une capacité de fonctionnent
- Augmentation de la fiabilité.
- Absences des contacts glissants.

### **II.3.2 Inconvénients**

- Ondulation de couple, coût élevé des aimants, technologie coûteuse.
- Risque de désaimantation (irréversible) : limite de température maximale.
- Interaction magnétique due au changement de structure.
- Pertes par courants de Foucault dans les aimants

## **II.4 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents**

### **II.4.1 Hypothèses simplificatrices de la GSAP**

Pour une représentation plus simple du modèle mathématique de la machine synchrone électrique nécessite l'introduction des hypothèses simplificatrices suivantes [21] :

- L'absence de saturation dans le circuit magnétique. La distribution sinusoïdale de le FMM crée par les enroulements du stator ;
- L'hystérésis est négligée avec les courants de Foucault et l'effet de peau et l'effet d'encoche est négligeable ;
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température ;
- La structure de la machine synchrone à aimants permanents comporte un enroulement triphasé au stator ;
- L'excitation rotorique est créée par des aimants permanents au rotor. Ces aimants sont supposés rigides et de perméabilité voisine de celle de l'air ;
- Caractéristique magnétique de la machine linéaire ;
- Symétrie de la machine et alimenté par un système de tensions triphasées, symétriques et sinusoïdales ;
- Répartition sinusoïdale dans l'entre fer ;
- L'influence des pièces polaires ;

### **II.4.2 Mises en équation électrique et magnétique dans le repère triphasé**

#### **II.4.2.1 Équation électrique**

La génératrice synchrone à aimant permanent est constituée d'un stator avec des enroulements connectés en étoile (neutre isolé) ; cela signifie que la somme instantanée des courants

statoriques est nulle, tandis que la création de l'excitation rotorique est assurée par l'aimant permanent. Les équations électriques dans le plan (a, b, c) peuvent s'écrire comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.1})$$

Avec

$[V_a \ V_b \ V_c]$ : Le vecteur des tensions statoriques

$[i_a \ i_b \ i_c]$ : Le vecteur des courants statoriques

$[\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c]$  : Le vecteur des flux totaux traversant les bobines statoriques

$R_s$  : La résistance d'une phase statorique.

### II.4.2.2 Equation magnétique

Les flux statoriques peuvent être décomposés en flux auto-induits par les enroulements du stator et ceux dû au flux des aimants permanents, tel que [22] :

$$[\varphi_s]_{abc} = [L_{ss}] [i_s]_{abc} + [\varphi_f]_{abc} \quad (\text{II.2})$$

Avec

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_{so} & M_{so} & M_{so} \\ M_{so} & L_{so} & M_{so} \\ M_{so} & M_{so} & L_{so} \end{bmatrix}$$

$M_{so}$  : Inductance mutuelle entre deux phases statoriques ;

$L_{so}$  : Inductance propre d'une phase statorique ;

$[L_{ss}]$ : Matrice des inductances statoriques ;

$[\varphi_f]$ : Flux des aimants permanents

Et

$$[L_{s1}(\theta)] = L_{s1} \begin{bmatrix} \cos(2\theta) & \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta) \\ \cos(2\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta) & \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

Avec :

$\theta$  : Position angulaire du rotor par rapport au stator.

On peut réécrire le système (II.1) sous la forme suivante :

$$[V_s]_{abc} = [R_s][i_s]_{abc} + \frac{d}{dt} \{ [L_{ss}][i_s]_{abc} + [\varphi_f]_{abc} \} \quad (\text{II.3})$$

### II.4.2.3 Equation mécanique

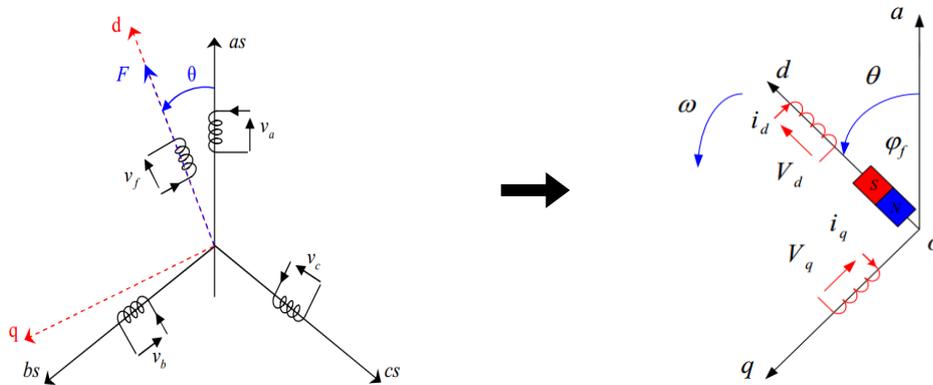
La dynamique de la machine est donnée par l'équation mécanique suivante

$$J \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} = C_t - C_{em} - f \cdot \Omega_g \quad (\text{II.4})$$

## II.4.3 Mises en équation électrique et magnétique dans le repère dq

### II.4.3.1 Transformation de Park

Afin de simplifier le modèle mathématique de la GSAP, la transformation du Park est utilisée ; cette dernière est un outil mathématique qui nous permet de transformer les trois axes de la machine dans le repère (a, b, c) en deux axes orthogonaux (d, q), c'est à dire la transformation des trois bobines statoriques diphasées de  $2\pi/3$ , en deux bobines diphasées de  $\pi/2$  et situées sur le rotor comme indiqué dans la figure(II.2) [23].



**Figure II. 2 :** Passage de système triphasé au système biphasé.

La transformation de Park est donnée par la matrice :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Pour revenir aux repères triphasés (abc), on utilise la transformation inverse de Park qui est donnée par :

$$P(\theta)^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Les équations des tensions, courants et flux seront données par :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = P(\theta) \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = P(\theta) \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \end{bmatrix} = P(\theta) \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix}$$

Avec :

$[V_d, V_q], [i_d, i_q]$  : Les composantes directes et en quadrature de tension et de courant

$[\varphi_d, \varphi_q]$  : Les composantes directes et en quadrature du flux

Appliquant la transformation de Park sur l'équation (II.1) ; l'équation électrique de la GSAP devient:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = P[\theta].R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + P[\theta].\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

### II.4.3.2 Equations électriques

Nous pouvons écrire les équations électriques de la GSAP dans le repère de Park sous la forme [24] :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - \omega \varphi_q \\ V_q = R_s i_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + \omega \varphi_d \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

### II.4.3.3 Equations magnétiques

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d i_d + \varphi_f \\ \varphi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

Si on remplace les flux par leurs expressions dans le système d'équation, on obtient

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \\ V_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega(L_d i_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

$L_d$  et  $L_q$  : les inductances directe et en quadrature, et elles sont supposées indépendantes de  $\theta$

$\varphi_f$  : Flux des aimants permanents.

#### II.4.3.4 Équations mécaniques

L'équation mécanique du système est exprimée par [25] :

$$\begin{cases} J = J_t + J_m \\ J \cdot \frac{d\Omega_m}{dt} + f_v \cdot \Omega_m = C_m - C_{em} \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

$J_t$  et  $J_m$  sont respectivement le moment d'inertie de la turbine et celui du générateur ;

$f_v$  est le coefficient des frottements visqueux du générateur ;

$\Omega_m$  est la vitesse de rotation du générateur.

#### II.4.3.5 Expression du couple électromagnétique

$$C_{em} = P[(L_d - L_q)i_d i_q + \varphi_f i_q] \quad (\text{II.10})$$

### II.5 Modélisation du convertisseur statique

La machine synchrone à aimants permanents est un dispositif à vitesse variable, ou la fréquence des tensions ou des courants d'alimentation est délivrée par un convertisseur statique et asservi à la position du rotor. La structure du convertisseur statique qui alimente la machine est constituée essentiellement, d'un pont redresseur (AC/DC) connecté au réseau, après redressement, la tension continue est filtrée par des composants passifs (C), pour être finalement appliquée à l'onduleur, et l'onduleur qui permet d'alimenter la machine par un système de tension alternatif à fréquence variable. Schéma de principe de l'association convertisseur – machine est donnée par la figure suivante [26] :

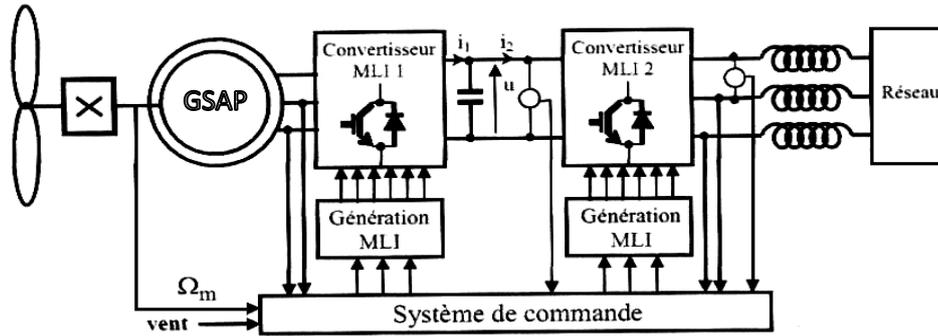


Figure II.3 : Alimentation avec un onduleur

## II.5.1 Convertisseur statique continu-alternatif

### II.5.1.1 Définition de l'onduleur

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continue-alternatif, alimenté par une source continue, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir une tension et un courant alternatifs de valeur moyenne nulle. On distingue plusieurs types d'onduleurs [27] :

- Selon la source : onduleurs de tension, onduleurs de courant.
- Selon le nombre de phases (monophasé, triphasé, etc...).
- Selon le nombre de niveaux (2,3, etc...).

### II.5.1.2 Modélisation de l'onduleur de tension

L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques  $S_i$  ( $i=a, b, c$ ). En appelant  $T_i$  et  $T_i'$  composants électroniques (supposée des interrupteurs idéaux), on a [22] :

Si  $S_i=1$ , alors  $T_i$  est passant et  $T_i'$  est ouvert ;

Si  $S_i=0$ , alors  $T_i$  est ouvert et  $T_i'$  est passant.

Un schéma de l'onduleur est représenté dans la figure (II.4).

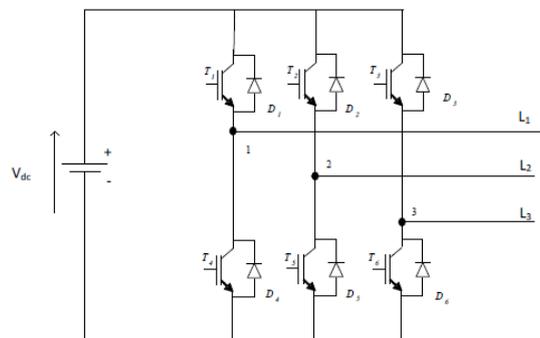


Figure II.4 : Schéma d'un onduleur de tension triphasé

L'onduleur alimenté par une tension parfaite donne à sa sortie une tension alternative formée d'une succession de créneaux rectangulaires, la période de fonctionnement étant fixée par la commande des interrupteurs.

Soit "n", le point neutre du coté alternatif, alors les trois tensions composées :

Les tensions  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$  sont définies par les relations suivantes :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an} - V_{bn} \\ U_{bc} = V_{bn} - V_{cn} \\ U_{ca} = V_{cn} - V_{an} \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

La charge constituée par la machine est équilibrée ( $V_{an}+V_{bn}+V_{cn}=0$ ), on aura donc :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

Elles peuvent s'écrire à partir des tensions de sorties de l'onduleur en introduisant la tension du neutre de la charge par rapport au point de référence  $n_0$ .

$$\begin{cases} V_{an0} = V_{an} + V_{mn0} \\ V_{bn0} = V_{bn} + V_{mn0} \\ V_{cn0} = V_{cn} + V_{mn0} \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

En introduisant le point de référence "n<sub>0</sub>", les tensions entre phases peuvent aussi s'écrire :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an0} - V_{bn0} \\ U_{bc} = V_{bn0} - V_{cn0} \\ U_{ca} = V_{cn0} - V_{an0} \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

On peut déduire le potentiel entre les points  $n$  et  $n_0$  :

$$V_{mn0} = \frac{1}{3}[V_{an0} + V_{bn0} + V_{cn0}] \quad (\text{II.15})$$

L'état des interrupteurs supposés parfaits  $S_i$  ( $i=a, b, c$ ), on a :

$$V_{in} = S_i V_{dc} - \frac{V_{dc}}{2} = (S_i - \frac{1}{2})V_{dc} \quad (\text{II.16})$$

On a donc :

$$\begin{cases} V_{ano} = (S_a - \frac{1}{2})V_{dc} \\ V_{bno} = (S_b - \frac{1}{2})V_{dc} \\ V_{cno} = (S_c - \frac{1}{2})V_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

En remplaçant (II.15) dans (II.14), on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} +2 & -1 & -1 \\ -1 & +2 & -1 \\ -1 & -1 & +2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an0} \\ V_{an0} \\ V_{an0} \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

En remplaçant l'équation (II.17) dans l'équation (II.18), on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} V_{dc} \begin{bmatrix} +2 & -1 & -1 \\ -1 & +2 & -1 \\ -1 & -1 & +2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

## II.5.2 MLI sinus triangle

On utilise la MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) pour déterminer l'instant de fermeture et d'ouverture (instants de commutation) des interrupteurs. Cette technique consiste à faire une comparaison entre le signal de référence onde (modulante) de forme sinusoïdale à faible fréquence et un signal triangulaire onde (porteuse) de fréquence élevée.

Les points d'intersection entre la porteuse et la modulation sont les instants de commutation des interrupteurs des sorties de l'onduleur.

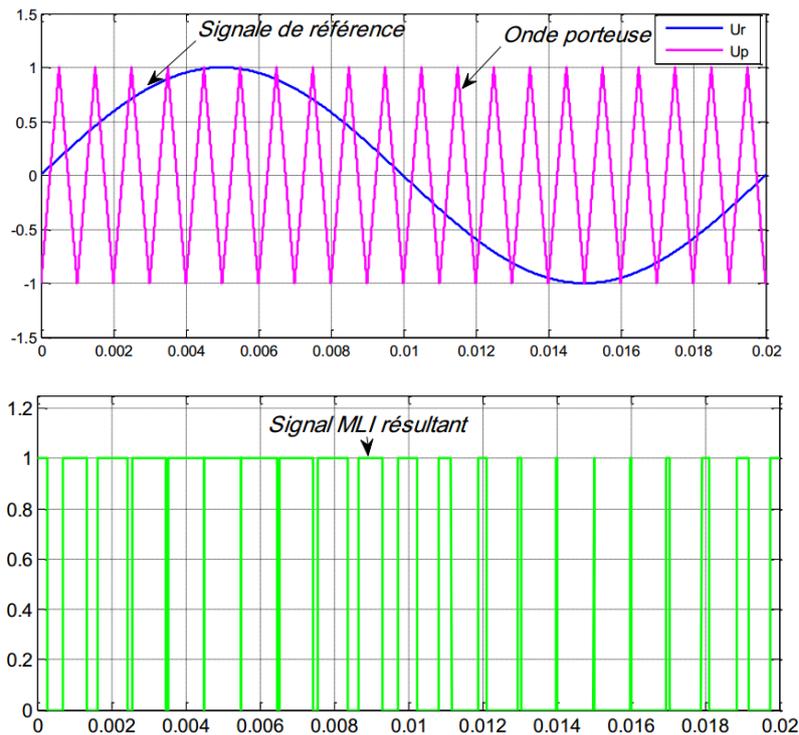
Si on a le signal de référence est au-dessus du signal de la porteuse l'impulsion de sortie donne 1 et le cas par l'algorithme suivants [28] :

$$si \ U_r \geq U_p \rightarrow (t) = 1 \ si \ non \ (t) = 0$$

$U_r$  : La tension de référence.

$U_p$  : La tension de la porteuse.

$S(t)$  : Le signal MLI résultant.



**Figure II.5** : principe de la MLI sinus-triangle.

On a deux paramètres dans cette technique : l'indice de modulation « m » et le taux de Modulation « r ». L'indice de modulation « m » est donné par l'équation suivante :

$$m = \frac{F_p}{F_r}$$

$F_p$  : La fréquence de la porteuse.

$F_r$  : La fréquence du signal de référence.

Le taux de modulation « r » est le coefficient de réglage en tension est donné par l'équation suivante :

$$r = \frac{U_r}{U_p}$$

$U_r$  : L'amplitude de tension de référence.

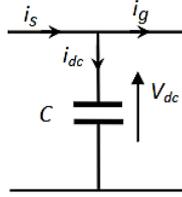
$U_p$  : L'amplitude de tension de la porteuse.

## II.5.2 Modèle du bus continu

L'évolution temporelle de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif. La capacité joue le rôle de réservoir lors de l'échange d'énergie et permet de limiter l'onduleur de la tension du bus [18].

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} i_{dc} \tag{II.20}$$

C : est la capacité totale du bus continu.



**Figure II.6:** Schéma électrique du bus continu.

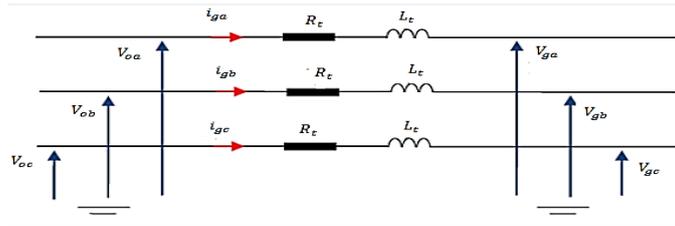
$i_s$  : le courant du bus continu du coté générateur,

$i_g$ : le courant du bus continu du coté réseau,

C: la capacité de condensateur de bus continue.

### II.6 Modèle du filtre coté réseau

Il s'agit d'un filtre passif série ( $R_t, L_t$ ) raccordé entre le convertisseur de puissance et le réseau (Figure II.7) pour réduire la propagation des harmoniques dans le réseau électrique [29].



**Figure II.7 :** Schéma électrique de filtre de liaison au réseau.

Avec  $V_0$  et  $V_g$  représentent respectivement la tension du coté onduleur et du coté réseau.

Dans le repère triphasé, les équations différentielles définissant le filtre peuvent être obtenues en regroupant les équations précédentes :

$$\begin{pmatrix} V_{0\_1} \\ V_{0\_2} \\ V_{0\_3} \end{pmatrix} = R_t \begin{pmatrix} i_{g1} \\ i_{g2} \\ i_{g3} \end{pmatrix} + L_t \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{g1} \\ i_{g2} \\ i_{g3} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_{g1} \\ V_{g2} \\ V_{g3} \end{pmatrix} \quad (II.21)$$

### II.7 Principe de commande vectorielle

D'après l'analyse du système d'équations de modèle GSAP, nous pouvons relever que ce Modèle est non linéaire, multi-variable et il est fortement couplé. En effet, le couple électromagnétique dépend aux courants  $i_d$  et  $i_q$ .

L'objectif de la commande vectorielle de la MSAP est d'aboutir à un modèle équivalent à celui d'une machine à courant continu, c.-à-d. un modèle linéaire et découplé, ce qui permet d'améliorer son comportement statique et dynamique.

Il nécessite de placer le système dans le référentielle (d, q), habituellement, la composante

D'axe (d) du courant statorique joue le rôle de l'excitation et permet de régler la valeur du flux dans la machine. La composante d'axe (q) joue le rôle du courant d'induit et permet de contrôler le couple, donc il faut contrôler les composantes  $i_d$  et  $i_q$  [30].

### II.7.1 Modelé de la machine a commandée

Notre machine synchrone à aimant permanent est à pole lisse ; telle que les inductances  $L_d$  et  $L_q$  sont égales ( $L_d=L_q$ )

- **Les équations électriques dans le repère de Park :**

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \\ \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d} (V_d - R_s i_d + \omega L_q i_q) \\ V_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega (L_d i_d - \varphi_f) \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q} (V_q - R_s i_q - \omega (L_d i_d - \varphi_f)) \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

- **L'équation mécanique :**

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = C_t - C_{em} \quad (\text{II.23})$$

Avec :

$C_t$  : Le couple de la turbine appliquée sur la GSAP.

$$C_{em} = P i_q \varphi_f \quad (\text{II.24})$$

### II.7.2 Commande vectorielle direct par compensation

#### II.7.2.1 Technique de découplage :

Il existe plusieurs techniques de découplage, parmi c'est techniques on a [26] :

- Découplage par compensation
- Découplages par régulateur

Nous exposons par la suite la première technique qui est l'objective de notre commande.

#### II.7.2.2 Découplage par compensation :

L'alimentation en tension est obtenue en imposant les tensions de référence à l'entrée de la commande de l'onduleur. Ces tensions permettent de définir les rapports cycliques sur les bras

de l'onduleur de manière à ce que les tensions délivrées par cet onduleur aux bornes du stator de la machine soient les plus proches possible des tensions de référence. Mais, il faut définir des termes de compensation, car, dans les équations statoriques, il y a des termes de couplage entre les axes d et q.

Ces tensions peuvent être écrites sous les formes suivantes [31] :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \\ V_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega(L_d i_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

Les tensions  $V_d$  et  $V_q$  dépendent à la fois des courants sur les axes « d » et « q », on est donc amené à implanter un découplage. Ce découplage est basé sur l'introduction de termes compensatoires  $e_d$  et  $e_q$ .

On a :

$$\begin{cases} V_d = V_{d1} - e_d \\ V_q = V_{q1} + e_q \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

Avec :

$$\begin{cases} V_{d1} = (R_s + sL_d)i_d \\ V_{q1} = (R_s + sL_q)i_q \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

Et

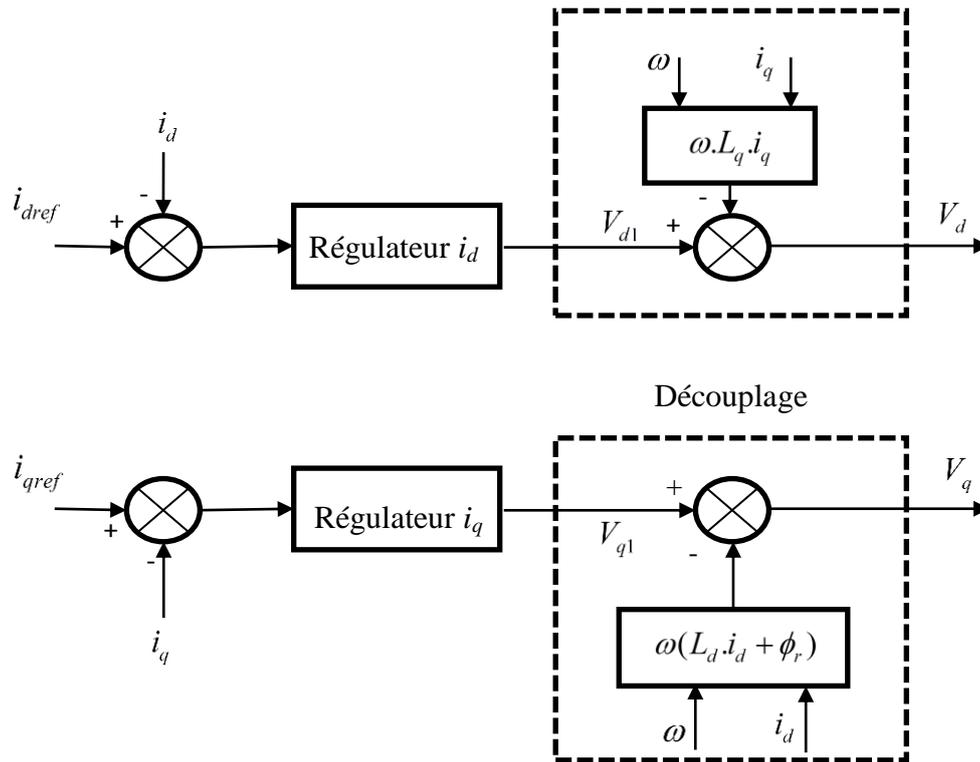
$$\begin{cases} e_d = \omega L_q i_q \\ e_q = \omega(L_d i_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

On a donc les courants « $i_d$ » et « $i_q$ » sont découplés. Le courant  $i_d$  ne dépend que de  $V_{d1}$ , et  $i_q$  ne dépend que  $V_{q1}$ , à partir de l'équation (II.27) les courant « $i_d$ » et « $i_q$ » s'écrivent Comme suit:

$$\begin{cases} i_d = \frac{V_{d1}}{R_s + sL_d} \\ i_q = \frac{V_{q1}}{R_s + sL_q} \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

où : (s) est l'opérateur de Laplace

Le principe de régulation consiste à réguler les courants statoriques à partir des grandeurs de référence (désirées) par des régulateurs classiques. Le schéma de principe de régulation des courants statoriques est représenté par la figure (II.8).



**Figure II.8** : Principe de découplage par compensation

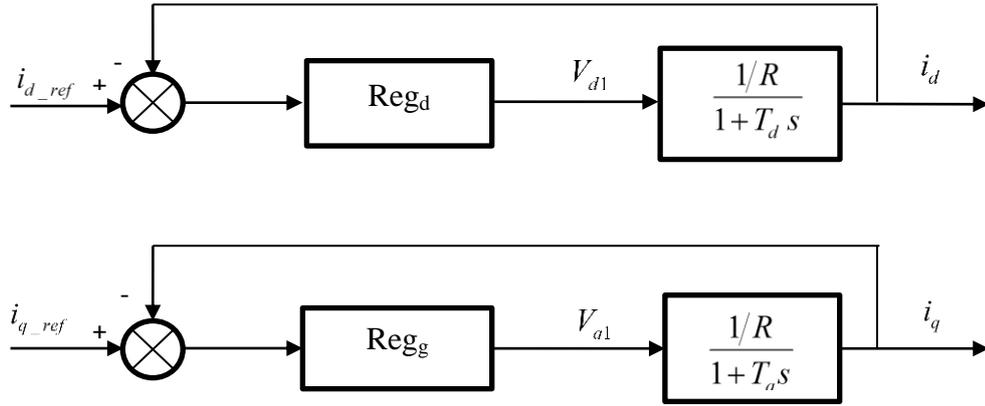
$V_{d1}$  : La tension à la sortie de régulateur de courant « $i_d$ ».

$V_{q1}$  : La tension à la sortie de régulateur de courant « $i_q$ ».

## II.8 Détermination des régulateurs

### II.8.1 Calcul des régulateurs de courant

Le schéma de commande des courants de la commande vectorielle se réduit à deux boucles distinctes comme l'indique la figure (II.9) [32]



**Figure II.9 :** Commande des courants  $i_d$  et  $i_q$  en deux boucles indépendantes

A partir des équations liées aux systèmes (II.29), on peut écrire les fonctions de transfert suivantes :

$$\begin{cases} F_d(s) = \frac{1}{1+T_d s} = \frac{i_d}{V_{d1}} \\ F_q(s) = \frac{1}{1+T_q s} = \frac{i_q}{V_{q1}} \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

Avec :

$$\begin{cases} T_d = \frac{L_d}{R} \\ T_q = \frac{L_q}{R} \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

Les régulateurs ( $\text{Reg}_d$  et  $\text{Reg}_q$ ) sont choisis comme étant des régulateurs proportionnels et intégrales, avec des fonctions de transfert de la forme suivante :

$$\begin{cases} \text{Reg}_d(s) = \frac{K_{id}}{s} \left(1 + \frac{K_{pd}}{K_{id}} s\right) \\ \text{Reg}_q(s) = \frac{K_{iq}}{s} \left(1 + \frac{K_{pq}}{K_{iq}} s\right) \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

Les fonctions de transfert en boucle ouverte sont donnée par :

$$\begin{cases} FTBO_d = \frac{K_{id}}{s} \left( 1 + \frac{K_{pd}}{K_{id}} s \right) \frac{1}{1 + T_d s} \\ FTBO_q = \frac{K_{iq}}{s} \left( 1 + \frac{K_{pq}}{K_{id}} s \right) \frac{1}{1 + T_q s} \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

La démarche à suivre consiste à procéder à la compensation de la constante de temps du système, en posant :

$$\begin{cases} \frac{K_{pd}}{K_{id}} = T_d \\ \frac{K_{pq}}{K_{iq}} = T_q \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

Les fonctions de transfert en boucle fermé (FTBF) sont données par :

$$\begin{cases} FTBF_d = \frac{1}{1 + \tau_d s} = \frac{i_d}{i_{dref}} \\ FTBF_q = \frac{1}{1 + \tau_q s} = \frac{i_q}{i_{qref}} \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

Avec :

$$\begin{cases} \tau_d = \frac{R}{K_{id}} \\ \tau_q = \frac{R}{K_{iq}} \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

Les boucles de courants correspondent donc à un premier ordre, il suffit de fixer la dynamique du système à travers un choix approprié de  $\tau_d$  et  $\tau_q$ . Celles-ci sont choisies de manière à ce que la constante de temps du système en boucle fermée réglé soit inférieure à la constante de temps en boucle ouverte.

Généralement le temps de réponse dans un système de premier ordre est de  $T_r = 3\tau$  [30] :

$$T_r = \frac{3.R_s}{K_{id}} \quad (\text{II.37})$$

- Pour le courant  $i_d$  :

$$K_{id} = \frac{3.R_s}{3\tau} = \frac{R_s}{\tau} \quad (\text{II.38})$$

Avec :

$$\frac{L_d}{R_s} = \frac{K_{pd}}{K_{id}} \quad (\text{II.39})$$

$$K_{pd} = \frac{L_d K_{id}}{R_s} = \frac{3L_d}{3\tau} = \frac{L_d}{\tau} \quad (\text{II.40})$$

- Pour le courant  $i_q$  :

$$K_{iq} = \frac{3.R_s}{3\tau} = \frac{R_s}{\tau} \quad (\text{II.41})$$

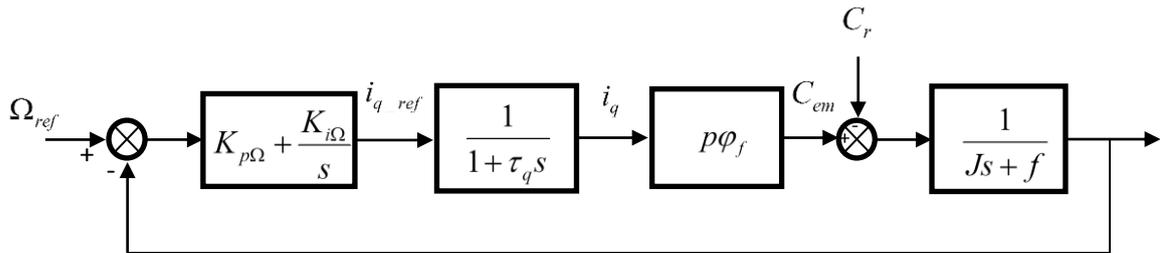
$$K_{pq} = \frac{L_q K_{iq}}{R_s} = \frac{3L_q}{3\tau} = \frac{L_q}{\tau} \quad (\text{II.42})$$

## II.8.2 Calcul du Régulateur de vitesse

Le processus à commander est décomposé en deux sous système :

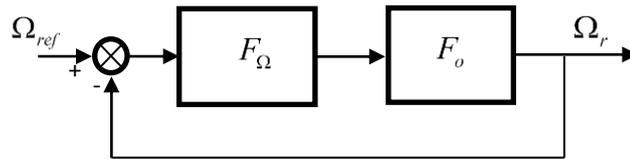
- Sous système du réglage de courant  $i_q$  donc du couple
- Sous système de la partie mécanique.

La boucle de régulation de la vitesse est représentée par la figure ci-dessous [33] :



**Figure II.10 :** Boucle de régulateur de vitesse

Le schéma de la Figure (II.10) peut être simplifié par la Figure (II.11) :



**Figure II.11 :** Boucle de régulation de vitesse.

$F_{\Omega}(s)$  : La fonction de transfert du régulateur de vitesse est donnée par :

$$F_{\Omega}(s) = K_{p\Omega} + \frac{K_{i\Omega}}{s} \quad (\text{II.43})$$

$F_o(s)$  : La fonction de transfert en boucle ouverte pour  $C_r = 0$ , est donnée par :

$$F_o(s) = \frac{p\phi_f}{f(1+s\tau_q)(1+s\tau_m)} \quad (\text{II.44})$$

$$\tau_m = \frac{J}{f} \quad (\text{II.45})$$

La FTBF est donnée par :

$$FTBF = \frac{F_{\Omega}F_o}{1 + F_{\Omega}F_o} \quad (\text{II.46})$$

Après les calculs on trouve :

$$FTBF_{\Omega} = \frac{p\phi_f(K_{p\Omega}s + K_{i\Omega})}{J\tau_q.s^3 + (J + f\tau_q)s^2 + (p\phi_f K_{p\Omega} + f)s + p\phi_f K_{i\Omega}} \quad (\text{II.47})$$

Si on néglige  $(J\tau_q)$  et  $(f\tau_q)$  devant  $(J)$ , le polynôme caractéristique de cette fonction

Devient :

$$p(s) = Js^2 + (p\phi_f K_{p\Omega} + f)s + p\phi_f K_{i\Omega} = \frac{J}{p\phi_f K_{i\Omega}}s^2 + \frac{p\phi_f K_{p\Omega} + f}{p\phi_f K_{i\Omega}}s + 1 \quad (\text{II.48})$$

La FTBF possède une dynamique de 2<sup>ème</sup> ordre, par identification à la forme canonique du 2<sup>ème</sup> ordre dont l'équation caractéristique est représenté comme suit :

$$\frac{1}{\omega_0^2}s^2 + \left(\frac{2\xi}{\omega_0}\right)s + 1 \quad (\text{II.49})$$

Où :

$\omega_0$  : Pulsation propre du système,

$\xi$  : Coefficient d'amortissement.

Et  $\xi$  représente le coefficient d'amortissement et  $\omega_0$  représente la pulsation naturelle. Par identification du dénominateur de l'équation

$$\frac{J}{p\phi_f K_{i\Omega}} = \frac{1}{\omega_0^2} \quad (\text{II.50})$$

$$\frac{p\phi_f K_{p\Omega} + f}{p\phi_f K_{i\Omega}} = \frac{2\xi}{\omega_0} \quad (\text{II.51})$$

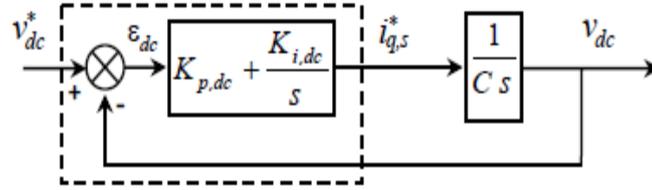
On déduit  $K_i$  et  $K_p$  :

$$K_{i\Omega} = \frac{J.\omega_0^2}{p\phi_f} \quad (\text{II.52})$$

$$K_{p\Omega} = \frac{2.\xi.J.\omega_0 - f}{p\phi_f}$$

### II.8.3 Régulateur de la tension de bus continue

La boucle de régulation de la tension de bus continu peut être représentée dans la figure (II.12).



**Figure II.12** : Boucle de régulation de la tension de bus continu.

En fait, les erreurs  $(V_{dc}^* - V_{dc})$  sont traitées par le correcteur PI, afin de concevoir le courant  $i_{qs}^*$ . En utilisant la transformation de Laplace, La fonction de transfert en boucle fermée est donnée comme suit [34] :

$$FTBF = \frac{\frac{1}{C}(K_{p\_dc} \cdot s + K_{i\_dc})}{s^2 + s\left(\frac{K_{p\_dc}}{C}\right) + \frac{K_{i\_dc}}{C}} \quad (\text{II.53})$$

Par identification à la forme canonique du 2<sup>ème</sup> ordre dont l'équation caractéristique est représenté comme suit :

$$s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2 \quad (\text{II.54})$$

On trouve :

$$\begin{aligned} K_{p\_dc} &= 2\xi\omega_0 C \\ K_{i\_dc} &= \omega_0^2 C \end{aligned} \quad (\text{II.55})$$

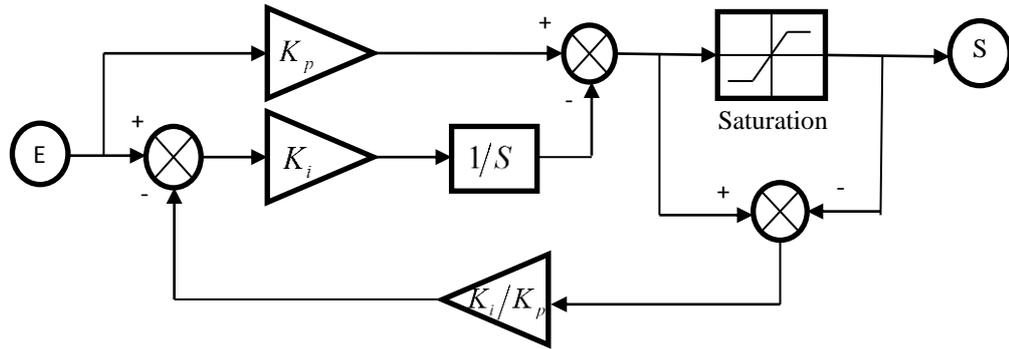
#### II.8.4 limitation de courant

Ces limitations peuvent causer des problèmes lors de grands phénomènes transitoires sous formes d'un dépassement élevé de la grandeur à régler, voir même d'un comportement instable du réglage.

La caractéristique non linéaire de la limitation ne permet plus l'application de la théorie linéaire afin d'analyser précisément le comportement dynamique dès que la sortie du régulateur est saturée.

La saturation perturbe également le fonctionnement des régulateurs comportant une action intégrale. En effet, la composante intégrale continue à croître, bien que la sortie du régulateur soit limitée.

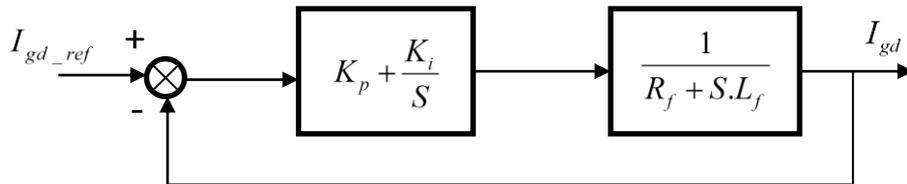
Afin d'éviter ces inconvénients, il s'avère indispensable de corriger le comportement dynamique du régulateur (en particulier la composante intégrale) lorsque la limitation est atteinte. Cette mesure est appelée mesure anti-reset-windup (anti remise de l'emballement) [35].



**Figure II.13 :** Régulateur PI avec anti-windup.

### II.8.5 Synthèse du régulateur des courants du filtre :

La figure (II.14) présente le schéma bloc du régulateur du courant direct du filtre en supposant que le découplage par compensation est parfaitement réalisé [29].



**Figure II.14 :** Boucle de régulation du courant direct coté réseau

La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par :

$$G_{BO}(s) = \frac{K_i}{s} \left( 1 + \frac{K_p}{K} s \right) \cdot \frac{1}{R_f} \cdot \frac{1}{1 + \tau s} \quad (\text{II.56})$$

$$\text{Avec : } \tau = \frac{L_f}{R_f} \quad (\text{II.57})$$

Par la méthode de la compensation du pôle en boucle ouverte, la constante de temps est égale à :

$$\tau = \frac{K_p}{K_i} \quad (\text{II.58})$$

La fonction de transfert en boucle ouverte devient :

$$G_{BO}(s) = \frac{K_i}{s.R_f} \quad (\text{II.59})$$

En boucle fermée, la fonction de transfert devient :

$$G_{BF} = \frac{G_{BO}(s)}{1+G_{BO}(s)} = \frac{\frac{K_i}{s.R_f}}{1+\frac{K_i}{s.R_f}} = \frac{1}{1+\frac{R_f}{K_i}.s} = \frac{1}{1+s.\tau_f} \quad (\text{II.60})$$

En boucle fermée la constante de temps  $\tau_f$  est donc égale à :

$$\tau_f = \frac{R_f}{K_i} \quad (\text{II.61})$$

Alors :

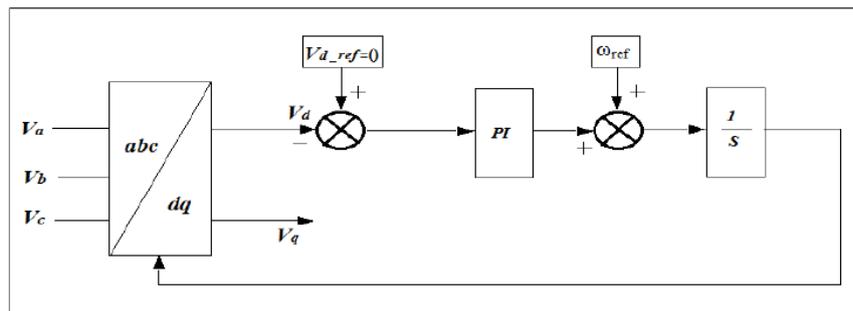
$$K_i = \frac{R_f}{\tau_f} \quad (\text{II.62})$$

D'après les expressions précédentes, le coefficient proportionnel  $K_p$  du régulateur est égale à :

$$K_p = K_i.\tau \quad (\text{II.63})$$

### II.8.6 La boucle de verrouillage de phase

**PLL** (Phased Locked Loop ou PLL) Cette boucle est utilisée pour assurer la synchronisation de la tension de sortie de l'onduleur avec celle du réseau. Elle impose que la tension en direct soit égale à zéro à l'aide d'un correcteur PI, ce qui permet le découplage des courants et des puissances active et réactive. Malgré que la PLL est très nécessaire dans la commande vectorielle et la commande directe de puissance, sachant que cette dernière est plus robuste que la commande vectorielle, la commande développée élimine tous les correcteur Pis, ce qui ajoute plus de robustesses par rapport ces deux commandes ,La figure suivante représentent le schéma fonctionnel [36] .



**Figure II.15 :** Schéma fonctionnel de la boucle verrouillage de la phase (PLL).

### II.9 Stratégie de commande des puissances injectées au réseau

L'injection de la puissance électromagnétique extraite du vent est assistée par l'onduleur de tension triphasé qui assure la phase de l'injection et qui doit maintenir la tension du bus continu

constante, et il doit commander les interrupteurs statiques afin d'injecter la puissance de référence au réseau, avec un facteur de puissance plus proche de l'unité.

En négligeant les pertes statorique du GSAP, ainsi que celles du redresseur MLI<sub>1</sub>, la puissance à l'entrée du bus continu est égale à la puissance électromagnétique. La puissance de référence injectée au réseau, est calculée en soustrayant la puissance électromagnétique de celle du condensateur  $P_{dc}$  :

$$P_g = P_{ref} = P_{em} - P_{dc} = C_{em} \cdot \Omega - V_{dc} \cdot I_{moy-ref} \quad (II.64)$$

La puissance injectée est le produit du courant et la tension, et comme la tension est imposée par le réseau, alors le contrôle de la puissance électromagnétique revient au contrôle des courants alternatifs injectés au réseau.

Les puissances active et réactive dans le repère de Park sont données par :

$$\begin{cases} P_{ref} = V_{g-d} \cdot I_{d-ref} + V_{g-q} \cdot I_{q-ref} \\ Q_{ref} = V_{g-q} \cdot I_{d-ref} - V_{g-d} \cdot I_{q-ref} \end{cases} \quad (II.65)$$

À partir de ces relations, il est alors possible de commander la puissance active et la puissance réactive en imposant sur l'onduleur les courants de références suivants :

$$\begin{cases} I_{d-ref} = \frac{P_{ref} V_{g-d} + Q_{ref} V_{g-q}}{V_{g-d}^2 + V_{g-q}^2} \mu \\ I_{q-ref} = \frac{P_{ref} V_{g-q} + Q_{ref} V_{g-d}}{V_{g-d}^2 + V_{g-q}^2} \end{cases} \quad (II.66)$$

En injectant seulement la puissance active, les courants de référence seront :

$$Q = 0 \Rightarrow \begin{cases} I_{d-ref} = \frac{P_{ref} V_{g-d}}{V_{g-d}^2 + V_{g-q}^2} \\ I_{q-ref} = \frac{P_{ref} V_{g-q}}{V_{g-d}^2 + V_{g-q}^2} \end{cases} \quad (II.67)$$

En transformant les courants de référence :  $I_{d-ref}, I_{q-ref}$  aux courants réels  $I_{a-ref}, I_{b-ref}, I_{c-ref}$  par la transformation inverse de Park, on aboutira à la commande MLI<sub>2</sub> d'onduleur.

## II.10 Résultats de simulation et Interprétation

Dans cette partie, on présente de résultats de simulation d'une éolienne à vitesse variable afin de tester le fonctionnement de la chaîne globale.

La figure (II.16) illustre le résultat du contrôle de la vitesse de rotation de la GSAP et couple électromagnétique, ceci montre que l'éolienne est bien adaptée à la variation du vent, grâce à la stratégie de contrôle MPPT proposée. Les courants  $i_d$  et  $i_q$  suivent parfaitement leurs références en appliquant la commande vectorielle à la GSAP (Figure(II.17))

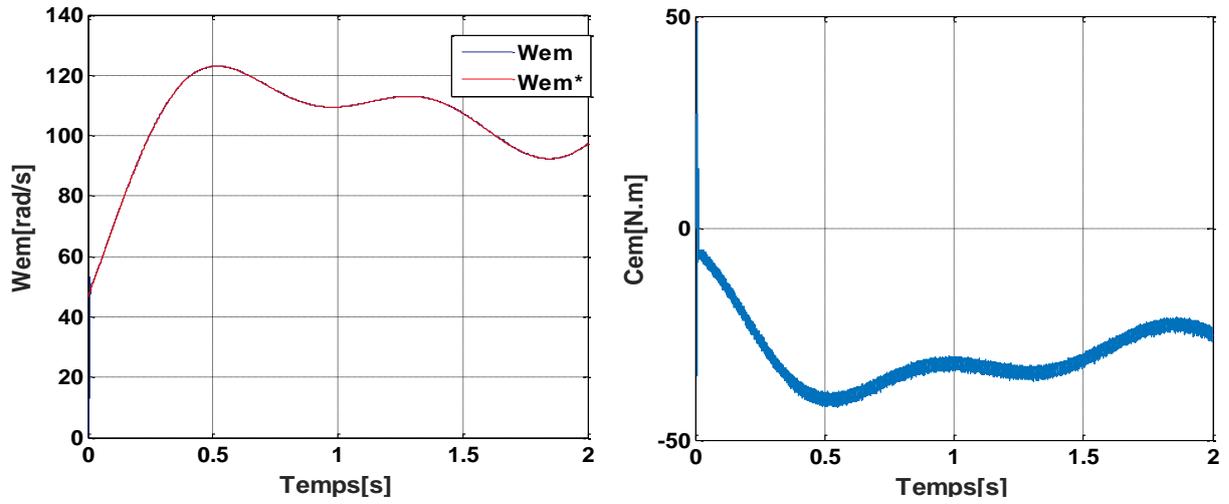


Figure II.16 : Vitesse de rotation et couple électromagnétique de la GSAP.

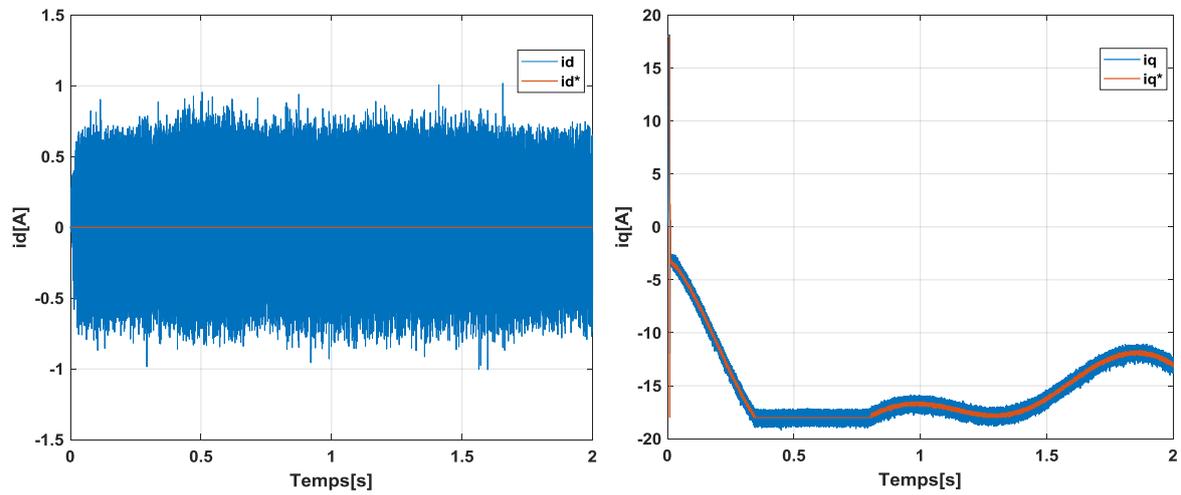


Figure II.17 : Courant direct et quadratique de GSAP.

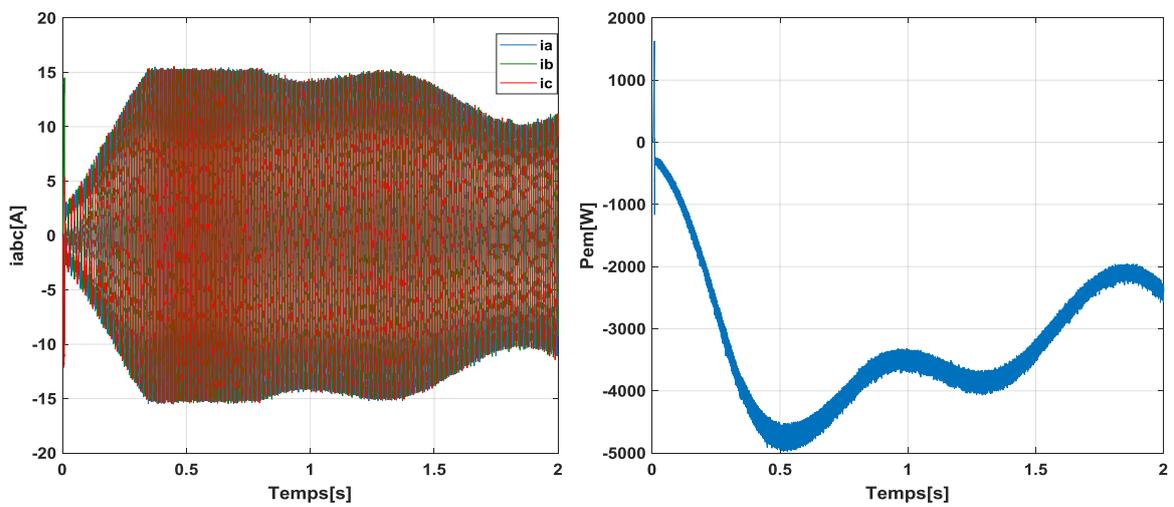
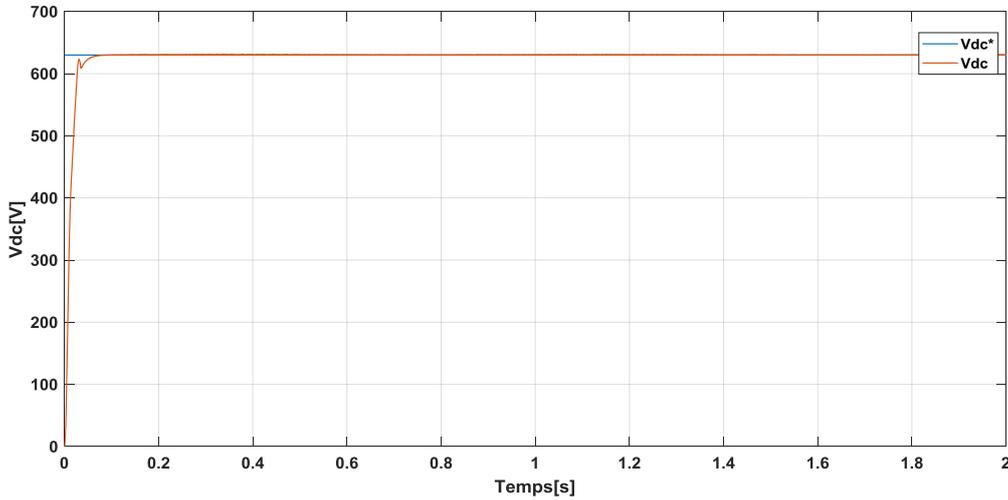


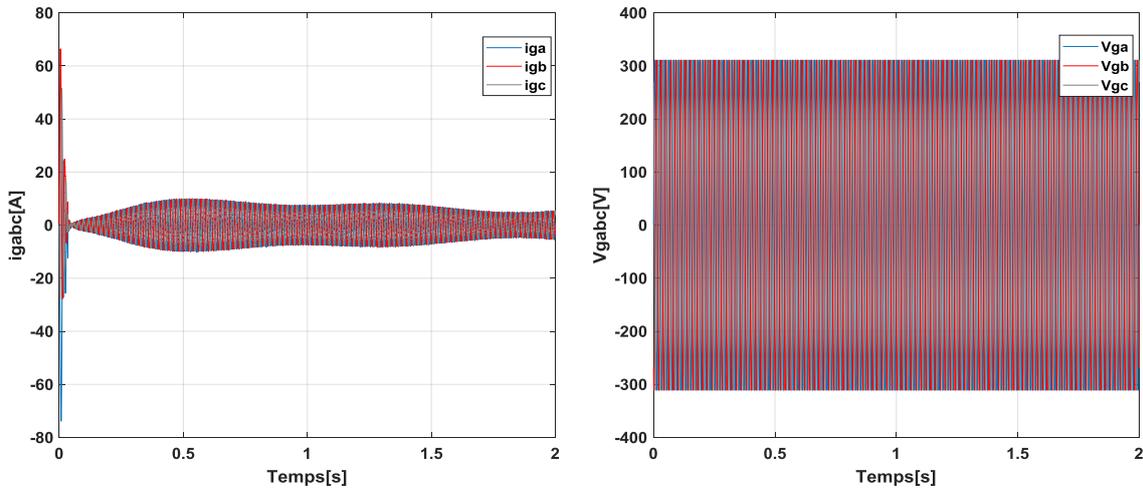
Figure II.18 : Courant statorique et puissance électromécanique de GSAP.

La figure (II.18) montre la forme sinusoïdale du courant triphasé et puissances générées sont négatives.

La tension de bus continu  $V_{dc}$  reste constante à une valeur de référence 630V, avec de faible oscillations causées par la variation de la vitesse de vent.

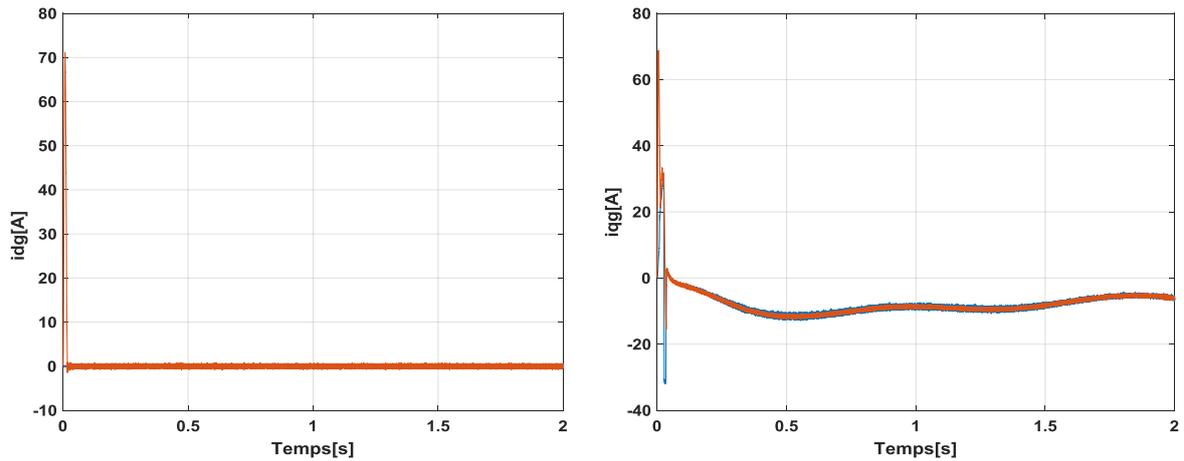


**Figure II.19:** Tension de bus continu  $V_{dc}$ .

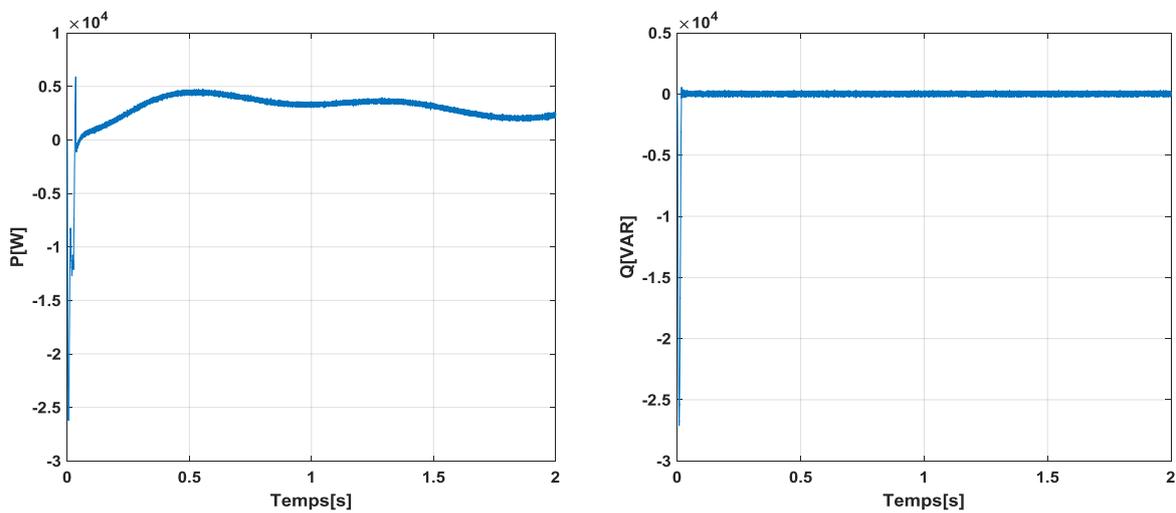


**Figure II.20 :** Courant et tension injectés au réseau.

La figure (II.20) montre la forme sinusoïdale du courant et tension injecté au réseau. Les courants  $i_{dg}$  et  $i_{qg}$  suivent parfaitement leurs références en appliquant la commande vectorielle coté réseau. La figure (II.22) illustre la puissance active et réactive délivrée au réseau, Pour toute la durée de simulation, la consigne de puissance réactive imposée est nulle pour facteur de puissance de l'ensemble du système reste unitaire. L'allure de la puissance active est l'image de la vitesse du vent et la puissance extraite par la turbine.



**Figure II.21** : Courant direct et quadratique injectés au réseau.



**Figure II.22** : Puissance active et réactive injectés au réseau.

## II.12 Conclusion

Dans ce chapitre, Nous avons établi, en premier lieu un modèle mathématique de la machine synchrone à aimants permanents dans le repère naturel, puis dans le repère de Park. . Ensuite, on a effectué une modélisation du redresseur MLI et de l'onduleur MLI.

Deux boucles de régulation ont été prévues pour la commande des courants, de courant  $I_d$  pour commander le flux et l'autre pour le courant  $I_q$  pour commander le couple électromagnétique, et boucle de régulation de vitesse de GSAP et boucle de commande la tension de bus continue et commande des puissances injectées. Finalement, Les résultats de simulation ont montré la possibilité d'extraire le maximum de puissance de l'énergie du vent et de contrôler la puissance de sortie de la chaîne de conversion.

## *Chapitre –III–*

---

Contrôle et diagnostic aux défauts des convertisseurs

### III.1 Introduction

L'intérêt grandissant des industriels pour la maintenance des entraînements électriques justifie l'accent mis pour la recherche sur le diagnostic des associations machine-convertisseur.

La complexité des systèmes mis en jeu et la nécessaire approche sous l'angle nouveau du diagnostic nécessitent aujourd'hui un travail préalable de détection/diagnostic des défauts de dans les convertisseurs statiques.

Actuellement un grand axe de recherches est orienté vers la surveillance de l'état du convertisseur DC/AC. En effet, un convertisseur tel que l'onduleur à MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) est susceptible de présenter des défauts structurels tels que les défauts d'ouverture des interrupteurs semi-conducteurs et par conséquent, ce type de dysfonctionnement peut induire des endommagements pour le système entier de production si le personnel n'est pas averti et qu'un arrêt intempestif ne soit produit. Puisque, l'appareillage de protection n'intervient qu'au dernier stade de défaut ; il est donc évident, que l'investissement dans le domaine de la détection des dysfonctionnements pourrait trouver une solution incontournable.

Dans ce contexte, le présent chapitre porte sur l'application de deux approches dédiées à la détection et au diagnostic des défauts de circuit ouvert dans le convertisseur à MLI utilisé dans les systèmes de conversion de l'énergie renouvelable [37].

### III.2 Définition

La définition du diagnostic (norme AFNOR et CEI) stipule que : Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la (ou de) défaillance(s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test [38].

Cette définition résume les deux tâches essentielles au diagnostic :

- Observer les symptômes de la défaillance,
- Identifier la cause de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur les observations.

### III. 3 Etapes de diagnostic

Les étapes de diagnostic sont détaillées comme suit [39] :

- **Prise de mesures** : La mesure que l'on fait sur le système est la seule information pour connaître l'évolution du système. Elle se fait à l'aide d'un capteur approprié et nécessite souvent une étape de filtrage,
- **Détection** : Souvent, il s'agit d'un test statistique traitant un signal susceptible de contenir des informations sur l'état du système à surveiller,

- **Localisation** : est une tâche liée aux caractéristiques du système. Il s'agit d'un test qui traite l'information sur l'origine de la provenance du défaut,
- **Identification** : Il s'agit de caractériser le défaut, d'estimer son importance et son comportement dans le temps,
- **Décision** : est une décision sur le type d'action à prendre pour rétablir de système,
- **Correction** : C'est l'action d'arrêter le système et de procéder à une maintenance corrective,
- **Adaptation** : C'est l'action de reconfiguration et d'adaptation de la consigne à injecter dans le système.

### III. 4 Définition et classification des défauts

Selon, un défaut est une déviation de la structure du système ou des paramètres du système par rapport à la situation nominale qui dégrade la performance en boucle fermée. Il est important de faire la différence entre les défauts et les perturbations ou les incertitudes du modèle. Les perturbations et les incertitudes du modèle sont des nuisances qui sont connues pour exister et qui peuvent être prises en compte avec un filtrage approprié et / ou des techniques de conception robuste. Cependant, un défaut produit des changements dans un composant ou un dispositif donné qui peut dégrader les performances du système global.

Différents types de défauts peuvent affecter un système [40] :

- **Défauts de l'installation ou du processus** : Ces défauts affectent les composants ou les dispositifs dans processus, avec les changements consécutifs dans les propriétés dynamiques d'entrée / sortie du système.
- **Défauts de l'actionneur** : Constituent des changements dans l'actionneur qui interrompent ou modifient l'influence du système de commande sur le processus.
- **Défauts du capteur** : affecter la lecture du capteur de sorte que des informations erronées soient renvoyées au système de commande.

Il est important de dire que les défauts de l'actionneur et du capteur n'affectent pas les propriétés de système contrôlé. En présence d'un défaut, des actions adéquates doivent être effectuées car un défaut peut éventuellement se transformer en panne du système. Ce dernier produit non seulement la perte de fonction et / ou la production, mais peut être nocif pour le système lui-même ainsi que pour les personnes et l'environnement.

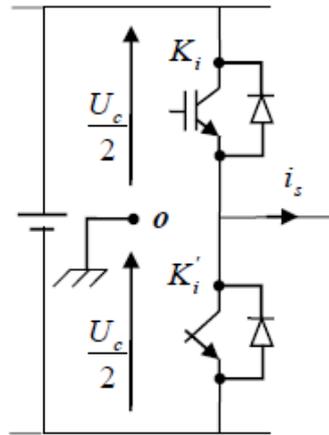
### III. 5 Défauts interne du convertisseur

#### III. 5.1 Défaut de type court-circuit

Le défaut de type court-circuit d'un interrupteur apparaît quand l'un des deux interrupteurs reste continuellement à l'état passant. Le court-circuit se produit lorsque le deuxième

interrupteur est à son tour commandé à la fermeture. Ce défaut se produit en raison d'une défaillance de la commande des transistors (défaillance du driver, défaillance de la carte de commande, problème de connectique entre la carte de commande et le driver) ou suite à une défaillance physique de la puce du silicium qui résulte d'un dépassement de la température et c'est le mode de défaillance le plus probable et le plus courant [41].

Les défauts de court-circuit des interrupteurs de puissance sont difficiles à manipuler en raison de la soumission du composant endommagé à un fort courant, à une tension élevée et à des températures locales excessives. Dans l'absence d'un mode de protection, ce défaut peut se propager et endommager l'autre interrupteur du même bras dans un temps très court de l'ordre de quelques microsecondes. La période entre l'initiation du défaut et sa défaillance totale est très courte. Par conséquent, la plupart des méthodes de diagnostic des défauts de type court-circuit sont basées sur des circuits matériels pour le contrôle de la tension émetteur-collecteur du transistor ou pour le suivi du courant de la cellule.



**Figure III.1** : Court-circuit sur un interrupteur d'un bras

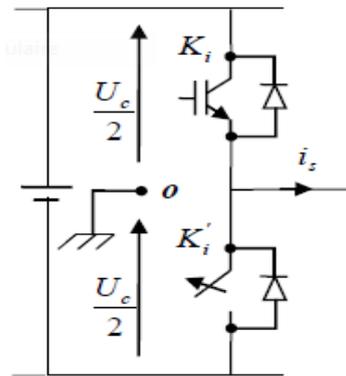
### III. 5.2 Défaut de type circuit-ouvert

Un défaut simple de type interrupteur-ouvert ou circuit-ouvert se traduit généralement par une perte totale ou partielle du fonctionnement de l'un des IGBT constituant le convertisseur statique, il se produit en raison d'une défaillance de grille ou une coupure d'un fil de liaison dans le transistor, cette coupure peut être causé par le cyclage thermique ou suite à un défaut de court-circuit. Un courant de collecteur extrêmement élevé peut également provoquer des défauts d'interrupteur ouvert. Le défaut d'ouverture d'IGBT se manifeste par la perte d'une alternance positive ou négative du courant de sortie de l'onduleur en fonction de l'emplacement du composant endommagé au niveau du bras défaillant (IGBT de l'étage inférieur ou de l'étage supérieur). Pour une dégradation simple d'un interrupteur de l'étage supérieur, la phase du moteur reste connectée seulement au potentiel négatif du bus continu par la diode antiparallèle de l'IGBT du niveau bas.

L'impact des défauts IGBT sur les performances du système d'entraînement est étudié dans le courant de la phase défectueuse s'annule et une augmentation de l'erreur de courant apparaît pour imposer à la modulante de rester saturée tout au long de l'alternance positive du courant de référence correspondant. Quand l'alternance du courant devient négative, l'erreur s'annule et le courant sera contrôlable. Les deux autres courants qui correspondent aux phases saines seront aussi déformés suite à ce défaut, cette déformation se manifeste par une augmentation de leurs amplitudes et ils ne deviennent plus parfaitement sinusoïdaux.

Cette distorsion importante des courants de phase se manifeste aussi sur le plan mécanique par l'apparition des vibrations sur l'arbre du moteur qui engendrent des oscillations au niveau de la vitesse mécanique mesurée. Ces vibrations sont les conséquences d'apparition des harmoniques dans les courants de référence qui engendrent des échauffements excessifs qui peuvent endommager le système d'entraînement électrique à vitesse variable. Pour un fonctionnement de longue durée du mode dégradé, ces vibrations vont conduire aux vieillissements accélérés des éléments mécaniques de la machine.

En résumé, les défaillances au niveau des commutateurs doivent être détectées et compensées indépendamment de leurs natures (court-circuit ou circuit ouvert), car en plus de la dégradation des performances du système, ils peuvent se propager et engendrer d'autres défaillances dans la chaîne de conversion d'énergie.



**Figure III.2 :** Circuit ouvert sur un interrupteur d'un bras

### III. 6 Méthodes de détections des défauts

#### III. 6 .1 Approche des vecteurs de Park

Cette méthode est basée sur la transformation de Park, à savoir la transformation des grandeurs de la machine triphasée à celles d'une machine biphasée, selon les deux axes **d** et **q**. On obtient de cette transformation les vecteurs de Park des tensions, des flux et des courants. Cette technique utilise les deux composantes du courant statorique  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$ .

Les vecteurs des courants de Park  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$  en fonction des courants  $(i_{sa}, i_{sb}, i_{sc})$  s'expriment comme suit :

$$\begin{aligned} i_{sd} &= (2/3)i_{sa} - (1/6)i_{sb} - (1/6)i_{sc} \\ i_{sq} &= (1/2)i_{sb} - (1/2)i_{sc} \end{aligned} \quad (III.1)$$

Dans le cas du moteur sans défaut, la courbe de Lissajous  $I_{sq} = f(I_{sd})$  à une forme circulaire centrée à l'origine et de diamètre égal à l'amplitude du courant statorique correspondant à l'état de fonctionnement du moteur. Pour le cas du moteur avec défaut, la courbe de Lissajous change en forme et en épaisseur à cause de la présence des harmoniques créent par le défaut. La stratégie de cette méthode est de comparer les deux courbes de Lissajous dans les deux cas du moteur avec et sans défaut lors de son fonctionnement [42].

### III. 6.2 L'analyse de la trajectoire du vecteur courant

Dans les conditions idéals, on suppose que

$$i_A + i_B + i_C = 0 \quad (III.2)$$

Les courants statorique s'expriment sous la forme suivante [43] :

$$\begin{aligned} i_A &= \frac{1}{3}(i_a - i_b) \\ i_B &= \frac{1}{3}(i_a - 2i_b) \\ i_C &= \frac{1}{3}(-2i_a - i_b) \end{aligned} \quad (III.3)$$

Avec  $(i_a, i_b, i_c)$  sont les courants de phases,  $(i_A, i_B, i_C)$  sont les courant de ligne.

Chaque défaut au niveau des convertisseurs statiques se caractériser par une signature spécifique, sous forme d'une courbe de Lissajous, Dans le référence stationnaire  $(\alpha, \beta)$ .

La détection du défaut peut être faite par simple calcul de la pente  $\psi$  du diamètre de la trajectoire du vecteur courant.

Le rapport  $\psi$  représente la pente de la trajectoire moyenne du courant sur un temps discret défini par :

$$\psi = \frac{i_{\alpha k} - i_{\alpha k-1}}{i_{\beta k} - i_{\beta k-1}} \quad (III.4)$$

$k$  et  $k-1$  sont l'instant actuel de calcul et l'instant d'avant.

### III. 6.3 Analyses des défauts par la FFT

L'analyse spectrale du signale est utilisée depuis de nombreuses années pour la détection des défaillances dans les machines électriques, en particulier les ruptures de barres au rotor, la dégradation des roulements, les excentricités, les court circuits dans les bobinages. La technique

d'analyse spectrale est utilisée dans le cas de la machine alimentée directement par le réseau ou à travers un onduleur de tension [44].

### III.6.4 Méthode de la tension de pôle estimée et mesurée

Plus récemment encore, la réduction du temps nécessaire à la détection du défaut, il a alors proposé d'utiliser des capteurs de tension supplémentaires pour la détection de défauts de types circuit-ouvert ou court-circuit, Il a montré qu'à l'aide de la mesure des trois tensions entre chaque phase du convertisseur et le point milieu des deux condensateurs de la source continue (tensions appelées conventionnellement "pole voltages" en anglais) et leurs comparaisons avec les tensions estimées, le défaut peut être alors détecté en un quart de période du fondamental des courants de phase [45].

### III.6.5 Diagnostic par logique floue

Cette approche, contrairement à la logique du tout ou rien de G. Boode, a pour but la prise en compte de la logique de la pensée humaine qui est approximative.

L'utilisation de technique de la logique floue pour le diagnostic de système permet d'obtenir des résultats interprétables et offre une information utile pour la décision d'action à effectuer en cas de défaillance.

Le concept de sous-ensemble flou a été introduit pour prendre en compte l'imprécision. La fonction d'appartenance à un ensemble flou prend des valeurs sur l'intervalle  $[0,1]$ . Celles-ci expriment le degré d'appartenance d'un élément à cet ensemble : 0 pour la non appartenance stricte et 1 pour l'appartenance stricte.

Le principe de fonctionnement du diagnostic basé sur la logique floue consiste à extraire et à calculer les signaux d'entrée, en utilisant les règles linguistiques représentées sous forme de fonctions d'appartenances, ces règles peuvent contenir tous les modèles possibles qui correspondent au mode de défaut considéré.

En général, la procédure de fonctionnement d'un système flou est accomplie en trois étapes :

- La fuzzification ;
- L'inférence ;
- La défuzzification.

Le bloc fuzzification contient en général un traitement de données préliminaires ; ces données sont alors traitées par des règles linguistiques, ce qui nécessite leur définition par des fonctions d'appartenance. La fuzzification fournit une série de variables floues, réunies par un vecteur, qui va être introduit au bloc d'inférence.

Dans le bloc inférence, les valeurs des variables linguistiques sont liées par plusieurs règles qui doivent tenir compte du comportement statique et dynamique du système (des effets du système à diagnostiquer).

Dans la dernière étape, il faut transformer la valeur floue (linguistique) en une valeur déterminée pour déduire l'état du système, ceci se faisant dans le bloc défuzzification [45].

### III.7 Analyse des conséquences du défaut de circuit ouvert

Les figures suivantes présentent les résultats obtenus par simulation de la chaîne éolienne pour le fonctionnement avec défaut de circuit ouvert de l'interrupteur K4 et K5 du à l'instant  $t = 0.3$  s. On va analyser le défaut à partir de la vitesse du vent à une valeur fixe.

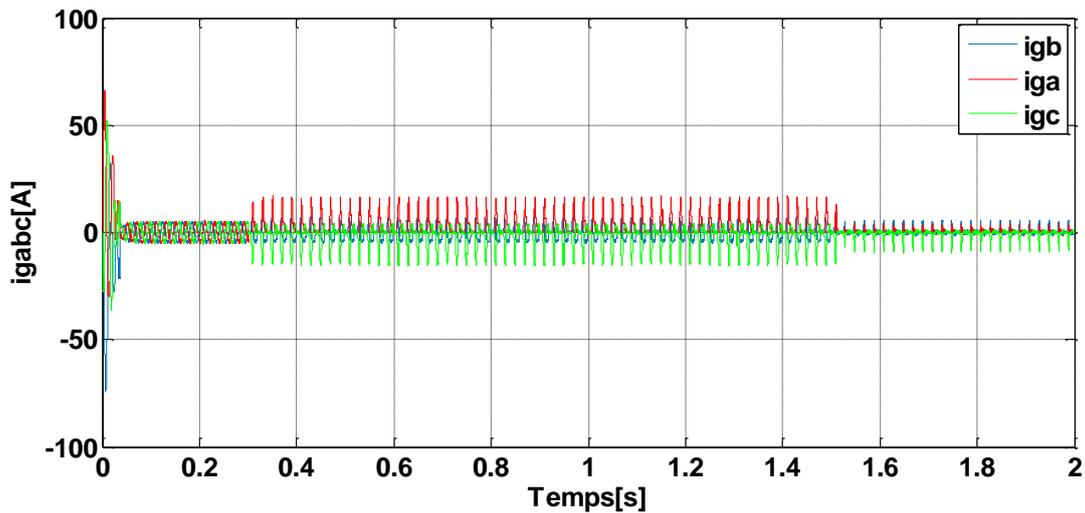


Figure III.3: Courant triphasé injecté au réseau dans le cas de défaut de circuit ouvert d'interrupteur K4.

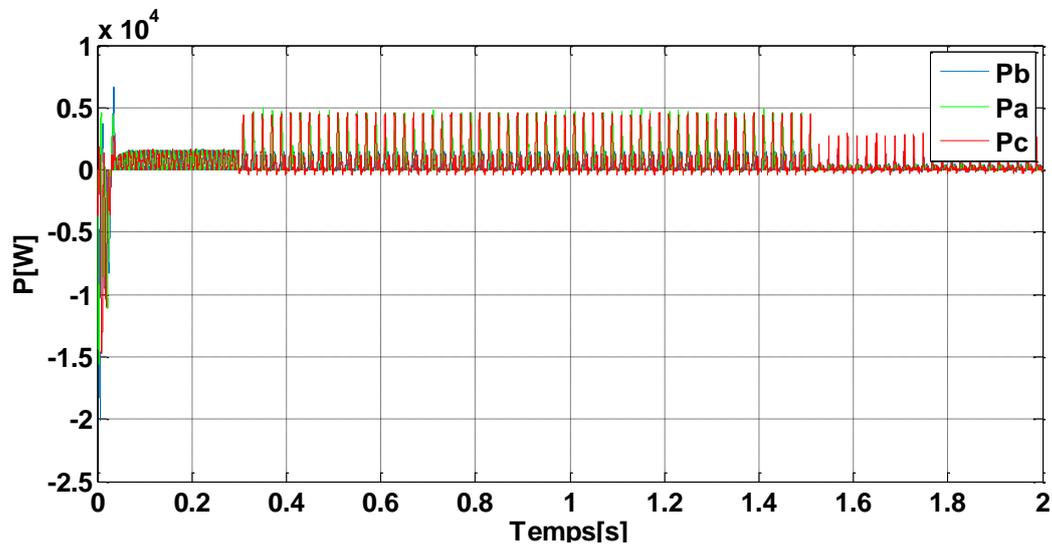
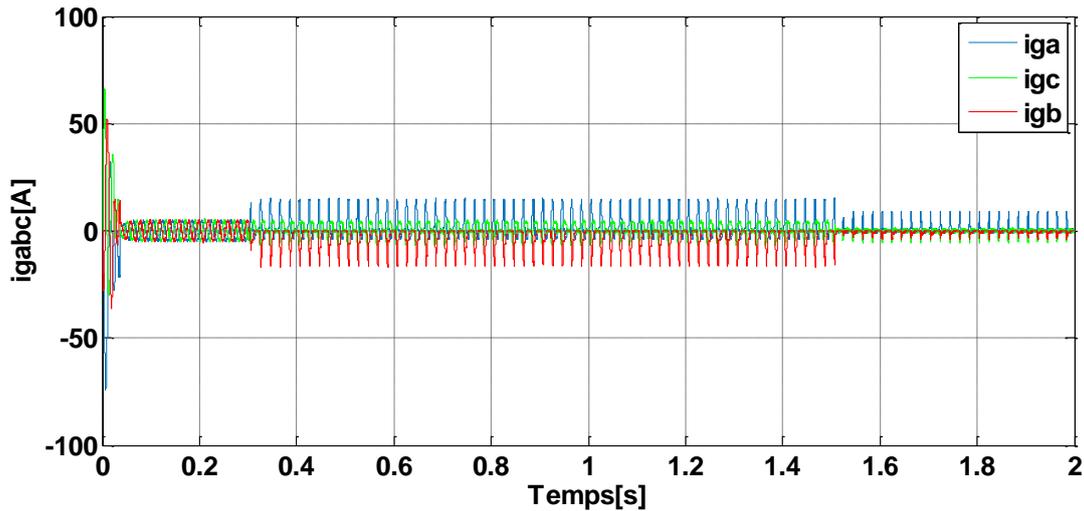
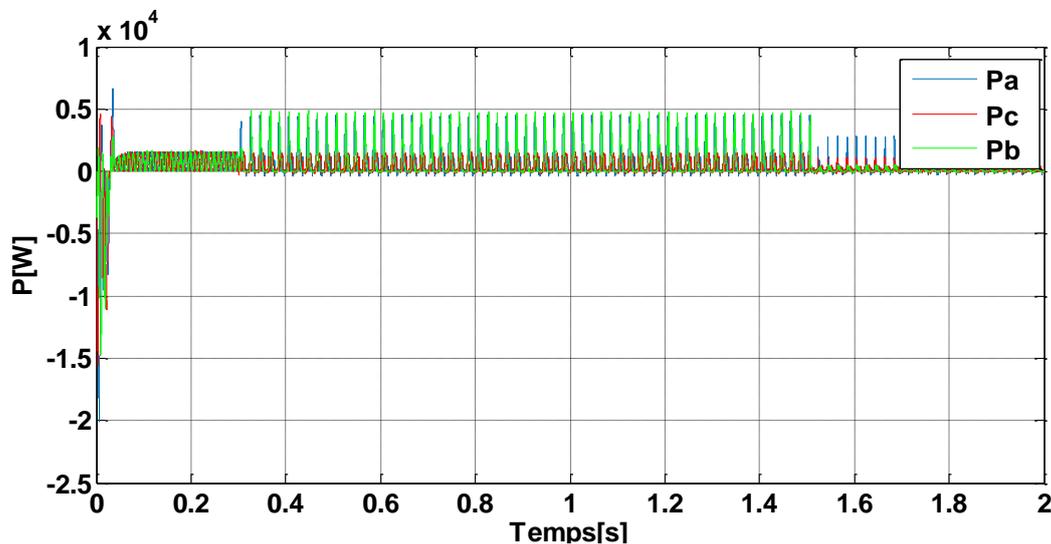


Figure III.4: Puissance active injectée au réseau dans le cas de défaut de circuit ouvert d'interrupteur K4.



**Figure III.5:** Courant triphasé injecté au réseau dans le cas de défaut de circuit ouvert d'interrupteur K5.



**Figure III.6:** Puissance active injecté au réseau dans le cas de défaut de circuit ouvert d'interrupteur K5.

Nous pouvons constatés que les courbes des puissances, courants triphasé présentent des oscillations plus importantes après l'apparition de défaut de circuit ouvert.

### III.8 Détection des défauts de circuit ouvert

#### III.8.1 Diagnostic par module et angle du vecteur de Park moyen

La méthode utilisant la valeur moyenne des courants de Park (ACPV Average Current Park Vector) est proposée dans le cas d'un convertisseur 2-niveaux triphasé. Notons que cet algorithme permet seulement de détecter un défaut circuit ouvert et localiser la paire d'interrupteurs défaillante. Il est basé sur l'analyse de l'amplitude et de la position du vecteur de Park moyen des trois courants de sortie du convertisseur, comme décrit ci-après.

Dans un premier temps, la valeur moyenne de chacun des trois courants triphasés de sortie du convertisseur est calculée par la relation [46].

$$I_{x_{av}}[k] = \frac{1}{N} \sum_{K=1}^N i_x[k] \quad \text{avec } x \in \{A, B, C\} \quad (\text{III.5})$$

Où N est le nombre d'échantillons et a, b, c les indices de chacune des trois phases.

$$\begin{cases} i_A[K] = I_m \cdot \cos(\omega T_s \cdot k) \\ i_B[K] = I_m \cdot \cos(\omega T_s \cdot k - \frac{2\pi}{3}) \\ i_C[K] = I_m \cdot \cos(\omega T_s \cdot k + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

Les courants de repère de Park

$$\begin{cases} i_{d_{av}}[k] = \frac{2}{3} i_{A_{av}}[k] - \frac{1}{3} (i_{B_{av}}[k] + i_{C_{av}}[k]) \\ i_{q_{av}}[k] = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{B_{av}}[k] - i_{C_{av}}[k]) \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

On a

$$i_{s_{av}}[k] = i_{d_{av}}[k] + j i_{q_{av}}[k] = |i_{s_{av}}[k]| \angle \theta_{s_{av}} \quad (\text{III.8})$$

$$|i_{s_{av}}[k]| = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \quad (\text{III.9})$$

Dans des conditions normales de fonctionnement du convertisseur, la norme de l'ACPV (norme du vecteur  $|i_{s_{av}}[k]|$ ) est égale à zéro. Si un défaut de type circuit ouvert survient, la valeur de cette norme va augmenter et dépasser une valeur seuil prédéfinie dans l'algorithme : le défaut sera alors détecté. Après avoir détecté le défaut, il faut maintenant le localiser. Pour se faire, on utilise l'angle de l'ACPV et selon sa valeur, il est possible de détecter quelle paire d'interrupteurs est en défaut.

**Table III.1** : Diagnostic du défaut d'ouverture d'IGBT utilisant le vecteur de Park

IGBT	Module du vecteur de Park	L'angle du vecteur de Park
K1	Supérieur au seuil	$120^\circ < \theta < 180^\circ$
K2	Supérieur au seuil	$-60^\circ < \theta < 0^\circ$
K3	Supérieur au seuil	$-120^\circ < \theta < -60^\circ$
K4	Supérieur au seuil	$60^\circ < \theta < 120^\circ$
K5	Supérieur au seuil	$0^\circ < \theta < 60^\circ$
K6	Supérieur au seuil	$-180^\circ < \theta < -120^\circ$

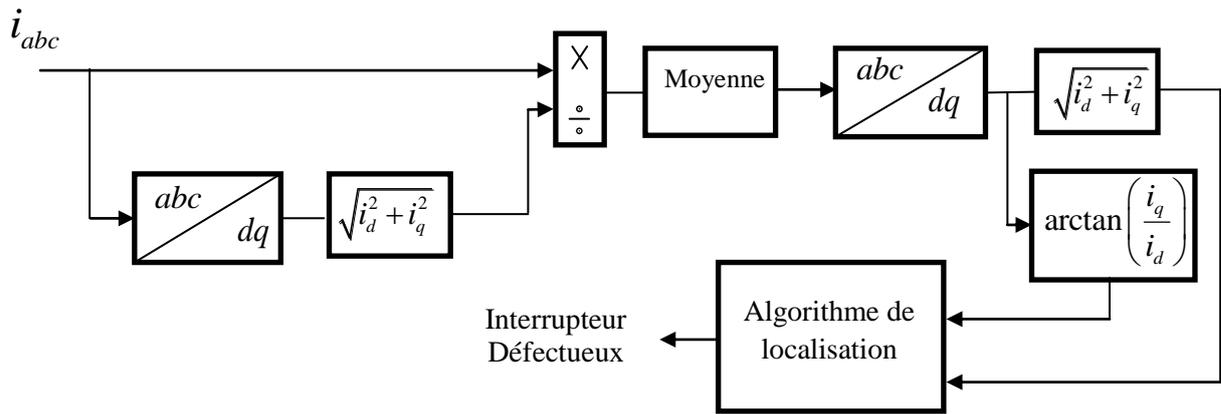


Figure III.7: Schéma globale pour la localisation d'un interrupteur ouvert.

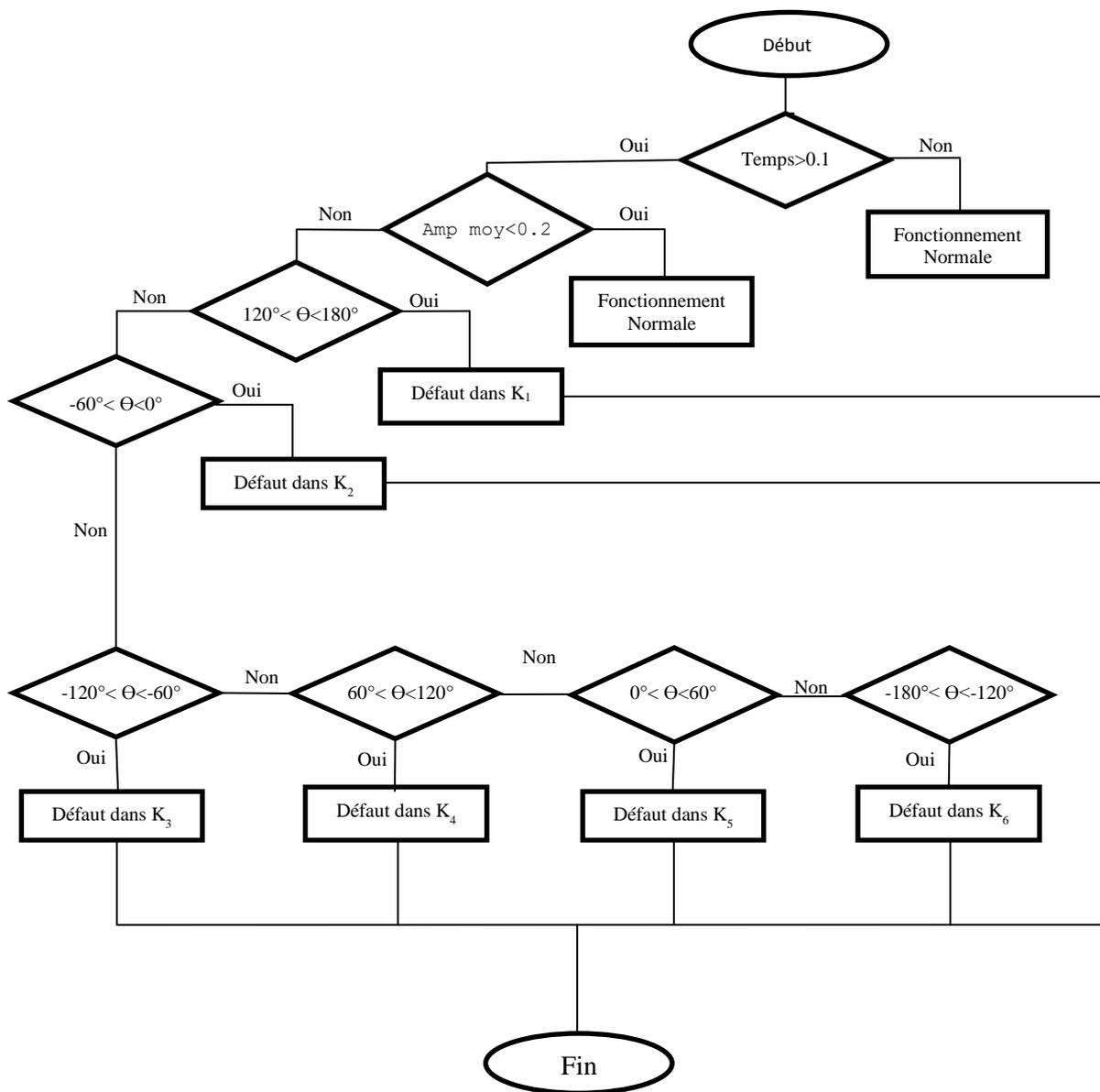


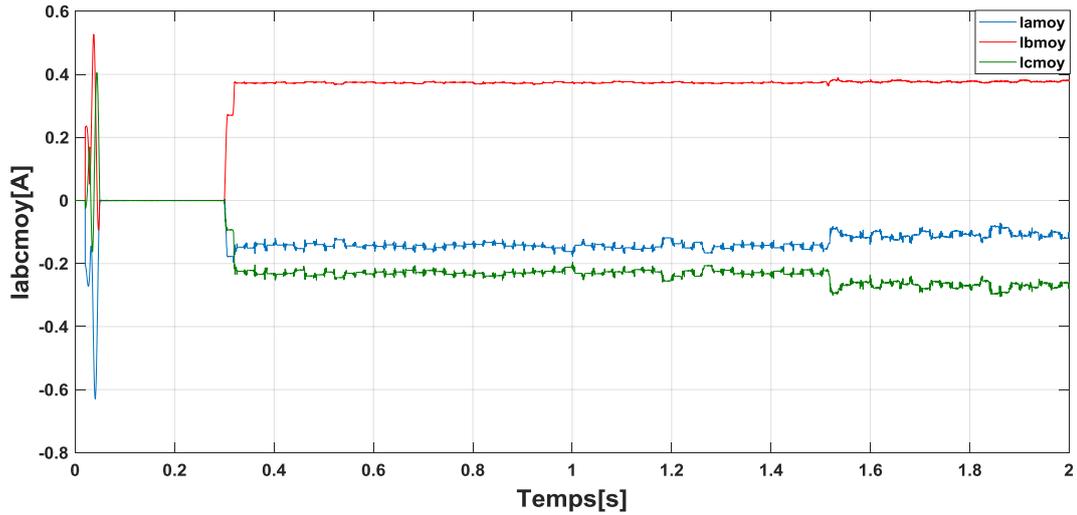
Figure III.8: Algorithme pour la détection du défaut circuit ouvert.

Les figures (III.9), (III.10), (III.11), (III.12) et (III.13) présentent les résultats de simulation de la détection de convertisseur pour le défaut de circuit ouvert qui s'applique à l'instant  $t=0.3s$  au niveau de l'interrupteur K4.

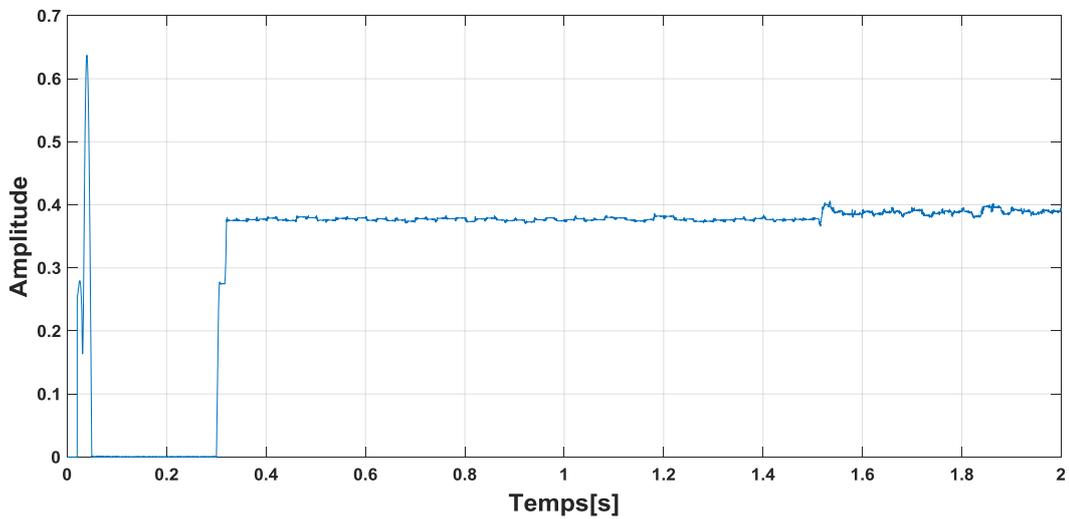
Les valeurs des courants moyennes  $I_a$  et  $I_c$  est négative et la valeur de courant  $I_b$  est positive.

On a remarqué que la valeur moyenne de l'amplitude des courants de Park est supérieure à 0.2.

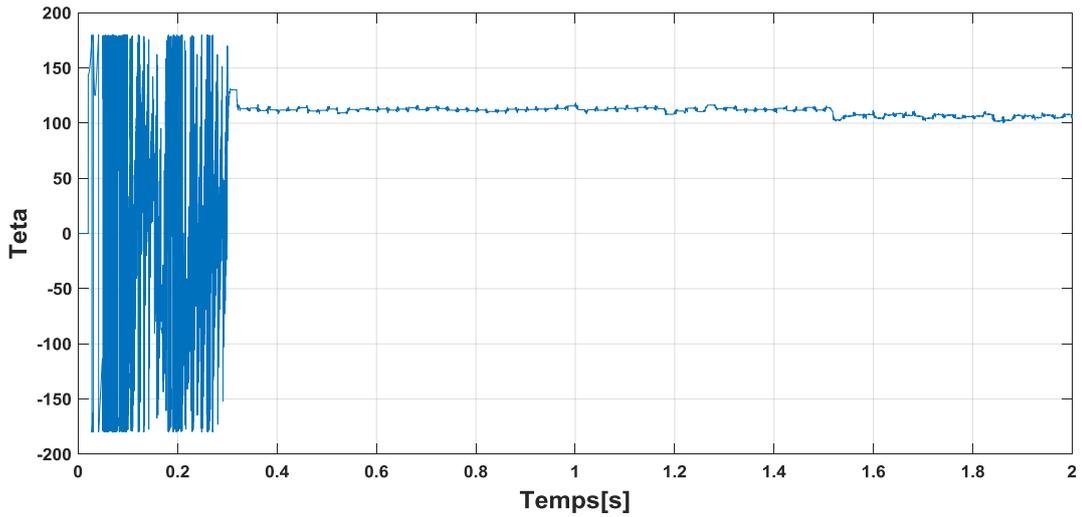
L'angle du vecteur de Park est égal à 113, donc le défaut est présent dans l'interrupteur K4.



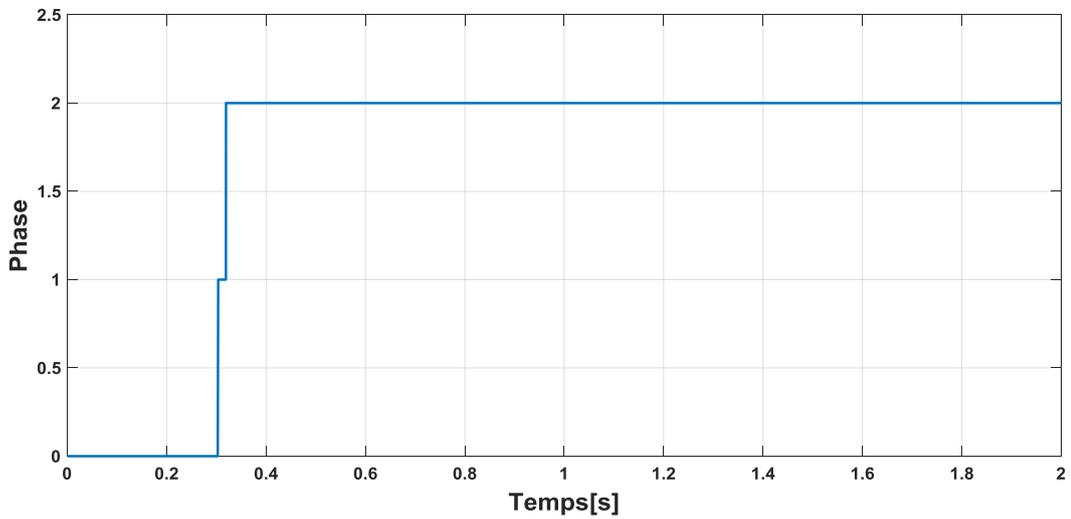
**Figure III.9:** La valeur moyenne des courants triphasés.



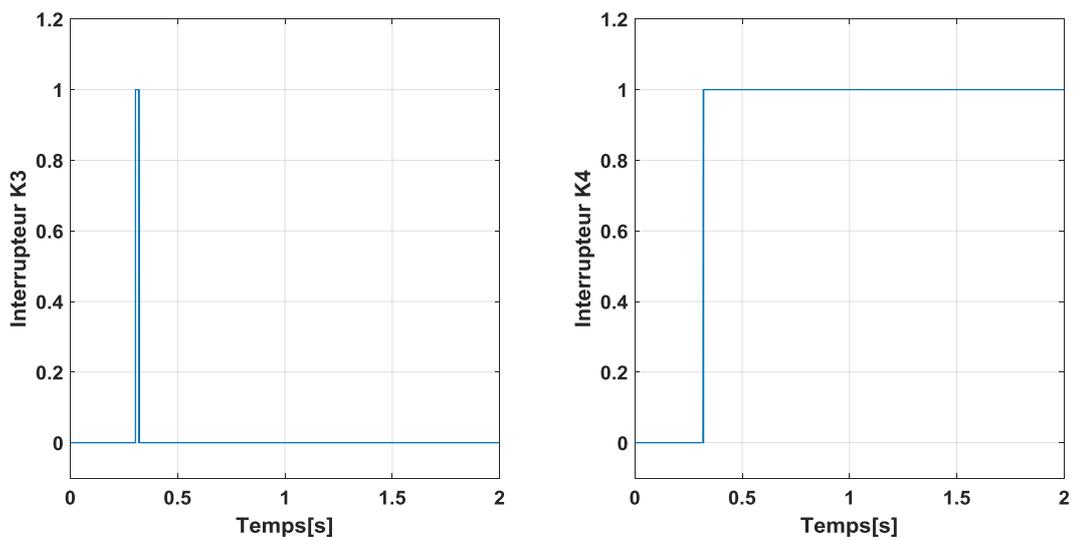
**Figure III.10:** L'amplitude de courant en repère de Park



**Figure III.11:** L'angle du vecteur de Park.



**Figure III.12:** Phase d'interrupteur en défaut

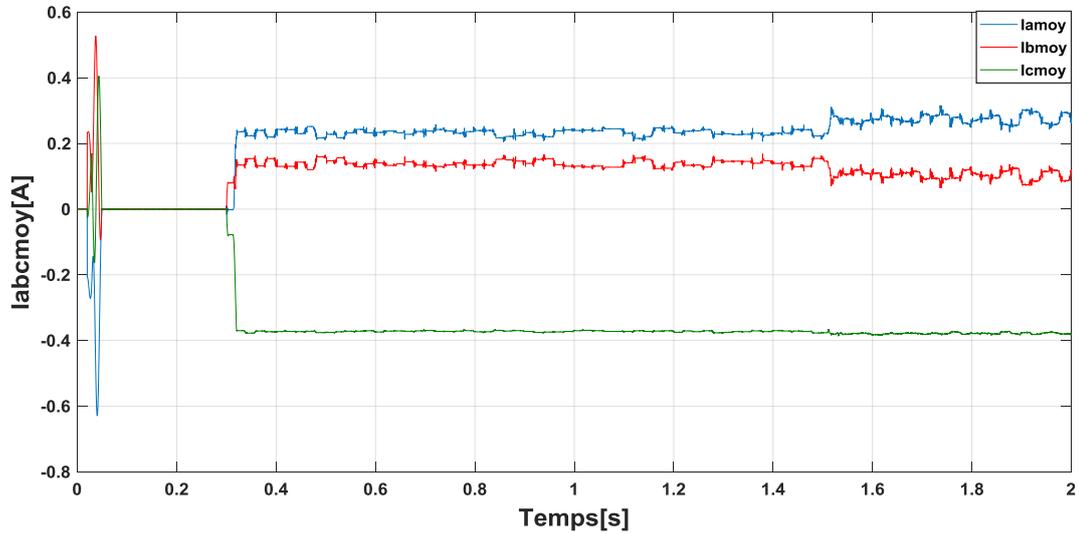


**Figure III.13:** Interrupteur en défaut

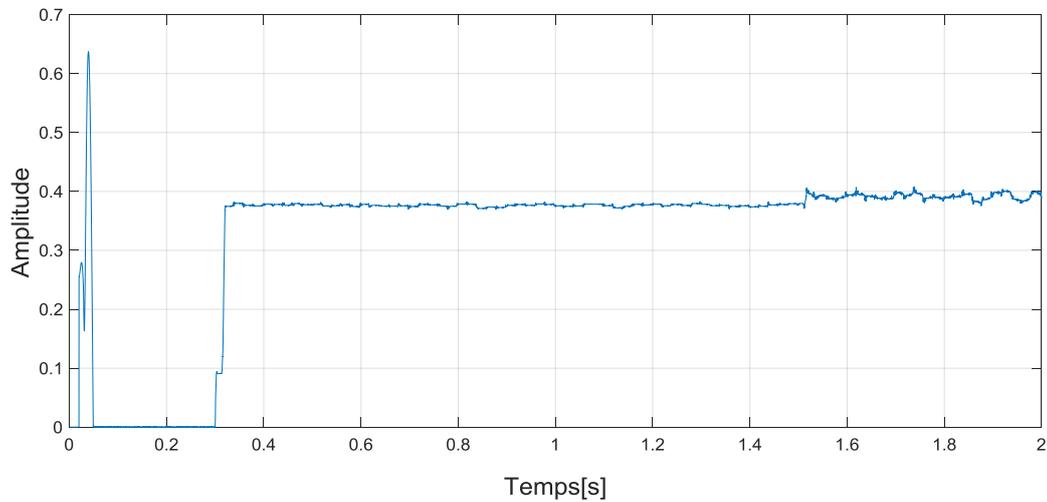
Les figures (III.14), (III.15), (III.16), (III.17) et (III.18) présentent les résultats de simulation de la détection du défaut de circuit ouvert à l'instant  $t=0.3s$  dans l'interrupteur K5.

La valeur de courant moyenne  $I_c$  est négative et les valeurs des courants  $I_a$  et  $I_b$  est positive.

On à remarquer que la valeur moyenne de l'amplitude des courants de Park est supérieure à 0.2. L'angle du vecteur de Park est égal à  $50^\circ$ , donc le défaut présenté dans l'interrupteur K5.



**Figure III.14:** La valeur moyenne du courant triphasée.



**Figure III.15:** L'amplitude de courant en repère de Park

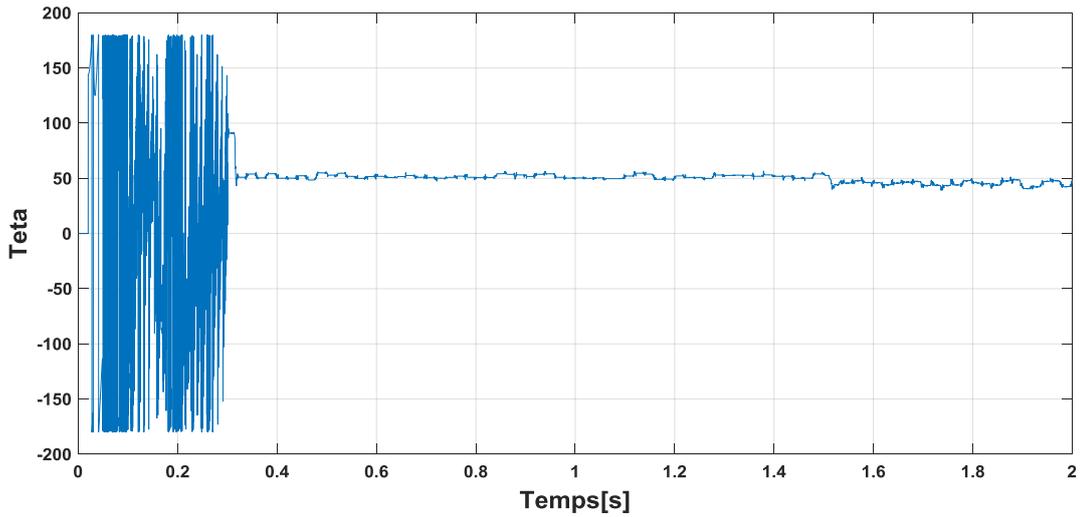


Figure III.16: L'angle de vecteur de Park.

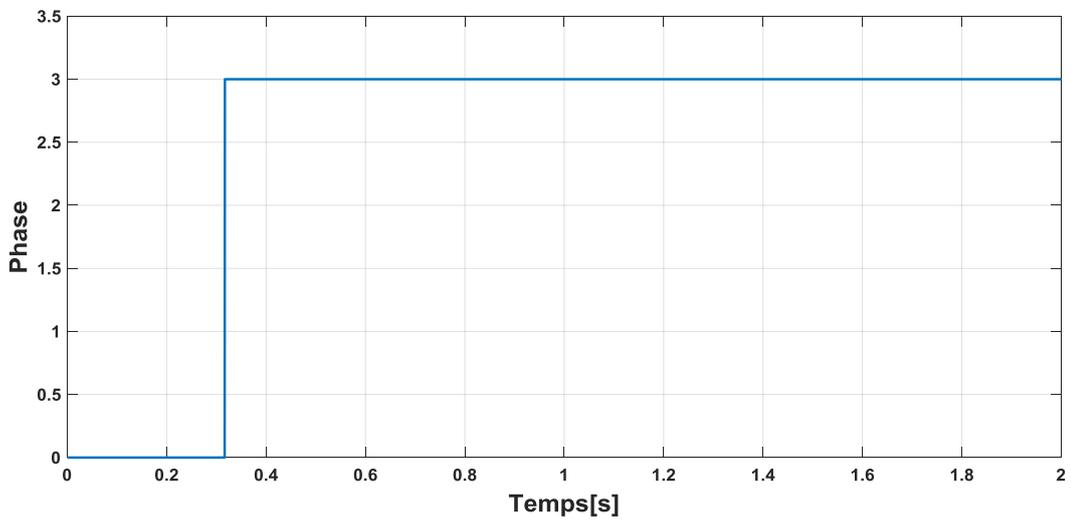


Figure III.17: Phase de l'interrupteur en défaut

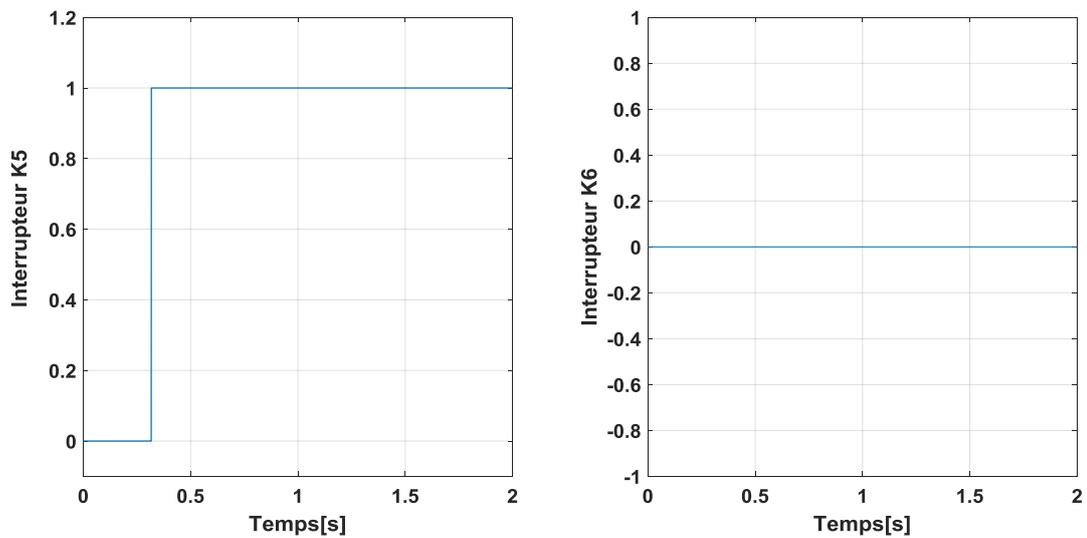


Figure III.18: Interrupteur en défaut.

### III.9 Conception d'un système de diagnostic avec la logique floue sous Matlab

L'implémentation du système d'inférence floue sous Matlab est réalisée par l'interface graphique de la boîte à outils. Méthode de diagnostic du défaut base sur logique floue.

#### III.9.1 Structure du système d'inférence floue (SIF)

Les bases de floues de l'approche proposée sont extraites de l'analyse des conditions défectueuses en circuit ouvert, et nous avons choisi un système d'inférence floue avec deux variables à l'entrées et une variable à la sortie.

La figure suivante montre le schéma bloc de notre système.

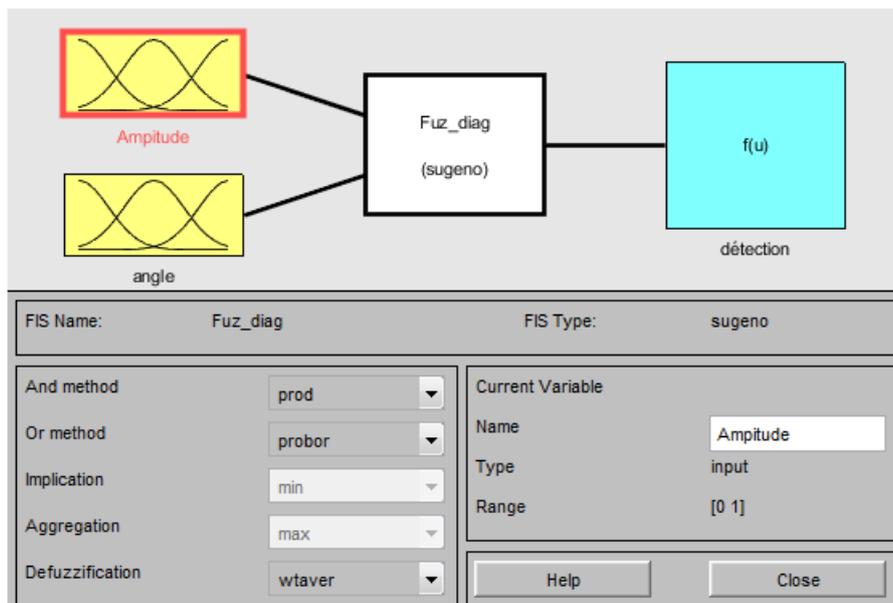


Figure III.19: schéma bloc du SIF.

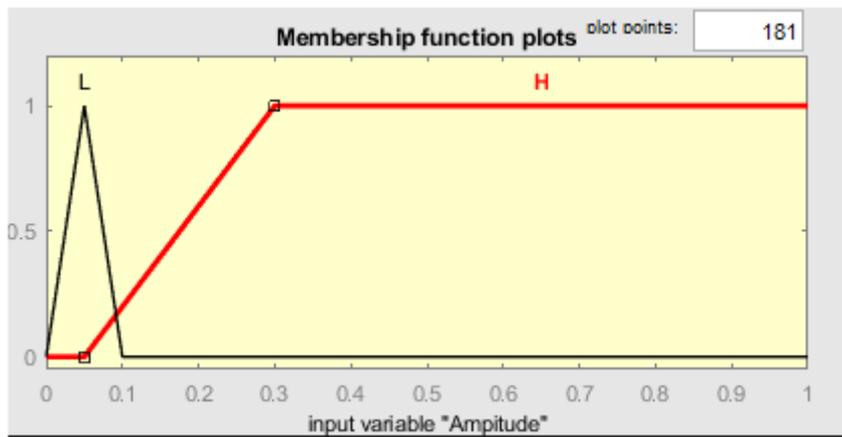
#### III.9.2 Fuzzification des variables d'entrées et de sorties

Elles permettent de définir le sous-ensemble flou et de mesurer le degré d'appartenance d'un élément à l'ensemble flou. Nous allons travailler dans ce chapitre avec une fonction d'appartenance de type trapézoïdale et triangulaire.

##### III.9.2.1 Fuzzification de la variable d'entrées (Amplitude)

La variable "Amplitude" varie dans l'intervalle  $[0 \ 1]$ . Donc, cette variable a deux fonctions d'appartenance de type triangulaire et trapézoïdale qui sont :  $[L, H]$

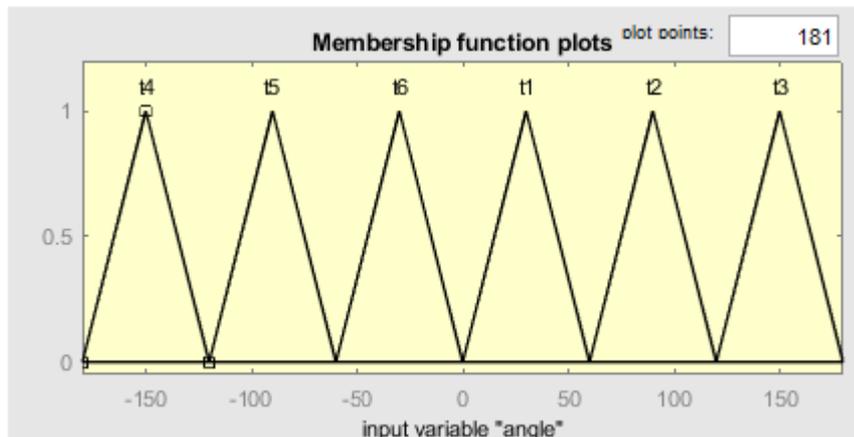
L : état sain, H : état de défaut



**Figure III.20:** Fuzzification de la variable d'entrée « Amplitude ».

### III.9.2.1 Fuzzification de la variable d'entées (Angle)

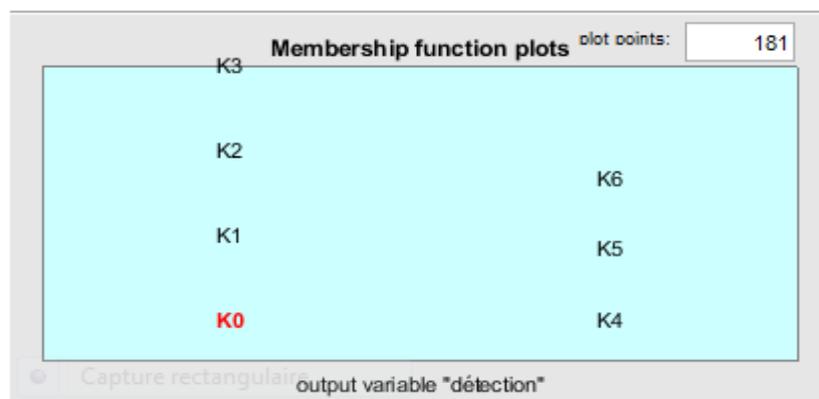
La variable "Angle" varie dans l'intervalle [-180 180]. Donc, cette variable a six fonctions d'appartenance de triangulaire qui sont : [t1, t2, t3, t4, t5, t6].



**Figure III.21:** Fuzzification de la variable d'entrée «Angle ».

### III.9.2.2 Fuzzification de la variable de sortie

La variable "détection" varie dans l'intervalle [0 1], cette variable a quatre fonctions d'appartenance de type constant qui sont : [K0, K1, K2, K3, K4, K5, K6].



**Figure III.22:** Fuzzification de sortie « détection ».

### III.9.3 L'inférence

La stratégie de diagnostic dépend essentiellement des inférences (règles). Pour simplifier la description des inférences on utilise une table d'inférence Tableau III.2.

**Tableau III.2** : Table d'inférence.

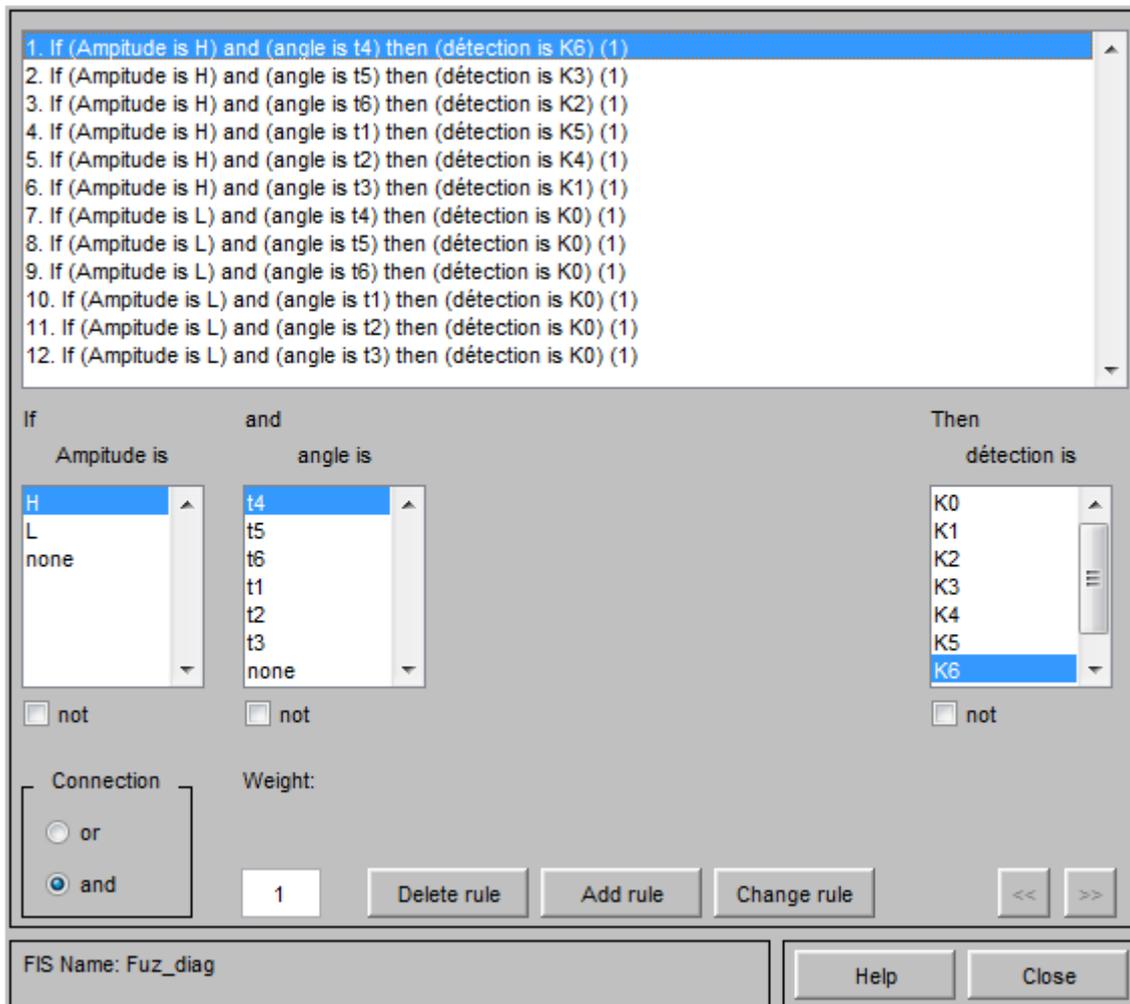
<i>Sorties</i> \ <i>Entres</i>	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$
$L$	$K_0$	$K_0$	$K_0$	$K_0$	$K_0$	$K_0$
$H$	$K_5$	$K_4$	$K_1$	$K_6$	$K_3$	$K_2$

On compte 12 règles d'inférence comme exemples les règles suivantes :

- SI (Amplitude est L) ET (Angle est t1) ALORS (détection==K0) → état sain (sans défaut),
- SI (Amplitude est H) ET (Angle est t1) ALORS (détection==K5) → intercepteur K5 en défaut,
- SI (Amplitude est H) ET (Angle est t6) ALORS (détection==K2) → intercepteur K2 en défaut.

Il faut noter que les situations de trois défauts ne sont pas présent en considération notre système de diagnostique par difficulté d'extraction des signatures propres à ces cas.

La figure (III.23) illustre la configuration des différentes règles floues pour les différentes situations de défauts dans le système flou.



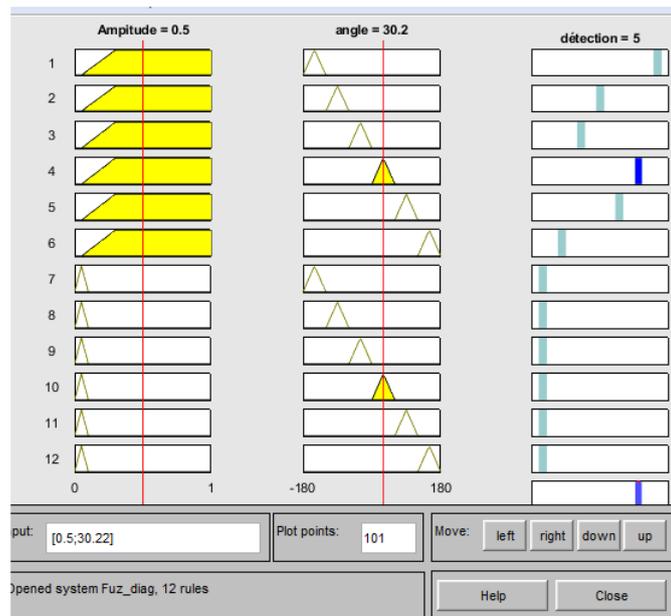
**Figure III.23:** présentation des règles d'inférence.

### III.9.4 Défuzzification

La défuzzification permet la conversion de l'union des sous-ensembles flous modifiés (fonctions d'appartenance résultantes fournies par l'inférence), à une sortie non floue ; suivie par une dénormalisation et conversion N/A.

Les figures (III.24), (III.25) illustre deux exemples de defuzzification le premier est dans le cas d'un défaut K2 tandis que le second concerne un exemple de défauts K5.

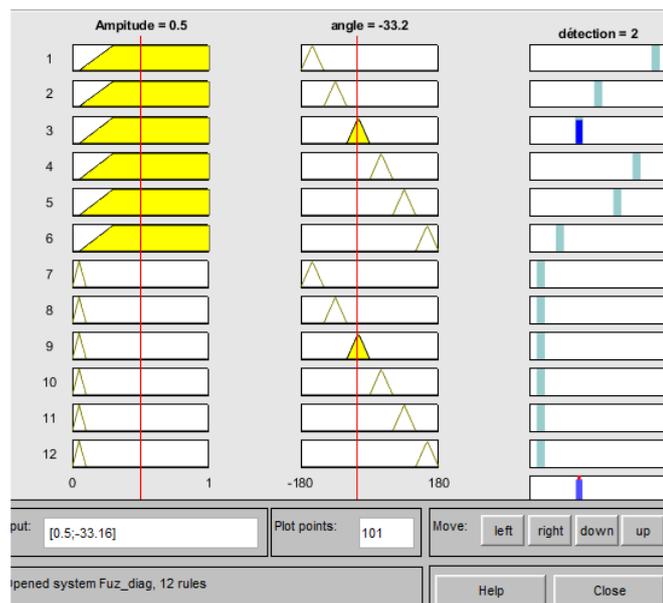
Le défaut appliqué dans  $t=1$



**Figure III.24:** Exemple de defuzzification en cas de défaut K5.

- Amplitude = 0.5, et Angle = 30.22, détection=5.

Donc le résultat obtenu par le système (SIF) est confondu avec l'hypothèse que nous avons considérée, donc notre système à bien classer le défaut.



**Figure III.25:** Exemple de defuzzification en cas de défaut K2.

- Amplitude = 0.5, et Angle = -33.16, détection=2.

Donc le résultat obtenu par le système (SIF) est confondu avec l'hypothèse que nous avons considérée, donc notre système à bien classer le défaut.

### III.10 Résultats de simulation

Les résultats de simulation des deux cas de défaut étudiés précédemment sont donnés par les figures suivantes présentés par la sortie correspondante du système flou.

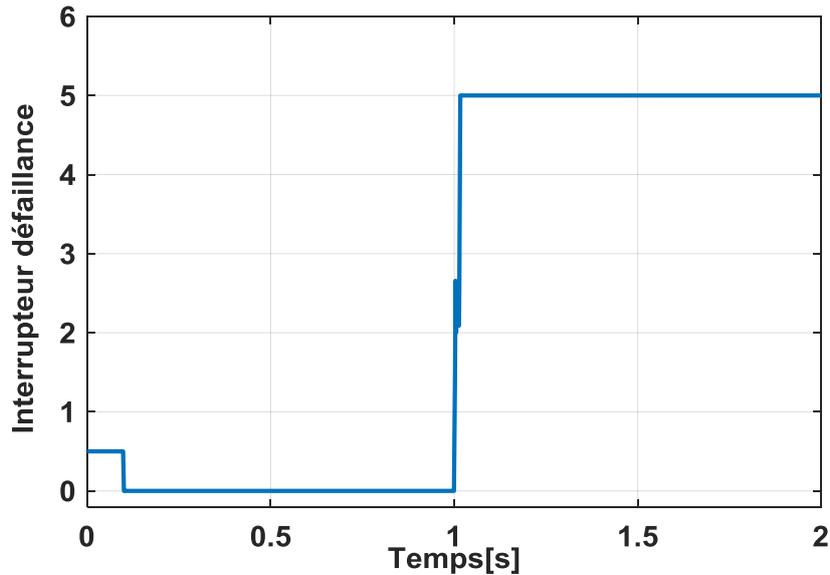


Figure III.26: Cas de défaut dans interrupteur K5.

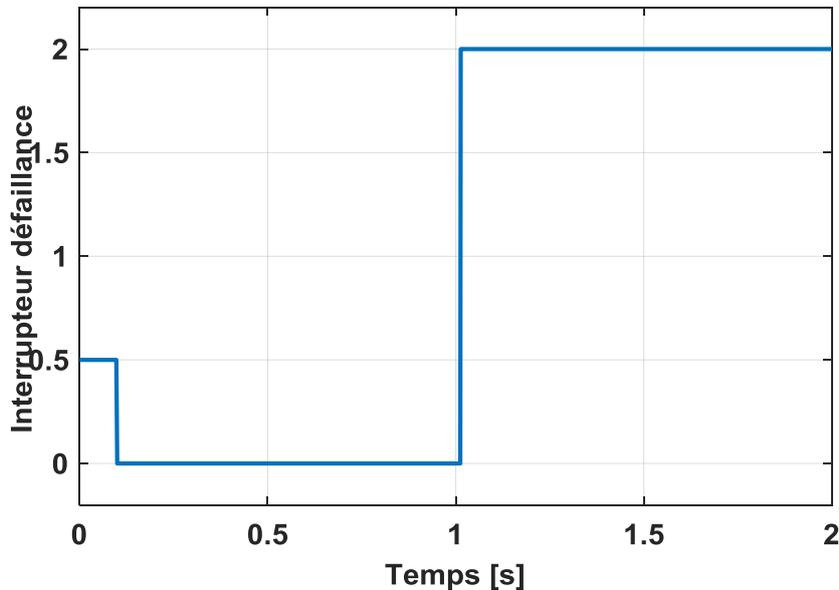


Figure III.27: Cas de défaut de l'interrupteur K2.

### III.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous étudions le défaut de circuit ouvert d'un interrupteur de l'onduleur par simulation à l'aide de MATLAB / SIMULINK où nous observons les résultats de la simulation lors de l'application d'un défaut (l'ouverture d'un interrupteur) où le système de diagnostic de défaut d'onduleur MLI s'est produit en utilisant la première technique de diagnostic générée à partir du module et de l'angle du vecteur de Park cette dernière représente une méthode simple qui fonctionne en temps réel, qui permet l'identification de l'interrupteur défectueux. La deuxième méthode de diagnostic flou est capable de détecter le défaut, permettant au contrôle en toute sécurité en isolant le défaut.

---

*Conclusion générale*

---

Vue la tendance de la majorité des pays vers les énergies renouvelables, le gisement éolien présente l'un des potentiels propres et un grand rendement par rapport à l'énergie solaire, et dans le cadre de la réalisation du mémoire de Master, nous avons choisi de travailler sur le thème de la production et conversion de l'énergie éolienne basée sur la GSAP, Nous avons abordé quelques notions théoriques concernant le système éolien, ses avantages et inconvénients. Nous avons aussi étudié les différents types des éoliennes. Nous avons présenté également une modélisation mathématique de la chaîne éolienne connectée au GSAP. Le choix a été porté sur l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents à vitesses variables avec redresseur commandé par MLI. Une simulation de la chaîne éolienne a été effectuée en utilisant le logiciel MATLAB, notre programme porte sur le fonctionnement du chaîne éolienne selon une structure de conversion d'énergie choisie constituée d'une génératrice synchrone à aimants permanents, pilotée par un convertisseur contrôlé par MLI, le bus continu placé en aval de ce convertisseur, Un modèle complet du système a été développé dans le but d'analyser son comportement dynamique. Un dispositif de control est basé sur la commande vectorielle de la génératrice associé au système de conversion pour pouvoir extraire la puissance maximale du vent. Les résultats de simulation pour un profil du vent donné ont permis d'envisager les objectifs fixés par ces stratégies de commande.

Enfin, nous avons étudié dans la dernière partie, la détection et diagnostic des défauts de type circuit ouvert d'un interrupteur de l'onduleur MLI à deux niveaux dans un entraînement électrique. Deux techniques statistiques ont été proposées pour la détection et de diagnostic des défauts, puis évaluées. La première méthode, le défaut est détecté avec le module et l'angle du vecteur de Park .Puis, en second, nous avons utilisé l'application de la logique floue pour la détection et l'identification des défauts .

Finalement, nous recommandons la poursuite de notre travail de mémoire par une étude de perspectives pour améliorer positivement les futurs travaux à savoir :

- La détection et diagnostic des défauts pour les onduleurs multi-niveaux (trois et cinq niveaux).

- La détection et diagnostic par technique des réseaux neurones

Ce travail de mémoire est terminé par une étude d'annexe et avec bibliographie.

*Annexe*

---

- Le tableau suivant donne les différents paramètres utilisés dans la simulation de la chaîne éolienne :

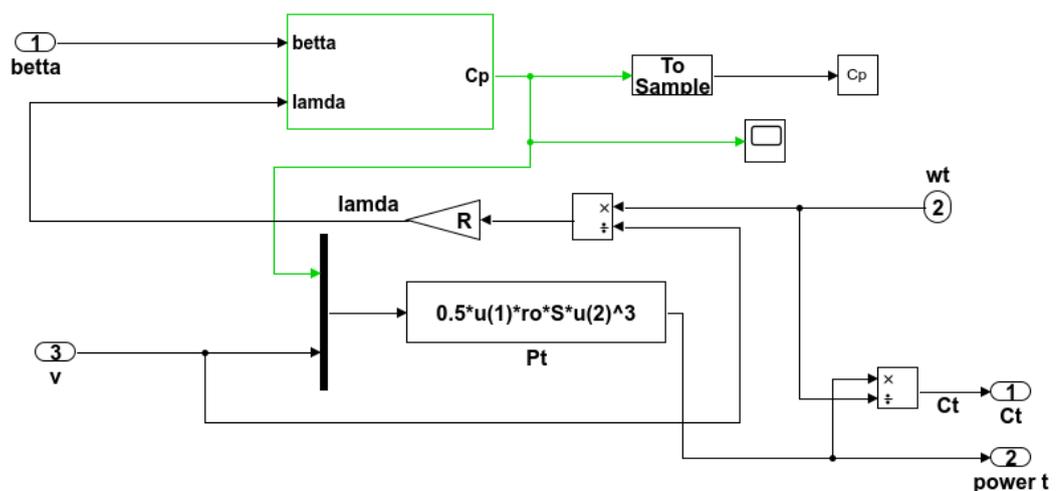
Elément de la chaîne	paramètres	Valeurs	Désignations, Unités
Turbine éolienne	$R$	3	Diamètre d'une pale [m]
	$G$	5.4	Gain du multiplicateur
	$J_{Turbine}$	0.042	Moment d'inertie de la turbine [ $K_g.m^2$ ]
	$F_{Turbine}$	0.017	Coefficient de frottement [ $N.m.S^{-1}$ ]
	$\rho$	1.22	Densité de l'air [ $K_g/m^3$ ]
	$\lambda_{opt}$	8.1	Vitesse spécifique optimale
GSAP	$F_{sn}$	50	Fréquence de la tension d'alimentation [ $H_z$ ]
	$P$	3	Nombre de pair de pôle
	$L_d$	0.0075	Inductance statorique direct [ $H$ ]
	$L_q$	0.0075	Inductance statorique quadratique [ $H$ ]
	$R_s$	0.45	Résistance statorique [ $\Omega$ ]
	$\varphi_f$	0.52	Flux de l'aimant permanent [Wb]
	$J_g$	0.00208	Moment d'inertie de la génératrice [ $K_g.m^2$ ]
	$F_g$	0.00017	Coefficient de frottement [ $N.m.S^{-1}$ ]
Bus continu	$V_{dc}$	630	Tension du bus continu [ $V$ ]
	$C$	1500e-6	Capacité [ $mF$ ]
	$L_F$	0.014	Inductance [ $mH$ ]
	$R_F$	1.4	Résistance [ $\Omega$ ]
Réseau	$V$	220	Tension du réseau [ $V$ ]
	$F$	50	Fréquence de la tension du réseau [HZ]

Paramètres du régulateur PI	symbole des paramètres		Valeur numérique	
vitesse de la turbine	$\omega$	600	$K_i$	1.3180e+03
	$\xi$	3.3	$K_p$	7.2483
courants $i_{sdq}$	$t_f$	0.0167	$K_i$	18900
			$K_p$	315
Bus de tension continue $V_{dc}$	$\omega$	300	$K_i$	76.1421
	$\xi$	1.97	$K_p$	0.0023
courants $i_{gdq}$	$t_f$	0.0100	$K_i$	1.2544e+06
			$K_p$	112

- **Conditions de simulations**

Les différentes simulations ont été faites à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK. Les conditions adoptées lors des simulations sont les suivantes :

- La méthode : Ode4 (Runge-Kutta),
  - le temps de calcul :  $0.5\mu S$ ,
  - Fixed step.
- On donne le schéma bloc des différents éléments de la chaîne éolienne sous Matlab/simulink



**Figure 1 : Turbine**

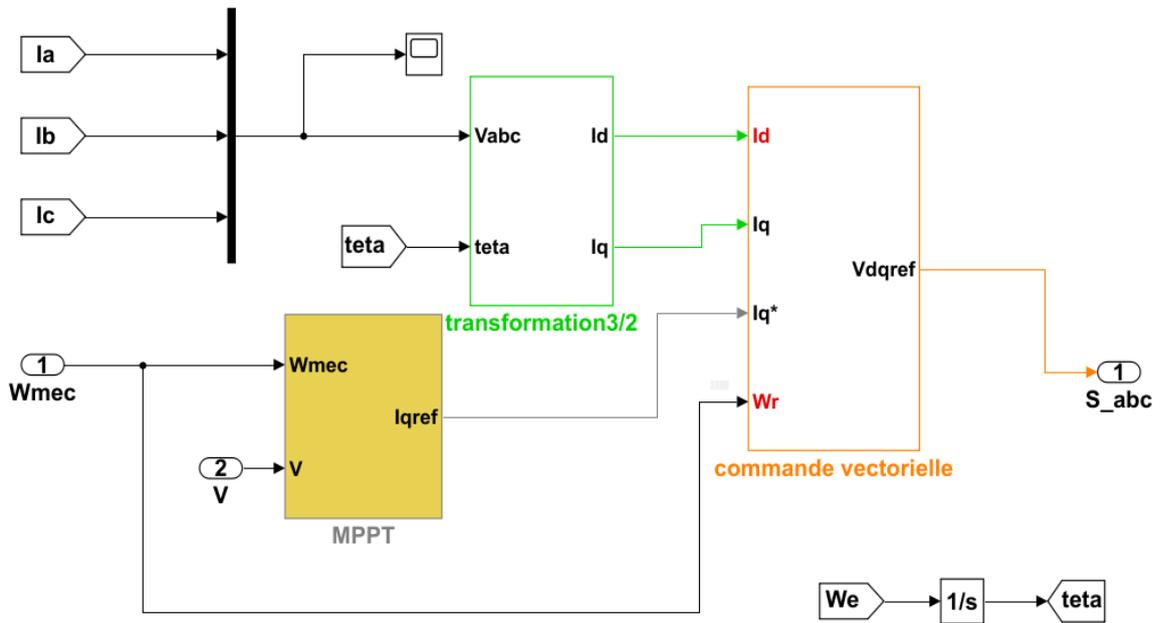


Figure 2 : Transformation de Park + MPPT + Commande Vectorielle.

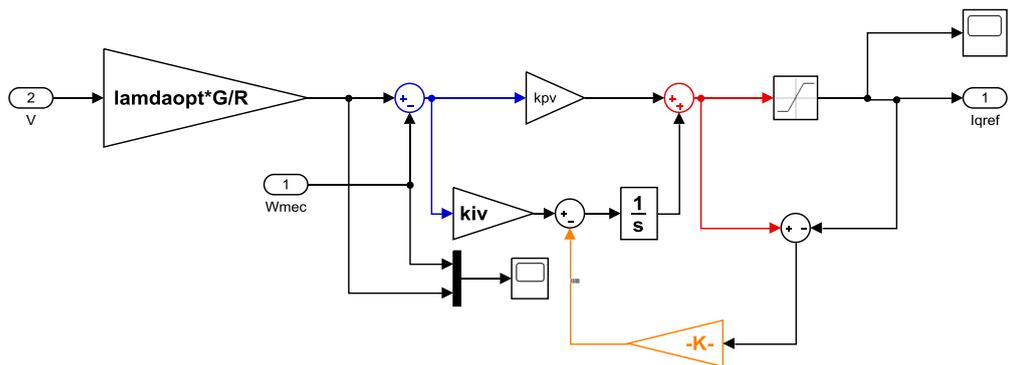


Figure 3 : MPPT

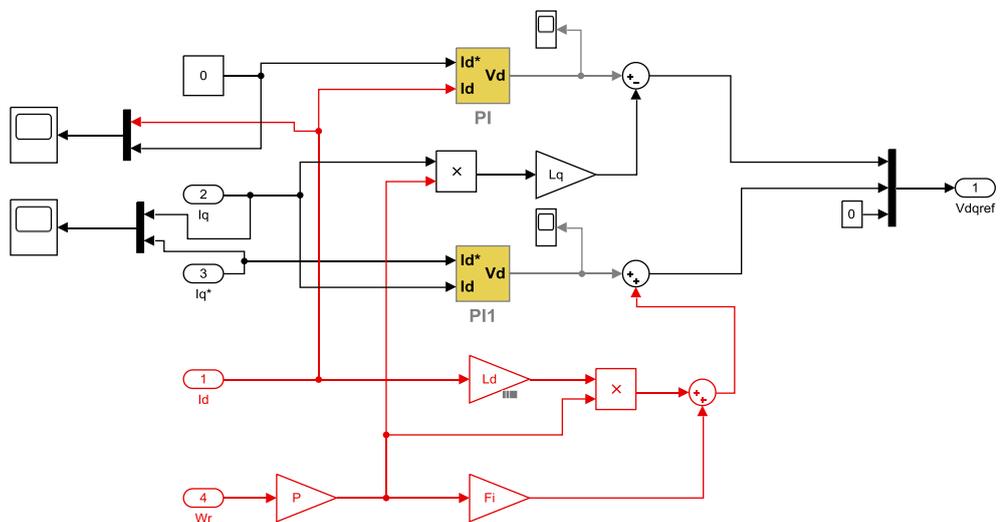


Figure 4 : commande vectorielle de la GSAP.

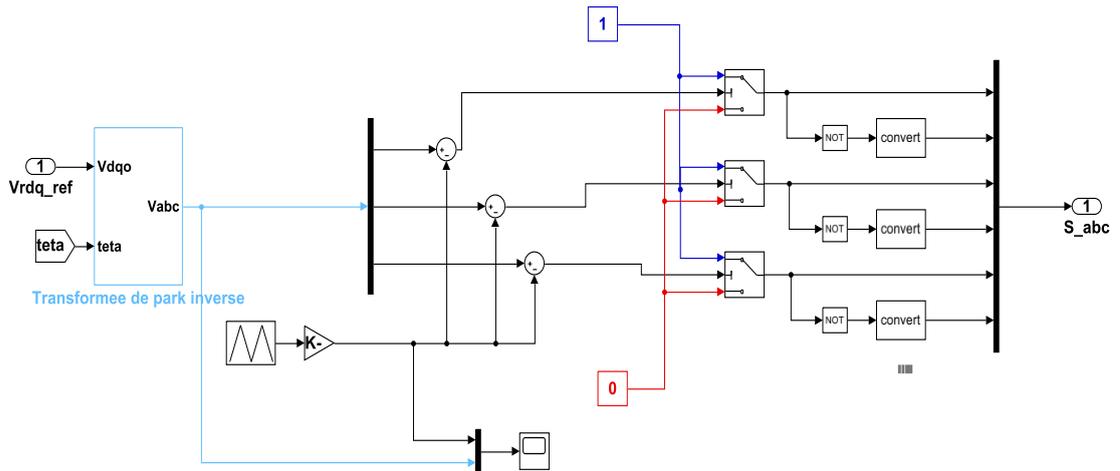


Figure 5 : Modélisation Redresseur à MLI.

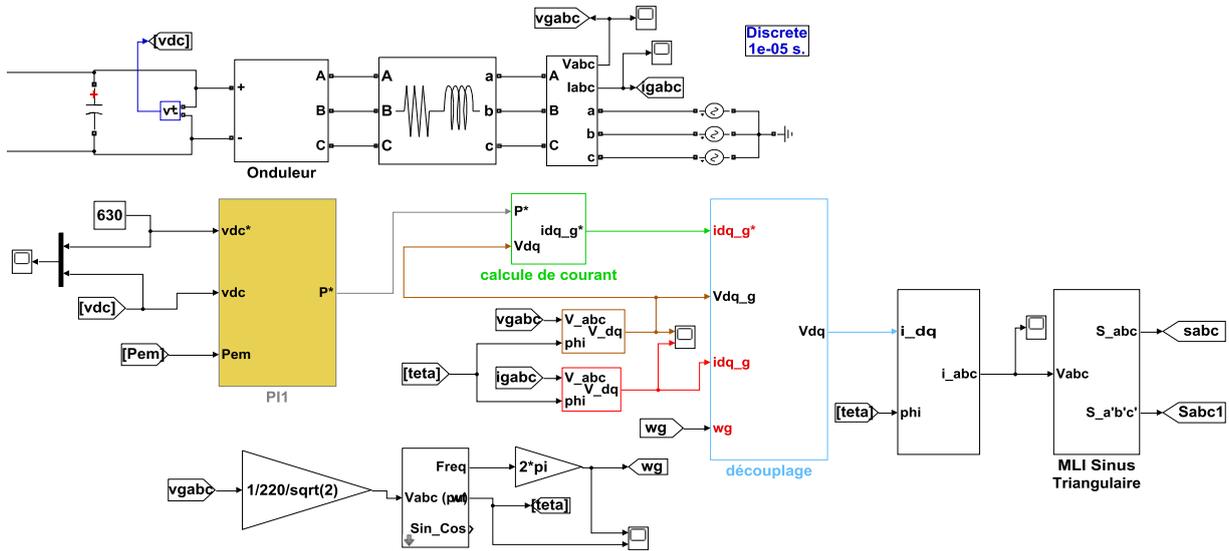


Figure 6 : Connexion au réseau.

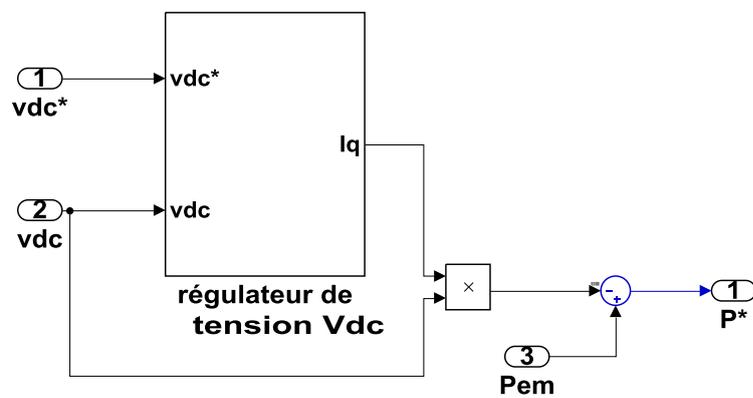


Figure 7 : Contrôle du bus continue.

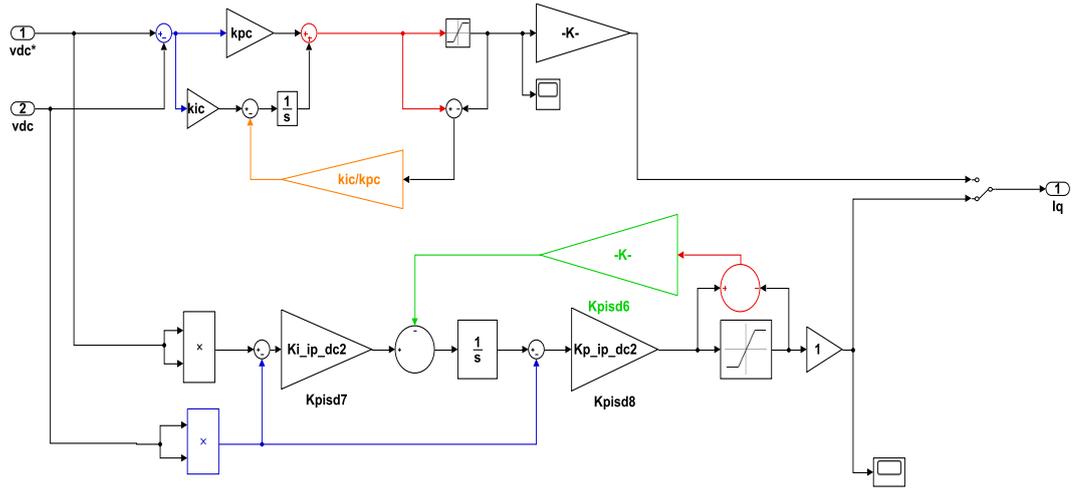


Figure 8 : régulateur de tension Vdc

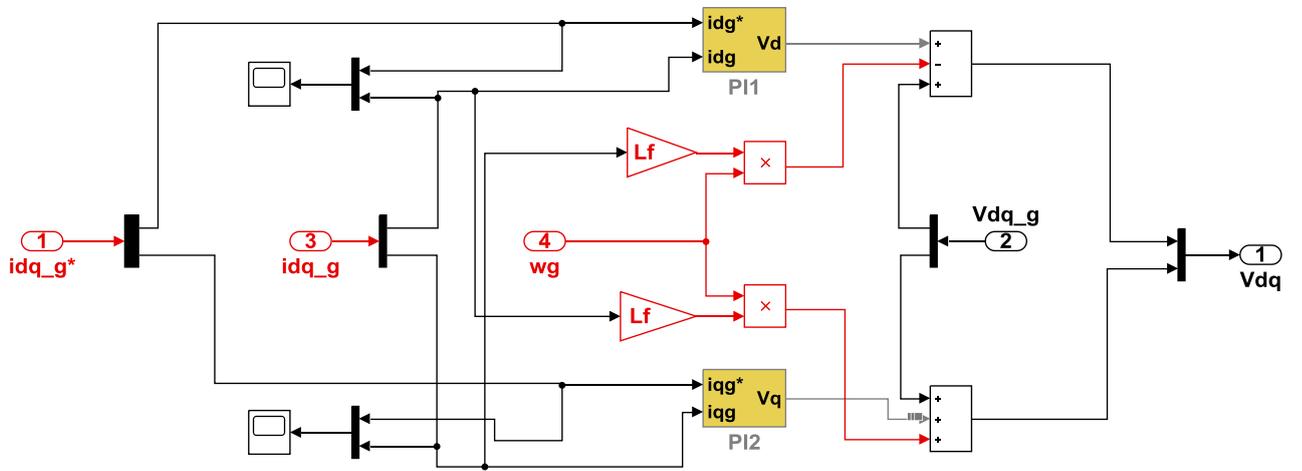


Figure 9 : Contrôle et découplage des courants coté réseau.

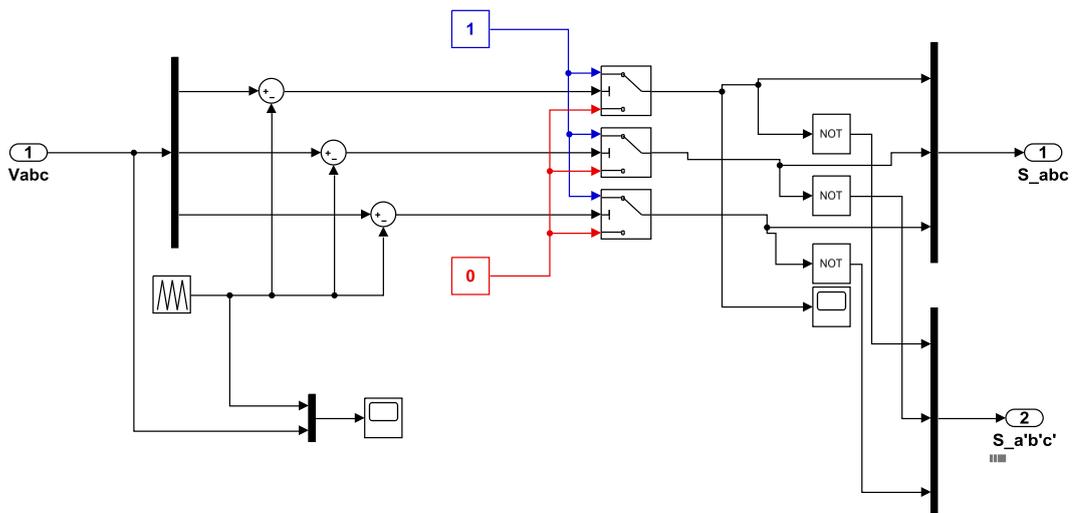


Figure 10 : Modélisation du convertisseur 2.

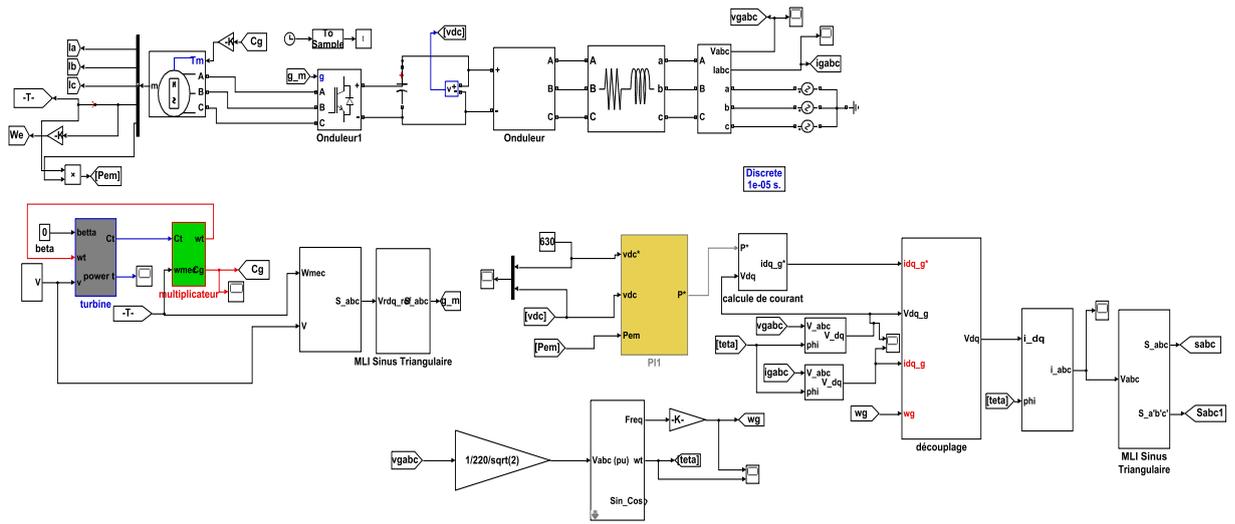


Figure 11 : coté machine + coté réseau

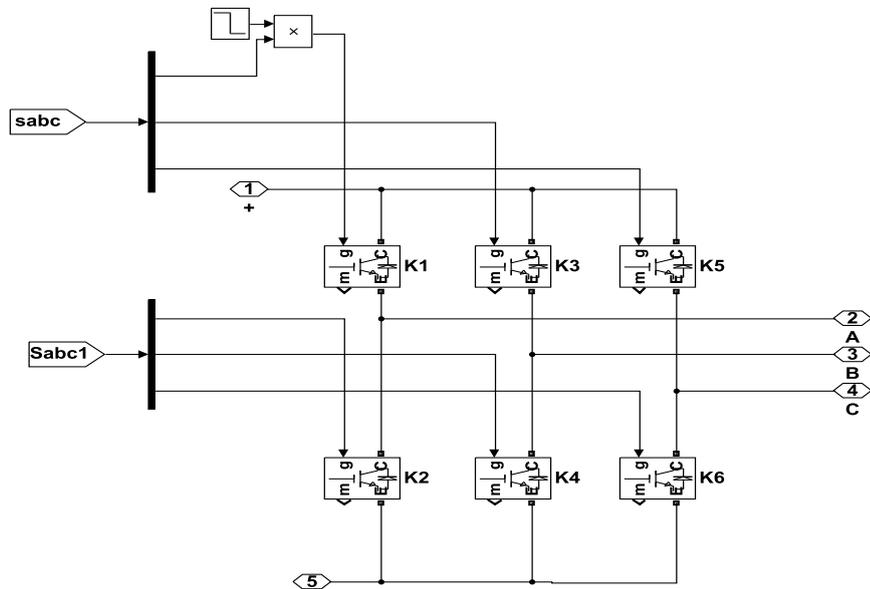


Figure 12 : application défaut de circuit ouvert.

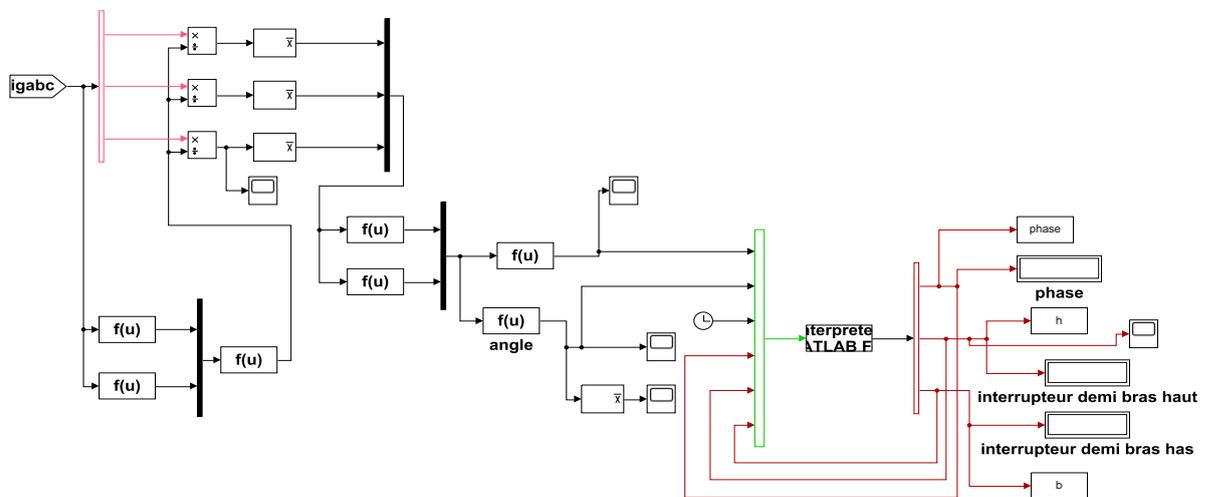
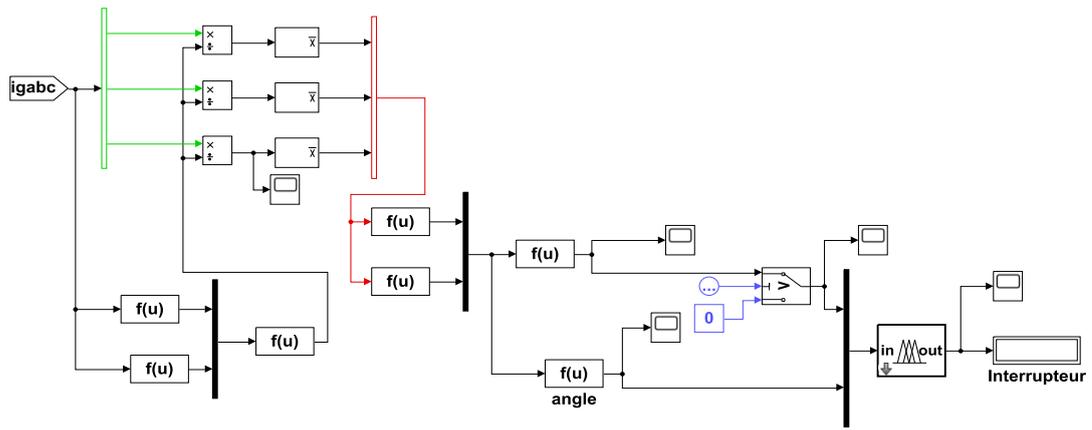


Figure 13 : Diagnostic par module et angle du vecteur de Park moyen.



**Figure14** : Diagnostic par Fuzzy.

```

a=newfis('Fuz_diag','sugeno')
a=addvar(a,'input','Ampitude',[0 1])
a=addmf(a,'input',1,'H','trapmf',[0.05 0.3 1.1 1.2])
a=addmf(a,'input',1,'L','trimf',[0 0.05 0.1])
a=addvar(a,'input','angle',[-180 180])
a=addmf(a,'input',2,'t4','trimf',[-180 -150 -120])
a=addmf(a,'input',2,'t5','trimf',[-120 -90 -60])
a=addmf(a,'input',2,'t6','trimf',[-60 -30 0])
a=addmf(a,'input',2,'t1','trimf',[0 30 60])
a=addmf(a,'input',2,'t2','trimf',[60 90 120])
a=addmf(a,'input',2,'t3','trimf',[120 150 180])
a=addvar(a,'output','default',[0 1])
a=addmf(a,'output',1,'K0','constant',[0])
a=addmf(a,'output',1,'K1','constant',[1])
a=addmf(a,'output',1,'K2','constant',[2])
a=addmf(a,'output',1,'K3','constant',[3])
a=addmf(a,'output',1,'K4','constant',[4])
a=addmf(a,'output',1,'K5','constant',[5])
a=addmf(a,'output',1,'K6','constant',[6])
ruleList=[1 1 7 1 1,1 2 4 1 1,1 3 3 1 1,1 4 6 1 1,1 5 5 1 1,1 6 2 1 1,2 1 1 1 1,2 2 1 1 1,2 3 1 1 1
,2 4 1 1 1,2 5 1 1 1,2 6 1 1 1];
a=addrule(a,ruleList)

```

**Figure 15** : programme de fis.

## *Références bibliographique*

- [1] E. Elbouchikhi, G. Feld, Y. Amirat, M. Benbouzid, and F. Le Gall, « Mise en œuvre expérimentale d'une plateforme de conversion d'énergie éolienne à base de génératrice asynchrone double alimentation » *La Revue 3EI*, 2020
- [2] W. Hiber, "Analyse Harmonique Dans Un Réseau Electrique Avec Une Production D'énergie Eolienne," 2018.
- [3] H. Bensaadi, "Contribution A La Commande D'un Aerogenerateur Basé Sur Un Gsap," Université De Batna 2, 2020.
- [4] H. L. K. Redouane, "Commande Neuronale Intelligente D'une Eolienne A Base D'une Gsap Soumise A Des Incertitudes Et Des Perturbations Externes," 2019-2020.
- [5] N. Tidjani, "Modélisation, Optimisation Et Dispositif De Commande Pour La Production De L'énergie De Source Eolienne," *Thèse De Doctorat En Science*, 2021.
- [6] B. M. B. Tariq, "Etude D'une Chaîne De Conversion D'énergie Eolienne A Base D'une Génératrice Synchrones A Aimants Permanents," *Mémoire Master*, 2015.
- [7] T. Douadi, "Etude Et Commande D'un Système Eolien A Base D'une Génératrice Asynchrone," Université De Batna 2, 2011.
- [8] B. Herissi, "Commande D'une Eolienne Basée Sur Les Modèles Flous De Takagisugeno," *Université Larbi Tebbesi De Tébessa*, 2016.
- [9] M. Baldé, "Etude D'un Compensateur Statique Pour Eoliennes A Vitesse Fixe A Base De Génératrice Asynchrone A Cage," Université Du Québec A Trois-Rivières, 2010.
- [10] A. Rabah And A. Rezki, "Modélisation Et Commande D'un Aérogénérateur Synchrones A Aimants Permanents A Attaque Directe," Université Mouloud Mammeri, 2013.
- [11] C. Bennour, "Simulation De La Commande Vectorielle Par Régulateurs A Mode Glissant D'une Chaîne Eolienne A Base D'une Machine Asynchrone A Double Alimentation," Université Mohamed Khider–Biskra, 2012.
- [12] A. Tahri, "Contribution A L'identification Et A La Commande Robuste Des Génératrices Synchrones A Aimants Permanents Associées Aux Générateurs Eoliens.," *Thèse De Doctorat, Université Ibn Khaldoun De Tiaret.*, 2018.
- [13] A. Abdellah, "Contribution A L'étude Des Convertisseurs Statiques Tolérants Aux Défauts Utilisés Dans Les Systèmes Eoliens.," *Thèse De Doctorat, Université Ibn Khaldoun De Tiaret.*, 2016.
- [14] R. Redjem, "Etude D'une Chaîne De Conversion D'énergie Eolienne," 2009.
- [15] Guy Cuntz, « Eoliennes Et Aérogénérateurs, Guide De L'énergie Eolienne », © Edisud, Aix-en-Provence, 2001, [www.edisud.com](http://www.edisud.com).
- [16] Haque Me, Negnevitsky M, Muttaqi Km. A Novel Control Strategy For A Variable-Speed Wind Turbine With A Permanent-Magnet Synchronous Generator. *Ieee Trans Ind Appl* 2010.
- [17] Muljadi, E. And Butterfield, C. P. "Pitch –Controlled Variable-Speed Wind Turbine Generation " , *Ieee Transactions On Industry Applications*, V.37, N°1, (2001), 240-246.
- [18] Allali Loubna , « Commande Vectorielle De La Génératrice Synchrones A Aimants Permanents, Diplome De Master, Ain El Beida Le : 04 Juin 2016 »
- [19] Benziane Mohamed Bendref Ibrahim « Etude Et Simulation D'un Chargeur Usb Alimenté Par Une Génératrice Eolienne » Mémoire Master Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem 2020
- [20] « Modélisation Et Commande D'une Génératrice Synchrones A Aimants Permanents Dédiée A La Conversion De L'énergie Eolienne » Article · March 2010
- [21] Kerrouche Mohammed -Gagaa Ali Abdullah Ali - Hathroubi Kamel « Commande Prédicative D'une Génératrice Synchrones A Aiment Permanent (Gsap) » Université Echahid Hamma Lakhdar D'el-Oued, 2020-2021
- [22] Madi Siham Mr : S. Taraft Lamamra Wassim « Application D'une Commande Non Linéaire Dans Une Chaîne De Conversion Eolienne A Base D'une Machine Synchrones A Aimant Permanent » Université A. Mira Bejaïa 2021
- [23] Abdelkader Berhail « Commande D'une Eolienne A Base De Gsap Connectée Au Réseau Electrique Par Convertisseur Multiniveaux », Université Du Québec A Trois-Rivières, 2020

- [24] Dr. Abdelhafidh Moualdia « Aérogénérateurs » Université Dr Yahya Fares De Medea 2014-2015
- [25] Hamid Gualous, Morlaye Sekou Camara, Mamadou Baïlo Camara, Brayima Dakyo « Modélisation Et Commande D'une Génératrice Synchrones A Aimants Permanents Pour La Production Et L'injection Des Energies Offshores Dans Un Réseau »
- [26] Mr: Maarouk Abdelatif « Commande Dynamique D'une Machine Synchrones A Aimants Permanents Alimentée En Tension » Université M'hamed Bougara- Boumerdes 2016
- [27] Senhadji Nawel Chalabi Ammaria « Commande Du Moteur Synchrones A Aimants Permanents Par Backstepping » Mémoire De Master Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen 2015
- [28] Benyahia Mohammed El Mahdi Kerroumi Abdel Hamid « Commande Par Linéarisation Entrée-Sortie De La Machine Synchrones A Aimants Permanents »
- [29] Abdelhadi Hakim Bakki Abdelmadjid « Commande D'un Système Eolien Basé Sur Gsap Alimentée Par Un Convertisseur Multicellulaire » Mémoire De Master Université Ibn-Khaldoun De Tiaret 2020
- [30] Assam Azzeddine Mdm Ben Smail.S Boukerma Redouane « Optimisation Et Commande D'une Chaîne De Conversion Eolienne Par La Logique Floue Adaptative » Université De Bouira 2018/2019
- [31] Aid Houssein Et Aina Wafaa « Synthèse De Lois De Commande Non-Linéaires Pour Un Entraînement Electrique A Vitesse Variable Basé Sur Un Moteur Synchrones A Aimants Permanents » 2013 Mémoire De Master Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen
- [32] Benariba Hassan « Contribution A La Commande D'un Véhicule Electrique » Docteur En Sciences Université Aboubakr Belkaid – Tlemcen 2018
- [33] Noureddine Bounasla « Commande Par Mode De Glissement D'ordre Supérieur De La Machine Synchrones A Aimants Permanents » Université Ferhat Abbas Sétif -1 (Algerie) Thèse De Master 2014
- [34] Youcef Saidi, Abdelkader Mezouar, Yahia Miloud « Comportement Dynamique D'un Système De Conversion D'énergie Eolienne A Base D'une Génératrice Synchrones A Aimants Permanents En Cas De Creux De Tension Du Réseau Electrique » Bucarest, 2019
- [35] Zeghoudi Souhila « Commande Par Passivité De La Machine Synchrones A Aimants Permanents » Mémoire De Master Université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen 2015
- [36] Dahbi Abdeldjalil « Contribution A La Commande Et A L'amélioration Des Performances De L'énergie Electrique D'un Chaîne De Production Electrique » Thèse De Doctorat Université De Mostefa Benbou Laid Batna 2 2018
- [37] Hellali Lallouani « Diagnostic Des Défauts Dans L'association Convertisseur Machine A Induction » Mémoire Master Université De Batna 2 2016
- [38] Youcef Soufi « Modélisation Et Diagnostic D'une Association Convertisseur Machine Electrique » Université E Badji Mokhtar Annaba 2012
- [39] Aissaoui Tassadit-Trache Kahina « Réalisation D'un Onduleur Monophasé Dédie Pour Le Diagnostic De Défaut Par La Technique De L'analyse De La Réponse Fréquentielle (Fra) » Université Akli Mohand Oulhadj-Bouira 2020
- [40] Beddek Karim « Détection Et Localisation De Défauts D'un Système De Conversion D'énergie Eolienne » Thèse De Doctorat Université M'hamed Bougara Boumerdes 2017
- [41] Rebah Maamouri « Diagnostic Et Commande Tolérante Aux Défauts Appliqués A Un Système De Conversion Electromécanique A Base D'une Machine Asynchrone Triphasée » thèse De Doctorat Ecole Doctorale Ed184 – Université De Sousse 2017

- [42] M. Benouzza, M. Drif, A.J. Marques Cardos Et J.A. Dente « Emploi De L'approche Des Vecteurs De Park Pour La Détection Des Défauts De Barres Dans Les Moteurs Asynchrones A Cage D'ecureuil » Institut D'electrotechnique, U.S.T.Oran, B.P. 1505, El M'naouar, Oran, Algérie
- [43] Ghefsi Yassine «Détection Des Défauts Dans L'association Convertisseur Machine A Induction »Mémoire Master Universite Mohamed Boudiaf - M'sila 2020
- [44] R. L. A. Ribeiro, C. B. Jacobina, E. Silva, And A. M. N. Lima, "Compensation Strategies In The Pwmvsi Topology For A Fault Tolerant Induction Motor Drive System," In *Diagnostics For Electric Machines, Power Electronics And Drives*, 2003. Sdemped 2003. 4th Ieee International Symposium On, 2003, Pp. 211–216.
- [45] M.Ould Brahim Mahmoud Fewzi « Diagnostic De Convertisseur Ac-Dc Alimentant Un Moteur A Courant Continu A Excitation Séparée » Universite De M'sila 2014
- [46] Andre M. Santos Mendes, Mohsen Bandar Abadi, Sérgio Manuel A. Cruz « Fault diagnostic algorithm for three-level neutral point clamped AC motor drives, based on the average current Park's vector" Published in *IET Power Electronics* 2013

## ملخص

الغرض من هذا المشروع هو دراسة تشخيص أعطال المحولات في إلكترونيات الطاقة المطبقة على سلسلة توربينات الرياح ، وقد درسنا الجزء الميكانيكي الذي يدمج التوربين والمضاعف والتحكم MPPT من أجل تحديد أفضل تحكم. جهاز التحكم مع المحاكاة يعتمد على التحكم في ناقلات المولد لسرعة الرياح المتغيرة. أخيرًا ، درسنا في الجزء الأخير، اكتشاف وتشخيص أعطال نوع الدائرة المفتوحة لمحول عاكس PWM ثنائي المستوى في محرك كهربائي. تم اقتراح طريقتين لاكتشاف الأخطاء وتشخيصها ، ثم تقييمها. الطريقة الأولى ، يتم الكشف عن الخلل مع الوحدة النمطية وزاوية متجه بارك. ثم ثانيًا ، استخدمنا تشخيص الأخطاء بمنطق ضبابي.

## Résumé

L'objet de ce projet est l'étude avec diagnostic des défauts convertisseurs de l'électronique de puissances appliquées à une chaîne éolienne, nous avons étudiés la partie mécanique intégrant la turbine, le multiplicateur, et le contrôle MPPT afin de définir le meilleure contrôle de l'aérogénérateur, un dispositif de control avec simulation est basé sur la commande vectorielle de la génératrice pour une vitesse de vent variable.

Enfin, nous avons étudié dans la dernière partie, la détection et diagnostic des défauts de type circuit ouvert d'un interrupteur de l'onduleur MLI à deux niveaux dans un entraînement électrique. Deux techniques ont été proposées pour la détection et le diagnostic des défauts, puis évaluées. La première méthode, le défaut est détecté avec le module et l'angle du vecteur de Park. Puis en second, nous avons utilisé le diagnostic des défauts avec logique floue.

## Abstract

The purpose of this project is the study with diagnosis of converter faults in the power electronics applied to a wind turbine chain, we have studied the mechanical part integrating the turbine, the multiplier, and the MPPT control in order to define the best control of the aerogenerator, a control device with simulation is based on the vector control of the generator for a variable wind speed.

Finally, we studied in the last part, the detection and diagnosis of open circuit type faults of a switch of the two-level PWM inverter in an electric drive. Two techniques have been proposed for fault detection and diagnosis, and then evaluated. The first method, the fault is detected with the module and the angle of the Park vector. Then second, we used fault diagnosis with fuzzy logic.