Ministère de l'Enseignement Supérieur de Recherche Scientifique
Université KasdiMerbah Ouargla
Faculté des Nouvelles Technologies de l'Information et la Communication
Département de l'Informatique et Technologies de l'Information

Mémoire MASTER

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et systèmes

Réalisé par :

- Siagh Abderrhmane
- Saouli Kheirallh

Thème :

commande tolérante aux défauts avancée d'un convertisseur électrique multicellulaire basée sur les données

Soutenu publiquement le : 14/06/2020

Devant le jury :

Dr. BOUBAKAR Rouabah

Dr. MAHBOB Abd El-Basset

Dr. BEN ARRABI Bilal

Encadreur :

Dr. TOUBAKH Houari.

Année universitaire:2020/2021

Résumé

Les convertisseurs électroniques de puissance(multicellulaire) ont été largement utilisés dans les véhicules à énergie nouvelle, les robots industriels, la transmission de courant continu haute tension, l'électrolyse haute puissance et les systèmes d'entraînement à moteur. Cependant, en raison de l'exposition à des environnements de travail médiocres, le convertisseur est susceptible de subir des pannes critiques en raison du vieillissement de l'appareil, d'une surcharge, de conditions de fonctionnement inattendues. Dans ce travail, proposée une approche de diagnostic prédictif basé sur une technique d'apprentissage automatique intégrant un mécanisme de détection de dérive est utilisé afin d'effectuer un diagnostic précoce des défauts des condensateurs (simple et multiple)

Des échantillons de données qui ne représentent que des conditions de fonctionnement normales sont utilisés. Afin de l'adapter à une situation où les données sur les comportements défectueux ne sont pas disponibles. Un indice de santé qui mesure la différence entre les conditions de fonctionnement normales et actuelles a été établie pour détecter la dérive (dégradation) au stade précoce. Lorsqu'une dégradation (défaut) est détectée, l'isolation est obtenue en tenant compte de la dynamique séparée des interrupteurs. Les caractéristiques liées à ces derniers sont extraites afin de construire un espace de caractéristiques qui permet de séparer l'inconduite (région ou classe) des différents commutateurs. Au final une nouvelle structure permettant l'intégration d'une commande tolérante aux défauts est proposée. Les résultats expérimentaux sont obtenus à l'aide d'un standard qui représente le véritable fonctionnement d'un transducteur multicellulaire sur MATLAB / Simulink et est en accord avec l'efficacité et la robustesse de l'approche proposée.

Les mots clés : diagnostic de défaut, convertisseurs de puissance multicellulaires, surveillance de défaut de type dérive, exploration de données, apprentissage automatique.

Remerciements

Après avoir remercié énergiquement ALLAH le tout puissant de m’avoir donné la force, la patience et le courage pour la réalisation de ce travail, que j’espère avoir mené à bonne fin, je tiens également à saisir cette occasion et adresser mes sincères remerciements et nos profondes reconnaissances à :

Dr.Toubakh Houari mon encadreur de mémoire de fin d’étude pour nous voir encadré avec un grand intérêt ainsi que pour ses conseils, ses encouragements, son ouverture d'esprit, sa disponibilité et bien sûr ses qualités scientifiques exceptionnelles.

Tous ceux qui ont participé à ma formation depuis le premier jour de ma scolarité jusqu'à ce jour.

A ma famille et mes amis dont les prières et les encouragements ont été d’une grande aide.

J’exprime ma reconnaissance à toute personne qui a contribué de près ou de loin à l’achèvement de ce travail.

Je remercie aussi les membres du jury d’avoir accepté de présider le jury de ma soutenance, et pour avoir accepté dejuger ce travail en tant que rapporteur.

Enfin, j’espère que ce travail aura la valeur souhaitée.

Table des matières

Résumé ***2***

Remerciements ***3***

CHAPITRE 1 ***7***

DIAGNOSTIC DE DEFAUTS DES CONVERTISSEURS ELECTRIQUE ***7***

1.2. Défis et motivations 10

1.3. Approche proposée 10

1.4. Organisation de manuscrit 11

CHAPITRE II ***12***

LE DIAGNOSTIC DES DEFAUTS ET LES CONVERTISSEURS DE PUISSANCE ***12***

Chapitre II: Le diagnostic des défauts et les convertisseurs de puissance **13**

2. Définitions des concepts de base 14

2.1. Etude bibliographique autour de diagnostic de défauts des convertisseurs de puissance 15

2.1.1. Diagnostic de défauts 15

2.1.2. Classification des défauts 16

2.1.3. Classification des méthodes de diagnostic 18

2.2. Diagnostic de convertisseur de puissance 20

2.2.1. Le défaut semi-conducteur 20

2.3. Etude bibliographique autour des convertisseurs de puissance 21

2.3.1. Rôles des convertisseurs de puissance 21

2.4. Objectif de ce travail 22

2.5. Conclusion 22

CHAPITRE III ***23***

APPROCHE PROPOSÉE POUR LA COMMANDE TOLÉRANTE AUX DÉFAUTS DU CONVERTISSEUR MULTICELLULAIRE ***23***

3. Introduction 24

3.1. Etat de l'art 24

3.1.1. Défis et motivations 25

3.1.2. L'Approche proposée 25

3.1.3. Traitement et analyse des données 27

3.1.4. Conception du classificateur et mise à jour de ses paramètres et de sa structure 28

3.1.5. Surveillance et interprétation des défauts 29

3.2. Convertisseur DC / AC 30

3.3. Structure tolérante aux défauts du Convertisseur DC / AC 33

3.3.1. Loi de commande en fonctionnement normal (convertisseur multicellulaire) 34

3.3.2. Loi de commande en fonctionnement avec défauts (convertisseur classiue deux-niveau) 34

3.4. Expérimentation et résultats obtenus 37

3.5. Conclusion 48

Table des Figures

Figure 1 Convertisseur électrique 9
Figure 2 Classification de défaut selon leurs rapidité d'évolution 17
Figure 3 Classification des défauts selon leurs emplacements [9] 18
Figure 4 Classification des méthodes de diagnostic 19
Figure 5 : Localisation des défauts selon la littérature 19
Figure 6 Semi-conducteur IGBT 20
Figure 7 Condensateur 21
Figure 8 Schéma synoptique d'un dispositif d'électronique de puissance 21
Figure 9 Les différents types de convertisseur de puissance 22
Figure 10 Systèmes auto-adaptative en ligne propose les étapes pour le diagnostic de panne d'un convertisseur de puissance multicellulaire. 27
Figure 11 : : Topologie du convertisseur de P cellules alimentant une charge inductive (R-L). 31
Figure 12 Topologie du convertisseur utilisée pour la commande tolérante aux défauts 34
Figure 13 Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) du convertisseur multicellulaire (fonctionnement normal) 34
Figure 14 Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) du convertisseur deux niveaux (fonctionnement défaillant). 35
Figure 15 Tension continue E el tensions des condensateurs flottants Vc1, Vc2 fonctionnement normal. 35
Figure 16 Tension des condensateurs flottants Vc1 et Vc2 lors d'un défaut d'interrupteur 36
Figure 17 Tension de sortie du convertisseur multicellulaire lors d'un défaut d'interrupteur 36
Figure 18 Tension des condensateurs flottants Vc1 et Vc2 lors d'un défaut d'interrupteur avec FTC 37
Figure 19 Tension de sortie du convertisseur multicellulaire lors d'un défaut d'interrupteur avec FTC 37
Figure 20 Espace de fonction du commutateur de convertisseur de puissance à trois cellules normal et condition de panne dans le cas d'un simple défaut interrupteur bloqué-ouvert. 40
Figure 21 Défaut simple dans l'interrupteur bloqué-ouvert, indicateur de défaut basé sur la distance euclidienne 41
Figure 22 Défaut simple dans l'interrupteur bloqué-ouvert, indicateur de direction de la classe évolutive 41
Figure 23 Défaut simple dans l'interrupteur bloqué-fermé, indicateur de défaut basé sur la distance euclidienne 43
Figure 24 Défaut simple dans l'interrupteur bloqué-fermé, indicateur de direction de la classe évolutive 43
Figure 25 Espace de fonction du l'interrupteur de convertisseur de puissance à trois cellules, des conditions de fonctionnement normales et de panne dans le cas de Multiples interrupteurs défectueux bloqués-ouverts 44
Figure 26 Défaut Multiples dans l'interrupteur bloqué-ouvert, indicateur de défaut basé sur la distance euclidienne 46
Figure 27Défaut Multiples dans l'interrupteur bloqué-ouvert, indicateur de direction de la classe évolutive 46
Figure 28 Défaut Multiples dans l'interrupteur bloqué-fermé, indicateur de défaut basé sur la distance euclidienne 47
Figure 29 Défaut Multiples dans l'interrupteur bloqué-fermé, indicateur de direction de la classe évolutive. 47

Table des tableaux

Tableau 1 : Différents modes de fonctionnement et les niveaux de tension de sortie correspondants du convertisseur à trois cellules. _____ ***Error! Bookmark not defined.***

Tableau 2 Les différents scénarios de défaut discrètes (simples et multiples) pour un convertisseur trois cellules. ***Error! Bookmark not defined.***

Tableau 3 Résultats de la détection des défauts dans l'interrupteur du convertisseur de puissance pour les 12 scénarios _____ ***Error! Bookmark not defined.***

CHAPITRE 1

DIAGNOSTIC DE DEFAUTS DES CONVERTISSEURS ELECTRIQUE

Chapitre I: Diagnostic de défauts des convertisseurs électrique

1. Introduction

L'apport de l'électronique de puissance remarquablement intégré les applications de l'industrie modern dans plusieurs applications allant du transport ferroviaire à l'industrie lourde jusqu'aux applications IT, les systèmes de l'électronique de puissance ont connu un développement révolutionnaire ces dernières années. Comme tous les systèmes industriels, les convertisseurs électriques subissent souvent des dysfonctionnements qui entraînent des dommages affectant leurs bons fonctionnements. Dans ce travail, un schéma de diagnostic prédictif basé sur une technique d'apprentissage automatique intégrant un mécanisme de détection de dérive est utilisé afin d'effectuer un diagnostic précoce des défauts de blocage des interrupteurs des convertisseurs multicellulaires. Des données représentantsdes conditions de fonctionnement normales sont utilisés, dans le but d'assigner tout comportement défectueuxaux classes représentant un défaut. Un indice de santé qui mesure la différence entre les conditions de fonctionnement normales et actuelles a été établie pour détecter la dérive (dégradation) au stade précoce. Lorsqu'une dégradation (défaut) est détectée, l'isolation est obtenue en tenant compte de la dynamique séparée des interrupteurs. Les caractéristiques liées à ces derniers sont extraites afin de construire un espace de caractéristiques qui permet de séparer l'inconduite (région ou classe) des différents commutateurs. Au final une nouvelle structure permettant l'intégration d'une commande tolérante aux défauts est proposée. Les résultats expérimentaux sont obtenus à l'aide d'un simulateur multicellulaire sur MATLAB / Simulink et est en accord avec l'efficacité et la robustesse de l'approche proposée.

1.1. Contexte général

De manière générale, le mot convertisseur est employé pour désigner une personne, un dispositif ou un objet dont le rôle est de convertir, une chose en une autre, ou l'état d'une personne en un autre. Un transformateur (transformer : changer de forme) agit sur une source d'énergie (qui se consomme) pour libérer l'énergie contenue. Le convertisseur agit sur une énergie pour la changer en une autre énergie (pour obtenir un nouvel effet recherché par l'être humain, ou la nature) (l'énergie ne se crée pas, ne se consomme pas, elle se convertit).

En particulier, nous utilisons le mot dans le domaine de l'énergie électrique :

Le convertisseur permet de transformer le courant continu, stocké dans une batterie ou produit par un générateur de courant (panneaux solaires photovoltaïques, éolienne, etc.) en courant alternatif qui peut ensuite être utilisé ou réinjecté sur le réseau de distribution électrique.

Si votre installation utilise des appareils fonctionnant en courant alternatif, il est alors nécessaire de **convertir le courant continu** produit par le générateur (les panneaux solaires, par exemple), **en courant alternatif** compatible et utilisable par ces appareils.

Le convertisseur électrique a plusieurs caractéristiques importantes à prendre en compte lors de l'achat :

- ***Puissance nominale***: avant de choisir votre convertisseur, il faut savoir la puissance totale nécessaire au fonctionnement des appareils utilisant le courant alternatif. Optez pour un convertisseur légèrement plus puissant que la puissance demandée, pour ne pas avoir de mauvaise surprise.
- ***Puissance crête*** : les appareils fonctionnant avec un moteur (comme un réfrigérateur) ont besoin d'un courant important lors du démarrage. Le convertisseur doit donc être capable de fournir un courant important pour ce court moment.
- ***Tension d'entrée :*** elle correspond à la tension de la source d'alimentation (une éolienne, par exemple). Choisissez donc une tension adaptée.
- Tension de sortie : elle doit être stable. Elle correspond à la tension des appareils utilisés.
- ***Rendement*** : exprimé en %, le rendement doit être le plus élevé possible pour limiter les pertes.
- ***Forme de signal :*** les appareils reliés au convertisseur doivent pouvoir supporter la formedu signal de celui-ci.

Figure 1 Convertisseur électrique

Passer aux énergies renouvelables est un bon moyen de faire des économies et de respecter l'environnement. En adoptant un système éolien ou encore photovoltaïque, vous pouvez même produire votre propre électricité. Cependant, pour transformer l'énergie éolienne ou solaire, vous

avez besoin d’un convertisseur électrique adapté.Le convertisseur est susceptible de subir des pannes critiques en raison du vieillissement de l'appareil, d'une surcharge, de conditions de fonctionnement inattendues.

Pendant ce temps, les défauts des convertisseurs peuvent endommager l'ensemble du système. Par conséquent, la fiabilité de ces convertisseurs est très importante.

Il s’agit donc de proposer des méthodes de diagnostic prédictif et du pronostic afin de détecter ces évolutions et de pouvoir les anticiper, puis, basés sur ces indicateurs, d’optimiser les stratégies de maintenance [1][2].

Ainsi deux grandes familles de procédures sont utilisées dans le domaine du diagnostic en génie électrique : les méthodes de diagnostic à base de modèles et les méthodes sans modèle. L’objectif est de fait une stratégie de diagnostic de défauts de convertisseur électrique.

1.2. *Défis et motivations*

Il est donc nécessaire de mettre en œuvre des systèmes de diagnostic afin de détecter, localiser et éventuellement identifier les défauts affectant le système.D’une grande importance pour la stabilité de l'ensemble du système.

Les méthodes de diagnostic des pannes sont généralement classées en méthodes basées sur des modèles et basées sur des données. Parmi eux, la méthode basée sur le modèle est difficile à réaliser car le modèle mathématique des défauts est difficile à établir comparé aux méthodes basées sur des données, l'apprentissage automatique les méthodes sont efficaces et reposent moins sur les modèles de circuits, qui nécessitent les données historiques.

1.3. Approche proposée

Les méthodes de détection et de diagnostic sans modèle de référence sont employéespour des systèmes dont le modèle comportemental est difficile à obtenir. Elles reposent sur l'utilisation des données obtenues à partir du système et des données issues (signal). Les signaux mesurables (les courants, les tensions, la vitesse, les vibrations, la température, les émissions sonores) peuvent fournir des informations significatives sur les défauts. A partir de ces grandeurs caractéristiques du fonctionnement des machines électriques, la mise en œuvre de méthodes décisionnelles (par exemple à base de reconnaissance des formes) permet deconcevoir des systèmes de surveillance ou des algorithmes performants au service du diagnostic [3].

1.4. Organisation de manuscrit

Ce manuscrit est organisé en deux parties. La première consiste à présenter un état de l'art sur Diagnostic de défauts des convertisseurs électrique en général, ensuite une étude bibliographique autour de diagnostic de défauts et les convertisseurs de puissance. Dans la deuxième partie, nous décrivons l'approche utilisée pour réaliser le diagnostic précoce des défauts condensateur du convertisseur multicellulaire ainsi la stratégie de la commande tolérante au défaut mise en place. Finalement une conclusion et des perspectives sont présentées.

CHAPITRE II

LE DIAGNOSTIC DES DEFAUTS ET LES CONVERTISSEURS DE PUISSANCE

Chapitre II: Le diagnostic des défauts et les convertisseurs de puissance

L’apport de l’électronique de puissance aremarquablement développée les applications industrielles, ferroviaire et des applications IT. La tendance d’introduire des redresseurs et des onduleurs de puissance dans a connu un développement révolutionnaire ces dernières années. Comme tous les systèmes industriels, les éoliennes subissent souvent des dysfonctionnements qui entraînent des dysfonctionnements ou des dommages affectant leurs bons fonctionnements. Dans ce travail, un schéma de diagnostic prédictif basé sur une technique d'apprentissage automatique intégrant un mécanisme de détection de dérive est utilisé afin d'effectuer un diagnostic précoce des défauts de blocage des interrupteurs des convertisseurs multicellulaires de la turbine éolienne. Des échantillons de données qui ne représentent que des conditions de fonctionnement normales sont utilisés. Afin de l'adapter à une situation où les données sur les comportements défectueux ne sont pas disponibles. Un indice de santé qui mesure la différence entre les conditions de fonctionnement normales et actuelles a été établie pour détecter la dérive (dégradation) au stade précoce. Lorsqu'une dégradation (défaut) est détectée, l'isolation est obtenue en tenant compte de la dynamique séparée des interrupteurs. Les caractéristiques liées à ces derniers sont extraites afin de construire un espace de caractéristiques qui permet de séparer l'inconduite (région ou classe) des différents commutateurs. Au final une nouvelle structure permettant l’intégration d’une commande tolérante aux défauts est proposée. Les résultats expérimentaux sont obtenus à l'aide d'un standard qui représente le véritable fonctionnement d'un transducteur multicellulaire sur MATLAB / Simulink et est en accord avec l'efficacité et la robustesse de l'approche proposée.

La tâche d'un convertisseur de puissance (appelé aussi convertisseur statique) est de contrôler le flux d'énergie électrique en fournissant des tensions et des courants sous une forme parfaitement adaptée aux charges des utilisateurs.

Les conversions d'énergie étaient initialement réalisées à l'aide de convertisseurs électromécaniques (qui étaient principalement des machines tournantes). Aujourd'hui, avec le développement et la production massive de semi-conducteurs de puissance, les convertisseurs de puissance sont utilisés dans de nombreux domaines d'application et notamment dans les accélérateurs de particules. Leur poids et leur volume sont plus faibles et leurs performances statiques et dynamiques sont meilleures [4].

Un convertisseur de puissance est composé d'un ensemble de composants électriques constituant un réseau maillé qui agit comme un étage de liaison, d'adaptation ou de transformation entre deux sources, généralement entre un générateur et une charge.

Un convertisseur de puissance idéal permet de contrôler le flux de puissance entre les deux sources avec un rendement de 100 %. Une grande partie de la conception d'un convertisseur de puissance est l'optimisation de son efficacité. Les éléments de base sont de deux types :

- interrupteurs électroniques : semi-conducteurs utilisés en mode commutation.
- condensateurs, inductances (et inductances mutuelles ou transformateurs).

Ces composants réactifs sont utilisés pour le stockage intermédiaire de l'énergie mais effectuent également des filtrages de tension et de courant[5][6].

Aujourd'hui, assurer la stabilité des convertisseurs électroniques de puissance et détecter leurs pannes sont parmi des préoccupations majeures dans le domaine de l'énergie. Les défaillances d'un convertisseur électronique de puissance, conduisent à la perte totale ou partielle du contrôle des courants de phase. Ces défaillances peuvent provoquer de graves dysfonctionnements du système, voire conduire à une mise hors tension. En outre, si le défaut n'est pas détecté rapidement et compensé, il peut dans certains cas mettre en danger le système. Par conséquent, afin d'empêcher la propagation de défauts aux autres composants et assurer la continuité de service en toute circonstance en présence d'une défaillance du convertisseur, des méthodes efficaces et rapides de diagnostic doivent mettre en œuvre.

Le diagnostic signifie simplement la détermination des composants défaillants au sein d’unsystème physique. Le principe général du diagnostic consiste à vérifier la cohérence entre uncomportement observé et un comportement attendu. Le diagnostic d’un système est effectué àtravers la détection, la localisation et l’identification des défauts.

La détection de défauts consiste à signaler la présence d’un défaut, c’est-à-dire déterminé sil’état courant du système et de ses éléments est normal ou non, en signalant toute déviation parrapport au fonctionnement attendu. Cette tâche est ensuite complétée par celle de la localisation qui doit indiquer quel organe ou quel composant est affecté par le défaut. Enfin, la tâched’identification a pour objet de caractériser le défaut en durée et en amplitude afin d’en déduire sa sévérité[4].

2. Définitions des concepts de base

- **Défaut** : c'est une déviation du système par rapport à son comportement normal,

- qui ne l'empêche pas de remplir sa fonction. Un défaut est donc une anomalie qui concerne une ou plusieurs propriétés du système, pouvant aboutir à une défaillance et parfois même à une panne.
- **Défaillance** : une défaillance est une anomalie altérant ou empêchant l'aptitude
- d'une unité fonctionnelle à accomplir la fonction souhaitée. Une défaillance correspond à un passage d'un état à un autre, par opposition à une panne qui est un état.
- **Panne** : une panne est l'inaptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise.
- **Sécurité** : Aptitude d'un système à ne pas causer de danger pour les personnes, le matériel ou Pour l'environnement
- **Un résidu** : Un signal indicateur de défauts, obtenu à partir de la différence entre les mesures et les calculs.
- **Les symptômes :** Ils sont les traductions d'un changement d'un comportement d'une variable détectée par comparaison à des valeurs de référence.
- **Détection des défauts**: Détermination des défauts présent dans un système et de leur instants de détection.
- **Localisation des défauts** : Détermination du type, de la localisation et des instants de détection des défauts.
- **Identification des Défauts**: Détermination de l'amplitude et du comportement temporel des défauts.
- **Dysfonctionnement :** Un dysfonctionnement est une irrégularité intermittente dans la réalisation d'une fonction désirée du système. Un dysfonctionnement est donc une interruption temporaire de la fonction du système. Il s'agit d'un évènement résultant d'un ou plusieurs défauts.
- **Dégradation:** Évolution irréversible d'une ou plusieurs caractéristiques d'un système liée autemps, à la durée d'utilisation ou à une cause externe. Si les performances sont au-dessous du seuil d'arrêt défini dans les spécifications fonctionnelles de l'équipement, il n'y a plus dégradation mais défaillance.

2.1. Etude bibliographique autour de diagnostic de défauts des convertisseurs de puissance

2.1.1. Diagnostic de défauts

Le diagnostic de défauts est, en fait, l'ensemble des actions mises en œuvre pour localiseret identifier tout dysfonctionnement sur un système, à l'aide d'un raisonnement logique fondésur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test, tellesque les

mesures fournies par les capteurs, les sorties calculées par les contrôleurs, et les connaissances sur la structure ou le modèle du système[7].

Cette définition résumepar les trois tâches essentielles du diagnostic :

- ***Détection de défauts***: Détermination de défauts présents dans un système et l' instant dedétection.Pour parvenir à cet objectif, un signal indiquant l'occurrence d'un défaut est généré. Ce signal est appelé résidu ou indicateur de défaut. Une fois les résidus sont générés, ces derniers doivent être évalués afin de prendre une décision sur la présence ou non d'un défaut. Idéalement, un résidu doit être 0(nul)en absence de défauts et non 0 en présence de défauts[6].
- ***l'isolation*** : permet de déterminer quel sont le composants en panne.L'idée est de faire une structuration de résidus, i.e. construire des résidus sensibles à certains défauts et insensibles aux autres. Tout comme une non détection, une localisation incorrecte peut porter un grave préjudice au système automatisé de production.
- ***l'identification du défaut*** : détermine le type de défaut apparu et donne une estimation de certaines caractéristiques du défaut telle que son amplitude. L'obtention d'une estimation du défaut permet de mettre en œuvre des systèmes decommande tolérants aux défauts, afin de compenser l'effet des défauts.

2.1.2. Classification des défauts

Les défauts peuvent être classés selon les critères détaillés ci-après.

Les défauts peuvent être classés selon leurs dynamiques d'évolution en :

- *défauts brusques(biais) :* se produisent instantanément souvent à cause de dommages matériels. Habituellement ils sont très graves car ils affectent les performances et/ou la stabilité du système commandé[8].
- *défauts progressifs (dérives):* sont dus au changements lents des valeurs paramétriques. Souvent dus au vieillissement, Ils sont plus difficiles à détecter.
- *défauts intermittents (valeurs aberrantes)* : sont des défauts qui apparaissent et disparaissent à plusieurs reprises, par exemple à cause d'un câblage partiellement endommagé[9].

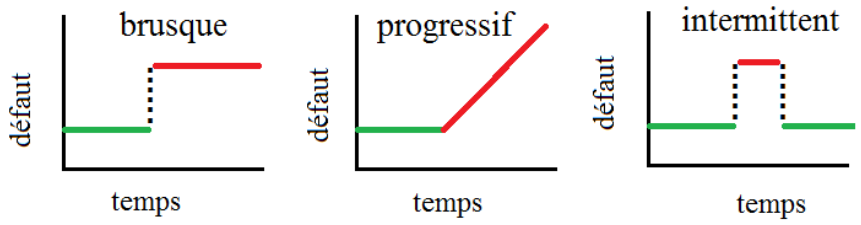
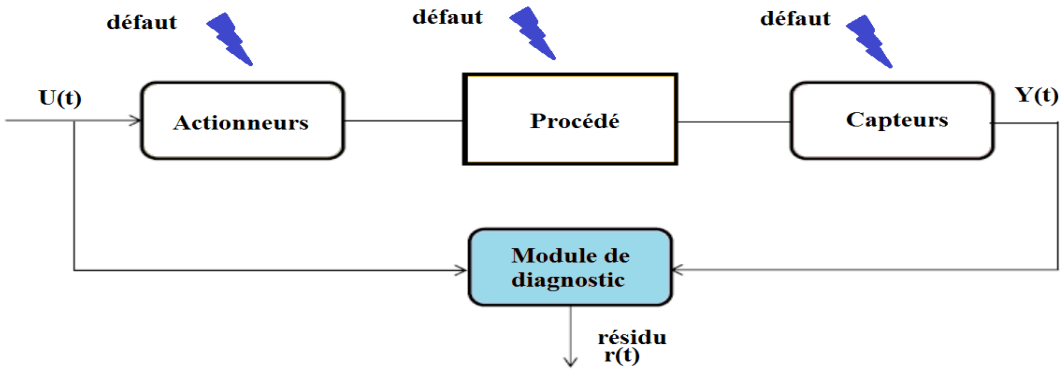


Figure 2 Classification de défaut selon leurs rapidité d'évolution

Selon leurs emplacements :

Dans les systèmes de commande, les défauts sont classés selon l'élément affecté par ce défaut en trois catégories :

- *Défauts actionneur :* L'actionneur est un élément de fonctionnement capable de produire un phénomène physique (déplacement, dégagement de chaleur, émission de lumière …) àpartir de l'énergie qu'il reçoit. Parfois, les moteurs convertissent un type d'énergie en un autre (par exemple, l'état du moteur qui convertit l'énergie électrique en énergie mécanique). En conséquence, les défauts actionneurs agissent au niveau de la partie opérative. Ils s'additionnent aux signaux de commandes du système, et engendrent des problèmes liés aux organes qui agissent sur l'état du système.
- *Défauts capteur :* Le capteur est un appareil qui convertit l'état d'une quantité physique notable en une quantité utilisable. Les capteurs de l'instrument de mesure se distinguentpar le fait qu'ils ne sont qu'une simple interface entre le processus physique et les informations de manipulation. Il permet de communiquer des informations sur le comportement interne du processus. Par conséquent, le traitement du signal de commande est inefficace si les informations prises en compte par l'algorithme de commande sont incorrectes et / ou incohérentes.
- *Défauts procédé (système) :* Les défauts de composants sont des erreurs qui affectent les composants du système eux-mêmes. Ce sont des défauts que nous ne pouvons classer ni entre les dysfonctionnements des actionneurs ni les dysfonctionnements des capteurs. Ce typede dysfonctionnement correspond à la détérioration des composants du système enmodifiant les paramètres internes[12].



figure(3) :Classification des défauts selon leurs emplacements [9]

Classement des défauts selon leurs natures

Dans HDS (hybridDynamic système) : Un système hybride est un système dynamique qui présente à la fois un comportement dynamique continu et discret - un système qui peut à la fois couler (décrit par une équation différentielle) et sauter (décrit par une machine à états ou un automate).

Il existe deux types de défauts qui peuvent avoir un impact négatif sur leurs comportements continus et discrets :

- *Défauts paramétriques*[10]: sont associés à des changements de valeurs de paramètres, et sont utiles pour modéliser la dégradation des composants du système. Les défauts paramétriques sont considérés comme des écarts anormaux des valeurs des paramètres dans les modes de fonctionnement continus.
- *Les défauts discrètes*[11] : affectent la dynamique discrète du système et sont considérées soit comme l'occurrence d'événements non observables et/ou l'atteinte de modes de défauts discrets.

2.1.3. Classification des méthodes de diagnostic

D'un point de vue méthodologie, il existe dans la littérature deux grandes famillesd'approches pour le diagnostic de défaut. Une classification des méthodes de diagnosticest proposée dans la figure suivante[13] :

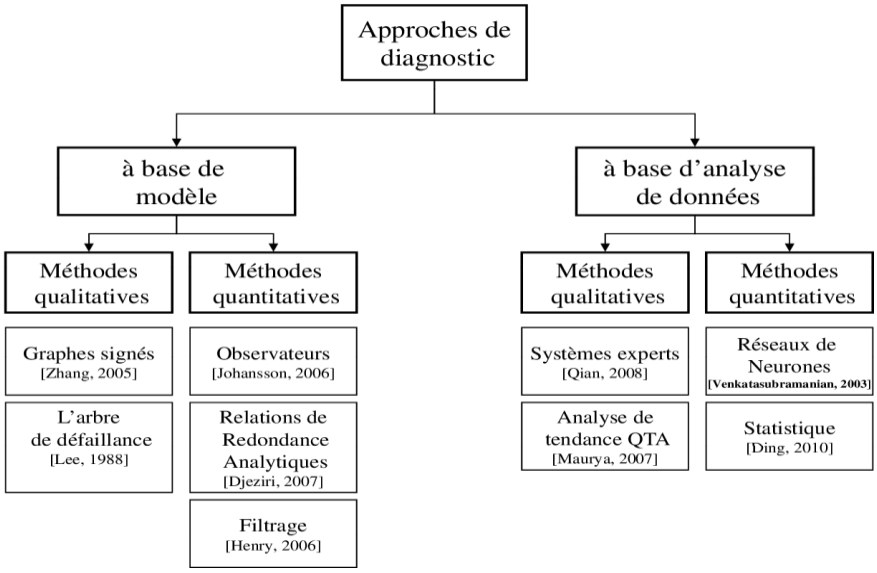


Figure 3 Classification des méthodes de diagnostic

Nous intéresserons ici principalementaux d'analyse de données :

a. Diagnostic à base de données :

Les systèmes de surveillance modernes sont capables de fournir une quantité importante dedonnées qui sont régulièrement enregistrés. De plus, compte tenu de la complexité desméthodes analytiques et souvent le coût et l'indisponibilité de la connaissance experte, lesméthodes de diagnostic basées sur les données se sont développées. Ces méthodes permettentde diagnostiquer les défauts des systèmes dynamiques complexes à travers les donnéesdisponibles (mesures historiques ou en temps réel). Elles permettent de reproduire lesmécanismes de dégradation en s'adaptant aux spécificités des systèmes. C'est la raison pourlaquelle, ces approches se sont particulièrement développées pour les applicationsindustrielles.

Ainsi, à partir des seules informations disponibles, c'est-à-dire les signaux issus descapteurs positionnés sur le système, ces méthodes permettent de reconnaitre l'état defonctionnement du système. Ces approches à base de données font appel à des techniques del'intelligence artificielle (IA). Nous pouvons également indiquer que les outils statistiquespeuvent être utilisés afin de générer des inducteurs de défaut. Ils sont ensuite analysés pourfournir une décision quand à l'occurrence ou non d'un défaut.

Figure 4 : Localisation des défauts selon la littérature

2.2. Diagnostic de convertisseur de puissance

Les convertisseurs de puissance sont constitués d'éléments actifs de semi-conducteurs (diodes, MOSFET, IGBT, GTO) et d'éléments de stockage d'énergie (inductances et condensateurs). Bien que les études soient rares, il est fréquent que les premiers et surtout les interrupteurs contrôlés soient les plus exposés aux pannes. Cela peut provenir de leur contrôle comme un défaut physique toujours lié à un problème thermique causé par une surcharge due à une surtension provoquant une avalanche; ce qui provoque l'augmentation de la température interne de l'interrupteur de puissance[14].

2.2.1. Le défaut semi-conducteur

Le défaut du semi-conducteur de puissance est principalement représenté par un court-circuitdéfaut et défaut de circuit ouvert. Les défauts de court-circuit, généralement protégés par un circuit de protection standard, sont considérés comme les plus dangereux et (IGBT,GTO…) sera coupé immédiatement une fois le défaut de court-circuit détecté. Au contraire, bien que les défauts en circuit ouvert ne soient pas si destructeurs, ils durent généralement un certain temps et peuvent causer des dommages secondaires à d'autres équipements.

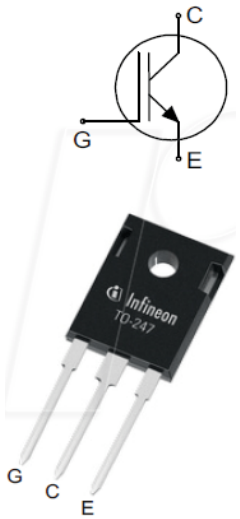


Figure 5 Semi-conducteur IGBT

a. Défauts de condensateur

Les défaillances d'un condensateur peuvent être de l'un des deux types suivants :

1- défaillances catastrophiques, lorsqu'il y a une perte complète de fonctionnalité en raison d'un court-circuit ou d'un circuit ouvert.

2- défaillances de dégradation, lorsqu'il y a une détérioration de la fonction du condensateur. Les défaillances de dégradation sont liées à une augmentation de la résistance série équivalente (ESR) et à une diminution de la capacité au fil du temps.

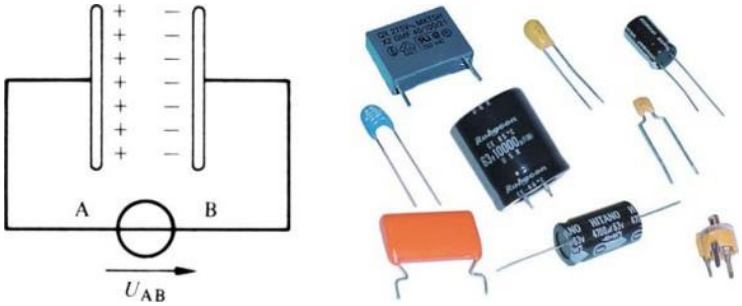


Figure 6 Condensateur

Par conséquent, le diagnostic de défaut est d'une grande importance pour la stabilité de l'ensemble du système.

Il est donc nécessaire de construire une approche de diagnostic : sans modèle (à base de données).

2.3. Etude bibliographique autour des convertisseurs de puissance

Le convertisseur de puissance est un dispositif composé d'interrupteurs commandés électroniquement. Ceux-ci commutent, c'est à dire qu'ils oscillent entre un état passant et un état bloqué. La fréquence de ces commutations est en général assez élevée, de l'ordre de quelques kilo-Hertz, voire quelques dizaines de kilo-Hertz. Un tel convertisseur est communément appelé ***convertisseur statique*** car il ne comprend aucun organemécanique mobile.

.

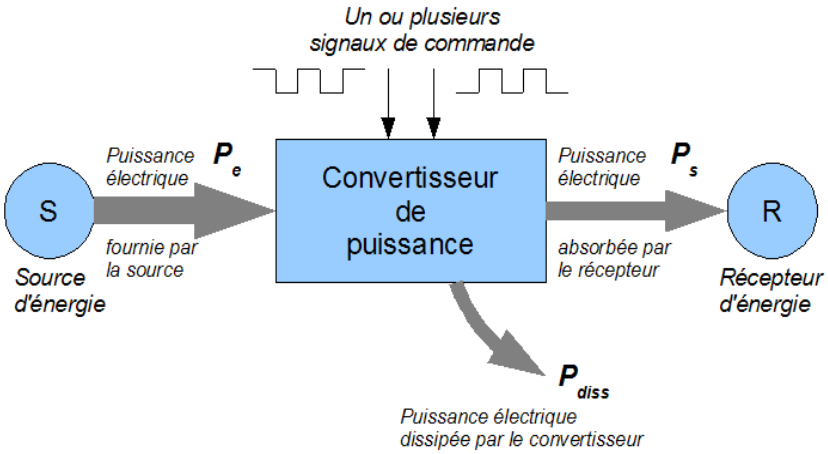


Figure 7 Schéma synoptique d'un dispositif d'électronique de puissance

2.3.1. Rôles des convertisseurs de puissance

Les convertisseurs de puissance sont les dispositifs à composants électroniques capables de modifier la tension et/ou la fréquence de l'onde électrique donc il y'a quatre types :

- convertisseur alternatif/alternatif : c'est un gradateur (ou variateur de courant alternatif).
- convertisseur alternatif/continu : c'est un redresseur (ou convertisseur de courant)
- convertisseur continu /continu : c'est un hacheur (ou variateur de courant continu).
-convertisseur (continu/alternatif : c'est un onduleur.

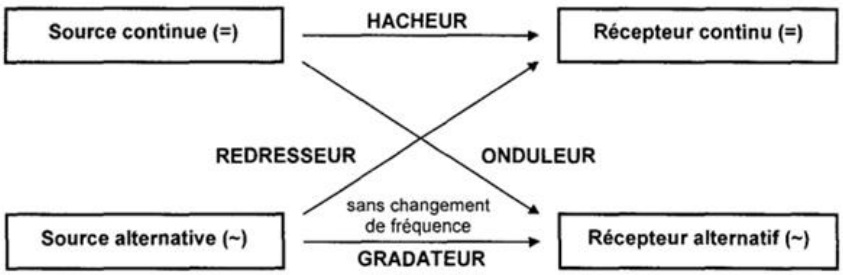


Figure 8 Les différents types de convertisseur de puissance

2.4. Objectif de ce travail

L'objectif principal de l'approche proposée est de tirer parti des approches d'apprentissage automatique afin d'améliorer les performances de diagnostic, en utilisant uniquement les données récentes et utiles représentant la dynamique de dégradation des défauts de commutation simples et multiples. Contrairement aux approches proposées dans la littérature, notre approche est capable d'isoler tous les défauts de commutation de convertisseur (simples ou multiples) et de suivre la dérive afin d'identifier leur type (bloqué ouvert ou bloqué fermé). Par conséquent, l'isolement et l'identification des pannes ont une importance cruciale pour déployer une stratégie de contrôle efficace et tolérante aux pannes.

2.5. Conclusion

Le diagnostic des défauts dans les convertisseurs est essentiel afin d'améliorer la disponibilité des éoliennes et de réduire leurs coûts de maintenance et d'exploitation. Peu d'approches ont été proposées dans la littérature pour la réalisation d'un diagnostic précoce des convertisseurs de puissance de l'éolienne. Cela est dû au fait que la modélisation de la dégradation des convertisseurs dans des environnements non stationnaires est une tâche très difficile. Dans le prochaine chapitre l'approche proposée afin de répondre aux déférents défis recensé dans la littérature sera présenté.

CHAPITRE III

APPROCHE PROPOSÉE POUR LA COMMANDE TOLÉRANTE AUX DÉFAUTS DU CONVERTISSEUR MULTICELLULAIRE

Chapitre III: Approche proposée pour la commande tolérante aux défauts du convertisseur multicellulaire

3. Introduction

Les convertisseurs électriques de puissances sont de plus en plus complexes et mettent en jeux de multiples technologies où cohabitent le matériel, le logiciel, les communications, etc. De plus les attentes et les contraintes du marché et de la société en termes économique, de sécurité, d'impact sur l'environnement vis à vis de ces systèmes imposent désormais de s'intéresser à leur performance globale. Cette performance est d'autant plus difficile à maîtriser que l'évolution continue de l'environnement, les reconfigurations fréquentes du système, le vieillissement des composants… modifient sans cesse l'état du système. Ceci est d'autant plus vrai dans la phase de maintien en conditions opérationnelles, considérée comme la plus impactant sur la performance globale, d'où l'importance de mettre en œuvre une stratégie de maintenance proactive basées sur des outils de surveillance en ligne adapté pour garantir les objectifs attendus du système. Celle-ci fournit au personnel de la maintenance une indication sur l'état futur du système et, idéalement, octroie un délai suffisant pour que le personnel, l'équipement et les pièces de rechange soient organisés, minimisant ainsi les temps d'arrêt et les coûts de maintenance [Zaidi, Chen, Strangas,Mahamad, Benk].

Les convertisseurs électriques de puissance peuvent être soumis, au cours de leurs fonctionnements, à des différents défauts et anomalies conduisant à une baisse de la performance du système et voire à l'indisponibilité totale du système. Toutes ces conséquences défavorables vont évidemment réduire la disponibilité de l'installation, et donc réduire le profit de l'installation, sans compter le coût de maintenance pour remettre le système en état normal. La maintenance proactive a pour objectif général de prédire l'état de fonctionnement (normal ou défaillant) d'un système lorsqu'il est en fonctionnement. Il s'agit de mettre en place des algorithmes de pronostic de défauts permettant de détecter et localiser les composants tendent vers une défaillance et susceptibles d'être incapables de remplir totalement les missions pour lesquelles ils ont été choisis.

3.1. Etat de l'art

Avant les années 1960, le service de maintenance dans une entreprise avait pour principale mission d'intervenir sur les équipements en panne afin de les réparer le plutôt possible. Ce type

de maintenance, dite corrective, a ensuite été peu à peu complété par une approche plus anticipative des phénomènes de défaillances, c'est-à-dire une maintenance réalisée avant que la défaillance ait lieu, dite préventive, cette anticipation de la défaillance se fait soit d'une manière statique en suivant un échéancier d'intervention, dite maintenance périodique, ou d'une manière dynamique en détectant un début de dégradation, dite maintenance conditionnelle, un nouveau concept appelé la maintenance proactive intégrant une fonction de pronostic des défaillance fait l'objet de plusieurs travaux de recherche dans plusieurs domaine d'application.

3.1.1. Défis et motivations

Dans les applications réelles, il est souvent impossible d'obtenir des mesures de données sur chaque défaut potentiel en raison de leur coût ou pour des raisons de sécurité. Par conséquent, l'approche d'apprentissage automatique doit être mise à jour en ligne pour pouvoir intégrer des nouveaux comportements des défauts de l'interrupteur bloqué-fermé se produisent souvent en raison d'une défaillance intrinsèque causée par une surtension ou un dépassement de température. Certains articles ont été publiés pour traiter les défauts d'interrupteur bloqué-fermé dans les convertisseurs de puissance [46][47]. L'interrupteur bloqué-fermé est l'une des défaillances les plus fatales, et son diagnostic précoce de défaut est essentiel pour limiter ses mauvaises conséquences en déclenchant les actions adéquates. Cependant, la plupart des méthodes de détection de défauts des interrupteurs existantes sont basées sur des circuits matériels. Très peu sont basés sur des algorithmes [48]. La plupart des approches de diagnostic de défauts discrets ne diagnostiquent pas les défauts d'interrupteurs simples et multiples au même temps. De plus, peu de travaux ont été proposés pour réaliser un diagnostic précoce des défauts des convertisseurs de puissance multicellulaires en utilisant des approches d'apprentissage automatique. Ces approches souffrent de deux limites principales. Premièrement, ils nécessitent des échantillons de données sur chaque mode de défaillance, ce qui est souvent difficile à obtenir pour des raisons de coût et de sécurité.

Deuxièmement, ils n'utilisent pas de mécanisme de détection de dérive pour détecter l'apparition d'une dégradation à son stade précoce. Cela augmente le délai de diagnostic des défauts et réduit le temps nécessaire pour effectuer les raisons de maintenance d'un système éolien.

3.1.2. L'Approche proposée

L'approche proposée comprend quatre étapes :

1. **La première étape** vise à construire un classificateur, en apprenant à l'aide d'un ensemble de données caractérisant les conditions normales de fonctionnement pendant une certaine période de temps dans le passé. Le classificateur attribue un nouveau modèle, caractérisant les conditions de fonctionnement actuelles, à la classe normale ou les données sont rejeté se trouve.
2. **La deuxième étape** est l'étape de regroupement. Il vise à rassembler les données rejetées de la classe normale à une classe évolutive. Ces derniers font référence à une dégradation telle un interrupteur bloqué ouvert ou bloqué fermé.
3. **La troisième étape** est l'étape de surveillance. Il vise à observer un changement des propriétés statistiques de données entrantes en fonction de ceux de la classe normale. Ce changement est quantifié grâce à un indicateur de dérive permettant de mesurer la dissimilarité entre les propriétés statistiques des motifs appartenant à la classe normale et les motifs entrants appartenant à la classe évolutive.
4. **La dernière étape** est l'étape de mise à jour. Il permet de mettre à jour la structure du classifieur en ajoutant l'occurrence d'une classe représentant un mode de défaillance (nouvelle classe anormale) à sa fonction de décision. En effet, lorsque les propriétés statistiques des modèles entrants ne changent plus selon celles de la classe normale, cela indique l'occurrence d'un mode de défaillance (par exemple, 100% bloqué ouvert ou bloqué fermé d'un interrupteur) voir (la Figure 13).

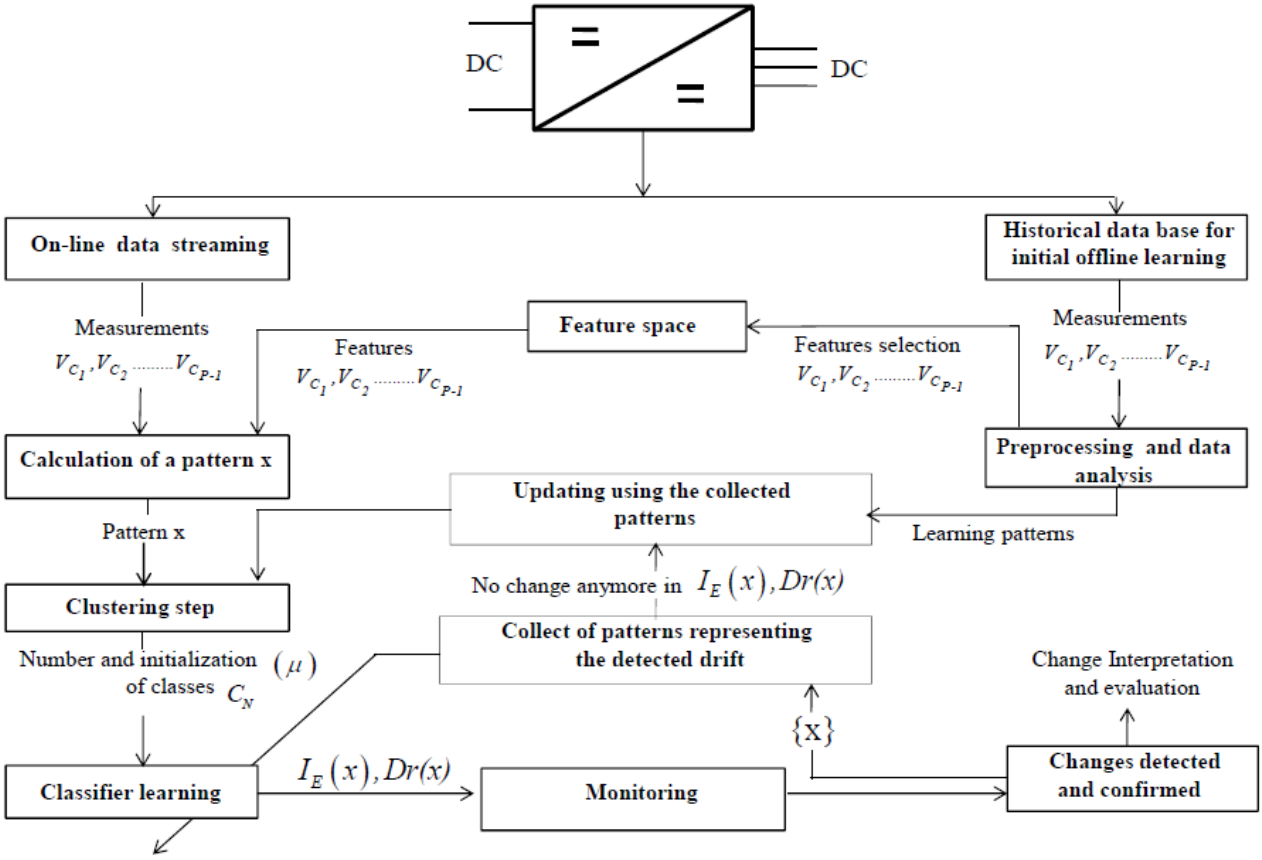


Figure 9 Systèmes auto-adaptative en ligne propose les étapes pour le diagnostic de panne d'un convertisseur de puissance multicellulaire.

3.1.3. Traitement et analyse des données

Le but de l'étape d'analyse de traitement et de données consiste à construire un espace de représentation basée sur des caractéristiques capables de distinguer entre les conditions de fonctionnement normal (représentant la classe normale) et chacun des modes de défaillance (par exemple, un commutateur bloqué-ouvert ou bloqué-fermé). À cette fin, les caractéristiques sensibles sont définies en fonction de l'utilisation des techniques et des outils d'analyse de traitement du signal / données ainsi que les connaissances physiques disponibles sur la dynamique du système et son comportement. Les caractéristiques sélectionnées doivent permettre de maximiser la séparation entre la classe normale et chacun des modes ou classes de défaillance dans l'espace de représentation. Afin de définir des éléments sensibles permettant de distinguer les classes normales et les modes de défaillance y associé, dans le convertisseur multicellulaire, la connaissance physique sur la dynamique de celui-ci est utilisée. A cet effet, Les tensions de condensateur sont réglées autour de leurs valeurs de référence, donnée par

(l'équation 3), lorsque le convertisseur multicellulaire est dans des conditions de fonctionnement normales. Lorsqu'un défaut de commutation simple ou multiple se produit, le contrôleur ne peut plus réguler les tensions des condensateurs pour se situer autour de leurs valeurs de référence. Ce changement entre les valeurs réelles et référence des tensions de condensateur et son augmentation au fil du temps permettent de détecter une dégradation observée comme une évolution de la classe normale dans l'espace de représentation.

3.1.4. Conception du classificateur et mise à jour de ses paramètres et de sa structure

La conception d'un classificateur vise à construire une fonction de décision afin de séparer les différentes classes (c'est-à-dire, représentant les modes de fonctionnement normal et de défaillance) dans l'espace de représentation. Les conditions de fonctionnement actuelles sont représentées par un point dans l'espace de représentation. La fonction de décision du classificateur affecte ce point à l'une de ces classes, ce qui permet de déterminer si le système est en mode de fonctionnement normal ou en panne. Lorsqu'un nouveau mode de défaillance se produit, la fonction de décision du classificateur doit être mise à jour afin d'intégrer ce nouveau mode de défaillance (c'est-à-dire représenté par une nouvelle zone ou classe dans l'espace de représentation). Sans perte de généralité, la méthode de regroupement dynamique auto-adaptatif (AuDyC) [34] est utilisée pour concevoir le classificateur et mettre à jour les paramètres et la structure de sa fonction de décision. La conception et la mise à jour du classifieur sont basées sur les propriétés statistiques (distribution des données dans l'espace caractéristique représenté comme un mélange gaussien) des échantillons de données initiaux formant les classes initiales. Il s'agit d'une méthode de classification non supervisée capable d'apprendre les paramètres des classes initiales (centre de gravité, matrice de variance-covariance) et de les mettre à jour en ligne. Chaque classe est représentée par son centre de gravité $\mu_{pj} \in \boldsymbol{R^d}$ et une matrice de variance – covariance $\boldsymbol{\Sigma_{pj}} \in \boldsymbol{R^{d*d}}$dans un espace d'entités de d entités. Chaque classe nécessite un nombre minimum de $\mathbf{N}_{\boldsymbol{win}}$ de points définis par les utilisateurs. La mise à jour des paramètres de chaque classe est réalisée en intégrant les nouveaux points entrants et en supprimant les plus anciens via une fenêtre temporelle glissante. Les nouveaux échantillons de données entrants renforcer l'estimation des paramètres des classes déjà existantes lorsqu'elles ont des propriétés statistiques (moyenne, variance-covariance) très proches de celles de ces classes.

Cependant, lorsque ces propriétés statistiques (moyenne, variance-covariance) entraînent un changement dans les paramètres des classes déjà existantes supérieures à un seuil prédéfini

(normalement défini comme trois fois les écarts-types de la distribution des données de classe), elles indiquent un changement (dérive). Dans ce cas, ces points seront attribués à une nouvelle classe $\mathbf{C}_e$ appelée classe évolutive. Seuls les échantillons de données correspondant aux conditions normales de fonctionnement sont considérés comme disponibles à l'avance. Ils forment la classe normale notée $\mathbf{C}_n = (\mu_n, \boldsymbol{\Sigma}_n)$. Cette hypothèse permet de surmonter le problème des données déséquilibrées où les échantillons de données sur les conditions de fonctionnement normales sont beaucoup plus que ceux représentant les conditions de défaillance. De plus, il permet de compléter en ligne les connaissances manquantes (échantillons de données) sur certains modes de défaillance absents dans l'ensemble de données initiales. Lorsque les propriétés statistiques des échantillons de données entrants dans une fenêtre temporelle glissante sont très proches (moins de trois écarts-types) à ceux de la classe normale, ces échantillons de données ne représentent pas une dérive (dégradation ou évolution vers un mode de défaillance). Lorsque ces propriétés statistiques génèrent un changement plus grand que le seuil prédéfini (trois écarts-types), elles indiquent une dérive (dégradation). Dans ce cas, la classe évolutive créé par l'estimation des paramètres $\mathbf{C}_e = (\mu_e, \boldsymbol{\Sigma}_e)$. Lorsque les propriétés statistiques des nouveaux échantillons de données entrants ne changent pas (moins de trois écarts-types) selon les fenêtres glissantes précédentes, une classe de défaillance rassemblant ces échantillons de données est créée en estimant ses paramètres (centre de gravité et matrice de variance-covariance).

3.1.5. Surveillance et interprétation des défauts

Les données représentant un défaut interrupteur dans un convertisseur multicellulaire évolue progressivement de l'état de fonctionnement normal à un mode de défaut fermé bloqué-ouvert ou bloqué-fermé. L'observation de cette dégradation (évolution ou dérive) permet de détecter ce mode de défaut à un stade précoce. Par conséquent, les opérateurs de surveillance peuvent avoir plus de temps pour effectuer les opérations de maintenance. A cet effet, l'approche proposée dans cette thèse utilise deux indicateurs.

- **Le premier indicateur est un indicateur de dérive** qui mesure la dissimilarité entre les caractéristiques des classes normales et évolutives (centres de gravité) représentées par une distance euclidienne dans l'espace de représentation.
- **Le second est l'indicateur de direction de dérive**. Il est utilisé pour surveiller la direction de la classe en pleine évolution, qui mieux isoler les défauts détectés.

La détermination de l'évolution de la classe en calculant son angle dans l'espace de représentation permet d'éviter la confusion entre les différentes sources de défauts. Étant donné que chaque défaut d'interrupteur a une direction et une trajectoire différentes de sa classe défectueuse dans l'espace de représentation. La détection du défaut et la détermination de sa trajectoire permettent de s'affranchir du problème de chevauchement des classes de défauts d'interrupteur et de mieux isoler les sources de défaut à un stade précoce. L'étape d'interprétation vise à comprendre les changements détectés dans les paramètres et les structures des classes. Il peut ensuite être utilisé comme une prévision à court terme de la tendance de la situation actuelle à l'avenir. Afin d'éviter les fausses alarmes, une dérive est détectée et confirmée lorsque l'indicateur IE devient supérieur à un seuil égal à trois écarts-types de la distribution des points dans la classe normale. Ce seuil permet d'obtenir un compromis entre les fausses alarmes et les alarmes manquées notamment lorsque la dérive est lente. Lorsque l'indicateur de dérive ne change plus (c'est-à-dire qu'il reste moins de trois écarts-types), cela indique que le mode de défaillance (fin de la dérive ou dégradation).

3.2. Convertisseur DC / AC

La configuration **DC-AC** d'un convertisseur de puissance multicellulaire (onduleur multiniveaux) associé à une charge inductive **(R-L)** estIllustrée. Cette topologie offre une répartition équilibrée de la tension d'entrée **E** entre **p** cellules de commutation au moyen de **p - 1** condensateurs flottants.

Chaque cellule contient des commutateurs de remorquage avec des valeurs complémentaires. Si l'un est fermé, l'autre est ouvert et vice versa. Ces commutateurs peuvent être commandés par le signal de commande $\boldsymbol{S_j}$(voir figure 14).

> $\boldsymbol{S_j}$ est égal à **1** lorsque l'interrupteur supérieur de la cellule et conducteur et à **0** lorsque l'interrupteur complémentaire inférieur de la cellule et conducteur [49]

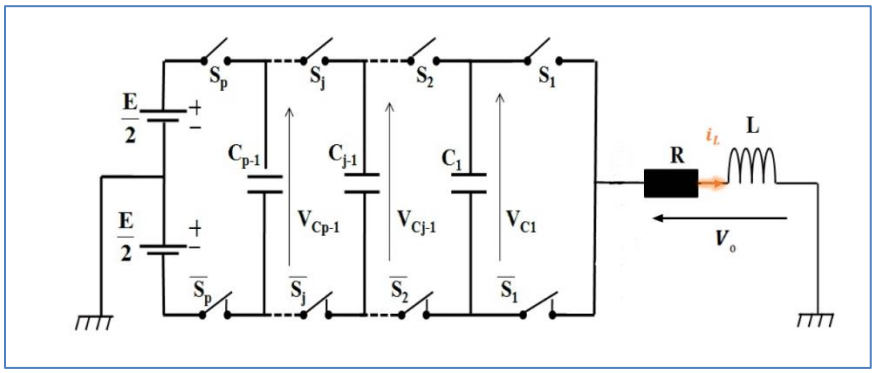


Figure 10: : Topologie du convertisseur de P cellules alimentant une charge inductive (R-L)

La cellule de commutation est composée de paires d'interrupteur complémentaires et commandée par un signal d'entrée binaire **($S_J \in \{0, 1\}$, $j \in \{1, ..., p\}$).** Pour lejième cellule, le signal d'entrée $\mathbf{S_J = 1}$**(respectivement** $\mathbf{S_J = 0}$**)** indique que l'interrupteur supérieur est activé (respectivement désactivé) et l'interrupteur inférieur est désactivé (respectivement activé). En considérant la tension $\mathbf{V_{CJ}}$ aux bornes de chaque condensateur $\mathbf{C_J}$ et le courant d'inductance $\mathbf{I_L}$ comme variables d'états continus (figure 14), la dynamique d'un convertisseur à cellules **P** peut être décrite par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \dfrac{dVc_j}{dt} = \dfrac{1}{C_j}\,(S_{j+1} - S_j)\,i_L \text{ , } j = 1, \ldots\ldots, p-1 \qquad (1) \\ \dfrac{di_L}{dt} = \dfrac{1}{L}\,(V_0 - R i_L) \end{cases}$$

Où $\mathbf{V_0}$ est la tension de sortie du convertisseur définie comme suit :

$$V_0 = \sum_{j=1}^{p-1} Vc_j (S_{j+1} - S_j) \text{ , Si } S_{p+1} = -\frac{E}{2} \text{ et } Vc_p = \frac{E}{2} \quad (2)$$

Selon les états des cellules, on peut distinguer des configurations **2p**, appelées modes de fonctionnement [50]. Soit q_i **(i ∈ {1,……..2p})** le **i**ème mode de fonctionnement obtenu par une combinaison spécifique d'états de cellule (voir le tableau 1 pour le cas du convertisseur à trois cellules).

Modes de fonctionnement	Les variables	q_1		q_2	q_3	q_4	q_5	q_6	q_7	q_8
États des cellules	S_1	0		1	0	1	0	1	0	1
	S_2	0		0	1	1	0	0	1	1
	S_3	0		0	0	0	1	1	1	1
L'évolution de l'Etat	Vc_1	→		↘	↗	→	→	↘	↗	→
	Vc_2	→		→	↘	↘	↗	↗	→	→
	i_L	↘		↗↘	↗↘	↗↘	↗↘	↗↘	↗↘	↗
La tension de sortie (équilibre)	V_0	$-\frac{E}{2}$		$-\frac{E}{6}$	$-\frac{E}{6}$	$\frac{E}{6}$	$-\frac{E}{6}$	$\frac{E}{6}$	$\frac{E}{6}$	$\frac{E}{2}$

Tableau 1 : Différents modes de fonctionnement et les niveaux de tension de sortie correspondants du convertisseur à trois cellules.

Pour la sécurité du convertisseur, qui correspond à une répartition équilibrée de la tension d'entrée **E** entre les **p** cellules de commutation, les tensions des condensateurs doivent être régulées autour des références moyennes suivantes :

$$\boldsymbol{Vc_{j,ref}} = j\,\frac{\boldsymbol{E}}{\boldsymbol{P}},\ \ j \in \{1, ..., p - 1\} \qquad (\mathbf{3})$$

La tension de sortie a p + 1 niveaux $(-\frac{E}{2}, \frac{E}{P}, \frac{2E}{P}, ..., \frac{E}{2},)$

Cela permet d'obtenir une amélioration remarquable des formes d'onde de sortie (ondulations faibles et fréquence apparente élevée), conduisant à une réduction significative des éléments filtrants [51]. Le schéma de contrôle suit la procédure donnée dans[52]. Il offre des fonctionnalités intéressantes telles que : une bonne régulation du courant de charge et des tensions des condensateurs, la robustesse malgré les variations d'entrée et de charge et la robustesse vis-à-vis des différents paramètres du modèle. Cependant, ces propriétés sont perdues en cas de mauvais fonctionnement du convertisseur, ce qui correspond à une ou plusieurs cellules de commutation endommagées.

Par conséquent, le fonctionnement défectueux doit être détecté et isolé le plus rapidement possible afin de développer un contrôleur tolérant aux pannes et d'éviter que le convertisseur ne soit endommagé.

La section suivante étudie un schéma d'apprentissage auto-adaptatif pour le diagnostic des défauts d'un convertisseur de puissance multicellulaire sous les défauts discrets suivants :

- **Défaut interrupteur simple** : représente le cas défectueux où un seul interrupteur est bloqué fermé ou bloqué ouvert.
- **Défauts interrupteurs multiple** : représente le cas où plusieurs interrupteurs sont défectueux.

Type	*Défaut Fi*	*interrupteur*
Défaut simple Bloqué ouvert	F_1	S_1
	F_2	S_2
	F_3	S_3
Défaut simple Bloqué fermé	F_4	S_1
	F_5	S_2
	F_6	S_3
Défauts multiples Bloqué ouvert	F_7	S_1 et S_2
	F_8	S_1 et S_3
	F_9	S_2 et S_3
Défauts multiples Bloqué fermé	F_{10}	S_1 et S_2
	F_{11}	S_1 et S_3
	F_{12}	S_2 et S_3

Tableau 2 Les différents scénarios de défaut discrètes (simples et multiples) pour un convertisseur trois cellules.

3.3. Structure tolérante aux défauts du Convertisseur DC / AC

Le convertisseur utilisé pour la commande tolérante aux défauts est composé d'un convertisseur multicellulaire à trois cellules et quatre niveaux en parallèle avec un convertisseur deux niveaux. La **figure 15** représente le schéma unifilaire de topologie de ce convertisseur avec les interrupteurs Sn1, Sn2 sont fermés (état passante) et Sd1, Sd2 sont ouverts (état bloquée) lorsque le fonctionnement normal du convertisseur multicellulaire. S'il y a un défaut des interrupteurs ou

des condensateurs flottants du convertisseur multicellulaire, les interrupteurs Sn1, Sn2 sont ouverts (état bloquée) et Sd1, Sd2 sont fermés (état passantes).

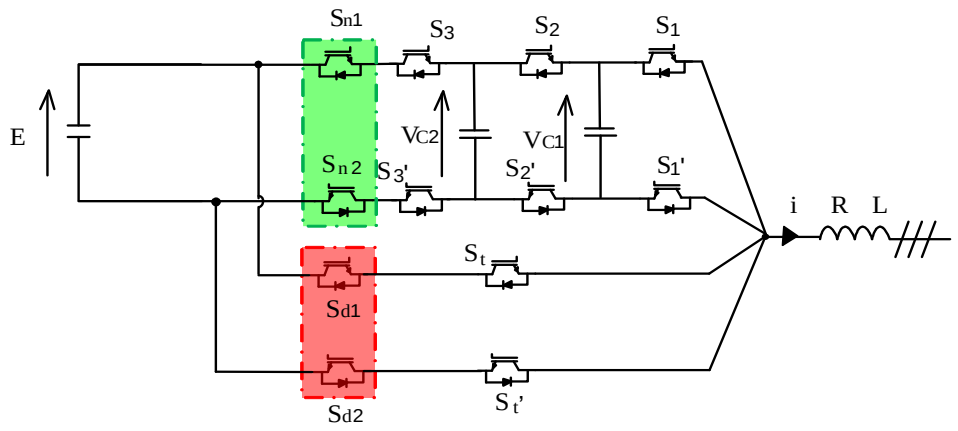


Figure 11Topologie du convertisseur utilisée pour la commande tolérante aux défauts

3.3.1. Loi de commande en fonctionnement normal (convertisseur multicellulaire)

En fonctionnement normal le convertisseur proposé est fonctionne comme convertisseur multicellulaire à trois cellules. La commande utilisée est la commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI). Pour générer ces commandes, on compare un signal sinusoïdal de référence avec un signal triangulaire (porteuse) de fréquence supérieur à la fréquence de référence, la deuxième porteuse est décalée de T/3 par rapport la première ou T est la période de découpage, la troisième porteuse est décalée de 2*T/3 par rapport la première, la figure suivante :

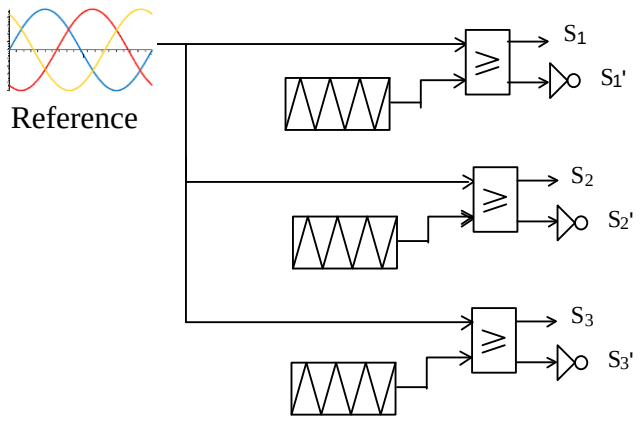


Figure 12Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) du convertisseur multicellulaire (fonctionnement normal)

3.3.2. Loi de commande en fonctionnement avec défauts (convertisseur classiue deux-niveau)

En fonctionnement défaillant le convertisseur proposé est fonctionne comme convertisseur classique à deux niveaux. La commande utilisée est la commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI). Pour générer ces commandes, on compare un signal sinusoïdal de référence avec un signal triangulaire (porteuse) de fréquence supérieur à la fréquence de référence, la figure suivante :

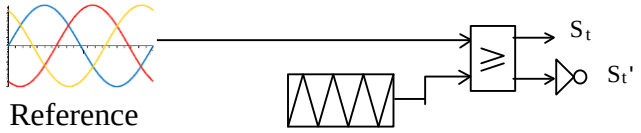


Figure 13Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) du convertisseur deux niveaux (fonctionnement défaillant).

La **figure 14** montre la commande par Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) en boucle ouverte pour commander le convertisseur multicellulaire (fonctionnement normal) et le convertisseur deux niveaux (fonctionnement avec défaut).

La **figure 15** montre la tension continue et les tensions des condensateurs flottants du convertisseur multicellulaire dans le fonctionnement normal, les tensions V_{c1} et V_{c2} tendent vers ces valeurs de références après un régime transitoire de 0.05 S. **figure 16** représente la tension de la sortie de quatre niveaux du convertisseur multicellulaire.

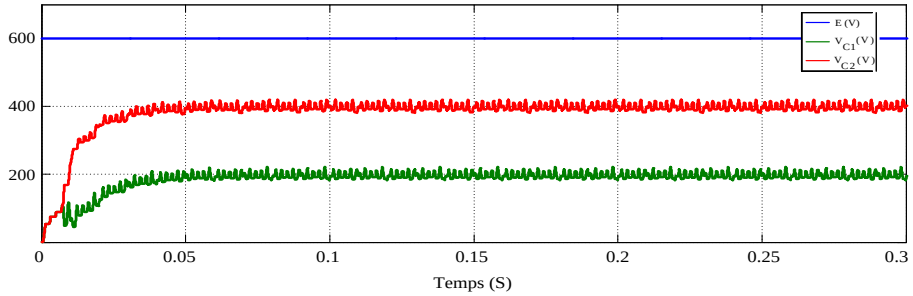


Figure 14Tension continue E el tensions des condensateurs flottants Vc1, Vc2 fonctionnement normal.

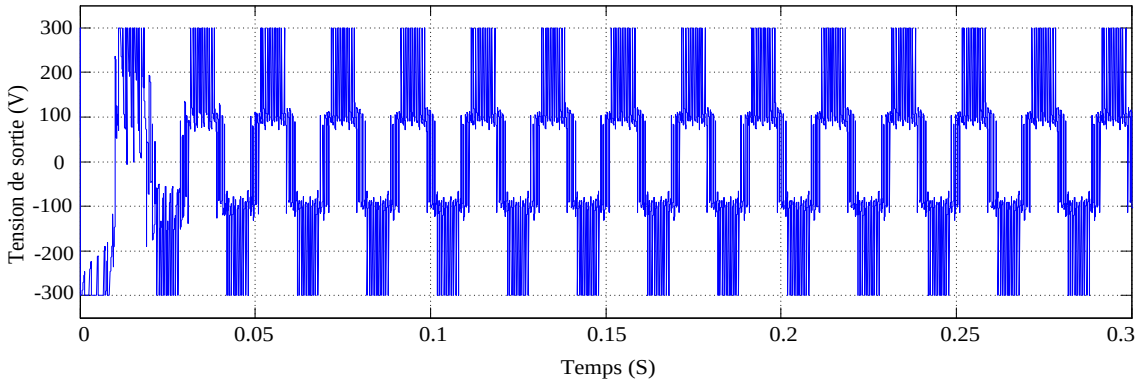


Figure 18 : Tension de sortie du convertisseur multicellulaire.

Lors d'un défaut d'interrupteur du convertisseur multicellulaire a l'instant 0.5 S les tensions des condensateurs flottants divergent de leurs valeurs de référence comme la **figure 19** indique, la tension de sortie du convertisseur multicellulaire défectueux perde la forme multi nivaux comme la **figure 20** présente.

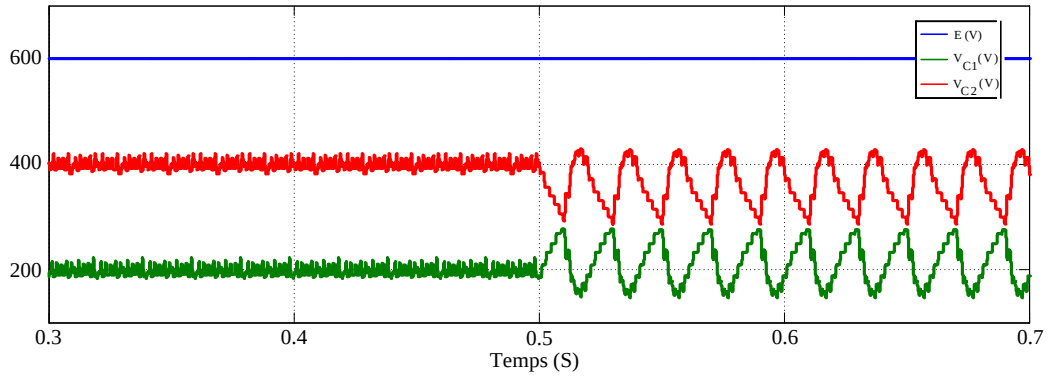


Figure 15Tension des condensateurs flottants Vc1 et Vc2 lors d'un défaut d'interrupteur

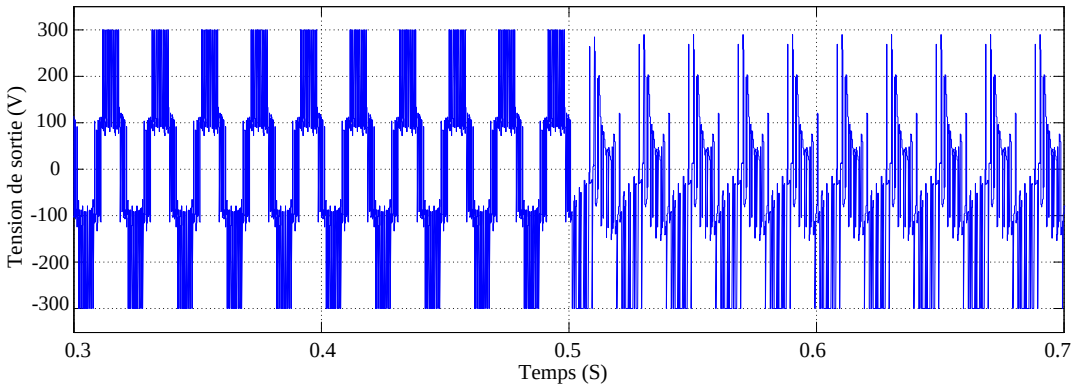


Figure 16Tension de sortie du convertisseur multicellulaire lors d'un défaut d'interrupteur

Pour résoudre le problème de la tension de sortie on applique la commande tolérante aux défauts par l'action des interrupteurs (Sd1, Sd2) à l'état passantes et les interrupteurs Sn1, Sn2 sont à l'état bloquée afin de permuté le fonctionnement au convertisseur deux niveaux et déconnecter le convertisseur multicellulaire. La **figure 21** présente les tensions des condensateurs flottants lors de l'application de la commande tolérante aux défauts à l'instant 0.5 S, la tension de sortie dans la **figure 22** présente deux niveaux lors de l'application de la commande tolérante aux défauts.

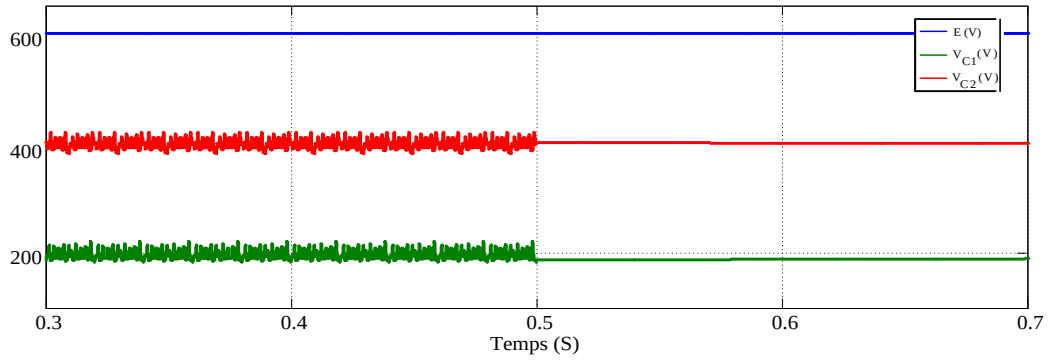


Figure 17Tension des condensateurs flottants Vc1 et Vc2 lors d'un défaut d'interrupteur avec FTC

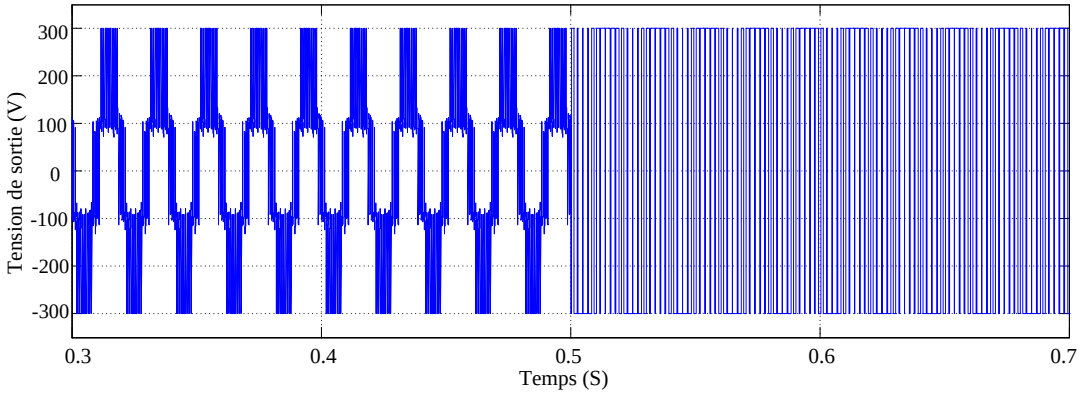


Figure 18Tension de sortie du convertisseur multicellulaire lors d'un défaut d'interrupteur avec FTC

3.4. Expérimentation et résultats obtenus

Nous utilisons le modèle de simulation Matlab pour le modèle avancé pour détecter et isoler les failles et déterminer l'indice de dérive, sa direction et l'évolution de la dérive.

En effet, pour confirmer une dérive, un certain nombre de points n'appartenant pas à la classe normale est nécessaire. Un nombre trop petit de points augmente le nombre de fausses détections tandis qu'un trop grand nombre de points évolutifs retarde la détection de dérive (nous utilisons un algorithme pour simplifier les vecteur Vc1, Vc2 et minimiser les points, en suit algorithme de

créait espace de représentation, d'abord indicateur de dériver en fin algorithme d'indicateur de direction).

Cependant, il convient de mentionner que l'impact des valeurs de ces paramètres sur les performances de détection et de confirmation de la dérive est faible grâce à la discrimination de puissance élevée de l'espace des fonctionnalités. En effet, la classe normale est bien séparée des classes de défauts et chaque classe de défauts est bien séparée des autres classes de défauts. Les pannes de ce convertisseur de puissance sont causées par des défauts de commutation simples et multiples bloqués-ouverts et bloqués-fermés. Ces pannes brusques peuvent être vues à travers **Vc1** et **Vc2** comme une dégradation continue (dérive) des caractéristiques des conditions normales de fonctionnement (classe normale) due à un simple défaut dans l'un des interrupteurs **S1, S2 ou S3**, ou à plusieurs défauts d'interrupteurs (voir Tableau 2). La différence majeure entre l'approche proposée dans cette mémoire de fin étude les approches existantes, comme celles développées dans [36],[37] , consistent à utiliser un indicateur de dérive comme indicateur de santé afin de détecter un défaut à ses débuts. En effet, une faille est considérée comme de type dérive. Par exemple, le commutateur commence à rester ouvert jusqu'à ce qu'il soit à **100%** bloqué ouvert. Les approches de l'état de la technique considèrent ce défaut comme un défaut brusque et, par conséquent, diagnostiquent ce défaut lorsque l'interrupteur est ouvert à **100%**. Un délai est donc nécessaire pour diagnostiquer ce défaut par ces approches. Bien que, l'approche proposée au but le diagnostic de cette faute avant qu'il ne devienne **100%** bloqué / ouvert, à savoir, avant d'atteindre la zone de bloquée-ouvert **100%.**

Par conséquent, l'approche proposée présente l'avantage de diagnostiquer un défaut plus rapidement que les approches traditionnelles de l'état de la technique.

a. Défaut Interrupteur simple Bloqué-ouvert :

(Figure 23) montre l'espace de fonction construit de la puissance à trois cellules convertisseur pour les conditions de fonctionnement normales et défectueuses du commutateur. Ces résultats sont obtenus pour les scénarios : **F1, F2** et **F3** qui Correspondent à différents défauts simples bloqués-ouverts dans les commutateurs du convertisseur, comme indiqué dans le tableau 2.

On peut remarquer que le contrôleur est capable de conduire la trajectoire du convertisseur à l'état souhaité dans le cas de conditions de fonctionnement normales. En effet, les tensions des

condensateurs **Vc1** et **Vc2** sont régulées à leurs références $\frac{E}{3}$ **= 40 V** et $\frac{2E}{3}$ **= 80 V**, respectivement, comme le montre la Figure 23.

Cependant, pour différents défauts simples, on peut noter un changement anormal progressif de la trajectoire du convertisseur jusqu'à ce qu'il atteigne un état défectueux. Cela démontre la sensibilité du contrôleur à ces scénarios de fonctionnement défectueux, qui est détaillé comme suit :

- **S1 Bloqué-ouvert :** à partir de l'Equation 1, la dynamique du condensateurla tension **Vc1** est donnée par : $\frac{d\,\mathrm{Vc_1}}{dt} = \frac{S_2}{C_1} i_L \geq 0.$

  Cela signifie que la tension du condensateur **Vc1** n'a aucune chance de se décharger. Cependant, le contrôleur, à son insu, tente de diminuer la valeur de **Vc1** en utilisant les modes **q2** et **q6**. Ce mode défectueux **(q2 et q6)** correspond respectivement à **q1 et q5** (voir tableau 1). Ainsi, tous les efforts du contrôleur sont convertis en une augmentation de la valeur de la tension du condensateur **Vc2** en utilisant les modes **q1 et q5.**

Après un temps spécifique, l'erreur dans la seconde la tension du condensateur atteint une valeur qui oblige le contrôleur à la considérer. À partir du tableau 1, le contrôleur doit utiliser les modes **q3 et q4** pour trouver un remède à la situation et diminuer la valeur de tension du deuxième condensateur. Dans ce cas défectueux, ces modes **q3 et q4** représentent le fonctionnement de **q3** dû au commutateur **S1** bloqué-ouvert. Le contrôleur peut diminuer la valeur **Vc2** mais la valeur du premier condensateur **Vc1** augmentera sans possibilité de la diminuer en mode **q3**. À la fin, le premier condensateur atteindra sa valeur maximale **(**$Vc_{1,ref} = \frac{E}{3}$ **= 40V)** et le contrôleur doit le décharger en chargeant le deuxième condensateur comme décrit ci-dessus. Cette dernière atteint également sa valeur maximale **(** $Vc_{2,ref} = \frac{2E}{3}$ **= 80V**), ce qui justifie la position de la région normale à **(40 V, 80 V)**.

À partir de **(**figure 24**,**figure 25 **et** Tableau 3 **),** nous voyons que le simple défaut de commutation dans **S1** est détecté par **IE après 0.5143s** de son apparition, de plus il est bien isolé à l'aide du **Dr**. Cela permet à l'opérateur humain de supervision de prendre efficacement les actions appropriées.

- S2 bloquée-ouvert : A partir de L'équation 1, la dynamique des tensions des condensateurs est donnée par : $\frac{d\mathbf{Vc_1}}{dt} = -\frac{S_1}{C_1} i_L \leq 0$ et $\frac{d\mathbf{Vc_2}}{dt} = \frac{S_3}{C_2} i_L \geq 0$.

  Cela signifie que la tension du condensateur **Vc1** n'a pas chance d'être chargé et la tension du condensateur **Vc2** n'a aucune chance d'être déchargée. Suite à la même analyse de S_1 coincé - ouvert, tous les efforts du contrôleur conduisent à réduire **Vc1** à sa valeur minimale Interpréterde **10 V** et à diminuer **Vc2** à sa valeur minimale de **50 V** avec une dégradation progressive comme le montre la figure 23.

Nous pouvons voir à partir de figure 24que le défaut de commutation simple dans **S2** est détecté par **IE après 0,5210 s** après son apparition et il est bien isolé à l'aide du Dr.

- **S3 bloqué-ouvert** : Dans ce cas, la tension d'entrée est déconnectée et il n'y a pas de transfert d'énergie de la source vers la charge. Par conséquent, l'énergie stockée dans différents condensateurs sera consommée par la charge. Cela confirme le changement anormal progressif de la trajectoire du convertisseur jusqu'à ce qu'il atteigne l'origine comme le montre la figure 23.

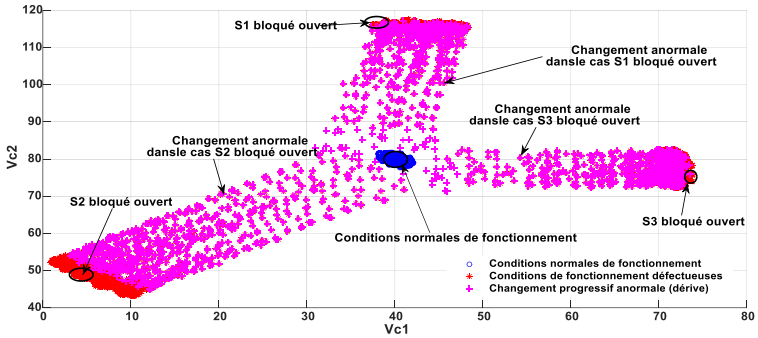


Figure 19Espace de fonction du commutateur de convertisseur de puissance à trois cellules normal et condition de panne dans le cas d'un simple défaut interrupteur bloqué-ouvert.

À partir de figure 24et figure 25et tableau 3**,**nous pouvons voir que le défaut de commutation simple dans **S3** est détecté après **0,5235s** de l'apparition du défaut par **IE** et il est bien isolé par le **Dr.**

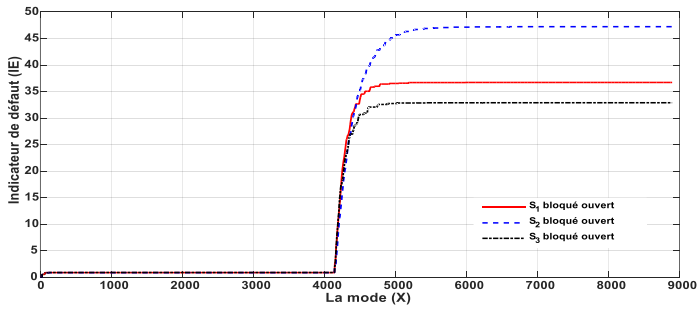


Figure 20Défaut simple dans l'interrupteur bloqué-ouvert, indicateur de défaut basé sur la distance euclidienne

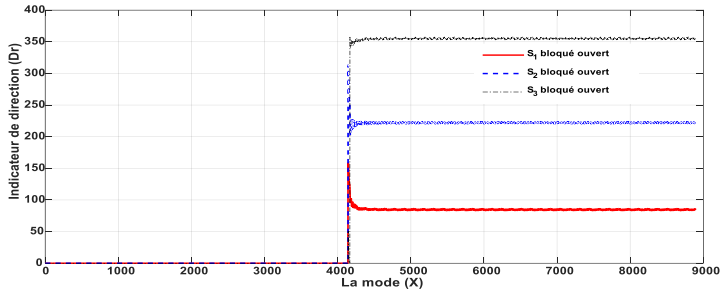


Figure 21Défaut simple dans l'interrupteur bloqué-ouvert, indicateur de direction de la classe évolutive

Type	*Défaut Fi*	*interrupteur*	*Temps de détection*
Défaut simple Bloqué ouvert	F_1	S_1	*0.5143 s*
	F_2	S_2	*0.5210 s*
	F_3	S_3	*0.5235 s*
Défaut simple Bloqué fermé	F_4	S_1	*0.6045 s*
	F_5	S_2	*0.6092 s*
	F_6	S_3	*0.5479 s*
Défauts multiples Bloqué ouvert	F_7	S_1 et S_2	*0.3079 s*
	F_8	S_1 et S_3	*0.3115 s*
	F_9	S_2 et S_3	*0.3265 s*
Défauts multiples Bloqué fermé	F_{10}	S_1 et S_2	*0.3418 s*
	F_{11}	S_1 et S_3	*0.3131 s*
	F_{12}	S_2 et S_3	*0.3147 s*

b. Défaut Interrupteur simple bloqué-fermé

Contrairement aux scénarios précédents, dans ce cas, nous avons considéré un interrupteur de défaut simple bloqué-fermé **(F4, F5 et F6)**.

Cela que le contrôleur est incapable de maintenir la trajectoire du convertisseur à l'état souhaité et que ses efforts, dans différentes opérations défectueuses, conduisent la trajectoire du système en boucle fermée vers un équilibre indésirable.

La dégradation anormale de la normale les conditions de fonctionnement du convertisseur de puissance changent progressivement jusqu'à ce qu'il atteigne un état défectueux comme détaillé ci-dessous.

- **S1 bloqué-fermé** : Dans ce cas, la dynamique du condensateur la tension **Vc1** est donnée par :

  $\frac{d\,\mathrm{Vc}_1}{dt} = \frac{S_2 - 1}{C_1} i_L \leq 0$, ce qui signifie qu'elle n'a aucune chance d'être chargée.

  Le contrôleur essaie d'augmenter la valeur **Vc1** en utilisant le mode **q3** ou le mode **q7** comme indiqué dans le tableau 1.

Cependant, ces modes **(q3 et q7)** correspondent respectivement à **q4 et q8** dans ce mode défectueux. Ainsi, tous les efforts du contrôleur conduisent à une valeur croissante de la tension du condensateur **Vc2** en utilisant les modes **q4 et q8**.

Après un certain temps, l'erreur dans la tension du second condensateur atteint une valeur qui oblige le contrôleur à la prendre en compte.

D'après le tableau 2, le contrôleur doit utiliser le mode **q5** ou le mode **q6** pour remédier à la situation et augmenter la valeur de tension du deuxième condensateur. Dans ce cas défectueux, ces modes correspondent au mode **q6** et le contrôleur peut réussir à augmenter la valeur de **Vc2** mais le premier condensateur **Vc1** diminuera sans possibilité de l'augmenter.

- **S2 bloqué fermé** : à partir de l'Equation 1 , la dynamique des tensions du condensateur est donnée par : $\frac{d\,\mathrm{Vc}_1}{dt} = \frac{1 - U_1}{C_1} i_L \geq 0$ et $\frac{d\,\mathrm{Vc}_2}{dt} = \frac{U_3 - 1}{C_1} i_L \leq 0$.

Cela signifie que la tension du condensateur **Vc1** n'a aucune chance à décharger contrairement à la tension du condensateur **Vc2**, qui n'a aucune chance d'être chargée. La trajectoire du système en boucle fermée atteint un état équilibré correspondant à une part égale de la tension d'entrée.

- **S3 bloqué-fermé** : Dans ce cas, la tension d'entrée est toujours connectée et aucune possibilité de décharger le deuxième condensateur, qui est proche de la source de tension d'entrée. Par conséquent, le deuxième condensateur sera complètement chargé dans ce cas défectueux.

Le contrôleur essaie de le décharger en agissant sur le signal d'entrée **u2** pour fermer l'interrupteur correspondant, cependant, cela augmente la tension du premier condensateur.

Comme on peut le voir sur La figure 26et figure 27, le simple défaut d'interrupteur bloqué-fermé dans $\boldsymbol{S_1}$**,** $\boldsymbol{S_2}$ **et** $\boldsymbol{S_3}$ est détecté avec succès par l'indicateur **IE** et bien isolé à l'aide de l'indicateur de direction **Dr.** Ces défauts sont détectés à un stade précoce après leur début **(**voir letableau 3**).**Cela aide l'opérateur humain à effectuer une supervision.

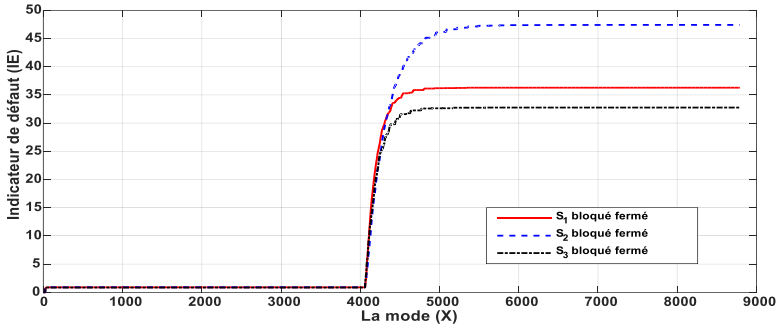


Figure 22Défaut simple dans l'interrupteur bloqué-fermé, indicateur de défaut basé sur la distance euclidienne

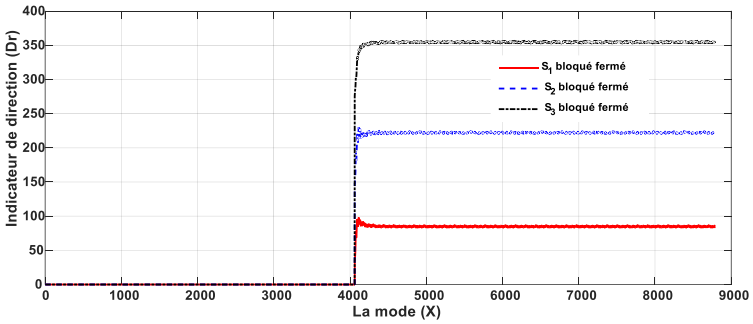


Figure 23Défaut simple dans l'interrupteur bloqué-fermé, indicateur de direction de la classe évolutive

c. Défaut Interrupteur Multiples bloqués-ouverts :

Les scénarios envisagés sont plusieurs défauts bloqués ouverts : **F7, F8 et F9**comme indiqué dansle tableau2. Il est clair que le contrôleur est incapable de suivre la trajectoire de convertisseur à l'état souhaité où un changement anormal progressive peut être vu pour chaque scénario jusqu'à ce qu'il atteigne un état défectueux (voirfigure 28).

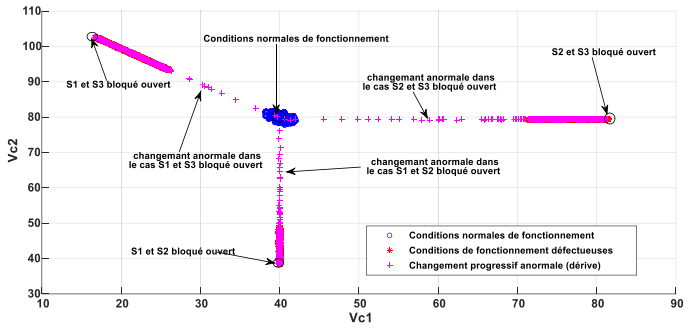


Figure 24Espace de fonction du l'interrupteur de convertisseur de puissance à trois cellules, des conditions de fonctionnement normales et de panne dans le cas de Multiples interrupteurs défectueux bloqués-ouverts

L'analyse suivante, pour chaque cas défectueux, met en évidence les résultats obtenus :

- Défaut Interrupteur Multiples bloqués-ouverts (S1 et S2) :

Sur la base du modèle de convertisseur, la dynamique des tensions de condensateur est donnée par :

$\frac{dVc_1}{dt} = 0$ et $\frac{dVc_2}{dt} = \frac{S_3}{C_2} i_L \geq 0.$

Par conséquent, la tension du condensateur **Vc1** est constante et il est égal à sa valeur juste avant la panne, qui correspond à$\boldsymbol{Vc_{j,ref}}$ **= 40 V.**

De plus, la tension du condensateur, **Vc2** n'a aucune chance de se décharger et tous les efforts du contrôleur sont traduits en mode de charge jusqu'à ce qu'il atteigne la valeur maximale de **Vc2 =** $\frac{E}{3}$.

Cela justifie la position de la région défectueuse du scénario **F7 (Vc1 = 40 V, Vc2 = 40 V)** comme indiqué surfigure 28.

À partir de la figure 29,figure 30et tableau 3, nous pouvons voir que les multiples défauts de commutation dans **S1 et S2** sont détectés après **0,3079s** à partir de l'apparition du défaut par **IE**. De plus, ils sont bien isolés par **Dr.**

- Défaut Interrupteur Multiples bloqués-ouverts (S1 et S3) :

Dans ce cas, la source de tension **E** est déconnectée et l'énergie restante est stockée dans les deux condensateurs juste avant la panne **(Vc1 = 40 V, Vc2 = 80 V).**

À partir de l'Equation 1 , la dynamique des tensions des condensateurs est donnée par :

$\frac{dVc_1}{dt} = \frac{S_2}{C_1} i_L \geq 0$ et $\frac{dVc_2}{dt} = -\frac{S_2}{C_2} i_L \leq 0.$

Ainsi, la tension **Vc1** sera augmenté et la tension **Vc2** sera diminué sans alimentation de la tension d'entrée.

À l'état d'équilibré **on** peut prouver à partir du modèle de convertisseur que le courant de charge est égal à zéro et cela correspond à un état équilibré comme le montre la Figure 21.

À partir defigure 29, figure 30 et tableau 3, nous pouvons voir que les multiples défauts de commutation dans **S1 et S3** sont détectés après **0.3115s** après l'apparition du défaut par **IE** et ils sont bien isolés par le **Dr**.

- Multiples interrupteurs bloqués-ouverts (S2 et S3) :

Dans ce cas, la dynamique du condensateur C_2 est $\frac{d\,Vc_2}{dt} = 0$, ce qui signifie que la tension du second condensateur gardera la dernière valeur dans des conditions de fonctionnement normales juste avant la panne **(Vc2 = 80 V)** comme présenté surfigure 28. Cependant, la tension **Vc1** du premier condensateur C_1 sera augmentée Ceci peut être examiné par sa dynamique après la panne : $\frac{d\,Vc_1}{dt} = -\frac{S_1}{C_1} i_L \leq 0.$

Le contrôleur tentera d'inverser la décharge de **Vc1** en agissant sur l'interrupteur S_1. Cela conduit le convertisseur à être soit en **q2**, soit en **q1**. Lorsqu'il est en **q1** (voir le tableau 1), il augmentée **Vc1.** À l'état équilibré, **Vc2** sera Équilibré, pas de grand changement.

Comme le montrent figure 29, figure 30**et** tableau 3, nous pouvons voir que les multiples défauts de commutation dans **S2 et S3** sont détectés après **0,3265s** après l'apparition du défaut par **IE** et ils sont bien isolés par le **Dr.**

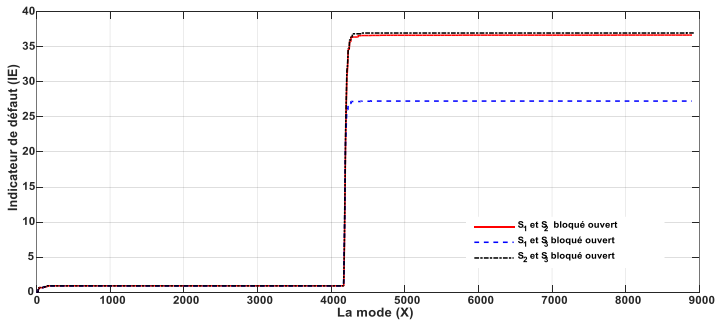


Figure 25Défaut Multiples dans l'interrupteur bloqué-ouvert, indicateur de défaut basé sur la distance euclidienne

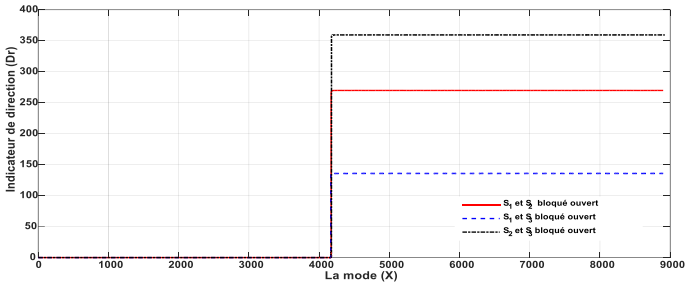


Figure 26Défaut Multiples dans l'interrupteur bloqué-ouvert, indicateur de direction de la classe évolutive

1) Défaut Interrupteur Multiples bloqués-fermés :

Les scénarios **F10, F11 et F12** correspondant à un défaut interrupteur multiple bloqué-fermé ont été appliqués au convertisseur commandé.

Qui confirment la sensibilité des pannes de commutateurs multiples du contrôleur. L'analyse du convertisseur sous ces cas défectueux peut mettre en évidence le résultat.

- Défaut Interrupteur Multiples bloqués-fermés (S1 et S2) :

Dans ce cas et à partir du modèle de convertisseur, la dynamique du condensateur les tensions sont données par : $\frac{d\,\mathrm{Vc_1}}{dt} = \mathbf{0}$ **et** $\frac{d\,\mathrm{Vc_2}}{dt} = \frac{U_{3-1}}{C_2} i_L \leq \mathbf{0}.$

Ainsi, la tension du condensateur **Vc1** gardera la dernière valeur juste avant la panne, ce qui correspond à **40V**.

Cependant, le second condensateur présente un comportement décroissant malgré les efforts du contrôleur, ce qui conduit à un état équilibré correspondant à la position de la région défectueuse **(vC1 = 40V, vC2 = 40 V)**

- Défaut Interrupteur Multiples bloqués-fermés (S2 et S3) :

Dans ce cas, la dynamique de la tension du condensateur **Vc2** est $\frac{d\,Vc_2}{dt} = \mathbf{0}$, ce qui signifie que la tension du second condensateur conservera la dernière valeur dans des conditions de fonctionnement normales juste avant la panne **(Vc2 = 80 V)**.

D'autre part, le premier condensateur a la dynamique $\frac{dVc_1}{dt} = \frac{1-U_1}{C_1} i_L \geq 0$.

Ceci justifie le mode de charge du premier condensateur jusqu'à ce qu'il atteigne un état équilibré du système en boucle fermée **(80 V, 80 V).**

- Défaut Interrupteur Multiples bloqués-fermés (S1 et S3):

La dynamique des tensions des condensateurs est :

$\frac{dVc_1}{dt} = \frac{U_{2-1}}{C_1} i_L \leq 0$ et $\frac{dVc_2}{dt} = \frac{1-U_2}{C_2} i_L \geq 0$.

Ceci justifie la valeur décroissante de **Vc1** et la valeur croissante de **Vc2** jusqu'à l'état équilibré **(20 V, 100 V)** du système en boucle fermée.

À partir de la figure 31**,** figure 32et tableau 3 nous pouvons voir que les multiples défauts de commutation dans S_1, S_2 et S_3sont détectés avec succès par l'indicateur **IE** et bien isolé par **Dr.**

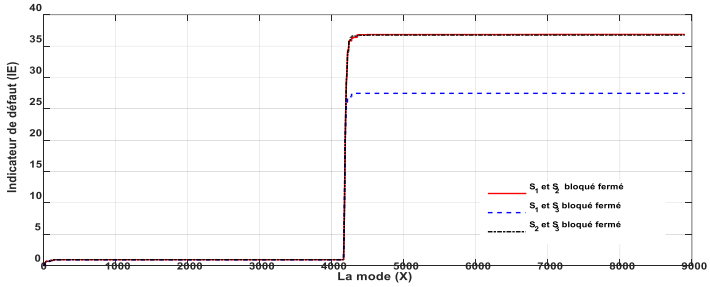


Figure 27Défaut Multiples dans l'interrupteur bloqué-fermé, indicateur de défaut basé sur la distance euclidienne

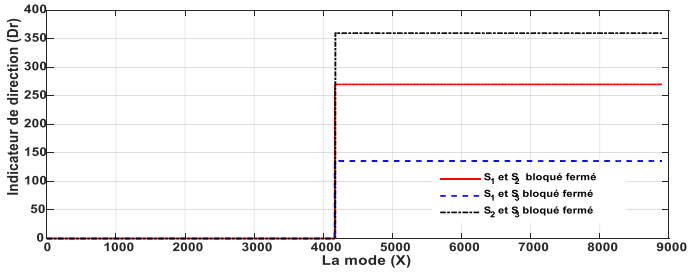


Figure 28Défaut Multiples dans l'interrupteur bloqué-fermé, indicateur de direction de la classe évolutive.

Conclusion :

Ce chapitre a été dédié à l'implémentation de l'approche proposée pour le diagnostic précoce des défauts d'interrupteur du convertisseur de puissance multicellulaire, des résultats de simulation obtenus en utilisant un Benchmark sous Matlab/Simulink a été fournie, l'indicateur de dérives mesurant la différence entre les conditions normales et l'état de fonctionnement en cours est utilisé afin de détecter une dérive (dégradations) à un stade précoce. Lorsqu'une dégradation (défaut) est détectée, l'isolement est réalisé en tenant compte de la direction de l'évolution de la classe dans l'espace de représentation et les Résultats de la détection de défaut dans l'interrupteur du convertisseur de puissance pour les douze scénarios de défaut résumé dans le Tableau 3.

Ces résultats peuvent être utilisées comme critère d'évaluation pour mettre en évidence la contribution de l'approche proposée. Cela permet de réaliser un diagnostic précoce des défauts et aide ainsi les opérateurs humains à effectuer une supervision efficace.

Références

[1] A. SaiSarathiVasan, B. Long, M. Pecht, Diagnostics and Prognostics Method forAnalog Electronic Circuits, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 60 Nov.2013, pp. 5277–5291.

[2] M. Aly, E.M. Ahmed, M. Shoyama, A New Single-Phase Five-Level Inverter Topology for Single and Multiple Switches Fault Tolerance, IEEE Transactions on Power Electronics, 33 Nov. 2018, pp. 9198–9208.

[4] E. Carrol, in Proceedings of the CERN-CAS Accelerator School on Power Converters for Particle Accelerators, Warrington, UK, 12 – 18 May 2004, edited by D. Brandt, CERN-2006-010 (CERN,Geneva, 2006), pp. 43-56, DOI: http://dx.doi.org/10.5170/CERN-2006-010.43.

[5] A. Rufer, in Proceedings of the CERN-CAS Accelerator School on Power Converters for Particle Accelerators, Warrington, UK, 12 – 18 May 2004, edited by D. Brandt, CERN-2006-010 (CERN, Geneva, 2006), pp. 57-102, DOI: http://dx.doi.org/10.5170/CERN-2006-010.57.

[6] P. Viarouge, Passive devices magnetic, these proceedings.

[7]Houari TOUBAKH-Diagnostic adaptatif et prédictif pour lamaintenance prévisionnelle des systèmes dynamiques complexes : application à un système éolien Département Informatique et AutomatiqueEcole des Mines de Douai

[8] Q. Xu, H. Yan, B. Jiang, D. Zhou, and Y. Zhang. Fault tolerant formations control of uavs subject to permanent and intermittent faults. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 73(1-4):589{602, 2014.

[9] A. Chammas. Drift Detection and Characterization for Supervision, Diagnosis and Prognosis of Dynamical Systems. Phd, Lille1 University, 2014.

[13]H-R.HERNANDEZ-D-L, «Supervision et diagnostic des procédés de production d'eau potable» thèse de doctorat de l'institut des sciences appliquées de Toulouse, 2006.

[10] R. Isermann. Fault-diagnosis systems. Springer, address = Germany, 2006. (Cited on page 34.)

[11] M. J. Daigle. A qualitative event-based approach to fault diagnosis of hybrid systems.Phd, Vanderbilt University, 2008.

[12] Y.J. Chain and A.K. Agrawal. Robustness studies of sensor faults and noises for semi-active control strategies using large-scale magnetorheological dampers. Journal of Vibration and Control, page 1077546314535947, 2014.

[14] MAVIER, J. : Convertisseurs génériques a tol´erance de panne Applications pour le domaine aéronautique, PhDthesis, Institut Nationale Polytechnique de Toulouse, 2007.

[15] A. Widodo and B. S. Yang, “Support vector machine in machine condition monitoring and fault diagnosis,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 21, no. 6, pp. 2560–2574, 2007, doi: 10.1016/j.ymssp.2006.12.007.

[16] M. Demetgul, “Fault diagnosis on production systems with support vector machine and decision trees algorithms,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 67, no. 9–12, pp. 2183–2194, 2013, doi: 10.1007/s00170-012-4639-5.

[17] M. Galagedarage Don and F. Khan, “Process fault prognosis using hidden markov model-bayesian networks hybrid model,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 58, no. 27, pp. 12041–12053, 2019, doi: 10.1021/acs.iecr.9b00524.
[18] M. Galagedarage Don and F. Khan, “Dynamic process fault detection and diagnosis based on a combined approach of hidden Markov and Bayesian network model,” *Chem. Eng. Sci.*, vol. 201, pp. 82–96, 2019, doi: 10.1016/j.ces.2019.01.060.
[19] R. Isermann and R. Isermann, “Fault detection with Principal Component Analysis (PCA),” in *Fault-Diagnosis Systems*, Springer, 2006, pp. 267–278.
[20] M. Ahmed, M. Baqqar, F. Gu, and A. D. Ball, “Fault detection and diagnosis using Principal Component Analysis of vibration data from a reciprocating compressor,” in *Proceedings of the 2012 UKACC International Conference on Control, CONTROL 2012*, 2012, pp. 461–466, doi: 10.1109/CONTROL.2012.6334674.
[21] H. N. Koivo, “Artificial neural networks in fault diagnosis and control,” *Control Eng. Pract.*, vol. 2, no. 1, pp. 89–101, 1994, doi: 10.1016/0967-0661(94)90577-0.
[22] H. N. Koivo, “Artificial neural networks in fault diagnosis and control,” in *Control Engineering Practice*, vol. 2, no. 1, Springer, 1994, pp. 89–101.
[33] M. Derbal and H. Toubakh, “Early Fault Diagnosis in Exciting Capacitors of Self-Excited Induction Generator for Wind Energy Applications,” in *Proceedings - International Conference on Communications and Electrical Engineering, ICCEE 2018*, 2019, pp. 1–5, doi: 10.1109/CCEE.2018.8634495.
[34] M. Traore, A. Chammas, and E. Duviella, “Supervision and prognosis architecture based on dynamical classification method for the predictive maintenance of dynamical evolving systems,” Reliab. Eng. Syst. Saf., vol. 136, pp. 120–131, 2015, doi: 10.1016/j.ress.2014.12.005.
[35] A. Widodo and B. S. Yang, “Support vector machine in machine condition monitoring and fault diagnosis,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 21, no. 6, pp. 2560–2574, 2007, doi: 10.1016/j.ymssp.2006.12.007.
[36] M. Demetgul, “Fault diagnosis on production systems with support vector machine and decision trees algorithms,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 67, no. 9–12, pp. 2183–2194, 2013, doi: 10.1007/s00170-012-4639-5.
[37] M. Galagedarage Don and F. Khan, “Process fault prognosis using hidden markov model-bayesian networks hybrid model,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 58, no. 27, pp. 12041–12053, 2019, doi: 10.1021/acs.iecr.9b00524.
[38] M. Galagedarage Don and F. Khan, “Dynamic process fault detection and diagnosis based on a combined approach of hidden Markov and Bayesian network model,” *Chem. Eng. Sci.*, vol. 201, pp. 82–96, 2019, doi: 10.1016/j.ces.2019.01.060.
[39] R. Isermann and R. Isermann, “Fault detection with Principal Component Analysis (PCA),” in *Fault-Diagnosis Systems*, Springer, 2006, pp. 267–278.
[40] M. Ahmed, M. Baqqar, F. Gu, and A. D. Ball, “Fault detection and diagnosis using Principal Component Analysis of vibration data from a reciprocating compressor,” in

Proceedings of the 2012 UKACC International Conference on Control, CONTROL 2012, 2012, pp. 461–466, doi: 10.1109/CONTROL.2012.6334674.
[41] H. N. Koivo, "Artificial neural networks in fault diagnosis and control," *Control Eng. Pract.*, vol. 2, no. 1, pp. 89–101, 1994, doi: 10.1016/0967-0661(94)90577-0.
[42] H. N. Koivo, "Artificial neural networks in fault diagnosis and control," in *Control Engineering Practice*, vol. 2, no. 1, Springer, 1994, pp. 89–101.
[43] G. Vachkov and H. Matsuyama, "Identification of Fuzzy Rule Based System for Fault Diagnosis in Chemical Plants," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 25, no. 4, pp. 79–82, 1992, doi: 10.1016/s1474-6670(17)50220-7.
[44] S. R. Samantaray, "A systematic fuzzy rule based approach for fault classification in transmission lines," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 13, no. 2, pp. 928–938, 2013, doi: 10.1016/j.asoc.2012.09.010.
[45] L. B. Jack and A. K. Nandi, "Fault detection using support vector machines and artificial neural networks, augmented by genetic algorithms," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 16, no. 2–3, pp. 373–390, 2002, doi: 10.1006/mssp.2001.1454.
[46] M. A. Rodríguez, A. Claudio, D. Theilliol, and L. G. Vela, "A new fault detection technique for IGBT based on gate voltage monitoring," in *PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*, 2007, pp. 1001–1005, doi: 10.1109/PESC.2007.4342127.
[47] R. Pagano, Y. Chen, K. Smedley, S. Musumeci, and A. Raciti, "Short circuit analysis and protection of power module IGBTs," in *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, 2005, vol. 2, pp. 777–783, doi: 10.1109/APEC.2005.1453063.
[48] B. Lu and S. K. Sharma, "A literature review of IGBT fault diagnostic and protection methods for power inverters," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 45, no. 5, pp. 1770–1777, 2009, doi: 10.1109/TIA.2009.2027535.
[49] M. Defoort, M. Djemai, T. Floquet, and W. Perruquetti, "Robust finite time observer design for multicellular converters," *Int. J. Syst. Sci.*, vol. 42, no. 11, pp. 1859–1868, 2011, doi: 10.1080/00207721.2010.543494.
[50] K. Benmansour, A. Benalia, M. Djemaï, and J. de Leon, "Hybrid control of a multicellular converter," *Nonlinear Anal. Hybrid Syst.*, vol. 1, no. 1, pp. 16–29, 2007, doi: 10.1016/j.nahs.2006.06.001.
[51] G. Gateau, M. Fadel, P. Maussion, R. Bensaid, and T. A. Meynard, "Multicell converters: Active control and observation of flying-capacitor voltages," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 5, pp. 998–1008, 2002, doi: 10.1109/TIE.2002.803200.
[52] L. Hetel, M. Defoort, and M. Djemai, "Binary Control Design for a Class of Bilinear Systems: Application to a Multilevel Power Converter," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 24, no. 2, pp. 719–726, 2016, doi: 10.1109/TCST.2015.2460696.