# DETECTION ET LOCALISATION DES DEFAUTS DANS LES CONVERTISSEURS STATIQUES

**Nazih MOUBAYED**

*Laboratoire d'Electricité – Centre Universitaire de Technologie Franco-Libanais*
*Deddeh El-Koura, Liban Nord, Liban*
*Tél. : (961) 3 87 99 56 ; Télécopie : (961) 6 40 50 48*
*Email : nmoubayed@ieee.org*

*Résumé* – **Au cours de ces dernières années, l'évolution des études dans le domaine d'électrotechnique permet de présenter des systèmes de plus en plus performants. Dans les secteurs de pointe comme l'aéronautique, le nucléaire ou bien l'équipement militaire, la sécurité, la fiabilité et la rentabilité sont devenues des concepts fondamentaux. Malgré toute cette évolution, nul système n'est à l'abri d'une défaillance. Pour cela, on porte aujourd'hui un grand effort sur la surveillance et le diagnostic des systèmes. Dans cet article, après présentation des concepts et des terminologies, ainsi que de l'organisation générale de la procédure de diagnostic, un rappel des généralités sur la détection et la localisation de défauts à l'aide de modèles est présenté. Une méthode de diagnostic d'un pont redresseur triphasé à thyristors est développée.**

***Mots-clés :*** *Diagnostic, sûreté de fonctionnement, détection de défauts, localisation de défauts.*

## 1. INTRODUCTION

Dans de nombreux secteurs industriels, la sûreté de fonctionnement est un enjeu majeur pour assurer une compétitivité optimale de l'outil de production dans un contexte international très concurrentiel. Considéré très souvent à tort comme le domaine privilégié des secteurs de haute technologie tels que l'industrie nucléaire, les industries spatiales et aéronautiques, la sûreté de fonctionnement concerne aussi bien les grandes entreprises que le monde des petites et moyennes entreprises. La discipline scientifique de la sûreté de fonctionnement, dont l'origine remonte aux années 1950, a suscité l'intérêt de nombreux organismes publics et privés nationaux et internationaux. La sûreté de fonctionnement englobe des notions essentielles telles que la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et la sécurité de n'importe quel système industriel produisant des biens ou des services [1].
Au cours de ces dernières années, l'évolution des études dans le domaine des systèmes industriels permet de présenter des systèmes de plus en plus performants. Malgré toute cette évolution, nul système n'est à l'abri d'une défaillance. Pour cela on porte aujourd'hui un grand effort sur la surveillance et le diagnostic des systèmes industriels. Discipline complexe ou considérée comme un art pour certain, le diagnostic est un des facteurs contribuant à la disponibilité de l'outil de production [2]. Il a pour principe la détection rapide ou précoce d'une défaillance des matériels des systèmes industriels. Le diagnostic réalisé par les opérateurs dans les salles de commande consiste principalement à localiser les matériels défaillants qui sont responsables de la perte des fonctions nécessaires au fonctionnement de leurs installations. Le diagnostic dans ce cas a pour objet de rechercher les défaillances qui sont par nature fortuite et qui devront ultérieurement faire l'objet d'une maintenance corrective. Par contre, le diagnostic réalisé dans le cadre de la maintenance préventive s'intéresse principalement à diagnostiquer l'état de dégradation des matériels pour prévenir une défaillance. Ces raisons expliquent la grande diversité des méthodes de diagnostic industriel. Le problème du diagnostic industriel se ramenant par définition au problème inverse entre les causes et les effets. Une connaissance intime des différents phénomènes régissant les matériels des systèmes industriels est absolument indispensable pour entreprendre le diagnostic d'une défaillance [3].

Cet article porte sur le diagnostic des convertisseurs statiques. Tout d'abord, les concepts et les terminologies sont présentés dans le deuxième paragraphe. L'organisation générale de la procédure de diagnostic est traitée dans le troisième paragraphe. Ensuite, les mesures et les observations sur le processus sont détaillées dans le quatrième paragraphe. Dans le cinquième paragraphe, nous présentons les généralités sur la détection et la localisation de défauts à l'aide de modèles. Dans le sixième paragraphe, une étude développée du diagnostic d'un pont redresseur triphasé à thyristors est traitée. Puis nous terminons l'article par une conclusion.

## 2. CONCEPTS ET TERMINOLOGIE

Les organismes de normalisation nationaux (AFNOR) et internationaux (CEI) ont défini avec précision les vocabulaires à utiliser dans les différents secteurs industriels [3].

### 2.1. Défaillance

Une défaillance est "l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa ou ses fonctions requise(s) avec les performances définies dans les spécifications techniques". L'ensemble est indisponible suite à la défaillance. Un ensemble est défaillant si ses capacités fonctionnelles sont interrompues (panne ou arrêt volontaire par action d'un système interne de protection ou une procédure manuelle équivalente).

### 2.2. Cause de défaillance

La norme définit la cause de défaillance par "les circonstances liées à la conception, la fabrication ou l'emploi et qui ont entraîné la défaillance".

### 2.3. Dégradation

Une dégradation est l'état d'un ensemble qui présente :
- une perte de performances d'une des fonctions assurées par l'ensemble.
- Un sous-ensemble lui-même dégradé, voire défaillant (sans conséquence fonctionnelle sur l'ensemble).

### 2.4. Sûreté de Fonctionnement

La sûreté de fonctionnement est également appelée "Science des défaillances". Cette discipline intervient non seulement au niveau du produit fini (système existant) mais aussi au niveau conceptuel pour la réalisation d'un système ou la connexion de plusieurs sous-systèmes (surtout s'ils sont de natures différentes). La sûreté de fonctionnement consiste à connaître, évaluer, prévoir, mesurer, et maîtriser les défaillances des systèmes.

### 2.5. Disponibilité

"Aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou pendant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires soit assurée".

### 2.6. Fiabilité

"Aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné".

### 2.7. Maintenance

"Toutes les activités destinées à maintenir ou à rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise. Ces activités sont une combinaison d'activités techniques, administratives et de management".

### 2.8. Maintenabilité

"Dans les conditions données d'utilisation, aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie, sur un intervalle de temps donné, dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits".

### 2.9. Sécurité

"Aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître, dans des conditions données des événements critiques ou catastrophiques".

### 2.10. Diagnostic

L'interprétation du mot diagnostic possède de nombreuses significations suivant les interlocuteurs auxquels on s'adresse : le diagnostic financier d'une entreprise concerne la vérification de l'état financier d'une société, le diagnostic médical s'intéressera à déterminer une maladie pour en identifier les causes. Le diagnostic industriel, quant à lui, a pour objet de trouver la cause d'une défaillance. Nous adopterons la définition qui a été retenue par les instances nationales et internationales de normalisation (AFNOR, CEI) : "Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillance(s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test''.

Cette définition très courte et concise résume les deux tâches essentielles en diagnostic :
- observer les symptômes de la défaillance,
- identifier la cause de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur des observations.

Les méthodes de diagnostic se classifient en deux grandes familles : les méthodes internes et les méthodes externes [4]. Les méthodes internes sont celles qui à partir de modèles physiques ou de comportement validés par les techniques d'identification de paramètre, il devient possible de mettre en oeuvre la méthode du problème inverse. Le diagnostic de défaillance est possible en suivant en temps réel l'évolution des paramètres physiques ou bien en utilisant l'inversion de modèles de type "boite noire". Tandis que les méthodes externes supposent qu'aucun modèle n'est disponible pour décrire les relations de cause à effet. La seule connaissance repose sur l'expertise humaine confortée par un solide retour d'expérience. Une autre classification peut être possible en se basant sur le mode de raisonnement utilisée pour remonter à la cause de la défaillance : les méthodes inductives ou déductives.

## 3. ORGANISATION GENERALE DE LA PROCEDURE DE DIAGNOSTIC

La sélection de la méthode de diagnostic la plus appropriée à un système industriel donné ne peut se faire qu'après un recensement des besoins et des connaissances disponibles. Ce paragraphe a pour objectif de structurer la démarche pour retenir la méthode techniquement et économiquement la plus efficace. La procédure de diagnostic de défaillances et de dégradations susceptibles d'affecter les différentes entités d'un processus industriel s'articule autour des étapes suivantes :

- l'extraction des informations nécessaires à la mise en forme des caractéristiques associées aux fonctionnements normaux et anormaux, à partir de moyens de mesures appropriées ou d'observations réalisées lors des rondes par les personnels de surveillance,
- l'élaboration des caractéristiques et signatures associées à des symptômes révélateurs de défaillances et de dégradations en vue de la détection d'un dysfonctionnement,
- la détection d'un dysfonctionnement par comparaison avec des signatures associées à des états de fonctionnements normaux et anormaux et la définition d'indicateurs de confiance dans la détection,
- la mise en oeuvre d'une méthode de diagnostic de la défaillance ou de la dégradation à partir de l'utilisation des connaissances sur les relations de cause à effet,
- la prise de décision en fonction des conséquences futures des défaillances et des dégradations. Cette prise de décision peut conduire à un arrêt de l'installation si les conséquences de la défaillance sont importantes pour la sécurité des personnes et des biens ou à une reconfiguration du fonctionnement du procédé pour éviter une perte de production en attendant le prochain arrêt de production le plus propice aux opérations de maintenance corrective.

## 4. MESURES ET OBSERVATIONS SUR LE PROCESSUS

La caractérisation du fonctionnement d'un processus est une étape indispensable dans la procédure de diagnostic et elle se réalise à l'aide d'informations recueillies sur le processus industriel. Ces informations peuvent provenir de constats effectués par les personnels de maintenance lors de rondes à partir d'informations sensorielles telles que la vue, l'odorat, l'ouïe et le toucher. Pour l'observation de symptômes non décelables directement par les sens physiques, il est indispensable d'installer des capteurs qui fourniront les informations nécessaires aux opérateurs dans la salle de commande ou à des systèmes spécialisés de traitement de l'information.

La mise en oeuvre de capteurs, si elle possède l'avantage de permettre d'accéder à des informations non directement accessibles, présente cependant l'inconvénient de poser des problèmes de crédibilité des informations en cas de défaillance de l'instrumentation dans la mesure où il n'est plus possible dans ce cas de dissocier une panne du capteur d'une panne du procédé.

La fiabilité et la confiance globale d'un système de diagnostic reposent en partie sur l'utilisation d'informations fiables et crédibles, il est indispensable de mettre en oeuvre des méthodes de validation des mesures avant toute utilisation par les opérateurs ou les systèmes de traitement de l'information.

## 5. GENERALITES SUR LA DETECTION ET LOCALISATION DE DEFAUTS A L'AIDE DE MODELES

Le principe de détection de défauts par redondance à l'aide de modèles demande [5,6] :

- de posséder à priori la connaissance du procédé et d'établir son modèle,
- de construire la structure liant le procédé au modèle,
- de faire fonctionner le modèle en même temps que le procédé à surveiller,
- d'effectuer la comparaison du procédé et de son modèle comportemental.

### 5.1. Détection

Les éléments nécessaires à la détection de défauts sur un système réel sont :

- Le modèle de représentation du procédé réel,
- La fonction de comparaison du procédé réel par rapport à son modèle,
- La fonction de détection de défaut qui analyse les quantités de comparaison fournies précédemment.

Le schéma fonctionnel général de la détection de défauts avec utilisation de modèles est alors donné sur la figure 1.

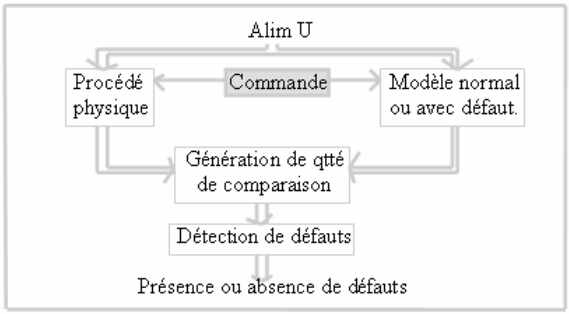


Figure 1 : Disposition des éléments nécessaires à la détection de défauts.

### 5.2. Localisation

Il est plus difficile de dégager une méthode systématique pour la fonction de localisation de défauts, chaque cas particulier est à prendre en considération. Néanmoins les méthodes courantes pour accéder à la localisation du défaut sont :
- L'analyse des conditions d'apparition du défaut,
- L'utilisation d'un modèle comportant le défaut supposé à la place d'un modèle de comportement normal,
- Des essais de fonctionnement du système après l'apparition du défaut si cela reste possible (fonctionnement en mode test).

## 6. DIAGNOSTIC D'UN PONT REDRESSEUR TRIPHASE A THYRISTORS

### 6.1. Description du système

Le système que nous allons étudier est un pont redresseur triphasé à thyristors débitant sur une charge résistive (Figure 2). Les données du système sont :
- Tension composée à l'entrée égale à 220 V,
- Charge admettant une valeur de 100 Ω.

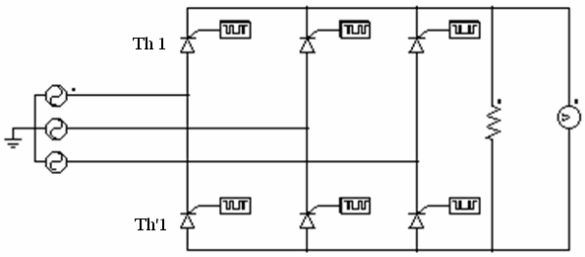


Figure 2 : Redresseur triphasé à thyristors.

Pour ce convertisseur statique, deux types de défauts sont pris en considération :
- Court circuit d'un thyristor,
- Blocage d'un thyristor.

### 6.2. Méthode de diagnostic utilisée

La solution proposée devra détecter la présence d'un défaut, localiser le thyristor en panne et trouver la nature de la défaillance (court-circuit ou blocage). Le principe général de la détection consiste à utiliser la redondance entre le système réel à surveiller et son modèle. Le fonctionnement du processus et de son modèle devra être synchrone. Le schéma descriptif peut être représenté sur la figure 3. Le vecteur d'entrée contient la puissance d'alimentation et la commande du système réel et de son modèle. Les vecteurs de sortie du système ou du modèle devront regrouper toutes les grandeurs nécessaires à la détection et la localisation des défauts. Le vecteur résidu n'est autre que la différence entre les grandeurs correspondantes du système réel et de son modèle.

Le problème revient à chercher les grandeurs ou les paramètres les plus significatives tout en utilisant un nombre optimal (minimal) de capteurs.

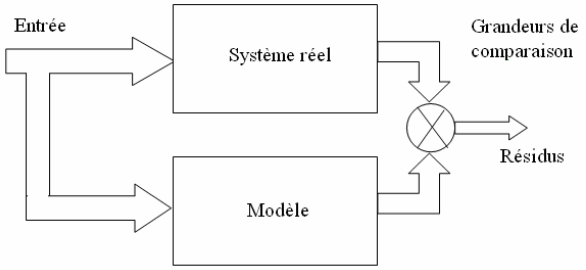


Figure 3 : Diagnostic par redondance.

### 6.3. Les grandeurs de mesures proposées

L'approche adoptée consiste, en première étape, à comparer les valeurs instantanées des courants traversant les trois phases du système réel avec celles du modèle fonctionnant sous le même réseau d'alimentation, à une échelle donnée, les mêmes angles d'amorçage des thyristors. Trois capteurs de courant seront alors nécessaires pour cette méthode de détection. Le schéma du circuit de diagnostic est représenté sur la figure 4.

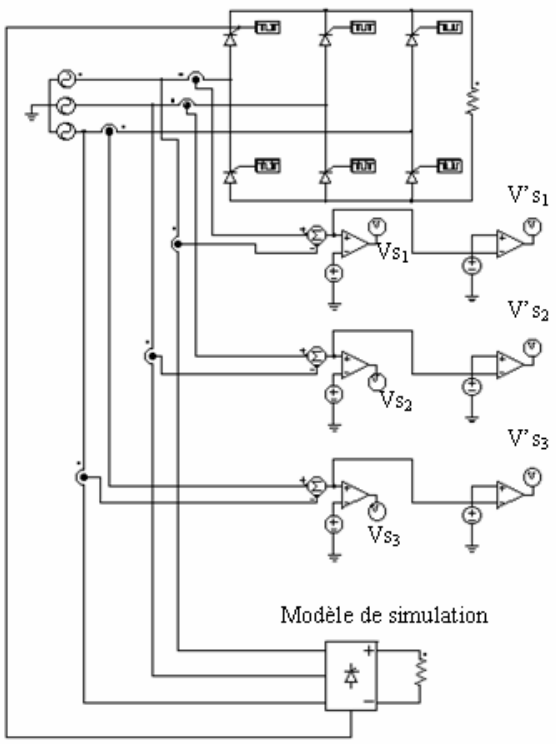


Figure 4 : Circuit de détection d'un défaut.

### 6.4. Résultats et interprétation

Pour chaque phase, la différence entre le courant réel et celui estimé par le modèle subira deux étapes de comparaison. Pour cela, chaque paire de comparateurs s'occupe de la détection d'un défaut dans une branche (ou phase) du redresseur. Les deux sorties de ces deux comparateurs, $V_{s\ i}$ et $V'_{s\ i}$ (i = 1, 2 ou 3), sont nécessaires pour localiser le thyristor défectueux dans une branche (partie haute ou basse). Les seuils correspondants sont inversés (-0,5 V pour la partie haute et +0,5 V pour la partie basse).

#### 6.4.1. Cas d'un fonctionnement normal

Lors d'un fonctionnement normal, les tensions délivrées par les capteurs de courant sont identiques dans les deux systèmes (réel et modèle). Par conséquent, les sorties des fonctions de comparaison sont toutes nulles. La tension, à la sortie du capteur de courant de la première phase, et pour un angle d'amorçage égal à 30 degrés, aura la forme suivante :

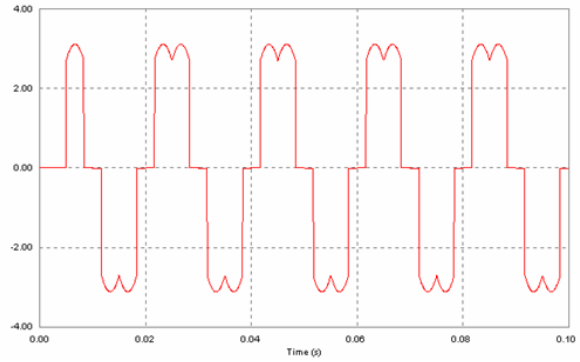


Figure 5 : Courant dans la première phase.

#### 6.4.2. Cas d'un blocage d'un thyristor

Considérons le défaut de blocage aux bornes d'un thyristor $Th_1$ de la première phase. Dans ce cas, les formes d'ondes des tensions, images des courants délivrés par les capteurs de la première et la deuxième phase du système réel, sont représentées sur la figure suivante :

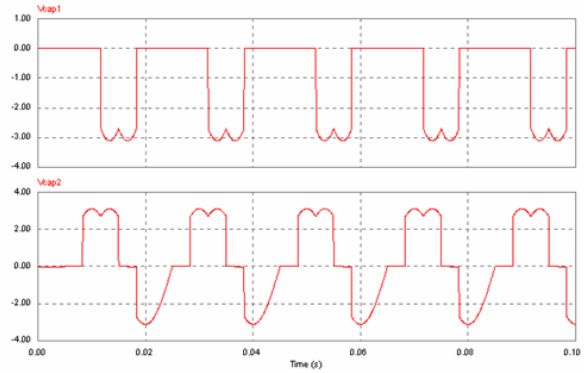


Figure 6 : Courants dans la 1$^{ère}$ et la 2$^{ème}$ phase.

Nous signalons qu'au cours de notre analyse, nous prenons en considération les grandeurs relatives à la phase présentant le défaut et celles d'une phase des deux restantes. La troisième étant identique à cette dernière avec un décalage de 120 degrés.

Les tensions de sortie des deux comparateurs utilisés dans la première et la deuxième phase prennent les formes suivantes :

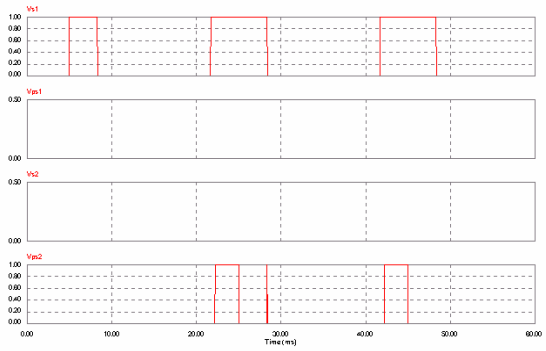


Figure 7 : Tensions à la sortie des comparateurs.

Ces résultats montrent que la sortie du comparateur $Vs_1$ est un signal carré dont la largeur des impulsions est le double de celle des sorties $V's_2$ et $V's_3$. En appliquant à chacun de ces signaux un filtrage passe bas, la valeur moyenne de la tension $Vs_1$ est la double de celle des tensions obtenues pour $V's_2$ et $V's_3$ (figure 8).

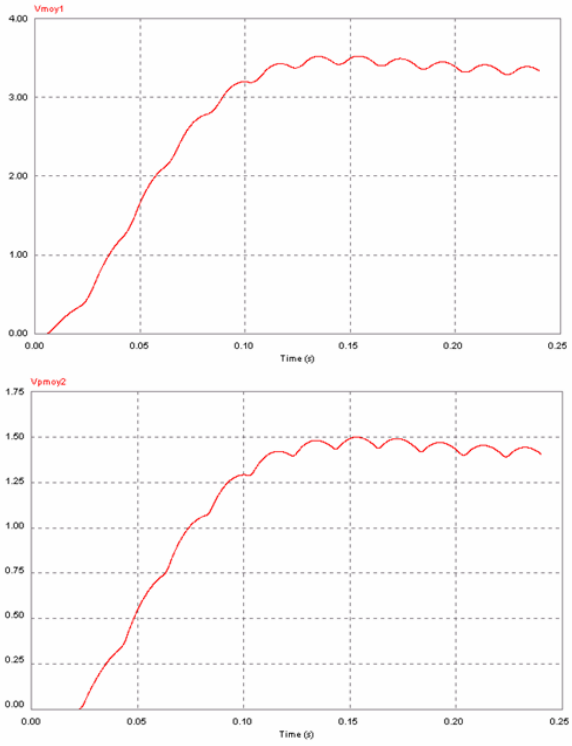


Figure 8 : Tensions moyenne de $Vs_1$ et $V's_2$.

Par comparaison avec un seuil précis et de valeur comprise entre les deux niveaux obtenus ci-dessus (les deux valeurs moyennes), le thyristor défectueux sera localisé par simple application des tensions des sorties des nouveaux comparateurs à des LED (figure 9). Il suffit donc de prendre un seuil égal à 2,5 V.

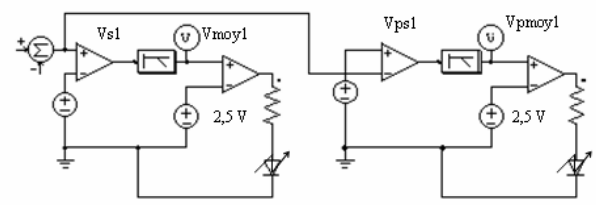


Figure 9 : Dispositif de détection et de localisation du blocage d'un thyristor.

### 6.4.3. Cas d'un court circuit aux bornes d'un thyristor

Considérons maintenant le défaut de court-circuit aux bornes du thyristor $Th_1$ de la première phase. Dans ce cas, les formes d'ondes des tensions $Vs_1$, $V's_1$, $Vs_2$ et $V's_2$, sorties des comparateurs, sont représentées sur la figure suivante :

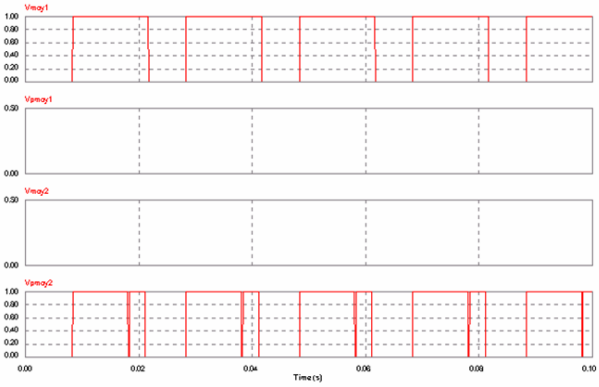


Figure 10 : Tensions à la sortie des comparateurs.

Les valeurs moyennes des tensions Vmoy1 et V'moy2, après filtrage, prennent les formes d'ondes suivantes :

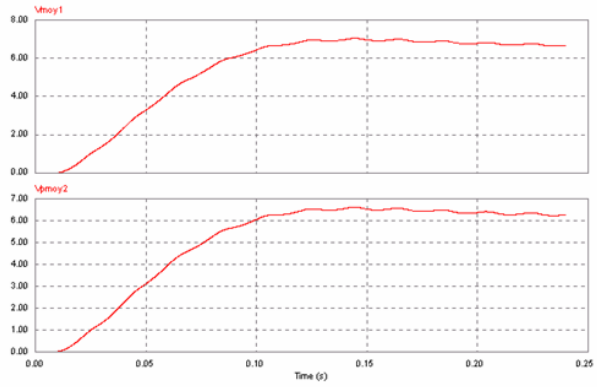


Figure 11 : Tensions moyennes $Vmoy_1$ et $V'moy_2$.

Pour ce type de défauts, les tensions des sorties ont des valeurs voisines. Ces valeurs sont nettement supérieures à celles obtenues dans le cas d'un défaut de blocage (moins que 4 V). Un seuil de 6 V permet de différencier les deux types de défaut. En plus, un court circuit aux bornes de $Th_1$ sera traduit alors par allumage de la diode relative à la sortie $Vs_1$ et des deux diodes relatives aux sorties $V's_2$ et $V's_3$. Le même raisonnement permet de détecter un court circuit aux bornes des autres thyristors.

## 7. CONCLUSION

Les techniques de diagnostic sont multiples et les domaines d'application sont très étendus. De nombreuses études ont déjà abouti à des solutions mais le diagnostic rapide et précis de tout système employant des convertisseurs statiques reste un des problèmes actuels. Nous avons présenté dans cet article les problèmes et la méthode nécessaire pour la surveillance et le diagnostic des convertisseurs statiques par redondance à l'aide de modèle.

La méthode de diagnostic développée dans cet article est appliquée sur un redresseur triphasé où un seul thyristor serait concerné par le défaut. Cette méthode permet la détection de défauts tout en utilisant trois capteurs de courant. Une telle méthode exige la présence d'autres composants comme des comparateurs et des filtres pour assurer la localisation de ces défauts. En plus, cette méthode nécessite plus d'études pour signaler la détection et la localisation des défauts dans le cas où plusieurs thyristors seront défectueux.

## Références


[1] B. Dubuisson, *Diagnostic et reconnaissance des formes*, Editions Hermès, Paris, 1990.

[2] G. C. Loveday, *Contrôles et diagnostics en électronique*, Editions Eyrolles, Paris, 1995.

[3] G. Zwingelstein, *Diagnostic des défaillances*, Editions Hermès, Paris, 1995.

[4] L. Negrello, *Systèmes experts et intelligence artificielle*, Cahier technique 157 (schneider), pp. 24, novembre 1991.

[5] G. Champenois, G.Rostaing, J.D. Gabano et J.P. Rognon, *Les méthodes de diagnostic appliquées à l'électrotechnique et l'électronique de puissance*, Journée régionale de sensibilisation, Le Havre, 12 octobre 1995, pp. 127-133.

[6] P.Calonnec, T.Derrey et E.Destobbeleer, *Détermination des causes de défaillances d'un ensemble convertisseur-machine par analyse fonctionnelle : Application à la machine asynchrone*, Journée régionale de sensibilisation, Le Havre, 12 octobre 1995, pp. 134-139.