« Procédé et système pour diagnostiquer en temps réel l'état de fonctionnement d'un système électrochimique, et système électrochimique intégrant ce système de diagnostic »

Domaine technique

La présente invention concerne un procédé pour diagnostiquer en temps réel l'état de fonctionnement d'un système électrochimique. Elle vise également un système de diagnostic mettant en œuvre ce procédé, ainsi qu'un système électrochimique, notamment une pile à combustible, intégrant ce système de diagnostic.

Etat de la technique antérieure

Les piles à combustible actuelles, qu'elles soient embarquées ou stationnaires, doivent faire l'objet d'une surveillance de leur état, afin notamment de prévenir une défaillance ou une dégradation de leur fonctionnement.

Il existe déjà des procédés de détection de défauts dans une pile à combustible, qui ne peuvent être mis en œuvre que hors fonctionnement de cette pile et dans un contexte de laboratoire. Ces méthodes mettent parfois en œuvre des capteurs intrusifs.

Par ailleurs, pour des piles à combustible à forte valeur ajoutée, utilisées par exemple en milieu nécessitant un fonctionnement certain à tout moment, tel qu'en milieu hospitalier par exemple, des méthodes de détection impliquant une mise hors fonctionnement temporaire ne sont pas envisageables.

Le document EP 2778700 A2 divulgue un équipement pour prédire l'état d'un pack batterie, utilisant des transformations d'ondelette discrètes.

Le document "Non intrusive diagnosis of polymer electrolyte fuel cells by wavelet packet transform » de Nadia Yousfi Steiner et al., paru dans International Journal of Hydrogen Energy, *Elsevier Science Publishers B.V., Barking,GB, vol.36, No1, 11 octobre 2010, pages 740-746*, divulgue un procédé de diagnostic de cellules de piles à combustibles polymères, mettant en oeuvre des mesures de tension de piles, et une transformation en paquet d'ondelette.

Le but de la présente invention est de proposer un nouveau procédé de détection de défauts dans un système électrochimique, notamment une pile à combustible, qui permette de connaître l'état de ce système en fonctionnement et sans capteur intrusif et/ou complexe ou coûteux, avec des performances supérieures, en termes de qualité et de fiabilité des détections des défauts, à celles habituellement observées sur les procédés actuels de diagnostic.

Exposé de l'invention

Cet objectif est atteint avec un procédé pour diagnostiquer en temps réel l'état de fonctionnement d'un système électrochimique comprenant un empilement de cellules, ce procédé comprenant des étapes pour réaliser des mesures de tension desdites cellules, caractérisé en ce qu'il comprend en outre :

- un traitement des mesures de tension ainsi réalisées en temps réel pour en extraire des formes d'onde spécifiques,
- une transformation desdites formes d'onde spécifiques pour en générer des points spécifiques du fonctionnement temps-réel dudit système électrochimique, et
- une comparaison desdits points spécifiques du fonctionnement temps-réel et de points spécifiques d'un fonctionnement hors-ligne dudit système électrochimique qui sont issus d'une transformation de formes d'onde spécifiques extraites de mesures de tension effectuées hors ligne alors que ledit système électrochimique est placé dans des états de fonctionnement connus incluant des états de défaut, de façon à produire des informations sur l'état de fonctionnement temps-réel dudit système électrochimique.

Les étapes de mesure de tension de cellule peuvent être effectuées périodiquement.

Dans un mode de réalisation préféré de l'invention, les formes d'onde spécifiques extraites des mesures de tension effectuées hors-ligne et/ou en temps réel sont soumises à une transformation mathématique - appelée « Shapelet Transform » - pour créer des points spécifiques à partir de formes d'onde spécifiques.

Ces points spécifiques peuvent être identifiés dans un espace bidimensionnel (2D) puis classés dans un espace tridimensionnel (3D).

Dans un premier mode particulier de réalisation du procédé selon l'invention, des points spécifiques sont classés au moyen d'une fonction de type SSM-SVM (pour « Sphere Shaped Multi-Class – Support Vector Machine »).

Dans un second mode particulier de réalisation du procédé selon l'invention, des points spécifiques sont classés au moyen d'une fonction de type kNN (pour « K Nearest Neighbor »).

Dans un troisième mode particulier de réalisation du procédé selon l'invention, des points spécifiques sont classés au moyen d'une fonction de type GMM (pour « Gaussian Mixture Model »).

Le procédé de diagnostic selon l'invention peut en outre avantageusement comprendre une constitution initiale d'une base de données par apprentissage sur des états de fonctionnement connus du système électrochimique, qui sont testés hors ligne.

Lorsque le procédé selon l'invention est mis en œuvre pour diagnostiquer l'état de fonctionnement d'une pile à combustible, les états de fonctionnement connus qui sont testés hors ligne comprennent tout ou partie des états suivants : Fonctionnement normal, Pression basse hydrogène, Stœchiométrie basse du côté air, Asséchement, Noyage.

Suivant un autre aspect de l'invention, il est proposé un système pour diagnostiquer l'état de fonctionnement en temps réel d'un système électrochimique comprenant un empilement de cellules, mettant en œuvre le procédé de diagnostic selon l'invention, ce système de diagnostic comprenant des moyens pour mesurer les tensions aux bornes desdites cellules, caractérisé en ce qu'il comprend en outre :

- des moyens pour traiter les tensions ainsi mesurées pour en extraire des formes d'onde spécifiques, des moyens pour transformer lesdites fonctions d'onde spécifiques pour en générer des points spécifiques du fonctionnement temps-réel dudit système électrochimique, et
- des moyens pour comparer lesdits points spécifiques du fonctionnement temps-réel et des points spécifiques d'un fonctionnement hors-ligne dudit système électrochimique qui sont issus d'une transformation de formes d'onde spécifiques extraites de mesures de tension effectuées

hors ligne - alors que ledit système électrochimique est placé dans des états de fonctionnement connus incluant des états de défaut, de façon à produire des informations de diagnostic de l'état de fonctionnement temps-réel dudit système électrochimique.

Le système de diagnostic selon l'invention peut en outre avantageusement comprendre des moyens pour transformer les formes d'onde spécifiques extraites des mesures de tension effectuées hors-ligne et/ou en temps réel, de façon à créer des points spécifiques.

Ce système de diagnostic peut en outre comprendre des moyens pour identifier les points spécifiques dans un espace bidimensionnel (2D) et des moyens pour classer lesdits points spécifiques ainsi identifiés dans un espace tridimensionnel (3D), ainsi qu'une base de données par apprentissage sur des états de fonctionnement connus du système électrochimique.

Suivant encore un autre aspect de l'invention, il est proposé un système électrochimique intégrant un système de diagnostic selon l'invention. Ce système électrochimique peut notamment comporter une pile à combustible.

Description des figures

D'autres avantages et particularités de l'invention apparaîtront à la lecture de la description détaillée de mises en œuvre et de modes de réalisation nullement limitatifs, et des dessins annexés suivants :

- la figure 1 illustre schématiquement le principe de mesure de tension mis en œuvre dans le procédé de détection de défauts selon l'invention ;
- la figure 2 illustre schématiquement une mise en œuvre d'un microcontrôleur pour des mesures analogiques ;
- la figure 3 représente un dispositif de mesure de tension mis en œuvre dans un exemple de réalisation d'un système de détection de défauts selon l'invention ;
- la figure 4 représente des formes d'onde spécifiques (ou « shapelets ») produits dans le procédé de détection de diagnostic selon l'invention ;
- la figure 5 illustre une classification des formes d'onde spécifiques avec la méthode SSM-SVM ; et
- la figure 6 illustre schématiquement un exemple de réalisation du procédé de diagnostic selon l'invention.

Modes de réalisation détaillés

Ces modes de réalisation étant nullement limitatifs, on pourra notamment considérer des variantes de l'invention ne comprenant qu'une sélection de caractéristiques décrites ou illustrées par la suite isolées des autres caractéristiques décrites ou illustrées (même si cette sélection est isolée au sein d'une phase comprenant ces autres caractéristiques), si cette sélection de caractéristiques est suffisante pour conférer un avantage technique ou pour différencier l'invention par rapport à l'état de la technique antérieure. Cette sélection comprend au moins une caractéristique de préférence fonctionnelle sans détails structurels, et/ou avec seulement une partie des détails structurels si cette partie uniquement est suffisante pour conférer un avantage technique ou à différencier l'invention par rapport à l'état de la technique antérieure.

On va tout d'abord décrire, en référence à la figure 1, un dispositif 10 de mesure des tensions aux bornes des différentes cellules d'un système électrochimique 1 tel qu'une batterie, un supercondensateur ou une pile à combustible.

Les différentes tensions Vcell 1,.., k+1 sont mesurées puis traitées par des composants programmables de type DSP (pour « Digital Signal Processor ») ou microcontrôleur 20, 70 et les données sont transmises par un bus de communication CAN 6.

Le dispositif de mesure 10 se présente sous forme modulaire. Chaque module 2, 7 isolé électriquement est chargé de mesurer les tensions Vcell_1,Vcell_2,Vcell_3 ; Vcell_k,Vcell_k+1 d'un nombre de cellules en respectant l'ordre défini par la connexion en série de celles-ci. Il est donc possible de connecter autant de modules 2, 7 que nécessaire pour répondre aux besoins de l'utilisateur, la limite étant fixée par le niveau d'isolation en tension des composants électroniques (environ 1000V dans le cas le plus critique).

Chaque module de mesure 2, 7 comporte un circuit électronique basé autour d'un microcontrôleur 20, 70, son potentiel de référence (masse) correspondant au potentiel le plus faible du paquet d'éléments (Vréf_1, Vréf_2). Ces modules 2, 7 sont alimentés par l'intermédiaire d'un convertisseur DC/DC isolé 3, 8 connecté sur l'alimentation générale du dispositif 10. Les différentes données issues des mesures sont transmises par

l'intermédiaire d'un bus de communication. Pour cela, des drivers CAN isolés 5, 9 permettent des liaisons entre les microcontrôleurs 20, 70 et le bus CAN 6 du dispositif de mesure 10.

Les module de mesure 2, 7 sont dupliqués autant de fois que nécessaire pour mesurer les différentes tensions aux bornes de tous les éléments du système électrochimique 1 étudié.

En référence à la figure 2, le potentiel de référence des mesures analogiques du microcontrôleur 30 est connecté à la tension la plus faible de l'ensemble des éléments concernés n, n+1, n+2. Les différentes mesures de tension Vn, Vn+1, Vn+2 sont connectées aux entrées analogiques AN_1, AN_2, AN_3 du microcontrôleur 30 en respectant l'ordre établi par les potentiels : du plus faible au plus fort. La tension aux bornes d'un élément est alors déterminée par la différence de deux tensions consécutives mesurées.

En fonction des niveaux de tension mesurés, les entrées analogiques du microcontrôleur 30 peuvent être connectées directement sur les éléments à mesurer. Pour des tensions plus élevées, un circuit d'adaptation permet d'ajuster la tension dans une plage compatible avec celle du microcontrôleur.

En fonction du microcontrôleur ou du circuit DSP utilisé, le nombre de voies analogiques est variable et limite ainsi le nombre de tensions mesurées sur un sous-ensemble de cellules. Les mesures analogiques peuvent être effectuées de manière simultanée (mesures synchrones) ou séquentielle (mesures asynchrones).

Dans l'exemple de réalisation illustré par la figure 3, le dispositif de mesure 100 est utilisé pour la mesure des tensions des cellules d'une pile à combustible 30. En pratique, la tension des cellules peut atteindre environ 1.43V lors de leur activation, mais la plage de mesure utile est comprise entre 0 et 1V.

Le dispositif de mesure 100 comprend un microcontrôleur 50 comportant 11 entrées analogiques et un seul convertisseur analogique/numérique intégré. On utilise alors le principe de mesures séquentielles pour les différentes voies analogiques. La durée globale de conversion pour les 11 voies reste inférieure à 2ms (150µs par voie, soit 1,6 ms).

Les différentes tensions des cellules de la pile à combustible 40 sont connectées sur les entrées analogiques, de manière directe pour les quatre

premières voies (tensions inférieures à 4V) et par l'intermédiaire d'un circuit d'adaptation pour les voies AN_4 à AN_10.

L'alimentation du dispositif de mesure 100 est réalisée à partir d'une source de tension de 5V continue (+5v_1). Un convertisseur DC/DC 51 permet d'obtenir une tension de 5V (+5V_2) isolée pour l'alimentation de l'ensemble de l'électronique. Le circuit utilisé assure une tension d'isolement de 1000V. L'ensemble du dispositif de mesure 100 se trouve ainsi isolé avec un potentiel de référence Vref_1.

Pour assurer cet isolement, les communications entre le microcontrôleur 50 et le reste du système sont effectuées par un bus CAN 52 également isolé. Un circuit driver CAN 53 isole le microcontrôleur 50 en assurant une tension d'isolement de 2500V.

On va maintenant décrire, en référence aux figures 4 à 6, des étapes de traitement qui sont implémentées dans le procédé de diagnostic selon l'invention.

Le procédé de diagnostic selon l'invention est construit autour d'un apprentissage basé sur des données mesurées et connues. Il est ici mis en œuvre dans le but de détecter des défauts d'un système de pile à combustible (PAC) de type PEMFC (pour « Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell »). Il est entendu que le procédé de diagnostic selon l'invention peut être mis en œuvre sans limitation dans d'autres types de piles à combustible.

Ce procédé de diagnostic met en œuvre un dispositif de mesure de tension individuelle des cellules unitaires de la PAC tel que décrit précédemment. Afin de tenir compte de la dynamique du système et de l'hétérogénéité spatiale des différentes cellules qui le composent, le procédé de diagnostic selon l'invention fait appel à un outil d'analyse de série temporelle, appelé dans la suite « Shapelet transform », qui réalise une caractérisation de formes d'onde spécifiques extraites des mesures de tension aux bornes des cellules du système électrochimique.

En référence à la figure 6, dans une forme particulière de réalisation du procédé de diagnostic selon l'invention, celui-ci comprend un processus 6A de traitement en temps réel de mesures de tension effectuées sur les cellules de la pile, et un processus 6B de traitement hors ligne de mesures de tension effectuées sur les mêmes cellules mais dans des états de fonctionnement connus incluant des états de dysfonctionnement.

L'outil d'analyse temporelle est utilisé pour extraire des formes d'onde spécifiques ou « shapelets » 40 (Figure 4) issues des données d'une base de données 61 (Figure 6) servant au diagnostic en temps-réel. L'outil d'analyse temporelle est utilisé dans une fenêtre 41 dont la durée est connue et définie préalablement en fonction des défauts considérés. Dans un second temps, un outil de classification SSM-SVM est appliqué dans l'espace dimensionnel considéré (fonction du nombre de défauts).

Les tensions des cellules du système de pile à combustible sont par nature non homogènes de par leurs états physiques au sein d'une pile (ou « stack »), tels que la température, la distribution des gaz, le taux d'humidité relative, la distribution du catalyseur sur la couche d'activation, et on doit considérer la corrélation temporelle entre les échantillons mesurés. Les tensions de cellules échantillonnées dans un intervalle de temps (fenêtre 41) sont considérées comme des variables pour le procédé de diagnostic selon l'invention.

Cette fenêtre d'acquisition est définie mathématiquement comme suit :

$$T = [T(1), \dots, T(l_W)] = [v_1, \dots, v_{l_W}] \qquad (1)$$

où v_i est le vecteur échantillonné à l'index i et composé de l'ensemble des tensions d'un nombre n_{cell} de cellules.

Ce vecteur $v_i = [v_i(1), v_i(2), \dots, v_i(n_{cell})]$. l_w est la largeur de la fenêtre d'acquisition.

Chaque observation T est une série chronologique dynamique qui peut être représentée mathématiquement sous la forme d'une matrice, dont la dimension esr définie d'une part par le nombre de cellules et d'autre part par la durée de l'observation l_W et dont le nombre de points est défini par la période d'échantillonnage (ou fréquence d'acquisition) du dispositif de mesure.

Dans le processus hors-ligne 6B, une base de données d'apprentissage 71 est constituée à partir de N mesures hors-ligne obtenues au moyen du dispositif de mesure décrit précédemment. Elle est répertoriée par classes notées $\Omega 0, \Omega 1, \Omega 2, \dots, \Omega C$ qui correspondent aux différents défauts. La classe d'indice 0 est définie comme l'état de fonctionnement normal (sans défauts).

L'espace des classes sur l'ensemble des observations T_i est connu au préalable, soit $g_i \in \{0,1, \dots, C\}$. Les nombres d'observations 78 qui

constituent la base de donnée 71 dans l'ensemble de ces classes sont respectivement N_0, N_1, ...,N_C et satisfont l'équation $N_0 + N_1 + \cdots + N_C = N$.

On va maintenant plus particulièrement décrire la génération de formes d'onde spécifiques (« Shapelets ») dans les deux processus temps-réel 6A et hors-ligne 6B.

Pour identifier une forme d'onde spécifique, il est nécessaire de produire une quantité de signaux éligibles que l'on appelle candidats et qui sont généré dans le vecteur SC_{ji}.

En faisant l'hypothèse que la forme d'onde spécifique est d'une durée l_S, les candidats sont sélectionnés en tenant compte de la durée d'observation l_W. Par exemple, on considère des candidats jusqu'à $l_W - l_S + 1$ pour une observation T_i suivant la formule ci-après :

$$SC_{ji} = \{T_i(j), T_i(j+1), \ldots, T_i(j + l_S - 1)\}, \qquad j = 1, \ldots, l_W - l_S + 1 \quad (2)$$

où SC_{ji} représente le jiéme candidat de la matrice T_i. Comme SC_{ji} est issu de T_i, l'espace dans lequel il se situe est également g_i. Le nombre de candidats générés à partir de la base d'apprentissage 71 est donc $(l_W - l_S + 1)N$.

Dans ce procédé, les durées ls et lw sont définies préalablement pour chaque classe. Cette définition est faite de manière empirique lors de la constitution de la base de données d'apprentissage.

Pour pouvoir classifier et caractériser les candidats, trois opérations sont nécessaires. La première consiste à calculer la distance entre un candidat SCij et l'observation Tk, qui est égale à la valeur minimum entre le candidat SCij et l'ensemble de candidats générés par cette observation Tk comme suit :

$$dis(SC_{i,j}, T_k) = \min_{l \in (1, \ldots l_W - l_S + 1,)} \|SC_{i,j} - SC_{k,l}\| \quad (3)$$

Pour chaque candidat cette distance est calculée, puis la distance moyenne de cette même classe est également définie.

$$\overline{dis}(SC_{i,j}) = \frac{\sum_{gk=gi} dis(SC_{i,j}, T_k)}{N_i} \quad (4)$$

Grâce aux deux valeurs précédentes, on calcule le facteur de qualité de chaque candidat d'une même classe suivante la formule de discrimination quadratique suivante :

$$Qual(SC_{i,j}) = \frac{\sum_{gk \neq gi} dis(SC_{i,j}, T_k)^2}{\sum_{gk=gi} \left(dis(SC_{i,j}, T_k) - \overline{dis}(SC_{i,j})\right)^2} \quad (5)$$

Lorsque tous les candidats de chaque classe ont été évalués, ils sont classés par ordre décroissant suivant leurs facteurs de qualité. Dans le cas où deux formes d'onde spécifiques candidats de même la base d'observation obtiennent des indices redondants, c'est alors celui qui présente le facteur de qualité le plus élevé qui est conservé. Dans les candidats restants, ce sont ceux qui ont le meilleur facteur de qualité qui sont sélectionnés.

La procédure d'extraction des formes d'onde spécifiques qui vient d'être décrite peut aisément être mise en œuvre sous la forme d'un algorithme avec des techniques logicielles connues. On peut ainsi générer des formes d'onde spécifiques 74 dans le processus hors-ligne 6B et des formes d'onde spécifiques 40 dans le processus temps-réel 6A.

On va maintenant plus particulièrement décrire un exemple d'extraction des formes d'onde spécifiques lors d'un diagnostic temps réel. Pour une fenêtre de diagnostic T (Figure 4) prise arbitrairement, les caractéristiques des formes d'onde spécifiques de cette base arbitraire issue de mesures en temps réel 64 (voir figure 6) sont déterminées en exécutant le calcul de distance avec ceux issus de la base d'apprentissage 71 et sélectionnés comme pertinents.

Ce calcul permet également de connaître la dimension du domaine de caractérisation qui servira à l'initialisation de l'outil 63 de classification SSM-SVM en référence à la figure 6.

On va maintenant décrire un exemple de mise en œuvre de cet outil de classification SSM-SVM dans le procédé de diagnostic selon l'invention.

Pour solutionner le problème de classification non linéaire issue des données d'apprentissage (notamment dû au fait que l'on considère plus de deux classes), la méthode utilisée ci-après est connue sous le nom « kernel trick ».

Dans un premier temps, on réalise une projection des vecteurs dans un espace multidimensionnel via la fonction Φ .

Les vecteurs sont définis comme suit : $z_n(n \in T)$

Par exemple, pour une classe i, la sphère est calculée comme suit :

$$\begin{cases} \|\Phi(z_n) - a_i\|^2 \leq R_i^2 + \xi_n^i & \text{if } z_n \in \Omega_i \\ \|\Phi(z_n) - a_i\|^2 \geq R_i^2 - \xi_n^i & \text{if } z_n \notin \Omega_i \end{cases} \quad (6)$$

Où R_i et a_i sont respectivement le rayon et le centre du cercle de la sphère i.

La fonction Φ utilisée ici est le noyau Gaussien, soit :

$$k(z_m, z_n) = exp\left(-\frac{\|z_m - z_n\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (7)$$

La classification SSM-SVM revient donc à solutionner le problème d'optimisation suivant :

$$\min_{R_i, a_i} \left(R_i^2 + D\sum_{n\in\mathcal{T}} \xi_n^i\right)$$
$$\text{s.t.} \begin{cases} c_n^i \left(\|\Phi(z_n) - a_i\|^2 - R_i^2\right) - \xi_n^i \leq 0 \\ \xi_n^i \geq 0 \end{cases} \quad \text{for } n \in \mathcal{T} \quad (8)$$

Pour un indice i donné, on minimise la somme du carré du rayon Ri et de la somme des variables d'ajustement multipliée par un paramètre D de réglage permettant le bon ajustement lors de la phase d'apprentissage, avec les contraintes suivantes :

- la distance absolue au carré entre la fonction appliquée au vecteur support zn et le centre de la sphère moins le rayon au carré moins la variable d'ajustement doivent être inférieurs ou égales à zéro
- les variables d'ajustements sont supérieures ou égales à zéro.

En considérant $c_n^i = 1$ si $z_n \in \Omega_i$; $c_n^i = -1$ si $z_n \notin \Omega_i$

La solution de l'équation d'optimisation (8) est donnée par :

$$L = \sum_i R_i^2 + D\sum_{n,i} \xi_n^{in} - \sum_{n,i} \beta_n^i \xi_n^i + \sum_{n,i} \alpha_n^i \left(c_n^i(\|\phi(z_n) - a_i\|^2 - R_i^2) - \xi_i^n\right) \quad (9)$$

Dans l'équation (9), on retrouve les deux multiplicateurs non-négatifs de Lagrange, α_n^i et β_n^i. Ils sont associés aux contraintes décrites en (8). Pour résoudre le problème d'optimisation, il faut donc trouver le l'extremum de L.

$$\frac{\partial L}{\partial R_i} = 0 \rightarrow \sum_n \alpha_n^i c_n^i = 1 \quad (10)$$

$$\frac{\partial L}{\partial a_i} = 0 \rightarrow a_i = \sum_n \alpha_n^i c_n^i \phi(z_n) \quad (11)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \xi_n^i} - 0 \rightarrow \alpha_n^i + \beta_n^i - D \ et \ 0 \leq \alpha_n^i \leq D \quad (12)$$

Le rayon de la sphère i, R_i, peut être calculé d'après les conditions de Karush-Kuhn-Tucker (« KKT conditions ») décrites ci-après.

$$\alpha_n^i\left(c_n^i\left(\|\phi(z_n) - a_i\|^2 - R_i^2\right) - \xi_n^i\right) = 0$$
$$\left(D - \alpha_n^i\right)\xi_n^i = 0$$

Donc

$$R_i^2 = \|\phi(z_n) - a_i\|^2 \ \ pour \ \ tout \ les \ \ z_n \ avec \ \alpha_n^i \epsilon \ (0, D)$$

A partir de ces calculs analytiques, l'algorithme SSM-SVM peut être codé. Dans l'exemple de mise en œuvre décrit ici, on opère sur un nombre de classe supérieur à 2 et dans un espace de dimensions supérieures à 2.

Cet algorithme permet de décomposer le problème quadratique en une somme de problèmes linéaires qui sont traités un à un. Chaque multiplicateur de Lagrange est calculé individuellement et les vecteurs supports décrivant les sphères englobant les classes sont mis à jours à chaque itération.

La méthode SSM-SVM qui vient d'être décrite permet ainsi de classifier des formes d'onde spécifiques, en référence à la figure 5. Par ailleurs, l'association des formes d'onde spécifiques (ou « shapelets ») et de la classification SSM-SVM permet d'avoir des performances en terme de taux d'erreur supérieures à celles habituellement observées avec les procédés actuels de diagnostic.

L'utilisation de la méthode SSM-SVM permet d'obtenir à la fois des résultats de classification 77 des formes d'onde spécifiques 75 issues d'observations hors-ligne dans un mode d'apprentissage, et des résultats de classification 66 des formes d'onde spécifiques 65 issues de mesures de tension effectuées en temps réel.

Les résultats de classification issus du mode d'apprentissage SSM-SVM 76 sont exploités dans le traitement SSM-SVM 63 des points spécifiques issues de la transformation 62 des formes d'onde spécifiques issues des mesures temps-réel.

On va maintenant décrire, en référence à la figure 6, une stratégie de diagnostic en temps réel mise en œuvre dans le procédé de diagnostic selon l'invention. Les tensions aux bornes des cellules du système électrochimique sont mesurées au moyen du dispositif de mesure décrit précédemment en

référence aux figures 1 à 3. Ces mesures sont numérisées à une fréquence d'échantillonnage de 1hz pendant un temps Lw puis stockées sous forme d'un tableau de données temps-réel 61 qui sera ensuite utilisé pour les calculs.

Les données en temps réel sont acquises selon une fenêtre glissante d'acquisition. Une fois le tableau stocké, les distances minimum sont alors calculées via la transformation 62 en forme d'onde spécifique.

Lorsque la forme d'onde spécifique est caractérisée et représentée graphiquement par un point spécifique 65, il est ensuite analysé par l'algorithme SSM-SVM 63 qui va lui affecter une classe en fonction de sa position dans les volumes définis par les sphères, comme l'illustre la figure 5. Chaque classe est associée à un état de fonctionnement (Normal ou décrivant un défaut connu).

Des règles de diagnostic 67 sont ensuite appliquées aux résultats de classification 66 de façon à générer des résultats de diagnostic 68 qui vont permettre de poser un diagnostic de fonctionnement 69 (normal ou défaut, type de défaut,..) qui sera communiqué à la gestion du système électrochimique et possiblement à l'utilisateur ou au personnel chargé de la maintenance de ce système. Ces opérations sont répétées en boucle à chaque nouvelle acquisition (fenêtre) et ce à chaque mise en route du système.

Il est à noter que d'autres méthodes mathématiques, faisant notamment appel aux réseaux de neurones ou encore de type kNN (K Nearest Neighbor) ou GMM (Gaussian Mixture Model), pourraient être utilisées pour réaliser des classifications de formes d'onde spécifiques.

Bien sûr, l'invention n'est pas limitée aux exemples qui viennent d'être décrits et de nombreux aménagements peuvent être apportés à ces exemples sans sortir du cadre de l'invention. Bien entendu, les différentes caractéristiques, formes, variantes et modes de réalisation de l'invention peuvent être associées les unes avec les autres selon diverses combinaisons dans la mesure où elles ne sont pas incompatibles ou exclusives les unes des autres. En particulier toutes les variantes et modes de réalisation décrits précédemment sont combinables entre eux.