

12 DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 20.03.23.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 27.09.24 Bulletin 24/39.

56 Liste des documents cités dans le rapport de
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du
présent fascicule*

60 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

71 Demandeur(s) : SAFRAN Société anonyme — FR,
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Etablissement public national à caractère administratif — FR,
ECOLE SUPERIEURE DE PHYSIQUE ET DE CHIMIE INDUS-
TRIELLE DE LA VILLE DE PARIS Régie d'une collectivité
locale à caractère administratif — FR et SORBONNE UNIVER-
SITE Etablissement public national à caractère scientifique
culturel et professionnel — FR.

72 Inventeur(s) : CARREIRA RUFATO Raul, BUSSY
Emmanuel, LEBEY Thierry Michel André, OUSSAR
Yacine et DITCHI Thierry.

73 Titulaire(s) : SAFRAN Société anonyme, CENTRE NATIONAL DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE Etablissement public national à
caractère administratif, ECOLE SUPERIEURE DE PHYSIQUE ET DE
CHIMIE INDUSTRIELLE DE LA VILLE DE PARIS Régie d'une collectivité
locale à caractère administratif, SORBONNE UNIVERSITE Etablis-
sement public national à caractère scientifique culturel et professionnel.

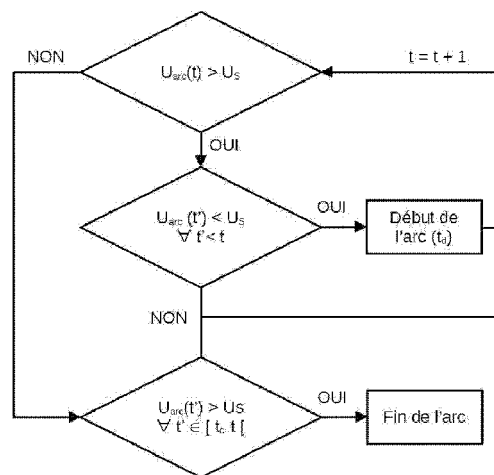
74 Mandataire(s) : Cabinet CAMUS LEBKIRI.

54 Procédé de détection de la présence d'arcs électriques et dispositif associé.

57 Procédé de détection de la présence d'arcs élec-
triques et dispositif associé

L'invention concerne un procédé mis en œuvre par ordi-
nateur de détection de la présence d'arcs électriques sur
une ligne électrique par apprentissage artificiel, l'apprentis-
sage étant effectué à l'aide de mesures corrélées dans le
temps de la tension d'arc et du courant d'arc, le procédé
comprenant une phase de conception par apprentissage ar-
tificiel d'une fonction de décision à l'aide de la pluralité de
mesures, la phase de conception comprenant notamment
une étape d'étiquetage de la mesure du courant. Ledit éti-
quetage comprend: lorsque la tension d'arc mesurée dé-
passe pour la première fois une valeur seuil prédéterminée,
une étape d'enregistrement d'un intervalle considéré
comme point de départ de l'arc électrique; Lorsque la ten-
sion d'arc mesurée repasse en-dessous de la valeur seuil
prédéterminée pour la première fois, une étape d'enregis-
trement de l'intervalle précédant un intervalle considéré
comme point de fin de l'arc électrique.

Figure à publier avec l'abrégié : Figure 4



Description

Titre de l'invention : Procédé de détection de la présence d'arcs électriques et dispositif associé

DOMAINE TECHNIQUE DE L'INVENTION

[0001] Le domaine technique de l'invention est celui de la détection de la présence d'arcs électriques à l'aide de méthodes issues de l'apprentissage artificiel.

[0002] La présente invention concerne un procédé et un dispositif de détection de la présence d'arcs électriques à l'aide de méthodes issues de l'apprentissage artificiel, et concerne en particulier une technique de classification dont les données utilisées pour l'apprentissage ont été étiquetées de manière automatique.

ARRIERE-PLAN TECHNOLOGIQUE DE L'INVENTION

[0003] L'aviation civile se mobilise depuis maintenant plusieurs années pour apporter une contribution à la lutte contre le changement climatique.

[0004] Les efforts de recherche technologique ont déjà permis d'améliorer de manière très significative les performances environnementales des avions. La présente demande résulte de la prise en considération des facteurs impactants dans toutes les phases de conception et de développement pour obtenir des composants et des produits aéronautiques moins énergivores, plus respectueux de l'environnement et dont l'intégration et l'utilisation dans l'aviation civile ont des impacts environnementaux modérés dans un but d'amélioration de l'efficacité énergétique des avions.

[0005] Autrement dit, la présente invention résulte du travail permanent à la réduction de l'impact climatique de l'aviation civile par l'emploi de méthodes et l'exploitation de procédés de développement et de fabrication vertueux et minimisant les émissions de gaz à effet de serre au minimum possible pour réduire l'empreinte environnementale de son activité. Comme le montre la présente invention, ces travaux de recherche et de développement soutenus portent notamment sur le développement de l'emploi des technologies électriques pour assurer la propulsion. Dans ce cadre, il est en particulier important de pouvoir détecter la formation d'arcs électriques.

[0006] Pour mémoire, un arc électrique est une décharge autoentretenue à fort courant. Il existe deux principaux types d'arcs électriques qui se produisent en environnement aéronautique : les arcs de coupure, présents dans les contacteurs au moment de l'ouverture ou de la fermeture d'un circuit et les arcs de défaut pouvant apparaître inopinément sur l'ensemble des composants de la chaîne électrique. Ces derniers peuvent être à l'origine de dégâts sévères sur les équipements, les systèmes et même la structure de l'aéronef. Il s'agit donc d'un point de vigilance particulier.

[0007] Les arcs de défaut peuvent être de deux types en fonction de leur position sur le

circuit électrique : les arcs parallèles et les arcs séries. Les arcs séries interviennent en général aux bornes d'une interface intermédiaire (bornier de raccordement, connecteur) suite à un problème de connexion en maintenance/ installation, ou une dégradation liée au vieillissement naturel ou anticipé par des interactions chimiques, électriques ou mécaniques.

[0008] Sur un réseau de distribution électrique, les arcs séries sont toujours plus complexes à détecter comparativement aux arcs parallèles. En effet, du point de vue de la signature électrique, les arcs parallèles génèrent un fort appel de courant, ce qui permet aux systèmes de diagnostic temps réel de les identifier efficacement et rapidement afin de donner un ordre de commande de mise en protection de la ligne par le système de coupure. En revanche, dans le cas d'un arc série, le courant n'est que faiblement impacté. Cela s'explique par le fait qu'un arc électrique est un défaut faible impédance. En conséquence, lorsqu'un arc est présent en série sur le système électrique, le courant ne souffrira que d'une légère fluctuation et plus précisément d'une réduction d'un faible pourcentage de sa valeur nominale. C'est pour cette raison principale que des arcs séries sont plus complexes à détecter par des moyens de contrôle standard, comparativement aux arcs parallèles. De plus, la forme d'onde du signal électrique du réseau est aussi un facteur pouvant complexifier la détection. Concernant les réseaux en tension alternative, dans la demi-période, le passage par une tension de 0 V est le moment où l'arc électrique ne peut plus perdurer. Lorsqu'un arc série apparaît sur un tel type de réseau, ce moment peut se traduire alors par un bref circuit ouvert laissant le courant de ligne à 0 A durant un petit instant (ce phénomène donne lieu à des épaulements de courant), ce qui peut être favorablement utilisé pour diagnostiquer un défaut d'arc série. Au contraire, lorsque la forme d'onde est continue (réseau DC), ce phénomène n'existe plus et l'arc perdure sans circuit ouvert supprimant ainsi l'une des possibilités de diagnostiquer le défaut.

[0009] Sur les réseaux actuels, du fait de la puissance distribuée relativement modérée, l'apparition des arcs électriques est mitigée car les niveaux de tension distribuée dans l'aéronautique sont au maximum de 230/400V. En outre, la distribution se fait sous forme d'onde alternative (AC) pour ces niveaux de tension (230/400V maximum), permettant de favoriser l'auto-extinction de l'arc à chaque demi-période lorsque la tension passe par 0 V. De plus, la distribution d'une forme d'onde continue (DC) est limitée majoritairement à 28 V. L'impact des arcs électriques est également limité par l'utilisation de protections passives (choix de matériaux "arc résistants", définition de distances de ségrégation) en vue de limiter les conséquences des arcs de défauts sur l'environnement, ainsi que par l'utilisation de protections actives (détection et ouverture de ligne) en cas de défaut de surintensité observée par des capteurs de courant. Cela permet avantageusement de détecter la plupart des arcs parallèles, mais

pas les arcs séries dont aucune protection active n'est jusque-là déployée.

- [0010] Les travaux actuels autour de l'électrification/hybridation des aéronefs envisagent la distribution de formes d'ondes continue (DC) à des niveaux de tension pouvant atteindre le kilovolt. Ce paradigme remet en cause la stratégie de passivation des défauts d'arcs qui vient d'être évoquée. L'arc électrique série doit alors être pris en compte au même titre que l'arc parallèle, car les dégâts associés à la génération de défauts à plus forte puissance et soumis à une tension continue risquent d'endommager l'aéronef et atteindre à la sécurité des passagers et de l'équipage.
- [0011] Un des moyens de mitiger le défaut d'arc série est alors de l'identifier (le détecter) en vue d'isoler la ligne en défaut, le cas échéant.
- [0012] Le problème majeur soulevé par la détection des arcs électriques en aéronautique repose sur une attente importante des niveaux de performance. Plus particulièrement une première exigence est la fiabilité, c'est-à-dire le pouvoir d'un système à détecter systématiquement et en toutes circonstances les phénomènes électriques dangereux. Il s'agit de sa capacité à atteindre un taux de vrais positifs le plus proche de 100%. La deuxième exigence est la robustesse, c'est-à-dire la capacité d'un système à être immunisé contre tout autre événement que celui pour lequel il a été programmé. En d'autres termes, c'est sa capacité à atteindre un taux de faux positifs le plus proche de 0%. Le système devra donc être robuste face aux différentes signatures de charges avion (ayant des comportements qui ressemblent à la signature des arcs) ainsi qu'à l'ensemble des paramètres environnementaux associés aux cycles de vol et de vie des aéronefs.
- [0013] Les méthodes par apprentissage artificiel commencent à être de plus en plus utilisées. Elles offrent de nouvelles solutions alternatives. Ces méthodes sont divisées notamment en apprentissage non-supervisé, en apprentissage semi-supervisé, en apprentissage supervisé ou bien encore en apprentissage par renforcement.
- [0014] La branche la plus appliquée à la détection de défauts d'ars électriques dans l'état de la technique est celle de l'apprentissage supervisé. Ce type d'apprentissage est un groupe de méthodes ayant pour finalité de générer une fonction capable de relier un ensemble d'entrées à une sortie en utilisant une base d'exemples et des méthodes mathématiques sophistiquées. Le modèle déduit cette fonction au cours de l'apprentissage, à partir de données étiquetées consistant en un ensemble d'exemples d'apprentissage. Les méthodes de détection à l'aide d'un modèle obtenu par apprentissage supervisé se divisent en méthodes de régression et de classification.
- [0015] L'objectif d'une classification est de prédire une valeur discrète permettant d'attribuer à toute donnée une catégorie appelée classe. La fonction de décision obtenue par une méthode de classification sépare donc les classes existantes. L'objectif d'une régression est de prédire une quantité continue. La fonction de décision obtenue

par une régression sera donc capable de représenter le comportement du système étudié en représentant de manière continue la grandeur d'intérêt (et non de manière discrète tel que le fait la classification).

[0016] Dans l'état de la technique, la détection d'arcs électriques (y compris en environnement aéronautique) est en général faite à partir de mesures électriques en utilisant de l'apprentissage artificiel supervisé, mais dans l'état de la technique, la méthode d'étiquetage utilisée n'est pas précisée, ou la méthode d'étiquetage est précisée mais n'identifie pas tous les phénomènes correctement. Par exemple, dans l'état de la technique, une mesure de la tension d'arc peut être utilisée pour compléter l'étiquetage. Le document intitulé « AC Series Arc-Fault Detection With A Transformer Neural Network, A Chabert et al., Juin 2022 » propose une détection d'arcs série en tension alternative avec une méthode par apprentissage supervisé. Un algorithme d'étiquetage totalement automatique est proposé en utilisant la tension d'arc.

[0017] Cependant, les solutions connues utilisant les outils d'apprentissage artificiel ayant pour objectif de détecter les arcs de défaut manquent parfois de représentativité. Généralement leurs méthodes d'étiquetage (essentiels pour cette approche) ne sont pas décrites et/ou ne sont pas assez précises face au caractère erratique de l'arc électrique. Or, si l'étape d'étiquetage n'est pas faite correctement, en incluant tous les phénomènes envisagés pour la phase de détection, l'étape d'apprentissage sera biaisée et produira un outil de détection présentant des performances médiocres en environnement réel.

[0018] Il existe donc un besoin d'une méthode d'étiquetage des données qui permette d'obtenir des données représentatives du phénomène de formation d'un arc de défaut, notamment des données représentatives d'un arc électrique de type arc série en tension continue. Il existe également un besoin d'un procédé de détection faisant usage, lors de la phase d'apprentissage, de données étiquetées avec la méthode en question.

Résumé de l'invention

[0019] Dans la suite, sauf précision contraire, le terme « arc » fera référence à un « arc de défaut ».

[0020] L'invention offre une solution aux problèmes évoqués précédemment, en garantissant que les données issues de mesures électriques d'arcs de défaut soient correctement étiquetées et en permettant :

- D'associer cet étiquetage binaire (arc ou non arc) à une méthode d'apprentissage artificiel supervisé de classification ;
- De garantir qu'un arc soit détecté de manière robuste et fiable ;
- De faire une détection d'arc automatisée.

[0021] Un autre objectif de l'invention est d'optimiser le temps consacré à l'étiquetage des

données lors de la phase d'apprentissage du modèle, en vue de la détection d'arcs électriques, et de diminuer les ressources nécessaires à l'étiquetage.

[0022] Pour cela, un premier aspect de l'invention concerne un procédé mis en œuvre par ordinateur de détection de la présence d'arcs électriques sur une ligne électrique à l'aide d'une méthode par apprentissage artificiel, l'apprentissage étant effectué à l'aide d'une pluralité de mesures relatives à la formation d'arcs électriques, chaque mesure de la pluralité de mesures comprenant une mesure corrélée dans le temps de la tension d'arc et du courant d'arc, le procédé comprenant :

- une phase de conception par apprentissage artificiel d'une fonction de décision à l'aide de la pluralité de mesures, la phase de conception comprenant :
 - Pour chaque mesure de la pluralité de mesures, une étape d'étiquetage de la mesure du courant d'arc à l'aide de la mesure de tension d'arc qui lui est associée ;
 - Une étape d'extraction de descripteurs à partir des mesures étiquetées ;
 - Une étape d'apprentissage pour la détermination de la fonction de décision à partir d'au moins une partie des descripteurs extraits lors de l'étape d'extraction ;
- une phase de détection comprenant :
 - Une étape de mesure du courant circulant sur la ligne ;
 - Une étape d'extraction des descripteurs de la mesure de courant obtenue lors de l'étape précédente de mesure de courant ;
 - A partir des descripteurs extraits de la mesure de courant et à l'aide de la fonction de décision déterminée lors de la phase de conception, une étape de détection de la présence d'arcs.

[0023] En outre, dans le procédé selon l'invention, l'étape d'étiquetage comprend, pour chaque mesure de la pluralité de mesures et pour chaque intervalle de temps t de la mesure considérée :

- Lorsque la tension d'arc mesurée U_{arc} dépasse pour la première fois une valeur seuil U_s prédéterminée, une étape d'enregistrement de l'intervalle considéré comme point de départ t_d de l'arc électrique ;
- Lorsque la tension d'arc mesurée U_{arc} repasse en-dessous pour la première fois de la valeur seuil U_s prédéterminée, une étape d'enregistrement de l'intervalle précédant l'intervalle considéré comme point de fin t_e de l'arc électrique.

[0024] Grâce à l'invention, la logique d'étiquetage associe la physique des arcs, une procédure automatisée et, dans certains cas, l'expertise humaine. Ainsi, il devient

possible d'étiqueter correctement la grande majorité, voire tous, les signaux d'arcs ou nominaux, de réaliser cet étiquetage de manière efficace grâce à la procédure automatisée, de corriger les imprécisions algorithmiques mises à mal par la variabilité des signatures d'arcs (lorsque l'expertise humaine est sollicitée), d'étiqueter les fenêtres le plus précisément possible (à l'échantillon près), et de créer une base de données ainsi étiquetée et adaptée à la conception d'un classifieur par apprentissage artificiel pour la détection d'arcs électriques.

[0025] Outre les caractéristiques qui viennent d'être évoquées dans le paragraphe précédent, le procédé selon un premier aspect de l'invention peut présenter une ou plusieurs caractéristiques complémentaires parmi les suivantes, considérées individuellement ou selon toutes les combinaisons techniquement possibles.

[0026] Dans un mode de réalisation, pour chaque mesure, l'étiquetage est associé à une fenêtre de mesure sur laquelle est réalisé l'apprentissage, ladite fenêtre étant donnée par l'intervalle $[P_g \times \min((t_e - t_d), T_{max}); P_d \times \min((t_e - t_d), T_{max})]$ où T_{max} est une durée de fenêtre maximale prédéfinie, P_g est un pas à gauche du point t_d ayant une valeur normalisée pour la durée de la fenêtre à l'étude et P_d est un pas à droite du point t_d ayant une valeur normalisée pour la durée de la fenêtre d'étude donnée par la relation $P_d = 1 - P_g$.

[0027] Dans un mode de réalisation, le procédé comprend, avant la phase d'apprentissage, une étape d'acquisition de signaux nécessaires à l'apprentissage de sorte à obtenir une pluralité de mesures, chaque mesure comprenant une mesure corrélée dans le temps de la tension d'arc et du courant d'arc.

[0028] Dans un mode de réalisation, la phase de conception comprend, avant l'étape d'étiquetage, une étape de pré-identification manuelle par expertise, dans chaque mesure de la pluralité de mesures, de tous les arcs électriques satisfaisant des critères prédéterminés de sorte à définir une position de chaque arc au sein de chaque mesure de la pluralité de mesures.

[0029] Dans un mode de réalisation, la phase de conception comprend, à l'issue de l'étape d'étiquetage, une étape de vérification manuelle des sorties de l'étape d'étiquetage par expertise de sorte à vérifier que les mesures étiquetées comprennent l'ensemble des régions envisagées pour l'apprentissage.

[0030] Dans un mode de réalisation, les descripteurs utilisés lors de l'étape de détermination de la fonction de décision comprennent l'entropie spectrale et/ou l'autocorrélation du courant d'arc.

[0031] Dans un mode de réalisation, la phase de conception comprend, entre l'étape d'extraction de descripteurs à partir des mesures étiquetées et l'étape de détermination de la fonction de décision, une étape de classement et de sélection des descripteurs de sorte à retenir le sous-ensemble de descripteurs les plus pertinents. Par exemple, le

classement pourra être réalisé à l'aide d'une méthode de Gram-Schmidt et la sélection pourra être réalisée à l'aide d'une méthode incrémentale. Bien entendu, d'autres méthodes peuvent être utilisées pour le classement ou la sélection.

[0032] Dans un mode de réalisation, l'étape de détermination de la fonction de décision comprend une pluralité d'itérations des deux sous-étapes suivantes :

- une sous-étape de conception, par apprentissage, d'un classifieur ; et
- une sous-étape de validation du classifieur à partir des données étiquetées ;

[0033] ces sous-étapes étant répétées jusqu'à l'obtention d'un classifieur optimal, la fonction de décision étant déterminée à partir de ce classifieur optimal.

[0034] Un deuxième aspect de l'invention concerne un dispositif de détection de la présence d'arcs dans une ligne de courant comprenant un moyen de mesure configuré pour mesurer le courant circulant dans la ligne de courant et des moyens configurés pour mettre en œuvre le procédé selon le premier aspect de l'invention.

[0035] Un troisième aspect de l'invention concerne un programme d'ordinateur comprenant des instructions qui, lorsqu'elles sont exécutées par un ordinateur, conduisent le dispositif selon le deuxième aspect de l'invention à exécuter le procédé selon le premier aspect de l'invention.

[0036] Un quatrième aspect de l'invention concerne un support lisible par ordinateur, sur lequel est enregistré le programme d'ordinateur selon le troisième aspect de l'invention.

[0037] Un cinquième aspect de l'invention concerne un aéronef comprenant un dispositif de détection tel que défini précédemment.

[0038] L'invention et ses différentes applications seront mieux comprises à la lecture de la description qui suit et à l'examen des figures qui l'accompagnent.

BREVE DESCRIPTION DES FIGURES

[0039] Les figures sont présentées à titre indicatif et nullement limitatif de l'invention.

[0040] La [Fig.1] montre un ordinogramme d'un procédé selon un exemple de l'invention.

[0041] La [Fig.2] montre une représentation schématique d'une mesure de tension d'arc et d'une mesure de courant d'arc corrélées en temps.

[0042] La [Fig.3] montre une représentation schématique d'une mesure de tension d'arc et d'une mesure de courant d'arc corrélées en temps après pré-identification.

[0043] La [Fig.4] montre un logigramme d'une étape d'étiquetage selon un exemple de l'invention.

[0044] La [Fig.5] montre une représentation schématique du principe d'étiquetage selon l'invention à partir d'une mesure de tension d'arc et d'une mesure de courant d'arc corrélées en temps.

[0045] La [Fig.6] montre une représentation schématique de la tension d'arc en fonction de la longueur d'arc.

[0046] La [Fig.7] montre une représentation schématique d'un dispositif selon un mode de réalisation de l'invention.

DESCRIPTION DETAILLEE

[0047] Les figures sont présentées à titre indicatif et nullement limitatif de l'invention.

[0048] **Procédé de détection de la présence d'arcs électriques sur une ligne électrique**

[0049] Un premier aspect de l'invention illustré à la [Fig.1] concerne un procédé 100 mis en œuvre par ordinateur de détection de la présence d'arcs électriques sur une ligne électrique à l'aide d'une méthode par apprentissage artificiel, l'apprentissage étant effectué à l'aide d'une pluralité de mesures relatives à la formation d'arcs électriques, chaque mesure de la pluralité de mesures comprenant une mesure corrélée dans le temps de la tension d'arc et du courant d'arc. Une telle mesure est illustrée à la [Fig.2] présentant, en haut, la mesure du courant d'arc, et en bas, la mesure de la tension d'arc correspondante, les deux mesures étant corrélées en temps (c'est-à-dire qu'une mesure de courant d'arc et une mesure de tension d'arc ayant la même abscisse t ont été mesurées au même instant t). La ligne électrique est par exemple une ligne électrique de réseau d'aéronef.

[0050] Dans un mode de réalisation préférentiel, la détection concerne un arc électrique en série et en tension continue. Cependant l'invention peut également être mise en œuvre dans le cadre de la détection d'arcs en série en tension alternative ou bien encore d'arcs en parallèle en tension continue ou alternative.

[0051] Le procédé 100 selon l'invention se déroule en au moins deux phases, dites ici PC, PD :

- une phase PC de conception permettant de déterminer une fonction de décision, c'est-à-dire une fonction qui prend en entrée une pluralité de descripteurs issus d'une mesure de courant et qui donne en sortie un booléen (ou toute représentation équivalente) représentatif de la présence ou non d'un arc électrique dans la mesure considérée ;
- une phase PD de détection, lors de laquelle le courant sur une ligne électrique est mesuré de sorte à extraire de cette mesure des descripteurs identifiés lors de la phase PC de conception et détecter la présence ou non d'un arc électrique à l'aide de la fonction de décision déterminée lors de la phase PC de conception.

[0052] De manière optionnelle, lorsque la pluralité de mesures nécessaires à la phase de conception n'est pas disponible, le procédé peut également comprendre une phase d'acquisition visant à obtenir ladite pluralité de mesures.

[0053] ***Acquisition des mesures***

[0054] Comme déjà mentionné, il peut être nécessaire de recueillir des mesures si ces

dernières ne sont pas disponibles. Pour cela, dans un mode de réalisation, le procédé 100 comprend, avant la phase PC de conception, une phase d'acquisition comprenant une étape d'acquisition d'une pluralité de mesures, chaque mesure comprenant une mesure corrélée dans le temps de la tension d'arc et du courant d'arc.

[0055] Cette phase est généralement mise en œuvre en laboratoire où des tests sont effectués afin de générer une base de données comprenant la pluralité de mesures brutes. Les mesures brutes sont également accompagnées d'informations relatives à la mesure et notamment :

- La fréquence d'échantillonnage lors de la mesure, par exemple 1MHz ;
- La description des signaux mesurés comportant :
 - La mesure du courant d'arc (ou courant de ligne) ;
 - La mesure de la tension d'arc ;
- La dimension de la base de données : le nombre d'essais (et donc le nombre de régions nominales et régions d'arcs – de préférence suffisamment important, par exemple plusieurs centaines ou milliers de fenêtres).

[0056] En outre, dans chaque mesure, la mesure de tension d'arc et de courant sont corrélées en temps.

[0057] Pour apprendre des informations aboutissant à un taux de vrais positifs élevé (aspect fiabilité) et un taux de faux positifs faible (aspect robustesse), deux catégories de signaux sont nécessaires : les signatures d'arcs électriques et les régions nominales. Les régions nominales sont toutes les signatures sur lesquelles un arc électrique n'est pas présent. Cela correspond donc à des régimes nominaux mais aussi anormaux (« inrush », reconfiguration de charges, etc...) de charges électriques connectées au réseau et alimentées par les câbles sous surveillance. La base de données doit donc contenir la plus grande distribution possible de ces signaux (charges avions, essais en environnement représentatif sévère).

[0058] A l'issue de leur acquisition, il peut être avantageux de prétraiter les mesures afin d'en faciliter l'analyse. Aussi, dans un mode de réalisation, la phase d'acquisition du procédé selon l'invention comprend une étape de pré-traitement des mesures acquises. Cette étape de pré-traitement permet notamment de standardiser les acquisitions, et de supprimer les décalages et les défauts de la chaîne de mesure.

[0059] ***Phase de conception d'une fonction de décision***

[0060] Le procédé 100 selon l'invention comprend une phase PC de conception d'une fonction de décision à l'aide de la pluralité de mesures (éventuellement prétraitées comme décrit précédemment), cette phase étant destinée à déterminer une fonction de décision telle que décrite précédemment, c'est-à-dire une fonction qui prend en entrée une pluralité de descripteurs extraits d'une mesure de courant d'arc et qui donne en sortie un booléen (ou toute représentation équivalente) représentatif de la présence ou

non d'un arc électrique.

[0061] Étape de pré-identification

[0062] De préférence, la phase PC de conception comprend tout d'abord une étape de pré-identification par expertise comportant une identification brute (sans précision à l'échantillon près) de tous les arcs électriques qui satisfont des critères prédéterminés. Pour cette première étape, l'expert identifie grossièrement une première fois l'ensemble des arcs sur l'ensemble des essais de l'ensemble des mesures. L'identification n'est pas précise à l'échantillon près. Il s'agit simplement de définir la position de chaque arc au sein des données d'acquisition. Une illustration de ces données après pré-identification est donnée à la [Fig.3] dans laquelle deux arcs (Arc1 et Arc2) sont identifiés par des cercles en pointillé.

[0063] Dans un mode de réalisation, cette pré-identification se fait sur la base des critères de spécification tels que durée d'arc minimale, tension d'arc minimale, etc. Dans un mode de réalisation, les mesures de la pluralité de mesures sont stockées dans un ou plusieurs fichiers, et la position temporelle et le nombre d'arcs par fichier de mesures sont stockés dans un fichier de synthèse.

[0064] Bien que facultative, cette étape permet d'améliorer les performances de la fonction de décision obtenue à l'issue de la phase PC de conception.

[0065] Étape d'étiquetage

[0066] La phase d'apprentissage comprend une étape E1 d'étiquetage. Dans la présente invention, l'étape E1 d'étiquetage est originale en ce qu'elle met en application une logique fondée sur la physique des arcs : pour chaque mesure, elle utilise la mesure de la tension d'arc (uniquement disponible en laboratoire) comme référence pour étiqueter la mesure du courant d'arc (ou de ligne – disponible en laboratoire et qui sera disponible plus tard lors de la phase PD de détection) de manière automatisée. Lors de cette étape E1, un algorithme qui sera décrit dans la suite parcourt l'ensemble des mesures de la pluralité de mesures de sorte à identifier précisément les informations de début et de fin d'arc dans chaque mesure de tension d'arc, et ainsi sélectionner la partie pertinente (autrement dit, la partie étiquetée correspondant à une fenêtre de mesure) dans chaque mesure du courant d'arc correspondante. La partie pertinente ainsi sélectionnée dans chaque mesure de courant d'arc de la pluralité de mesures sera ensuite utilisée pour l'apprentissage. Les fenêtres ainsi étiquetées sont labellisées et sauvegardées. Il est ainsi possible d'étiqueter les données sur la base de critères choisis en amont (par ex., une tension seuil U_s – cf. la description détaillée de l'étape d'étiquetage dans la suite).

[0067] Étape de vérification

[0068] De préférence, la phase PC de conception comprend, à l'issue de l'étape d'étiquetage, une étape de vérification manuelle de l'étiquetage par expertise. Lors de

cette étape un ou plusieurs experts viennent contrôler l'ensemble des fenêtres ainsi sauvegardées. Lors de cette étape, des fenêtres non-étiquetées, mais correspondant néanmoins à la survenue d'un arc électrique, peuvent ainsi être étiquetées manuellement. De la même manière, des fenêtres étiquetées de manière erronée (parce que le phénomène présente des caractéristiques atypiques) peuvent être réétiquetées. En règle générale, les fenêtres étiquetées sont sauvegardées tandis que les autres mesures sont anonymisées et sorties de la sauvegarde. Autrement dit, cette étape permet de vérifier que les mesures étiquetées comprennent l'ensemble des régions envisagées pour l'apprentissage, c'est-à-dire une fenêtre comprenant une partie de la mesure antérieure à la formation de l'arc, la mesure correspondant à la formation de l'arc, ainsi qu'une partie de la mesure après la formation de l'arc.

[0069] Bien que facultative, cette étape peut être utile car il est possible que certains arcs ne soient pas correctement identifiés lors de l'étape E1 d'étiquetage. Cette étape facultative peut donc contribuer à l'amélioration de la fonction de décision obtenue à l'issue de la phase PC de conception.

[0070] Étape d'identification manuelle

[0071] De préférence, la phase PC de conception comprend, à l'issue de l'étape d'étiquetage, une étape d'identification manuelle des reliquats, c'est-à-dire des arcs manquants. Lors de cette étape, un contrôle des écarts entre le nombre et la position des arcs identifiés lors de l'étape de pré-identification (lorsque cette dernière est mise en œuvre) et lors de l'étape de vérification de l'étiquetage (lorsque cette dernière est mise en œuvre) est effectué. Tous les arcs identifiés lors de l'étape de pré-identification et non marqués à l'issue de l'étape de vérification de l'étiquetage sont alors marqués manuellement, l'objectif étant d'étiqueter la totalité des arcs présents dans les mesures de la pluralité de mesures.

[0072] Bien que facultative, cette étape peut donc contribuer à l'amélioration de la fonction de décision obtenue à l'issue de la phase PC de conception.

[0073] Étape d'extraction de descripteurs

[0074] La phase PC de conception comprend également, pour chaque mesure de la pluralité de mesures, une étape E2 d'extraction des descripteurs de chaque fenêtre de la mesure du courant d'arc étiquetée lors de l'étape E1 d'étiquetage. En effet, pour ajuster un modèle par apprentissage, il est nécessaire d'extraire des descripteurs à partir d'une fenêtre de données relative à chaque mesure représentative du phénomène à détecter, cette fenêtre ayant été identifiée lors de l'étape E1 d'étiquetage. Ces descripteurs sont des caractéristiques informatives sur la fenêtre de mesure analysée et donc sur le phénomène à détecter, ici, la formation d'un arc électrique.

[0075] L'étape E2 d'extraction peut se faire d'au moins deux manières différentes :

- En utilisant une méthode par apprentissage non supervisé telles que les auto-

- encodeurs ; dans ce cas, les descripteurs n'ont pas d'interprétation physique ;
 - En utilisant des connaissances physiques préalables pouvant être contenues dans la mesure, telles que :
 - Le contenu fréquentiel, par exemple après une transformation de Fourier ou en ondelettes ;
 - Les moments statistiques, comme la moyenne, l'écart type, le « kurtosis » et la « skewness » ;
 - Les analyses temporelles.
- [0076] De préférence, dans le procédé 100 selon l'invention, les descripteurs sont extraits en utilisant des connaissances physiques préalables et comprennent l'entropie spectrale et/ou l'autocorrélation du courant d'arc mesurée sur la fenêtre sélectionnée.
- [0077] Dans un mode de réalisation, le procédé comprend, à l'issue de l'étape d'extraction des descripteurs, une étape de normalisation des mesures de la pluralité de mesures.
- [0078] Étape de classement et de sélection des descripteurs
- [0079] Dans un mode de réalisation, la phase PC de conception comprend également une étape de classement et de sélection des descripteurs. En effet, tous les descripteurs extraits n'ont pas nécessairement des caractéristiques pouvant aboutir à la bonne ségrégation des deux classes de fenêtres existantes (arcs et nominales). Ainsi, l'analyse de l'importance et du niveau de corrélation des descripteurs avec l'étiquette de la fenêtre peut être utile et améliorer les performances de la fonction de décision. En effet, un mauvais descripteur peut éventuellement perturber la prédiction, diminuant (parfois drastiquement) les performances finales de la fonction de décision. Aussi, la sélection de descripteurs peut généralement conduire à de meilleures performances en apprentissage, telles qu'une plus grande efficacité, un coût de calcul inférieur et un modèle de détection automatique d'arcs plus performant. Aussi, ce mode de réalisation est particulièrement avantageux lorsque le nombre de descripteurs est élevé.
- [0080] Ainsi, le but de l'étape de sélection de descripteurs est de maximiser la pertinence et de minimiser la redondance de l'information. Dans un exemple de réalisation, cette étape est effectuée par une méthode supervisée de filtrage.
- [0081] Dans un exemple de réalisation, le classement pourra être réalisé à l'aide d'une méthode de Gram-Schmidt et la sélection pourra être réalisée à l'aide d'une méthode incrémentale. Bien entendu, d'autres méthodes peuvent être utilisées pour le classement ou la sélection.
- [0082] Bien que facultative, cette étape peut donc contribuer à l'amélioration de la fonction de décision obtenue à l'issue de la phase PC de conception.
- [0083] Étape de détermination de la fonction de décision
- [0084] La phase PC de conception comprend également une étape E3 de détermination de la fonction de décision, notée $f(X)$ dans la suite (où X représente les descripteurs extraits

de la mesure du courant d'arc et fournis en entrée de la fonction de décision).

[0085] Dans un mode de réalisation, cette étape E3 comprend une pluralité d'itérations des deux sous-étapes suivantes :

- une sous-étape de conception, par apprentissage, d'un classifieur ; et
- une sous-étape de validation du classifieur à partir des données étiquetées.

[0086] En outre, ces sous-étapes sont répétées jusqu'à l'obtention du classifieur le plus performant, c'est-à-dire par exemple le classifieur minimisant en-dessous d'un certain seuil l'erreur de classification réalisée sur une base de données non apprises (de sorte à assurer une capacité de généralisation dudit classifieur). La fonction de décision $f(X)$ est déterminée à partir de ce classifieur.

[0087] Ainsi, la détermination d'un classifieur permet, par apprentissage (correspondant à la pluralité d'itérations des sous-étapes décrites précédemment), d'obtenir un classifieur performant de sorte à réaliser une décision efficace.

[0088] Afin de mettre en œuvre cette étape E3, plusieurs méthodes de classification supervisée peuvent être utilisées. Le choix de la méthode peut notamment être influencé par le temps de détection souhaité : certaines méthodes peuvent avoir une complexité de calcul plus élevée, mais de meilleures performances. De préférence, la méthode de classification utilisée lors de cette étape est une méthode par machines à vecteur support. Cette méthode étant bien connue de la personne du métier, elle ne sera pas davantage décrite ici.

[0089] Dans un mode de réalisation alternatif, la méthode de classification est choisie parmi l'une des méthodes suivantes :

- Réseaux de neurones formels (simples, convolutionnels, récurrents) ;
- Modèles de Markov cachés ;
- Méthode des K-plus proches voisins ;
- Arbre de décision ;
- Apprentissage ensembliste (jumelage de deux méthodes parmi les méthodes précédemment listées).

[0090] Toutes les étapes E1-E3 décrites jusqu'ici sont mises en œuvre préalablement à la phase PD de détection et, à l'issue de la phase PC de conception, la fonction de décision (et donc la stratégie de détection) est figée. Aussi, les descripteurs sélectionnés lors de la phase PC de conception sont les descripteurs qui seront utilisés lors de la phase PD de détection. Lors de la phase PD de détection, ces derniers seront donc extraits des signaux mesurés (par exemple via du traitement du signal) et utilisés comme entrées de la fonction de décision qui attribuera au signal soit la catégorie « arc », soit la catégorie « régime nominal » (c'est-à-dire absence d'arc électrique).

[0091] ***Phase de détection***

[0092] Afin de pouvoir détecter la présence d'un arc électrique sur une ligne électrique, le

procédé comprend une phase PD de détection postérieure à la phase PC de conception et durant laquelle la fonction de décision va être utilisée afin de déterminer la présence ou non d'un arc électrique dans une mesure de courant. Contrairement à la phase PC de conception où la tension d'arc est une mesure disponible, en condition réelle (hors laboratoire), c'est-à-dire lors de la phase PD de détection, seule la mesure de courant d'arc est disponible. C'est donc de préférence à partir de cette seule mesure que va s'opérer la détection.

- [0093] Plus particulièrement, la phase PD de détection comprend tout d'abord une étape E4 de mesure du courant circulant sur la ligne électrique. Cette étape E4 est réalisée en continu et en temps réel de sorte à permettre une détection rapide de la présence d'un arc.
- [0094] La phase PD de détection comprend également une étape E5 d'extraction des descripteurs de la mesure de courant. Comme déjà mentionné, les descripteurs extraits lors de cette étape E5 sont identiques à ceux sélectionnés lors de la phase PC de conception et servant de données d'entrée à la fonction de décision. Ils sont par ailleurs extraits en continu, au fur et à mesure que les mesures de courant sont acquises.
- [0095] La phase PD de détection comprend également une étape E6 de détection de la présence d'un arc dans la mesure du courant circulant sur la ligne LI électrique. Cette étape utilise les descripteurs extraits de la mesure de courant et la fonction de décision déterminée lors de la phase PC de conception.
- [0096] Dans un mode de réalisation, il est possible de couper le courant dans la ligne électrique LI sur laquelle est opérée la détection à l'aide d'un dispositif de coupure du courant (dispositif MCC visible sur la [Fig.7]), et le procédé 100 selon l'invention comprend, lorsqu'un arc électrique est détecté lors de l'étape E6 de détection, une étape d'envoi, au dispositif de coupure MMC, d'une instruction de coupure du courant sur la ligne LI considérée. Cela permet d'éviter ou, à tout le moins, limiter les dégâts associés à la formation d'un arc électrique sur la ligne LI de courant considérée.
- [0097] La qualité de la détection dépend de la qualité de l'apprentissage qui dépend elle-même de la qualité des données et de leur étiquetage. L'un des apports du procédé selon l'invention est d'automatiser cet étiquetage en utilisant une pluralité de mesures (en général effectuées en laboratoire), chaque mesure comprenant une mesure corrélée en temps de la tension d'arc et du courant d'arc. Cette étape E2 d'étiquetage, introduite précédemment, va maintenant être décrite en détail.
- [0098] **Description détaillée de l'étape d'étiquetage**
- [0099] Dans la suite, afin d'illustrer l'étape E2 d'étiquetage, la notation suivante est utilisée :
- t est l'instant considéré ;
 - t_{end} est la durée totale de l'essai en cours ;
 - T_{max} est la durée de fenêtre maximale ;

- T_{min} est la durée de fenêtre minimale ;
- P_g est le pas à gauche ; sa valeur est normalisée pour la durée de la fenêtre à l'étude et comprise entre $[0,1]$;
- P_d est le pas à droite ; $P_d = 1 - P_g$, il s'agit donc également d'une valeur normalisée pour la durée de la fenêtre à l'étude et comprise entre $[0,1]$;
- t_d est l'instant de démarrage de l'arc ;
- t_e est l'instant d'extinction de l'arc ;
- $t_{evaluation}$ est le temps d'évaluation du pourcentage de points qui sont au-dessus de U_s avant le démarrage d'un arc ;
- U_{arc} est la tension d'arc ;
- I_{arc} est le courant d'arc ;
- U_s est le seuil de tension minimal à partir duquel l'existence d'un arc électrique est considérée comme vrai ; ce seuil de tension (ou tension de seuil) est fonction de la connaissance de la physique des arcs.

[0100] Comme cela a été détaillé précédemment, l'étape E2 d'étiquetage selon l'invention est postérieure à l'étape d'acquisition des signaux ou bien encore à l'étape de pré-traitement desdits signaux. Dans le cas des signatures électriques des arcs de défaut, la seule information permettant de garantir la présence d'un arc électrique est la mesure de la tension à ses bornes (la tension d'arc), puisque cette valeur sera nulle en absence de décharge et supérieure à une certaine valeur uniquement en présence d'un arc. Pour rappel, l'information de cette tension d'arc n'est pas mesurée (car non disponible) lors de la phase PD de détection. Elle n'est accessible et utilisée que lors de la phase PC de conception. C'est donc à partir de cette information que la stratégie d'étiquetage selon l'invention est définie. Autrement dit, la mesure de la tension d'arc est utilisée exclusivement pour étiqueter la mesure de courant (pour les données d'apprentissage et de validation qui sont acquises en laboratoire) et cette utilisation est limitée à la phase PC de conception.

[0101] Par ailleurs, lors de l'étape E2 d'étiquetage, les caractéristiques du phénomène à détecter doivent être bien définies. Elles représentent la spécificité du défaut que l'on cherche à détecter.

[0102] Dans un exemple de réalisation, les caractéristiques des arcs à détecter sont les suivantes :

- une durée d'arc ≥ 1 ms ;
- une augmentation de la tension d'arc de 0 à 10V minimum.

[0103] Dans un exemple de réalisation, les caractéristiques des fenêtres étiquetées comme des arcs sont les suivantes :

- une durée de la fenêtre comprise entre 1 et 10 ms ;
- présence d'un décalage temporel négatif d'une durée proportionnelle à la

longueur de la fenêtre ;

- absence de signature de fin d'arc (corrélée à une chute de tension d'arc vers 0V).

[0104] Ces valeurs sont fournies à titre d'exemple mais ne représentent pas une limitation de l'invention.

[0105] Dans l'état de la technique, l'étiquetage est une opération délicate et chronophage. Cependant, dans le procédé 100 selon l'invention, cette étape E2 est automatisée, permettant d'assurer le même résultat qu'une mise en œuvre manuelle, tout en optimisant le temps consacré.

[0106] Pour cela, l'étape E2 d'étiquetage comprend, pour chaque mesure et pour chaque intervalle de temps t de la mesure considérée, les sous-étapes suivantes :

- lorsque la tension d'arc mesurée U_{arc} dépasse pour la première fois une valeur seuil U_s prédéterminée (c'est-à-dire à la première occurrence de la relation suivante : $U_{arc}(t) > U_s$ et $U_{arc}(t-1) < U_s$ où t est l'intervalle considéré), une étape d'enregistrement de l'intervalle considéré comme point de départ de l'arc électrique (autrement dit $t_d = t$) ;
- lorsque la tension d'arc mesurée U_{arc} repasse pour la première fois en-dessous de ladite valeur seuil U_s prédéterminée (c'est-à-dire à la première occurrence de la relation suivante : $U_{arc}(t) < U_s$ et $U_{arc}(t-1) > U_s$ où t est l'intervalle considéré), une étape d'enregistrement de l'intervalle précédant l'intervalle considéré (c'est-à-dire $t-1$) comme point de fin de l'arc électrique (autrement dit $t_e = t-1$).

[0107] Ces deux sous-étapes sont illustrées sous la forme d'un ordinogramme à la [Fig.4]. Sur cet ordinogramme, la tension d'arc mesurée est comparée à la tension d'arc seuil. Si la tension d'arc mesurée est supérieure à la tension d'arc seuil, les valeurs précédentes de la tension d'arc sont vérifiées. Si aucune desdites valeurs précédentes n'était au-dessus de cette valeur seuil, cela signifie que la tension d'arc passe pour la première fois au-dessus de la valeur seuil, signalant le début de l'arc. Dans le cas contraire, rien n'est fait. De même, si la valeur de tension d'arc mesurée est en-dessous de la valeur seuil et que la valeur seuil était au-dessus de cette même valeur seuil, alors cela signale que la tension d'arc repasse en dessous de la valeur seuil, signalant la fin de l'arc.

[0108] Dans un mode de réalisation, pour chaque mesure, l'étiquetage est associé à une fenêtre de mesure sur laquelle est réalisé l'apprentissage, ladite fenêtre étant donnée par l'intervalle : $[P_g \times \min((t_e - t_d), T_{max}); P_d \times \min((t_e - t_d), T_{max})]$. C'est à partir des données de cet intervalle que seront extraits les descripteurs. Une telle fenêtre de mesure est illustrée à la [Fig.5] qui représente, en haut, le courant d'arc en

fonction du temps et, en bas, la tension d'arc en fonction du temps. Il s'agit d'une représentation simplifiée de profils électriques apparaissant en cas d'arc série en tension continue sur un système électrique alimentant une charge résistive. Sur l'exemple de la [Fig.5], l'apparition de l'arc est représentée sur la courbe de tension par une augmentation de tension de quelques Volts ou quelques dizaines de Volts. Sur la courbe de courant, cela est représenté par l'apparition d'une chute de courant survenant au même instant. En plus de ces chutes, l'étape d'étiquetage cherche à conserver une petite partie du signal à gauche de la chute (région nominale) et une partie encore plus grande du signal à droite de la chute (arc établi) afin de stocker un contenu fréquentiel important du phénomène. Comme déjà mentionné, le début d'un arc, au temps t_d , est d'abord identifié comme le moment où la tension d'arc mesurée U_{arc} dépasse une valeur seuil U_s déterminée, choisie en relation avec la physique des arcs. Dans un mode de réalisation, la valeur de U_s est donnée par la somme de la chute anodique et cathodique, par exemple une valeur de 20V pour la somme des deux chutes de tension dans l'air.

[0109] Une fois le début de l'arc identifié, sa fin (t_e) est déterminée de la même manière, mais représentant le moment où la tension revient à une valeur inférieure au seuil établi. Avec cela, il est possible d'identifier la durée de l'arc électrique analysé ($d = t_e - t_d$). Si cette durée est supérieure à la valeur maximale de fenêtrage souhaitée dans la détection (T_{max}), cette valeur maximale prédéfinie est prise comme référence. Dans le cas contraire, où la durée d'arc est inférieure à celle du fenêtrage établi et supérieure à la durée minimale (T_{min}) acceptable pour l'arc, la durée d'arc est prise comme fenêtrage de référence. Les régions à droite et gauche de t_d sont alors additionnées selon un pourcentage ($P_d + P_g = 1$) de cette durée de référence. Tous les arcs sont alors étiquetés de cette façon.

[0110] Dans un mode de réalisation, la tension de seuil est déterminée à partir de l'évolution de la tension mesurée aux bornes d'un arc électrique en fonction de la longueur d'arc, cette évolution étant présentée à la [Fig.6]. Il est possible d'identifier trois zones sur cette figure. Dans les zones situées en début et en fin d'arc, la tension d'arc évolue de manière non linéaire. Ce sont les zones anodiques et cathodiques au sein desquelles la chute de tension d'arc représente une valeur non négligeable, inéluctable et systématiquement supérieure à 0 V. De manière générale, les valeurs de $V_c + V_a$ sont comprises entre 10 et 25V dans les conditions environnementales rencontrées dans le domaine de l'aéronautique. La troisième zone est la zone centrale dont la tension d'arc progresse linéairement en fonction de la distance parcourue par l'arc et ne présente pas d'intérêt particulier dans la mise en œuvre du procédé selon l'invention. En d'autres termes, l'apparition d'un arc électrique sera accompagnée systématiquement par la production d'une tension d'arc dont la valeur sera définie par un seuil minimal

expliqué par les chutes de tensions aux bornes des électrodes.

[0111] **Dispositif de détection de la présence d'arcs électriques**

[0112] Un deuxième aspect de l'invention illustré à la [Fig.7] concerne un dispositif DI comprenant les moyens configurés pour mettre en œuvre un procédé 100 selon l'invention. Le dispositif DI est, à titre d'exemple, embarqué dans un aéronef.

[0113] Plus particulièrement, le dispositif comprend un moyen de calcul MC (par exemple un processeur ou une carte ASIC) associé à une mémoire MM (par exemple une mémoire RAM et/ou un disque dur), ladite mémoire MM étant configurée pour stocker les données et les instructions nécessaires à la mise en œuvre du procédé 100 selon l'invention. Le dispositif DI selon l'invention comprend également un moyen de mesure CPT configuré pour mesurer, en temps réel, le courant traversant une ligne de courant LI (par exemple une ligne de réseau électrique d'aéronef) lorsque ce dernier est connecté à une telle ligne de courant LI et communiquer la mesure au moyen de calcul MC du dispositif DI selon l'invention. Dans un exemple de réalisation, le dispositif est un RCCB (pour Remote Controller Circuit Breaker en anglais) ou bien encore un SSPC (pour Solid State Power Controller en anglais).

[0114] Dans un mode de réalisation, le courant traversant la ligne de courant LI peut être coupé par un dispositif de coupure de courant MCC commandable à distance, et le dispositif DI selon l'invention est configuré pour, lorsque la présence d'un arc est détectée sur la ligne de courant LI, envoyer une instruction au dispositif de coupure de courant MCC de sorte à couper le courant dans la ligne de courant.

Revendications

[Revendication 1]

Procédé (100) mis en œuvre par ordinateur de détection de la présence d'arcs électriques sur une ligne électrique (LI) à l'aide d'une méthode par apprentissage artificiel, l'apprentissage étant effectué à l'aide d'une pluralité de mesures relatives à la formation d'arcs électriques, chaque mesure de la pluralité de mesures comprenant une mesure corrélée dans le temps de la tension d'arc et du courant d'arc, le procédé comprenant :

- une phase (PC) de conception d'une fonction de décision par apprentissage artificiel, à l'aide de la pluralité de mesures, la phase (PC) de conception comprenant :
 - Pour chaque mesure de la pluralité de mesures, une étape (E1) d'étiquetage de la mesure du courant d'arc à l'aide de la mesure de tension d'arc qui lui est associée ;
 - Une étape (E2) d'extraction de descripteurs à partir des mesures étiquetées issues de l'étape d'étiquetage ;
 - Une étape (E3) de détermination de la fonction de décision, par apprentissage artificiel, à partir d'au moins une partie des descripteurs extraits lors de l'étape (E2) d'extraction ;
- une phase (PD) de détection de la présence d'arcs électriques comprenant :
 - Une étape (E4) de mesure du courant circulant sur la ligne (LI) ;
 - Une étape (E5) d'extraction des descripteurs de la mesure de courant obtenue lors de l'étape (E4) précédente de mesure du courant ;
 - A partir d'une partie des descripteurs extraits lors de l'étape précédente et à l'aide de la fonction de décision déterminée lors de la phase (PC) de conception, une étape (E6) de détection de la présence d'arcs dans la mesure du courant ;

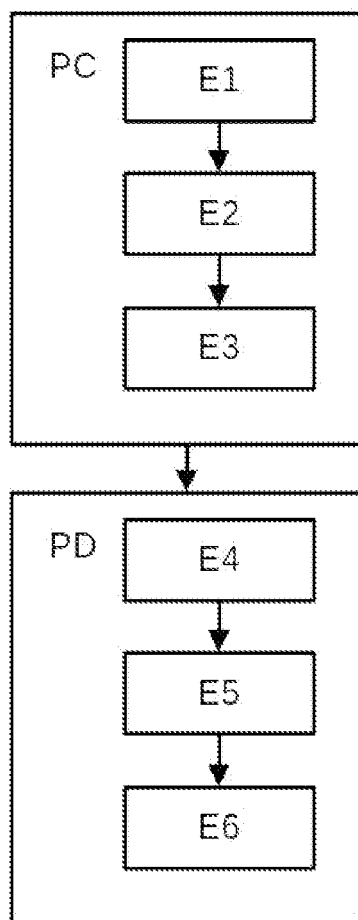
le procédé étant caractérisé en ce que l'étape d'étiquetage (E1) comprend, pour chaque mesure de la pluralité de mesures et pour chaque intervalle de temps t de la mesure considérée :

- Lorsque la tension d'arc mesurée U_{arc} dépasse pour la première fois une valeur seuil U_s prédéterminée, une étape d'enregistrement d'un intervalle considéré comme point de départ t_d de l'arc électrique ;
- Lorsque la tension d'arc mesurée U_{arc} repasse en-dessous de la valeur seuil U_s prédéterminée pour la première fois, une étape d'enregistrement de l'intervalle précédant un intervalle considéré comme point de fin t_e de l'arc électrique.

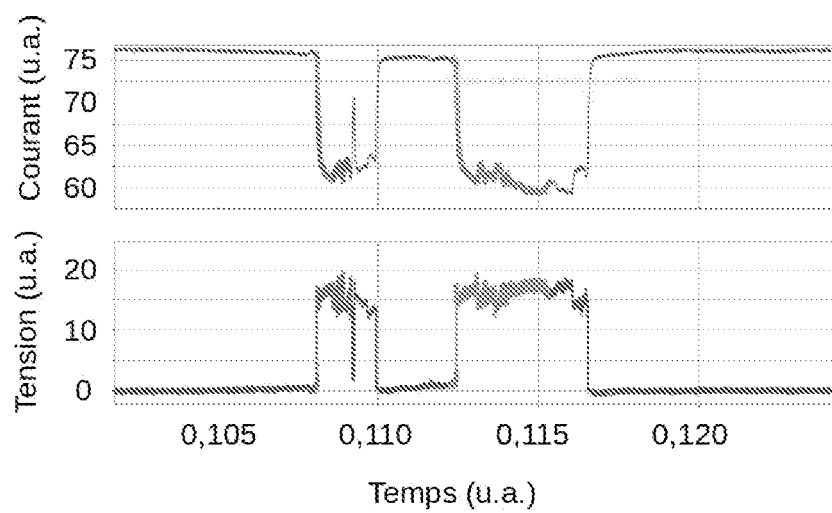
- [Revendication 2] Procédé selon la revendication précédente dans laquelle, pour chaque mesure, l'étiquetage est associé à une fenêtre de mesure sur laquelle est réalisé l'apprentissage, ladite fenêtre étant donnée par l'intervalle $[P_g \times \min((t_e - t_d), T_{max}); P_d \times \min((t_e - t_d), T_{max})]$ où T_{max} est une durée de fenêtre maximale prédéfinie, P_g est un pas à gauche de t_d ayant une valeur normalisée pour la durée de la fenêtre à l'étude, et P_d est un pas à droite de t_d ayant une valeur normalisée pour la durée de la fenêtre d'étude donnée par la relation $P_d = 1 - P_g$.
- [Revendication 3] Procédé selon l'une des revendications précédentes comprenant, avant la phase de conception, une étape d'acquisition de signaux nécessaire à l'apprentissage de sorte à obtenir une pluralité de mesures, chaque mesure comprenant une mesure corrélée dans le temps de la tension d'arc et du courant d'arc.
- [Revendication 4] Procédé selon l'une des revendications précédentes dans lequel la phase de conception comprend, avant l'étape d'étiquetage, une étape de pré-identification manuelle par expertise, dans chaque mesure de la pluralité de mesures, de tous les arcs électriques satisfaisant des critères prédéterminés de sorte à définir une position de chaque arc au sein de chaque mesure de la pluralité de mesures.
- [Revendication 5] Procédé selon l'une des revendications précédentes dans lequel la phase de conception comprend, à l'issue de l'étape d'étiquetage (E1), une étape de vérification manuelle des sorties de l'étape d'étiquetage par expertise de sorte à vérifier que les mesures étiquetées comprennent l'ensemble des régions envisagées pour l'apprentissage.
- [Revendication 6] Procédé selon l'une des revendications précédentes dans lequel les descripteurs utilisés lors de l'étape de détermination (E3) de la fonction de décision comprennent l'entropie spectrale et/ou l'autocorrélation du courant d'arc.

- [Revendication 7] Dispositif de détection de la présence d'arcs dans une ligne de courant, le dispositif comprenant un moyen de mesure configuré pour mesurer le courant circulant dans la ligne de courant et des moyens configurés pour mettre en œuvre un procédé selon l'une des revendications précédentes.
- [Revendication 8] Programme d'ordinateur comprenant des instructions qui, lorsqu'elles sont exécutées par un ordinateur, conduisent le dispositif selon la revendication précédente à exécuter le procédé selon l'une des revendications 1 à 6.
- [Revendication 9] Support lisible par ordinateur, sur lequel est enregistré le programme d'ordinateur selon la revendication précédente.
- [Revendication 10] Aéronef comprenant un dispositif de détection conforme à la revendication 7.

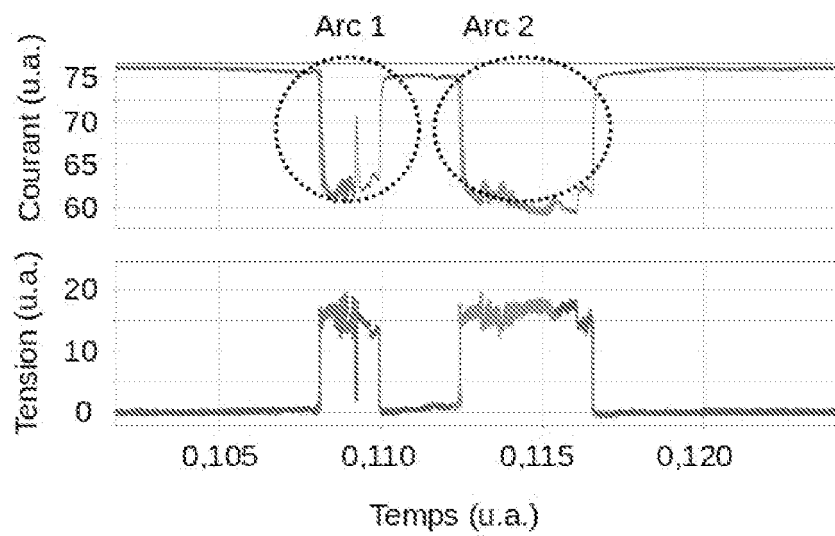
[Fig. 1]

100

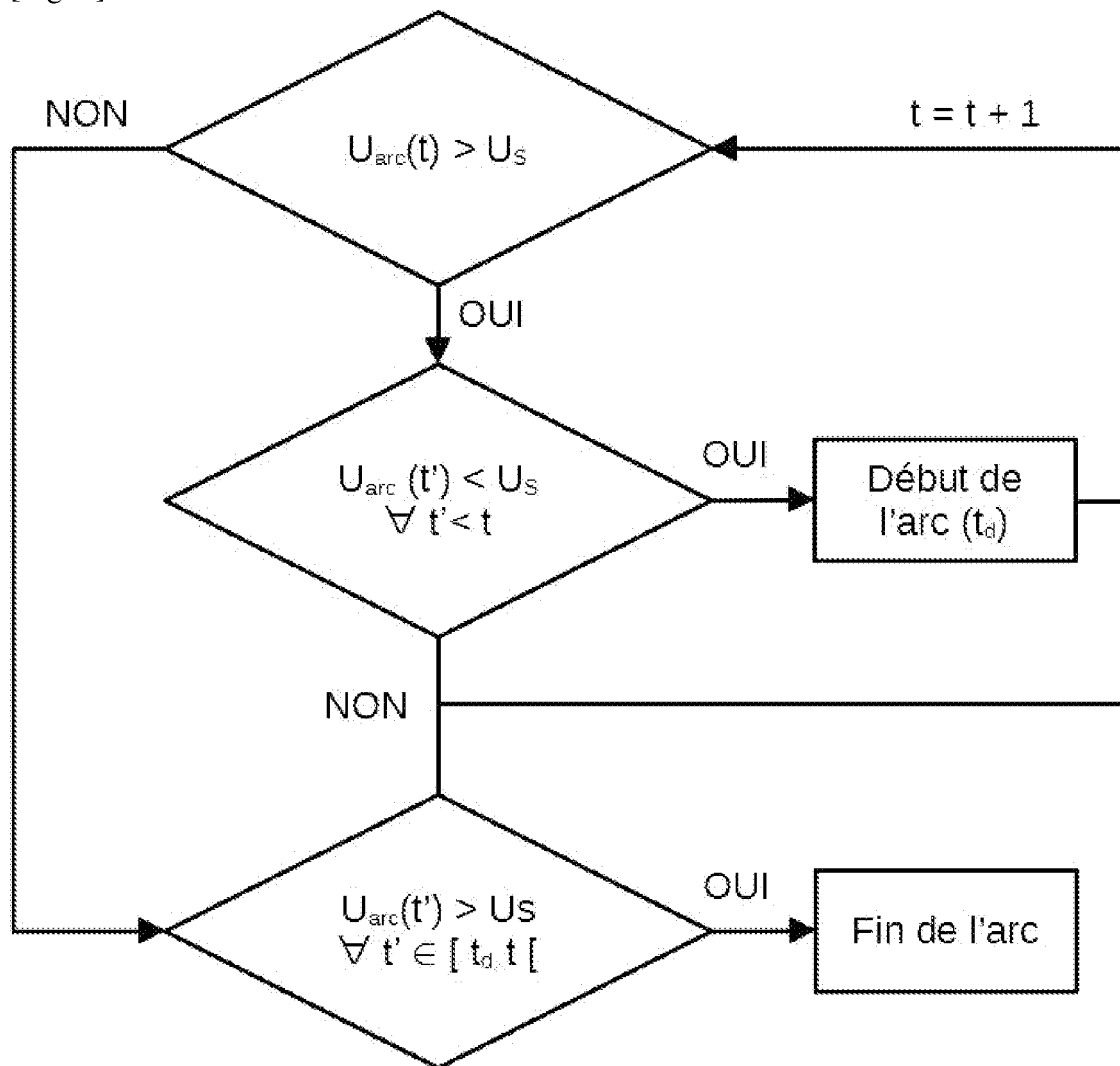
[Fig. 2]



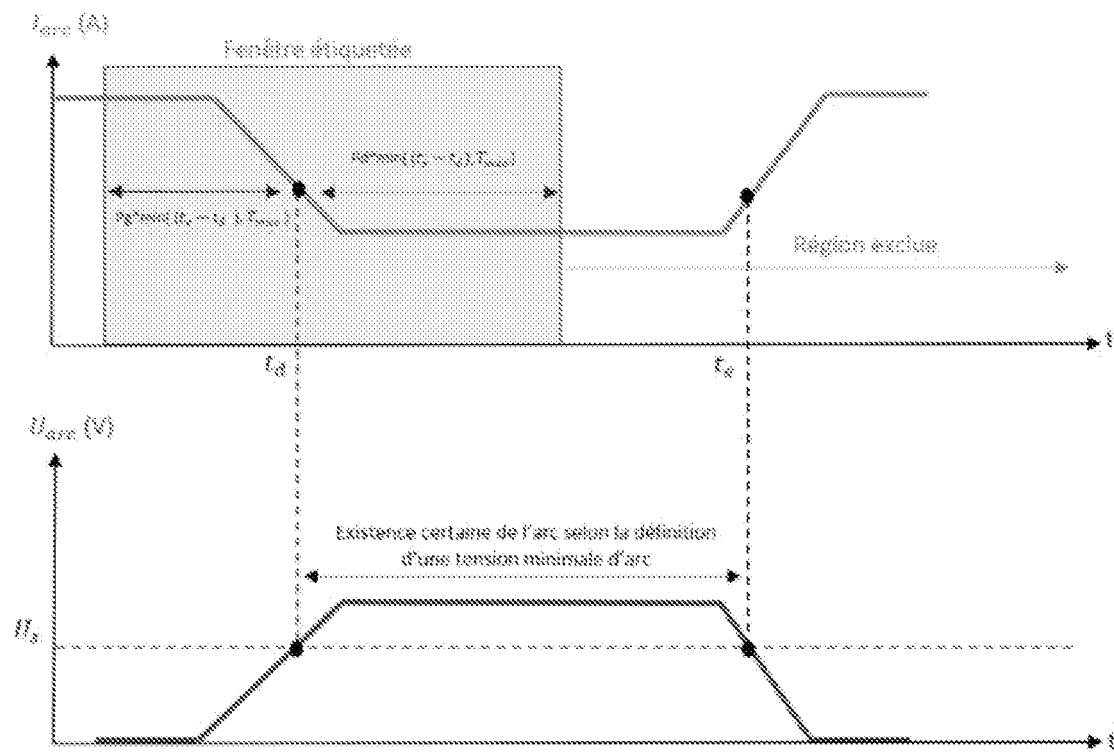
[Fig. 3]



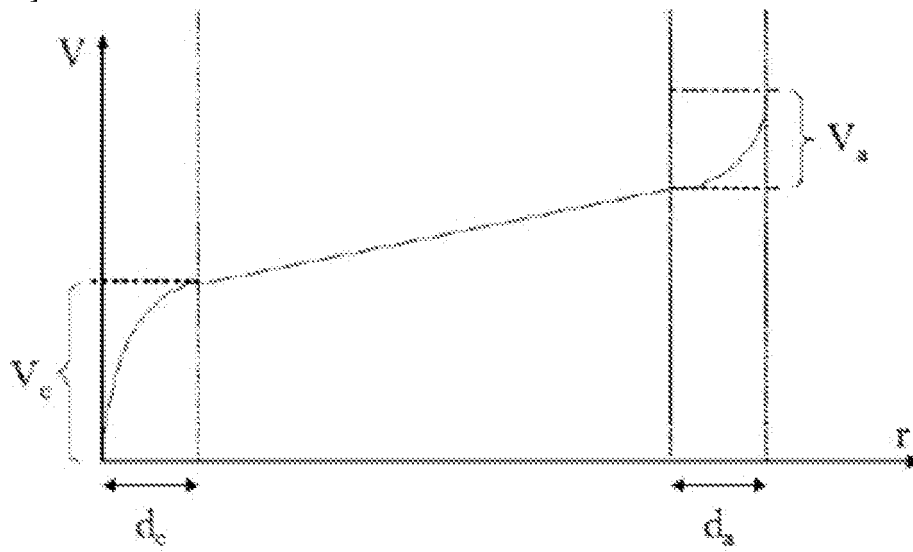
[Fig. 4]



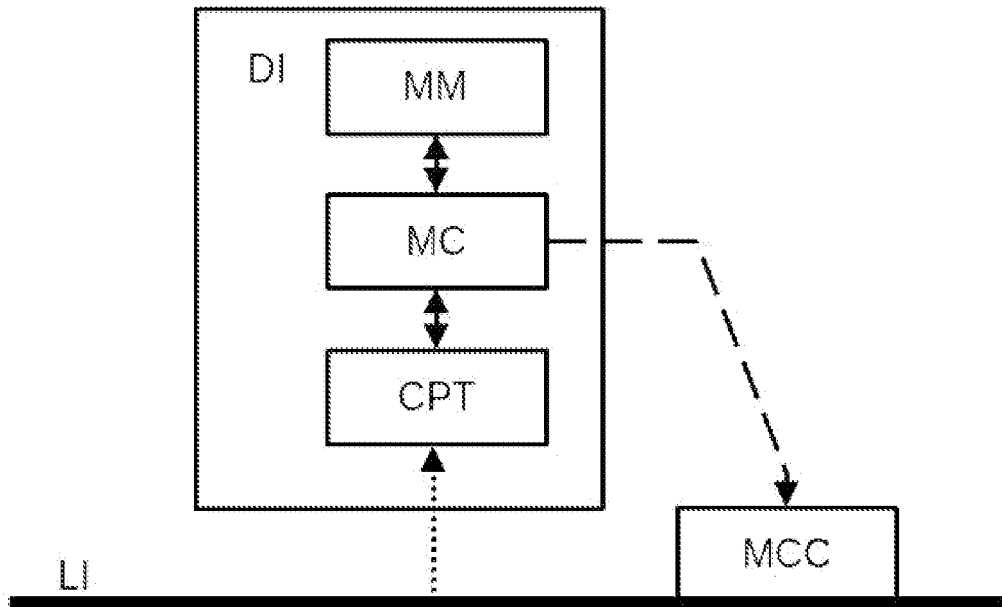
[Fig. 5]



[Fig. 6]



[Fig. 7]



RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 918271
FR 2302544

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X,D	Chabert A ET AL: "AC Series Arc-Fault Detection With A Transformer Neural Network", , 30 juin 2022 (2022-06-30), XP093090940, DOI: 10.13140/RG.2.2.31060.48004 Extrait de l'Internet: URL:https://www.researchgate.net/profile/Alexis-Chabert/publication/361482856_AC_Series_Arc-Fault_Detection_With_A_Transformer_Neural_Network/links/62b4099c1010dc02cc54d8c4/AC-Series-Arc-Fault-Detection-With-A-Transformer-Neural-Network.pdf?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aWw9UiwicGFnZSI [extrait le 2023-10-12] * abrégé * * figures 2, 5, 6 * * sections 3.1, 3.2, 4, 4.2.2, 4.2.4, 4.3, 5, 6 * * le document en entier *	1-10	G01R 31/50 G01R 31/52 G06N 20/00 G06N 3/02 H02H 1/00
X	US 2023/059561 A1 (CHAKRABORTY INDRASIS [US] ET AL) 23 février 2023 (2023-02-23) * abrégé * * alinéas [0004], [0014] - [0017], [0020], [0033] * * revendications 1-3, 10 * * le document en entier *	1-10	G06F G01R G06N
X	CN 111 123 048 A (UNIV WENZHOUE) 8 mai 2020 (2020-05-08) * abrégé * * figure 6 * * revendication 1 * * alinéas [0007] - [0012], [0025] - [0030], [0067] - [0072] * * le document en entier *	1-10	
Date d'achèvement de la recherche		Examinateur	
13 octobre 2023		Joris, Pierre	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS			
X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	

RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 918271
FR 2302544

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X	VU HIEN DUC ET AL: "Multi criteria series arc fault detection based on supervised feature selection", INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTRICAL POWER & ENERGY SYSTEMS, vol. 113, 18 mai 2019 (2019-05-18), pages 23-34, XP085724375, ISSN: 0142-0615, DOI: 10.1016/J.IJEPES.2019.05.012 * abrégé * * figures 2, 14, 15 * * sections 2, 3.C, 5.A-B, 6 * * le document en entier * -----	1-10	
A	GEORGIJEVIC NIKOLA L ET AL: "The Detection of Series Arc Fault in Photovoltaic Systems Based on the Arc Current Entropy", IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, USA, vol. 31, no. 8, 1 août 2016 (2016-08-01), pages 5917-5930, XP011608633, ISSN: 0885-8993, DOI: 10.1109/TPEL.2015.2489759 [extrait le 2016-03-02] * abrégé * * sections II.B, III.A-B * * le document en entier * ----- -/--	6	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
13 octobre 2023		Joris, Pierre	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant			

1

EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)

RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 918271
FR 2302544

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
A	KIM JONATHAN C ET AL: "Series PV Arc Fault Detection using Current Demodulation and Autocorrelation Coefficients", 2022 IEEE ENERGY CONVERSION CONGRESS AND EXPOSITION (ECCE), IEEE, 9 octobre 2022 (2022-10-09), pages 1-7, XP034235117, DOI: 10.1109/ECCE50734.2022.9947524 [extrait le 2022-11-30] * abrégé * * sections II.B-E * * le document en entier * -----	6	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
13 octobre 2023		Joris, Pierre	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant			

RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2302544 FA 918271

Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française