

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.

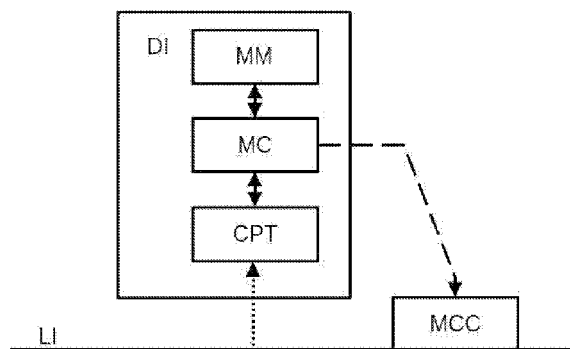
74 Mandataire(s) : Cabnet CAMUS LEBKIRI.

54 Procédé de détection de la présence d'un arc électrique et dispositif associé.

57 Procédé de détection de la présence d'un arc élec-
trique et dispositif associé

L'invention concerne un procédé mis en œuvre par ordi-
nateur de détection de la présence d'un arc électrique sur
une ligne électrique (LI) à l'aide d'un algorithme d'apprentis-
sage machine, effectué à l'aide d'une mesure corrélée dans
le temps de la tension d'arc, du courant et de la tension de
source ainsi que d'un modèle de connaissance permettant
de relier la tension d'arc et le courant à des constantes dé-
pendant du modèle de connaissance, mis en œuvre après
une phase d'apprentissage au cours de laquelle on ajuste
un modèle d'apprentissage prenant en entrée le courant et
la tension de source et fournissant en sortie la tension d'arc
et les constantes du modèle de connaissance ; le procédé
comprenant une détection en continu de la présence d'un
arc à l'aide d'une fonction de décision dépendant d'une
fonction de coût utilisée lors de la phase d'apprentissage.

Figure à publier avec l'abrégié : Figure 2



Description

Titre de l'invention : Procédé de détection de la présence d'un arc électrique et dispositif associé

DOMAINE TECHNIQUE DE L'INVENTION

- [0001] Le domaine technique de l'invention est celui de la détection de la présence d'un arc électrique à l'aide d'une méthode par apprentissage artificiel.
- [0002] La présente invention concerne un procédé et un dispositif de détection de la présence d'un arc électrique à l'aide d'une méthode par apprentissage et en particulier une méthode dans laquelle un modèle par apprentissage et un modèle de connaissance sont utilisés conjointement.

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 autoentretenu 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) à la suite d'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 fortes 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] Jusqu'à présent, les solutions existantes pour détecter les arcs électriques de défaut ont systématiquement montré leurs faiblesses, soit en termes de fiabilité, soit en termes de robustesse. Les raisons sont multiples, mais il est intéressant de citer l'imprécision des modèles d'arcs de défauts utilisés pour calibrer les systèmes, la méconnaissance (ou la simplification) de l'architecture électrique ciblée, ou encore les contraintes environnementales rencontrées qui sont autant de raisons qui diminuent les performances des technologies proposées.
- [0014] Afin de tenter de satisfaire ces fortes exigences, de nouvelles méthodes sont recherchées. Parmi elles, 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.
- [0015] 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 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.

[0016] 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).

[0017] Afin de détecter la formation d'arc de défaut, le document EP3695476 A1 propose une détection par apprentissage artificiel en utilisant un réseau de neurones récurrents. Il s'agit d'une méthode de détection utilisant uniquement l'information mathématique proposée par les outils d'apprentissage artificiel. En particulier, dans la méthode proposée, la phase d'apprentissage n'utilise pas d'équations physiques des arcs. Le document « *Physics-Informed Learning for High Impedance Faults Detection*, Wenting Li, Deepjyoti Deka, 2021 IEEE Madrid PowerTech » propose une méthode de détection dite physiquement informée des défauts à haute impédance dans les micro-réseaux (il ne s'agit donc pas du même type de décharge que celle produite par un arc électrique). Plus particulièrement, la détection repose sur une méthode issue de l'apprentissage artificiel ainsi que des connaissances issues de la physique du phénomène à détecter. Cependant, dans ce document, l'information physique ne vient pas d'un modèle complet de connaissance du comportement de la décharge. L'information physique concernant la décharge est en effet issue d'une mesure d'écart entre un diagramme de phase tension - courant dans un réseau, sans défaut et avec défaut.

[0018] Ainsi, les méthodes de l'état de la technique ne permettent pas, en général, d'obtenir la fiabilité et la robustesse requise pour une utilisation en aéronautique. Aussi, il existe un besoin pour une méthode de détection d'arcs électriques permettant d'améliorer de manière significative la capacité de détection des méthodes existantes, notamment pour des arcs électriques de type arc série.

Résumé de l'invention

[0019] L'invention offre une solution aux problèmes évoqués précédemment, en proposant un procédé de détection reposant sur une approche qui consiste à tirer parti aussi bien des données expérimentales que des connaissances physiques pour la conception par

apprentissage d'un modèle semi-physique de détection d'arcs.

[0020] Pour cela, un premier aspect de l'invention concerne un procédé mis en œuvre par ordinateur de détection de la présence d'un arc électrique 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'un arc électrique, chaque mesure de la pluralité de mesures comprenant une mesure corrélée dans le temps de la tension d'arc V_{arc} , du courant I et de la tension de source V_{source} ;
- d'un modèle de connaissance reliant la tension d'arc V_{arc} et le courant I à des constantes dépendant du modèle de connaissance.

[0021] Le procédé selon un premier aspect de l'invention est mis en œuvre à l'aide d'un modèle d'apprentissage issu d'une phase d'apprentissage au cours de laquelle, à l'aide des mesures de la pluralité de mesures et du modèle de connaissance, une étape d'ajustement du modèle d'apprentissage est mise en œuvre, le modèle d'apprentissage prenant en entrée le courant I et la tension de source V_{source} et fournissant en sortie la tension d'arc V_{arc} et les constantes du modèle de connaissance, l'apprentissage étant effectué à l'aide d'une fonction de coût L donnée par la relation suivante $L = L_1 + L_2$ où L_1 est une première sous-fonction de coût mesurant un premier écart entre la tension d'arc $V_{arc}^{predict}$ prédite par le modèle d'apprentissage et la tension d'arc V_{arc} mesurée :

[0022]
$$L_1 = |V_{arc}^{predict} - V_{arc}|$$

[0023] et où L_2 est une deuxième sous-fonction de coût mesurant un deuxième écart entre la prédiction du modèle de connaissance et les valeurs mesurées.

[0024] Le procédé selon un premier aspect de l'invention comprend une phase de détection comportant :

- Une étape de mesure en continu du courant I et de la tension de source V_{source} sur la ligne électrique, de sorte à acquérir des données d'entrée relatives au courant I et à la tension de source V_{source} sur une fenêtre de mesure $\{I(t_m), V_{source}(t_m)\}_{m=1}^M$ où M est le nombre de points de mesure dans la fenêtre de mesure, $I(t_m)$ est le courant au temps t_m et $V_{source}(t_m)$ est la tension de source au temps t_m ;
- Une étape de détermination en continu de la présence d'un arc, à l'aide d'une fonction de décision permettant, en fonction des M dernières données d'entrée relatives au courant I et à la tension de source V_{source} mesurées sur la ligne électrique lors de l'étape de mesure, de détecter la présence d'un arc, la fonction de décision étant une fonction de la deuxième sous-fonction de coût.

[0025] Grâce à l'invention, il est possible d'utiliser la physique des arcs (sur la base de modèles de connaissance d'arcs électriques) afin de prédire une partie du com-

portement d'un arc de défaut et ainsi contribuer à l'apprentissage du modèle. Cela permet de prendre une décision plus efficace que les solutions proposées par l'état de la technique, et de diminuer la quantité de données brutes nécessaires à l'apprentissage (par exemple, en limitant la quantité de signaux de charges issues de l'architecture avion), en comparaison d'un modèle d'apprentissage selon l'état de la technique. Ce résultat est notamment obtenu par l'association des informations expérimentales avec une loi physique. De plus, la variation de la longueur d'arc n'a pas besoin d'être connue a priori, car elle apparaît de manière implicite dans les variables du modèle de connaissance.

[0026] 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.

[0027] Dans un mode de réalisation, la fonction de décision est définie par l'expression suivante :

$$[0028] \quad f(X) = \begin{cases} \text{Arc si } \sum_{m=1}^M L_2(X_m) \leq \varepsilon \\ \text{Autre si } \sum_{m=1}^M L_2(X_m) > \varepsilon \end{cases}$$

[0029] Où $X_m = \{I(t_m), V_{source}(t_m)\}$, ε est une valeur de seuil de détection, et $L_2(X_m)$ est la valeur de la deuxième sous-fonction de coût L_2 déterminée à l'aide du modèle d'apprentissage et calculée au point X_m .

[0030] Dans un mode de réalisation, le modèle de connaissance est le modèle de Mayr et la deuxième sous-fonction de coût L_2 prend la forme suivante :

$$[0031] \quad L_2 = \frac{1}{I} \frac{dI}{dt} - \frac{1}{V_{arc}} \frac{dV_{arc}}{dt} - \frac{1}{\tau} \left(\frac{V_{arc} I}{P_0} - 1 \right)$$

[0032] où τ est la constante d'arc et P_0 est la puissance de refroidissement.

[0033] Dans un mode de réalisation, le modèle de connaissance est le modèle de Cassie et la deuxième sous-fonction de coût L_2 prend la forme suivante :

$$[0034] \quad L_2 = \frac{1}{I} \frac{dI}{dt} - \frac{1}{V_{arc}} \frac{dV_{arc}}{dt} - \frac{1}{\tau} \left(\frac{V_{arc}^2}{V_0^2} - 1 \right)$$

[0035] où τ est la constante d'arc, et V_0 est une constante correspondant à une tension minimale d'arc (c'est-à-dire à une valeur minimale de tension sur la ligne électrique où apparaît l'arc).

[0036] Dans un mode de réalisation, le modèle de connaissance est le modèle de Shavemaker et la deuxième sous-fonction de coût L_2 prend la forme suivante :

$$[0037] \quad L_2 = \frac{1}{I} \frac{dI}{dt} - \frac{1}{V_{arc}} \frac{dV_{arc}}{dt} - \frac{1}{\tau} \left(\frac{V_{arc} I}{P_0 + V_0 I} - 1 \right)$$

[0038] où τ est la constante d'arc, P_0 est la puissance de refroidissement et V_0 est une constante correspondant à une tension minimale d'arc (c'est-à-dire à une valeur

minimale de tension sur la ligne électrique où apparaît l'arc).

- [0039] Dans un mode de réalisation, la ligne électrique est équipée d'un dispositif de coupure permettant de couper le courant dans ladite ligne, le procédé comprenant, lorsqu'un arc électrique est détecté lors de l'étape de détection, une étape d'envoi, au dispositif de coupure, d'une instruction de coupure du courant sur la ligne considérée.
- [0040] Dans un mode de réalisation, le modèle d'apprentissage est réalisé à l'aide d'un réseau de neurones formels.
- [0041] Dans un mode de réalisation, le modèle d'apprentissage est réalisé à l'aide d'une machine à vecteurs support.
- [0042] Un deuxième aspect de l'invention concerne un dispositif de détection de la présence d'un arc 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.
- [0043] 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.
- [0044] 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.
- [0045] Un cinquième aspect de l'invention concerne un aéronef comprenant le dispositif de détection de présence d'un arc tel que défini ci-avant.
- [0046] 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

- [0047] Les figures sont présentées à titre indicatif et nullement limitatif de l'invention.
- [0048] La [Fig.1] présente un ordinogramme du procédé selon un exemple de réalisation de l'invention.
- [0049] La [Fig.2] montre une représentation schématique d'un dispositif selon un exemple de réalisation de l'invention.

DESCRIPTION DETAILLEE

- [0050] Les figures sont présentées à titre indicatif et nullement limitatif de l'invention.
- [0051] **Procédé de détection de la présence d'un arc électrique sur une ligne électrique**
- [0052] 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'un arc électrique sur une ligne électrique à l'aide d'une méthode par apprentissage artificiel. Plus particulièrement, dans le procédé selon l'invention, l'apprentissage est effectué à l'aide d'une pluralité de mesures relatives à la formation d'un arc électrique, chaque mesure de la pluralité

de mesures comprenant une mesure corrélée en temps de la tension d'arc V_{arc} , du courant I et de la tension de source V_{source} .

- [0053] Le procédé selon l'invention est notamment original en ce que, en plus d'un modèle par apprentissage, sa conception repose également sur l'utilisation d'un modèle de connaissance permettant de relier la tension d'arc V_{arc} et le courant I à des constantes qui dépendent du choix du modèle de connaissance. Plus particulièrement, le principe de la présente invention repose sur la mise en œuvre d'une phase PA d'apprentissage qui utilise deux techniques : la modélisation par apprentissage artificiel et la modélisation de connaissance. Ceci permet de tirer parti de la capacité de la modélisation par apprentissage artificiel et de l'expertise apportée par la méthode issue de la physique du mécanisme d'arc de défaut.
- [0054] Pour mémoire, la modélisation par apprentissage utilise un outil mathématique de régression issu des méthodes de l'apprentissage artificiel (« *machine learning* » en anglais). Par exemple, cet outil peut prendre la forme d'un réseau de neurones formels. Ce type d'approche, appelée parfois modélisation « boîte noire », où seules les mesures sont utilisées, présente cependant certaines limitations, notamment du fait que la base de données utilisée lors de l'apprentissage n'est pas exhaustive et ne dispose pas de tous les types d'arcs à détecter.
- [0055] Pour mémoire également, la modélisation de connaissance permet de décrire, au moins partiellement, le comportement physique de l'arc que l'on cherche à détecter. Cependant, cette modélisation présente également certaines limitations. En particulier, la généralisation de cette méthode peut être remise en cause : son domaine de validité et ses performances peuvent être par exemple diminués par la grande variabilité des paramètres de l'arc et de son environnement.
- [0056] L'approche de la présente invention propose un procédé 100 qui permet de corriger les limitations de chacune de ces méthodes en les combinant. Plus particulièrement, dans le procédé selon l'invention, le modèle de connaissance issu de la physique de l'arc permet de définir un cadre au comportement du défaut à détecter. Ainsi, dans le cas d'une rareté des données pour l'ajustement du modèle par apprentissage, le modèle de connaissance permet de guider la décision et de ne pas s'écarter du fonctionnement connu du mécanisme étudié, ici l'arc de défaut.
- [0057] D'autre part, une imprécision du modèle de connaissance peut être ajustée grâce aux données qui contiennent toute l'information sur la variation des grandeurs d'intérêt. Plus précisément, l'apprentissage du modèle d'apprentissage se fait par la reconnaissance des signatures d'arcs au sein des données expérimentales. Dans le même temps, il s'agit de guider cette phase d'apprentissage par une expertise provenant d'une (ou des) loi(s) physique(s) issue(s) de la connaissance de la physique des arcs.
- [0058] En résumé, dans la présente invention, la détection d'arc est conçue et ajustée grâce à

des outils issus de l'apprentissage artificiel et de connaissances issues de la physique du système.

[0059] Phase d'apprentissage

[0060] Le procédé selon l'invention comprend tout d'abord une phase d'apprentissage. Cette phase a pour but d'ajuster le modèle boîte noire à l'aide du modèle de connaissance et ainsi obtenir une fonction de décision qui, à partir de mesures réalisées sur la ligne électrique, donne un booléen (ou tout autre représentation équivalente) représentatif de la présence ou non d'un arc de défaut sur la ligne électrique.

[0061] Afin de pouvoir effectuer cet apprentissage, il est nécessaire de disposer d'une pluralité de mesures, chaque mesure de la pluralité de mesures comportant une mesure corrélée en temps du courant I , de la tension de source V_{source} et de la tension d'arc V_{arc} . On entend par « corrélée en temps » qu'une mesure de courant I , une mesure de la tension de source V_{source} et une mesure de tension d'arc V_{arc} ayant la même abscisse t ont été mesurées au même instant t .

[0062] Si ces mesures ne sont pas disponibles, il peut être nécessaire de recueillir ces dernières, par exemple lors de mesures en laboratoires. Pour cela, dans un mode de réalisation, la phase PA d'apprentissage comprend une étape d'acquisition d'une pluralité de mesures, chaque mesure comprenant une mesure corrélée en temps du courant I , de la tension de source V_{source} et de la tension d'arc V_{arc} . Comme déjà mentionné, cette étape 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.

[0063] A l'issue de cette étape, une pluralité de mesure est obtenue, chaque mesure de cette pluralité de mesures pouvant être décrite à l'aide de la notation suivante :

$$[0064] \quad \{I(t_m), V_{arc}(t_m), V_{source}(t_m)\}_{m=1}^M$$

[0065] où t_m est le temps discrétisé, $I(t_m)$ est le courant en fonction de t_m , $V_{arc}(t_m)$ est la tension d'arc en fonction de t_m , $V_{source}(t_m)$ est la tension de source en fonction de t_m et M est le nombre total des points disponibles dans la mesure considérée.

[0066] La phase PA d'apprentissage comprend également, à l'aide des mesures de la pluralité de mesures, un étape E1 d'ajustement d'un modèle d'apprentissage prenant en entrée le courant I et la tension de source V_{source} et fournissant en sortie la tension d'arc V_{arc} et les constantes associées au modèle de connaissance choisi (par exemple, la constante d'arc τ et la puissance de refroidissement P_0 lorsque le modèle de connaissance est le modèle de Mayr). Lors de cette étape E1, l'apprentissage est effectué à l'aide d'une fonction de coût L à minimiser et donnée par la relation suivante $L = L_1 + L_2$. Pour mémoire, une fonction de coût est une fonction paramétrable définissant une erreur. Plus le résultat de la fonction de coût est proche de 0,

plus l'erreur est faible.

[0067] Dans la relation précédente, le terme L_1 est défini comme étant la comparaison des valeurs de sortie calculées par le modèle d'apprentissage avec les valeurs mesurées, cette erreur n'étant calculée que pour la tension d'arc V_{arc} . Aussi, L_1 représente l'écart entre la tension d'arc $V_{arc}^{predict}$ prédit par le modèle d'apprentissage et la tension d'arc V_{arc} mesurée et donnée par la relation suivante :

$$[0068] \quad L_1 = |V_{arc}^{predict} - V_{arc}|$$

[0069] Le terme L_2 représente quant à lui l'écart entre la prédiction du modèle de connaissance et les valeurs mesurées. Son expression dépend donc du modèle de connaissance utilisé. En tout état de cause, le modèle de connaissance utilisé doit pouvoir fournir, en sortie, la tension d'arc V_{arc} .

[0070] Dans un mode de réalisation qui servira d'illustration dans la suite de la description, le modèle de connaissance utilisé est le modèle de Mayr. Dans ce mode de réalisation, le modèle ajusté par apprentissage est réalisé à l'aide d'un réseau de neurones formels.

[0071] Dans un mode de réalisation alternatif, le modèle de connaissance est un modèle de Cassie. Dans ce mode de réalisation, le modèle ajusté par apprentissage peut être réalisé à l'aide d'une machine à vecteurs support.

[0072] Dans un mode de réalisation alternatif, le modèle de connaissance est un modèle de Shavemaker. Dans ce mode de réalisation, le modèle ajusté par apprentissage peut être réalisé à l'aide d'une machine à vecteurs support.

[0073] Dans la suite, et à des fins d'illustration, le modèle de Mayr sera utilisé. Pour mémoire, le modèle de Mayr est issu du bilan d'énergie entre la quantité d'énergie perdue à cause du refroidissement et celle fournie par le circuit. En particulier, le modèle de Mayr propose l'équation dynamique suivante :

$$[0074] \quad \frac{d \ln G_{arc}}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{V_{arc}^2 G_{arc}}{P_0} - 1 \right)$$

[0075] où $G_{arc} = \frac{1}{R_{arc}} = \frac{I}{V_{arc}}$ est la conductance de la colonne d'arc (en négligeant l'effet des pieds d'arcs). Cette équation peut se mettre sous la forme :

$$[0076] \quad \frac{1}{I} \frac{dI}{dt} - \frac{1}{V_{arc}} \frac{dV_{arc}}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{V_{arc} I}{P_0} - 1 \right)$$

[0077] où τ est la constante de temps d'arc avec $\tau = \tau(T, P, l)$ et P_0 est la puissance de refroidissement avec $P_0 = P_0(T, P, l)$, T étant la température ambiante, P étant la pression ambiante et l étant la longueur d'arc.

[0078] La fonction de coût L_2 peut alors s'écrire de la manière suivante :

$$[0079] \quad L_2 = \frac{1}{I} \frac{dI}{dt} - \frac{1}{V_{arc}} \frac{dV_{arc}}{dt} - \frac{1}{\tau} \left(\frac{V_{arc} I}{P_0} - 1 \right)$$

[0080] L'étape d'apprentissage vise alors notamment à ajuster un modèle mathématique qui déterminera une fonction :

[0081] $f : (I(t_m), V_{source}(t_m)) \rightarrow (V_{arc}(t_m), \tau, P_0)$

[0082] Plus particulièrement, l'algorithme d'apprentissage utilise les valeurs de mesure de sorte à déterminer les variables de sortie $(V_{arc}(t_m), \tau, P_0)$. Cependant, seule la tension d'arc $V_{arc}(t_m)$ est disponible dans les mesures de la pluralité de mesures. Aussi, la détermination du couple (τ, P_0) (dans le cas du modèle Mayr), qui doit satisfaire l'équation sera effectuée en utilisant le ou les modèles de connaissance choisis.

[0083] Ainsi, à l'issue de cette étape E1, la fonction f introduite précédemment est déterminée (et n'évolue plus lors de la phase de détection présentée dans la suite).

[0084] Phase PD de détection

[0085] Une fois la phase d'apprentissage achevée, le modèle obtenu qui minimise au mieux L , est alors capable de prévoir correctement les sorties $(V_{arc}(t_m), \tau, P_0)$ à partir des entrées $(I(t_m), V_{source}(t_m))$ provenant des signaux d'arcs.

[0086] Au cours de la phase PD de détection, le modèle va ainsi recevoir une quantité M d'entrées $\{I(t_m), V_{source}(t_m)\}_{m=1}^M$ qui représentent une fenêtre de signal acquise à partir de capteurs (typiquement le courant de ligne I et la tension côté source V_{source} , mais d'autres grandeurs peuvent être envisagées en fonction du modèle de connaissance comme la température, la pression, etc.). Ensuite, le modèle d'apprentissage au travers de la fonction f introduite précédemment effectue une prédiction de M sorties $\{V_{arc}(t_m), \tau, P_0\}_{m=1}^M$, qui dépendent du modèle de connaissance choisi. Les sorties calculées par le modèle permettent d'évaluer la fonction d'erreur L_2 et ainsi déterminer si le signal correspondant est un arc (si la prédiction est bonne, c'est à dire que la valeur de la fonction d'erreur est faible) ou non (si la prédiction est mauvaise, c'est à dire que la valeur de la fonction d'erreur n'est pas faible).

[0087] Le principe énoncé dans le paragraphe précédent peut être formulé de manière simple à l'aide de la fonction d'erreur L_2 introduite précédemment à l'aide de l'expression suivante :

[0088]
$$Fen\hat{e}tre = \begin{cases} Arc, & si \sum_{m=1}^M L_2 \leq \varepsilon \\ Autre, & si \sum_{m=1}^M L_2 > \varepsilon \end{cases}$$

[0089] L'ajustement de la valeur du seuil ε va dépendre de la disponibilité de données dites nominales. Cette valeur de seuil pourra être plus ou moins sensible selon le domaine d'application. Elle pourra être définie empiriquement (éventuellement par calibration), en fonction des performances souhaitées du modèle de détection. Les mesures de performances peuvent par exemple être évaluées comme le taux de faux négatifs et de faux positifs.

[0090] Aussi, la phase PD de détection du procédé selon l'invention comprend une étape E2 de mesure en continu du courant I et de la tension de source V_{source} sur la ligne électrique. C'est à partir de ces mesures en continu qu'il est ensuite possible de constituer une fenêtre de M mesures notée $\{I(t_m), V_{source}(t_m)\}_{m=1}^M$ (précédemment introduite). Bien entendu, il s'agit d'une fenêtre glissante qui évolue au fil des mesures acquises lors de l'étape E2 de mesure.

[0091] C'est à partir de cette fenêtre glissante qu'il est possible de détecter en continu la présence d'un arc de défaut.

[0092] La phase PD de détection comprend également une étape E3 de détermination en continu de la présence d'un arc à l'aide d'une fonction de décision permettant, en fonction des M dernières données d'entrée relative au courant I et à la tension de source V_{source} mesurée sur la ligne électrique lors de l'étape de mesure, de détecter la présence d'un arc. La fonction de décision est, selon un exemple, définie par l'expression suivante :

$$[0093] \quad f(X) = \begin{cases} \text{Arc si } \sum_{m=1}^M L_2(X_m) \leq \varepsilon \\ \text{Autre si } \sum_{m=1}^M L_2(X_m) > \varepsilon \end{cases}$$

[0094] Où $X_m = \{I(t_m), V_{source}(t_m)\}$.

[0095] Dans un mode de réalisation, la ligne électrique est équipée d'un dispositif de coupure de courant permettant de couper le courant dans la ligne sur laquelle est opérée la détection, et le procédé 100 selon l'invention comprend, lorsqu'un arc électrique est détecté lors de l'étape E3 de détermination de la présence d'un arc, une étape d'envoi, au dispositif de coupure, d'une instruction de coupure du courant sur la ligne considérée. Cela permet d'éviter ou, à tout le moins, limiter les dégâts associés à la formation d'un arc électrique sur la ligne de courant considérée.

[0096] **Dispositif de détection de la présence d'un arc électrique**

[0097] Un deuxième aspect de l'invention illustré à la [Fig.2] concerne un dispositif DI de comprenant les moyens configurés pour mettre en œuvre un procédé 100 selon l'invention. 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 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).

- [0098] 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'un arc électrique 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'un arc électrique, chaque mesure de la pluralité de mesures comprenant une mesure corrélée dans le temps de la tension d'arc V_{arc} , du courant I et de la tension de source V_{source} ;
- d'un modèle de connaissance reliant la tension d'arc V_{arc} et le courant I à des constantes dépendant du modèle de connaissance ;

le procédé (100) étant mis en œuvre à l'aide d'un modèle d'apprentissage issu d'une phase (PA) d'apprentissage au cours de laquelle, à l'aide des mesures de la pluralité de mesures et du modèle de connaissance, une étape (E1) d'ajustement du modèle d'apprentissage est mise en œuvre, le modèle d'apprentissage prenant en entrée le courant I et la tension de source V_{source} et fournissant en sortie la tension d'arc V_{arc} et les constantes du modèle de connaissance, l'apprentissage étant effectué à l'aide d'une fonction de coût L donnée par la relation suivante $L = L_1 + L_2$ où L_1 est une première sous-fonction de coût mesurant un premier écart entre la tension d'arc $V_{arc}^{predict}$ prédite par le modèle d'apprentissage et la tension d'arc V_{arc} mesurée :

$$L_1 = |V_{arc}^{predict} - V_{arc}|$$

et où L_2 est une deuxième sous-fonction de coût mesurant un deuxième écart entre la prédiction du modèle de connaissance et les valeurs mesurées ;

le procédé comprenant une phase (PD) de détection comportant :

- Une étape (E2) de mesure en continu du courant I et de la tension de source V_{source} sur la ligne électrique (LI), de sorte à acquérir des données d'entrée relatives au courant I et à la tension de source V_{source} sur une fenêtre de mesure $\{I(t_m), V_{source}(t_m)\}_{m=1}^M$ où M est le nombre de points de mesure dans la fenêtre de mesure, $I(t_m)$ est le courant au temps t_m et $V_{source}(t_m)$ est la tension de source au temps t_m ;

- Une étape (E3) de détermination en continu de la présence d'un arc, à l'aide d'une fonction de décision permettant, en fonction des M dernières données d'entrée relatives au courant I et à la tension de source V_{source} mesurées sur la ligne électrique (LI) lors de l'étape de mesure, de détecter la présence d'un arc, la fonction de décision étant une fonction de la deuxième sous-fonction de coût.

[Revendication 2] Procédé selon la revendication précédente dans lequel la fonction de décision est définie par l'expression suivante :

$$f(X) = \begin{cases} Arc & si \sum_{m=1}^M L_2(X_m) \leq \varepsilon \\ Autre & si \sum_{m=1}^M L_2(X_m) > \varepsilon \end{cases}$$

Où $X_m = \{I(t_m), V_{source}(t_m)\}$, ε est une valeur de seuil de détection, et $L_2(X_m)$ est la valeur de la deuxième sous-fonction de coût L_2 déterminée à l'aide du modèle d'apprentissage calculée au point X_m .

[Revendication 3] Procédé selon la revendication précédente dans lequel le modèle de connaissance est le modèle de Mayr et la deuxième sous-fonction de coût L_2 prend la forme suivante :

$$L_2 = \frac{1}{I} \frac{dI}{dt} - \frac{1}{V_{arc}} \frac{dV_{arc}}{dt} - \frac{1}{\tau} \left(\frac{V_{arc} I}{P_0} - 1 \right)$$

où τ est la constante d'arc et P_0 est la puissance de refroidissement.

[Revendication 4] Procédé selon la revendication 1 dans lequel le modèle de connaissance est le modèle de Cassie et la deuxième sous-fonction de coût L_2 prend la forme suivante :

$$L_2 = \frac{1}{I} \frac{dI}{dt} - \frac{1}{V_{arc}} \frac{dV_{arc}}{dt} - \frac{1}{\tau} \left(\frac{V_{arc}^2}{V_0^2} - 1 \right)$$

où τ est la constante d'arc et V_0 est la tension minimale d'arc.

[Revendication 5] Procédé selon la revendication 1 dans lequel le modèle de connaissance est le modèle de Shavemaker et la deuxième sous-fonction de coût L_2 prend la forme suivante :

$$L_2 = \frac{1}{I} \frac{dI}{dt} - \frac{1}{V_{arc}} \frac{dV_{arc}}{dt} - \frac{1}{\tau} \left(\frac{V_{arc} I}{P_0 + V_0^2 I} - 1 \right)$$

où τ est la constante d'arc, P_0 est la puissance de refroidissement et V_0 est la tension minimale d'arc.

[Revendication 6] Procédé (100) selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la ligne électrique (LI) est équipée d'un dispositif de coupure (MCC) permettant de couper le courant dans ladite ligne, le procédé (100)

comprenant, lorsqu'un arc électrique est détecté lors de l'étape (E3) de détection, une étape d'envoi, au dispositif de coupure (MCC), d'une instruction de coupure du courant sur la ligne (LI) considérée.

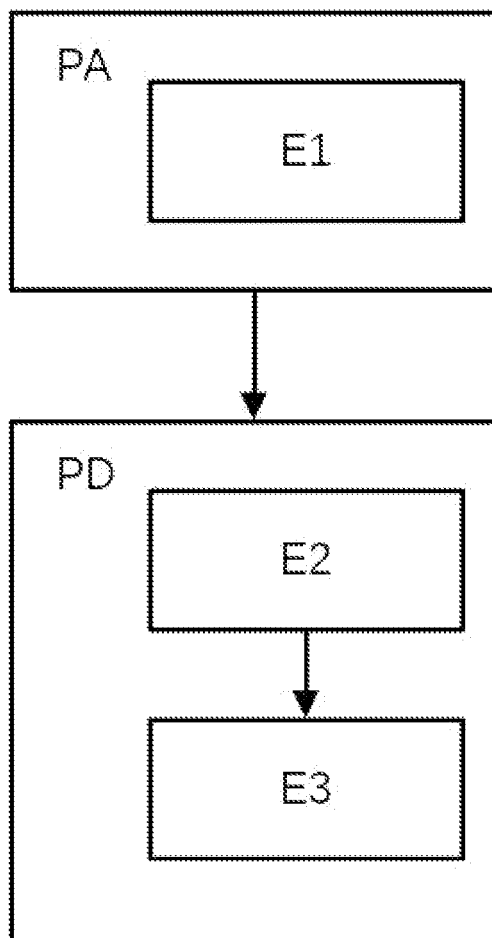
[Revendication 7] Dispositif (DI) de détection de la présence d'un arc dans une ligne (LI) de courant, le dispositif comprenant un moyen de mesure (CPT) configuré pour mesurer le courant circulant dans la ligne de courant et des moyens configurés pour mettre en œuvre un procédé (100) selon l'une des revendications 1 à 5.

[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 7.

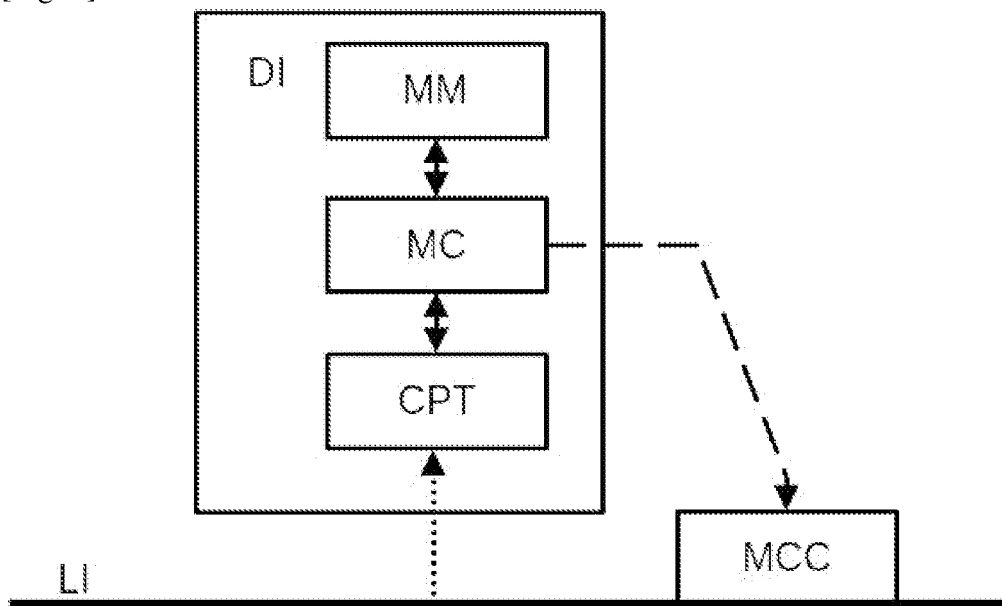
[Revendication 9] Support lisible par ordinateur, sur lequel est enregistré le programme d'ordinateur selon la revendication précédente.

[Revendication 10] Aéronef comprenant un dispositif de détection conforme à la revendication 7.

[Fig. 1]

100

[Fig. 2]



RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

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

N° d'enregistrement
national

FA 917219
FR 2302545

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	US 2023/059561 A1 (CHAKRABORTY INDRASIS [US] ET AL) 23 février 2023 (2023-02-23)	1, 2, 6-10	G01R 31/50
A	* abrégé; revendications 1-31; figures 1-4	3-5	G01R 31/52
	* *		G06N 20/00
	* alinéa [0011] - alinéa [0037] *		G06N 3/02
	-----		H02H 1/00
X	CN 115 598 475 A (STATE GRID SHANDONG ELECTRIC POWER CO RIZHAO POWER SUPPLY CO) 13 janvier 2023 (2023-01-13)	1, 2, 6-10	
A	* le document en entier *	3-5	

X	CN 111 123 048 A (UNIV WENZHOU) 8 mai 2020 (2020-05-08)	1, 2, 6-10	
A	* le document en entier *	3-5	

A	CN 109 492 339 A (YUNNAN POWER GRID CO LTD ELECTRIC POWER RES INST) 19 mars 2019 (2019-03-19)	1-10	
	* le document en entier *		

A	PIETER H SCHAVEMAKER ET AL: "An Improved Mayr-Type Arc Model Based on Current-Zero Measurements", IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, IEEE SERVICE CENTER, NEW YORK, NY, US, vol. 15, no. 2, 1 avril 2000 (2000-04-01), XP011049847, ISSN: 0885-8977	1-10	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
	* le document en entier *		G01R

Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
2 octobre 2023		Nadal, Rafael	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS			
X : particulièrement pertinent à lui seul		T : théorie ou principe à la base de l'invention	
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie		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.	
A : arrière-plan technologique		D : cité dans la demande	
O : divulgation non-écrite		L : cité pour d'autres raisons	
P : document intercalaire			
		& : membre de la même famille, document correspondant	

ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2302545 FA 917219

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.
Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **02-10-2023**
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

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2023059561 A1	23-02-2023	AUCUN	
CN 115598475 A	13-01-2023	AUCUN	
CN 111123048 A	08-05-2020	AUCUN	
CN 109492339 A	19-03-2019	AUCUN	