(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle
Bureau international

(43) Date de la publication internationale
17 décembre 2015 (17.12.2015)

WIPO | PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2015/189232 A1

(51) Classification internationale des brevets : *G01D 5/24* (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale : PCT/EP2015/062875

(22) Date de dépôt international : 10 juin 2015 (10.06.2015)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
1455403 13 juin 2014 (13.06.2014) FR

(71) Déposant : **FOGALE NANOTECH** [FR/FR]; 125 Rue de L'hostellerie, Batiment A - Ville Active, F-30900 Nîmes (FR).

(72) Inventeurs : **NEEL, Christian**; 707 B, Chemin du Quartier d'Espagne, F-30900 Nîmes (FR). **BILLIARD, Nicolas**; 23 rue de Montaury, Résidence Montaury, Plein Sud A23, F-30900 Nîmes (FR).

(74) Mandataire : **PONTET ALLANO & ASSOCIES**; Parc Les Algorithmes, Bâtiment Platon, CS 70003 Saint-Aubin, F-91192 Gif sur Yvette cedex (FR).

(81) États désignés *(sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible)* : AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés *(sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible)* : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

— *avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))*

(54) **Title** : METHOD FOR REAL-TIME TRACKING OF THE OPERATIONAL STATUS OF A CAPACITIVE SENSOR

(54) **Titre** : PROCEDE DE SUIVI TEMPS REEL DE L'ETAT DE FONCTIONNEMENT D'UN CAPTEUR CAPACITIF

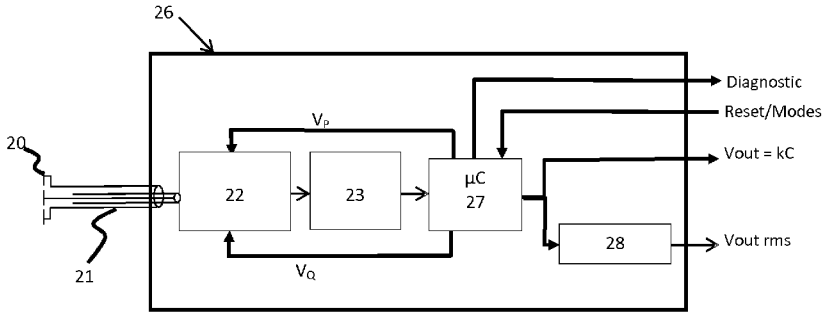


FIG. 2

(57) **Abstract** : The invention relates to a method for real-time tracking of the operational status of a capacitive sensor mountable onto a rotatable machine and connected to an electronic measurement module via a high-frequency transmission line. Said method includes the steps of: generating, within the electronic module, a signal of conductance compensation for interference from the transmission line and the sensor; generating, within the electronic module, a signal of capacitance compensation for the transmission line and the sensor; sampling a signal representing the capacitance compensation and a signal representing the conductance compensation such as to determine an operation point of the sensor; and analyzing the operation point so as to verify if it is located in a predetermined area.

(57) **Abrégé** : L'invention concerne un procédé de suivi temps réel de l'état de fonctionnement d'un capteur capacitif apte à être monté sur une machine tournante, et relié à un module électronique de mesure via une ligne de transmission à haute fréquence, ce procédé comprenant les étapes de : - génération

[Suite sur la page suivante]

WO 2015/189232 A1

au sein du module électronique d'un signal de compensation en capacité d'effets parasites de la ligne de transmission et du capteur, - génération au sein du module électronique d'un signal de compensation en conductance d'effets parasites de la ligne de transmission et du capteur, - prélèvement d'un signal représentatif de la compensation en capacité et d'un signal représentatif de la compensation en conductance de façon à déterminer un point de fonctionnement du capteur, - analyse du point de fonctionnement de façon à vérifier s'il se trouve dans une zone prédéterminée.

" Procédé de suivi temps réel de l'état de fonctionnement d'un capteur capacitif."

La présente invention se rapporte à un procédé de suivi de l'état de fonctionnement d'un capteur capacitif. Elle trouve une application particulièrement intéressante, mais pas uniquement, dans la mesure des passages d'aubes dans une machine tournante ou une turbomachine telle qu'un turboréacteur ou un turbopropulseur d'avion, ou une turbine de générateur électrique par exemple. L'invention est d'un cadre plus large puisqu'elle peut s'appliquer à tout système utilisant un capteur capacitif dans des conditions environnementales très difficiles.

Lors du fonctionnement de la turbomachine, il est connu de monter un capteur capacitif sur le carter. Le document US2010268509 décrit une électrode constituée par le rotor et une contre-électrode constituée par le carter, en particulier la couche interne du carter notamment constituée de plusieurs feuilles.

D'une façon générale, il est possible de mesurer en temps réel de manière non intrusive dans une machine tournante ou une turbomachine les passages des aubes pour en extraire le jeu entre le carter et la tête de l'aube ainsi que les vibrations de l'aube. Ces deux informations, le jeu et les vibrations, sont des informations clés sur l'état de vie de l'aube, c'est à dire son intégrité mécanique. Elles peuvent être suivies en temps réel sur toute la durée de fonctionnement de la machine, notamment d'une surveillance de l'état des aubes (BHM pour « Blade Health Monitoring »).

Il est connu que les mesures capacitives dans ces conditions sont fortement affectées par les pertes électriques de ligne, dues à l'impédance électrique de la ligne de transmission.

On connaît le document JP2006170797 décrivant un principe de compensation des éléments parasites de la ligne de transmission.

Le document FR2784179 décrit un système de compensation des courants de fuite de la ligne de transmission en réalisant des boucles de contre réaction à partir de signaux représentatifs de la compensation en capacité et en conductance.

Cependant, tout comme son environnement, carter moteur, aube, cheminement, le capteur non-intrusif utilisé pour la mesure de jeu et de vibrations évolue dans le temps en fonction des charges thermiques et mécaniques qui s'appliquent sur lui en fonctionnement.

La présente invention a pour but le suivi en temps réel de l'état du capteur.

La présente invention a aussi pour but de réaliser des diagnostics sur des risques de réalisation de mesures non fiables.

On atteint au moins l'un des objectifs avec un procédé de suivi temps réel de l'état de fonctionnement d'un capteur capacitif apte à être monté sur une machine tournante, et relié à un module électronique de mesure via une ligne de transmission à haute fréquence.

Selon l'invention, ce procédé comprend les étapes de :

- génération au sein du module électronique d'un signal de compensation en capacité d'effets parasites de la ligne de transmission et du capteur,
- génération au sein du module électronique d'un signal de compensation en conductance d'effets parasites de la ligne de transmission et du capteur,
- prélèvement d'un signal représentatif de la compensation en capacité et d'un signal représentatif de la compensation en conductance de façon à déterminer un point de fonctionnement du capteur,
- analyse du point de fonctionnement de façon à vérifier s'il se trouve dans une zone prédéterminée.

Selon les modes d'implémentation, la zone prédéterminée peut être plus large que, ou moins large que, ou similaire à, une zone de fonctionnement normal liée à la température.

La machine tournante peut comprendre, notamment, une turbomachine telle qu'un turboréacteur ou un turbopropulseur d'avion, ou une turbine de générateur électrique.

Avec le procédé selon l'invention, on assure un suivi temps-réel de l'état de vie du capteur capacitif qui peut ainsi être complètement intégré dans une gestion globale optimisée de la chaîne de mesure.

On utilise avantageusement une technologie dite active dans la mesure où le module électronique met en œuvre une conversion du signal physique en signal analogique ainsi que des compensations en capacité et en conductance des effets parasites de la chaîne de mesure.

L'invention est particulièrement astucieuse, mais pas uniquement, par le fait qu'on utilise les signaux de compensation comme paramètres de suivi de l'état de vie du capteur au-delà de la simple vérification de sa température. En effet un tel capteur baigne dans un environnement très hostile lié à des températures élevées, à la variation de ces températures, mais également à l'humidité et à d'autres polluants.

Alors que les signaux de compensation sont généralement utilisés que pour la compensation, la présente invention profite de leur présence pour élaborer une politique de surveillance et de diagnostic. Pour ce faire, on considère l'espace des valeurs de capacité et de conductance de compensation, c'est-à-dire un espace bidimensionnel ayant en abscisse et en ordonnée les valeurs de capacité et de conductance, ou inversement. On détermine ensuite une zone de tolérance dite zone prédéterminée dans laquelle le capteur est opérationnel. En dehors de cette zone prédéterminée, on estime que le capteur est en défaut pour diverses raisons. Un point de fonctionnement est un point dans l'espace des valeurs de compensation. Il est connu que le point de fonctionnement suit une évolution en fonction de la température. On prévoit que la zone prédéterminée soit de préférence strictement plus large que la courbe d'évolution fonction de la température. Cela signifie que l'on tient compte d'autres éléments de défaillance en plus de la température.

Selon une caractéristique avantageuse de l'invention, le procédé peut comprendre également une étape de déclenchement d'un signal d'alarme lorsque le point de fonctionnement est en dehors de la zone prédéterminée. Il peut s'agir d'une vérification tout ou rien permettant d'avertir un opérateur que le point de fonctionnement courant est obtenu avec un capteur non opérationnel.

Avantageusement, le procédé selon l'invention peut comprendre une étape d'analyse de l'évolution du point de fonctionnement afin d'en déduire

un diagnostic. Cette évolution peut se concrétiser par une trajectoire et/ou une vitesse et/ou une accélération.

Avec la présente invention, le point de fonctionnement est analysé. Mais on analyse également son évolution au cours du temps de façon à en déduire un certain nombre d'enseignements tels que par exemple le type de défaut ou de risque comme on le verra ci-après. En suivant l'évolution dans le temps des compensations, il est possible de faire un diagnostic de l'état de vie du capteur au cours de son utilisation. Dans le cas de la mesure capacitive, cela peut se faire en suivant l'évolution de la compensation en conductance et en capacité

Selon un mode de mise en œuvre avantageux de l'invention, la zone prédéterminée est définie à partir de valeurs limites de température du capteur et/ou de la ligne de transmission, et de valeurs limites de capacité et de conductance représentatives d'au moins l'un des paramètres suivants : court-circuit d'électrodes du capteur, rupture ou court-circuit de la liaison entre le module électronique et le capteur, fissure d'une céramique contenue dans le capteur.

Ainsi l'élaboration de la zone prédéterminée se fait à partir de nombreux paramètres obtenus par expérience ou par calcul à partir des résistances et capacités parasites de la chaîne de mesure. Ces paramètres sont directement liés au capteur.

En complément notamment de ce qui précède, la zone prédéterminée peut en outre être définie à partir de valeurs limites de capacité et de conductance représentatives d'au moins l'un des paramètres suivants de la ligne de transmission : rupture de moyens de connexion à la masse, rupture de moyens de connexion à une garde. Ces paramètres sont directement liés à la ligne de transmission. On peut ainsi diagnostiquer des défaillances dues à la ligne de transmission ou au capteur, et quel type de défaillance.

A titre d'exemple non limitatif, plusieurs paramètres et leur influence dans la détermination de la zone prédéterminée peuvent être cités.

On détermine par exemple un facteur de risque lié au court-circuit d'électrodes du capteur lorsque le point de fonctionnement tend vers des valeurs de conductance et de capacité de saturation. Il est donc relativement aisé de déduire un risque d'évolution vers un défaut de court-circuit en

analysant le fait que le point de fonctionnement évolue vers des valeurs maximales de la capacité et de la conductance.

On peut également déterminer un facteur de risque lié à une fissure céramique du capteur lorsque le point de fonctionnement évolue vers des valeurs de conductance de plus en plus élevées. Une forte variation de la valeur de conductance indépendamment de la variation de la valeur de capacité peut ainsi présager d'une fragilisation de la céramique constituant le capteur.

On peut également déterminer un facteur de risque lié à une température élevée du capteur lorsque le point de fonctionnement évolue vers des valeurs de conductance et de capacité de plus en plus élevées.

On peut également déterminer un facteur de risque lié à une température élevée de la ligne de transmission lorsque le point de fonctionnement évolue vers des valeurs de conductance négatives de plus en plus élevées en valeur absolue et des valeurs de capacité positives de plus en plus élevées.

On peut enfin par exemple déterminer un facteur de risque lié à une rupture de moyens de connexion à la masse de la ligne de transmission lorsque le point de fonctionnement évolue vers des valeurs de conductance et de capacité de plus en plus faibles.

Les moyens de connexions à la masse peuvent tout simplement être des connecteurs reliés à la masse.

On peut encore déterminer un facteur de risque lié à une rupture de moyens de connexion à une garde de la ligne de transmission lorsque le point de fonctionnement évolue vers des valeurs de capacité de plus en plus élevées.

Selon un mode de mise en œuvre avantageux de l'invention, chaque mesure réalisée par le capteur capacitif peut être accompagnée de la détermination dudit point de fonctionnement ; la mesure étant validée uniquement lorsque le point de fonctionnement est à l'intérieur de la zone prédéterminée. Il s'agit d'un processus de surveillance qui peut être automatique de sorte que seules les mesures réalisées dans de bonnes conditions sont prises en compte.

De préférence, on prévoit une étape d'émission d'un signal sonore et/ou visuel lorsque le point de fonctionnement est en dehors de la zone prédéterminée.

L'invention prévoit également l'utilisation du procédé tel que décrit ci-dessous, pour la mesure du temps de passage des sommets d'aubes dans une machine tournante.

Il est également prévu une chaîne de mesure capacitive comprenant :

- un capteur capacitif apte à être monté sur une machine tournante,
- un module électronique de mesure, et
- une ligne de transmission à haute fréquence reliant le capteur au module électronique.

Selon l'invention, le module électronique est configuré pour réaliser un suivi temps réel de l'état de fonctionnement du capteur par les étapes de :

- génération d'un signal de compensation en capacité d'effets parasites de la ligne de transmission et du capteur,
- génération d'un signal de compensation en conductance d'effets parasites de la ligne de transmission et du capteur,
- prélèvement d'un signal représentatif de la compensation en capacité et d'un signal représentatif de la compensation en conductance de façon à déterminer un point de fonctionnement du capteur,
- analyse du point de fonctionnement de façon à vérifier s'il se trouve en dehors d'une zone prédéterminée.

Selon une caractéristique avantageuse de l'invention, la ligne de transmission peut comprend un câble triaxial ou coaxial.

Selon une caractéristique avantageuse de l'invention, la chaîne de mesure capacitive peut comprendre un capteur capacitif de type triaxial, ou coaxial.

D'autres avantages et caractéristiques de l'invention apparaîtront à l'examen de la description détaillée d'un mode de mise en œuvre nullement limitatif, et des dessins annexés, sur lesquels :

- La Fig. 1 est une vue schématique d'un exemple de chaîne de mesure active adaptée à la mise en œuvre de l'invention,

- La Fig. 2 est une vue schématique simplifiée de l'intégration du procédé de diagnostic selon l'invention dans une chaîne de mesure active,
- La Fig. 3 est une courbe illustrant la zone prédéterminée pour un capteur coaxial, et
- La Fig. 4 est une courbe illustrant la zone prédéterminée pour un capteur triaxial.

Bien que l'invention n'y soit pas limitée, on va maintenant décrire une chaîne de mesure comprenant un capteur capacitif monté sur un carter d'une turbomachine pour la mesure de temps de passage des sommets d'aubes. Les sollicitations aérodynamiques, thermiques et mécaniques de la turbomachine en fonctionnement peuvent modifier la fiabilité du capteur, donc fausser les mesures. Dans le cadre d'une surveillance générale de l'état des aubes, il est nécessaire de prendre également en compte l'évolution de l'état du capteur.

On va décrire la mise en œuvre de l'invention en relation avec un mode de réalisation d'une chaine de détection capacitive mettant en œuvre une compensation automatique des capacités et des conductances de fuite telle que décrite dans le document FR2784179.

Bien entendu, l'invention peut être mise en œuvre avec d'autres modes de réalisation d'une chaine de détection capacitive qui met en œuvre une compensation des capacités et des conductances de fuite.

Pour des raisons de clarté et de concision, la Fig. 1 et la description y afférente ci-dessous sont essentiellement reprises de ce document FR2784179.

En référence à la Fig. 1, la chaîne de mesure capacitive comprend un circuit d'entrée CE et un circuit de mesure capacitive CMC.

Le circuit d'entrée CE comprend essentiellement un capteur capacitif 1, une ligne de transmission à haute fréquence de liaison 2 et un transformateur 3 relié à une source de tension à haute fréquence 4.

Dans le mode de réalisation présenté, le capteur capacitif 1 est de type triaxial et comprend des première, deuxième et troisième électrodes concentriques 11, 12 et 13.

La première électrode est une électrode centrale de mesure 11, de l'ordre de quelques millimètres de diamètre par exemple. L'électrode 11 a une extrémité libre qui est disposée en face d'une pièce A reliée à un potentiel de référence tel que la masse M d'un dispositif incluant la pièce A, directement ou par des capacités parasites propres au dispositif. La distance J entre l'extrémité de l'électrode de mesure 11 et la pièce A est à mesurer. Par exemple, la pièce A est constituée successivement par les aubes d'une turbine tournant autour d'un axe perpendiculaire au plan de la Fig. 1, suivant la flèche F. La distance J est le jeu variable, de l'ordre du millimètre, entre les extrémités des aubes A passant successivement devant l'électrode centrale 11.

La variation du jeu J engendre un signal à basse fréquence dont les variations d'amplitude d'une période à la suivante varient peu, chaque période correspondant au passage d'une aube respective. Le signal à basse fréquence module en amplitude une porteuse de fréquence F_0 en un signal modulé ayant une amplitude variant en fonction du jeu J. La deuxième électrode 12 entoure la première électrode 11 et constitue une électrode de garde.

La troisième électrode 13 est une électrode de blindage reliée à la masse M et entourant l'électrode 12 et constitue le corps métallique cylindrique du capteur 1. La face avant du corps du capteur est fixée dans un trou du carter de révolution CT, par exemple cylindrique ou conique, de la turbine.

Les valeurs des impédances parasites, tant au niveau du capteur 1 que de la ligne de liaison 2 sont variables avec la température et la chaine de 1 mesure doit être très tolérante pour ces variations de capacité et de résistance.

La ligne de liaison 2, selon la réalisation illustrée à la Fig. 1, comprend une section de câble triaxial avec trois conducteurs concentriques 21, 22 et 23 respectivement reliés aux électrodes 11, 12 et 13 du capteur 1. En général, le câble de liaison comprend un câble triaxial rigide LTR typiquement de quelques mètres de longueur dont une extrémité est soudée directement au capteur, et un câble triaxial souple LTS dont la longueur peut être de quelques mètres à quelques dizaines de mètres. Le câble de liaison peut comprendre également une section de câble coaxial du côté de l'électronique.

Suivant d'autres modes de réalisation, le capteur capacitif 1 peut être de type coaxial. Dans ce cas il ne comprend qu'une première électrode 11 de mesure et une troisième électrode 13 de blindage reliée à la masse M.

Dans ce cas, la ligne de liaison 2 est un câble coaxial qui comprend deux conducteurs concentriques 21 et 23 respectivement reliés aux électrodes 11 et 13 du capteur coaxial 1.

Une différence importante entre les capteurs coaxiaux et triaxiaux est que les impédances de perte dans les capteurs coaxiaux dépendent plus fortement de la température. Selon les applications, il peut être utile de minimiser cette dépendance, ou au contraire de l'augmenter volontairement.

La source de tension alternative 4 est un oscillateur à haute fréquence HF, piloté par un quartz à une fréquence porteuse F_0, et asservi en amplitude de façon à améliorer la forme d'onde de la porteuse générée et à garantir la constance des caractéristiques de la chaîne de mesure. La porteuse, qui est une tension de polarisation sinusoïdale, est appliquée par l'oscillateur 4 au capteur 1 à travers le transformateur 3.

Dans le mode de réalisation présenté, cette porteuse a typiquement une amplitude de l'ordre de quelques volts à 10 volts efficaces, et une fréquence F_0 de l'ordre du MHz.

L'oscillateur fournit également deux tensions de référence en phase et en quadrature:

$VR_P = V_R \sin(\omega t)$ et $VR_Q = V_R \sin(\omega t + \pi/2)$

avec $\omega = 2\pi F_0$ la pulsation de la porteuse HF. Les tensions VR_P et VR_Q sont utilisées pour piloter des détecteurs synchrones et générer des signaux de tension de compensation active nécessaires au fonctionnement du circuit de mesure capacitive CMC.

Dans le circuit d'entrée CE, le transformateur 3 présente un primaire relié à des bornes de sortie de l'oscillateur 4 produisant la porteuse $V_0 \sin(\omega t)$ de fréquence F_0 et un secondaire, constituant une source flottante, relié d'une part au capteur 1 à travers la ligne de liaison 2 et d'autre part aux entrées d'un amplificateur de charge 5 inclus dans le circuit de mesure CMC. Comme on le verra dans la suite, la ligne de liaison peut être du type triaxial ou bifilaire blindé, ou coaxial; un conducteur de la ligne de liaison relie l'électrode de mesure 11 à l'entrée inverseuse (-) de l'amplificateur 5 à travers le secondaire du transformateur 3. Un conducteur de blindage de la ligne de

liaison relie au moins l'électrode de blindage 13 du capteur 1 à la borne de masse M.

L'amplificateur de charge 5 est un amplificateur opérationnel 30 dont la sortie est reliée en contre- réaction à l'entrée inverseuse (-) à travers un condensateur de contre-réaction 51 de capacité C51 et une résistance de contre-réaction 52 en parallèle, et à travers une boucle d'asservissement de phase décrite ci-après.

La boucle d'asservissement comprend un filtre passe-bande 61 et un amplificateur 62 connectés en cascade à la sortie de l'amplificateur de charge 5, ainsi que deux voies parallèles entre la sortie de l'amplificateur 62 et l'entrée inverseuse (-) de l'amplificateur de charge 5. Les voies sont assignées à des traitements de signaux en phase (P) et en quadrature (Q). Chaque voie comprend en cascade un détecteur synchrone 7_P, 7_Q, un intégrateur 8_P, 8_Q, un multiplieur 9_P, 9_Q et un condensateur de référence C_P, C_Q de capacité de référence C_R.

La voie comprenant le détecteur synchrone 7_P, l'intégrateur 8_P, le multiplieur 9_P et le condensateur de référence C_P permet de compenser la partie réactive de l'impédance de perte du capteur 1 et de la ligne de liaison 2.

La voie comprenant le détecteur synchrone 7_Q, l'intégrateur 8_Q, le multiplieur 9_Q et le condensateur de référence C_Q permet de compenser la partie résistive de l'impédance de perte du capteur 1 et de la ligne de liaison 2.

Cette impédance de perte peut être modélisée globalement comme une capacité et une résistance parasites en parallèle entre l'entrée inverseuse (-) de l'amplificateur de charge 5 et la masse M.

La bande passante AF du filtre 61 est centrée sur la fréquence F_0 de l'oscillateur 4 et a une largeur fixée typiquement à 300 kHz environ. L'amplificateur 62 est un amplificateur-suiveur de gain unitaire et produit un signal de tension filtré et amplifié SFA dont l'amplitude varie inversement avec le jeu J dans le capteur 1. Ce signal est appliqué aux deux détecteurs synchrones 7_P et 7_Q qui sont pilotés par les tensions de référence en phase et quadrature VR_P et VR_Q fournies par l'oscillateur 4. Les détecteurs synchrones 7_P et 7_Q sont des détecteurs de phase qui démodulent en amplitude le signal de tension filtré et amplifié SFA en deux signaux composants en phase et en quadrature S_P et S_Q dont l'un d'eux, S_P, est exploité pour mesurer le jeu J.

Les signaux composants à basse fréquence S_P et S_Q sont respectivement intégrés dans les intégrateurs 8_P et 8_Q en une tension en phase V_P et une tension en quadrature V_Q afin de stabiliser la boucle d'asservissement. Les tensions V_P et V_Q sortant des intégrateurs sont appliquées à des premières entrées des deux multiplieurs 9_P et 9_Q de facteur de multiplication K de façon à multiplier les tensions V_P et V_Q respectivement par les tensions de référence $VR_P = V_R \sin(2\omega t)$ et $VR_Q = V_R \sin(2\omega t + \pi/2)$ appliquées à des deuxièmes entrées des multiplieurs.

Les signaux modulés en amplitude [K V_P V_R $\sin(2\omega t)$] et [K V_Q V_R $\sin(2\omega t + \pi/2)$] produits par les multiplieurs 9_P et 9_Q sont réinjectés à l'entrée inverseuse (-) de l'amplificateur de charge 5 via les condensateurs de référence C_P et C_Q avec des phases convenables et additionnés au signal de mesure transmis par le capteur 1 via le transformateur 3 afin d'obtenir la stabilité de l'asservissement.

Compte tenu du facteur d'amplification très grand aux basses fréquences assuré par les intégrateurs, la valeur moyenne du signal d'erreur ER en sortie de l'amplificateur 5 et donc les valeurs moyennes des signaux S_P et S_Q sont maintenues nulles.

Le courant en phase traversant le capteur 1 et ayant pour amplitude (V_0 $C_{13}\omega$) est compensé par le courant traversant le condensateur de phase Cp, ayant l'amplitude:

$Ip = K\ Vp\ V_R\ C_R\omega$.

Le courant en quadrature dû aux pertes du capteur et ayant pour amplitude V_0/R_{13} est compensé par un courant traversant le condensateur de quadrature CQ, ayant l'amplitude:

$I_Q = K\ V_Q\ V_R\ C_R\omega$.

Le condensateur C_Q alimenté par le courant en quadrature se comporte comme une résistance alimentée avec un courant en phase. Il permet ainsi une compensation des pertes résistives, mais en évitant le bruit thermique qui serait introduit par l'utilisation d'une résistance.

Les sensibilités nominales aux sorties des intégrateurs I_P et I_Q sont:

$$S(V_P) = \frac{V_P}{C_{13}} = \frac{V_0}{KV_R}\frac{1}{C_R}$$ V/pF, et

$$S(V_Q) = \frac{V_Q}{1/R_{13}} = \frac{V_0}{KV_R}\frac{1}{C_R\omega} \text{ V/Siemens.}$$

A la sortie de l'amplificateur 5, le signal d'erreur ER est normalement nul lorsque la pièce A est immobile. En fonctionnement, lorsque la turbine tourne, le signal ER ne comprend que le bruit de fond du capteur capacitif 1, ainsi que des signaux transitoires, par exemple le passage d'une aube A, qui sont dans la bande passante limitée AF de l'asservissement.

Le signal S_P (ou S_Q) de passage d'une aube se présente à la sortie de la chaîne de mesure de jeu sous la forme d'un signal à valeur moyenne nulle.

Le schéma simplifié de la Fig. 2 est une représentation fonctionnelle d'une chaîne de mesure et de traitement implémentant le procédé selon l'invention. Dans le mode de réalisation présenté, elle comprend un module électronique 26 intégrant les éléments électroniques de la Fig. 1. Selon l'invention, le module électronique 26 comprend en outre une unité de traitement de signal 24 apte à mettre en œuvre le procédé selon l'invention.

Le capteur 20 est disposé à l'extrémité d'une ligne de transmission 21 constituée par un câble triaxial. Dans le mode de réalisation présenté, le capteur 20 est un capteur coaxial, dont les électrodes sont reliées respectivement au conducteur de mesure et au conducteur de masse du câble. D'autres câbles peuvent bien entendu être utilisés tels que notamment un câble coaxial.

L'entrée du module électronique 26 est assurée par le préamplificateur 22 comprenant notamment l'amplificateur de charge 5 de la Fig. 1. Des signaux de compensation en conductance et en capacité sont générés par l'unité de traitement de signal 24 et sont injectés dans le préamplificateur 22. Un amplificateur 23, intégrant notamment l'amplificateur 6 de la Fig. 1, alimente, après amplification, l'unité de traitement de signal 24 à partir d'un signal provenant du préamplificateur 22. L'unité de traitement 24 comprend avantageusement les détecteurs synchrones et les intégrateurs de la Fig. 1 ainsi qu'un microcontrôleur 27 configuré pour mettre en œuvre le procédé selon l'invention. Ce microcontrôleur 27 reçoit les signaux VQ et VP, puis en déduit des valeurs de conductance et de capacité sachant que VQ est proportionnel à la conductance que l'on peut nommer G_L, et VP est proportionnel à la capacité que l'on peut nommer C_L.

L'unité de traitement de signal 24 est apte à générer un signal de sortie Vout qui est proportionnel à la capacité mesurée par le capteur 20, Vout=kC, k étant un nombre réel. Ce signal de sortie peut alimenter un convertisseur RMS/DC 28.

Le microcontrôleur est configuré pour déterminer en temps réel les valeurs de G_L et C_L et enregistrer ces valeurs en mémoire de façon à avoir un suivi de leurs évolutions. Une valeur G_L associé à une valeur C_L constitue un point de fonctionnement qui peut être représenté dans un espace à deux dimensions ayant pour axe des abscisses, les valeurs de C_L, et pour axe des ordonnées les valeurs de G_L.

Sur la Fig. 3 sont illustrées des courbes représentatives des variations du point de fonctionnement dans un repère G_L/C_L pour un capteur coaxial.

On distingue une première courbe T sous la forme d'un segment oblique dans le domaine des valeurs positives de conductance et de capacité.

Dans un état de vie dit normal, en fonction de la variation de paramètres environnementaux tels que la température, la compensation de ligne, représentée par la capacitance C_L et la conductance G_L, reste dans ou à proximité de la courbe T prédéterminée, et la capacitance C_L et la conductance G_L suivent une évolution monotone l'une par rapport à l'autre (par exemple la conductance croît lorsque la capacité croît).

En cas de défaillance du capteur ou du câble, le point de fonctionnement matérialisé par la capacitance C_L et la conductance G_L s'éloigne de la courbe T de fonctionnement dit normal. La détection de l'évolution de ces paramètres à distance de la courbe de fonctionnement normal permet de détecter des défaillances et/ou d'invalider des mesures, dans le cadre par exemple d'une surveillance de l'état de pâle (BHM pour « blade health monitoring »).

Dans des conditions normales, le point de fonctionnement courant PF peut évoluer sur la courbe T entre un point inférieur correspondant à une température Tmin et un point supérieur correspondant à une température Tmax.

Selon l'invention, pour détecter les défaillances et les risques, on peut définir préalablement une courbe définissant une zone prédéterminée ZP. Cette zone prédéterminée englobe la courbe T. On peut ainsi mettre en œuvre la méthode de détection suivante :

- lorsque le point de fonctionnement n'est plus sur la courbe T mais à l'intérieur de la zone prédéterminée, on estime qu'il y a un risque sur l'état de fonctionnement du capteur et qu'il est nécessaire de suivre l'évolution ;

- Au-delà de la zone prédéterminée, on estime que la mesure n'est pas fiable.

La Fig. 3 présente des flèches E1-E4 qui partent du point de fonctionnement vers des directions différentes. Chaque flèche représente une évolution risquée due à une ou plusieurs caractéristiques prédéfinies.

Par exemple, l'évolution dans la direction de la flèche E1 (la capacité croît lorsque la conductance diminue) est caractéristique d'une évolution vers une coupure de la ligne de transmission.

L'évolution dans la direction de la flèche E2 (augmentation de la capacité pour une valeur fixe de la conductance) est caractéristique d'une évolution vers une rupture d'une connectique de garde de la ligne de transmission.

L'évolution dans la direction de la flèche E3 (baisse de la capacité pour une valeur fixe de la conductance) est caractéristique d'une évolution vers une rupture de l'électrode du capteur.

L'évolution dans la direction de la flèche E4 (augmentation de la conductance pour une valeur fixe de la capacité) est caractéristique d'une évolution vers un court-circuit au niveau du capteur ou de la ligne de transmission.

Sur la Fig. 4 on voit une courbe T1 de fonctionnement normal dans une zone prédéterminée ZP1 pour un capteur triaxial. Dans ce cas, la courbe T1 est une courbe passant par zéro et ayant un minimum (correspondant à une valeur de température Tmin) dans le cadran des conductances positives et des capacités négatives. Le maximum (correspondant à une valeur de température Tmax) se trouve dans le cadran des conductances négatives et des capacités positives.

Comme expliqué précédemment, la présente invention permet de réaliser différents diagnostics à partir de l'analyse du point de fonctionnement et de son évolution. Différents cas de figure sont décrits ci-après à titre simplement d'exemples non limitatifs.

Concernant le capteur capacitif :

- une fissure de la céramique qui constitue l'isolant entre les électrodes peut engendrer une absorption d'humidité ou de polluants. Elle se caractérise

par des valeurs de conductance de fuite G_L anormalement élevées. Les risques associés sont une oxydation, une pollution définitive, une rupture et donc la destruction du capteur ;

- une température trop élevée provoque une augmentation de la permittivité diélectrique de l'isolant. Elle se caractérise par des valeurs de capacité de fuite C_L et de conductance de fuite G_L anormalement élevées. Les risques associés sont une dégradation irréversible ou une destruction du capteur ;

– une amorce de court-circuit entre l'électrode de mesure et la masse se caractérise par des saturations des tensions de compensation et une surconsommation de l'oscillateur 4 qui excite le transformateur. Le risque est également une destruction du capteur ;

- une rupture de la liaison électrique avec l'électrode de mesure, outre l'absence de signaux de mesure, se caractérise par une diminution de la capacité de fuite C_L due au fait que la capacité de fuite résiduelle ne concerne que la section de la ligne de mesure jusqu'à la rupture.

Concernant le câble, et en particulier un câble triaxial :

- une température trop élevée provoque une augmentation de la permittivité diélectrique de l'isolant (en général minéral). Elle se caractérise par des valeurs de capacité de fuite C_L et de conductance de fuite G_L anormalement élevées en valeur absolue, la conductance de fuite G_L (équivalente) ayant un signe négatif à cause du déphasage introduit par la résistance du câble de garde ;

- une rupture de la connectique des conducteurs de masse se caractérise par des valeurs de capacité de fuite C_L et de conductance de fuite G_L anormalement faibles, puisqu'elles correspondent à une longueur de câble (jusqu'à la rupture) inférieure à la longueur normale ;

- une rupture de la connectique des conducteurs de garde se caractérise par des valeurs de capacité de fuite C_L anormalement élevées, puisqu'elles correspondent à capacité de fuite vers la masse accrue.

Ainsi, on peut noter que l'invention permet de diagnostiquer des causes de défaillance, ou des groupes de causes de défaillances, ou un état anormal, en détectant au moins l'un des évènements suivants :

- une évolution anormale d'un paramètre parmi la capacité de fuite C_L et la conductance de fuite G_L, l'autre paramètre conservant une valeur

normale ;- une évolution anormale des deux paramètres, la capacité de fuite C_L et la conductance de fuite G_L.

Bien entendu, le champ des défaillances possibles ou une identification plus précise de la défaillance peut être réalisée selon l'invention en intégrant dans l'analyse des informations supplémentaires, telles que :

- des mesures de températures externes ;
- la qualité des mesures, ou l'absence de mesures ;
- un suivi de la consommation électrique, afin de détecter notamment des composants saturés.

Bien sûr, l'invention n'est pas limitée aux exemples qui viennent d'être décrits et de nombreux aménagements peuvent être apportés à ces exemples sans sortir du cadre de l'invention.

REVENDICATIONS

1. Procédé de suivi temps réel de l'état de fonctionnement d'un capteur capacitif apte à être monté sur une machine tournante, et relié à un module électronique de mesure via une ligne de transmission à haute fréquence,

ce procédé comprenant les étapes de :

- génération au sein du module électronique d'un signal de compensation en capacité d'effets parasites de la ligne de transmission et du capteur,
- génération au sein du module électronique d'un signal de compensation en conductance d'effets parasites de la ligne de transmission et du capteur,
- prélèvement d'un signal représentatif de la compensation en capacité et d'un signal représentatif de la compensation en conductance de façon à déterminer un point de fonctionnement du capteur,
- analyse du point de fonctionnement de façon à vérifier s'il se trouve dans une zone prédéterminée.

2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comprend également une étape de déclenchement d'un signal d'alarme lorsque le point de fonctionnement est en dehors de la zone prédéterminée.

3. Procédé selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce qu'il comprend une étape d'analyse de l'évolution du point de fonctionnement afin d'en déduire un diagnostic.

4. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que la zone prédéterminée est définie à partir de valeurs limites de température du capteur et/ou de la ligne de transmission et de valeurs limites de capacité et de conductance représentatives d'au moins l'un des paramètres suivants : court-circuit d'électrodes du capteur, rupture ou court-circuit de la liaison entre le module électronique et le capteur, fissure d'une céramique contenue dans le capteur.

5. Procédé selon la revendication 4, caractérisé en ce que la zone prédéterminée est en outre définie à partir de valeurs limites de capacité et de conductance représentatives d'au moins l'un des paramètres suivants de la ligne de transmission : rupture de moyens de connexion à la masse, rupture de moyens de connexion à une garde.

6. Procédé selon l'une des revendications 4 ou 5, caractérisé en ce qu'on détermine un facteur de risque lié au court-circuit d'électrodes du capteur lorsque le point de fonctionnement tend vers des valeurs de conductance et de capacité de saturation.

7. Procédé selon l'une quelconque des revendications 4 à 6, caractérisé en ce qu'on détermine un facteur de risque lié à une fissure céramique du capteur lorsque le point de fonctionnement évolue vers des valeurs de conductance de plus en plus élevées.

8. Procédé selon l'une quelconque des revendications 4 à 7, caractérisé en ce qu'on détermine un facteur de risque lié à une température élevée du capteur lorsque le point de fonctionnement évolue vers des valeurs de conductance et de capacité de plus en plus élevées.

9. Procédé selon l'une quelconque des revendications 5 à 8, caractérisé en ce qu'on détermine un facteur de risque lié à une température élevée de la ligne de transmission lorsque le point de fonctionnement évolue vers des valeurs de conductance négatives de plus en plus élevées en valeur absolue et des valeurs de capacité positives de plus en plus élevées.

10. Procédé selon l'une quelconque des revendications 5 à 9, caractérisé en ce qu'on détermine un facteur de risque lié à une rupture de moyens de connexion à la masse de la ligne de transmission lorsque le point de fonctionnement évolue vers des valeurs de conductance et de capacité de plus en plus faibles.

11. Procédé selon l'une quelconque des revendications 5 à 10, caractérisé en ce qu'on détermine un facteur de risque lié à une rupture de moyens de connexion à une garde de la ligne de transmission lorsque le point de

fonctionnement évolue vers des valeurs de capacité de plus en plus élevées.

12. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que chaque mesure réalisée par le capteur capacitif est accompagnée de la détermination dudit point de fonctionnement ; la mesure étant validée uniquement lorsque le point de fonctionnement est à l'intérieur de la zone prédéterminée.

13. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comprend une étape d'émission d'un signal sonore et/ou visuel lorsque le point de fonctionnement est en dehors de la zone prédéterminée.

14 .Utilisation du procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 13, pour la mesure du temps de passage des sommets d'aubes dans une machine tournante.

15. Chaîne de mesure capacitive comprenant :
- un capteur capacitif apte à être monté sur une machine tournante,
- un module électronique de mesure, et
- une ligne de transmission à haute fréquence reliant le capteur au module électronique,

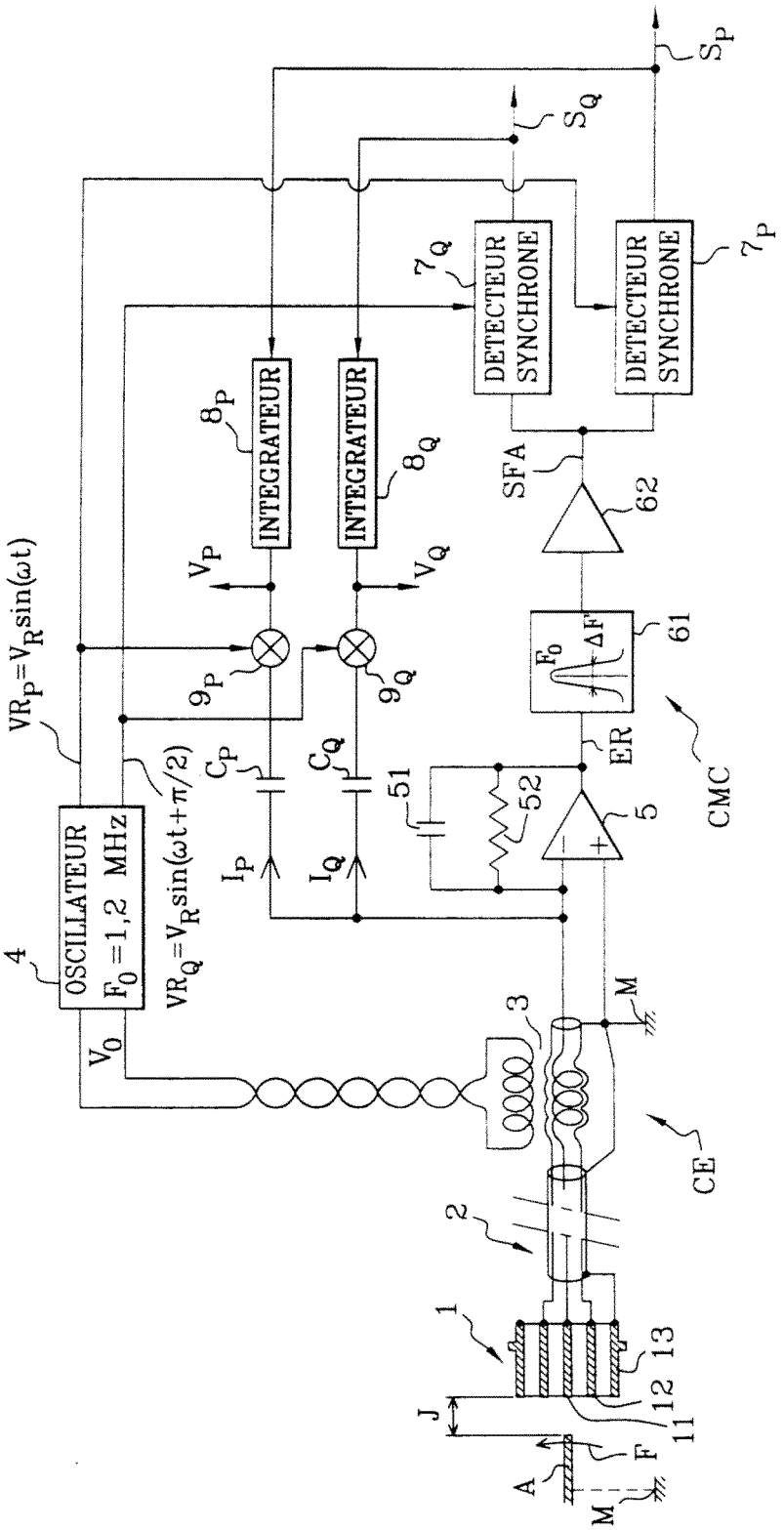
caractérisée en ce que le module électronique est configuré pour réaliser un suivi temps réel de l'état de fonctionnement du capteur par les étapes de :

- génération d'un signal de compensation en capacité d'effets parasites de la ligne de transmission et du capteur,
- génération d'un signal de compensation en conductance d'effets parasites de la ligne de transmission et du capteur,
- prélèvement d'un signal représentatif de la compensation en capacité et d'un signal représentatif de la compensation en conductance de façon à déterminer un point de fonctionnement du capteur,
- analyse du point de fonctionnement de façon à vérifier s'il se trouve en dehors d'une zone prédéterminée.

16. Chaîne de mesure capacitive selon la revendication 15, caractérisée en ce que la ligne de transmission comprend un câble triaxial ou coaxial.

17. Chaîne de mesure capacitive selon l'une des revendications 15 ou 16, caractérisée en ce qu'elle comprend un capteur capacitif de type triaxial, ou coaxial.

FIG.1


S_P
S_Q
7_Q
DETECTEUR SYNCHRONE
7_P
DETECTEUR SYNCHRONE
8_P
INTEGRATEUR
8_Q
INTEGRATEUR
SFA
62
V_P
V_Q
9_P
9_Q
F_0
ΔF
61
$VR_P=V_R\sin(\omega t)$
C_P
C_Q
51
52
ER
5
CMC
I_P
I_Q
$VR_Q=V_R\sin(\omega t+\pi/2)$
4
OSCILLATEUR
$F_0=1,2$ MHz
V_0
3
M
CE
2
1
J
A
F
M
11
12
13

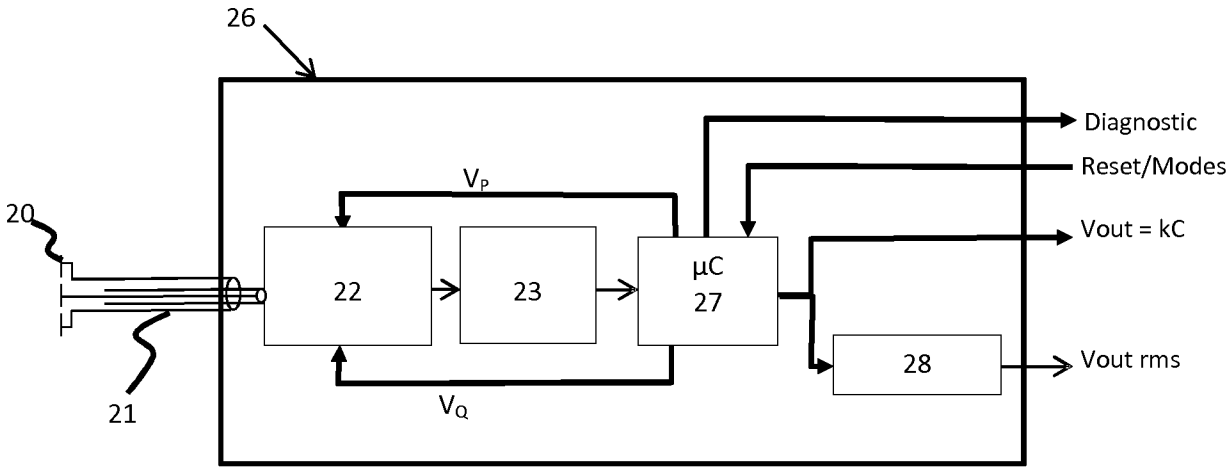


FIG. 2

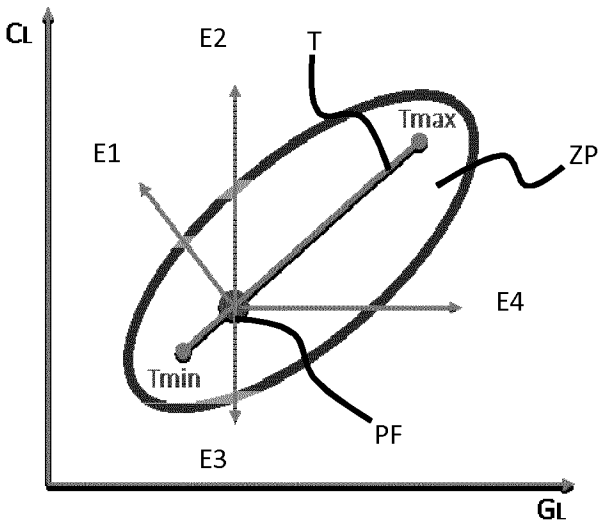


FIG. 3

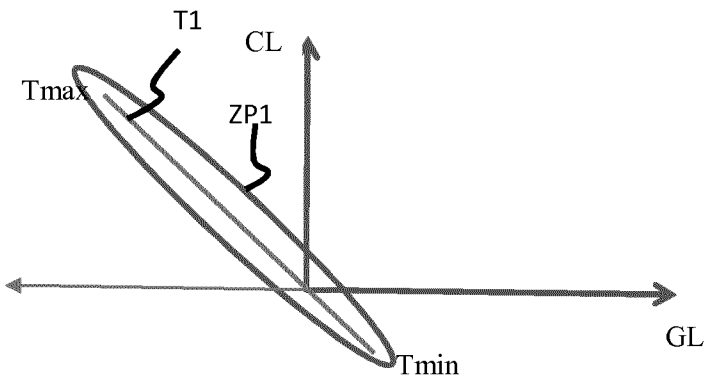


FIG. 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2015/062875

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. G01D5/24
ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
G01D

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	FR 2 784 179 A1 (ONERA (OFF NAT AEROSPATIALE) [FR]) 7 April 2000 (2000-04-07) cited in the application page 1, line 3 - page 15, line 34; figure 1	1-17
A	DE 10 2007 028335 A1 (RECHNER IND ELEKTRONIK GMBH [DE]) 24 December 2008 (2008-12-24) the whole document	1-17
A	FR 2 912 814 A1 (SIEMENS VDO AUTOMOTIVE SAS [FR]) 22 August 2008 (2008-08-22) the whole document	1-17

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
15 September 2015	24/09/2015

Name and mailing address of the ISA/	Authorized officer
European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Lyons, Christopher

1

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No
PCT/EP2015/062875

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
FR 2784179 A1	07-04-2000	NONE	
DE 102007028335 A1	24-12-2008	NONE	
FR 2912814 A1	22-08-2008	NONE	

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°
PCT/EP2015/062875

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE
INV. G01D5/24
ADD.

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)
G01D

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés)
EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	FR 2 784 179 A1 (ONERA (OFF NAT AEROSPATIALE) [FR]) 7 avril 2000 (2000-04-07) cité dans la demande page 1, ligne 3 - page 15, ligne 34; figure 1	1-17
A	DE 10 2007 028335 A1 (RECHNER IND ELEKTRONIK GMBH [DE]) 24 décembre 2008 (2008-12-24) le document en entier	1-17
A	FR 2 912 814 A1 (SIEMENS VDO AUTOMOTIVE SAS [FR]) 22 août 2008 (2008-08-22) le document en entier	1-17

☐ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

☒ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

* Catégories spéciales de documents cités:

"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent

"E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date

"L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)

"O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens

"P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

"T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention

"X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément

"Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier

"&" document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée	Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale
15 septembre 2015	24/09/2015

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale	Fonctionnaire autorisé
Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Lyons, Christopher

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°
PCT/EP2015/062875

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
FR 2784179 A1	07-04-2000	AUCUN	
DE 102007028335 A1	24-12-2008	AUCUN	
FR 2912814 A1	22-08-2008	AUCUN	