

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

(19) Organisation Mondiale de la
Propriété Intellectuelle
Bureau international



(10) Numéro de publication internationale
WO 2019/097167 A1

(43) Date de la publication internationale
23 mai 2019 (23.05.2019)

(51) Classification internationale des brevets :
F03D 7/02 (2006.01) *F03D 13/35* (2016.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2018/052849

(22) Date de dépôt international :
15 novembre 2018 (15.11.2018)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
1760715 15 novembre 2017 (15.11.2017) FR

(71) Déposant : **SEREEMA** [FR/FR] ; Rond Point Benjamin Franklin, Cap Omega, CS 39521, 34960 Montpellier (FR).

(72) Inventeurs : **IMBERT, Jérôme** ; 110 Allée des Fauvettes, 34280 La Grande Motte (FR). **PINTO, Bruno** ; 85 Rue Christian Bénézech, Bât B, App 52, 34070 Montpellier (FR). **MICHEL, Kevin** ; 7 Rue d'Alger, 34000 Montpellier (FR).

(74) Mandataire : **RHEIN, Alain** ; Cabinet Brev&Sud, 55 Avenue Clément Ader, 34170 Castelnaud Le Lez (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, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, 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,

(54) Title: SYSTEM AND METHOD FOR DIAGNOSING A ROTOR UNBALANCE OF A WIND TURBINE

(54) Titre : SYSTÈME ET PROCÉDÉ DE DIAGNOSTIC D'UN DÉSÉQUILIBRE ROTOR D'UNE ÉOLIENNE

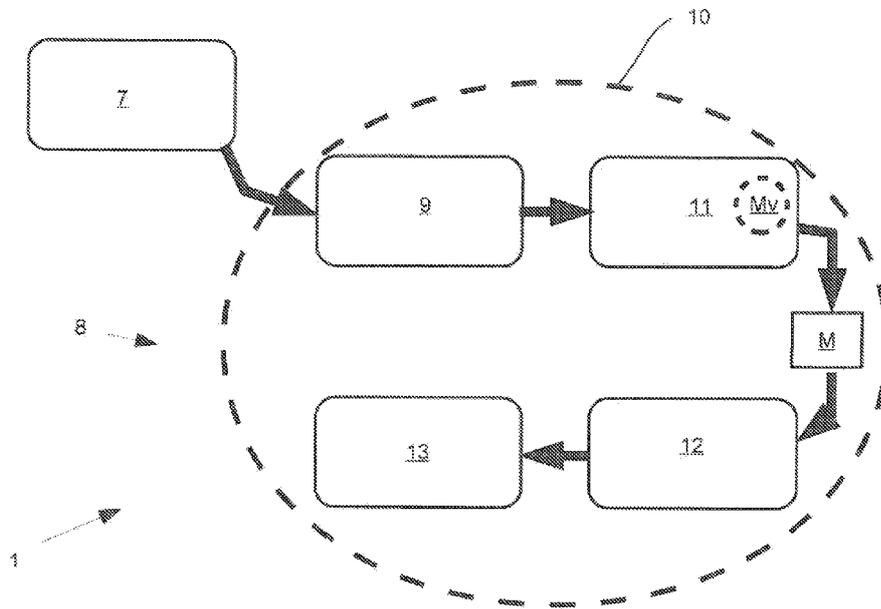


Figure 1

(57) Abstract: The invention relates to a system for diagnosing (1) a rotor unbalance of a wind turbine based on acceleration data measured at a nacelle of the wind turbine which is supported by a tower. According to the invention, the diagnostic system (1) comprises: a measuring device (7) provided with a triaxial vibration sensor (X, Y, Z) suitable for measuring acceleration data corresponding to vibrations occurring at the nacelle; and a system for processing (8) the acceleration data, suitable for determining the rotor unbalance according to the acceleration data measured on at least two axes (X, Y, Z) at the nacelle. The invention also relates to a method for diagnosing the rotor unbalance of a wind turbine.

(57) Abrégé : L'invention concerne un système de diagnostic (1) d'un déséquilibre rotor d'une éolienne à partir de données d'accélération



WO 2019/097167 A1

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), eurasién (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))

mesurées au niveau d'une nacelle de l'éolienne qui est supportée par une tour. Selon l'invention, le système de diagnostic (1) comporte : ~ un dispositif de mesure (7) équipé d'un capteur de vibration trois axes (X, Y, Z) qui est adapté à mesurer des données d'accélération correspondant aux phénomènes vibratoires se produisant au niveau de la nacelle; et - un système de traitement (8) des données d'accélération adapté à déterminer le déséquilibre du rotor en fonction des données d'accélération mesurées sur au moins deux axes (X, Y, Z) au niveau de la nacelle. L'invention concerne également un procédé de diagnostic du déséquilibre rotor d'une éolienne.

Système et procédé de diagnostic d'un déséquilibre rotor d'une éolienne

La présente invention entre dans le domaine du développement durable, des énergies renouvelables et plus particulièrement de l'énergie éolienne. En effet, l'invention concerne un système de diagnostic d'un déséquilibre rotor d'une éolienne.

Dans le cadre du développement des énergies renouvelables, de nombreux parcs éoliens se sont implantés rapidement. Les exploitants de ces parcs ont dû mettre en place des solutions d'entretien et de surveillance de l'état de fonctionnement de chacune des éoliennes qui composent leur parc. Ainsi, l'état de fonctionnement de chaque éolienne est une donnée primordiale pour optimiser la production d'énergie et prévenir tout risque de dommage.

Dans ce contexte, il est connu que le déséquilibre rotor d'une éolienne peut être une source d'informations quant à l'usure des pales, l'état physique des pales ou de leur état d'assemblage.

Ainsi, des solutions techniques ont donc été développées afin d'optimiser le fonctionnement d'une éolienne.

Une première solution décrite par le document US 2012/0183399 consiste en un système d'équilibrage du rotor et des pales d'une éolienne. A cet effet, le système d'équilibrage utilise un dispositif de mesure qui comporte un capteur de vibration et un capteur de la vitesse de rotation du rotor de type capteur électromagnétique. Au travers notamment d'un procédé de mesure du déséquilibre à N configurations différentes de tangage des pales suivi, d'une part, d'une étape de calcul pour estimer la correction nécessaire de tangage des pales, et d'autre part, d'une étape de correction du tangage des pales. Le système d'équilibrage corrige le déséquilibre rotor identifié lors des phases de rotation du rotor. Il est à noter que le tangage d'une pale correspond à son angle d'inclinaison par rapport à un zéro de référence au niveau du moyeu du rotor.

Dans le but de corriger le déséquilibre rotor, le système d'équilibrage utilise les données d'accélération de la nacelle mesurées par le capteur de vibration, les données de vitesse de rotation des pales mesurées par le capteur de vitesse de rotation du rotor et le tangage connu des pales.

Selon le type d'éolienne, un tel système d'équilibrage implique une modification des réglages de l'éolienne pour réaliser des mesures à N configurations de tangage des pales. De tels changements de configuration de tangage peuvent entraîner une baisse de production énergétique. De plus, le déséquilibre rotor est mesuré sur des périodes de fonctionnement courtes qui sont peu représentatives des différentes conditions de fonctionnement d'une éolienne. Par exemple, selon des conditions météorologiques auxquelles est soumise une éolienne, telles que l'orientation et la force du vent, la température, la pluie, la neige, le givre etc. Dans ce contexte, des mesures sur une courte période ne représentent pas la variabilité des vibrations qui s'appliquent sur le rotor. Ainsi, ce procédé peut nécessiter de nouvelles interventions et augmenter le coût d'entretien de l'éolienne.

Une deuxième solution décrite par le document WO 2016/169964 consiste en un système d'équilibrage qui utilise un système de réglage du tangage de chaque pale du rotor et un dispositif de mesure du déséquilibre rotor. Plus particulièrement, le dispositif de mesure comporte un détecteur d'angle adapté à détecter le tangage de chaque pale, un capteur de la vitesse de rotation du rotor et au moins un capteur de vibration de la nacelle. Le système d'équilibrage détermine le déséquilibre du rotor lors de quelques périodes de rotation du rotor, par exemple deux ou trois, chaque rotation étant choisie selon une vitesse de rotation prédéfinie du rotor. Ainsi, le déséquilibre du rotor est déterminé en fonction des données de vibration de la nacelle mesurées par le capteur de vibration et des données de vitesse de rotation du rotor mesurées par le capteur de vitesse de rotation du rotor. Dans une seconde étape, le système

d'équilibrage corrige le tangage d'une ou de plusieurs pale(s) de manière à corriger le déséquilibre rotor déterminé. Le système d'équilibrage répète ainsi ces étapes jusqu'à éliminer le déséquilibre rotor. Ce système d'équilibrage présente également l'inconvénient de modifier les réglages de l'éolienne pour réaliser des mesures à N configurations de tangage des pales. De tels changements de configuration de tangage peuvent entraîner une baisse de production énergétique. De plus, le diagnostic est réalisé sur des périodes non représentatives des conditions de fonctionnement d'une éolienne.

Une troisième solution décrite par le document WO 2009/129617 consiste en un système d'équilibrage du déséquilibre rotor d'une éolienne. Dans cet objectif, le système d'équilibrage comporte un dispositif de mesure équipé d'un capteur de vitesse de rotation du rotor et de trois capteurs de vibration qui sont formés par des accéléromètres. De manière ponctuelle, les capteurs sont installés précisément au niveau de la nacelle afin de mesurer des vibrations selon l'axe de rotation du rotor et selon deux axes parallèles l'un à l'autre et perpendiculaires à l'axe de rotation du rotor.

Une fois le dispositif de mesure installé une batterie de test est effectuée de manière à déterminer les deux composantes du déséquilibre rotor d'une éolienne à savoir le déséquilibre aérodynamique du rotor et le déséquilibre massique du rotor.

Afin de déterminer le déséquilibre aérodynamique du rotor, des mesures de données d'accélération sont réalisées pendant une période de fonctionnement de l'éolienne. Les données d'accélération qui correspondent aux vibrations de torsion de la nacelle et aux vibrations axiales sont comparées avec des données de référence issues d'un cycle de rotation de référence. Lorsque les données d'accélération dépassent un certain seuil cela signifie que le rotor présente un déséquilibre aérodynamique. Pour détecter la source du problème, une inspection visuelle et/ou un réaligement des pales sont réalisés.

En outre, le déséquilibre massique est déterminé via des mesures de données d'accélération réalisées pendant une période de fonctionnement de l'éolienne au cours de laquelle une masse est arrimée à une pale. Comme les deux premières solutions citées de l'état de l'art, ce troisième système d'équilibrage nécessite un arrêt de la production d'énergie pour déterminer le déséquilibre rotor et le corriger. En outre, le déséquilibre rotor est également mesuré sur une période courte qui est peu représentative des conditions de fonctionnement d'une éolienne.

Dans ce contexte, la demanderesse a développé un système de diagnostic du déséquilibre du rotor alternatif et innovant. Au travers de mesures et d'analyses de données d'accélération continues et systématiques pendant des périodes de fonctionnement significatives de l'éolienne, le système de diagnostic permet d'obtenir des données fiables sans interrompre la production d'énergie et sans modifier les réglages de l'éolienne.

A cet effet, un premier aspect de l'invention porte sur un système de diagnostic d'un déséquilibre rotor d'une éolienne à partir de données d'accélération mesurées au niveau d'une nacelle de l'éolienne qui est supportée par une tour, caractérisé en ce qu'il comporte :

- un dispositif de mesure équipé d'un capteur de vibration trois axes X, Y, Z qui effectue des mesures systématiques et continues des données d'accélération correspondant aux phénomènes vibratoires se produisant au niveau de la nacelle ; et
- Un système de traitement des données d'accélération adapté à déterminer le déséquilibre du rotor au travers d'une analyse vibratoire qui se base uniquement sur les données d'accélération mesurées sur au moins deux axes X, Y, Z au niveau de la nacelle sans intervenir sur le fonctionnement normal de l'éolienne.

Le système de diagnostic de l'invention permet de déterminer un déséquilibre rotor au travers d'une analyse vibratoire qui se base uniquement sur des mesures de données d'accélération qui correspondent aux phénomènes vibratoires se produisant au niveau
5 de la nacelle. Avantageusement, le système selon l'invention permet de déterminer le déséquilibre rotor de l'éolienne sans modifier les réglages de fonctionnement de l'éolienne tels que l'angle de tangage du rotor. Contrairement à l'état de l'art cité dans la demande, le système de diagnostic selon l'invention
10 fournit à un exploitant de parc éolien un diagnostic de son parc sans avoir la nécessité de stopper chaque éolienne afin d'effectuer un protocole de tests itératifs visant à déterminer le déséquilibre rotor de chaque éolienne. Ce qui représente un gain de productivité pour l'exploitant du parc et une réduction
15 des coûts pour obtenir un diagnostic.

Selon une première caractéristique du premier aspect de l'invention, le système de traitement comprend un module d'analyse qui analyse en continu des données d'accélération mesurées par le dispositif de mesure afin de déterminer une
20 période de fonctionnement T_f de l'éolienne, le déséquilibre rotor étant déterminé au cours d'une pluralité de périodes de fonctionnement T_f stable de l'éolienne qui est définie par une fréquence $3P$ stable de passage des pales devant la tour.

Plus précisément, le module d'analyse détermine une période de
25 fonctionnement T_f lorsqu'il identifie des vibrations V_{3P} dues au passage d'une pale devant la tour selon au moins un axe X, Y, Z. Selon l'invention le module d'analyse réalise des opérations d'analyse systématiques en continu des phénomènes vibratoires mesurés et permet de déterminer si l'éolienne est dans une
30 période de fonctionnement en identifiant les vibrations V_{3P} .

Selon une particularité de la première caractéristique du premier aspect de l'invention, le module d'analyse identifie les vibrations V_{3P} après une opération de raffinage des données d'accélération mesurées. Plus particulièrement, l'opération de
35 raffinage comporte :

- une étape de projection des données d'accélération collectées dans un repère tridimensionnel X'' , Y'' , Z'' du rotor ;
- une étape de formation d'un spectre fréquentiel des données d'accélération projetées dans le repère tridimensionnel X'' ,
5 Y'' , Z'' du rotor ;
- une étape de suréchantillonnage du spectre fréquentiel ; et
- une étape de sélection de pics correspondant aux vibrations V3P qui est réalisée par le produit de chaque pic du spectre fréquentiel suréchantillonné avec le pic d'au moins les cinq
10 premières harmoniques dudit pic.

Selon une deuxième caractéristique du premier aspect de l'invention, le système de traitement comporte un module de périodicité qui est adapté à déterminer et enregistrer une période de rotation T_r régulière du rotor qui correspond à une
15 pluralité de périodes de fonctionnement T_f stable de l'éolienne. Cette pluralité de périodes de fonctionnement T_f stable est déterminée en fonction des vibrations V3P identifiées.

A cet effet, le module de périodicité balaye les vibrations V3P identifiées au cours d'une période de fonctionnement T_f de
20 manière à détecter au moins une vibration V3P dont la fréquence est voisine d'une fréquence $3P$ de référence de l'éolienne. Ainsi, lorsque que le module de périodicité détecte au moins une vibration V3P dont la fréquence est voisine de la valeur de la fréquence $3P$ théorique de l'éolienne, le module de périodicité
25 présélectionne la période de fonctionnement T_f .

Dans ce contexte, lorsque le module de périodicité sélectionne un nombre seuil NS de périodes de fonctionnement T_f qui se succèdent chronologiquement, le module de périodicité enregistre une période de rotation T_r régulière du rotor.

30 Selon une troisième caractéristique du premier aspect de l'invention, le système de traitement comprend un module de traitement fréquentiel adapté à quantifier selon au moins deux axes X'' , Y'' , Z'' des vibrations V1P de la nacelle dues à un déséquilibre du rotor au cours d'une pluralité de périodes de

fonctionnement Tf stable de l'éolienne. Plus spécifiquement, le module fréquentiel quantifie les vibrations VIP de la nacelle au cours d'une pluralité de périodes de fonctionnement Tf stable de l'éolienne correspondant à une période de rotation Tr régulière enregistrée.

A ces fins, le module de traitement fréquentiel quantifie des vibrations VIP dont la fréquence est voisine d'une fréquence IP de référence de l'éolienne.

Selon une quatrième caractéristique du premier aspect de l'invention, le système de traitement comprend un module de calcul adapté à déterminer le déséquilibre du rotor en fonction des vibrations VIP selon au moins deux axes X'', Y'', Z'' qui ont été quantifiées au cours d'une pluralité de périodes de fonctionnement Tf stable de l'éolienne. De préférence, les vibrations VIP sont quantifiées au cours d'un nombre déterminé Nd de périodes de rotation Tr régulières enregistrées.

Avantageusement, le traitement des données d'accélération mesurées sur une pluralité de périodes de fonctionnement stable de l'éolienne, c'est-à-dire, des périodes où le rotor tourne à vitesse régulière, permet de déterminer un déséquilibre rotor sur un grand nombre de périodes de fonctionnement et ainsi d'augmenter la précision du diagnostic. En effet, le traitement de grand nombre de périodes de fonctionnement permet de réduire l'impact des variations des phénomènes vibratoires mesurés dues aux conditions externes auxquelles est soumise l'éolienne. Le traitement des données sur une pluralité de périodes de fonctionnement stable contribue également à déterminer le déséquilibre rotor de l'éolienne sans avoir la nécessité de modifier les réglages de fonctionnement de l'éolienne.

Le système de diagnostic selon l'invention permet de déterminer le déséquilibre rotor en se basant uniquement sur des données d'accélération qui peuvent être mesurées sans stopper la production d'énergie et sans intervenir sur l'éolienne et ses réglages.

Le module de calcul détermine, en fonction des vibrations VIP selon au moins deux axes X'' , Y'' , Z'' , un déséquilibre aérodynamique du rotor et un déséquilibre massique du rotor qui forment le déséquilibre rotor.

5 Avantageusement, le système de diagnostic réalise un traitement simultané des données d'accélération VIP selon au moins deux axes permettant de déterminer simultanément les déséquilibres aérodynamique et massique du rotor.

Selon une particularité des quatre précédentes caractéristiques
10 du premier aspect de l'invention, le module d'analyse, le module de périodicité, le module de traitement fréquentiel et le module de calcul sont des algorithmes adaptés à être exécutés par au moins un terminal informatique.

Selon une cinquième caractéristique du premier aspect de
15 l'invention, le dispositif de mesure est disposé sur un axe parallèle à l'axe longitudinal de la nacelle. Ce positionnement du dispositif de mesure rend possible la projection des données d'accélération dans le repère tridimensionnel du rotor.

Un deuxième aspect de l'invention concerne un procédé de
20 diagnostic d'un déséquilibre rotor d'une éolienne à partir de données d'accélération mesurées au niveau d'une nacelle d'éolienne qui est supportée par une tour, caractérisé en ce qu'il comporte :

- une étape de mesure systématique et continue selon trois axes
25 X, Y, Z de données d'accélération correspondant aux phénomènes vibratoires se produisant au niveau de la nacelle ; et
- une étape de traitement des données d'accélération de manière à déterminer le déséquilibre du rotor au travers d'une
30 analyse vibratoire qui se base uniquement sur les données d'accélération mesurées sur au moins deux axes X, Y, Z au niveau de la nacelle sans intervenir dans le fonctionnement normal de l'éolienne.

Selon une première caractéristique du deuxième aspect de l'invention, l'étape de traitement des données d'accélération comprend :

- 5 - une opération d'analyse en continue des données d'accélération afin de déterminer une période de fonctionnement Tf stable de l'éolienne, et
- 10 - une opération de détermination d'une pluralité de périodes de fonctionnement Tf stable de l'éolienne, le déséquilibre rotor étant déterminé au cours de cette pluralité de périodes de fonctionnement Tf stable de l'éolienne qui est définie par une fréquence 3P stable de passage des pales devant la tour.

En particulier, une période de fonctionnement Tf est déterminée lorsque des vibrations V3P dues au passage d'une pale devant la
15 tour selon au moins un axe X, Y, Z sont identifiées.

D'autres particularités et avantages apparaîtront dans la description détaillée qui suit, d'un exemple de réalisation non limitatif de l'invention, qui est illustré par les figures 1 à 9 placées en annexe et dans lesquelles :

- 20 - la figure 1 est une représentation schématique d'un système de diagnostic du déséquilibre rotor d'une éolienne qui est conforme à un exemple de réalisation de l'invention ;
- la figure 2 est une représentation d'un signal vibratoire
25 brut de données d'accélération ;
- la figure 3 est représentation simplifiée d'un spectre fréquentiel suréchantillonné de données d'accélération.
- la figure 4 est une représentation simplifiée d'un spectre fréquentiel transformé ;
- 30 - la figure 5 est une représentation d'un histogramme correspondant à une distribution des vibrations axiales quantifiées du rotor pour lequel un ajustement de type Weibull a été réalisé ;

- la figure 6 est une représentation d'un histogramme correspondant à une distribution des vibrations transversales quantifiées du rotor pour lequel un ajustement de type Gaussien a été réalisé ;
- 5 - la figure 7 est une représentation graphique d'un facteur de correction axial ;
- la figure 8 est une représentation graphique d'une courbe de distribution du déséquilibre aérodynamique du rotor ;
et
- 10 - la figure 9 est une représentation schématique d'un procédé de diagnostic du déséquilibre rotor d'une éolienne effectué par le système de diagnostic de la figure 1.

L'invention concerne un système de diagnostic 1 d'un déséquilibre rotor d'une éolienne.

- 15 De manière générale, une éolienne se compose d'une tour qui est ancrée au sol ou à des fonds marins. La tour supporte une nacelle au niveau de laquelle est ménagé le rotor. Le rotor s'étend selon un axe longitudinal qui se confond avec son axe de rotation X'' et présente un angle de tangage par rapport à l'axe longitudinal X' de la nacelle. De manière générale, l'angle de tangage de l'axe de rotation X'' du rotor est de 5° . Ici, et dans la plupart des cas, le rotor comprend trois pales.

- Comme illustré aux figures 1 et 9, le système de diagnostic 1 permet, au travers d'un procédé de diagnostic, de déterminer le déséquilibre rotor à partir de données d'accélération mesurées au niveau de la nacelle de l'éolienne. Les données d'accélération correspondent à des phénomènes vibratoires que subit la nacelle au cours du fonctionnement de l'éolienne. Les origines d'un phénomène vibratoire peuvent être multiples et dépendre des conditions météorologiques, de perturbations induites par la rotation du rotor, ou encore de perturbations induites par le passage d'une pale devant la tour etc.

Comme illustré à la figure 1, afin de mesurer les vibrations subites par la nacelle, le système de diagnostic 1 comporte un

dispositif de mesure 7 qui est équipé d'un capteur de vibration présentant trois axes de mesure X, Y, Z. Le capteur de vibration permet de mesurer des données d'accélération qui correspondent à des phénomènes vibratoires. Les données d'accélération mesurées
5 peuvent être représentées sous la forme d'un signal vibratoire brut tel qu'illustré à la figure 2. Ici, le capteur de vibration est formé par un accéléromètre à trois axes de mesure X, Y, Z.

Le dispositif de mesure 7 est positionné sur la nacelle afin qu'un des axes de mesure X, Y, Z du capteur de vibration soit
10 positionné de manière parallèle à l'axe longitudinal X'. Ici, l'axe de mesure X est positionné de manière parallèle à l'axe longitudinal X'. De préférence, le dispositif de mesure 7 est solidarisé de manière rigide à un mât météo de l'éolienne.

Une fois positionné, le dispositif de mesure 7 est mis en
15 fonctionnement et effectue une opération de mesure systématique et continue des données d'accélération, selon les trois axes de mesure X, Y, Z.

Le dispositif de mesure 7 est adapté à transférer, les données d'accélération mesurées au niveau de la nacelle, vers un système
20 de traitement 8 qui est adapté à déterminer le déséquilibre rotor à partir des données d'accélération mesurées sur au moins deux axes (X'', Y'', Z'').

Dans l'exemple illustré à la figure 1, le système de traitement 8 comporte un module d'analyse 9 qui reçoit les données
25 d'accélération transférées par le dispositif de mesure 7.

En outre, le dispositif de mesure 7 peut comporter une mémoire lui permettant de stocker les données collectées localement.

Ici, le module d'analyse 9 est un algorithme stocké et exécuté par un terminal informatique 10 qui peut être embarqué au niveau
30 de l'éolienne ou être situé à distance de l'éolienne.

Dans le cas où le terminal informatique 10 est situé à distance de l'éolienne, le dispositif de mesure 7 comporte des moyens de transmission au travers d'un réseau de télécommunication, tel qu'un réseau GSM ou satellite.

Afin de limiter les interventions au niveau de la nacelle de l'éolienne, le dispositif de mesure 7 est alimenté en énergie électrique par une batterie ou par l'éolienne.

Plus précisément, le module d'analyse 9 est intégré au système de diagnostic 1, et est adapté à analyser en continu les données d'accélération transmises par le dispositif de mesure 7 de manière à déterminer une période de fonctionnement T_f de l'éolienne. De préférence, la période de fonctionnement T_f est comprise entre 15 secondes et 90 secondes et de préférence la période de fonctionnement T_f est comprise entre 20 et 60 secondes.

Une période de fonctionnement T_f est déterminée lorsque que le module d'analyse 9 identifie des vibrations V3P de la nacelle, selon au moins un axe X, Y, Z, qui sont induites par le passage d'une pale devant la tour.

Dans cet objectif, le module d'analyse 9 effectue un procédé de raffinage des données d'accélération qui permet d'obtenir un spectre fréquentiel tel qu'illustré à la figure 3. Le spectre fréquentiel de la figure 3 comporte, d'une part, en abscisse la fréquence de la vibration mesurée, et d'autre part, en ordonnée, le niveau d'accélération du signal vibratoire qui correspond à l'intensité de la vibration mesurée.

Le procédé de raffinage des données d'accélération mesurées permet de mettre en exergue, en fonction de leur niveau d'accélération et de leur fréquence, les vibrations V3P de la nacelle, qui correspondent aux vibrations induites par le passage d'une pale devant la tour de l'éolienne.

A cet effet, le procédé de raffinage utilise une succession d'opérations de traitement de manière à améliorer la lisibilité du spectre fréquentiel en ne laissant subsister que les vibrations V3P correspondant au passage d'une pale devant la tour. Dans l'exemple de la figure 4, seul un pic subsiste, il correspond à une vibration V3P de la nacelle.

Dans cette optique, le procédé de raffinage comporte une première opération de projection des données d'accélération dans un repère tridimensionnel X' , Y' , Z' de la nacelle. Le vecteur de gravité G qui est considéré comme relativement constant par nature et correspond à l'axe Z' de la nacelle.

En outre, le vecteur de gravité G est utilisé comme référence pour projeter, au travers d'une première matrice de rotation, les données d'accélération X , Y , Z dans le repère tridimensionnel X' , Y' , Z' de la nacelle.

10 Quelque soit l'inclinaison du dispositif de mesure 7 la projection des données d'accélération dans le repère X' , Y' , Z' permet de faire correspondre l'axe Z' avec le vecteur de gravité G .

Le procédé de raffinage comporte une seconde opération de projection qui utilise une seconde matrice de rotation pour projeter les données d'accélération depuis le repère tridimensionnel X' , Y' , Z' de la nacelle vers un repère tridimensionnel X'' , Y'' , Z'' du rotor. Comme indiqué précédemment, le rotor présente un angle de tangage par rapport à la nacelle, cette seconde projection dans le repère tridimensionnel X'' , Y'' , Z'' permet de projeter les données d'accélération dans le plan du rotor.

Les deux opérations de projection des données d'accélération permettent, d'une part, de limiter les contraintes de positionnement du dispositif de mesure 7, et d'autre part, de projeter les données d'accélération dans le repère tridimensionnel X'' , Y'' , Z'' du rotor sur lequel les efforts du déséquilibre rotor se répercutent.

Le procédé de raffinage comporte une opération de formation d'un spectre fréquentiel des données d'accélération projetées dans le repère tridimensionnel X'' , Y'' , Z'' du rotor. Typiquement, l'opération de formation du spectre fréquentiel peut être réalisée à l'aide d'une transformée de fourrier.

Afin d'améliorer la résolution du spectre fréquentiel le procédé de raffinage comporte une étape de suréchantillonnage du spectre fréquentiel. Cette étape de suréchantillonnage contribue à améliorer la précision de l'identification des pics et/ou signaux correspondant aux vibrations V3P (illustré à la figure 3).

Le procédé de raffinage comporte une opération d'identification de signaux correspondant aux vibrations V3P de la nacelle. Afin d'effectuer cette opération, le module d'analyse 9 génère un spectre fréquentiel transformé en réalisant le produit de chaque pic et/ou signal du spectre fréquentiel suréchantillonné avec le pic et/ou signal d'au moins les cinq premières harmoniques dudit pic et/ou signal.

En effet, seules les vibrations induites par le passage d'une pale devant la tour excitent la fréquence de vibration fondamentale et au moins cinq de ses premières harmoniques sur l'axe X''. Ainsi, le produit de chaque pic et/ou signal du spectre fréquentiel suréchantillonné avec le pic et/ou signal d'au moins les cinq premières harmoniques du spectre fréquentiel suréchantillonné permet de ne faire subsister que les vibrations V3P correspondant au passage d'une pale devant la tour.

Le module d'analyse 9 identifie la fondamentale des vibrations V3P par une sélection de pics significatifs par rapport au bruit du spectre fréquentiel transformé illustré à la figure 4. En pratique, chaque pic significatif correspond à une vibration V3P et la sélection de pics significatifs peut être réalisée sur une plage fréquentielle prédéterminée qui dépend des données constructeurs de l'éolienne. Par exemple, le module d'analyse 9 peut être paramétré pour sélectionner des pics significatifs lorsqu'ils se trouvent dans une plage fréquentielle comprise entre 0,1 Hz et 2 Hz.

Au travers du procédé de raffinage le module d'analyse 9 permet de déterminer une fréquence 3P du rotor par extraction de la fondamentale des vibrations V3P des données d'accélération

mesurées par le dispositif de mesure 7. La fréquence 3P du rotor correspond à la fréquence de passage d'une pale devant la tour.

Comme illustré à la figure 1, le système de traitement 8 comporte un module de périodicité 11 qui est adapté à
5 enregistrer dans une mémoire M du terminal informatique 10 une période T_r de rotation régulière du rotor en fonction des vibrations V3P identifiées. La mémoire M du terminal informatique 10 peut être constituée par un disque dur ou une mémoire flash.

10 Dans le présent exemple, le module de périodicité 11 est un algorithme stocké et exécuté par le terminal informatique 10.

Au travers d'un procédé d'analyse des vibrations V3P identifiées sur un spectre fréquentiel transformé de périodes de fonctionnement T_f qui se succèdent, le module de périodicité 11
15 crée et enregistre une période T_r dans la mémoire M du terminal informatique 10.

A cet effet, le procédé d'analyse effectué par le module de périodicité 11 comporte une opération de balayage des vibrations V3P identifiées sur le spectre fréquentiel transformé d'une
20 période de fonctionnement T_f . Lors de l'opération de balayage, le module de périodicité 11 compare la fréquence des vibrations V3P identifiées avec une fréquence 3P de référence de l'éolienne.

Ici, la fréquence 3P de référence de l'éolienne correspond à une
25 fréquence 3P théorique qui dépend du type d'éolienne et relève d'une donnée constructeur connue. La fréquence 3P théorique correspond, par exemple, à la valeur de la fréquence 3P pendant un fonctionnement nominal du rotor, où les efforts causés par le déséquilibre du rotor s'exercent sur le rotor de manière
30 maximale.

Lorsque le module de périodicité 11 détecte sur le spectre fréquentiel transformé d'une période de fonctionnement T_f , au moins une vibration V3P dont la fréquence est voisine de la fréquence 3P de référence de l'éolienne, le module de

périodicité 11 réalise une opération de présélection de ladite période de fonctionnement T_f . En pratique, ladite période de fonctionnement T_f présélectionnée est stockée de manière temporaire et/ou permanente dans une mémoire M_v du module de
5 périodicité 11.

La mémoire M_v du module de périodicité 11 peut être constituée par une mémoire vive, un disque dur ou encore une mémoire flash.

Lorsque le module de périodicité 11 présélectionne un nombre seuil NS de période de fonctionnement T_f qui se succèdent
10 chronologiquement, le module de périodicité 11 réalise une opération d'assemblage du nombre seuil NS des périodes de fonctionnement T_f successives pour créer une période de rotation T_r régulière du rotor.

Dans le présent exemple, le nombre seuil NS de périodes de
15 fonctionnement T_f présélectionnées nécessaire pour créer une période de rotation T_r régulière peut être compris entre 5 et 30 périodes de fonctionnement T_f présélectionnées et de préférence entre 10 et 20 périodes de fonctionnement T_f présélectionnées.

Ici, chaque période de rotation T_r régulière déterminée via une
20 analyse vibratoire correspond à une période de 2 à 15 minutes au cours de laquelle le rotor tourne à une vitesse régulière.

Dans cet exemple, le module de périodicité 11 enregistre chaque période T_r dans la mémoire M du terminal informatique 10.

En outre, dans l'exemple de la figure 1, le système de
25 traitement 8 du système de diagnostic 1 comporte un module de traitement fréquentiel 12 adapté à déterminer des vibrations V_{IP} de la nacelle qui sont induites par le déséquilibre du rotor.

Dans le présent exemple, le module de traitement fréquentiel 12 est un algorithme stocké et exécuté par le terminal informatique
30 10.

Au travers d'un procédé de traitement fréquentiel d'une période de rotation T_r régulière enregistrée dans la mémoire M , le module de traitement fréquentiel 12 détermine des vibrations V_{IP}

dont la fréquence est voisine d'une fréquence 1P de référence de l'éolienne.

La fréquence 1P correspond à la vitesse de rotation du rotor. Lorsque la vitesse de rotation du rotor est stable, la fréquence
5 1P est également stable.

Par ailleurs, dans cet exemple, la fréquence 1P de référence de l'éolienne correspond à une fréquence 1P théorique qui dépend du type d'éolienne et relève d'une donnée constructeur connue. La
10 fréquence 1P théorique correspond, par exemple, à la valeur de la fréquence 1P pendant un fonctionnement nominal du rotor au cours duquel les efforts causés par le déséquilibre du rotor s'exercent sur le rotor de manière maximale.

Le module de traitement fréquentiel 12 quantifie, sur une période de rotation T_r régulière des vibrations V1P dont la
15 valeur est comprise entre -20% et + 20% de la fréquence 1P de référence, de préférence le module de traitement fréquentiel 12 quantifie des vibrations V1P dont la valeur est comprise entre -15 % et +15 % de la fréquence 1P de référence et de préférence le module de traitement fréquentiel 12 quantifie des vibrations
20 V1P dont la valeur est comprise entre -10 % et +5 % de la fréquence 1P de référence.

Dans cet objectif, le module de traitement fréquentiel 12 réalise une étape de quantification du niveau d'accélération des vibrations V1P axiales et transversales autour de la fréquence
25 1P de référence, c'est-à-dire, la quantification de l'intensité vibratoire des vibrations V1P axiales, selon l'axe X'', et V1P transversales, selon l'axe Y''.

Dans l'exemple illustré à la figure 1, le système de traitement
8 du système de diagnostic 1 comporte un module de calcul 13
30 adapté à déterminer le déséquilibre rotor en fonction des vibrations V1P axiales et V1P transversales d'un nombre déterminé N_d de périodes de rotation T_r régulières enregistrées dans la mémoire M.

Ici, le module de calcul 13 est un algorithme stocké et exécuté par le terminal informatique 10.

Dans cet exemple, le nombre déterminé Nd de périodes de rotation Tr régulières est compris entre 100 et 400, et de préférence le
5 nombre déterminé Nd de périodes de rotation Tr régulières est compris entre 200 et 300.

Afin de déterminer le déséquilibre rotor, le module de calcul 13 réalise des opérations de traitement statistique qui permettent d'obtenir une valeur globale des vibrations VIP axiales et
10 transversales pour le nombre déterminé Nd de périodes de rotation Tr régulières dans la mémoire M. Dans cet exemple, le module de calcul 13 traite de manière indépendante les valeurs globales des vibrations VIP axiales et transversales.

De manière connue, le déséquilibre rotor d'une éolienne comporte
15 deux composantes, un déséquilibre aérodynamique du rotor et un déséquilibre massique du rotor.

Il a été démontré que les vibrations axiales VIP sont principalement résultantes du déséquilibre aérodynamique et principalement induites par un comportement aérodynamique
20 différent entre chaque pale de l'éolienne. Les vibrations axiales VIP varient avec la force du vent. De plus, le déséquilibre aérodynamique d'un rotor peut être dû à une erreur de montage des pales telle qu'un décalage d'angle de tangage d'une ou plusieurs pale(s), à une déformation des pales qui peut
25 être induite par des impacts de foudre, une usure différenciée des pales, ou encore une différence de fabrication entre chaque pale.

Dans le cas des vibrations transversales VIP, elles résultent principalement d'un déséquilibre massique du rotor et sont
30 principalement induites par la rotation du rotor. Le déséquilibre massique du rotor peut être dû à un problème de fissures d'une pale qui peut favoriser une accumulation d'eau dans cette pale, ou un dépôt de matière sur les pales, par exemple un dépôt de givre.

La figure 5 présente une distribution des vibrations VIP axiales pour le nombre déterminé N_d de périodes de rotation T_r régulières selon un premier histogramme 14. L'histogramme 14 présente sur l'axe des abscisses les valeurs d'accélération des vibrations VIP axiales et sur l'axe des ordonnées la proportion et/ou la quantité de vibrations VIP axiales. La distribution est effectuée par le module de calcul 13.

Afin de déterminer une valeur globale des vibrations VIP axiales, il est nécessaire d'interpréter la distribution des vibrations VIP axiales sur l'histogramme 14.

Comme indiqué au préalable, lorsque la vitesse du rotor est constante, la spécificité de la distribution des vibrations VIP axiales est due à différentes vitesses de vent qui s'appliquent sur le rotor et les pales. Pour interpréter un tel phénomène, le module de calcul 13 utilise un modèle statistique tel que la loi de Weibull. Une valeur globale des vibrations VIP axiales est déterminée au travers du calcul du paramètre A de la loi de Weibull qui représente la valeur caractéristique de la distribution des valeurs des vibrations VIP axiales.

Dans l'exemple illustré à la figure 5, le module de calcul 13 ajuste une courbe de Weibull 16 à la distribution des vibrations VIP axiales de manière à déterminer le paramètre A de la courbe de Weibull ajustée.

La figure 6 présente une distribution des vibrations VIP transversales pour le nombre déterminé N_d de périodes de rotation T_r régulières selon un second histogramme 17. L'histogramme 17 présente sur l'axe des abscisses les valeurs d'accélération des vibrations VIP transversales et sur l'axe des ordonnées la proportion et/ou la quantité de vibrations VIP transversales. La distribution est effectuée par le module de calcul 13.

Afin de déterminer une valeur globale des vibrations VIP transversales, il est nécessaire d'interpréter la distribution des vibrations VIP transversales sur l'histogramme 17.

Comme indiqué préalablement, les vibrations VIP transversales varient principalement avec à la vitesse de rotation du rotor. Or, les périodes de rotation T_r régulières sélectionnées sont caractérisées par une vitesse de rotation constante du rotor.

5 Par voie de faits et comme illustré sur la figure 6, la distribution des vibrations VIP transversales sur l'histogramme 17 présente un profil classique de distribution Gaussienne. Dans ce contexte, une fonction gaussienne constitue un modèle pertinent pour déterminer une valeur globale caractéristique de

10 la distribution des vibrations VIP transversales.

Ainsi, le module de calcul 13 ajuste une courbe Gaussienne 18 sur l'histogramme 17 de distribution des vibrations VIP transversales à l'aide d'une fonction Gaussienne. Dans cet exemple, la valeur globale des vibrations VIP transversales

15 correspond à la valeur moyenne μ de la courbe Gaussienne 18 ajustée.

En outre, comme cela a été évoqué, le déséquilibre aérodynamique est la principale origine des vibrations axiales VIP. De manière connue, le déséquilibre massique du rotor constitue également

20 une origine annexe des vibrations axiales VIP. Toutefois, proportionnellement au déséquilibre aérodynamique du rotor, le déséquilibre massique du rotor représente une partie moindre de l'intensité des vibrations VIP axiales.

A l'inverse, la principale origine des vibrations transversales

25 VIP est le déséquilibre massique du rotor, le déséquilibre aérodynamique du rotor constituant une origine annexe des vibrations transversales VIP. Toutefois, proportionnellement au déséquilibre massique du rotor, le déséquilibre aérodynamique du rotor représente une partie moindre de l'intensité des

30 vibrations VIP transversales.

Dans ce contexte, pour un même nombre déterminé N_d de périodes de rotation T_r régulières, le module de calcul 13 réalise une opération de correction des valeurs globales des vibrations VIP axiales A et transversales μ l'une par rapport à l'autre.

De préférence, les opérations de correction des valeurs globales des vibrations axiales A et transversales μ sont indépendantes.

A cet effet, le module de calcul 13 peut utiliser une fonction logistique qui permet de calculer un coefficient de correction de chaque valeur globale A, μ .

Dans l'exemple de la figure 7, est illustré graphiquement, sous la forme d'une courbe d'un coefficient de correction axial de la valeur globale A. Ici, le coefficient de correction axial est compris entre 0 et 1. En pratique, plus le coefficient de correction axial comporte une valeur proche de la valeur 1, plus la part des vibrations VIP transversales dans l'intensité des phénomènes vibratoires axiaux est faible.

Afin d'obtenir le coefficient de correction de la valeur globale A, le module de calcul 13 peut utiliser la fonction logistique ci-dessous :

$$\text{facteur correctif axial } (x) = \frac{1}{1 + e^{-k \cdot (x - x_0)}}$$

où $x = (\text{valeur globale } \mu \text{ VIP transversales} / \text{valeur globale A VIP axiales})$, et $c=0.25$, $k=1.1$, $x_0=2.5$ peuvent être utilisées comme valeurs de coefficient pour un type d'éolienne déterminé.

Le module de calcul 13 détermine le déséquilibre aérodynamique du rotor en fonction du produit de la valeur globale A des vibrations VIP axiales et du coefficient de correction axial.

Dans l'exemple de la figure 8, le déséquilibre aérodynamique est représenté graphiquement par une courbe dont la valeur varie entre 0 et 1. La valeur 0 correspondant à l'équilibre parfait du rotor, alors que la valeur 1 correspond à un déséquilibre maximal théorique qui ne peut être atteint. En pratique, lorsque le système de diagnostic 8 détermine un déséquilibre aérodynamique qui est supérieur à une valeur comprise entre 0,2 et 0,3, il est conseillé d'intervenir sur l'éolienne en question afin d'éviter tout dommage au niveau des pales ou du rotor.

Afin de déterminer le déséquilibre aérodynamique du rotor, le module de calcul 13 utilise une fonction logistique :

$$\text{diagnostic déséquilibre aérodynamique } (x) = \frac{1}{1 + e^{-k \cdot (x-x_0)}}$$

où x = valeur globale A VIP axiale * facteur correctif axial
(valeur_globale_transverse_VIP/valeur_globale_axial_VIP), et
 $k=0.9$, $x_0=2.75$ qui peuvent être utilisées comme valeurs de
5 coefficient pour un type d'éolienne déterminé.

Ici, les valeurs axiales et transversales VIP sont exprimées en
mg (milig), le milig étant une unité d'accélération.

De la même manière, le module de calcul 13 détermine un
coefficient de correction transversal de la valeur globale μ par
10 exemple à l'aide d'une fonction logistique de même type que
celle décrite pour le coefficient de correction axial :

$$\text{facteur correctif transverse } (x) = \frac{1}{1 + e^{-k \cdot (x-x_0)}}$$

où x = (valeur globale A VIP axiales/valeur globale μ VIP
transversales), et $c=0.2$, $k=1.1$, $x_0=1.75$ qui peuvent être
15 utilisées comme valeurs de coefficient pour un type d'éolienne
déterminé.

D'un point de vue graphique, le facteur correctif transversal
présente un profil de courbe similaire à celui du facteur
correctif axial qui est illustré à la figure 7.

20 De manière similaire, plus le coefficient de correction
transversal comporte une valeur proche la valeur 1, plus la part
des vibrations VIP axiales dans l'intensité des phénomènes
vibratoires transversaux est faible.

Le module de calcul 13 détermine le déséquilibre massique en
25 fonction du produit du coefficient de correction transversal et
de la valeur globale des vibrations VIP transversales. La
détermination du déséquilibre massique du rotor est effectuée au
travers d'une fonction logistique de même type que celle
utilisées pour déterminer le déséquilibre aérodynamique :

$$30 \quad \text{diagnostic déséquilibre de masse } (x) = \frac{1}{1 + e^{-k \cdot (x-x_0)}}$$

où $x = \text{valeur globale } \mu \text{ VIP transversale} * \text{facteur correctif transversale} (\text{valeur_globale_axiale_VIP} / \text{valeur globale_transverse_VIP})$, et $k=0.7$, $x_0=2.25$ qui peuvent être
5 utilisées comme valeurs de coefficients pour un modèle d'éolienne déterminé.

Le déséquilibre massique du rotor peut également être exprimé selon une échelle de 0 à 1 selon une interprétation similaire au déséquilibre aérodynamique du rotor. A savoir, que la valeur 0
10 correspond à l'équilibre parfait du rotor, alors que la valeur 1 correspond à un déséquilibre maximal théorique qui ne peut être atteint.

D'un point de vue graphique, le déséquilibre massique du rotor présente un profil de courbe similaire à celui du déséquilibre
15 aérodynamique qui est illustré à la figure 8.

En pratique, lorsque que le système de diagnostic détermine un déséquilibre massique qui est supérieur à des valeurs comprises entre 0,2 et 0,3, il est également conseillé d'intervenir sur l'éolienne en question afin d'éviter tout dommage au niveau des
20 pales et/ou du rotor.

Le système de diagnostic 1 fonctionne en continu et permet de transmettre des données en continu et en temps réel aux exploitants des parcs d'éoliennes.

Le système de diagnostic 1 permet de déterminer, au travers d'un
25 procédé de diagnostic, le déséquilibre aérodynamique et massique du rotor sans intervenir dans le fonctionnement normal de l'éolienne. En d'autres termes, le déséquilibre aérodynamique et massique du rotor est déterminé sans intervenir sur les réglages de fonctionnement de l'éolienne. Ainsi, à titre indicatif, le
30 système et le procédé de diagnostic ne nécessitent pas de modifier l'angle de tangage du rotor pour déterminer le déséquilibre rotor.

Au regard des informations que reçoivent les exploitants des parcs d'éoliennes, ils peuvent optimiser la gestion de leurs parcs éoliens. Le système de diagnostic permet notamment d'orienter les exploitants des parcs dans leurs démarches
5 d'entretien du parc éolien en identifiant les éoliennes qui présentent un déséquilibre rotor.

Revendications

1. Système de diagnostic (1) d'un déséquilibre rotor d'une éolienne à partir de données d'accélération mesurées au niveau d'une nacelle de l'éolienne qui est supportée par une tour, caractérisé en ce qu'il comporte :
- 5
- un dispositif de mesure (7) équipé d'un capteur de vibration trois axes (X, Y, Z) qui effectue des mesures systématiques et continues des données d'accélération correspondant aux phénomènes vibratoires se produisant au niveau de la nacelle ; et

10

 - un système de traitement (8) des données d'accélération adapté à déterminer le déséquilibre du rotor au travers d'une analyse vibratoire qui se base uniquement sur les données d'accélération mesurées sur au moins deux axes (X, Y, Z) au niveau de la nacelle sans intervenir sur le fonctionnement normal de l'éolienne.

15
2. Système de diagnostic (1) selon la revendication 1, caractérisé en ce que le système de traitement (8) comprend un module d'analyse (9) qui analyse en continue des données d'accélération mesurées par le dispositif de mesure (7) afin de déterminer une période de fonctionnement (Tf) stable de l'éolienne, le déséquilibre rotor étant déterminé au cours d'une pluralité de périodes de fonctionnement (Tf) stable de l'éolienne qui sont définies par une fréquence (3P) stable de passage des pales devant la tour.
- 20
- 25
3. Système de diagnostic (1) selon la revendication 2, caractérisé en ce que le module d'analyse (9) détermine une période de fonctionnement (Tf) lorsqu'il identifie des vibrations (V3P) dues au passage d'une pale devant la tour selon au moins un axe (X, Y, Z).
- 30
4. Système de diagnostic (1) selon la revendication 3, caractérisé en ce que le module d'analyse (9) identifie les vibrations (V3P) après une opération de raffinement des

données d'accélération mesurées, l'opération de raffinage comportant :

- 5 - une étape de projection des données d'accélération collectées dans un repère tridimensionnel (X'' , Y'' , Z'') du rotor ;
- une étape de formation d'un spectre fréquentiel des données d'accélération projetées dans le repère tridimensionnel (X'' , Y'' , Z'') du rotor ;
- 10 - une étape de suréchantillonnage du spectre fréquentiel ;
et
- une étape de sélection de pics correspondant aux vibrations (V3P) qui est réalisée par le produit de chaque pic du spectre fréquentiel suréchantillonné avec le pic d'au moins les cinq premières harmoniques dudit
15 pic.

- 20 5. Système de diagnostic (1) selon l'une des revendications 2 à 4, caractérisé en ce que le système de traitement (8) comporte un module de périodicité (11) qui est adapté à déterminer et enregistrer une période de rotation (T_r) régulière du rotor qui correspond à une pluralité de périodes de fonctionnement (T_f) stable de l'éolienne.
- 25 6. Système de diagnostic (1) selon la revendication 5, caractérisé en ce que le module de périodicité (11) balaye les vibrations (V3P) identifiées au cours d'une période de fonctionnement (T_f) de manière à détecter au moins une vibration (V3P) dont la fréquence est voisine d'une fréquence (3P) de référence de l'éolienne, lorsque que le module de périodicité (11) détecte au moins une vibration (V3P) dont la fréquence est voisine de la valeur de la
30 fréquence (3P) théorique de l'éolienne, le module de périodicité (11) présélectionne la période de fonctionnement (T_f).
7. Système de diagnostic (1) selon l'une des revendications 5 et 6, caractérisé en ce que, lorsque le module de

- 5 périodicité (11) sélectionne un nombre seuil (NS) de périodes de fonctionnement (Tf) qui se succèdent chronologiquement, le module de périodicité (11) enregistre une période de rotation (Tr) régulière du rotor.
8. Système de diagnostic (1) selon l'une des revendications 2 à 7, caractérisé en ce que le système de traitement (8) comprend un module de traitement fréquentiel (12) adapté à quantifier selon au moins deux axes (X'', Y'', Z'') des vibrations (VlP) de la nacelle dues à un déséquilibre du rotor au cours d'une pluralité de périodes de fonctionnement (Tf) stable de l'éolienne.
- 10
9. Système de diagnostic (1) selon la revendication 8, caractérisé en ce que le module de traitement fréquentiel (12) quantifie des vibrations (VlP) dont la fréquence est voisine d'une fréquence (1P) de référence de l'éolienne.
- 15
10. Système de diagnostic (1) selon l'une des revendications 8 et 9, caractérisé en ce que le système de traitement (8) comprend un module de calcul (13) adapté à déterminer le déséquilibre du rotor en fonction des vibrations (VlP) selon au moins deux axes (X'', Y'', Z'') qui ont été quantifiées au cours d'une pluralité de périodes de fonctionnement (Tf) stable de l'éolienne.
- 20
11. Système de diagnostic (1) selon la revendication 10, caractérisé en ce que le module de calcul (13) détermine, en fonction des vibrations (VlP) quantifiées selon au moins deux axes (X'', Y'', Z''), un déséquilibre aérodynamique du rotor et un déséquilibre massique du rotor qui forment le déséquilibre rotor.
- 25
- 30 12. Système de diagnostic (1) selon l'une des revendications 10 et 11, caractérisé en ce que le module d'analyse (9), le module de périodicité (11), le module de traitement fréquentiel (12) et le module de calcul (13) sont des

algorithmes adaptés à être exécutés par au moins un terminal informatique (10).

5 13. Procédé de diagnostic d'un déséquilibre rotor d'une éolienne à partir de données d'accélération mesurées au niveau d'une nacelle d'éolienne qui est supportée par une tour, caractérisé en ce qu'il comporte :

10 - une étape de mesure systématique et continue selon trois axes (X, Y, Z) de données d'accélération correspondant aux phénomènes vibratoires se produisant au niveau de la nacelle ; et

15 - une étape de traitement des données d'accélération de manière à déterminer le déséquilibre du rotor au travers d'une analyse vibratoire qui se base uniquement les données d'accélération mesurées sur au moins deux axes (X, Y, Z) au niveau de la nacelle sans intervenir dans le fonctionnement normal de l'éolienne.

14. Procédé de diagnostic selon la revendication 13, caractérisé en ce que l'étape de traitement des données d'accélération comprend :

20 - une opération d'analyse en continue des données d'accélération afin de déterminer une période de fonctionnement (Tf) stable de l'éolienne, et

25 - une opération de détermination d'une pluralité de périodes de fonctionnement (Tf) stable de l'éolienne qui est définie par une fréquence (3P) stable de passage des pales devant la tour, le déséquilibre rotor étant déterminé au cours de cette pluralité de périodes de fonctionnement (Tf) stable de l'éolienne.

30 15. Procédé de diagnostic selon la revendication 14, caractérisé en ce qu'une période de fonctionnement (Tf) est déterminée lorsque des vibrations (V3P) dues au passage d'une pale devant la tour selon au moins un axe (X, Y, Z) sont identifiées.

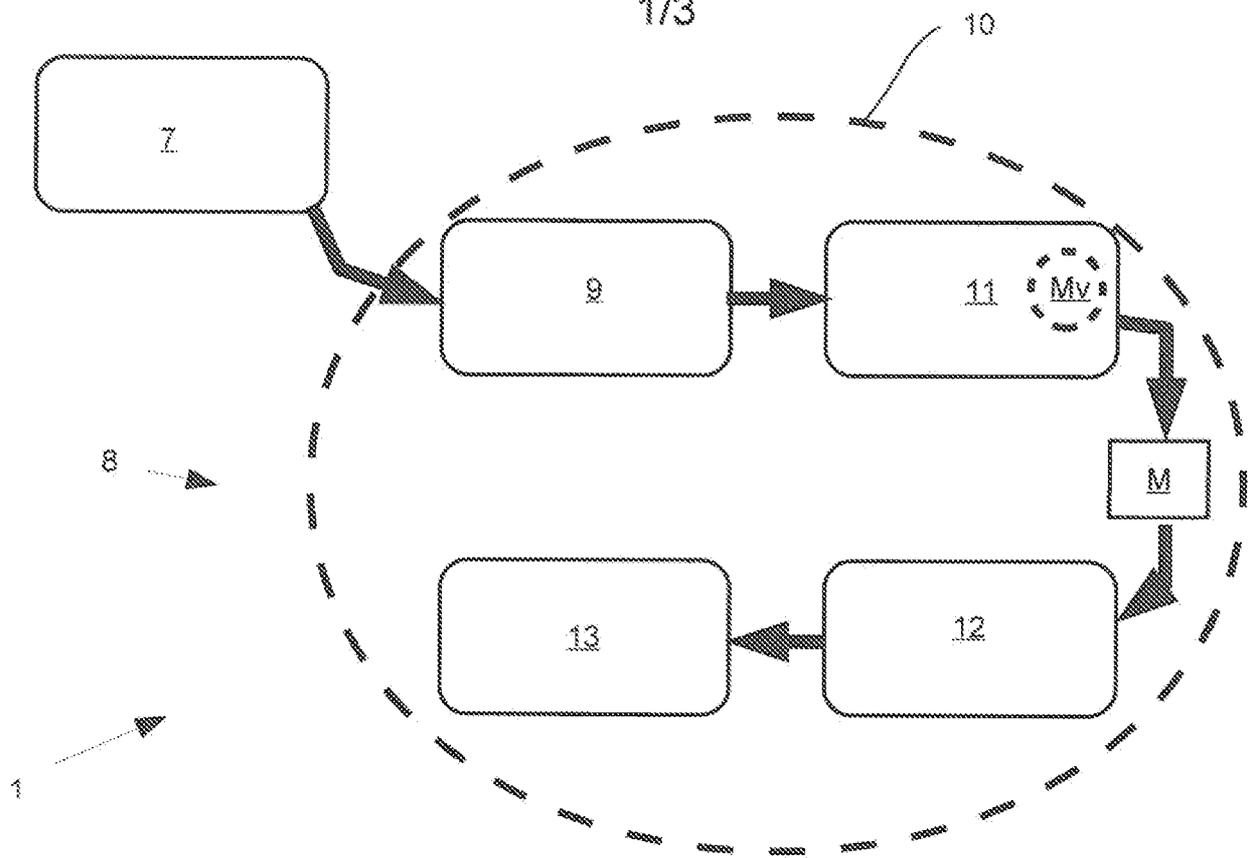


Figure 1

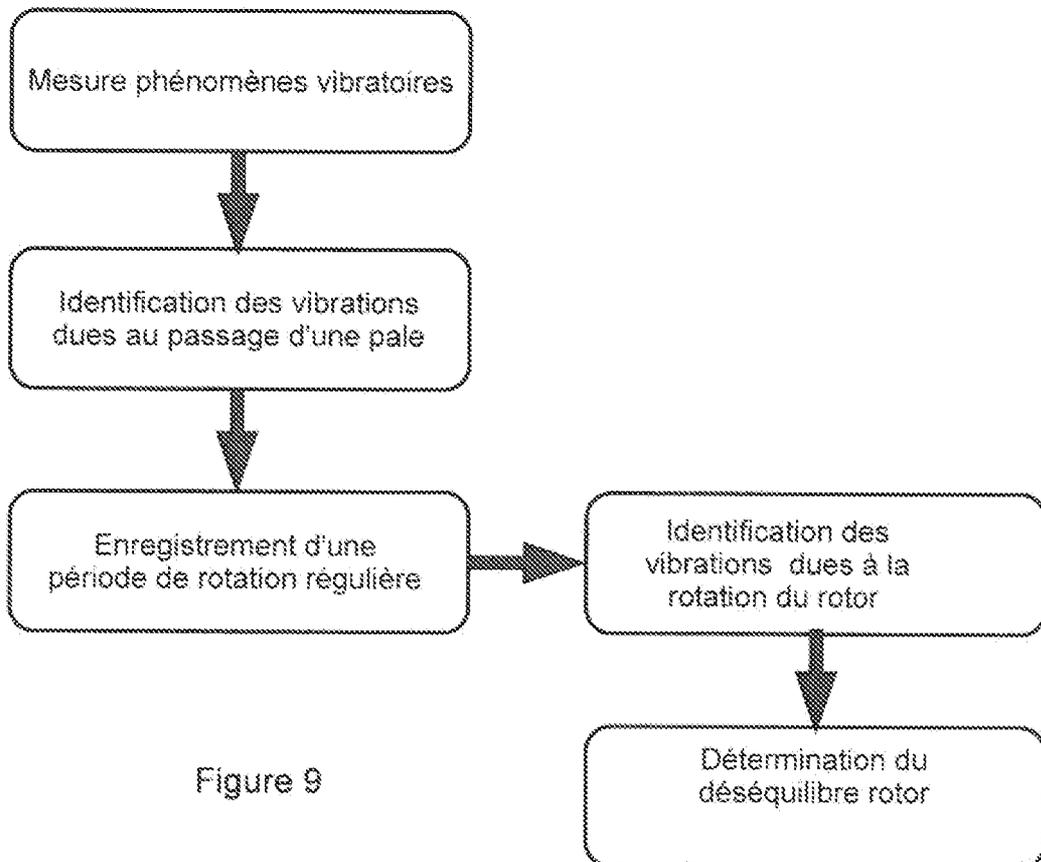


Figure 9

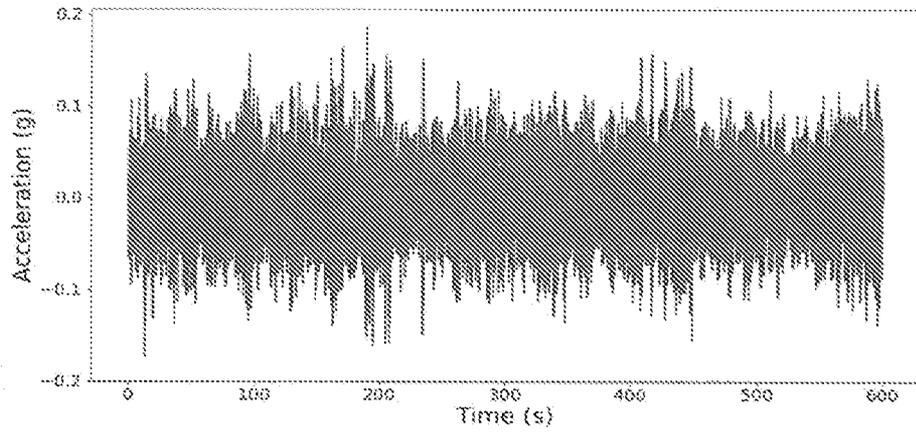


Figure 2

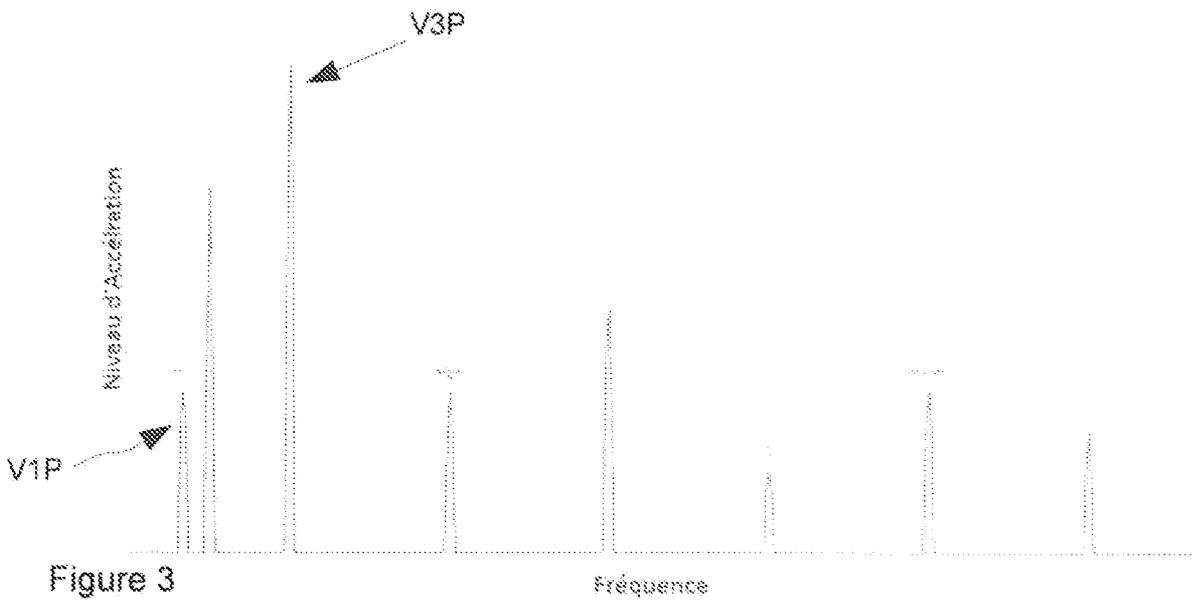


Figure 3

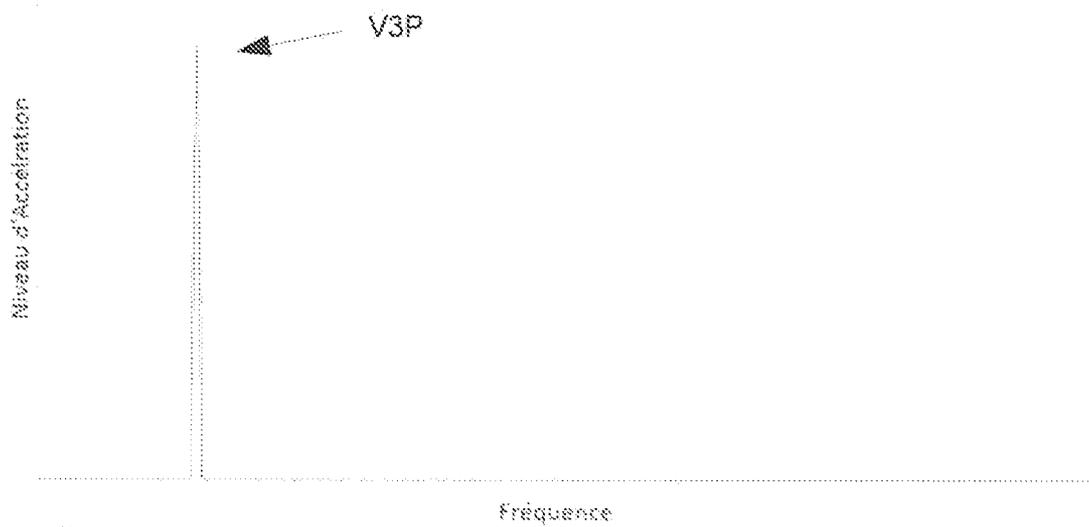


Figure 4

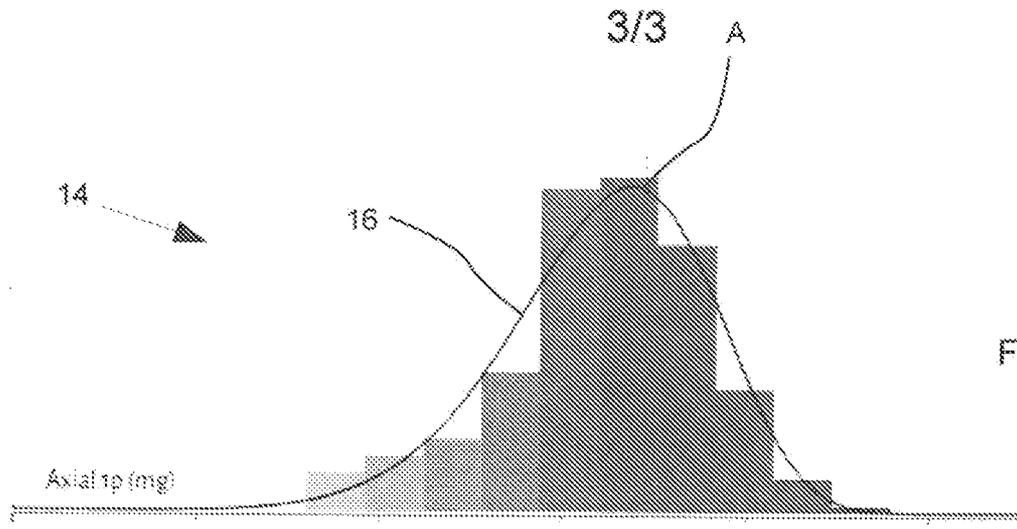


Figure 5

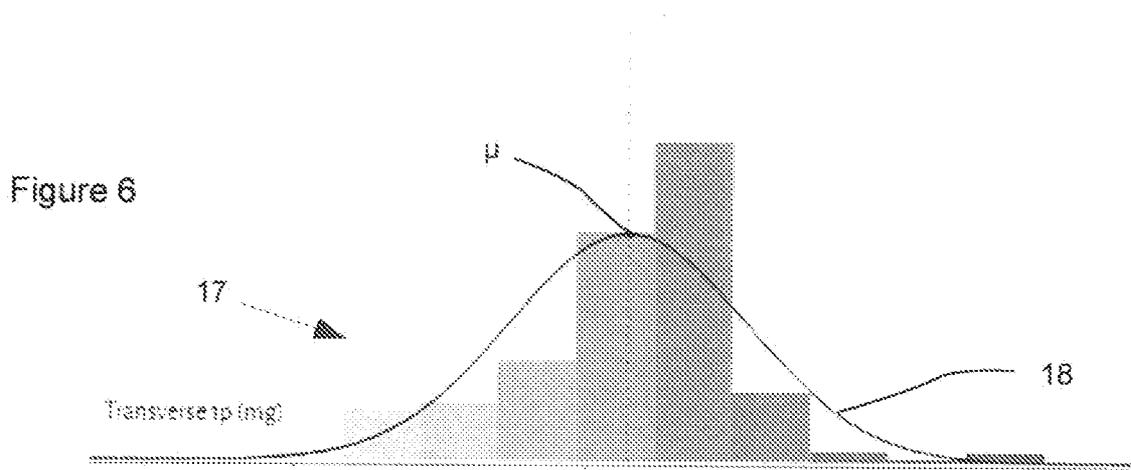


Figure 6

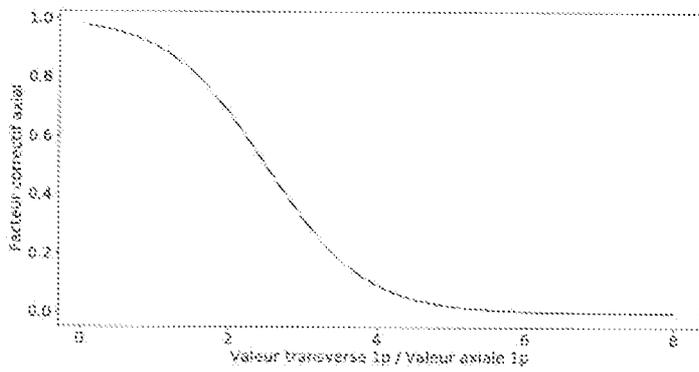
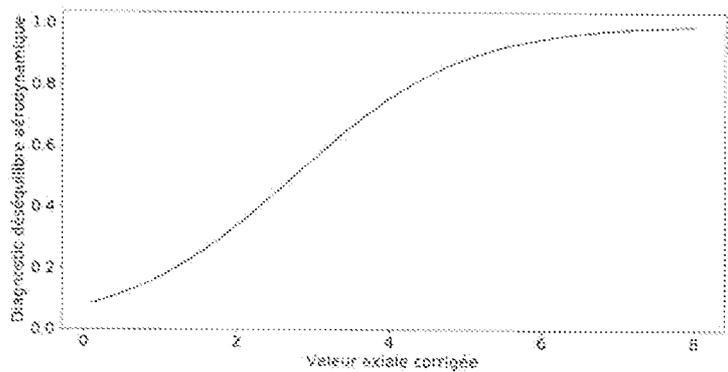


Figure 7

Figure 8



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/FR2018/052849

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. F03D7/02 F03D13/35
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)
F03D

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. |
|-----------|---|-----------------------|
| X | WO 2016/169963 A1 (ENVISION ENERGY APS [DK]) 27 October 2016 (2016-10-27) | 1-3,5-15 |
| A | page 4, line 1 - page 5, line 15 page 6, line 1 - page 7, line 21 page 8, line 1 - page 9, line 28 page 11, line 14 - line 21 page 12, line 15 - line 20 page 13, line 1 - line 10 page 17, line 1 - page 18, line 23 page 23, line 11 - page 24, line 16; figure 3 | 4 |
| X | ----- WO 2009/000787 A2 (SIEMENS AG [DE]; BIRKEMOSE BO [DK]; EGEDAL PER [DK]) 31 December 2008 (2008-12-31) page 2, line 29 - page 3, line 32 page 4, line 29 - page 5, line 30 page 10, line 10 - line 20; figure 4 ----- -/-- | 1,13 |

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 18 February 2019 | Date of mailing of the international search report 25/02/2019 |
|--|---|

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

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/FR2018/052849

| C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT | | |
|--|---|-----------------------|
| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
| X | EP 1 719 910 A1 (MITSUBISHI HEAVY IND LTD [JP]) 8 November 2006 (2006-11-08) paragraph [0007] - paragraph [0008] paragraph [0034] - paragraph [0040] paragraph [0060] - paragraph [0063] paragraph [0076] - paragraph [0077] ----- | 1,13 |
| A | EP 2 472 238 A1 (SIEMENS AG [DE]) 4 July 2012 (2012-07-04) paragraph [0047] - paragraph [0048] paragraph [0052] - paragraph [0055]; figure 2 ----- | 1-12 |
| A | US 2012/183399 A1 (PERKINSON ROBERT H [US]) 19 July 2012 (2012-07-19) paragraph [0013] - paragraph [0014]; figure 3 ----- | 1-12 |
| X,P | WO 2018/171852 A1 (VESTAS WIND SYS AS [DK]) 27 September 2018 (2018-09-27) page 1, line 25 - line 33 page 8, line 24 - page 9, line 5 page 10, line 26 - page 12, line 34; figure 3 ----- | 1-3,13 |

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

| |
|---|
| International application No PCT/FR2018/052849 |
|---|

| Patent document cited in search report | Publication date | Patent family member(s) | Publication date |
|--|------------------|-------------------------|-------------------------------|
| WO 2016169963 | A1 | 27-10-2016 | CA 2983208 A1 27-10-2016 |
| | | | CN 107667221 A 06-02-2018 |
| | | | EP 3286430 A1 28-02-2018 |
| | | | US 2018142676 A1 24-05-2018 |
| | | | WO 2016169963 A1 27-10-2016 |
| | | | WO 2016169964 A1 27-10-2016 |
| | | | |
| WO 2009000787 | A2 | 31-12-2008 | CN 101743398 A 16-06-2010 |
| | | | DK 179081 B1 16-10-2017 |
| | | | EP 2158402 A2 03-03-2010 |
| | | | US 2010209243 A1 19-08-2010 |
| | | | WO 2009000787 A2 31-12-2008 |
| | | | |
| EP 1719910 | A1 | 08-11-2006 | AU 2004316333 A1 09-09-2005 |
| | | | CA 2557396 A1 09-09-2005 |
| | | | CN 1906409 A 31-01-2007 |
| | | | EP 1719910 A1 08-11-2006 |
| | | | JP 4599350 B2 15-12-2010 |
| | | | JP WO2005083266 A1 17-01-2008 |
| | | | KR 20070026362 A 08-03-2007 |
| | | | TW I261088 B 01-09-2006 |
| | | | US 2008206051 A1 28-08-2008 |
| | | | US 2010187820 A1 29-07-2010 |
| | | | US 2011156393 A1 30-06-2011 |
| | | | US 2011309622 A1 22-12-2011 |
| | | | US 2013001947 A1 03-01-2013 |
| | | | US 2013230396 A1 05-09-2013 |
| WO 2005083266 A1 09-09-2005 | | | |
| | | | |
| EP 2472238 | A1 | 04-07-2012 | CA 2762744 A1 29-06-2012 |
| | | | CN 102538939 A 04-07-2012 |
| | | | EP 2472238 A1 04-07-2012 |
| | | | US 2012173172 A1 05-07-2012 |
| | | | |
| US 2012183399 | A1 | 19-07-2012 | NONE |
| | | | |
| WO 2018171852 | A1 | 27-09-2018 | NONE |
| | | | |

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/FR2018/052849

| A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. F03D7/02 F03D13/35 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) F03D | | | | |
| 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 | | |
| X A | WO 2016/169963 A1 (ENVISION ENERGY APS [DK]) 27 octobre 2016 (2016-10-27) page 4, ligne 1 - page 5, ligne 15 page 6, ligne 1 - page 7, ligne 21 page 8, ligne 1 - page 9, ligne 28 page 11, ligne 14 - ligne 21 page 12, ligne 15 - ligne 20 page 13, ligne 1 - ligne 10 page 17, ligne 1 - page 18, ligne 23 page 23, ligne 11 - page 24, ligne 16; figure 3 | 1-3,5-15 4 | | |
| X | ----- WO 2009/000787 A2 (SIEMENS AG [DE]; BIRKEMOSE BO [DK]; EGEDAL PER [DK]) 31 décembre 2008 (2008-12-31) page 2, ligne 29 - page 3, ligne 32 page 4, ligne 29 - page 5, ligne 30 page 10, ligne 10 - ligne 20; figure 4 ----- -/-- | 1,13 | | |
| <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%; border: none;"><input checked="" type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents</td> <td style="width: 50%; border: none;"><input checked="" type="checkbox"/> Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe</td> </tr> </table> | | | <input checked="" type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents | <input checked="" type="checkbox"/> Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe |
| <input checked="" type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents | <input checked="" type="checkbox"/> 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 <p style="text-align: center; font-size: 1.2em;">18 février 2019</p> | | Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale <p style="text-align: center; font-size: 1.2em;">25/02/2019</p> | | |
| Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016 | | Fonctionnaire autorisé <p style="text-align: center; font-size: 1.2em;">Tack, Gaël</p> | | |

| C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS | | |
|---|---|-------------------------------|
| Catégorie* | Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents | no. des revendications visées |
| X | EP 1 719 910 A1 (MITSUBISHI HEAVY IND LTD [JP]) 8 novembre 2006 (2006-11-08) alinéa [0007] - alinéa [0008] alinéa [0034] - alinéa [0040] alinéa [0060] - alinéa [0063] alinéa [0076] - alinéa [0077] ----- | 1,13 |
| A | EP 2 472 238 A1 (SIEMENS AG [DE]) 4 juillet 2012 (2012-07-04) alinéa [0047] - alinéa [0048] alinéa [0052] - alinéa [0055]; figure 2 ----- | 1-12 |
| A | US 2012/183399 A1 (PERKINSON ROBERT H [US]) 19 juillet 2012 (2012-07-19) alinéa [0013] - alinéa [0014]; figure 3 ----- | 1-12 |
| X,P | WO 2018/171852 A1 (VESTAS WIND SYS AS [DK]) 27 septembre 2018 (2018-09-27) page 1, ligne 25 - ligne 33 page 8, ligne 24 - page 9, ligne 5 page 10, ligne 26 - page 12, ligne 34; figure 3 ----- | 1-3,13 |

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/FR2018/052849

| Document brevet cité au rapport de recherche | | Date de publication | Membre(s) de la famille de brevet(s) | Date de publication |
|---|---------------|------------------------|---|------------------------|
| WO 2016169963 | A1 | 27-10-2016 | CA 2983208 | A1 27-10-2016 |
| | | | CN 107667221 | A 06-02-2018 |
| | | | EP 3286430 | A1 28-02-2018 |
| | | | US 2018142676 | A1 24-05-2018 |
| | | | WO 2016169963 | A1 27-10-2016 |
| | | | WO 2016169964 | A1 27-10-2016 |
| ----- | | | | |
| WO 2009000787 | A2 | 31-12-2008 | CN 101743398 | A 16-06-2010 |
| | | | DK 179081 | B1 16-10-2017 |
| | | | EP 2158402 | A2 03-03-2010 |
| | | | US 2010209243 | A1 19-08-2010 |
| | | | WO 2009000787 | A2 31-12-2008 |
| ----- | | | | |
| EP 1719910 | A1 | 08-11-2006 | AU 2004316333 | A1 09-09-2005 |
| | | | CA 2557396 | A1 09-09-2005 |
| | | | CN 1906409 | A 31-01-2007 |
| | | | EP 1719910 | A1 08-11-2006 |
| | | | JP 4599350 | B2 15-12-2010 |
| | | | JP WO2005083266 | A1 17-01-2008 |
| | | | KR 20070026362 | A 08-03-2007 |
| | | | TW I261088 | B 01-09-2006 |
| | | | US 2008206051 | A1 28-08-2008 |
| | | | US 2010187820 | A1 29-07-2010 |
| | | | US 2011156393 | A1 30-06-2011 |
| | | | US 2011309622 | A1 22-12-2011 |
| | | | US 2013001947 | A1 03-01-2013 |
| | | | US 2013230396 | A1 05-09-2013 |
| WO 2005083266 | A1 09-09-2005 | | | |
| ----- | | | | |
| EP 2472238 | A1 | 04-07-2012 | CA 2762744 | A1 29-06-2012 |
| | | | CN 102538939 | A 04-07-2012 |
| | | | EP 2472238 | A1 04-07-2012 |
| | | | US 2012173172 | A1 05-07-2012 |
| ----- | | | | |
| US 2012183399 | A1 | 19-07-2012 | AUCUN | |
| ----- | | | | |
| WO 2018171852 | A1 | 27-09-2018 | AUCUN | |
| ----- | | | | |