

(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 2012/131186 A2

(43) Date de la publication internationale
4 octobre 2012 (04.10.2012)

WIPO | PCT

(51) Classification internationale des brevets :
F03B 13/18 (2006.01) F03B 13/16 (2006.01)
F03B 13/20 (2006.01) F03B 15/00 (2006.01)
F03B 15/12 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2012/000107

(22) Date de dépôt international :
27 mars 2012 (27.03.2012)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
11/00.924 29 mars 2011 (29.03.2011) FR

(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) : **IFP ENERGIES NOUVELLES** [FR/FR]; Direction Propriété Industrielle, 1 & 4, avenue de Bois-Préau, F-92852 Rueil Malmaison Cedex (FR).

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : **HENWOOD, Nicolas** [FR/FR]; 19 rue Cantagrel, Bât. 05 - Esc. 12 - Hall 12, F-75013 Paris (FR). **MALAIZE, Jérémy** [FR/FR]; 6 rue Marcel Lherbier, F-91700 Sainte Gene-

vie des Bois (FR). **CHAUVIN, Jonathan** [FR/FR]; 13 avenue de Clichy, F-75017 Paris (FR).

(74) Mandataire : **NGUYEN, Jean-Paul**; IFP Energies Nouvelles, Chef de Département - Propriété Industrielle, 1 & 4, avenue de Bois-Préau, F-92852 Rueil Malmaison 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, 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, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, 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, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, 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,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : METHOD FOR CONTROLLING A DEVICE FOR CONVERTING WAVE ENERGY INTO ELECTRICAL ENERGY

(54) Titre : PROCÉDÉ DE CONTRÔLE D'UN DISPOSITIF POUR CONVERTIR L'ÉNERGIE DES VAGUES EN ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

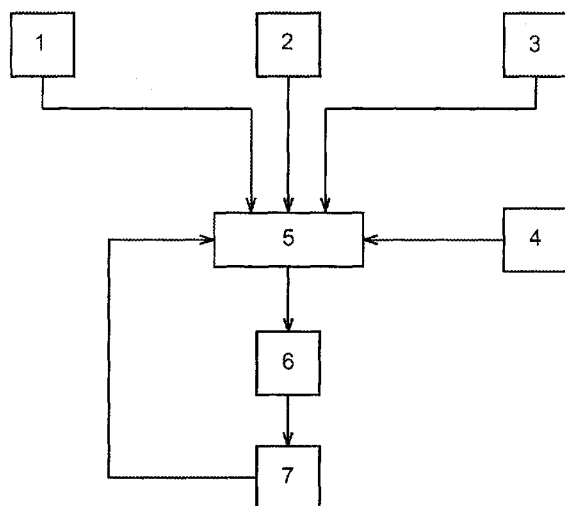


FIG. 3

(57) Abstract : The invention relates to a method for converting wave energy into electrical energy using a device comprising a moving part that interacts with an electric motor, the moving part oscillating, relative to the motor, by means of the waves. The method consists of the following steps: a) selecting a law that expresses the position of the moving part on the basis of the force exerted by the motor on the moving part, and on the basis of the force of the waves applied to the moving part; b) actuating the motor in order to produce a specific force on the moving part; then c) measuring the position of the moving part relative to the motor over time; d) determining said force of the waves by using said law selected in step a) and by taking said specific force of the motor obtained in step b) and the position of the moving part measured in step c) into account; then e) determining a new value of the force exerted by the motor on the moving part, said new value corresponding to a force that maximizes the electric power recovered by the motor; and f) actuating the motor in order to generate the new value of the force determined in step e) by supplying electrical energy to the motor when the force of the motor drives the moving part and by recovering the electrical energy from the motor when the force of the motor resists the movement of the moving part.

(57) Abrégé :

[Suite sur la page suivante]

WO 2012/131186 A2

SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG). **Publiée :**

— *sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport (règle 48.2.g)*

Le procédé permet de convertir l'énergie des vagues en énergie électrique avec un appareil comportant un mobile qui coopère avec un moteur électrique, le mobile effectuant un mouvement oscillatoire par rapport au moteur sous l'action des vagues. On effectue les étapes suivantes : a) on choisit une loi qui exprime la position du mobile en fonction de la force exercée par le moteur sur le mobile et en fonction de la force des vagues appliquée au mobile, b) on actionne le moteur pour produire une force donnée sur le mobile, puis c) on mesure la position du mobile par rapport au moteur au cours du temps, d) on détermine ladite force des vagues en utilisant ladite loi choisie à l'étape a) et en tenant compte de ladite force du moteur donnée à l'étape b) et de la position du mobile mesurée à l'étape c), puis e) on détermine une nouvelle valeur de la force exercée par le moteur sur le mobile, ladite nouvelle valeur correspondant à une force qui maximise la puissance électrique récupérée par le moteur, et f) on actionne le moteur pour produire la nouvelle valeur de la force déterminée à l'étape e) en fournissant de l'énergie électrique au moteur lorsque la force du moteur entraîne le mobile et en récupérant de l'énergie électrique sur le moteur lorsque la force du moteur résiste au mouvement du mobile.

PROCÉDÉ DE CONTRÔLE D'UN DISPOSITIF POUR CONVERTIR L'ÉNERGIE DES VAGUES EN ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

5 L'invention concerne le domaine des dispositifs pour convertir l'énergie des vagues en énergie électrique.

Ces dispositifs, couramment appelés appareils "houlomoteurs", sont particulièrement intéressants, car ils permettent de produire de l'électricité à partir d'une
10 source d'énergie renouvelable (l'énergie potentielle et cinétique des vagues) sans émission de gaz à effet de serre. Ils sont bien adaptés pour fournir de l'électricité à des sites insulaires isolés.

Les documents FR 2 876 751 et WO 2009/081042 décrivent des appareils pour
15 capter l'énergie produite par le flot marin. Ces dispositifs sont composés d'un support flottant dans lequel est disposé un pendule monté mobile par rapport au support flottant. Le mouvement relatif du pendule par rapport au support flottant est utilisé pour produire de l'énergie électrique.

20 L'invention propose d'améliorer le fonctionnement d'un appareil houlomoteur en estimant en temps réel les efforts exercés par la houle sur l'axe du pendule afin d'adopter en conséquence les meilleurs réglages des stratégies de récupération de l'énergie électrique.

25 De manière générale, l'invention décrit un procédé pour convertir l'énergie des vagues en énergie électrique avec un appareil comportant un moyen mobile qui coopère avec un moteur électrique, le moyen mobile effectuant un mouvement oscillatoire par rapport au moteur sous l'action des vagues. Selon l'invention, on effectue les étapes suivantes :

- 30
- a) on choisit une loi qui exprime la position du moyen mobile en fonction de la force exercée par le moteur sur le moyen mobile et en fonction de la force des vagues appliquée au moyen mobile,
 - b) on actionne le moteur pour produire une force donnée sur le moyen mobile, puis
 - c) on mesure la position du moyen mobile par rapport au moteur au cours du temps,

- d) on détermine ladite force des vagues en utilisant ladite loi choisie à l'étape a) et en tenant compte de ladite force du moteur donnée à l'étape b) et de la position du moyen mobile mesurée à l'étape c), puis
- e) on détermine une nouvelle valeur de la force exercée par le moteur sur le moyen mobile, ladite nouvelle valeur correspondant à une force qui maximise la puissance électrique moyenne récupérée par le moteur, la puissance électrique moyenne étant fonction de ladite force des vagues déterminées à l'étape d), de ladite nouvelle valeur de la force exercée par le moteur sur le moyen mobile et de la position du moyen mobile par rapport au moteur, et
- f) on actionne le moteur pour produire la nouvelle valeur de la force déterminée à l'étape e) en fournissant de l'énergie électrique au moteur lorsque la force du moteur entraîne le moyen mobile et en récupérant de l'énergie électrique sur le moteur lorsque la force du moteur résiste au mouvement du moyen mobile.

Selon l'invention, la loi choisie à l'étape a) peut exprimer l'égalité entre la somme des forces appliquées au moyen mobile et le produit de la masse du moyen mobile par l'accélération du moyen mobile.

Selon l'invention :

- on peut choisir un premier modèle qui exprime la force exercée par le moteur sur le moyen mobile en fonction du temps,
- on peut choisir un deuxième modèle qui exprime la force des vagues appliquée au moyen mobile en fonction du temps,
- à l'étape b), on peut fixer des valeurs aux paramètres du premier modèle et on peut actionner le moteur pour produire une force donnée par le premier modèle avec les valeurs des paramètres fixées,
- à l'étape d), on peut déterminer les paramètres du deuxième modèle,
- à l'étape e), on peut déterminer les paramètres du premier modèle,
- à l'étape f), on peut actionner le moteur pour produire une force donnée par le premier modèle avec les paramètres déterminés à l'étape e).

Le deuxième modèle peut être une somme de fonctions sinusoïdales.

$$J\ddot{x} + \mu\dot{x} + kx = \sum_{i=1}^P D_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) + C$$

A l'étape a), on peut choisir la loi :

on peut choisir le premier modèle : $C = K_x x + K_v \dot{x}$

on peut choisir le deuxième modèle : $\sum_{i=1}^P D_i \sin(\omega_i t + \varphi_i)$

dans lesquels :

- 5 x étant la position du moyen mobile par rapport au moteur,
 J étant l'inertie du moyen mobile,
 k étant la force de rappel due à la gravité terrestre,
 μ étant un terme modélisant les frottements visqueux du moyen mobile,
 C étant la force exercée par le moteur sur le moyen mobile,
 10 K_x et K_v étant des paramètres,
 P étant un nombre entier,
 D_i étant une amplitude, ω_i étant une fréquence et φ_i étant une phase.

Avant l'étape a), on peut déterminer les valeurs termes J, k et μ .

- 15 A l'étape a), on peut choisir le nombre P compris entre 10 et 100, et on peut choisir les fréquences ω_i comprises entre 0 et 2 Hz.

A l'étape e), on peut déterminer la nouvelle valeur de la force du moteur qui permet de maximiser la puissance électrique moyenne récupérée par le moteur pour une fréquence ω_i à laquelle correspond la plus grande amplitude D_i .

- 20 A l'étape e), on peut déterminer la nouvelle valeur de la force du moteur qui permet de maximiser la puissance électrique moyenne récupérée par le moteur pour toute les fréquences ω_i .

Après l'étape f), on peut répéter les étapes c, d, e, et f.

A l'étape b), ladite force donnée peut être choisie par l'utilisateur.

- 25 On peut effectuer l'étape c) pendant au moins 30 secondes.

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention seront mieux compris et apparaîtront clairement à la lecture de la description faite ci-après en se référant aux dessins parmi lesquels :

- les figures 1 et 2 représentent des appareils houlomoteur qui peuvent être pilotés par le procédé de contrôle selon l'invention,
- la figure 3 représente un exemple de diagramme du procédé, selon l'invention de contrôle d'un appareil houlomoteur,
- 5 - les figures 4 à 6 représentent l'évolution de l'estimation des efforts créés par la houle,
- les figures 7 et 8 représentent les paramètres de commande du moteur, déterminés par le procédé selon l'invention.

10 Un appareil "houlomoteur" mis en œuvre selon la présente invention comporte un élément mobile actionnant une machine électrique. La houle met en mouvement l'élément mobile par rapport à la machine électrique. La machine électrique fonctionne alternativement en mode génératrice d'électricité pour récupérer l'énergie de la houle et en mode moteur pour actionner le mobile.

15

Selon un premier mode de réalisation présenté sur la figure 1, l'appareil "houlomoteur" pour convertir l'énergie des vagues en énergie électrique est composée d'un élément flotteur 1 sur lequel est disposé un élément mobile constitué d'un pendule 2. L'élément flotteur est destiné à flotter en mer. Le pendule 2 est monté mobile en rotation autour d'un axe fixe 3 par rapport à l'élément flotteur 1. Sur la figure 1, le pendule 2 est formé d'une tige munie à une de ses extrémités d'une masse M. La tige constitue le bras de levier de la masse M en rotation autour de l'axe 3. Les mouvements du pendule actionnent un arbre d'axe 3. Alternativement, le pendule 2 peut être composé d'une roue d'axe 3 dont le centre de gravité est distinct de l'axe 3.

20 L'appareil "houlomoteur" comporte un dispositif de récupération d'énergie 4 qui récupère l'énergie sur l'arbre d'axe 3. Le dispositif 4 est une machine électrique génératrice d'électricité. La machine électrique est également utilisée comme moteur pour actionner le pendule. L'arbre de la machine électrique 4 peut être directement relié à l'arbre actionné par le pendule. La machine électrique 4 peut également être reliée au pendule par l'intermédiaire d'un système de transmission de mouvement avec démultiplication de la vitesse de rotation, par exemple par un ensemble d'engrenages.

30 L'export d'électricité et l'alimentation électrique de la machine électrique 4 sont effectués par un câble 5 qui relie le flotteur 1 au réseau électrique installé à terre.

Lors du fonctionnement de l'appareil "houlomoteur", l'élément flotteur 1 est mis en mouvement par l'action des vagues, tandis que le pendule tend à rester dans une position verticale du fait de la masse M. Vu de l'élément flotteur 1, le pendule 2 est actionné en mouvement par rapport à l'élément flotteur 1 sous l'action des vagues sur l'élément flotteur 1. Les mouvements de rotation du pendule 2 actionnent l'arbre d'axe 3 qui entraîne le générateur électrique 4.

Le mouvement du pendule 2 peut être repéré par sa position angulaire x par rapport à l'élément flotteur 1. L'angle x peut être mesuré entre une direction α liée à l'élément flotteur et la direction β de la tige du pendule 2. La direction α peut correspondre à la direction de la tige du pendule 2 lorsque le pendule 2 est au repos et que l'élément flotteur 1 est à l'équilibre sur une mer calme.

Selon un deuxième mode de réalisation présenté sur la figure 2, l'appareil "houlomoteur" pour convertir l'énergie des vagues en énergie électrique est composée d'une tige 11 ancrée sur le fond marin et d'un élément mobile constitué d'un flotteur 12. Le flotteur 12 étant mobile en translation sur la tige 11.

L'appareil "houlomoteur" comporte un dispositif de récupération d'énergie 14 qui récupère l'énergie produite par les mouvements du flotteur 12. La machine 14 est un moteur linéaire qui peut fonctionner alternativement en génératrice d'électricité et en moteur pour actionner le flotteur 12 par rapport à la tige 11. Le moteur 14 est composé d'un ou plusieurs patins 14a, par exemple une bobine, et de la rampe 14b, par exemple composée d'une succession d'aimants disposés le long de la tige 11.

L'export d'électricité et l'alimentation électrique de la machine électrique 4 sont effectués par un câble 15 qui relie le flotteur 12 au réseau électrique installé à terre.

Lors du fonctionnement de l'appareil "houlomoteur", l'élément flotteur 12 est mis en mouvement par l'action des vagues, tandis que la tige 11 ancrée au sol reste fixe. Le flotteur 12 décrit successivement et alternativement des mouvements ascendants et descendants le long de la tige 11. Le mouvement de translation du flotteur 12 entraîne la machine électrique 14a par rapport à 14b pour produire de l'électricité.

Le mouvement du mobile 12 peut être repéré par sa position x qui peut être mesurée par exemple par la distance du patin 14a par rapport à une position de référence γ fixe sur la tige 11.

Selon l'étape a) du procédé selon l'invention on choisit une loi qui exprime la position du mobile en fonction de la force exercée par le moteur sur le mobile et en fonction de la force des vagues appliquées au mobile. Selon la loi d'équilibre du mobile en mouvement oscillatoire, par exemple le pendule 2 au niveau de l'axe 3 de rotation ou le flotteur 12 au niveau de la tige 11, la somme des forces extérieures appliquées au mobile est égale au produit de la masse du mobile par l'accélération à son centre d'inertie. En l'occurrence, les forces appliquées au mobile sont la force ou couple appliqué par le moteur sur le mobile, l'action des vagues sur le mobile, les frottements que subit le mobile et la force de gravité terrestre. La loi d'équilibre du mobile en mouvement peut-être modélisée par l'équation suivante :

$$J\ddot{x} + \mu\dot{x} + kx = \sum_{i=1}^P D_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) + C \quad (1)$$

où x représente la position du mobile (l'angle ou la distance par rapport à une référence), \dot{x} représente la dérivé première de la fonction x par rapport au temps (c'est-à-dire la vitesse du mobile), \ddot{x} représente la dérivé seconde de la fonction x par rapport au temps (c'est-à-dire l'accélération du mobile),

J représente l'inertie du mobile, par exemple du pendule 2 rapportée à l'axe 3 ou le flotteur 12 par rapport à la tige 11,

k la force de rappel, due à la force de gravité terrestre, à une position d'équilibre due à la masse M du pendule 2 ou due à la masse M du flotteur 12,

μ un terme modélisant les frottements visqueux du pendule 2 ou du flotteur 12,

C est le couple fourni par le moteur 4 ou la force fournie par le moteur 14, que l'on peut commander.

$\sum_{i=1}^P D_i \sin(\omega_i t + \varphi_i)$ correspond au modèle qui représente l'effort créé par la houle sur le mobile et rapporté à l'axe du moteur 4 ou à la tige 11. On suppose qu'il s'agit d'une somme de P termes oscillants, chaque terme i étant caractérisé par une amplitude D_i , une fréquence ω_i et une phase φ_i . D'autre modèle peuvent être utilisés dans le procédé selon l'invention. Le modèle qui correspond à une somme de fonction sinusoïdale (c'est-à-dire un modèle de la forme $\sum_{i=1}^P D_i \sin(\omega_i t + \varphi_i)$) permet d'utiliser le

contenu spectrale des efforts créer par la houle pour optimiser l'énergie électrique récupérée.

On peut écrire l'équation (1) sous une forme différente, mais équivalente, qui est plus facile à manipuler. Pour chaque pulsation ω_i , on appelle z_i le vecteur suivant :

$$z_i = \begin{pmatrix} z_{i,1} \\ z_{i,2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \\ D_i \omega_i \cos(\omega_i t + \varphi_i) \end{pmatrix}$$

Si l'on calcule la dérivée du vecteur z_i par rapport au temps, on montre que

$$\dot{z}_i = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_i^2 & 0 \end{pmatrix}}_{\Omega_i} z_i \text{ et l'on appelle } \Omega_i \text{ la matrice } 2 \times 2 \text{ apparaissant dans}$$

l'équation précédente. Si l'on rassemble tous les vecteurs z_i dans un vecteur de dimension $2 \times P$ appelé z , on obtient que la dérivée de ce vecteur z par rapport au temps répond à l'équation suivante :

$$\dot{z} = \underbrace{\begin{pmatrix} Q_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & Q_{P-1} & 0 \\ 0 & \dots & 0 & Q_P \end{pmatrix}}_{\Omega} z \text{ où la matrice } \Omega \text{ intervenant dans cette équation}$$

est une matrice diagonale par blocs, dont les blocs diagonaux sont constitués des matrices Q_i . Au final, la somme pour i allant de 1 à P dans l'équation (1) est égale à la somme pour i allant de 1 à P de la première composante du vecteur z , lequel admet une représentation différentielle donnée par la précédente équation. De façon plus précise, on obtient que :

$$\sum_{i=1}^P D_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) = \underbrace{(1 \ 0 \ \dots \ \dots \ 1 \ 0)}_{\Sigma} z$$

Au final, on appelle X le vecteur constitué de x, \dot{x} et de z . La représentation d'état de l'équation (1) est la suivante :

$$\dot{X} = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -k/J & -\mu/J & \Sigma \\ 0 & 0 & \Omega \end{pmatrix}}_A X + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ 1/J \\ 0 \end{pmatrix}}_B C \quad (1')$$

Selon l'invention, on met en œuvre le procédé de contrôle décrit ci-après en
5 référence à la figure 3.

Selon l'invention on estime en temps réel le spectre du couple exercé par la
houle sur l'axe 3 du pendule 2 ou de la force exercée par la houle sur le flotteur 12, c'est
à dire que l'on détermine les P valeurs d'amplitude D_i , et de phase φ_i de l'équation 1, en
effectuant les opérations suivantes.

10

Opération 1 :

Les termes J, k et μ dépendent de la constitution physique et sont des
paramètres intrinsèques de l'appareil "houlomoteur" mis en œuvre.

On détermine les termes J, k et μ qui permettent de modéliser le mouvement
15 oscillatoire du mobile.

On peut déterminer les termes J, k et μ de manière théorique ou par
expérimentation. Par exemple, on peut déterminer les termes J, k et μ par calcul en
tenant compte de la constitution physique de l'appareil "houlomoteur". Alternativement,
on dispose l'appareil "houlomoteur" dans des conditions sans houle et sans action du
20 moteur, on déplace le mobile par rapport à sa position d'équilibre et on mesure la
position au cours du temps. On détermine les valeurs J, k et μ au moyen de l'équation
 $J\ddot{x} + \mu\dot{x} + kx = 0$ qui exprime l'équilibre du mobile.

Opération 2 :

25 On choisit une valeur de P et les valeurs des fréquences ω_i . On peut choisir le
nombre entier P compris entre 10 et 100. Les inventeurs ont observé que pour modéliser
les efforts créés par la houle, on peut choisir les valeurs de ω_i dans les basses
fréquences, par exemple dans l'intervalle compris entre 0 et 2 Hz, de préférence entre 0
et 0,5 Hz. Les valeurs des ω_i peuvent être régulièrement réparties sur l'intervalle choisi.

Par exemple, on choisit $P=20$ et les valeurs 20 de ω_i étant choisies dans l'intervalle 0 à 0,5 Hz. Dans ce cas $\omega_i = i \times \frac{0,5}{20}$ en faisant varier i dans les nombres entiers de 0 à 20.

Si on choisit $P=80$ et les valeurs 80 de ω_i étant choisies dans l'intervalle 0 à 2 Hz. Dans ce cas $\omega_i = i \times \frac{2}{80}$ en faisant varier i dans les nombres entiers de 0 à 80.

Opération 3 :

L'opération 3 correspond à l'étape b) du procédé selon l'invention : on actionne le moteur pour qu'il produise une force donnée et connue sur le mobile.

10 On actionne le moteur électrique pour imposer un couple ou une force au mobile, par exemple un couple au pendule 2 ou une force au flotteur 12. Le couple ou force C peut être décrit par le modèle suivant :

$$C = K_x x + K_v \dot{x} \quad (2)$$

15 dans lequel K_x et K_v sont des paramètres. Compte tenu du fait que C est une fonction qui dépend de la position et de la vitesse du mobile oscillant, le couple appliqué par le moteur est également oscillant. En appliquant le couple C dans l'équation (1) (ou dans l'équation (1')), on peut modifier la fréquence propre et l'amortissement naturel de l'ensemble constitué par l'élément mobile 2 ou 12 et la machine électrique 4 ou 14.

Initialement, on peut choisir une force ou couple C nul ($K_x=0$ et $K_v=0$).

20 x et \dot{x} étant oscillant, la force ou couple C présente également un caractère oscillant.

On peut également déterminer des valeurs initiales de K_x et K_v à partir d'une connaissance théorique de la houle et en mettant en œuvre l'opération 6 décrite ci-après.

25

Opération 4 :

L'opération 4 correspond à l'étape c) du procédé selon l'invention. On mesure la position x du mobile en temps réel au moyen de capteurs. La mesure de la position peut être effectuée pendant une durée de temps minimale, par exemple au moins 1 minute, 30 de préférence au moins 30 secondes.

Le capteur peut être un capteur optique incrémental composé d'une source lumineuse d'un capteur détectant un flux de lumière et d'une roue perforée cas du dispositif de la figure 1, ou d'une règle perforée ou gravée dans le cas du dispositif de la figure 2.

5

Opération 5 :

L'opération 5 correspond à l'étape d) du procédé selon l'invention : on détermine l'effort créé par la houle sur le mobile. En particulier, on peut déterminer l'effort créé par la houle sur le mobile en déterminant les P valeurs d'amplitude D_i et de phase φ_i de l'équation 1 en utilisant :

10

- les termes J, K et μ , déterminés à l'opération 1
- une valeur de P et les valeurs des ω_i , choisies à l'opération 2
- la valeur du couple ou force C appliqué par le moteur 4 ou 14 à l'opération 3
- l'angle x mesuré à l'opération 4.

15

Cette opération 5 est réalisée à l'aide d'un observateur qui est compatible avec le fonctionnement temps réel. L'observateur s'apparente à un banc de filtres agissant sur la position mesurée pour en extraire les phases et les amplitudes de l'excitation due à la houle.

20

En pratique, on appelle \hat{X} le vecteur contenant les estimations de la position, de la vitesse et des composantes sinusoïdales z_i introduites précédemment pour obtenir l'équation (1). Pour calculer ces estimations, il faut réaliser les calculs suivants :

$$\frac{d\hat{X}}{dt} = A\hat{X} + BC - K(\hat{x} - x), \text{ où } \hat{x} \text{ est la première composante du vecteur}$$

25 \hat{X} , et où x est la mesure de position.

Les calculs précédents sont construits à partir des paramètres (J, K, μ) et des P valeurs de ω_i . Pour calculer \hat{X} , il est également nécessaire d'injecter dans les calculs la mesure de position x, et le couple ou la force exercé C.

Il est possible de résoudre l'équation précédente en ligne, ce qui permet d'obtenir le vecteur \hat{X} qui contient toutes les informations nécessaires. On peut extraire les informations de phase φ_i et d'amplitude D_i du vecteur \hat{X} avec :

$$D_i = F_D(i, \hat{X}) = \sqrt{\hat{z}_{i,1}^2 + \left(\frac{\hat{z}_{i,2}}{\omega_i}\right)^2}$$

$$\varphi_i = F_\varphi(i, \hat{X}) = a \tan\left(\frac{\omega_i \hat{z}_{i,1}}{\hat{z}_{i,2}}\right)$$

5 où les fonctions F_D et F_φ réalisent des opérations élémentaires (additions, multiplications et fonctions trigonométriques) à partir de certaines composantes de \hat{X} . Par construction de la fonction F , on est assuré que l'on obtient ainsi les valeurs exactes des amplitudes et des phases.

Cette phase est très différente d'autres méthodes présentées dans la littérature. 10 On cherche en effet à estimer le contenu fréquentiel de l'excitation due à la houle. Les méthodes répandues dans la littérature s'attachent à prédire l'excitation de la houle sur un horizon de temps futur, alors que notre méthode s'appuie uniquement sur des mesures déjà acquises pour décrire la houle comme une somme de fonctions sinusoïdales et ainsi remonter au contenu spectral des efforts créés par la houle.

15 On peut tracer l'évolution du spectre ainsi reconstruit au cours du temps. En effet, comme le montre l'équation utilisée pour calculer \hat{X} , \hat{X} est obtenu en résolvant une équation différentiel, il existe donc une certaine dynamique dans l'estimation des amplitudes et des phases. En pratique, il faut un certain temps, qu'il est possible de choisir, pour que les valeurs estimées des phases et des amplitudes convergent 20 exactement vers les valeurs liées à la houle. Les figures 4, 5 et 6 montrent l'amplitude D_i en fonction de la fréquence ω_i respectivement au temps t_1 , au temps $t_2 > t_1$ et au temps $t_3 > t_2$. L'observation de la figure 4 à t_1 , de la figure 5 à t_2 , puis de la figure 6 à t_3 montre que les amplitudes estimées D_i , représentées par des cercles, convergent vers les valeurs exactes, représentées en pointillé, au cours du temps.

25

Opération 6 :

L'opération 6 correspond à l'étape e) du procédé selon l'invention : on détermine une nouvelle valeur de la force exercée par le moteur sur le mobile, la nouvelle valeur permettant de maximiser la puissance électrique moyenne récupérée par le moteur.

Selon l'invention, on utilise l'estimation du spectre de la force des vagues pour
5 piloter l'appareil "houlomoteur" en modifiant l'action de la machine électrique 4 ou 14 pour placer l'oscillation du pendule 2 ou du flotteur 12 en résonance avec les vagues.

Connaissant à ce stade les fréquences contenues dans la houle, ainsi que le niveau d'énergie porté par chacune d'elles, on peut calculer une nouvelle valeur du couple ou de la force C, c'est-à-dire de nouvelles valeurs de K_x et K_v . La nouvelle valeur
10 du couple ou de la force C est déterminée pour modifier la fréquence propre et l'amortissement naturel de l'ensemble constitué par l'élément mobile 2 ou 12 et la machine électrique 4 ou 14 en fonction du spectre de la houle (c'est-à-dire les valeurs de phase φ_i et d'amplitude D_i), déterminé à l'opération 5 afin de maximiser la puissance électrique moyenne récupérée par le moteur.

15

Méthode 1 : on détermine la fréquence Ω pic de la houle. La fréquence de résonance Ω correspond à la valeur de ω_i associée à la plus grande valeur d'amplitude D_i . on détermine de nouvelles valeurs des paramètres K_x et K_v en négligeant les autres composantes fréquentielles, et en cherchant à maximiser la puissance moyenne
20 récupérée à la fréquence Ω . Pour l'exemple particulier de l'équation (1), cela revient pratiquement à choisir $K_v = -\mu$ et $K_x = k - J\Omega$.

Méthode 2 : La seconde méthode consiste à prendre en compte la totalité des fréquences contenues dans le spectre fournies par l'opération 5. On cherche les
25 paramètres K_x et K_v pour que la puissance moyenne récupérée soit maximale, en prenant en compte toutes les fréquences ω_i . En pratique, on calcule la puissance moyenne électrique par l'équation suivante, qui est la moyenne de la puissance électrique instantanée sur une période de temps T, la valeur de T tendant vers l'infini, la puissance électrique instantanée étant donnée par le produit du couple ou de la force C
30 par le régime du moteur (c'est-à-dire la vitesse de rotation ou vitesse linéaire du moteur) :

$$P_{elec} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T -C(t)\dot{x}(t)dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T -(K_x x + K_v \dot{x})\dot{x}(t)dt .$$

voit clairement que la puissance électrique moyenne récupérée est une fonction des paramètres K_x , et K_v , mais aussi des paramètres D_i , ω_i puisque la vitesse \dot{x} dont l'évolution est donnée par (1) dépend de façon évidente de l'excitation de la houle. Au

5 final, on cherche à trouver les paramètres optimaux qui permettent de maximiser la puissance électrique récupérée, c'est-à-dire que l'on cherche à résoudre, par exemple par calcul numérique, le problème d'optimisation suivant :

$$\max_{(K_x, K_v)} (P_{elec}(K_x, K_v, D_i, \omega_i, J, k, \mu))$$

10 où P_{elec} est la puissance électrique moyenne produite à partir de la houle, et de ses composantes fréquentielles en ω_i . En procédant de la sorte, pour l'exemple de la figure (1), K_x et K_v sont obtenus en lisant dans les tables représentées aux figures 7 et 8, et où K_x et K_v sont donnés en fonction de Ω mais obtenus en prenant en compte tout le spectre des efforts créés par la houle.

15

Opération 7 :

L'opération 7 correspond à l'étape f) du procédé selon l'invention : on actionne le moteur pour qu'il reproduise la nouvelle valeur de la force telle que déterminée à l'opération 6.

20 On détermine la nouvelle expression du couple ou de la force C du moteur 4 ou 14 avec les paramètres K_x et K_v déterminés à l'opération 6. Bien que les paramètres K_x et K_v soient conservés constants jusqu'à la prochaine itération du processus, le couple ou la force C dépend de la position et de la vitesse du mobile, par conséquent sa valeur évolue de manière oscillante au cours du temps.

25 On applique au moteur 4 ou 14 la nouvelle expression du couple ou force C . Le contrôle du moteur pour qu'il applique un couple ou force C au mobile est effectué en modifiant la tension électrique appliquée au moteur. De manière plus détaillée, pour fournir un couple ou force C qui entraîne le mobile, on applique une tension en fournissant une puissance électrique. Par contre, pour produire un couple ou force C qui

résiste au mouvement du mobile, on applique une tension en récupérant une puissance électrique.

5 Tout au long de la phase d'exploitation de l'appareil houlo-moteur, l'état de la mer est grandement susceptible d'évoluer (variation de la période pic de la houle, déformation du spectre...). De plus, l'appareil houlo-moteur peut lui même s'avérer sensible au vieillissement et son comportement par rapport à la sollicitation des vagues peut varier au cours du temps.

10 Pour tenir compte de ces variations, selon l'invention on peut répéter les opérations 4 à 7.

Par exemple, on effectue les opérations 4 et 5 en continu. Dès qu'une valeur de D_i , varie au-delà d'un seuil par rapport aux premières valeurs de D_i qui ont été déterminées, par exemple dès qu'une valeur D_i varie de plus de 5%, on effectue les opérations 6 et 7.

15 Alternativement, on effectue les opérations 4 et 5 à intervalle régulier dans le temps pendant une durée déterminée, par exemple une fois par jour, ou toutes les semaines, pendant 1 heure. Puis on effectue les opérations 6 et 7.

REVENDICATIONS

5 1) Procédé pour convertir l'énergie des vagues en énergie électrique avec un appareil comportant un moyen mobile qui coopère avec un moteur électrique, le moyen mobile effectuant un mouvement oscillatoire par rapport au moteur sous l'action des vagues, dans lequel on effectue les étapes suivantes :

10 a) on choisit une loi qui exprime la position du moyen mobile en fonction de la force exercée par le moteur sur le moyen mobile et en fonction de la force des vagues appliquée au moyen mobile,

b) on actionne le moteur pour produire une force donnée sur le moyen mobile, puis

c) on mesure la position du moyen mobile par rapport au moteur au cours du temps,

15 d) on détermine ladite force des vagues en utilisant ladite loi choisie à l'étape a) et en tenant compte de ladite force du moteur donnée à l'étape b) et de la position du moyen mobile mesurée à l'étape c), puis

e) on détermine une nouvelle valeur de la force exercée par le moteur sur le moyen mobile, ladite nouvelle valeur correspondant à une force qui maximise la puissance électrique moyenne récupérée par le moteur, la puissance électrique moyenne étant fonction de ladite force des vagues déterminées à l'étape d), de ladite nouvelle valeur de la force exercée par le moteur sur le moyen mobile et de la position du moyen mobile par rapport au moteur, et

20 f) on actionne le moteur pour produire la nouvelle valeur de la force déterminée à l'étape e) en fournissant de l'énergie électrique au moteur lorsque la force du moteur entraîne le moyen mobile et en récupérant de l'énergie électrique sur le moteur lorsque la force du moteur résiste au mouvement du moyen mobile.

25 2) Procédé selon la revendication 1, dans lequel la loi choisie à l'étape a) exprime l'égalité entre la somme des forces appliquées au moyen mobile et le produit de la masse du moyen mobile par l'accélération du moyen mobile.

3) Procédé selon la revendication 2, dans lequel

- on choisit un premier modèle qui exprime la force exercée par le moteur sur le moyen mobile en fonction du temps,
- on choisit un deuxième modèle qui exprime la force des vagues appliquée au moyen mobile en fonction du temps,
- 5 - à l'étape b), on fixe des valeurs aux paramètres du premier modèle et on actionne le moteur pour produire une force donnée par le premier modèle avec les valeurs des paramètres fixées,
- à l'étape d), on détermine les paramètres du deuxième modèle,
- à l'étape e), on détermine les paramètres du premier modèle,
- 10 - à l'étape f), on actionne le moteur pour produire une force donnée par le premier modèle avec les paramètres déterminés à l'étape e).

4) Procédé selon la revendication 3, dans lequel le deuxième modèle est une somme de fonctions sinusoïdales.

15

5) Procédé selon la revendication 4, dans lequel,

à l'étape a) on choisit la loi : $J\ddot{x} + \mu\dot{x} + kx = \sum_{i=1}^P D_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) + C$

on choisit le premier modèle : $C = K_x x + K_v \dot{x}$

on choisit le deuxième modèle : $\sum_{i=1}^P D_i \sin(\omega_i t + \varphi_i)$

20 dans lesquels :

x étant la position du moyen mobile par rapport au moteur,

J étant l'inertie du moyen mobile,

k étant la force de rappel due à la gravité terrestre,

μ étant un terme modélisant les frottements visqueux du moyen mobile,

25

C étant la force exercée par le moteur sur le moyen mobile,

K_x et K_v étant des paramètres,

P étant un nombre entier,

D_i étant une amplitude, ω_i étant une fréquence et φ_i étant une phase.

6) Procédé selon la revendication 5, dans lequel avant l'étape a), on détermine les valeurs termes J , k et μ .

7) Procédé selon l'une des revendications 5 et 6, dans lequel, à l'étape a), on choisit le nombre P compris entre 10 et 100, et on choisit les fréquences ω_i comprises entre 0 et 2 Hz.

8) Procédé selon l'une des revendications 5 à 7, dans lequel à l'étape e), on détermine la nouvelle valeur de la force du moteur qui permet de maximiser la puissance électrique moyenne récupérée par le moteur pour une fréquence ω_i à laquelle correspond la plus grande amplitude D_i .

9) Procédé selon l'une des revendications 5 à 7, dans lequel, à l'étape e), on détermine la nouvelle valeur de la force du moteur qui permet de maximiser la puissance électrique moyenne récupérée par le moteur pour toute les fréquences ω_i .

10) Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel, après l'étape f), on répète les étapes c, d, e, et f.

11) Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel, à l'étape b), ladite force donnée est choisie par l'utilisateur.

12) Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel on effectue l'étape c) pendant au moins 30 secondes.

1/5

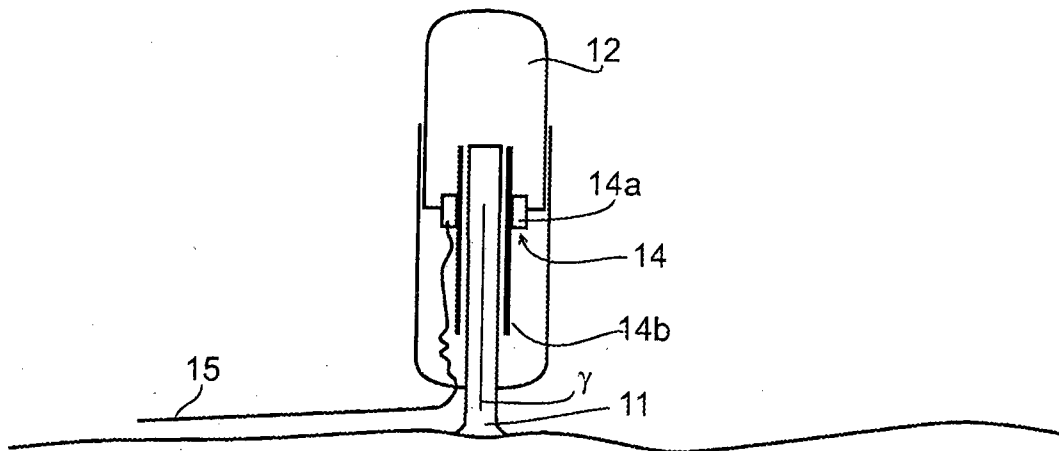
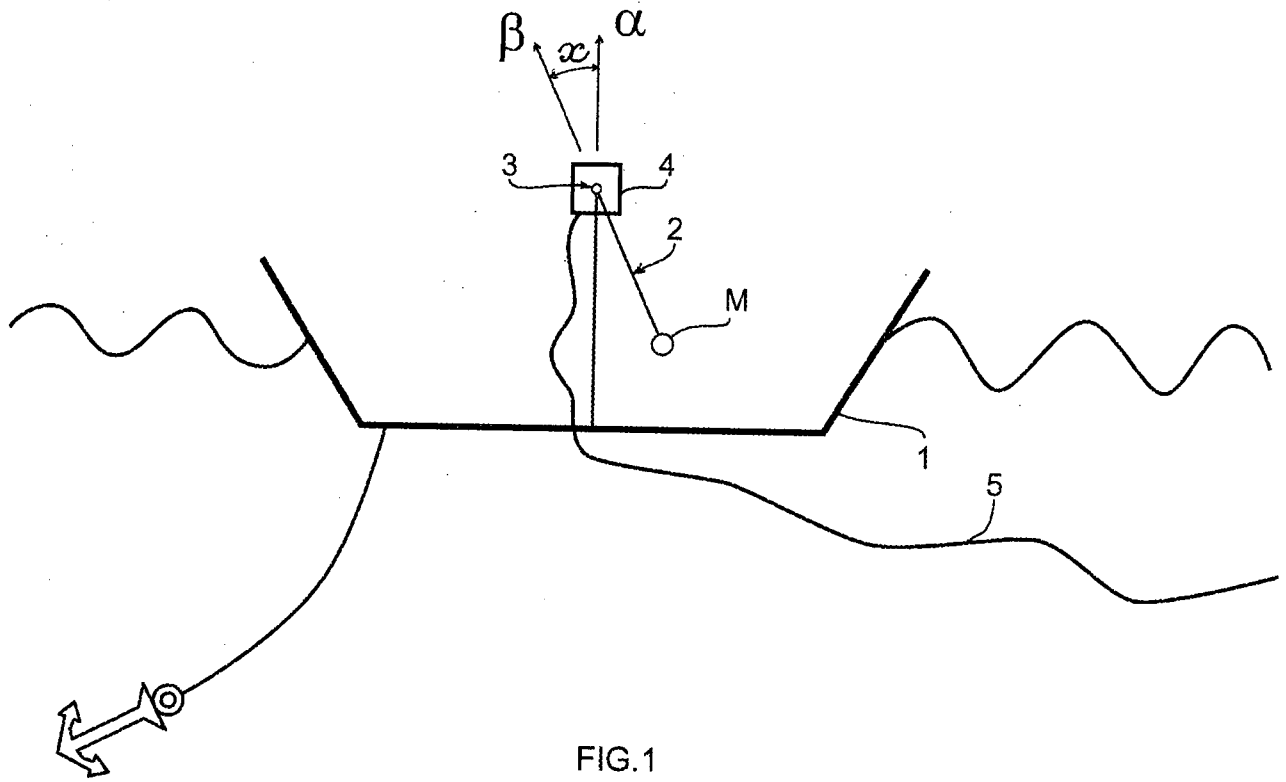


FIG. 2

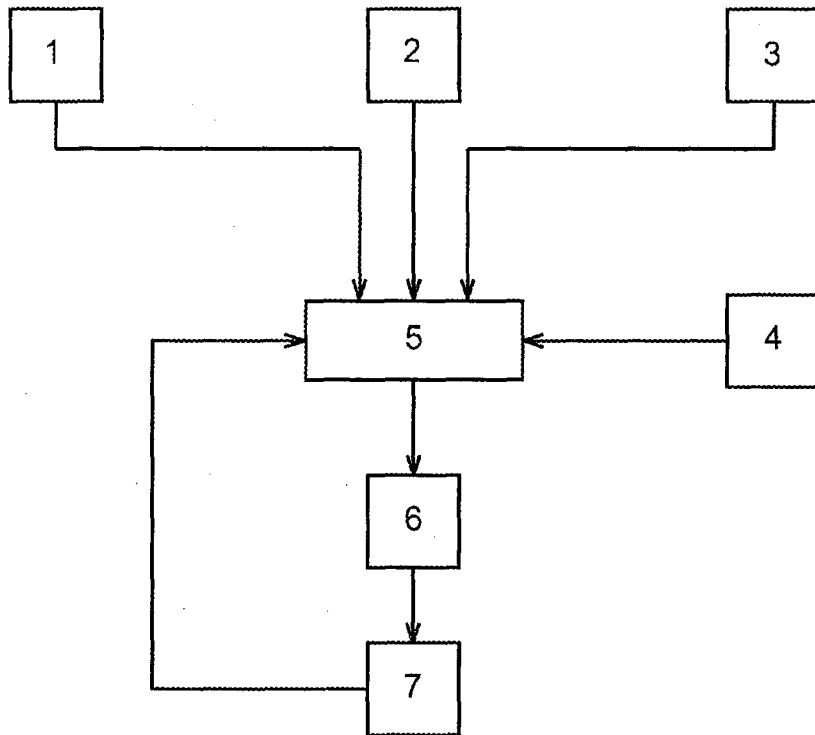


FIG. 3

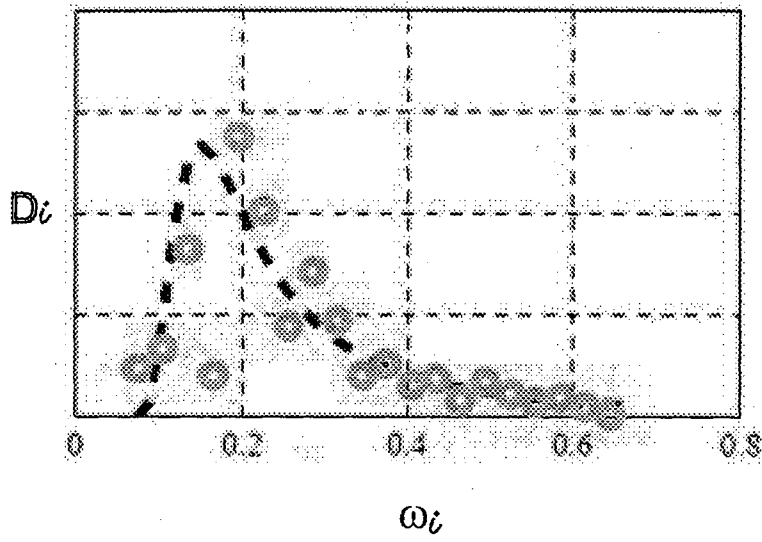


FIG.4

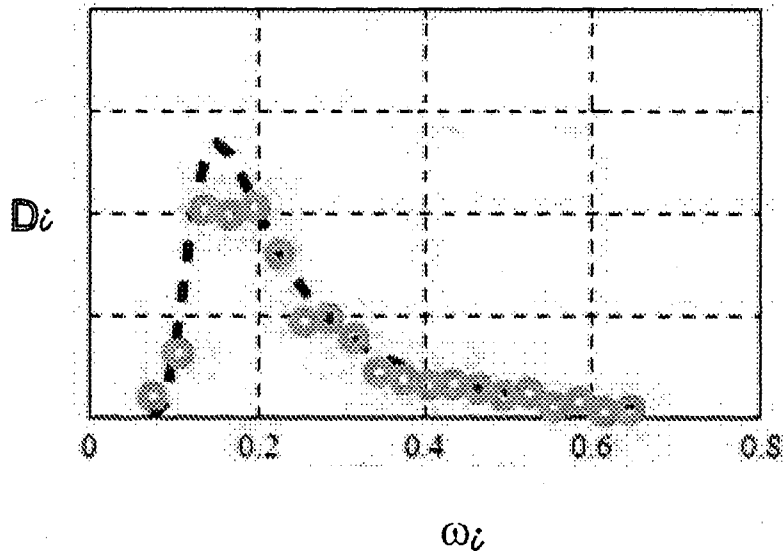


FIG.5

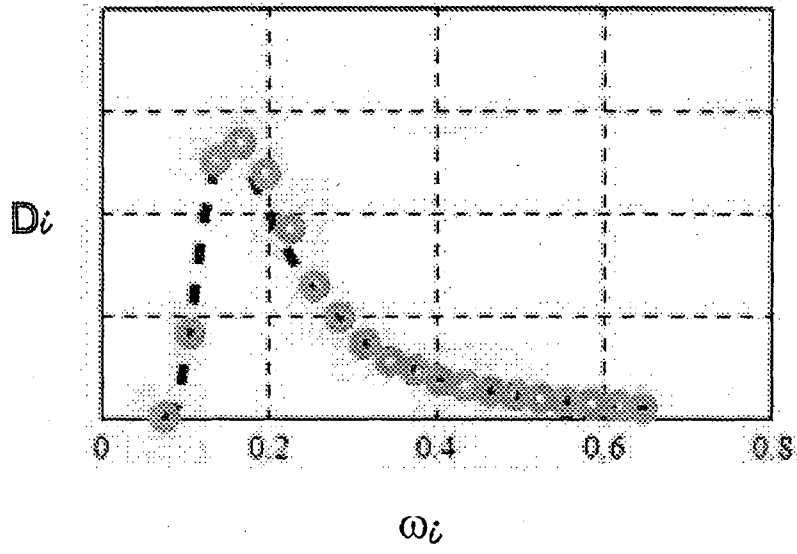


FIG.6

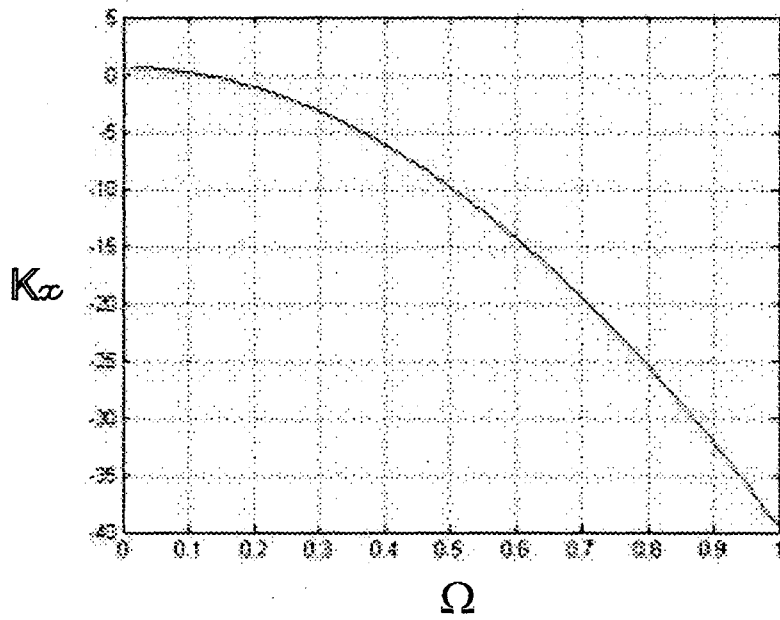


FIG.7

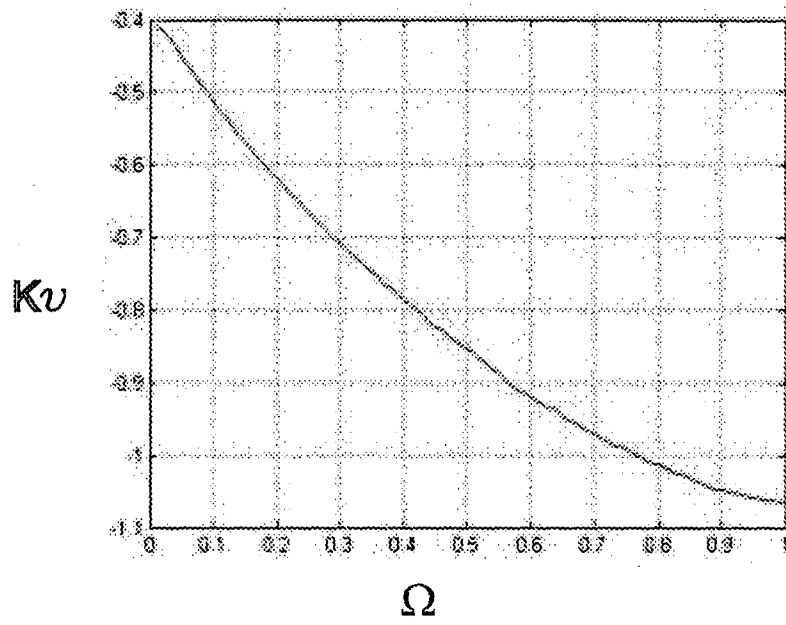


FIG.8