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

(19) Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle
Bureau international

(43) Date de la publication internationale
8 octobre 2015 (08.10.2015)

WIPO | PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2015/150102 A1

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

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2015/055842

(22) Date de dépôt international :
19 mars 2015 (19.03.2015)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
1452885 1 avril 2014 (01.04.2014) FR

(71) Déposant : **IFP ENERGIES NOUVELLES** [FR/FR]; 1 & 4 avenue du Bois-Préau, F-92852 RUEIL-MALMAISON (FR).

(72) Inventeurs : **SAUPE, Florian**; 17 rue de la Part-Dieu, F-69003 LYON (FR). **CREFF, Yann**; Imp. des Peupliers, F-38138 LES COTES D'AREY (FR).

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

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

Publiée :

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

(54) Title : METHOD FOR CONTROLLING A WAVE ENERGY CONVERTER SYSTEM, MAXIMISING THE POWER GENERATED

(54) Titre : PROCEDE DE COMMANDE D'UN SYSTEME HOULOMOTEUR MAXIMISANT LA PUISSANCE GENEREE

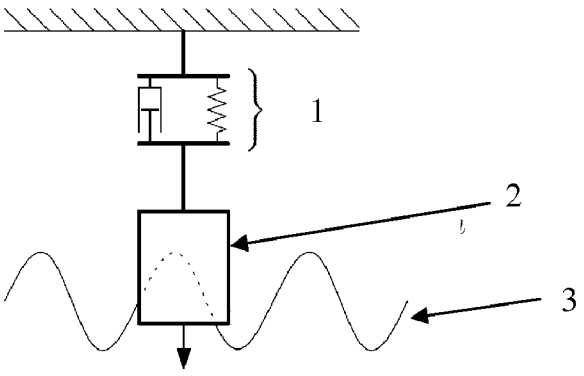

Figure 5

(57) Abstract : The aim of the invention is to improve the operation of a wave energy converter system, (1, 2) by means of a method for the predictive control of the converter machine (1) which maximises the power generated by taking into account the efficiency of the energy conversions and the prediction of the swell (3).

(57) Abrégé : L'invention propose d'améliorer le fonctionnement d'un système houlomoteur (1, 2) par un procédé de commande prédictive de la machine de conversion (1) qui maximise la puissance générée en prenant en considération le rendement des conversions énergétiques et une prédiction de la houle (3).

WO 2015/150102 A1

PROCEDE DE COMMANDE D'UN SYSTEME HOULOMOTEUR MAXIMISANT LA PUISSANCE GENEREE

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

Les ressources énergétiques renouvelables connaissent un fort intérêt depuis quelques années. Propres, gratuites et inépuisables, autant d'atouts majeurs dans un monde rattrapé par la diminution inexorable des ressources fossiles disponibles et prenant conscience de la nécessité de préserver la planète. Parmi ces ressources, l'énergie houlomotrice, source relativement méconnue au milieu de celles largement médiatisées comme l'éolien ou le solaire, contribue à la diversification indispensable de l'exploitation des énergies renouvelables. Les dispositifs, couramment appelés appareils "houlomoteurs", sont particulièrement intéressants, car ils permettent de produire de l'électricité à partir de cette source d'énergie renouvelable (l'énergie potentielle et cinétique des vagues) sans émission de gaz à effet de serre. Ils sont particulièrement bien adaptés pour fournir de l'électricité à des sites insulaires isolés.

Par exemple, les demandes de brevet FR 2876751, FR 2973448 et WO 2009/081042 décrivent des appareils pour capter l'énergie produite par le flot marin. Ces dispositifs sont composés d'un support flottant sur 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 au moyen d'une machine de conversion de l'énergie (par exemple une machine électrique). La machine de conversion fonctionne en tant que générateur et en tant que moteur. En effet, pour fournir un couple ou une force qui entraîne le mobile, on fournit une puissance à la machine de conversion afin de le mettre en résonance avec les vagues (mode moteur). Par contre, pour produire un couple ou force qui résiste au mouvement du mobile, on récupère une puissance via la machine de conversion (mode générateur).

Le mouvement des moyens mobiles est donc contrôlé par la machine de conversion de l'énergie pour favoriser la récupération d'énergie. Afin d'optimiser l'énergie électrique récupérée par les systèmes houlomoteurs, différents procédés de commande de la machine de conversion ont été envisagés. Certains de ces procédés ne sont pas optimaux car la prédiction de la houle n'est pas considérée. De plus, ces procédés ne prennent pas en compte les pertes énergétiques lors de la conversion de l'énergie dans le système

houlomoteur. Par exemple, la demande de brevet FR 2973448 (WO 2012/131186) décrit un tel procédé.

Par ailleurs, d'autres procédés combinent la commande prédictive avec un algorithme qui prédit la houle. Toutefois, ces algorithmes ne permettent pas de prendre en compte les pertes énergétiques lors de la conversion de l'énergie dans le système houlomoteur, ce qui ne permet pas de réaliser une commande optimale qui maximise l'énergie récupérée. Par exemple, le document suivant décrit un tel procédé : Giorgio Bacelli, John Ringwood, and Jean-Christophe Gilloteaux. "A control system for a self-reacting point absorber wave energy converter subject to constraints". In: Proceedings of 18th IFAC World Congress. International Federation of Automatic Control (IFAC). 2011, pp. 11387–11392

L'invention propose d'améliorer le fonctionnement d'un système houlomoteur par un procédé de commande prédictive de la machine de conversion qui maximise l'énergie générée en prenant en considération le rendement des conversions énergétiques et une prédiction de la houle.

Le procédé selon l'invention

L'invention concerne un procédé de commande d'un système houlomoteur qui convertit l'énergie des vagues en énergie électrique ou hydraulique, ledit système houlomoteur comportant au moins un moyen mobile qui coopère avec au moins une machine de conversion de l'énergie, et ledit moyen mobile effectuant un mouvement oscillatoire par rapport à ladite machine de conversion. Pour ce procédé, on réalise les étapes suivantes :

a) on construit un modèle dynamique dudit système houlomoteur qui relie la vitesse dudit moyen mobile à ladite force exercée par les vagues sur ledit moyen mobile et à la force exercée par ladite machine de conversion sur ledit moyen mobile ;
b) on construit un modèle énergétique dudit système houlomoteur qui relie la puissance moyenne générée par ladite machine de conversion à la force exercée par ladite machine de conversion sur ledit moyen mobile, à la vitesse dudit moyen mobile, et au rendement des moyens de conversion énergétiques ;
c) on prédit la force exercée par les vagues sur ledit moyen mobile pour une période de temps prédéterminé ;
d) on détermine une valeur de commande de ladite force exercée par ladite machine de conversion sur ledit moyen mobile maximisant la puissance moyenne générée par ladite machine de conversion, au moyen de ladite prédiction de la force exercée par les vagues sur ledit moyen mobile, dudit modèle dynamique et dudit modèle énergétique ; et

e) on commande ladite machine de conversion au moyen de ladite valeur de commande.

Selon une variante de réalisation de l'invention, on prédit la force exercée par les vagues sur ledit moyen mobile par au moins une mesure ou une estimation de ladite force exercée par les vagues sur le moyen mobile, notamment au moyen d'un ensemble de capteurs de pression disposés au niveau du moyen mobile ou de capteurs de force disposés entre ledit moyen mobile et la machine de conversion..

Alternativement, on prédit la force exercée par les vagues sur ledit moyen mobile par mesure des vagues en amont dudit système houlomoteur.

Avantageusement, on construit ledit modèle dynamique du système houlomoteur au moyen d'un modèle des dynamiques de ladite machine de conversion et d'un modèle de la partie mécanique et hydrodynamique dudit système houlomoteur.

De préférence, ledit modèle des dynamiques de ladite machine de conversion s'écrit par des équations de la forme : $\dot{x}_a = A_a^c x_a + B_a^c u_c$ et $u = C_a^c x_a$ et le modèle de la partie mécanique et hydrodynamique s'écrit par des équations de la forme : $\dot{x}_s = A_s^c x_s + B_s^c (w - u)$ et $v = C_s^c x_s$ avec x_a le vecteur d'état de la machine de conversion, x_s le vecteur d'état de la partie mécanique et hydrodynamique, A_a^c, B_a^c, C_a^c, A_s^c, B_s^c et C_s^c les matrices dynamiques, entrées, sorties des modèles dynamiques de la machine de conversion et de la partie mécanique et hydrodynamique, u_c la commande de ladite force exercée par ladite machine de conversion sur ledit moyen mobile, w la force exercée par les vagues sur le moyen mobile, u la force exercée par ladite machine de conversion sur ledit moyen mobile et v la vitesse dudit moyen mobile par rapport à ladite machine de conversion.

De manière avantageuse, on synthétise à partir desdits deux modèles linéaires au moyen d'un observateur d'état, notamment un filtre de Kalman pour observer l'état du système.

Selon un aspect de l'invention, ledit modèle énergétique s'écrit par une formule du type : $P_m^c = -\frac{1}{T}\int_{t=0}^{T} \eta u v dt$ avec P_m^c la puissance moyenne générée, t le temps, T une durée prédéterminée, η le rendement de la conversion de l'énergie, u la force exercée par ladite machine de conversion sur ledit moyen mobile et v la vitesse dudit moyen mobile par rapport à ladite machine de conversion.

Avantageusement, ledit rendement η est fonction de la force u exercée par la machine de conversion sur ledit moyen mobile et de la vitesse v du moyen mobile par rapport à ladite machine de conversion.

Selon une variante de réalisation, ledit rendement η est calculé par une formule du type : $\eta(uv) = \begin{cases} \eta_0 & si\ uv \geq 0 \\ \frac{1}{\eta_0} & si\ uv < 0 \end{cases}$ avec η_0 le rendement moteur et générateur de la machine de conversion avec $0 \leq \eta_0 \leq 1$.

Alternativement, ledit rendement η est calculé par une formule du type : $\eta(uv) = -\frac{\frac{1}{\eta_0}-\eta_0}{\pi} arctan\left(\frac{\pi r_a uv}{2}\right) + \frac{\frac{1}{\eta_0}-\eta_0}{2} + \eta_0$ avec η_0 le rendement moteur et générateur de la machine de conversion avec $0 \leq \eta_0 \leq 1$, et r_a un paramètre de lissage de la fonction.

Selon l'invention, la maximisation de la puissance moyenne générée est réalisée par un algorithme d'optimisation, contraint par des valeurs minimales et maximales de la force exercée par la machine de conversion sur ledit moyen mobile et des contraintes sur l'état du système.

De préférence, la maximisation de la puissance moyenne générée est un algorithme d'optimisation du type points intérieurs.

Selon un mode de réalisation de l'invention, on réitère les étapes c), d) et e) pour une commande prédictive à horizon glissant.

De manière avantageuse, ladite machine de conversion de l'énergie est une machine électrique ou hydraulique.

Présentation succincte des figures

D'autres caractéristiques et avantages du procédé selon l'invention, apparaîtront à la lecture de la description ci-après d'exemples non limitatifs de réalisations, en se référant aux figures annexées et décrites ci-après.

La figure 1 illustre les étapes du procédé selon l'invention.

La figure 2 illustre deux courbes pour deux exemples d'équations du rendement en fonction de la puissance mécanique instantanée (le produit uv).

La figure 3 illustre des courbes du de la puissance mécanique instantanée (le produit uv) en fonction du temps pour différentes valeurs du rendement.

La figure 4 illustre la commande prédictive à horizon glissant selon l'invention.

La figure 5 illustre un exemple d'un système houlomoteur.

La figure 6 illustre l'amplitude en fonction de la fréquence de différents types de houle simulés.

La figure 7 représente des courbes du déplacement, de la vitesse, de la commande, et de la puissance mécanique instantanée (le produit uv) pour le système houlomoteur de la

figure 5 et une houle du type HO 1 de la figure 6 selon un procédé de l'art antérieur et selon le procédé de commande de l'invention.

La figure 8 correspond à la figure 7 pour une houle du type HO 5 de la figure 6.

Description détaillée de l'invention

L'invention concerne un procédé de commande d'un système houlomoteur qui comprend au moins un moyen mobile qui coopère avec au moins une machine de conversion de l'énergie (également appelé PTO de l'anglais « Power Take-Off »). Le moyen mobile effectue un mouvement oscillatoire par rapport à la machine de conversion, sous l'action des vagues (ou houle) et de la machine de conversion. La machine de conversion convertit l'énergie mécanique du mouvement du moyen mobile en énergie électrique. Dans ce but, la machine de conversion peut être une machine électrique ou une machine hydraulique.

Notations

Au cours de la description, les notations suivantes sont utilisées :

- u : force exercée par la machine de conversion sur le moyen mobile, et :
  - u_c : valeur de la commande de la force exercée par la machine de conversion sur le moyen mobile
- w : force exercée par les vagues sur le moyen mobile.
- v : vitesse du moyen mobile par rapport à la machine de conversion.
- x_a : vecteur d'état de la machine de conversion du système houlomoteur.
- x_s : vecteur d'état de la partie mécanique et hydrodynamique du système houlomoteur.
- A_a^c, B_a^c, C_a^c, A_s^c, B_s^c et C_s^c : matrices dynamiques, entrées, sorties des modèles dynamique de la machine et de la partie mécanique et hydrodynamique. Le modèle peut être calculé par un bilan des forces ou une procédure d'identification expérimentale. Si le modèle est linéaire, le modèle peut être représenté par ces matrices (c'est un formalisme).
- P_m^c : puissance moyenne générée.
- t : temps.
- T_f : durée prédéterminée.
- η : rendement de la conversion de l'énergie, avec
  - η_0 : rendement moteur et générateur de la machine de conversion, il s'agit d'une donnée constructeur ou d'une donnée déterminée expérimentalement.
- r_a : paramètre prédéfini de lissage de la fonction rendement.

Dans la suite de la description et pour les revendications, les termes vagues, flots marins et houle sont considérées comme équivalents.

L'invention concerne un procédé de commande d'un système houlomoteur. La figure 1 représente les différentes étapes du procédé selon l'invention :

1. Construction d'un modèle dynamique (MOD DYN)
2. Construction d'un modèle énergétique (MOD ENE)
3. Prédiction de la force exercée par les vagues (PRED)
4. Estimation de l'état du système (ETAT)
5. Détermination de la valeur de commande (VAL)
6. Commande de la machine de conversion (COM)

Les étapes 1 et 2 sont des étapes qui peuvent être réalisées préalablement, elles font partie d'une procédure de calibration quand la machine est mise en place. Les étapes 3 à 6 sont réalisées en temps réel, dans une boucle temps réel (BTR).

Etape 1) Construction d'un modèle dynamique (MOD DYN)

Lors de cette étape, on construit un modèle dynamique du système houlomoteur. Le modèle dynamique représente le comportement dynamique, traduisant le mouvement, des éléments constituant le système houlomoteur sous l'action des vagues et sous l'action de la machine de conversion. Le modèle dynamique est un modèle qui relie la vitesse du moyen mobile à la force exercée par les vagues sur le moyen mobile et à la force exercée par la machine de conversion sur le moyen mobile.

Selon un mode de réalisation de l'invention, le modèle dynamique peut comporter un modèle linéaire des dynamiques de la machine de conversion. Ce modèle linéaire peut s'écrire sous une forme suivante $\dot{x}_a = A_a^c x_a + B_a^c u_c$ et $u = C_a^c x_a$. Le modèle dynamique peut comporter également un modèle linéaire de la partie mécanique et hydrodynamique du système houlomoteur. Ce modèle linéaire peut s'écrire sous une forme suivante $\dot{x}_s = A_s^c x_s + B_s^c(w - u)$ et $v = C_s^c x_s$.

Etape 2) Construction d'un modèle énergétique (MOD ENE)

Lors de cette étape, on construit un modèle énergétique du système houlomoteur. Le modèle énergétique représente le bilan énergétique entre l'énergie générée par la machine de conversion (c'est-à-dire l'énergie fournie au réseau) et l'énergie houlomotrice. Selon l'invention, ce modèle prend en compte le rendement imparfait de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique ou hydraulique ainsi que le rendement imparfait de la conversion d'énergie électrique ou hydraulique en énergie mécanique. Le modèle

énergétique relie la puissance moyenne générée par la machine de conversion à la force exercée par la machine de conversion sur le moyen mobile, à la vitesse du moyen mobile et au rendement des convertisseurs énergétiques.

Selon un mode de réalisation de l'invention, le modèle énergétique du système houlomoteur peut être déterminé à partir de la puissance moyenne qui est extraite pendant une durée T, qui peut être calculée avec une formule du type : $P_m^c = -\frac{1}{T}\int_{t=0}^{T} \eta uv dt$. La définition de la puissance moyenne générée ci-dessus est telle que la puissance moyenne a un signe négatif si l'énergie est extraite du système et par exemple fournie au réseau électrique. Une maximisation de la puissance moyenne générée correspond donc à une minimisation de cette puissance.

Selon l'invention, la fonction η est utilisée pour modéliser un rendement imparfait de la chaîne de conversion de l'énergie. Dans ce cas-là, la quantité d'énergie générée dans le mode moteur est diminuée et le coût de l'énergie fournie au système (pour le mettre en résonance avec les vagues avec le mode moteur) augmente. Un modèle simple qui utilise l'hypothèse que le rendement η_0 est le même dans les modes moteur et générateur peut s'écrire selon une première équation (Eq 1) : $\eta(uv) = \begin{cases} \eta_0 & si\ uv \geq 0 \\ \frac{1}{\eta_0} & si\ uv < 0 \end{cases}$. Une autre possibilité pour la modélisation du rendement η évitant l'utilisation d'une discontinuité peut s'écrire selon une deuxième équation (Eq 2) : $\eta(uv) = -\frac{\frac{1}{\eta_0}-\eta_0}{\pi} arctan\left(\frac{\pi r_a uv}{2}\right) + \frac{\frac{1}{\eta_0}-\eta_0}{2} + \eta_0$. Les deux possibilités (Eq 1 et Eq 2) sont illustrées sur la figure 2 en fonction du produit uv. Sur cette figure, on peut observer la discontinuité de la première équation (Eq 1) au contraire de la deuxième équation (Eq 2). La fonction η peut également modéliser d'autres pertes énergétiques.

Etape 3) Prédiction de la force exercée par les vagues (PRED)

Pour cette étape, on prédit en temps réel la force exercée par les vagues sur le moyen mobile pour une période future d'une durée prédéterminée T_f. Cette durée prédéterminée T_f peut être à court terme, par exemple d'une durée de 5 à 10 secondes. On choisit alors une méthode de prédiction et on l'applique à l'instant considéré.

Selon un mode de réalisation de l'invention, une possibilité est d'estimer ou de mesurer en temps réel la force exercée sur le moyen mobile par la houle avec par exemple un ensemble de capteurs de pression disposés au niveau du moyen mobile ou des capteurs de force entre moyen mobile et la machine de conversion ou des capteurs d'élevation des houles. Pour la prédiction, la force exercée sur le moyen mobile par la houle peut être extrapolé en utilisant par exemple un modèle autorégressif identifié en ligne.

Selon une alternative, on prédit la force exercée par les vagues sur le moyen mobile en utilisant un ensemble de capteurs disposés en amont du dispositif. Ces capteurs peuvent mesurer notamment l'amplitude et la fréquence des vagues.

Etape 4) Estimation de l'état du système (ETAT)

On détermine en temps réel l'état actuel du système houlomoteur. Pour cette étape, on peut estimer l'état actuel au moyen d'un observateur d'état du système. Cet observateur d'état peut être réalisé par synthèse d'un filtre de Kalman à partir du modèle dynamique du système houlomoteur. Par exemple, l'observateur est construit à partir des modèles linéaires exposés à l'étape 1.

De plus l'observateur peut prendre en compte la commande actuelle de la machine de conversion pour déterminer l'état actuel du système houlomoteur, par exemple au moyen de la commande aux instants précédant l'instant considéré.

Etape 5) Détermination de la valeur de commande (VAL)

Lors de cette étape, on détermine en temps réel une valeur de commande de la force exercée par la machine de conversion sur le moyen mobile, la valeur de commande maximise la puissance moyenne générée par la machine de conversion. Pour cela, la détermination est réalisée au moyen de la prédiction de la force exercée par les vagues (Etape 3), du modèle dynamique (Etape 1) et du modèle énergétique (Etape 2). De plus, cette détermination peut être mise en œuvre en prenant en compte de l'état du système (Etape 4).

L'utilisation de la prédiction de la force exercée par les vagues donne la caractéristique prédictive du procédé de commande selon l'invention. L'utilisation d'un modèle énergétique prenant en compte le rendement des conversions énergétiques assure la prise en compte des pertes énergétiques, ce qui permet une commande optimale qui maximise la puissance moyenne générée par la machine de conversion.

En effet, si le rendement η est différent de 1, le produit entre commande u et vitesse optimale v change d'une façon importante à cause du coût de l'énergie fournie à la machine, lié notamment aux pertes énergétiques, tel que le montre la figure 3. Sur cette figure, les courbes représentent, pour un exemple, le produit uv en fonction du temps pour différentes valeurs du rendement η_0 . C'est la raison pour laquelle la prise en compte du rendement dans le calcul de la commande est importante.

Avec les formulations des modèles dynamique et énergétique, la recherche de la commande optimale avec des contraintes sur la commande u et sur l'état du système x peut être formulée d'une façon générale : $\min_{u_c} P_m^c$ en fonction des modèles et des contraintes suivantes : $u_{min} < u < u_{max}$ et $x_{min} < x < x_{max}$. Pour la minimisation de la puissance

moyenne générée, on peut paramétrer la variable u_c. Une possibilité est de choisir une variable u_c qui est constante par morceaux.

Selon un mode de réalisation de l'invention, la maximisation de la puissance moyenne P_m^c générée est réalisée au moyen d'un algorithme d'optimisation.

Selon une variante de réalisation de l'invention, dans le but de lisser la commande et d'éviter des oscillations non souhaitées, une pénalité pour les variations de u_c peut être ajoutée à la fonction cible.

Selon un mode de réalisation de l'invention, pour calculer une commande en temps réel, une approche de commande prédictive à horizon glissant (MPC de l'anglais « Model Predictive Control ») est appliquée:

1. Au pas actuel, le pas i, l'état du système est estimé (étape 4) et la force de la houle est prédite (étape 3). A partir de ces valeurs, la commande optimale sur un horizon limité à la période prédéterminée T (environ 5 sec) est calculée. Cela fournit une série de commandes optimales $u_{c,i}$ de longueur n.

2. Le premier élément de la série des commandes optimales $u_{c,i}$ est appliqué au système comme valeur cible pour la machine de conversion (PTO). La valeur est maintenue constante pendant un pas de temps.

3. Au pas suivant, le pas i+1, l'état du système est estimé (étape 4) et la force de la houle est prédite (étape 3). A partir de ces valeurs, la commande optimale sur un horizon limité à la période prédéterminée T est calculée. Les valeurs initiales pour cette optimisation sont choisies à partir des résultats du pas précèdent (de la deuxième entrée de $u_{c,i}$ jusqu'à la dernière valeur qui est répétée une fois). L'optimisation fournit une nouvelle série de commandes optimales $u_{c,i+1}$ de longueur n.

4. Le premier élément de la nouvelle série des commandes optimales $u_{c,i+1}$ est appliqué.

On réitère ces étapes 1 à 4 pour chaque pas de temps.

Ce principe de commande prédictive à horizon glissant MPC est montré sur la figure 4. Sur cette figure sont représentées les courbes de la vitesse v et de la commande u_c pour deux pas de temps consécutifs : i et i + 1. PA indique le passé, de l'instant considéré, AV indique le futur, de l'instant considéré, PRED i indique la prédiction de la vitesse réalisée à l'instant i, et PRED i+1 indique la prédiction de la vitesse réalisée à l'instant i+1. Sur cette figure, on peut remarquer que la prédiction a été modifiée entre les deux pas de temps

même si la forme générale est similaire. On remarque également que la commande a été un peu modifiée entre les deux pas de temps

Les algorithmes qui résolvent les problèmes d'optimisation sont des algorithmes itératifs. Comme le temps pour leur exécution est limité en temps réel, il est important que tous les pas donnent des solutions qui satisfont les contraintes, pour le cas où il faudrait terminer l'algorithme avant qu'il n'ait convergé. Pour résoudre le problème d'optimisation qui donne la commande optimale, on peut utiliser un algorithme qui fournit à chaque itération des valeurs qui satisfont les contraintes comme par exemple un algorithme du type points intérieurs.

Etape 6) Commande de la machine de conversion

Lors de cette étape, on commande la machine de conversion en fonction de la valeur déterminée lors de l'étape précédente. Pour cela, on actionne la machine de conversion (machine électrique ou hydraulique) pour qu'elle reproduise la nouvelle valeur de la force u_c telle que déterminée à l'étape 5.

Par exemple, on applique à la machine électrique la nouvelle expression de la force u_c exercée par la machine de conversion sur le moyen mobile. La commande de la machine électrique pour qu'elle applique la force u_c au mobile est effectuée en modifiant le courant électrique appliquée à la machine électrique. De manière plus détaillée, pour fournir un couple ou force qui entraîne le mobile, on applique un courant en fournissant une puissance électrique. Par contre, pour produire un couple ou force qui résiste au mouvement du mobile, on applique un courant en récupérant une puissance électrique.

Exemple d'application

Un exemple non limitatif d'un système houlomoteur est une bouée oscillante telle que représentée sur la figure 5. Ce système houlomoteur comprend une bouée 2 en tant que moyen mobile de masse m, une machine de conversion 1 d'amortissement d et d'élasticité k qui est fixe. La bouée est soumise à un mouvement oscillatoire par les vagues 3 et aux forces hydrauliques (équation différentielle d'ordre ODE 5).

Pour cet exemple, on compare une commande prédictive à horizon glissant MPC selon l'invention avec une commande PI selon l'art antérieur (PI : proportionnel intégral). Cinq états de mer différents sont considérés dont les spectres (lissés) sont montrés sur la figure 6. Cette figure montre les courbes de cinq états de mer (houles HO 1, HO 2, HO 3, HO 4 et HO 5) de la hauteur h de la houle en mètre en fonction de la fréquence f en Hertz.

Pour la commande selon l'invention, le modèle dynamique prend en compte les dynamiques de la partie mécanique et l'hydrodynamique avec un système linéaire du

cinquième ordre et les dynamiques d'actionneur avec un système linéaire de deuxième ordre. L'effort de la machine de conversion est limité et le rendement non linéaire, correspondant à $\eta(uv) = \begin{cases} \eta_0 & si\ uv \geq 0 \\ \frac{1}{\eta_0} & si\ uv < 0 \end{cases}$ avec $\eta_0 = 0{,}7$, est modélisé et une saturation de la commande peut être réalisée.

Une commande classique selon l'art antérieur pour un système houlomoteur consiste à boucler la commande PTO sur la vitesse du moyen mobile via une commande PI :

$$u_c = -k_p \int_{t_0}^{t} v \, \mathrm{d}\tau - k_v v.$$

Pour la comparaison avec la commande prédictive selon l'invention, les gains k_p et k_v sont calibrés d'une façon optimale pour tous les états de mer considérés.

Les résultats de la comparaison entre la stratégie MPC selon l'invention (INV) et la stratégie PI selon l'art antérieur (AA) sont résumés dans le Tableau 1. Le gain en génération d'énergie est compris entre 16% et 50%.

Tableau 1 Puissance moyenne de la commande prédictive et une commande PI classique

	P_m PI (AA) /kW	P_m MPC (INV) /kW	gain P_m	ratio max. pos. (MPC/PI)	ratio max. vel. (MPC/PI)
houle 1	-2.83	-4.26	50.43 %	1.31	1.48
houle 2	-8.64	-11.89	37.54 %	0.89	0.88
houle 3	-16.42	-20.76	26.44 %	0.81	0.91
houle 4	-24.44	-29.26	19.75 %	0.88	0.91
houle 5	-32.14	-37.14	15.55 %	0.90	0.97

La trajectoire du système d en rad, la vitesse v en rad/s, la commande u en 10^6 Nm et le produit uv en kW, commandés par MPC (INV) et PI (AA), sont montrés sur les figures 7 et 8 respectivement pour une houle HO 1 et HO 5 (cf. figure 6). On constate que la position maximale et la vitesse maximale sont réduites (sauf dans le cas de la houle HO 1 qui est très faible et qui n'excite pas des oscillations fortes).

Revendications

1) Procédé de commande d'un système houlomoteur qui convertit l'énergie des vagues (3) en énergie électrique ou hydraulique, ledit système houlomoteur comportant au moins un moyen mobile (2) qui coopère avec au moins une machine de conversion (1) de l'énergie, et ledit moyen mobile (2) effectuant un mouvement oscillatoire par rapport à ladite machine de conversion (1), caractérisé en ce qu'on réalise les étapes suivantes :
   a) on construit un modèle dynamique dudit système houlomoteur qui relie la vitesse dudit moyen mobile (2) à ladite force exercée par les vagues (3) sur ledit moyen mobile (2) et à la force exercée par ladite machine de conversion (1) sur ledit moyen mobile (2) ;
   b) on construit un modèle énergétique dudit système houlomoteur qui relie la puissance moyenne générée par ladite machine de conversion (1) à la force exercée par ladite machine de conversion (1) sur ledit moyen mobile (2), à la vitesse dudit moyen mobile (2), et au rendement des moyens de conversion énergétiques ;
   c) on prédit la force exercée par les vagues (3) sur ledit moyen mobile (2) pour une période de temps prédéterminé ;
   d) on détermine une valeur de commande de ladite force exercée par ladite machine de conversion (1) sur ledit moyen mobile (2) maximisant la puissance moyenne générée par ladite machine de conversion (1), au moyen de ladite prédiction de la force exercée par les vagues (3) sur ledit moyen mobile (2), dudit modèle dynamique et dudit modèle énergétique ; et
   e) on commande ladite machine de conversion (1) au moyen de ladite valeur de commande.

2) Procédé selon la revendication 1, dans lequel on prédit la force exercée par les vagues sur ledit moyen mobile (2) par au moins une mesure ou une estimation de ladite force exercée par les vagues sur le moyen mobile, notamment au moyen d'un ensemble de capteurs de pression disposés au niveau du moyen mobile ou de capteurs de force disposés entre ledit moyen mobile et la machine de conversion..

3) Procédé selon la revendication 1, dans lequel on prédit la force exercée par les vagues sur ledit moyen mobile (2) par mesure des vagues en amont dudit système houlomoteur.

4) Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel on construit ledit modèle dynamique du système houlomoteur au moyen d'un modèle des dynamiques de ladite machine de conversion (1) et d'un modèle de la partie mécanique et hydrodynamique dudit système houlomoteur.

5) Procédé selon la revendication 4, dans lequel ledit modèle des dynamiques de ladite machine de conversion s'écrit par des équations de la forme : $\dot{x}_a = A_a^c x_a + B_a^c u_c$ et $u = C_a^c x_a$ et le modèle de la partie mécanique et hydrodynamique s'écrit par des équations de la forme : $\dot{x}_s = A_s^c x_s + B_s^c (w - u)$ et $v = C_s^c x_s$ avec x_a le vecteur d'état de la machine de conversion, x_s le vecteur d'état de la partie mécanique et hydrodynamique, A_a^c, B_a^c, C_a^c, A_s^c, B_s^c et C_s^c les matrices dynamiques, entrées, sorties des modèles dynamiques de la machine de conversion et de la partie mécanique et hydrodynamique, u_c la commande de ladite force exercée par ladite machine de conversion sur ledit moyen mobile, w la force exercée par les vagues sur le moyen mobile, u la force exercée par ladite machine de conversion sur ledit moyen mobile et v la vitesse dudit moyen mobile par rapport à ladite machine de conversion.

6) Procédé selon l'une des revendications 4 ou 5, dans lequel on synthétise à partir desdits deux modèles linéaires au moyen d'un observateur d'état, notamment un filtre de Kalman pour observer l'état du système.

7) Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel ledit modèle énergétique s'écrit par une formule du type : $P_m^c = -\frac{1}{T}\int_{t=0}^{T} \eta u v dt$ avec P_m^c la puissance moyenne générée, t le temps, T une durée prédéterminée, η le rendement de la conversion de l'énergie, u la force exercée par ladite machine de conversion sur ledit moyen mobile et v la vitesse dudit moyen mobile par rapport à ladite machine de conversion.

8) Procédé selon la revendication 7, dans lequel ledit rendement η est fonction de la force u exercée par la machine de conversion (1) sur ledit moyen mobile (2) et de la vitesse v du moyen mobile (2) par rapport à ladite machine de conversion (1).

9) Procédé selon la revendication 7 ou 8, dans lequel ledit rendement η est calculé par une formule du type : $\eta(uv) = \begin{cases} \eta_0 & si\ uv \geq 0 \\ \frac{1}{\eta_0} & si\ uv < 0 \end{cases}$ avec η_0 le rendement moteur et générateur de la machine de conversion (1) avec $0 \leq \eta_0 \leq 1$.

10) Procédé selon la revendication 7 ou 8, dans lequel ledit rendement η est calculé par une formule du type : $\eta(uv) = -\frac{\frac{1}{\eta_0} - \eta_0}{\pi} arctan\left(\frac{\pi r_a uv}{2}\right) + \frac{\frac{1}{\eta_0} - \eta_0}{2} + \eta_0$ avec η_0 le rendement moteur et générateur de la machine de conversion avec $0 \leq \eta_0 \leq 1$, et r_a un paramètre de lissage de la fonction.

11) Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la maximisation de la puissance moyenne générée est réalisée par un algorithme d'optimisation, contraint par des valeurs minimales et maximales de la force exercée par la machine de conversion (1) sur ledit moyen mobile (2) et des contraintes sur l'état du système.

12) Procédé selon la revendication 11, dans lequel la maximisation de la puissance moyenne générée est un algorithme d'optimisation du type points intérieurs.

13) Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel on réitère les étapes c), d) et e) pour une commande prédictive à horizon glissant.

14) Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel ladite machine de conversion (1) de l'énergie est une machine électrique ou hydraulique.

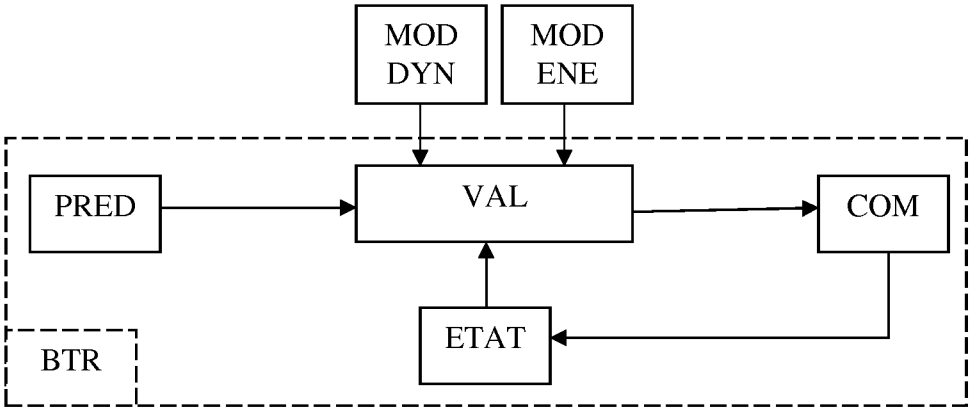

Figure 1

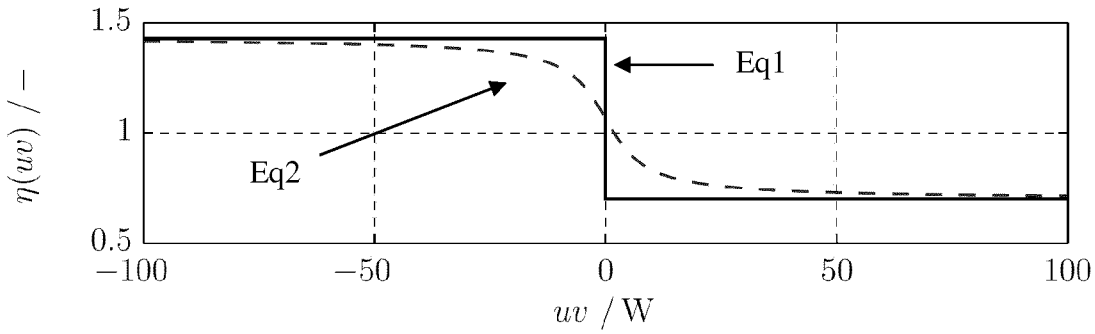

Figure 2

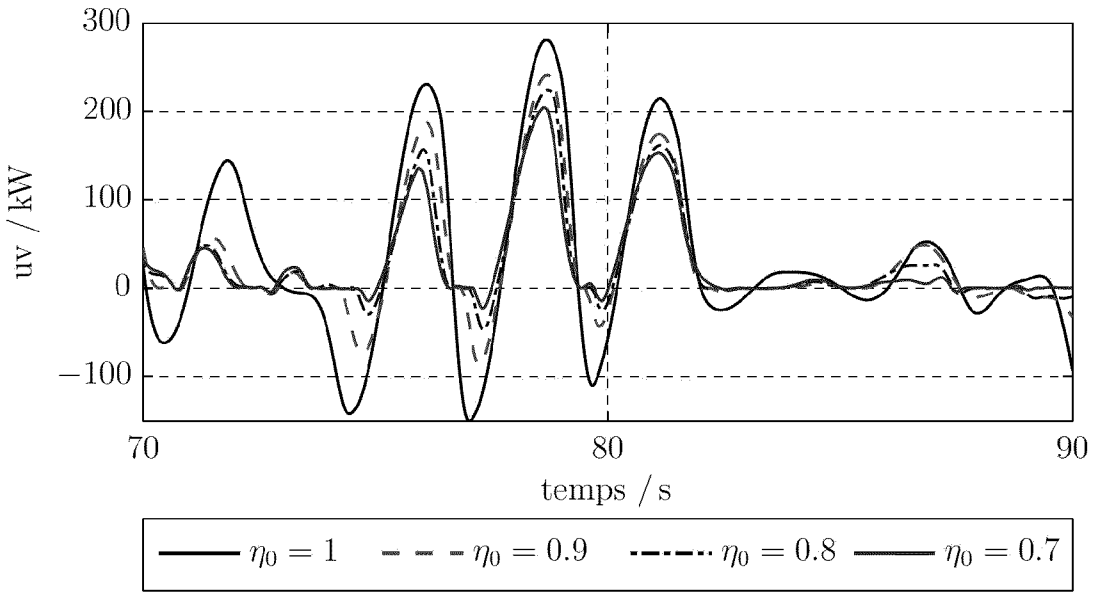

Figure 3

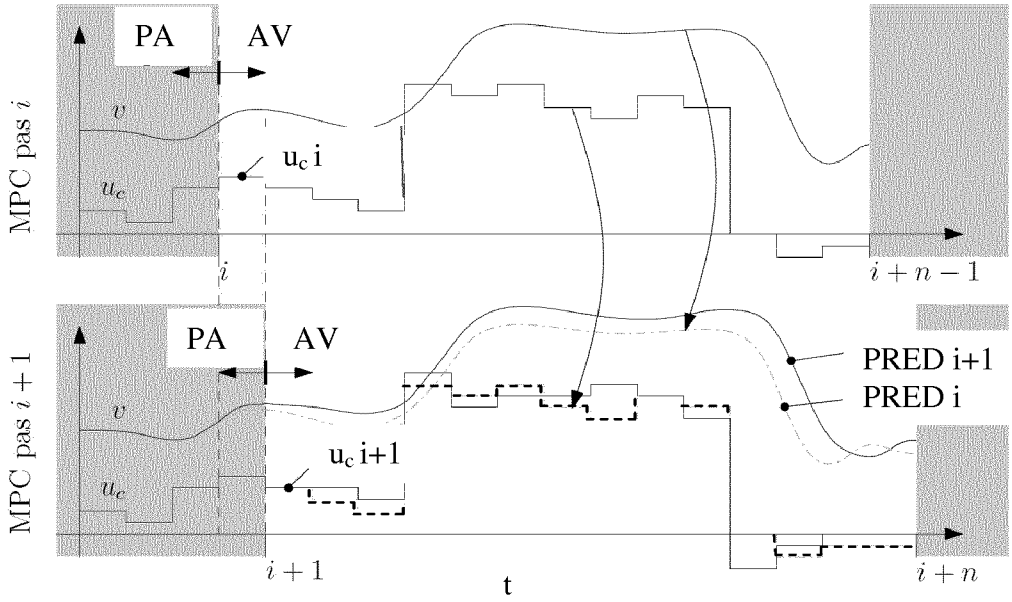

Figure 4

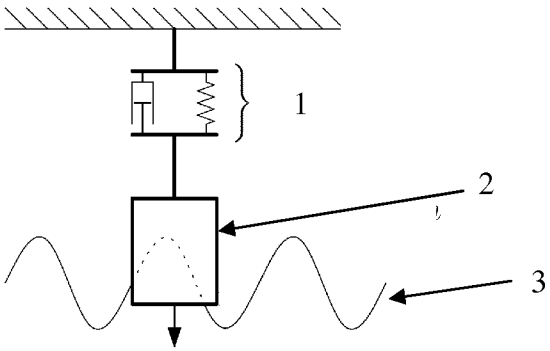

Figure 5

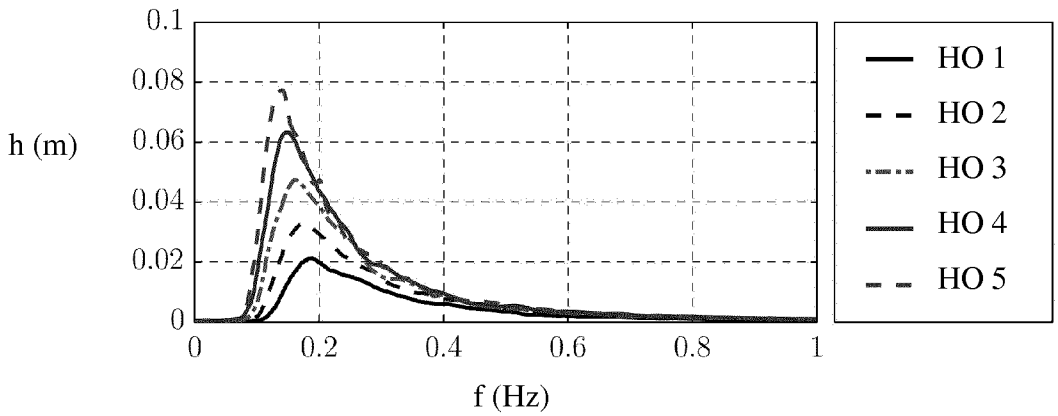

Figure 6

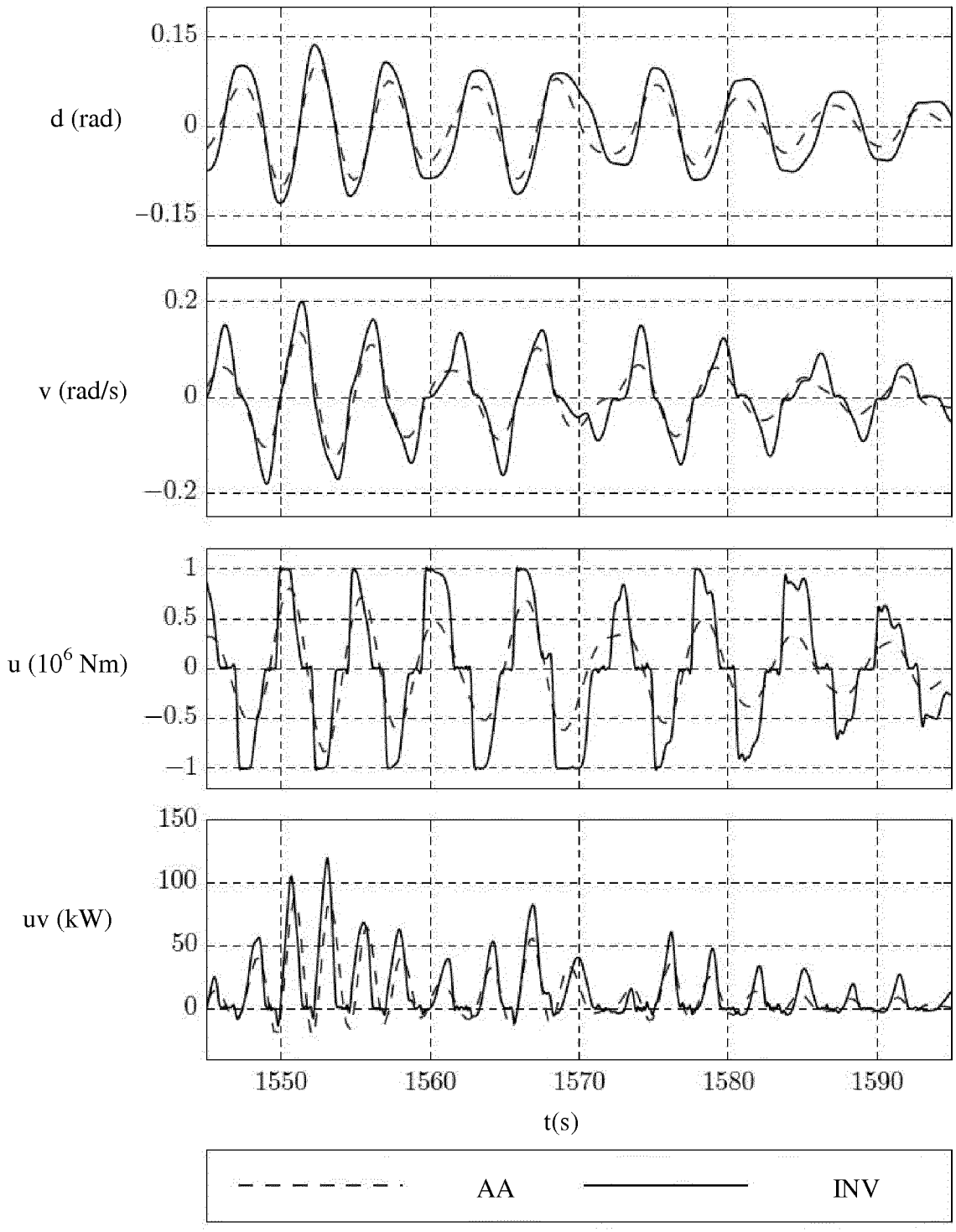
d (rad)
0.15
0
−0.15
v (rad/s)
0.2
0
−0.2
u (10^6 Nm)
1
0.5
0
−0.5
−1
uv (kW)
150
100
50
0
1550
1560
1570
1580
1590
t(s)
AA
INV

Figure 7

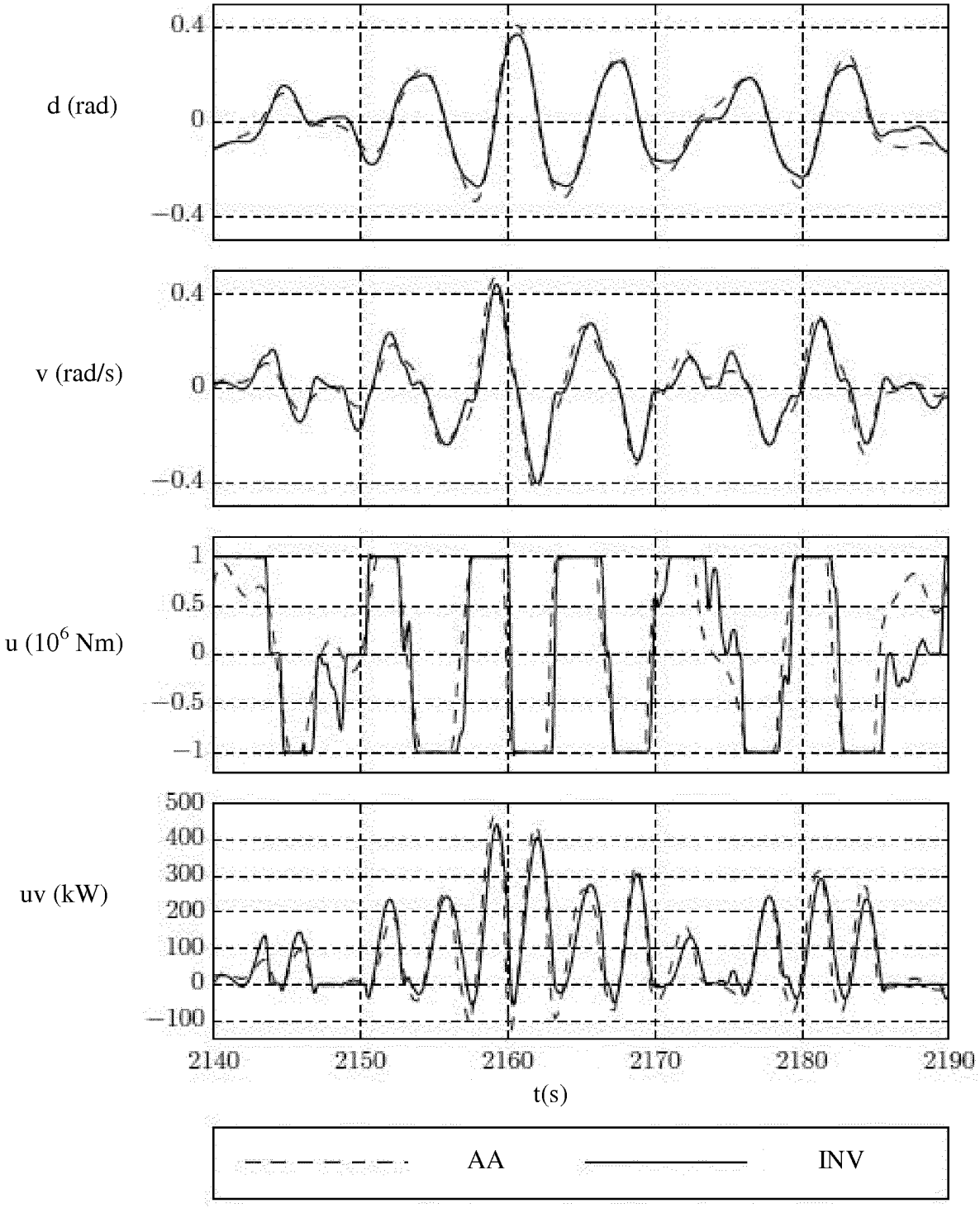
d (rad)
0.4
0
−0.4
v (rad/s)
0.4
0
−0.4
u (10^6 Nm)
1
0.5
0
−0.5
−1
uv (kW)
500
400
300
200
100
0
−100
2140
2150
2160
2170
2180
2190
t(s)
AA
INV

Figure 8

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2015/055842

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. F03B13/16 F03B15/00 F03B13/18
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)
F03B

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

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

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	FR 2 973 448 A1 (IFP ENERGIES NOUVELLES [FR]) 5 October 2012 (2012-10-05) cited in the application page 5, line 13 - page 14, line 3	1-14
A	US 2010/148504 A1 (GERBER JAMES S [US]) 17 June 2010 (2010-06-17) the whole document	1-14

-/--

[X] Further documents are listed in the continuation of Box C.

[X] See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

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

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

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

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

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

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

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

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

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
16 June 2015	30/06/2015

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

1

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (April 2005)

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	Giorgio Bacelli ET AL: "A control system for a self-reacting point absorber wave energy converter subject to constraints", , 28 August 2011 (2011-08-28), XP055153399, Retrieved from the Internet: URL:http://eprints.nuim.ie/3555 [retrieved on 2014-11-17] cited in the application the whole document	1-14
A	US 2013/229011 A1 (KAWAGUCHI TAKASHI [JP] ET AL) 5 September 2013 (2013-09-05) paragraph [0037] - paragraph [0070]; claim 1; figures	1-14

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No
PCT/EP2015/055842

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
FR 2973448 A1	05-10-2012	AU 2012237000 A1	12-09-2013
		EP 2691642 A2	05-02-2014
		FR 2973448 A1	05-10-2012
		US 2014084586 A1	27-03-2014
		WO 2012131186 A2	04-10-2012
US 2010148504 A1	17-06-2010	AU 2009255714 A1	10-12-2009
		CA 2725619 A1	10-12-2009
		EP 2315935 A1	04-05-2011
		JP 5474056 B2	16-04-2014
		JP 2011522157 A	28-07-2011
		US 2010148504 A1	17-06-2010
		WO 2009148531 A1	10-12-2009
US 2013229011 A1	05-09-2013	AU 2012209023 A1	24-10-2013
		EP 2634415 A1	04-09-2013
		JP 5211252 B1	12-06-2013
		JP 2013181496 A	12-09-2013
		US 2013229011 A1	05-09-2013

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°
PCT/EP2015/055842

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE
INV. F03B13/16 F03B15/00 F03B13/18
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)
F03B

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

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

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	FR 2 973 448 A1 (IFP ENERGIES NOUVELLES [FR]) 5 octobre 2012 (2012-10-05) cité dans la demande page 5, ligne 13 - page 14, ligne 3 -----	1-14
A	US 2010/148504 A1 (GERBER JAMES S [US]) 17 juin 2010 (2010-06-17) le document en entier -----	1-14
	-/--	

[X] Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

[X] Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

* Catégories spéciales de documents cités:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée	Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale
16 juin 2015	30/06/2015

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

1

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	Giorgio Bacelli ET AL: "A control system for a self-reacting point absorber wave energy converter subject to constraints", , 28 août 2011 (2011-08-28), XP055153399, Extrait de l'Internet: URL:http://eprints.nuim.ie/3555 [extrait le 2014-11-17] cité dans la demande le document en entier -----	1-14
A	US 2013/229011 A1 (KAWAGUCHI TAKASHI [JP] ET AL) 5 septembre 2013 (2013-09-05) alinéa [0037] - alinéa [0070]; revendication 1; figures -----	1-14

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°
PCT/EP2015/055842

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
FR 2973448 A1	05-10-2012	AU 2012237000 A1	12-09-2013
		EP 2691642 A2	05-02-2014
		FR 2973448 A1	05-10-2012
		US 2014084586 A1	27-03-2014
		WO 2012131186 A2	04-10-2012
US 2010148504 A1	17-06-2010	AU 2009255714 A1	10-12-2009
		CA 2725619 A1	10-12-2009
		EP 2315935 A1	04-05-2011
		JP 5474056 B2	16-04-2014
		JP 2011522157 A	28-07-2011
		US 2010148504 A1	17-06-2010
		WO 2009148531 A1	10-12-2009
US 2013229011 A1	05-09-2013	AU 2012209023 A1	24-10-2013
		EP 2634415 A1	04-09-2013
		JP 5211252 B1	12-06-2013
		JP 2013181496 A	12-09-2013
		US 2013229011 A1	05-09-2013