

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 878 323**

51 Int. Cl.:

F03B 13/16 (2006.01)

F03B 15/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **26.02.2018** **PCT/EP2018/054700**

87 Fecha y número de publicación internacional: **27.09.2018** **WO18172019**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **26.02.2018** **E 18711831 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **28.04.2021** **EP 3601781**

54 Título: **Procedimiento de control de un sistema convertidor de la energía undimotriz por medio de una ley de control integral proporcional**

30 Prioridad:

22.03.2017 FR 1752337

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

18.11.2021

73 Titular/es:

IFP ENERGIES NOUVELLES (100.0%)
1 & 4 Avenue de Bois-Préau
92852 Rueil-Malmaison, FR

72 Inventor/es:

TONA, PAOLINO y
NGUYEN, HOAI-NAM

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 878 323 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Procedimiento de control de un sistema convertidor de la energía undimotriz por medio de una ley de control integral proporcional

La invención se refiere al campo de los dispositivos para convertir la energía de las olas en energía eléctrica o hidráulica.

5 Los recursos energéticos renovables han experimentado un gran interés desde hace algunos años. Limpios, gratuitos e inagotables, tantas ventajas importantes en un mundo superado por la inexorable disminución de los recursos fósiles disponibles y con la conciencia de la necesidad de preservar el planeta. Entre estos recursos, la energía undimotriz, una fuente relativamente desconocida en medio de las ampliamente mediatizadas como la eólica y la solar, contribuye a la esencial diversificación de la explotación de las energías renovables. Los dispositivos, comúnmente llamados "fuentes undimotrices", son particularmente interesantes porque permiten producir electricidad a partir de esta fuente de energía renovable (la energía potencial y cinética de las olas), sin emisión de gases de efecto invernadero. Están particularmente bien adaptados para suministrar electricidad a zonas insulares aisladas.

10 Por ejemplo, las solicitudes de patente FR 2876751, FR 2973448 y WO 2009/081042 describen aparatos para captar la energía producida por el flujo del mar. Estos dispositivos están compuestos de un soporte flotante sobre el que se coloca un péndulo montado para poder moverse con respecto al soporte flotante. El movimiento relativo del péndulo con respecto al soporte flotante se utiliza para producir energía eléctrica por medio de una máquina de conversión de energía (por ejemplo, una máquina eléctrica). La máquina de conversión funciona como generador y como motor. De hecho, para proporcionar un par o una fuerza que accione el móvil, se suministra una potencia a la máquina de conversión para ponerla en resonancia con las olas (modo motor). En cambio, para producir un par o fuerza que resista el movimiento del móvil, se recupera una potencia a través de la máquina de conversión (modo generador).

15 Por tanto, el movimiento de los medios móviles está controlado por la máquina de conversión de la energía para promover la recuperación de energía. Para optimizar la energía eléctrica recuperada por los sistemas convertidores de energía undimotriz, se han considerado varios procedimientos para controlar la máquina de conversión. Algunos de estos procedimientos no son óptimos, porque no se considera la predicción del oleaje. Además, estos procedimientos no tienen en cuenta las pérdidas de energía durante la conversión de energía en el sistema convertidor de energía undimotriz. Por ejemplo, la solicitud de patente FR 2973448 (WO 2012/131186) describe tal procedimiento.

20 El control «PI» es un enfoque bien conocido para el control de sistemas convertidores de energía undimotriz. Por ejemplo, el documento Ringwood, J.V. .. Control optimisation and parametric design ("Optimización de control y diseño paramétrico"), en Numerical Modelling of Wave Energy Converters: ("Modelado numérico de convertidores de energía undimotriz"): Técnicas del estado del arte para WEC individuales y grupos de convertidores (M. Folly Ed.), Elsevier, 2016 describe un enfoque de este tipo. Se han presentado en la bibliografía versiones adaptativas con respecto al estado del mar (es decir, cuyos parámetros varían con respecto al estado del mar), por ejemplo, en los siguientes documentos:

- Whittaker, T., Collier, D., Folley, M., Osterried, M., Henry, A. y Crowley, M. (2007, septiembre). El desarrollo de Oyster, un convertidor de energía de las olas en aguas poco profundas. En Actas de la 7ª Conferencia Europea sobre Energía undimotriz y mareomotriz, Oporto, Portugal (págs. 11-14).
- Hansen, Rico H y Kramer, Morten M., "Modelado y control del prototipo Wavestar". En: Actas de la Conferencia europea sobre Energía undimotriz y mareomotriz de 2011 (2011)
- Hals, J., Faines, J. y Moan, T., "A Comparison of Selected Strategies for Adaptive Control of Wave Energy Converters ("Una comparación de estrategias seleccionadas para el control adaptativo de convertidores de energía undimotriz"). En: J. Offshore Mech. Arct. Eng. 133.3 (2011)

25 Para todos estos métodos, el enfoque utilizado es la planificación de la ganancia, o programación previa de las ganancias. Se calcula un conjunto de ganancias o parámetros óptimos (una ganancia para el comando P, dos ganancias para el comando PI) fuera de línea, analítica o digitalmente, para un conjunto de estados del mar, con el fin de completar cartografías (tablas) de ganancias en función del estado de la mar. Para los métodos descritos en estos documentos, la actualización de las ganancias PI siempre se realiza a partir de estimaciones promediadas, en ventanas temporales de varios minutos (por ejemplo, entre 10 y 30 minutos). Por tanto, estos métodos no permiten adaptar las ganancias «de ola a ola», es decir, a una frecuencia que es la del control en tiempo real (por ejemplo, comprendida entre 10 y 100 Hz, es decir un período de muestreo comprendido entre 10 y 100 ms). Así, el elevado tiempo de reacción de estos métodos no permite un control óptimo del sistema convertidor de energía undimotriz, por lo que la potencia recuperada no es óptima. Además, estos métodos no permiten optimizar la potencia producida por la máquina de conversión, porque no tienen en cuenta el rendimiento de la máquina de conversión.

30 Para paliar estos inconvenientes, la presente invención proporciona un procedimiento para controlar un sistema de energía undimotriz, en el que se estima la fuerza ejercida por el oleaje sobre el medio móvil del sistema convertidor de energía undimotriz, luego se determina al menos una frecuencia dominante de la fuerza ejercida por el oleaje sobre el medio móvil

mediante un filtro de Kalman sin perfume (del inglés «Unscented Kalman Filter» UKF), y se determina el control del sistema convertidor de energía undimotriz por una ley de control PI de ganancias variables, cuyos coeficientes son una función de la frecuencia dominante. El procedimiento de control según la invención permite adaptar los coeficientes (ganancias) de las acciones P, e I, de forma automática y continua, al estado actual del mar para maximizar la potencia recuperable con la estructura de control PI. Esto se realiza a través de una estimación en línea, por filtrado UKF (Unscented Kalman Filter), de la frecuencia dominante (o de las frecuencias dominantes) del espectro del oleaje.

El procedimiento según la invención

La invención se refiere a un procedimiento de control de un sistema convertidor de energía undimotriz que convierte la energía del oleaje en energía eléctrica o hidráulica, incluyendo dicho sistema convertidor de energía undimotriz al menos un medio móvil en conexión con una máquina de conversión de energía, y efectuando dicho medio móvil un movimiento oscilatorio con respecto a dicha máquina de conversión. Para este procedimiento se llevan a cabo las siguientes etapas:

- a) se miden la posición y/o la velocidad y/o la aceleración de dicho medio móvil;
- b) se estima la fuerza ejercida por el oleaje sobre dicho medio móvil mediante dicha medición de dicha posición y/o de dicha velocidad de dicho medio móvil;
- c) se determina al menos una frecuencia dominante de la fuerza ejercida por dicho oleaje sobre dicho medio móvil mediante un filtro de Kalman sin perfume;
- d) se determina un valor de control de dicha fuerza ejercida por dicha máquina de conversión sobre dicho medio móvil para maximizar la potencia generada por dicha máquina de conversión, por medio de una ley de control proporcional integral PI con ganancias variables, cuyos coeficientes se determinan por medio de dicha frecuencia dominante de dicha fuerza ejercida por dicho oleaje sobre dicho medio móvil; y
- e) se controla dicha máquina de conversión por medio de dicho valor de control.

Según un modo de realización, se determina el coeficiente de proporcionalidad Kp de dicha ley de control PI mediante una curva de resistencia de carga óptima a partir de dicha frecuencia dominante de dicha fuerza ejercida por dicho oleaje sobre dicho medio móvil.

Ventajosamente, se determina el coeficiente integral Ki de dicha ley de control PI mediante una curva de reactancia de carga óptima a partir de dicha frecuencia dominante de dicha fuerza ejercida por dicho oleaje sobre dicho medio móvil.

Ventajosamente, se determina dicha resistencia Rc de la carga óptima y dicha reactancia Xc de carga óptima resolviendo el siguiente problema de optimización:

$$\min_{R_c, X_c} \left\{ -\frac{R_c}{(X_c + X_i)^2 + (R_c + R_l)^2} \left(\eta_p - \frac{\eta_n - \eta_p}{\pi} \left(\frac{X_c}{R_c} - \arctan \left(\frac{X_c}{R_c} \right) \right) \right) \right\} \text{ con}$$

$$\begin{cases} R_l(\omega) = B_{pa}(\omega) \\ X_i(\omega) = \omega \left(M + M_{\infty} + M_{pa}(\omega) - \frac{K_{pa}}{\omega^2} \right) \end{cases}$$

ω la frecuencia de excitación, $B_{pa}(\omega)$ la resistencia a la radiación de dicho medio móvil, M la masa de dicho medio móvil, $M_{pa}(\omega)$ la masa añadida y M_{∞} masa añadida en el infinito de dicho medio móvil, K_{pa} la rigidez hidrostática de dicho medio móvil, η_p el rendimiento del motor de dicha máquina de conversión, y η_{pn} el rendimiento generador de dicha máquina de conversión.

Preferiblemente, dichas curvas de resistencia de carga óptima y/o de reactancia de carga óptima se determinan antes de la implementación de las etapas del procedimiento.

Según una implementación, se maximiza dicha potencia generada por dicha máquina de conversión teniendo en cuenta el rendimiento de dicha máquina de conversión.

Según una característica, dicha ley de control PI se escribe mediante una ecuación del tipo: $f_u(t) = K_p v(t) + K_i p(t)$ con $f_u(t)$ el control de la fuerza ejercida por dicha máquina de conversión sobre dicho medio móvil, $v(t)$ la velocidad de dicho móvil, $p(t)$ la posición de dicho medio móvil, K_p el coeficiente de proporcionalidad de dicha ley de control PI, y K_i el coeficiente integral de dicha ley de control PI.

Según un modo de realización, dicha ley de control es una ley de control proporcional integral derivada PID con ganancias variables.

Ventajosamente, dicha ley de control proporcional integral derivada PID se escribe en la forma: $f_u(t) = K_p v(t) + K_i p(t) + K_d a(t)$ con $f_u(t)$ el control de la fuerza ejercida por la máquina de conversión sobre dicho medio móvil, $v(t)$ la velocidad de dicho medio móvil, $p(t)$ la posición de dicho medio móvil, $a(t)$ la aceleración de dicho medio móvil, K_p el coeficiente de proporcionalidad de dicha ley de control PID, K_i el coeficiente integral de dicha ley de control PID, y K_d el coeficiente derivado de dicha ley de control PID.

Según una opción de realización, se determina la frecuencia dominante de dicha fuerza ejercida por dicho oleaje sobre dicho medio móvil por medio de un modelado de dicha fuerza ejercida por el oleaje sobre dicho medio móvil como una señal sinusoidal, o como la suma de dos señales sinusoidales.

Según una implementación de la invención, se estima la posición y/o la velocidad de dicho medio móvil utilizando un modelo dinámico que representa la evolución de la posición y de la velocidad del medio móvil.

Ventajosamente, dicho modelo dinámico comprende un modelo de la fuerza de radiación.

Preferiblemente, dicha máquina de conversión es una máquina eléctrica o una máquina hidráulica.

Breve presentación de las figuras

Otras características y ventajas del procedimiento según la invención aparecerán al leer la siguiente descripción de ejemplos no limitativos de realizaciones, con referencia a las figuras adjuntas y descritas a continuación.

La figura 1 ilustra las etapas del procedimiento según un modo de realización de la invención.

La figura 2 ilustra la determinación del valor de control según un modo de realización de la invención.

La figura 3 ilustra un modelo del sistema convertidor de energía undimotriz y su control.

La figura 4 ilustra un sistema convertidor de energía undimotriz según un ejemplo de realización.

La figura 5a ilustra una curva de resistencia de carga óptima para un primer ejemplo de aplicación.

La figura 5b ilustra una curva de reactancia de carga óptima para el primer ejemplo de aplicación.

La figura 6 ilustra un espectro de una de las olas irregulares para el primer ejemplo de aplicación.

La figura 7 ilustra una estimación de la frecuencia dominante de la fuerza de la ola mediante el procedimiento de control según la invención para el primer ejemplo de aplicación.

La figura 8 ilustra una estimación de la amplitud de la fuerza de la ola mediante el procedimiento de control según la invención para el primer ejemplo de aplicación.

La figura 9 ilustra una curva comparativa entre la energía recuperada por el procedimiento de control según la invención y por un procedimiento de control según la técnica anterior para el primer ejemplo de aplicación.

La figura 10 ilustra un espectro de una ola irregular para un segundo ejemplo de aplicación.

La figura 11 ilustra una curva comparativa entre la energía recuperada por el procedimiento de control según la invención y por un procedimiento de control según la técnica anterior para el segundo ejemplo de aplicación.

Descripción detallada de la invención

La invención se refiere a un procedimiento de control de un sistema convertidor de energía undimotriz que comprende al menos un medio móvil (por ejemplo, un flotador) que coopera con al menos una máquina de conversión de la energía (también llamada PTO del inglés «Power Take-Off»). El medio móvil realiza un movimiento oscilatorio con respecto a la máquina de conversión, bajo la acción de las olas (u oleaje) y de la máquina de conversión. La máquina de conversión convierte la energía mecánica del movimiento del medio móvil en energía eléctrica. Para ello, la máquina de conversión puede ser una máquina eléctrica simple o un dispositivo más complejo que incluye otras máquinas, como una máquina hidráulica. La máquina de conversión puede considerarse como el activador mediante el cual el sistema de control controla el funcionamiento del sistema de energía undimotriz.

Notaciones

En el curso de la descripción, se utilizan las siguientes notaciones:

f_u : fuerza ejercida por la máquina de conversión sobre el medio móvil,

- f_{ex} : fuerza ejercida por el oleaje sobre el medio móvil,
- p : posición del medio móvil con respecto a su punto de equilibrio.
- v : velocidad del medio móvil.
- a : aceleración del medio móvil.
- 5 ω : frecuencia de movimiento del medio móvil.
- M : masa del medio móvil.
- Z_{pa} : impedancia de radiación, se trata de un parámetro, función de la frecuencia y determinado experimentalmente o resultante del cálculo de los coeficientes hidrodinámicos del medio móvil, que permite dar cuenta del fenómeno de radiación, según el cual el movimiento del medio móvil en el agua crea una ola irradiada que lo amortigua (es decir que amortigua el movimiento)
- 10 - K_{pa} : coeficiente de rigidez hidrostática.
- B_{pa} : resistencia a la radiación, es decir, la parte real de la impedancia de radiación
- M_{pa} : masa añadida, se trata de un parámetro, función de la frecuencia y determinado experimentalmente, o resultante del cálculo de los coeficientes hidrodinámicos del medio móvil, que permite dar cuenta del fenómeno que aumenta la masa equivalente del medio móvil, a causa de las partículas de agua que son arrastradas por su movimiento
- 15 - M^∞ : masa añadida a una frecuencia infinitamente alta,
- P_a : potencia media generada por el sistema convertidor de energía undimotriz.
- t : tiempo continuo
- s : variable de Laplace
- 20 - k : tiempo discreto
- η : rendimiento de la conversión de la energía, con
 - η_p : rendimiento motor de la máquina de conversión, se trata de un dato del fabricante o de un dato determinado experimentalmente.
 - η_n : rendimiento generador de la máquina de conversión, se trata de dato del fabricante o de un dato determinado experimentalmente.
- 25 - Z_i : impedancia intrínseca del medio móvil del sistema convertidor de energía undimotriz, parámetro conocido, función de la frecuencia, resultante del modelado del medio móvil sobre la base de la teoría lineal de las olas, determinado a partir de los coeficientes hidrodinámicos del medio móvil y eventualmente de mediciones experimentales.
- R_i : resistencia intrínseca del medio móvil del sistema convertidor de energía undimotriz, es decir, la parte real de la impedancia intrínseca
- 30 - X_i : reactancia intrínseca del medio móvil del sistema convertidor de energía undimotriz, es decir, la parte imaginaria de la impedancia intrínseca
- K_p : coeficiente de proporcionalidad de la ley de control PI.
- K_i : coeficiente integral de la ley de control PI.
- 35 - K_d : coeficiente derivado de la ley de control PID.
- Z_c : impedancia de la ley de control (o de carga)
- R_c : resistencia de la ley de control (o de carga), con
 - R_c^0 resistencia óptima para un estado del mar dado
- X_c : reactancia de la ley de control, con
 - 40 ▪ X_c^0 resistencia óptima para un estado del mar dado

- A: amplitud del oleaje
- $\omega^{\wedge}_{ex}$: estimación de la frecuencia dominante de la ola
- f_{ex} : estimación de la fuerza ejercida por la ola sobre el dispositivo móvil
- T_s : periodo de muestreo

- 5
- ϕ : desfase de la señal
 - A_x : matriz del modelo de estado
 - C: matriz del modelo de estado
 - $v(k)$: ruido gaussiano con matriz de covarianza Q
 - $\mu(k)$: ruido gaussiano con matriz de covarianza R
- 10
- P_x : matriz de covarianza de $x(k)$

Para estas notaciones, los valores estimados generalmente se marcan con un acento circunflejo. El tiempo se denota t (variable continua) o k (variable discreta).

En la continuación de la descripción y para las reivindicaciones, los términos olas, flujos marinos y oleaje se consideran equivalentes.

- 15
- La invención se refiere a un procedimiento de control de un sistema convertidor de energía undimotriz. La figura 1 representa las diferentes etapas del procedimiento según la invención:

1. Medición o mediciones de la posición y/o de la velocidad del medio móvil (p, v)
2. Estimación de la fuerza ejercida por las olas (EST)
3. Determinación de la frecuencia dominante (UKF)
4. Determinación del valor de control (COEFF)
5. Control de la máquina de conversión (COM)

- 20
- Las etapas 1 a 5 se realizan en tiempo real, en un bucle en tiempo real. Sin embargo, según un modo de realización de la invención, la determinación del valor de control puede comprender un cálculo preliminar de curvas de resistencia y de reactancia de carga óptima.

- 25
- Ventajosamente, el procedimiento de control según la invención puede implementarse por medios informáticos, por ejemplo, un ordenador, o un procesador, en particular un procesador integrado.

Etapas 1) Medición o mediciones de la posición y/o la velocidad del medio móvil (p, v)

- 30
- Durante esta etapa, se miden la posición y/o la velocidad del medio móvil. La posición corresponde al movimiento (por ejemplo, distancia o ángulo) con respecto a la posición de equilibrio del medio móvil. Estas mediciones se pueden realizar mediante sensores, generalmente implementados en un sistema convertidor de energía undimotriz para su control y/o su supervisión.

Según una implementación de la invención, durante esta etapa, también es posible medir o estimar la aceleración del medio móvil, porque esta medición o estimación se puede utilizar en las siguientes etapas del procedimiento según la invención. Por ejemplo, la aceleración se puede medir mediante un acelerómetro colocado en el medio móvil.

Etapas 2) Estimación de la fuerza ejercida por el oleaje (EST)

- 40
- Para esta etapa, se estima en tiempo real la fuerza ejercida por el oleaje sobre el medio móvil. La estimación del oleaje se realiza a partir de las mediciones disponibles (posición y/o velocidad y/o aceleración) obtenidas en la etapa anterior. La estimación de la fuerza ejercida por el oleaje sobre el medio móvil se realiza en línea y en tiempo real, para poder realizar un control en tiempo real. Con el propósito de un control que tenga un tiempo de respuesta óptimo, se puede elegir un método de estimación rápida.

Para esta etapa del procedimiento, se puede considerar cualquier tipo de estimación de la fuerza ejercida por el oleaje sobre el medio móvil.

Según un modo de realización de la invención, la estimación de la fuerza ejercida por el oleaje sobre el medio móvil se puede implementar mediante un estimador basado en un modelo dinámico del sistema de energía undimotriz. En este caso, se puede construir un modelo dinámico del sistema de energía undimotriz. El modelo dinámico representa el comportamiento dinámico, traduciendo el movimiento de los elementos que constituyen el sistema de energía undimotriz bajo la acción del oleaje y bajo la acción del control de fuerza dado a la máquina de conversión. El modelo dinámico es un modelo que relaciona la velocidad del medio móvil con la fuerza ejercida por las olas sobre el medio móvil en el control de la fuerza dada a la máquina de conversión, que se traduce a su vez en una fuerza ejercida por dicha máquina de conversión sobre el medio móvil.

Según un modo de realización de la invención, el modelo dinámico se puede obtener aplicando el principio fundamental de la dinámica sobre el medio móvil del sistema convertidor de energía undimotriz. Para esta aplicación, se tiene en cuenta en particular la fuerza ejercida por el oleaje sobre el medio móvil y la fuerza ejercida por la máquina de conversión sobre el medio móvil.

Según una implementación de la invención, se puede considerar un sistema convertidor de energía undimotriz con una parte flotante (medio móvil) cuyo movimiento oscilante de traslación o rotación está restringido en una sola dimensión. Se puede entonces suponer que el movimiento de traslación o de rotación puede ser descrito por un modelo lineal en forma de estado que incluye la dinámica del flotador con su interacción con el oleaje y la dinámica del sistema de toma de potencia (PTO), o máquina de conversión, que constituye el activador del sistema.

En el resto de la descripción, solo se considera un movimiento unidireccional para el modelo dinámico. Sin embargo, el modelo dinámico se puede desarrollar para un movimiento multidireccional.

Según un ejemplo de realización, se puede estimar en tiempo real la fuerza ejercida por las olas sobre el medio móvil mediante la implementación de un procedimiento para determinar la fuerza de excitación ejercida por el oleaje incidente en un medio móvil de un sistema convertidor de energía undimotriz por medio de un modelo de la fuerza de radiación, tal como se describe en la solicitud de patente, cuyo número de registro es FR 16/53109. Como recordatorio, la fuerza de radiación es la fuerza aplicada sobre el medio móvil y generada por el propio movimiento del medio móvil, a diferencia de la fuerza de excitación del oleaje que se genera únicamente por el oleaje.

Etapas 3) Determinación de la frecuencia dominante

Durante esta etapa, se determina al menos una frecuencia dominante de la fuerza ejercida por el oleaje sobre el medio móvil (determinada en la etapa anterior). Se llama frecuencia dominante a la frecuencia correspondiente al pico (máximo) de su espectro. La frecuencia dominante se determina mediante un filtro de Kalman UKF sin perfume (del inglés «unscented Kalman filter» UKF). Un filtro UKF se basa en la teoría de transformación «sin perfume», que permite obtener un estimador para un sistema no lineal sin necesidad de linealizarlo previamente para la aplicación del filtro. El filtro UKF utiliza una distribución estadística del estado que se propaga a través de las ecuaciones no lineales. Dicho filtro tiene la ventaja de permitir estabilidad y, por tanto, robustez de la estimación.

Según un modo de realización de la invención, la fuerza de excitación de la ola se modela como una señal sinusoidal que varía en el tiempo:

$$f_{ex}(t) = A(t) \sin(\omega(t)t + \phi(t))$$

donde $A(t)$, $\omega(t)$ y $\phi(t)$ son respectivamente la amplitud, la frecuencia y el desfase de la señal. Se trata de una aproximación, porque esta fuerza no es en realidad una senoide con parámetros variables. En la teoría lineal de las olas, se modela más bien como una superposición de sinusoides con parámetros constantes.

Alternativamente, la fuerza de excitación de la ola puede ser modelada como la suma de dos señales sinusoidales que varían en el tiempo:

$$f_{ex}(t) = A_1(t) \sin(\omega_1(t) + \phi_1(t)) + A_2(t) \sin(\omega_2(t) + \phi_2(t))$$

Estos parámetros del modelado de la fuerza de excitación de la ola (variable en el tiempo) deben estimarse. Dado que entran de forma no lineal en la ecuación anterior, se trata de un problema de estimación no lineal.

El método del filtro de Kalman sin perfume (UKF, Unscented Kalman Filter en inglés) se utiliza para estimar $A(t)$, $\omega(t)$ y $\phi(t)$.

Cabe señalar que otros métodos de estimación no lineales podrían, en principio, ser utilizados para llevar a cabo esta etapa, tales como el filtro extendido de Kalman (EKF, Extended Kalman Filter) o el filtro de partículas (Particle Filter), pero el UKF da resultados particularmente buenos. El uso del filtro EKF en particular se ha mencionado en la bibliografía para este propósito. Sin embargo, al estar basado el filtro EKF en la linealización local de un modelo no lineal, no da las garantías de estabilidad, y por tanto de robustez, de la estimación dada por el UKF.

Para aplicar el UKF, primero se pone la ecuación que modela la fuerza de excitación en forma de estado y en tiempo discreto.

Sea T_s el período de muestreo en el que debe funcionar el filtro. La fuerza de excitación de la ola se estimará en el tiempo discreto $t = kT_s$, $k = 0, 1, 2, \dots$, que simplemente indicaremos por k .

5 Definiendo

$$\begin{cases} x_1(k) = A \sin(kT_s \omega + \phi), \\ x_2(k) = A \cos(kT_s \omega + \phi) \\ x_3(k) = \omega \end{cases}$$

y en la hipótesis de que $\omega(k)$ cambia lentamente con el tiempo (con respecto al período de muestreo), se puede obtener el modelo en forma de estado siguiente:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(T_s x_3(k-1)) & \sin(T_s x_3(k-1)) & 0 \\ -\sin(T_s x_3(k-1)) & \cos(T_s x_3(k-1)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k-1) \\ x_2(k-1) \\ x_3(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1(k-1) \\ v_2(k-1) \\ v_3(k-1) \end{bmatrix}, \\ f_{ex}(k) = [1 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \end{bmatrix} + \mu(k) \end{cases}$$

10 En este modelo, se han añadido incertidumbres para tener en cuenta los errores de modelado. Más particularmente, $v_1(k-1)$ y $v_2(k-1)$ sirven para paliar la naturaleza variable en el tiempo de $A(t)$, $\omega(t)$ y $\phi(t)$ que no se tiene en cuenta en la definición de los estados $x_1(k)$ y $x_2(k)$. $v_3(k-1)$ es una incertidumbre sobre el tercer estado (la frecuencia a estimar), que está naturalmente correlacionado con $v_1(k-1)$ y $v_2(k-1)$. $\mu(k)$ es una incertidumbre que se puede asimilar a un error de medición sobre $f_{ex}(k)$, que se utiliza para tener en cuenta el hecho de que $f_{ex}(k)$ no es exactamente una senoide.

15 Observando

$$\begin{aligned} x(k) &= [x_1(k) \quad x_2(k) \quad x_3(k)]^T, \\ v(k) &= [v_1(k) \quad v_2(k) \quad v_3(k)]^T, \\ y(k) &= f_{ex}(k) \end{aligned}$$

y

$$\begin{cases} A_x = \begin{bmatrix} \cos(T_s x_3(k-1)) & \sin(T_s x_3(k-1)) & 0 \\ -\sin(T_s x_3(k-1)) & \cos(T_s x_3(k-1)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ C = [1 \quad 0 \quad 0] \end{cases}$$

las ecuaciones del modelo de estado se escriben:

$$\begin{cases} x(k) = A_x x(k-1) + v(k), \\ y(k) = Cx(k) + \mu(k) \end{cases}$$

20

Se adoptan las siguientes hipótesis:

- el estado inicial $x(0)$ es un vector aleatorio de media $m(0) = E[x(0)]$ y covarianza $P(0) = E[(x(0) - m(0))(x(0) - m(0))^T]$;
- $v(k)$ y $\mu(k)$ son ruidos gaussianos con matrices de covarianza Q y R , respectivamente;

y las siguientes notaciones:

- 25
- $x(k|k-1)$ es la estimación de $x(k)$ a partir de las mediciones hasta el momento $k-1$, es decir, $y(k-1)$, $y(k-2)$, ...
 - $x(k|k)$ es la estimación de $x(k)$ a partir de las mediciones hasta el momento k , es decir, $y(k)$, $y(k-1)$, ...
 - $P_x(k|k-1)$ es la matriz de covarianza de $x(k)$ a partir de las mediciones hasta el momento $k-1$, es decir, $y(k-1)$, $y(k-2)$, ...

- $P_x(k|k)$ es la matriz de covarianza de $x(k)$ a partir de las mediciones hasta el momento k , es decir $y(k)$, $y(k-1)$, ...

Hay tres etapas en el método UKF:

1. Cálculo de los puntos sigma

- 5 En esta primera etapa, se calcula un conjunto de muestras en el espacio de estado, llamadas puntos sigma, que representan bien la distribución probabilística del estado según sus parámetros de media y covarianza.

Sean

$$W_0^m = \frac{\lambda}{n+\lambda},$$

$$W_0^c = \frac{\lambda}{n+\lambda} + (1 - \alpha^2 + \beta),$$

$$W_j^m = W_j^c = \frac{\lambda}{2(n+\lambda)}, j = 1, 2, \dots, 2n$$

- 10 donde $\lambda = (\alpha^2 - 1)n$ es un parámetro de puesta a escala, α es un parámetro que determina la difusión de los puntos sigma alrededor de $x(k-1|k-1)$ y al que se da en general un valor positivo pequeño, por ejemplo 10^{-3} , β es un parámetro utilizado para incorporar el conocimiento a priori de la distribución de x : para una distribución gaussiana, $\beta = 2$ es óptimo.

En el momento $k-1$, se considera la siguiente elección de puntos sigma (conjunto de puntos que codifican exactamente la información de media y varianza):

15
$$x_0(k-1) = x(k-1|k-1),$$

$$x_i(k-1) = x(k-1|k-1) + \sqrt{n+\lambda} S_i(k-1), i = 1, 2, \dots, n$$

$$x_{i+n}(k-1) = x(k-1|k-1) - \sqrt{n+\lambda} S_i(k-1), i = 1, 2, \dots, n$$

donde $S_i(k-1)$ es la i -ésima columna de la raíz cuadrada matricial de $P_x(k-1|k-1)$, es decir $P_x(k|k-1) = S(k-1)^T S(k-1)$

2. Actualización de las predicciones

- 20 Cada punto sigma se propaga a través del modelo no lineal que representa la evolución de los estados:

$$x_j(k|k-1) = A_x x_j(k-1), j = 0, 1, \dots, 2n$$

La media y la covarianza de $\hat{x}(k|k-1)$, la predicción de $x(k|k-1)$

$$\hat{x}(k|k-1) = \sum_{j=0}^{2n} W_j^m \hat{x}_j(k|k-1),$$

$$P_x(k|k-1) = \sum_{j=0}^{2n} W_j^c \left(\hat{x}_j(k|k-1) - \hat{x}(k|k-1) \right) \left(\hat{x}_j(k|k-1) - \hat{x}(k|k-1) \right)^T + Q.$$

- 25 Los estados predichos $\hat{x}_j(k|k-1)$ se utilizan en la ecuación de estado de salida, lo que da:

$$\hat{y}_j(k|k-1) = C \hat{x}_j(k|k-1)$$

La media y la covarianza de $\hat{y}(k|k-1)$ se calculan como

$$\hat{y}(k|k-1) = \sum_{j=0}^{2n} W_j^m \hat{y}_j(k|k-1),$$

$$P_y(k|k-1) = \sum_{j=0}^{2n} W_j^c \left(\hat{y}_j(k|k-1) - \hat{y}(k|k-1) \right) \left(\hat{y}_j(k|k-1) - \hat{y}(k|k-1) \right)^T + R$$

- 30 mientras que la covarianza cruzada entre $\hat{x}(k|k-1)$ e $\hat{y}(k|k-1)$ es:

$$P_{xy}(k|k-1) = \sum_{j=0}^{2n} W_j^c \left(\hat{x}_j(k|k-1) - x(k|k-1) \right) \left(\hat{y}_j(k|k-1) - y(k|k-1) \right)^T$$

3. Actualización a partir de las mediciones

Como en el filtro de Kalman, la estimación del estado final se obtiene corrigiendo la predicción con retroacción sobre el error de predicción en la salida (medida):

$$\hat{x}(k) = \hat{x}(k|k-1) + K(\hat{y}(k) - \hat{y}(k|k-1))$$

donde la ganancia K viene dada por

$$K = P_{xy}(k|k-1)P_y(k|k-1)^{-1}$$

La covarianza a posteriori de la estimación se actualiza con la siguiente fórmula:

$$P_x(k|k) = P_x(k|k-1) - KP_y(k|k-1)K^T$$

10 Etapas 4) Determinación del valor de control

Durante esta etapa, se determina el valor de control de la fuerza ejercida por la máquina de conversión sobre el medio móvil para maximizar la potencia generada por la máquina de conversión. Esta determinación se realiza mediante una ley de control proporcional integral con ganancias variables, cuyos coeficientes (las ganancias variables) se determinan en función de la frecuencia dominante de la fuerza ejercida por el oleaje sobre el medio móvil.

15 Según una implementación de la invención, la ley de control puede ser una ley de control del tipo proporcional integral derivada con ganancias variables.

De acuerdo a un modo de realización, se puede escribir un modelo dinámico de fuerza-velocidad de este tipo de sistema convertidor de energía undimotriz en forma frecuencial:

$$\left(j\omega M + Z_{pa}(j\omega) + \frac{K_{pa}}{j\omega} \right) v(j\omega) = f_{ex}(j\omega) - f_u(j\omega)$$

20 donde:

- $v(j\omega)$ es la velocidad del medio móvil;
- $f_{ex}(j\omega)$ y $f_u(j\omega)$ son la fuerza de excitación de la ola incidente y la fuerza aplicada por la máquina de conversión al medio móvil, respectivamente;
- M es la masa del medio móvil (flotador, por ejemplo) y de todas las demás partes del sistema convertidor de energía undimotriz solidarias de este medio móvil;
- $Z_{pa}(j\omega)$ es la impedancia de radiación;
- K_{pa} es la rigidez hidrostática.

30 Este modelo proviene de la ecuación integral-diferencial de Cummins, y sus coeficientes K_{pa} y $Z_{pa}(j\omega)$ (y los resultantes de su descomposición, a continuación) se pueden calcular utilizando códigos hidrodinámicos basados en el método de los elementos frontera (BEM), tales como WAMIT, Diodore o NEMOH. La impedancia de radiación $Z_{pa}(j\omega)$, que en la teoría lineal de las olas describe el efecto del movimiento libre del flotador en el agua, es el resultado de una aproximación de la respuesta de impulso de radiación por un filtro de respuesta de impulso infinito. Se puede descomponer de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} Z_{pa}(j\omega) &= B_{pa}(j\omega) + j\omega(M_{pa}(j\omega) + M_{\infty}) \\ &= H_{pa}(j\omega) + j\omega M_{\infty} \end{aligned}$$

35 donde $B_{pa}(j\omega)$ es la resistencia de radiación, $M_{pa}(j\omega)$ es la masa añadida después de que la singularidad en el infinito M_{∞} ha sido retirada y $H_{pa}(j\omega) = B_{pa}(j\omega) + j\omega M_{pa}(j\omega)$.

La velocidad del flotador, dependiendo de las fuerzas que se le apliquen, se puede reescribir:

$$v(j\omega) = \frac{1}{Z_i(j\omega)} (f_{ex}(j\omega) - f_u(j\omega))$$

donde la impedancia intrínseca $Z_i(j\omega)$ se define como

$$\begin{aligned} Z_i(j\omega) &= B_{pa}(\omega) + j\omega \left(M + M_\infty + M_{pa}(\omega) - \frac{K_{pa}}{\omega^2} \right) \\ &= R_i(\omega) + jX_i(\omega) \end{aligned}$$

donde

$$\begin{cases} R_i(\omega) = B_{pa}(\omega) \\ X_i(\omega) = \omega \left(M + M_\infty + M_{pa}(\omega) - \frac{K_{pa}}{\omega^2} \right) \end{cases}$$

son respectivamente la resistencia y la reactancia (parte real y parte imaginaria de la impedancia) intrínsecas del sistema.

Durante esta etapa, se puede buscar optimizar las prestaciones de la ley de control, en términos de maximización de la potencia eléctrica producida en promedio P_a :

$$P_a = \frac{1}{T} \int_{t=0}^T \eta f_u(t) v(t) dt$$

donde η es un coeficiente que representa el rendimiento de la máquina de conversión. Si $\eta = 1$, se considera la máquina de conversión perfecta, sin pérdidas de conversión de energía. Aunque esta hipótesis sea poco realista, se suele adoptar en la bibliografía porque simplifica mucho los cálculos, en este caso los de los parámetros óptimos de una ley de control de tipo PI. Pero corresponde considerar que tomar de la potencia de la red por la máquina de conversión tiene el mismo coste que entregar desde ella, lo que es generalmente falso y puede conducir a la obtención de una producción de energía eléctrica mucho menor que lo que se espera, o incluso una pérdida de energía de la red (P_a negativa).

Según una implementación, el rendimiento η se puede considerar como una función de la potencia instantánea $f_u v$, definido como sigue

$$\eta(f_u v) = \begin{cases} \eta_p & \text{si } f_u v \geq 0 \\ \eta_n & \text{si } f_u v < 0 \end{cases}$$

donde los coeficientes $0 < \eta_p \leq 1$ y $\eta_n \geq 1$ dependen de la máquina de conversión e incluso pueden ser una función de $f_u v$.

Esta etapa consiste en una ley de control PI para el control hidrodinámico de un sistema convertidor de energía undimotriz:

$$f_u(t) = K_p v(t) + K_i p(t) = K_p v(t) + K_i \int_0^T v(\tau) d\tau$$

es decir, en el dominio de Laplace:

$$f_u(s) = K_p v(s) + \frac{K_i}{s} v(s), \quad s = \sigma + j\omega$$

cuyos parámetros K_p y K_i son adaptados de forma continua, es decir, en línea y en tiempo real, de acuerdo con la frecuencia dominante estimada de la fuerza de excitación de la ola, a fin de garantizar que la energía eléctrica producida se maximiza para esta frecuencia.

Alternativamente, la ley de control es una ley PID, que se puede escribir para el control de un sistema convertidor de energía undimotriz:

$$f_u(t) = K_p v(t) + K_i p(t) + K_d a(t)$$

La maximización de la potencia eléctrica producida se realiza sobre la base de una expresión analítica (original) que enlaza, frecuencia por frecuencia, esta potencia a la parte real (resistencia) y a la parte imaginaria (reactancia) de la impedancia realizada por la ley de control, en la hipótesis de que la fuerza aplicada por la máquina de conversión es una retroacción lineal sobre la velocidad del medio móvil del sistema convertidor de energía undimotriz (véase la figura 3):

$$f_u(s) = Z_c(s)v(s)$$

Habiendo observado

$$\begin{cases} R_c = \text{Re}\{Z_c\} \\ X_c = \text{Im}\{Z_c\} \end{cases}$$

- 5 la resistencia y la reactancia de la impedancia de la ley de control (o de carga) a una frecuencia dada (la frecuencia dominante de la fuerza de excitación de la ola), la expresión analítica de la potencia eléctrica a esta frecuencia es:

$$P_a = \frac{A^2 R_c}{2((X_c + X_i)^2 + (R_c + R_i)^2)} \left(\eta_p - \frac{\eta_n - \eta_p}{\pi} \left(\frac{X_c}{R_c} - \arctan\left(\frac{X_c}{R_c}\right) \right) \right)$$

- 10 donde R_i y X_i se calculan a la frecuencia en cuestión a partir del modelo del sistema convertidor de energía undimotriz, el parámetro A se puede derivar de la estimación de la fuerza de la ola (pero, como se muestra a continuación, no es necesario calcularlo) y R_c y X_c hay que determinarlos para esta misma frecuencia resolviendo el siguiente problema de optimización

$$\min_{R_c, X_c} \left\{ -\frac{R_c}{(X_c + X_i)^2 + (R_c + R_i)^2} \left(\eta_p - \frac{\eta_n - \eta_p}{\pi} \left(\frac{X_c}{R_c} - \arctan\left(\frac{X_c}{R_c}\right) \right) \right) \right\}$$

que corresponde a maximizar la potencia definida anteriormente. Se observa que el parámetro A se puede omitir porque no influye en la solución óptima.

- 15 Dado que este problema de optimización no es lineal, no tiene una solución analítica cerrada, pero se puede resolver numéricamente. Fuera de línea, los parámetros R_c , X_c por tanto, se pueden calcular numéricamente para cada frecuencia en el intervalo de interés, a fin de obtener curvas que las conecten con la frecuencia dominante de la fuerza de la ola. Estas curvas se consultan en línea para obtener los parámetros óptimos R_c^0 , X_c^0 a partir de ω_{ex} , la estimación de la frecuencia dominante de la ola.

Las ganancias óptimas de la ley de control PI se calculan entonces como

$$\begin{cases} K_p^0 = R_c^0 \\ K_i^0 = -\hat{\omega}_{ex} X_c^0 \end{cases}$$

- 25 La etapa de control propuesta se muestra esquemáticamente de manera no limitativa en la figura 2. A la entrada de esta etapa de determinación del valor de control, se tiene la estimación de la frecuencia dominante de la fuerza de excitación del oleaje ω_{ex} así como las medidas de la velocidad $v(t)$ y de la posición $p(t)$ del medio móvil. Mediante una curva C1, que es una curva de resistencia de carga óptima que se puede obtener fuera de línea, y de la frecuencia dominante de la fuerza de excitación del oleaje ω_{ex} , se determina la resistencia de carga óptima R_c^0 que corresponde al coeficiente proporcional PI K_p^0 de la ley de control. En paralelo, mediante una curva C2, que es una curva de reactancia de carga óptima obtenible fuera de línea, y de la frecuencia dominante de la fuerza de excitación del oleaje ω_{ex} , se determina la reactancia de carga óptima X_c^0 . El coeficiente integral K_i^0 de la ley de control PI se obtiene multiplicando la reactancia de carga óptima X_c^0 por la frecuencia dominante de la fuerza de excitación del oleaje ω_{ex} . Luego, la ley de control $f_u(t)$ se obtiene sumando la multiplicación del coeficiente proporcional K_p^0 por la velocidad $v(t)$ con la multiplicación del coeficiente integral K_i^0 por la posición $p(t)$.

- 35 Alternativamente, se puede realizar previamente y fuera de línea del procedimiento, la construcción de curvas de los coeficientes K_i y K_p óptimos en función de la frecuencia dominante de la fuerza del oleaje, luego, en línea, se determinan los coeficientes K_i y K_p a partir de estas curvas y de la frecuencia dominante ejercida por la fuerza del oleaje. Así, la ley de control está completamente definida.

Según el modo de realización para el que la ley de control es una ley de control PID, el coeficiente variable K_d de la ley de control se puede obtener utilizando la estimación de una segunda frecuencia dominante (por ejemplo, con el modelado del oleaje con dos sinusoides).

Etapa 5) Control de la máquina de conversión

- 40 Durante esta etapa, la máquina de conversión se controla en función del valor determinado durante la etapa anterior. Para ello, se acciona la máquina de conversión (máquina eléctrica o hidráulica) para que reproduzca el nuevo valor de la fuerza f_u tal como se ha determinado en la etapa 4.

Por ejemplo, se aplica al sistema de control de la máquina eléctrica la nueva expresión del control de la fuerza u que permite obtener una fuerza f_u ejercida por la máquina de conversión sobre el medio móvil. El control de la máquina eléctrica para que aplique la fuerza f_u correspondiente, a la dinámica de la máquina aproximada, al control u solicitado, se realiza modificando, si es necesario, la corriente eléctrica aplicada a la máquina eléctrica. Más detalladamente, para proporcionar un par o fuerza que impulsa el medio móvil, se aplica una corriente proporcionando una potencia eléctrica. En cambio, para producir un par o fuerza que resista el movimiento del medio móvil, se aplica una corriente recuperando una potencia eléctrica.

Un ejemplo no limitativo de un sistema convertidor de energía undimotriz es una boya oscilante tal como se muestra en la figura 4. Este sistema de energía undimotriz comprende una boya 2 como medio móvil de masa m , una máquina de conversión 1 con su ley de control, cuya acción f_{PTO} puede ser representada por un amortiguamiento d y una elasticidad k . La boya es sometida a un movimiento oscilatorio por las olas 3 y por la fuerza f_{PTO} aplicada por la máquina de conversión. La máquina de conversión 1 puede ser una máquina eléctrica conectada a una red eléctrica 4.

Ejemplo de aplicación

Las características y ventajas del procedimiento según la invención aparecerán más claramente al leer el siguiente ejemplo de aplicación.

Para este ejemplo, se considera un flotador como se describe en la figura 4, y cuya dinámica fuerza-velocidad (respuesta de velocidad a la suma de las fuerzas aplicadas al flotador) viene dada por la función de transferencia siguiente:

$$Z_i(s) = \frac{s^6 + 208.6s^5 + 8.583 \cdot 10^4 s^4 + 8.899 \cdot 10^6 s^3 + 1.074 \cdot 10^8 s^2 + 7.031 \cdot 10^8 s}{1.44s^7 + 300.4s^6 + 1.237 \cdot 10^5 s^5 + 1.284 \cdot 10^7 s^4 + 1.652 \cdot 10^8 s^3 + 2.106 \cdot 10^9 s^2 + 9.988 \cdot 10^9 s + 6.539 \cdot 10^{10}}$$

La función de transferencia describe la dinámica de un prototipo a pequeña escala (1:20) sobre el que se ha aplicado el procedimiento.

Los parámetros de rendimiento de la máquina de conversión tenidos en cuenta son: $\eta_p = \eta_n = 0,7$. Con estos parámetros y la función de transferencia $Z_i(s)$ anterior, se puede resolver el siguiente problema de optimización:

$$\min_{R_c, X_c} \left\{ -\frac{R_c}{(X_c + X_i)^2 + (R_c + R_i)^2} \left(\eta_p - \frac{\eta_n - \eta_p}{\pi} \left(\frac{X_c}{R_c} - \arctan \left(\frac{X_c}{R_c} \right) \right) \right) \right\}, \quad R_c \geq 0$$

Se obtienen las dos curvas óptimas de resistencia y reactancia de carga de las figuras 5a y 5b, que se utilizan en el cálculo en línea de los parámetros de la ley de control PI.

La figura 5a ilustra, en función de la frecuencia ω , la resistencia óptima R_0 resultante de la optimización anterior. En esta curva se representa en líneas de puntos, la resistencia intrínseca R_i y en línea continua la resistencia óptima R_0 .

La figura 5b ilustra, en función de la frecuencia ω , la reactancia óptima X_0 resultante de la optimización anterior. En esta curva se representa en líneas de puntos la reactancia intrínseca X_i y en línea continua la reactancia óptima X_0 .

Para validar el procedimiento propuesto, el sistema convertidor de energía undimotriz, pilotado por el procedimiento de control PI adaptativo según la invención, se sometió a una serie de olas de prueba irregulares. El espectro S ($\text{Nm}^2\text{s/rad}$) de una de estas olas, de poco más de 1000 s de longitud y con una frecuencia dominante de alrededor de 5 rad/s, se muestra en la figura 6.

El buen rendimiento de la etapa de la estimación en línea de la frecuencia dominante de la fuerza de la ola w (rad/s) en función del tiempo $t(s)$ por el procedimiento de control según la invención se muestra en la figura 7.

La figura 8 ilustra la amplitud A de la ola w y la amplitud estimada A_{est} (en trazo oscuro) por el procedimiento de control según la invención. Esta figura muestra que el algoritmo UKF utilizado en el procedimiento de control según la invención para estimar los parámetros del modelo sinusoidal con parámetros variables de la fuerza de excitación de la ola es capaz de gestionar las transiciones fuertes (por ejemplo, hacia $t=1040$ s en la figura) al tiempo que permite obtener estimaciones estables de la amplitud $A(t)$ y de la frecuencia dominante $\omega(t)$, gracias a su robustez respecto a las no linealidades. Otros enfoques de estimación, y en particular el EKF, no serían capaces de un rendimiento parecido.

La figura 9 ilustra la energía recuperada por el control PI adaptativo según la invención INV, y por un control de PI no adaptativo según la técnica anterior AA. Se trata de la energía recuperada por el control PI según la invención o según la técnica anterior con parámetros fijos en una ola irregular. Así, esta curva compara los rendimientos en recuperación de energía en la misma onda de la ley de control PI adaptativo según la invención y de un PI con parámetros fijos optimizados

a partir de las características del espectro de estado del mar, de acuerdo con un estado de la técnica. Se observa que la ley de control PI según la invención incluso permite recuperar más energía que en una situación en la que deberían bastar parámetros fijos según la técnica anterior.

- 5 Se realizó una segunda prueba con una ola irregular cuya frecuencia dominante varía linealmente entre la frecuencia de la primera ola probada (5 rad/s) y la de una ola de frecuencia 1,8 rad/s. La figura 10 representa el espectro S ($\text{Nm}^2\text{s/rad}$) de la ola irregular en función de la frecuencia w (rad).

La figura 11 es una curva similar a la curva de la figura 9 para la ola irregular cuyo espectro se muestra en la figura 10. Como se muestra en la figura 11, el procedimiento según la invención INV permite en este caso recuperar mucha más energía que un control PI con parámetros fijos calibrados en el primer espectro, según una técnica anterior.

- 10 En consecuencia, el procedimiento de control según la invención permite un control en línea que optimiza la energía recuperada.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de control de un sistema convertidor de energía undimotriz que convierte la energía del oleaje en energía eléctrica o hidráulica, incluyendo dicho sistema convertidor de energía undimotriz al menos un medio móvil en conexión con una máquina de conversión de la energía, y efectuando dicho medio móvil un movimiento oscilatorio con respecto a dicha máquina de conversión, caracterizado por que se llevan a cabo las siguientes etapas:

- a) se miden la posición y/o la velocidad y/o la aceleración de dicho medio móvil;
- b) se estima la fuerza ejercida por el oleaje sobre dicho medio móvil mediante dicha medición de dicha posición y/o de dicha velocidad de dicho medio móvil;
- c) se determina al menos una frecuencia dominante de la fuerza ejercida por dicho oleaje sobre dicho medio móvil mediante un filtro Kalman sin perfume;
- d) se determina un valor de control de dicha fuerza ejercida por dicha máquina de conversión sobre dicho medio móvil para maximizar la potencia generada por dicha máquina de conversión, por medio de una ley de control proporcional integral PI con ganancias variables, cuyos coeficientes se determinan por medio de dicha frecuencia dominante de dicha fuerza ejercida por dicho oleaje sobre dicho medio móvil; y
- e) se controla dicha máquina de conversión por medio de dicho valor de control.

2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que se determina el coeficiente de proporcionalidad K_p de dicha ley de control PI mediante una curva de resistencia de carga óptima a partir de dicha frecuencia dominante de dicha fuerza ejercida por dicho oleaje sobre dicho medio móvil.

3. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que se determina el coeficiente integral K_i de dicha ley de control PI mediante una curva de reactancia de carga óptima a partir de dicha frecuencia dominante de dicha fuerza ejercida por dicho oleaje sobre dicho medio móvil.

4. Procedimiento según las reivindicaciones 2 y 3, en el que se determina dicha resistencia R_c de carga óptima y dicha reactancia X_c de carga óptima X_c resolviendo el siguiente problema de optimización:

$$\min_{R_c, X_c} \left\{ -\frac{R_c}{(X_c + X_i)^2 + (R_c + R_i)^2} \left(\eta_p - \frac{\eta_n - \eta_p}{\pi} \left(\frac{X_c}{R_c} - \arctan \left(\frac{X_c}{R_c} \right) \right) \right) \right\}$$

con

$$\begin{cases} R_i(\omega) = B_{pa}(\omega) \\ X_i(\omega) = \omega \left(M + M_\infty + M_{pa}(\omega) - \frac{K_{pa}}{\omega^2} \right) \end{cases}$$

ω la frecuencia de excitación, $B_{pa}(\omega)$ la resistencia a la radiación de dicho medio móvil, M la masa de dicho medio móvil, $M_{pa}(\omega)$ la masa añadida y M_∞ masa añadida en el infinito de dicho medio móvil, K_{pa} la rigidez hidrostática de dicho medio móvil, η_p el rendimiento del motor de dicha máquina de conversión, y η_n el rendimiento generador de dicha máquina de conversión.

5. Procedimiento según una de las reivindicaciones 2 a 4, en el que dichas curvas de resistencia de carga óptima y/o reactancia de carga óptima son determinadas antes de la implementación de las etapas del procedimiento.

6. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que dicha potencia generada por dicha máquina de conversión se maximiza teniendo en cuenta el rendimiento de dicha máquina de conversión.

7. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que dicha ley de control PI se escribe mediante una ecuación del tipo:

$f_u(t) = K_p v(t) + K_i p(t)$ con $f_u(t)$ el control de la fuerza ejercida por dicha máquina de conversión sobre dicho medio móvil, $v(t)$ la velocidad de dicho medio móvil, $p(t)$ la posición de dicho medio móvil, K_p el coeficiente de proporcionalidad de dicha ley de control PI, y K_i el coeficiente integral de dicha ley de control PI.

8. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 6, en el que dicha ley de control es una ley de control proporcional integral derivado PIT con ganancias variables.

9. Procedimiento según la reivindicación 8, en el que dicha ley de control proporcional integral derivado se escribe en la forma:

$f_u(t) = K_p v(t) + K_i p(t) + K_d a(t)$, con $f_u(t)$ el control de la fuerza ejercida por la máquina de conversión sobre dicho medio móvil, $v(t)$ la velocidad de dicho medio móvil, $p(t)$ la posición de dicho medio móvil, $a(t)$ la aceleración de dicho medio móvil, K_p el coeficiente de proporcionalidad de dicha ley de control PID, K_i el coeficiente integral de dicha ley de control PID y K_d el coeficiente derivado de dicha ley de control PID.

10. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que se determina la frecuencia dominante de dicha fuerza ejercida por dicho oleaje sobre dicho medio móvil mediante un modelado de dicha fuerza ejercida por el oleaje sobre dicho medio móvil como una señal sinusoidal, o como la suma de dos señales sinusoidales.

11. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que se estima la posición y/o la velocidad de dicho medio móvil utilizando un modelo dinámico que representa la evolución de la posición y de la velocidad del medio móvil.

12. Procedimiento según la reivindicación 11, en el que dicho modelo dinámico incluye un modelo de la fuerza de radiación.

13. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que dicha máquina de conversión es una máquina eléctrica o una máquina hidráulica.

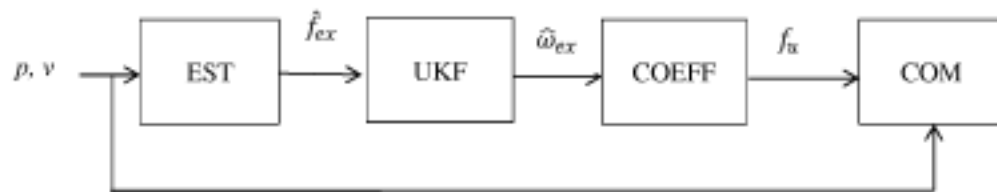


Figura 1

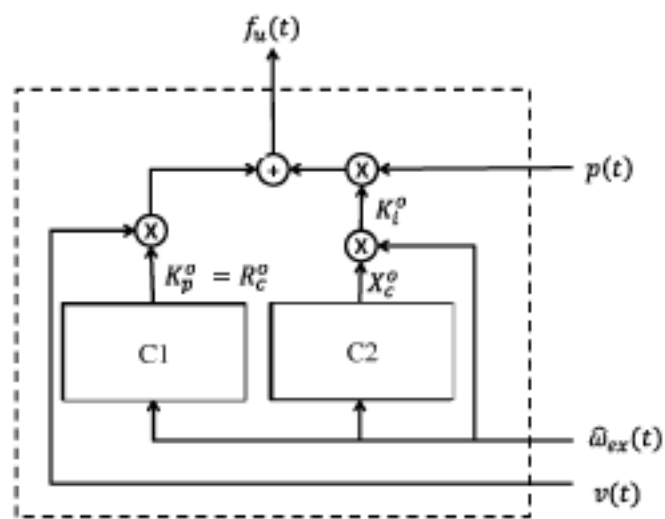


Figura 2

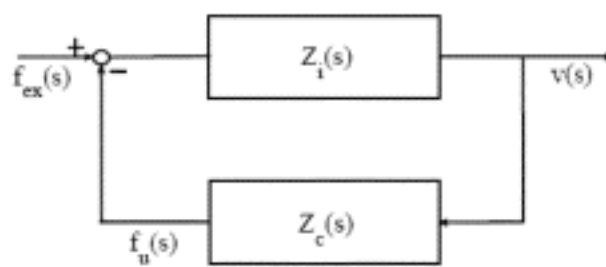


Figura 3

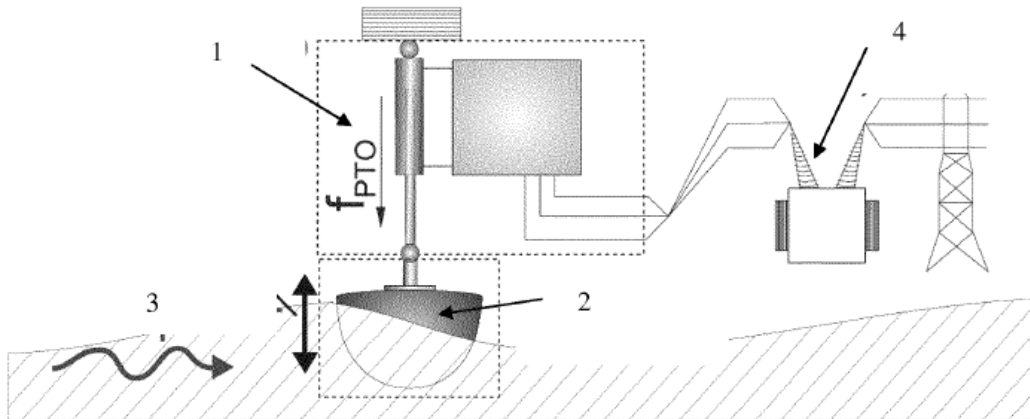


Figura 4

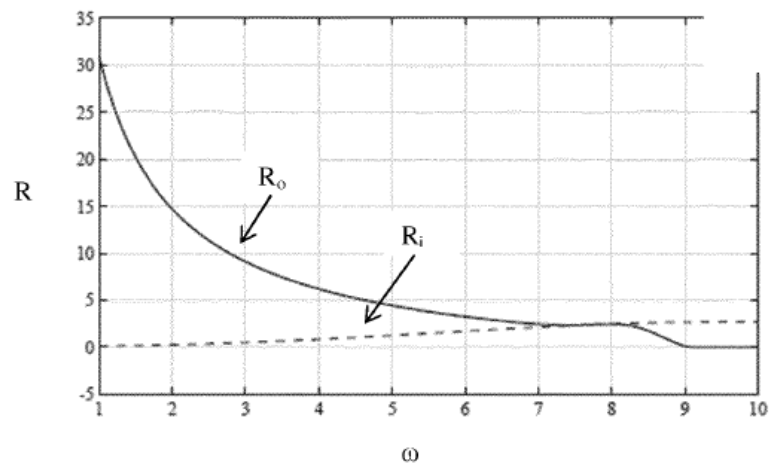


Figura 5a

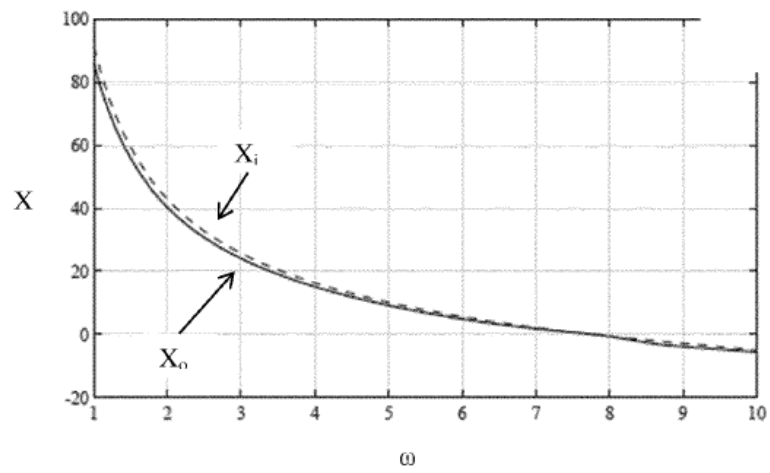


Figura 5b

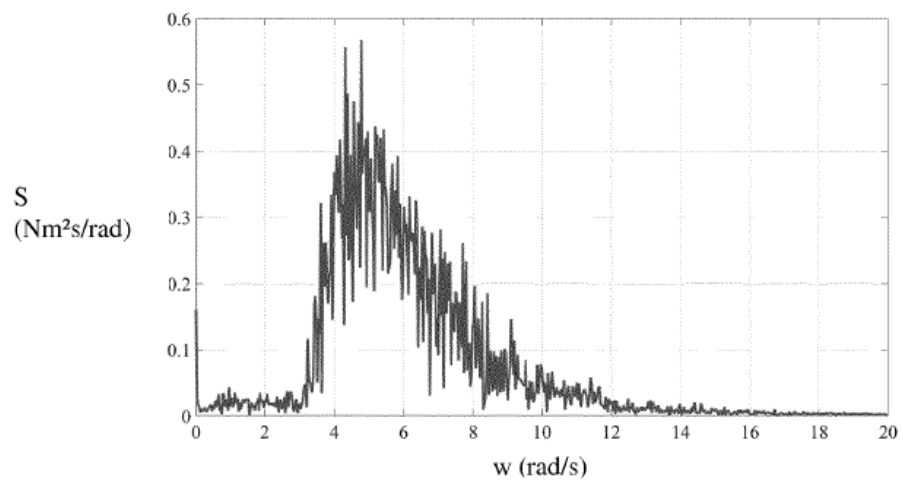


Figura 6

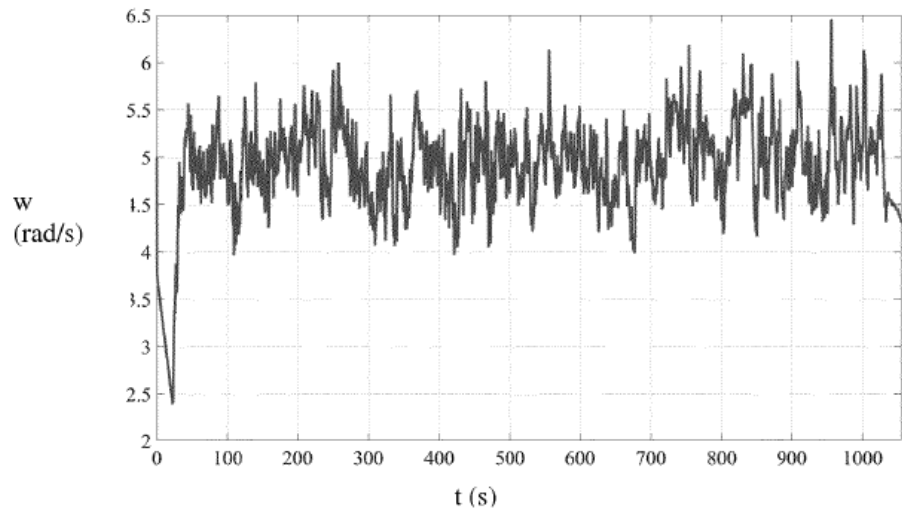


Figura 7

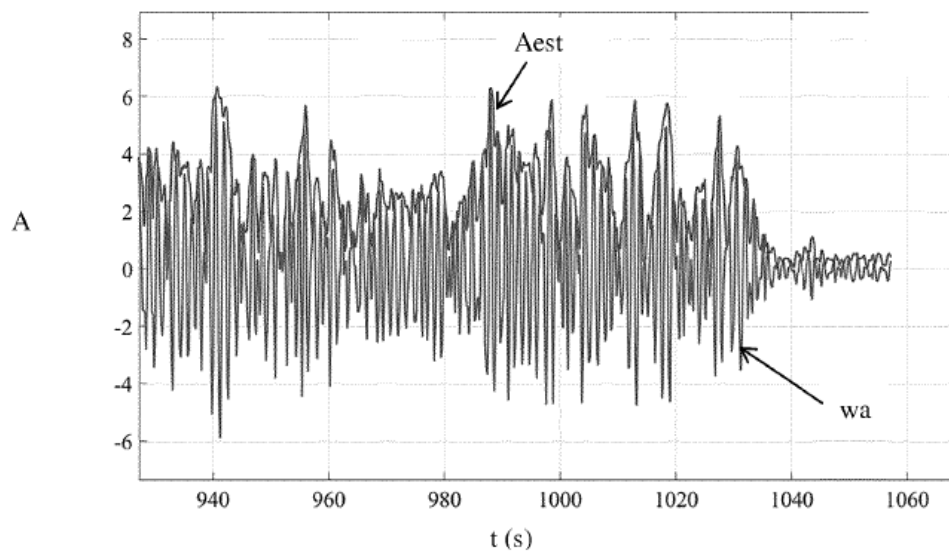


Figura 8

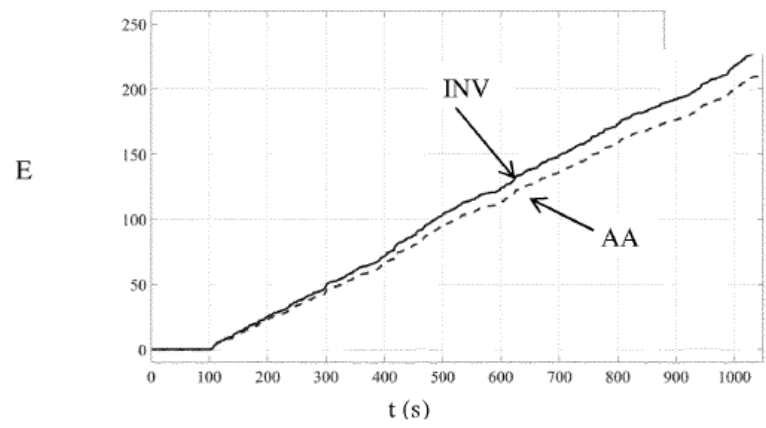


Figura 9

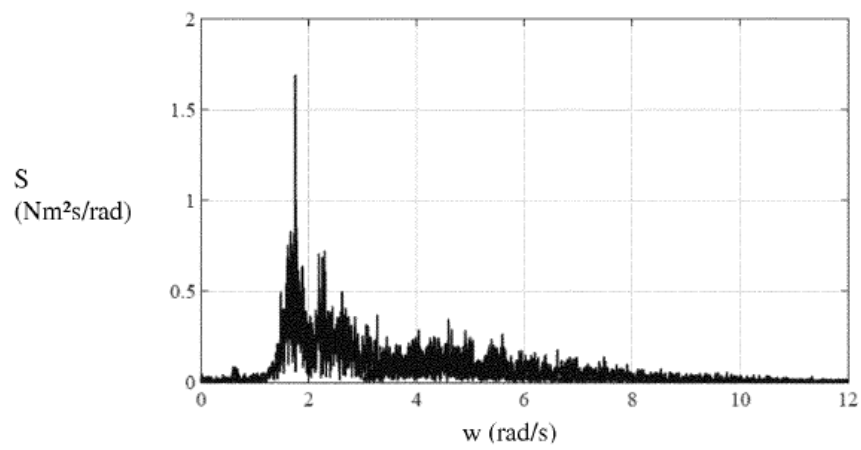


Figura 10

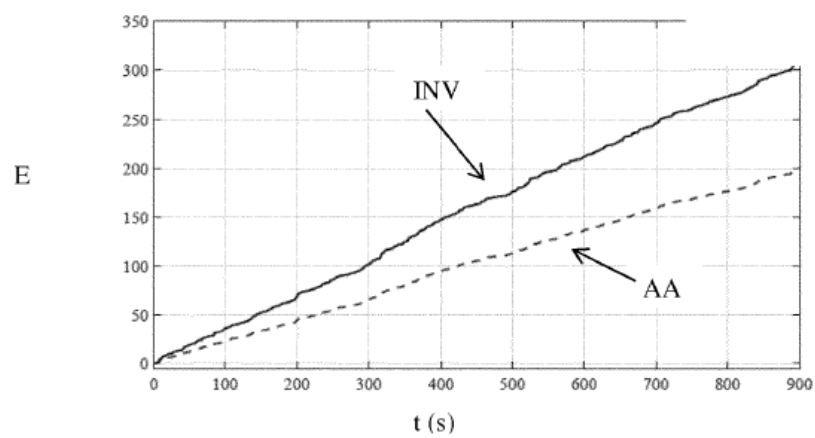


Figura 11