

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 806 152**

51 Int. Cl.:

**F03D 7/04** (2006.01)

**F03D 7/02** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **04.09.2013 PCT/FR2013/052040**

87 Fecha y número de publicación internacional: **10.04.2014 WO14053718**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **04.09.2013 E 13774723 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **22.04.2020 EP 2904265**

54 Título: **Procedimiento para controlar una turbina eólica por medio de una estimación de la velocidad del viento incidente**

30 Prioridad:

**01.10.2012 FR 1202601**

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

**16.02.2021**

73 Titular/es:

**IFP ENERGIES NOUVELLES (100.0%)  
1 & 4 avenue de Bois-Préau  
92500 Rueil-Malmaison, FR**

72 Inventor/es:

**CHAUVIN, JONATHAN y  
HAFIDI-RAMI YAHYAOU, GHIZLANE**

74 Agente/Representante:

**ISERN JARA, Jorge**

ES 2 806 152 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 para controlar una turbina eólica por medio de una estimación de la velocidad del viento incidente

5 La presente invención se refiere al campo de las energías renovables y más particularmente al control de las turbinas eólicas.

Una turbina eólica permite transformar la energía cinética del viento en energía eléctrica o mecánica. Para la conversión del viento en energía eléctrica, esta se compone de los siguientes elementos:

- 10
- un mástil que permite colocar un rotor a una altura suficiente para permitir su movimiento (necesario para las turbinas eólicas con eje horizontal) o colocar ese rotor a una altura que le permita ser accionado por un viento más fuerte y regular que a nivel del suelo. El mástil cobija generalmente una parte de los componentes eléctricos y electrónicos (modulador, control, multiplicador, generador, ...);
  - 15 - una góndola montada en la cúspide del mástil, que cobija componentes mecánicos, neumáticos, ciertos componentes eléctricos y electrónicos, necesarios para el funcionamiento de la máquina. La góndola puede girar para orientar la máquina en la dirección correcta;
  - un rotor, fijado a la góndola, que comprende varias palas (en general tres) y la caperuza de la hélice de la turbina eólica. El rotor es accionado por la energía del viento, está conectado por un árbol mecánico directa o indirectamente (a través de un sistema de caja de engranajes y de árbol mecánico) a una máquina eléctrica (generador eléctrico...) que convierte la energía recibida en energía eléctrica;
  - 20 - una transmisión, compuesta por dos ejes (árbol mecánico del rotor y árbol mecánico de la máquina eléctrica) conectados por una transmisión (caja de engranajes).

25 Desde principios de los años 1990, la energía eólica ha conocido un aumento de interés, en particular en la Unión Europea donde la tasa de crecimiento anual es de aproximadamente un 20 %. Este crecimiento se atribuye a la posibilidad inherente de producción de electricidad sin emisiones de carbono. Para sostener este crecimiento, el rendimiento de las turbinas eólicas debe seguir mejorando. La perspectiva de aumento de producción de energía turbina eólica necesita el desarrollo de herramientas de producción eficaces, y de herramientas de control avanzado para mejorar las prestaciones de las máquinas. Las turbinas eólicas están diseñadas para producir electricidad a un precio tan bajo como sea posible. Por consiguiente, las turbinas eólicas están construidas en general para alcanzar su rendimiento máximo para una velocidad del viento de aproximadamente 15 m/s. de hecho, es inútil diseñar turbinas eólicas que maximicen su rendimiento a velocidades del viento más elevadas, siendo estas poco frecuentes. En caso de velocidades del viento superiores a 15 m/s, es necesario perder una parte de la energía suplementaria contenida en el viento para evitar cualquier daño de la turbina eólica. Todas las turbinas eólicas están, por lo tanto, diseñadas con un sistema de regulación de la potencia.

40 Para esta regulación de la potencia, están diseñados controladores para aerogeneradores con velocidad variable, véase, por ejemplo, el documento US 5.155.375. Los objetivos de los controladores son maximizar la potencia eléctrica recuperada, minimizar las fluctuaciones de velocidad del rotor y minimizar la fatiga y los momentos extremos de la estructura (palas, mástil y plataforma).

45 Controladores lineales se han utilizado ampliamente para la regulación de potencia por el control del ángulo de inclinación de las palas (orientación de las palas). Se trata, en concreto de técnicas que utilizan controladores PI (proporcional integral) y PID (proporcional integral derivada), de técnicas de control LQ (controlador lineal y cuadrático del inglés Linear Quadratic) y de estrategias basadas en controles lineales robustos.

50 Sin embargo, las prestaciones de estos controladores lineales están limitadas por las características fuertemente no lineales de la turbina eólica. Se han desarrollado primeras estrategias basadas en controles no lineales, una estrategia de ese tipo se describe, por ejemplo, en el documento: Boukhezzar B., Lupu L., Siguerdidjane H., Hand M. "Multivariable control strategy for variable speed, variable pitch wind turbines" Renewable Energy, 32 (2007) 1273-1287.

55 No obstante, ninguna de estas estrategias utiliza la velocidad incidente del viento que es un dato fundamental para los fenómenos aerodinámicos que rigen la turbina eólica. Para tener en cuenta esta componente, se han realizado primeros trabajos con una medida de la velocidad del viento. Estos trabajos muestran que se puede aumentar fuertemente la productividad de una turbina eólica y su vida útil gracias a estrategias innovadoras que utilizan la velocidad del viento.

60 Desgraciadamente, esta técnica necesita un sensor que es caro y que no es muy preciso. Para tener en cuenta la velocidad del viento incidente sin sensor, se puede realizar una estimación de este viento para poder utilizar este dato en el control. Se han realizado trabajos en este sentido con la utilización de un filtro de Kalman, siendo descrito dicho método en el documento: Boukhezzar B., Siguerdidjane H., "Nonlinear control of variable speed wind turbine without wind speed measurement" IEEE Control and Decision Conference (2005). Este método es poco preciso ya que la reconstrucción del viento es poco representativa. En efecto, Según este método, el viento no ha sido estructurado, se ha considerado como un ruido blanco, lo que no es el caso experimentalmente.

El objeto de la invención se refiere a un procedimiento para controlar una turbina eólica, con el fin de optimizar la en el presente documento producida, el control tiene en cuenta una estimación de la velocidad del viento incidente para obtener un control óptimo. La estimación de la velocidad del viento se realiza teniendo en cuenta las dinámicas del sistema, a partir de la medida de la velocidad del rotor, del par impuesto al generador y de la orientación de las palas de la turbina eólica para una estimación precisa.

El procedimiento según la invención

La invención se refiere a un procedimiento de control de una turbina eólica, constando dicha turbina eólica de un rotor al que está fijada al menos una pala, y una máquina eléctrica conectada a dicho rotor, en el que se conoce un ángulo de inclinación  $\theta$  de dicha pala y un par eléctrico  $T_e$  de recuperación de dicha máquina eléctrica. Este procedimiento consta de las etapas siguientes:

- a) se construye un modelo de dinámica de dicho rotor aplicando el principio fundamental de la dinámica a nivel de dicho rotor, relacionando dicho modelo la velocidad del viento incidente en dicha turbina eólica  $V_w$  con una velocidad de rotación de dicho rotor  $\Omega_r$ , con dicho ángulo de inclinación  $\theta$  de dicha pala y con dicho par eléctrico  $T_e$ ;
- b) se mide dicha velocidad de rotación de dicho rotor  $\Omega_r$ ;
- c) se determina dicha velocidad del viento incidente  $V_w$  por medio de dicho modelo de dinámica del rotor, de dicha velocidad de rotación de dicho rotor  $\Omega_r$  medida y de dicho ángulo de inclinación  $\theta$  de dicha pala y de dicho par eléctrico  $T_e$ ; y
- d) se controla dicho ángulo de inclinación  $\theta$  de dicha pala y/o dicho par eléctrico  $T_e$  de recuperación en función de dicha velocidad del viento incidente  $V_w$  para optimizar la producción de energía de dicha turbina eólica.

Según la invención, dicho modelo de dinámica del rotor se escribe mediante una fórmula del tipo:

$$J_r \frac{d\Omega_r}{dt} = T_{aero} - T_l(\Omega_r) - NT_e$$

$J_r$  con  $J_r$  la inercia de dicho rotor,  $T_{aero}$  el par aerodinámico aplicado a dicho rotor que depende de dicha velocidad del viento incidente  $V_w$ , de dicha velocidad de rotación de dicho rotor  $\Omega_r$  y de dicho ángulo de inclinación  $\theta$ ,  $T_l(\Omega_r)$  el par de fricción y de carga sobre el rotor que depende de dicha velocidad de rotación de dicho rotor  $\Omega_r$ ,  $N$  la relación de transmisión entre dicho rotor y dicha máquina eléctrica.

Ventajosamente, dicho par aerodinámico aplicado a dicho rotor se escribe mediante una fórmula de la forma:

$$T_{aero} = 0,5\rho\Pi R_b^3 c_q \left( \theta, \frac{R_b \Omega_r}{V_w} \right) V_w^2$$

con  $R_b$  el radio de dicho rotor,  $\rho$  la densidad del aire,  $c_q$  es un parámetro determinado por medio de una cartografía del rotor en función de dicho ángulo de inclinación  $\theta$  y de la relación  $\frac{R_b \Omega_r}{V_w}$ .

Según un modo de realización de la invención, estando dicha velocidad del viento incidente  $V_w$  considerada como una perturbación armónica, pudiendo dicha velocidad del viento incidente  $V_w$  escribirse mediante una fórmula del tipo:

$$V_w(t) = \sum_{k=-p}^p c_k e^{(i\omega_k t)}$$

con  $p$  el número de armónicos considerados,  $\omega_k$  es la frecuencia del armónico  $k$ ,  $c_k$  el coeficiente del armónico  $k$ , se determina dicha velocidad del viento incidente  $V_w$  determinando los parámetros  $\omega_k$  y  $c_k$  por medio de dicho modelo dinámico del rotor, y a continuación se deduce de ellos dicha velocidad del viento incidente  $V_w$ .

Preferentemente, se determina dicha frecuencia del armónico  $k$  por medio de una fórmula del tipo:

$$\omega_k = 3 \frac{k}{p} \omega_k$$

De manera ventajosa, se determinan los coeficientes  $c_k$  resolviendo un sistema de ecuaciones de la forma:

$$\left\{ \begin{array}{l} J_r \frac{d\Omega_r}{dt} = 0,5\rho\Pi R_b^3 c_q \left( \theta, \frac{R_b \Omega_r}{\sum_{k=-p}^p c_k e^{(i\omega_k t)}} \right) \left( \sum_{k=-p}^p c_k e^{(i\omega_k t)} \right)^2 - T_l(\Omega_r) - NT_e - J_r L_\Omega (\Omega_r - \Omega) \\ \frac{dc_k}{dt} = -L_k e^{(-i\omega_k t)} (\Omega_r - \Omega) \text{ para cualquier } k \in [-p, p] \end{array} \right.$$

con  $L_\Omega$  una ganancia que controla la velocidad de convergencia de la estimación de dicha velocidad de rotación del rotor,  $L_k$  una ganancia que controla la velocidad de convergencia de la descomposición armónica, y  $\Omega$  representa la velocidad medida del rotor. De manera preferente, dicha ganancia  $L_\Omega$  vale sustancialmente 1 y dicha ganancia  $L_k$  se determina mediante una fórmula del tipo:

$$L_k = \frac{10}{1 + \omega_k^2}.$$

Además, se puede controlar dicho ángulo de inclinación  $\theta$  por medio de las etapas siguientes:

- 10 i) se determina una consigna de par aerodinámico  $T_{aero}^{sp}$  y una consigna de par de la máquina eléctrica  $T_e^{sp}$  que permiten maximizar la potencia recuperada, a partir de dicha velocidad del viento incidente  $V_w$ , de medidas de dicha velocidad de rotación del rotor  $\Omega_r$  y de la velocidad de rotación del árbol de la máquina eléctrica  $\Omega_e$ ;
- ii) se modifica al menos una de dichas consignas sustrayéndole un término proporcional a una desviación entre velocidad medida del rotor  $\Omega_r$  y velocidad medida de la máquina eléctrica  $\Omega_e$ ;
- 15 iii) se determina un ángulo de inclinación  $\theta^{sp}$  de dicha pala que permite realizar dicha consigna de par aerodinámico  $T_{aero}^{sp}$ ; y
- iv) se orienta dicha pala según dicho ángulo de inclinación  $\theta^{sp}$ .

Preferentemente, se modifica al menos una de dichas consignas realizando las etapas siguientes:

- 20 (1) se determina un par  $\overline{T}_{res}$  en dicha transmisión resultante de dichas consignas de par aerodinámico  $T_{aero}^{sp}$  y de par de la máquina eléctrica  $T_e^{sp}$ ;
- (2) se determina una consigna de par resultante  $T_{res}^{sp}$  sustrayendo de dicho par resultante  $\overline{T}_{res}$  un término proporcional a la desviación entre la velocidad medida del rotor  $\Omega_r$  y la velocidad medida de la máquina eléctrica  $\Omega_e$ ; y
- 25 (3) se modifica dicha consigna de par aerodinámico  $T_{aero}^{sp}$  distribuyendo dicha consigna de par resultante  $T_{res}^{sp}$  en un par aerodinámico  $T_{aero}^{sp}$  y un par de la máquina eléctrica  $T_e^{sp}$ .

Según un modo de realización de la invención, dicha consigna de par resultante  $T_{res}^{sp}$  se escribe:

$$T_{res}^{sp} = \overline{T}_{res} - k \dot{\gamma}_{tr}$$

con  $k$  parámetros de calibración estrictamente positivos, y  $\dot{\gamma}_{tr}$  velocidad de una torsión de la transmisión, igual a una diferencia de velocidad del rotor  $\Omega_r$  y de la máquina eléctrica  $\Omega_e$  llevada a un mismo eje:

$$\dot{\gamma}_{tr} = \Omega_r - \frac{1}{N} \Omega_e,$$

donde  $N$  es una relación de transmisión entre dicho rotor y dicha máquina eléctrica.

- 35 Además, se puede determinar el ángulo de inclinación de dicha pala invirtiendo un modelo de par aerodinámico y utilizando dicha velocidad del viento incidente  $V_w$  y la medida de la velocidad del rotor  $\Omega_r$ .

Ventajosamente, se determina el término proporcional utilizando un modelo de la dinámica de la transmisión.

- 40 Presentación sucinta de las figuras

Otras características y ventajas del procedimiento según la invención, surgirán con la lectura de la descripción a continuación de ejemplos no limitantes de realizaciones, haciendo referencia a las figuras adjuntas descritas a continuación.

La figura 1 ilustra las etapas del procedimiento según la invención.

La figura 2 ilustra las etapas del procedimiento según un modo de realización de la invención.

La figura 3 representa una cartografía del rotor que da el coeficiente  $c_q$  en función del ángulo de inclinación  $\theta$  y

5 de la relación  $\frac{R_b \cdot \Omega_r}{V_w}$ .

La figura 4 ilustra las etapas de control de la turbina eólica según un modo de realización de la invención.

#### Descripción detallada de la invención

10 La invención se refiere a un procedimiento de control de una turbina eólica con eje horizontal en tierra o en mar ("offshore"), en el que se controla el ángulo de inclinación de las palas y/o el par eléctrico de recuperación de la máquina eléctrica para optimizar la energía recuperada.

#### Notaciones

15 A lo largo de la descripción, se utilizan las siguientes notaciones:

- $\theta$ : ángulo de inclinación de las palas, se trata del ángulo entre las palas y una referencia tal como el suelo (plano horizontal, perpendicular al mástil de la turbina eólica), esta inclinación puede estar controlada por el procedimiento según la invención, este ángulo se denomina también "pitch".
- $T_e$ : par eléctrico de recuperación de la máquina eléctrica, este par puede estar controlado por el procedimiento según la invención.
- $V_w$ : velocidad del viento incidente en las palas de la turbina eólica, esta velocidad es estimada por el procedimiento según la invención.
- $\Omega_r$ : velocidad de rotación del rotor de la turbina eólica, esta velocidad puede ser medida.
- $\Omega_e$ : velocidad de rotación del árbol de la máquina eléctrica, esta velocidad puede ser medida.
- $J_r$ : inercia del rotor de la turbina eólica, se trata de un valor conocido.
- $J_g$ : inercia de la máquina eléctrica.
- $T_{aero}$ : par aerodinámico aplicado al rotor, se trata de la fuerza rotacional aplicada al rotor bajo el efecto del viento.
- $T_f$ : par de fricción y de carga sobre el rotor, este par puede ser determinado por un polinomio de orden dos de la velocidad de rotación del rotor  $\Omega_r$ .
- $N$ : relación de transmisión entre el rotor y la máquina eléctrica.
- $R_b$ : radio del rotor.
- $\rho$ : densidad del aire. La densidad varía en función de la temperatura y la presión atmosférica. Generalmente es de aproximadamente  $1,2 \text{ kg/m}^3$ .
- $c_q$ : coeficiente dado por una cartografía del rotor en función del ángulo de inclinación  $\theta$  y de la relación  $\frac{R_b \cdot \Omega_r}{V_w}$ , la figura 3 es un ejemplo de cartografía utilizada para determinar el coeficiente.
- $c_k$ : coeficiente del armónico k de la descomposición armónica de la velocidad del viento incidente  $V_w$ .
- $\omega_k$ : frecuencia del armónico k de la descomposición armónica de la velocidad del viento incidente  $V_w$ .
- $p$ : número de armónicos considerados para la descomposición armónica de la velocidad del viento incidente  $V_w$ .
- $L_\Omega$ : ganancia que controla la velocidad de convergencia de la estimación de la velocidad del rotor.
- $L_k$ : ganancia que controla la velocidad de convergencia de la descomposición armónica de la velocidad del viento incidente  $V_w$ .
- $\overline{T}_{res}$ : par resultante en la transmisión entre el rotor y la máquina eléctrica.
- $\dot{\gamma}_{tr}$ : velocidad de torsión de la transmisión entre el rotor y la máquina eléctrica.

Estas notaciones, indexadas por la mención  $-sp$ , representan las consignas asociadas a las magnitudes consideradas.

50 La figura 1 representa el procedimiento según la invención. Las etapas del procedimiento según la invención son las siguientes:

- 1) Medida de la velocidad de rotación del rotor  $\Omega_r$
- 2) Construcción de un modelo de dinámica del rotor (MOD DYN)
- 3) Control de la turbina eólica (COM)

Etapa 1) Medida de la velocidad de rotación del rotor

La velocidad de rotación del rotor  $\Omega_r$  se mide durante el funcionamiento de la turbina eólica, en concreto por un sensor de rotación.

Etapa 2) Construcción de un modelo de dinámica del rotor (MOD DYN)

En primer lugar, se determina el ángulo de inclinación  $\theta$  actual de las palas así como el par eléctrico de recuperación  $T_e$ , por medida (por ejemplo, por sensor) o en función del control aplicado a los accionadores para modificar estos parámetros.

A continuación, se construye un modelo de dinámica del rotor. Se denomina un modelo de dinámica del rotor un modelo que representa los fenómenos dinámicos aplicados al rotor. Este modelo se obtiene por aplicación del principio fundamental de la dinámica al rotor, el modelo permite relacionar la velocidad del viento incidente  $V_w$  con una velocidad de rotación del rotor  $\Omega_r$ , con el ángulo de inclinación  $\theta$  de dicha pala y con el par eléctrico  $T_e$  de la máquina eléctrica.

Se aplica entonces este modelo de dinámica del rotor con datos conocidos:  $\theta$  y  $T_e$  y con el valor medido:  $\Omega_r$ , lo que permite, por lo tanto, determinar la velocidad del viento incidente  $V_w$ .

La figura 2 representa un modo de realización del procedimiento según la invención. Para este modo de realización, el modelo dinámico del rotor (MOD DYN) está construido por medio de un modelo del par aerodinámico (MOD AERO), del principio fundamental de la dinámica (PFD) aplicado al rotor y de un modelo de viento (MOD VENT).

*Modelo de par aerodinámico (MOD AERO)*

Según este modo de realización de la invención, se modeliza el par aerodinámico  $T_{aero}$  por un modelo que describe la potencia del viento contenido en un cilindro, multiplicado por un factor que describe el hecho de que una turbina eólica solamente permite recuperar una parte de esta potencia. De este modo, se modeliza el par aerodinámico  $T_{aero}$  en función de la velocidad del viento incidente  $V_w$ , del pitch  $\theta$  y de la velocidad del rotor  $\Omega_r$ . Dicho modelo puede escribirse de este modo en régimen estabilizado:

$$T_{aero} = 0,5\rho\Pi R_b^3 c_q \left( \theta, \frac{R_b \Omega_r}{V_w} \right) V_w^2$$

El parámetro  $c_q$  se puede determinar por medio de una cartografía del rotor. Un ejemplo de cartografía del parámetro

$c_q$  se presenta en la figura 3. Esta cartografía indica el valor del parámetro  $c_q$  en función de la relación  $\frac{R_b \Omega_r}{V_w}$ , para diferentes pitches (una curva para cada  $\theta$ ). Este tipo de cartografías es bien conocido por los especialistas. La relación  $\frac{R_b \Omega_r}{V_w}$  se indica TSR en la figura 3.

Por consiguiente, se puede escribir el par aerodinámico  $T_{aero}$  en función de magnitudes vinculadas a la turbina eólica ( $\rho, R_b$ ), del valor conocido ( $\theta$ ) y de la velocidad del viento incidente, que se busca estimar ( $V_w$ ).

*Principio fundamental de la dinámica (PFD)*

Escribiendo el principio fundamental de la dinámica aplicado al rotor, en lo que concierne a los momentos sobre su eje de rotación, se tiene una relación del tipo:

$$J_r \frac{d\Omega_r}{dt} = T_{aero} - T_l(\Omega_r) - NT_e$$

En esta relación, se utiliza el par aerodinámico  $T_{aero}$  determinado con el modelo de par aerodinámico descrito anteriormente. Además, el par de fricción y de carga sobre el rotor  $T_l$  se puede determinar, de manera convencional, mediante un polinomio de orden dos de la velocidad de rotación del rotor  $\Omega_r$ .

Combinando los dos modelos, se puede establecer, por lo tanto, una relación entre la velocidad del viento incidente  $V_w$ , y las magnitudes conocidas o medidas que son el ángulo de inclinación  $\theta$  de las palas, el par eléctrico de recuperación  $T_e$  y la velocidad de rotación del rotor  $\Omega_r$ .

*Modelización del viento incidente (MOD VENT)*

La última etapa de modelización es considerar el viento como una perturbación armónica. Esto significa que se supone que el viento se escribe en la forma:

$$V_w(t) = \sum_{k=-p}^p c_k e^{(i\omega_k t)}$$

5 con  $p$  el número de armónicos considerados para la descomposición armónica del viento, por ejemplo, se puede elegir  $p = 50$ .

$$\omega_k = 3 \frac{k}{p} \text{ Hz (con } k > 0 \text{)}$$

Por otro lado, para la frecuencia de los armónicos se puede elegir

10 Combinando los tres modelos presentados anteriormente, se puede obtener un modelo dinámico de la forma:

$$\begin{cases} J_r \frac{d\Omega_r}{dt} = 0,5 \rho \Pi R_b^3 c_q \left( \theta, \frac{R_b \Omega_r}{\sum_{k=-p}^p c_k e^{(i\omega_k t)}} \right) \left( \sum_{k=-p}^p c_k e^{(i\omega_k t)} \right)^2 - T_l(\Omega_r) - NT_e \\ \frac{dc_k}{dt} = 0 \text{ para cualquier } k \in [-p, p] \end{cases}$$

A partir de este sistema de ecuaciones, se puede construir un observador, que permite determinar los coeficientes  $c_k$  de la descomposición armónica del viento incidente. El observador se puede escribir de la forma:

$$\begin{cases} J_r \frac{d\Omega_r}{dt} = 0,5 \rho \Pi R_b^3 c_q \left( \theta, \frac{R_b \Omega_r}{\sum_{k=-p}^p c_k e^{(i\omega_k t)}} \right) \left( \sum_{k=-p}^p c_k e^{(i\omega_k t)} \right)^2 - T_l(\Omega_r) - NT_e - J_r L_\Omega (\Omega_r - \Omega) \\ \frac{dc_k}{dt} = -L_k e^{(-i\omega_k t)} (\Omega_r - \Omega) \text{ para cualquier } k \in [-p, p] \end{cases}$$

15 donde  $\Omega$  representa la velocidad medida del rotor. en el que  $L_\Omega$  una ganancia que controla la velocidad de convergencia de la estimación de la velocidad del rotor, esta ganancia debe ser positiva, se le puede elegir igual a 1 por ejemplo y  $\{L_k\}_{k \in [-p, p]}$  una ganancia que controla la velocidad de convergencia de la descomposición armónica. Estas ganancias deben ser positivas, se les puede elegir

20 iguales a  $\frac{10}{1 + \omega_k^2}$  por ejemplo.

Este último sistema de ecuaciones representa un estimador no lineal de tipo adaptativo que permite estimar los coeficientes  $c_k$  de la descomposición armónica de la señal de viento incidente  $V_w$ .

25 Este método garantiza la reconstrucción de la excitación del viento  $V_w$  a través de los coeficientes  $c_k$ . El viento reconstruido  $V_w$  viene dado por la siguiente relación:

$$V_w(t) = \sum_{k=-p}^p c_k e^{(i\omega_k t)}$$

### 30 Etapas 3) Control de la turbina eólica (COM)

En función de la velocidad del viento incidente  $V_w$ , se controla la turbina eólica para optimizar la energía recuperada. Según la invención, se puede controlar el ángulo de inclinación de las palas  $\theta$  y/o el par eléctrico de recuperación  $T_e$  en función del viento incidente  $V_w$ .

35 Según un modo de realización de la invención, el ángulo de inclinación de las palas  $\theta$  y/o el par eléctrico de recuperación  $T_e$  se determinan por medio de cartografías de la turbina eólica en función del viento incidente  $V_w$ .

Como alternativa, según un modo de realización de la invención ilustrado en la figura 4, se puede controlar el ángulo  $\theta$  de inclinación de las palas por medio de las etapas siguientes:

40

E1. Determinación del pitch que permite optimizar la potencia recuperada

i - Generación de una consigna de par eléctrico  $T_e^{sp}$

5 ii - Generación de una consigna de par aerodinámico  $T_{aero}^{sp}$

iii - Determinación de una posición de pitch  $\theta$

10 E2. Determinación del par resultante de las consignas de pares  $T_e^{sp}$  y  $T_{aero}^{sp}$

E3. Generación de una consigna de par resultante ( $T_{res}^{sp}$ ) que disminuye la fatiga y los momentos extremos de la transmisión

15 E4. Distribución del par resultante consigna ( $T_{res}^{sp}$ ) entre los pares aerodinámicos y eléctricos

E5. Determinación de una posición de pitch que permite realizar este par aerodinámico

E6. Orientación de las palas según el pitch determinado

20 1. Determinación del pitch que permite optimizar la potencia recuperada

Un objetivo del procedimiento según la invención es maximizar la producción de energía de una turbina eólica con eje horizontal (hélice perpendicular al viento), implantada en tierra ("onshore") o en mar ("offshore"), al tiempo que limita los momentos extremos y la fatiga de la estructura mecánica.

25 Para maximizar la producción de energía de una turbina eólica se busca el ángulo de inclinación de las palas, llamado «pitch» y denotado  $\theta$ , que permite maximizar la potencia recuperada  $P_{aero}$  en función de la velocidad del viento incidente  $V_w$  determinada en la etapa de construcción del modelo de dinámica del rotor.

30 Según un modo de realización, para definir este ángulo, se utiliza un modelo de la potencia recuperable. Esta potencia  $P_{aero}$  se puede escribir:

$$P_{aero} = T_{aero} * \Omega_r$$

35 Se busca, por lo tanto, el ángulo  $\theta$  que permite maximizar  $P_{aero}$ . Para hacer esto, se realizan las etapas siguientes:

• i. - Generación de una consigna de par de la máquina eléctrica  $T_e^{sp}$

• ii - Generación de una consigna de par aerodinámico  $T_{aero}^{sp}$

40 • iii - Determinación de una posición de pitch  $\theta$

i - Generación de una consigna de par de la máquina eléctrica  $T_e^{sp}$

45 Se determina en un primer momento una consigna de par de la máquina eléctrica  $T_e^{sp}$ . Esta consigna se obtiene por medio de una cartografía en función de la velocidad de la máquina eléctrica.

Según la invención, se modeliza el par aerodinámico  $T_{aero}$  por el modelo aerodinámico tal como se describe en la parte de construcción del modelo dinámico.

$$T_{aero} = 0,5\rho\Pi R_b^3 c_q \left( \theta, \frac{R_b \Omega_r}{V_w} \right) V_w^2$$

50 De este modo, para determinar la consigna de par de la máquina eléctrica en función de la velocidad de la máquina eléctrica, se optimiza la potencia aerodinámica recuperada para cada velocidad del viento.



$$T_e^{sp} = \arg \left( \max_{\theta, V_w} \frac{0,5}{N} \rho \Pi R_b^3 C_q \left( \theta, \frac{R_b \Omega_g}{N V_w} \right) V_w^2 \right)$$

Esto permite tener el par consigna  $T_e$  que depende de la velocidad de rotación del árbol de la máquina eléctrica:

$$T_e^{sp} = f(\Omega_e).$$

5

No obstante, con respecto a esta curva de referencia, se aplican dos limitaciones:

- un par nulo para las velocidades bajas de la máquina eléctrica para poder aumentar la velocidad de la turbina eólica;
- un par máximo para limitar la potencia de la máquina eléctrica. De este modo, se tienen tres regiones en la curva  $T_e^{sp} = f(\Omega_e)$ :
  - Región 1: con par nulo;
  - Región 2 : con par óptimo;
  - Región 3 : con par limitado por la potencia máxima.

10

15

ii - Generación de una consigna de par aerodinámico  $T_{aero}^{sp}$

El objetivo es generar una consigna de par aerodinámico  $T_{aero}^{sp}$  que permita realizar la velocidad de rotación de rotor consigna  $\Omega_r^{sp}$ . Para ello, se utiliza el modelo de la dinámica del rotor.

20

$$J_r \frac{d\Omega_r}{dt} = T_{aero} - T_l(\Omega_r) - NT_e(\Omega_e)$$

De este modo, la estrategia de control utilizada es una estrategia de control dinámico que anticipa la variación de consigna y que corrige con dos términos, un término proporcional y un término integral. La estrategia se escribe mediante una relación de la forma:

25

$$T_{aero}^{sp} = T_l(\Omega_r) + NT_e(\Omega_e) + J_r \frac{d\Omega_r^{sp}}{dt} - k_p (\Omega_r - \Omega_r^{sp}) - k_i \int (\Omega_r - \Omega_r^{sp})$$

donde  $k_p$  y  $k_i$  son dos parámetros reales a calibrar para garantizar la convergencia de la velocidad hacia su consigna.

30

iii - Determinación de una posición de pitch  $\theta$

A partir de esta consigna de par aerodinámico  $T_{aero}^{sp}$ , se determina un ángulo de inclinación  $\theta$  de las palas para satisfacer esta demanda de par aerodinámico  $T_{aero}^{sp}$ . Para ello, se utiliza el modelo de par aerodinámico, con la velocidad del viento incidente  $V_w$  determinada durante la etapa de construcción del modelo de dinámica del rotor, la medida del régimen del rotor  $\Omega_r^{sp}$  y el par consigna  $T_{aero}^{sp}$ . Invertiendo el modelo (mediante un algoritmo de Newton, por ejemplo), se obtiene una consigna de pitch  $\bar{\theta}$ :

35

$$\bar{\theta} = \arg \left( \min_{\theta} \left( T_{aero}^{sp} - 0,5 \rho \Pi R_b^3 C_q \left( \theta, \frac{R_b \Omega_r}{V_w} \right) V_w^2 \right)^2 \right)$$

De este modo, con esta ley de control, se garantiza la convergencia hacia la velocidad del rotor de referencia, que permite maximizar la potencia recuperada.

40

2 - Determinación del par resultante de las consignas de pares  $T_e^{sp}$  y  $T_{aero}^{sp}$

A partir de las consignas  $T_e^{sp}$  y  $T_{aero}^{sp}$ , se determina el par  $\bar{T}_{res}$  resultante de estos dos pares y que tratará de la transmisión. Para ello, se modeliza este par mediante la siguiente fórmula:

45

$$\bar{T}_{res} = \frac{J_g}{J_r + J_g} (T_{aero}^{sp} - T_l) + \frac{J_r}{J_r + J_g} NT_e^{sp}$$

donde  $J_r$  y  $J_g$  son las inercias respectivamente del rotor y de la máquina eléctrica.

3 - Generación de una consigna de par resultante ( $T_{res}^{sp}$ ) que disminuye la fatiga y los momentos de la transmisión

Se busca modificar este par resultante  $\bar{T}_{res}$  para minimizar el impacto sobre la transmisión y, por lo tanto, aumentar su vida útil. Para ello, se busca disminuir las variaciones de velocidad de torsión de la transmisión. De este modo, se buscará compensar el par con términos proporcionales a la desviación entre la velocidad del rotor y de la máquina eléctrica. La dinámica de la estructura mecánica (dinámica de la transmisión) se puede escribir en forma de dos sistemas de segundo orden acoplados.

$$\begin{cases} \frac{J_r J_g}{J_r + J_g} \ddot{\gamma}_{tr} = -c_d \dot{\gamma}_{tr} - k_d \dot{\gamma}_{tr} + \frac{J_g}{J_r + J_g} (T_{aero} - T_l) + \frac{J_r}{J_r + J_g} NT_e \\ J_g \ddot{\Omega}_e = c_d \dot{\gamma}_{tr} + k_d \dot{\gamma}_{tr} + N_{gb} T_e \end{cases}$$

donde

- $\gamma_{tr}$ ,  $\dot{\gamma}_{tr}$  y  $\ddot{\gamma}_{tr}$  son respectivamente el ángulo, la velocidad y la aceleración de la torsión del árbol. Cabe destacar que la velocidad de torsión de la transmisión es la diferencia de velocidad del rotor y de la generatriz llevada al

mismo eje, es decir  $\dot{\gamma}_{tr} = \Omega_r - \frac{1}{N} \Omega_e$  ;

- $k_d$  es la amortiguación estructural de la transmisión;
- $c_d$  es la rigidez de la transmisión;
- $N_{gb}$  es la relación de la caja de engranajes, es decir la proporción entre la velocidad del generador y la velocidad del rotor.

De este modo, la estrategia de control busca generar un par resultante diferente de  $\bar{T}_{res}$  para minimizar la fatiga y los momentos extremos de la transmisión. Por lo tanto, tendremos:

$$T_{res}^{sp} = \bar{T}_{res} - k \dot{\gamma}_{tr}$$

con  $k$  parámetros de calibración estrictamente positivos. Estos parámetros pueden ser determinados experimentalmente por un especialista. Se puede considerar que todos estos parámetros  $k$  son iguales a 1 por ejemplo.

4 - Distribución del par resultante consigna ( $T_{res}^{sp}$ ) entre los pares aerodinámicos y eléctricos

Esta consigna de par resultante  $T_{res}^{sp}$  se distribuye a continuación entre el par aerodinámico  $T_{aero}$  y el par de la máquina eléctrica  $T_e$ . Para ello, la distribución se realiza en función de las zonas operatorias. En una zona 2, donde el par aerodinámico es limitante, se tiene una reserva de par. En este caso, la modificación de par influye sobre el par de la máquina eléctrica y no sobre el par aerodinámico. De este modo, en este caso, tenemos:

$$\begin{cases} T_{aero}^{strat} = T_{aero}^{sp} \\ T_e^{strat} = T_e^{sp} - k \frac{J_r + J_g}{NJ_r} \dot{\gamma}_{tr} \end{cases}$$

De la misma manera en una zona 3 donde el par de la máquina eléctrica es limitante, la modificación de par influye sobre el par aerodinámico, lo que da:

$$\begin{cases} T_{aero}^{strat} = T_{aero}^{sp} - k \frac{J_r + J_g}{J_g} \dot{\gamma}_{tr} \\ T_e^{strat} = T_e^{sp} \end{cases}$$

5 - Determinación de una posición de pitch que permite realizar este par aerodinámico.

- 5 A partir de esta consigna de par aerodinámico  $T_{aero}^{strat}$ , se determina un ángulo de inclinación  $\theta$  de las palas para satisfacer esta demanda de par aerodinámico  $T_{aero}^{strat}$ . Para ello, se utiliza el modelo de par aerodinámico, con la velocidad del viento incidente  $V_w$  determinada durante la etapa de construcción del modelo de dinámica del rotor, y la medida del régimen del rotor  $\Omega_r^{sp}$  y el par consigna  $T_{aero}^{strat}$ . Invertiendo el modelo (mediante un algoritmo de Newton, por ejemplo), se obtiene una
- 10 consigna de pitch  $\bar{\theta}$ :

$$\bar{\theta} = \arg \left( \min_{\theta} \left( T_{aero}^{sp} - 0,5 \rho \Pi R_b^3 c_q \left( \theta, \frac{R_b \Omega_r}{V_w} \right) V_w^2 \right)^2 \right)$$

- 15 De este modo, con esta ley de control, se garantiza la convergencia hacia la velocidad rotor de referencia, que permite maximizar la potencia recuperada, al tiempo que minimiza el impacto mecánico (fatiga y momento extremo) en la transmisión.

6 - Orientación de las palas según el pitch determinado

- 20 Para optimizar la potencia eléctrica recuperada por la turbina eólica, se orientan las palas según el ángulo de inclinación calculado en la etapa anterior.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de control de una turbina eólica, constanding dicha turbina eólica de un rotor al que está fijada al menos una pala, y una máquina eléctrica conectada a dicho rotor, en el que se conoce un ángulo de inclinación  $\theta$  de dicha pala y un par eléctrico  $T_e$  de recuperación de dicha máquina eléctrica, caracterizado por que consta de las etapas siguientes:

a) se construye un modelo de dinámica de dicho rotor aplicando el principio fundamental de la dinámica a nivel de dicho rotor, relacionando dicho modelo la velocidad del viento incidente en dicha turbina eólica  $V_w$  con una velocidad de rotación de dicho rotor  $\Omega_r$ , con dicho ángulo de inclinación  $\theta$  de dicha pala y con dicho par eléctrico

$$J_r \frac{d\Omega_r}{dt} = T_{aero} - T_l(\Omega_r) - NT_e$$

$T_e$  y dicho modelo de dinámica del se escribe mediante una fórmula del tipo: con  $J_r$  la inercia de dicho rotor,  $T_{aero}$  el par aerodinámico aplicado a dicho rotor que depende de dicha velocidad del viento incidente  $V_w$ , de dicha velocidad de rotación de dicho rotor  $\Omega_r$  y de dicho ángulo de inclinación  $\theta$ ,  $T_l(\Omega_r)$  el par de fricción y de carga sobre el rotor que depende de dicha velocidad de rotación de dicho rotor  $\Omega_r$ , N la relación de transmisión entre dicho rotor y dicha máquina eléctrica; en el que dicho par aerodinámico aplicado a

$$T_{aero} = 0,5\rho\Pi R_b^3 c_q \left( \theta, \frac{R_b \Omega_r}{V_w} \right) V_w^2$$

dicho rotor se escribe mediante una fórmula de la forma: con  $R_b$  el radio de dicho rotor,  $\rho$  la densidad del aire,  $c_q$  es un parámetro determinado por medio de una cartografía del rotor en

$$\frac{R_b \Omega_r}{V_w},$$

función de dicho ángulo de inclinación  $\theta$  y de la relación

b) se mide dicha velocidad de rotación de dicho rotor  $\Omega_r$ ;

c) se determina dicha velocidad del viento incidente  $V_w$  por medio de dicho modelo de dinámica del rotor, de dicha velocidad de rotación de dicho rotor  $\Omega_r$  medida y de dicho ángulo de inclinación  $\theta$  de dicha pala y de dicho par eléctrico  $T_e$ : estando dicha velocidad del viento incidente  $V_w$  considerada como una perturbación armónica, pudiendo dicha velocidad del viento incidente  $V_w$  escribirse mediante una fórmula del tipo:

$$V_w(t) = \sum_{k=-p}^p c_k e^{(i\omega_k t)}$$

con p el número de armónicos considerados,  $\omega_k$  es la frecuencia del armónico k

$$\omega_k = 3 \frac{k}{p}, c_k$$

determinada preferentemente por medio de una fórmula del tipo: el coeficiente del armónico k, se determina dicha velocidad del viento incidente  $V_w$  determinando los parámetros  $\omega_k$  y  $c_k$  por medio de dicho modelo dinámico del rotor, y a continuación se deduce de ellos dicha velocidad del viento incidente  $V_w$ ; y

d) se controla dicho ángulo de inclinación  $\theta$  de dicha pala y/o dicho par eléctrico  $T_e$  de recuperación en función de dicha velocidad del viento incidente  $V_w$  para optimizar la producción de energía de dicha turbina eólica.

2. Procedimiento según la reivindicación 1 en el que se determinan los coeficientes  $c_k$  resolviendo un sistema de ecuaciones de la forma:

$$\left\{ \begin{array}{l} J_r \frac{d\Omega_r}{dt} = 0,5\rho\Pi R_b^3 c_q \left( \theta, \frac{R_b \Omega_r}{\sum_{k=-p}^p c_k e^{(i\omega_k t)}} \right) \left( \sum_{k=-p}^p c_k e^{(i\omega_k t)} \right)^2 - T_l(\Omega_r) - NT_e - J_r L_\Omega (\Omega_r - \Omega) \\ \frac{dc_k}{dt} = -L_k e^{(-i\omega_k t)} (\Omega_r - \Omega) \text{ para cualquier } k \in [-p, p] \end{array} \right.$$

con  $L_\Omega$  una ganancia que controla la velocidad de convergencia de la estimación de dicha velocidad de rotación del rotor,  $L_k$  una ganancia que controla la velocidad de convergencia de la descomposición armónica, y  $\Omega$  representa la velocidad medida del rotor.

3. Procedimiento según la reivindicación 2, en el que dicha ganancia  $L_\Omega$  vale sustancialmente 1 y dicha ganancia  $L_k$

$$L_k = \frac{10}{1 + \omega_k^2}.$$

se determina mediante una fórmula del tipo:

4. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que se controla dicho ángulo de inclinación  $\theta$

por medio de las etapas siguientes:

- 5 i) se determina una consigna de par aerodinámico  $T_{aero}^{sp}$  y una consigna de par de la máquina eléctrica  $T_e^{sp}$  que permiten maximizar la potencia recuperada, a partir de dicha velocidad del viento incidente  $V_w$ , de medidas de dicha velocidad de rotación del rotor  $\Omega_r$  y de la velocidad de rotación del árbol de la máquina eléctrica  $\Omega_e$ ;
- ii) se modifica al menos una de dichas consignas sustrayéndole un término proporcional a una desviación entre velocidad medida del rotor  $\Omega_r$  y velocidad medida de la máquina eléctrica  $\Omega_e$ ;
- iii) se determina un ángulo de inclinación  $\theta^{sp}$  de dicha pala que permite realizar dicha consigna de par aerodinámico  $T_{aero}^{sp}$ ; y
- 10 iv) se orienta dicha pala según dicho ángulo de inclinación  $\theta^{sp}$ .

5. Procedimiento según la reivindicación 4, en el que se modifica al menos una de dichas consignas realizando las etapas siguientes:

- (1) se determina un par  $\overline{T}_{res}$  en dicha transmisión resultante de dichas consignas de par aerodinámico  $T_{aero}^{sp}$  y de par de la máquina eléctrica  $T_e^{sp}$ ;
- 15 (2) se determina una consigna de par resultante  $T_{res}^{sp}$  sustrayendo de dicho par resultante  $\overline{T}_{res}$  un término proporcional a la desviación entre la velocidad medida del rotor  $\Omega_r$  y la velocidad medida de la máquina eléctrica  $\Omega_e$ ; y
- (3) se modifica dicha consigna de par aerodinámico  $T_{aero}^{sp}$  distribuyendo dicha consigna de par resultante  $T_{res}^{sp}$  en un par aerodinámico  $T_{aero}^{sp}$  y un par de la máquina eléctrica  $T_e^{sp}$ .
- 20

6. Procedimiento según la reivindicación 5, en el que dicha consigna de par resultante  $T_{res}^{sp}$  se escribe:

$T_{res}^{sp} = \overline{T}_{res} - k\dot{\gamma}_{tr}$  con k parámetros de calibración estrictamente positivos, y  $\dot{\gamma}_{tr}$  velocidad de una torsión de la transmisión, igual a una diferencia de velocidad del rotor  $\Omega_r$  y de la máquina eléctrica  $\Omega_e$  llevada a un mismo eje:

$\dot{\gamma}_{tr} = \Omega_r - \frac{1}{N}\Omega_e$ , donde N es una relación de transmisión entre dicho rotor y dicha máquina eléctrica.

7. Procedimiento según una de las reivindicaciones 4 a 6, en el que se determina el ángulo de inclinación de dicha pala invirtiendo un modelo de par aerodinámico y utilizando dicha velocidad del viento incidente  $V_w$  y la medida de la velocidad del rotor  $\Omega_r$ .

8. Procedimiento según una de las reivindicaciones 4 a 7, en el que se determina el término proporcional utilizando un modelo de la dinámica de la transmisión.

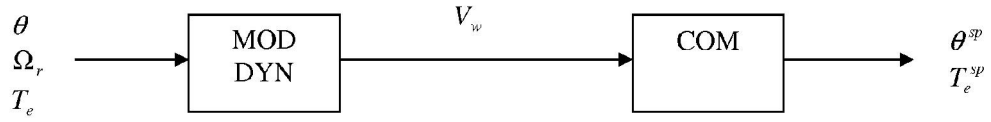


Figura 1

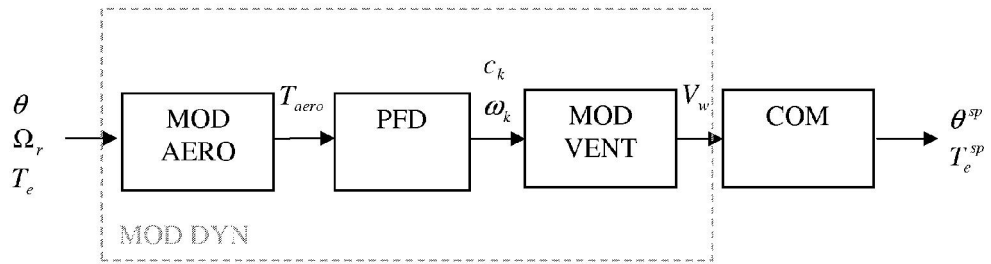


Figura 2

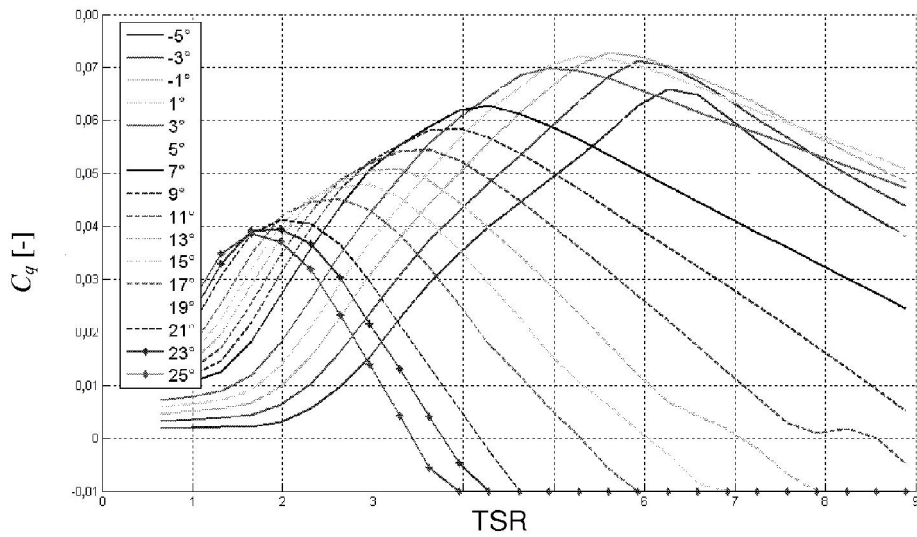


Figura 3

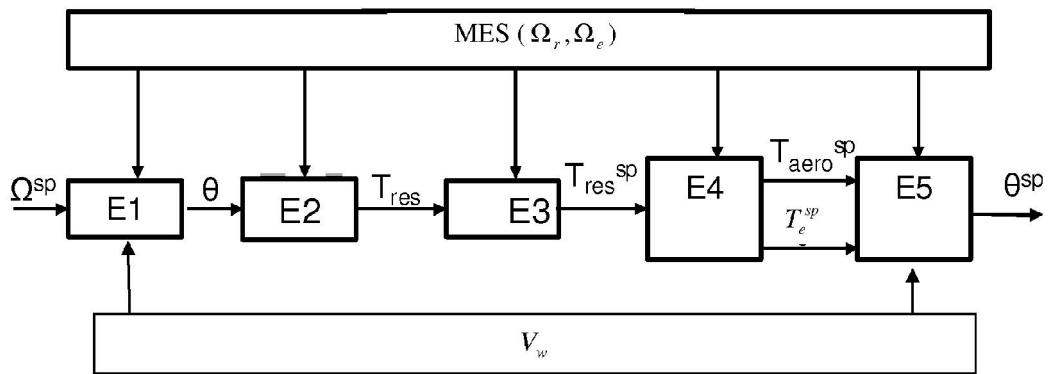


Figura 4