

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 659 113**

51 Int. Cl.:

**F03D 7/04** (2006.01)

**F03D 7/02** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **06.12.2011 E 11009623 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **15.11.2017 EP 2463520**

54 Título: **Procedimiento para el funcionamiento de una planta de energía eólica con ángulo de paso regulado**

30 Prioridad:

**10.12.2010 DE 102010054014**

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

**13.03.2018**

73 Titular/es:

**NORDEX ENERGY GMBH (100.0%)  
Langenhorner Chaussee 600  
22419 Hamburg, DE**

72 Inventor/es:

**KABATZKE, WOLFGANG;  
ROCHHOLZ, HERMANN y  
BIRKEMEYER, JOCHEN**

74 Agente/Representante:

**ROEB DÍAZ-ÁLVAREZ, María**

**ES 2 659 113 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 el funcionamiento de una planta de energía eólica con ángulo de paso regulado

5 La presente invención se refiere a un procedimiento para el funcionamiento de una planta de energía eólica con ángulo de paso regulado, en la que un valor nominal  $M$  para el par del generador se preddefine en dependencia de una velocidad de giro  $n$  del generador o del rotor. La norma de asignación del valor nominal  $M$  en dependencia de la velocidad de giro  $n$  tiene un punto de transición, en el que se produce una transición de un funcionamiento a carga parcial a un funcionamiento a carga nominal. En el funcionamiento a carga nominal se regula la velocidad de giro  $n_3$  para un valor nominal  $M_3$  a partir del punto de transición mediante un ajuste del ángulo de paso de pala.

10 Por el documento DE10109553B4 es conocido un procedimiento para controlar una planta de energía eólica con un generador eléctrico mediante la utilización de datos sobre la densidad del aire en la ubicación de la planta de energía eólica. En el procedimiento, el generador de la planta de energía eólica se controla mediante un dispositivo de control, que procesa los datos sobre la densidad del aire, y los datos de potencia del generador se ajustan en dependencia de la densidad del aire. En el caso del procedimiento conocido se considera la altura del lugar de instalación de la planta de energía eólica sobre el nivel de mar teniendo en cuenta la densidad del aire más baja en la curva característica de potencia. Esto permite adaptar, o sea, reducir, de manera correspondiente la potencia a generar por la planta de energía eólica, que está asignada a una velocidad de giro del rotor y, por tanto, a una velocidad específica determinada, de modo que el par del generador no supera el par de giro proporcionado por el generador a causa de una potencia de excitación alimentada por el dispositivo de control. En general, se debe mantener la eficiencia determinada mediante la curva característica de potencia y extraer la máxima energía del viento.

15 Por el documento EP1939445A2 es conocido un procedimiento para calcular una curva de potencia de ubicaciones a gran altitud. En este caso se determina una relación entre la potencia eléctrica inicial  $P$  y la velocidad del viento  $v$  a partir de una relación entre el coeficiente de potencia  $c_p$  y la velocidad específica  $\lambda$ .

20 Por el documento EP1918581A2 es conocida una planta de energía eólica, en la que la potencia inicial se reduce cuando la temperatura del aire ambiente desciende por debajo de un valor umbral predeterminado. La razón de esta reducción de potencia es que a temperaturas inferiores a  $-20$  °C, el funcionamiento de la planta de energía eólica puede requerir otros cálculos de carga.

25 Por E. L. van der Hooft et al, "Wind turbine control algorithms", ECN Literature Review, volumen ECN-C-03-111, es conocido un procedimiento de optimización para el funcionamiento de una planta de energía eólica en el intervalo de carga completa. En el marco del procedimiento de optimización se tienen en cuenta curvas de potencia constante.

30 Por el documento DE102009025445B3 es conocido un procedimiento para el funcionamiento de una planta de energía eólica, en el que se registra un valor meteorológico y se preddefine un valor nominal para el funcionamiento de la instalación teniendo en cuenta el valor de medición. El valor de medición es aquí un flujo másico de aire provocado por el viento.

35 En relación con los efectos de la densidad del aire en el rendimiento de la planta de energía eólica se ha de tener en cuenta que en caso de plantas de energía eólica con ángulo de paso regulado se pueden producir efectos de pérdida aerodinámica con una separación no deseada del flujo al variar las condiciones del aire.

40 La invención tiene el objetivo de proporcionar un procedimiento mejorado para el funcionamiento de una planta de energía eólica con ángulo de paso regulado, en el que la densidad del aire descendente se tiene en cuenta al predefinirse el valor nominal para el par del generador y al mismo tiempo se evitan efectos de pérdida no deseados en la pala de rotor.

45 El objetivo se consigue según la invención mediante un procedimiento con las características de la reivindicación 1. Configuraciones ventajosas son el objeto de las reivindicaciones secundarias.

50 En el procedimiento según la invención, el funcionamiento de una planta de energía eólica con ángulo de paso regulado se realiza al asignarse un valor nominal  $M$  para el par del generador a un valor real de una velocidad de giro  $n$  del generador o del rotor. En general, para el funcionamiento de la planta de energía eólica se ha de establecer una diferencia entre un funcionamiento a carga parcial y un funcionamiento a carga nominal. En el funcionamiento a carga parcial, el valor nominal para el par del generador aumenta con el incremento de la velocidad de giro. En el funcionamiento a carga nominal, la velocidad de giro  $n_3$  se regula mediante el ajuste del ángulo de paso de pala para un valor nominal  $M_3$ .

55 La transición del funcionamiento a carga parcial al funcionamiento a carga nominal se realiza en un punto de transición que está definido por un valor para la velocidad de giro  $n_3$  y un valor nominal para el par del generador  $M_3$ . Según la invención, los valores del punto de transición se determinan en dependencia de un valor actual de la densidad del aire, aumentando la velocidad de giro  $n_3$  y/o reduciéndose el valor nominal para el par del generador

5  $M_3$  con el descenso de la densidad del aire. Esto permite garantizar que al descender la densidad del aire, la planta de energía eólica pueda seguir funcionando de una manera económica y sin problemas con una regulación estable a una velocidad de giro mayor y un par de generador menor. En el procedimiento según la invención, el funcionamiento a carga nominal se realiza a continuación con el par de generador reducido  $M_3$  a partir del punto de transición. La adaptación de la velocidad de giro  $n_3$ , a partir de la que se realiza el funcionamiento a carga nominal, y del valor nominal para el par de generador  $M_3$  permite evitar efectos de pérdida aerodinámica no deseados.

10 Según la invención, la densidad actual del aire  $\rho$  se determina en dependencia de la temperatura del aire medida  $T$  y de una presión del aire  $p$  teniendo en cuenta un valor para la densidad del aire  $\Psi$ . La humedad relativa del aire puede tener una influencia considerable sobre la densidad del aire, en particular al montarse las plantas de energía eólica en lugares de alta temperatura ambiente, en los que el aire puede absorber mucha humedad, y en montañas o colinas, en las que se ha de contar con nubosidades, neblina y similares. Según la invención, el valor  $\Psi$  para la humedad del aire se predefine en dependencia de una hora del día y/o de una estación del año.

15 A fin de evitar mejor los efectos de pérdida no deseados en la pala de rotor, el ángulo de paso de pala se ajusta a un ángulo de paso de pala mínimo preferentemente en el funcionamiento a carga parcial. La pala de rotor cambia a continuación al funcionamiento a carga nominal, predefinido por la densidad del aire, con un ángulo de paso de pala mínimo.

20 En la configuración preferida, la transición del funcionamiento a carga parcial al funcionamiento a carga nominal se varía en dependencia de la densidad del aire. Al mismo tiempo se realiza un ajuste previo del ángulo de paso de la pala de rotor en el funcionamiento a carga parcial, de modo que al entrar en el funcionamiento a carga nominal, la pala de rotor no toma la potencia máxima posible del viento.

25 En una variante preferida del procedimiento según la invención, el valor del ángulo de paso de pala mínimo se selecciona asimismo en dependencia de la densidad del aire. De este modo se puede definir el ángulo de paso de pala mínimo, con el que la pala de rotor entra en el funcionamiento a carga nominal.

30 En una configuración preferida está previsto al asignarse el valor nominal para el par del generador en dependencia de la velocidad de giro un punto de inflexión predeterminado  $(n_2, M_2)$ , a partir del que se produce un aumento lineal del valor nominal para el par del generador hasta el funcionamiento a carga nominal. Este punto de inflexión predeterminado marca, por lo general, la transición de un intervalo, en el que se especifica de manera óptima el valor nominal para el par de giro en dependencia de la velocidad de giro y del coeficiente de potencia de la pala de rotor, a un intervalo, en el que se produce un aumento rápido del valor nominal para el par del generador con el incremento de la velocidad de giro.

35 En una configuración preferida, el valor nominal  $M_2$  para el par del generador disminuye a una velocidad de giro constante  $n_2$  con el descenso de la densidad del aire. Este principio se basa en la consideración de que la absorción de potencia ideal del rotor es proporcional a la densidad del aire, de modo que al descender la densidad del aire se puede absorber una potencia óptima menor con la pala de rotor. Por consiguiente, para el punto de inflexión  $(n_2, M_2)$ , la transición para el aumento lineal con el descenso de la densidad del aire se desplaza también hacia valores nominales menores para el par del generador.

45 Un ejemplo de realización preferido se explica detalladamente a continuación por medio de las figuras. Muestran:

- Fig. 1 la curva característica para el valor nominal del par del generador en dependencia de la velocidad de giro del generador;
- Fig. 2 un diagrama de flujo para calcular la variación de la velocidad de giro y la variación del valor nominal para el par del generador en dependencia de la temperatura del aire, la presión del aire y la humedad del aire;
- Fig. 3 la curva característica para el valor nominal del par del generador en dependencia de la velocidad de giro del generador con su desarrollo desplazado al descender la densidad del aire; y
- Fig. 4 el desarrollo del ángulo de paso de pala en dependencia de la velocidad de giro del generador.

60 La figura 1 muestra a modo de ejemplo el desarrollo de una curva característica que indica el valor nominal del par del generador  $M_{Gen}$  en dependencia de la velocidad de giro del generador  $n_{Gen}$ . La curva característica establece aquí una diferencia entre cuatro secciones. En una primera sección 10 se produce un aumento lineal del valor nominal para el par del generador  $M_{Gen}$  con el incremento de la velocidad de giro del generador  $n_{Gen}$ .

En una segunda sección 12, la curva característica sigue la curva característica ideal del rotor. El valor nominal para el par del generador se calcula mediante la siguiente función para la potencia óptima  $P_{opt}$ :

$$P_{opt}(n) = \left( 2 * \pi * R * \frac{n}{U_{Getr}} * \frac{1}{60 * \lambda_{opt}} \right)^3 * \pi * R^2 * \frac{\rho}{2} * c_{p_{opt}}$$

donde R identifica el radio del rotor, n, la velocidad del giro del generador,  $U_{Getr}$ , la relación de transmisión del engranaje,  $\lambda_{opt}$ , la velocidad específica máxima de la pala de rotor,  $\rho$ , la densidad del aire y  $c_{p_{opt}}$ , el coeficiente de potencia óptimo. A lo largo de la sección 12 de la curva característica, el valor nominal para el par del generador se calcula analíticamente de acuerdo con la fórmula anterior.

Un punto de inflexión está situado en el punto 14 entre la segunda sección 12 y una tercera sección 16 de la curva característica. A fin de obtener un óptimo aprovechamiento de la energía, la sección 16 abandona la curva característica ideal 12 y el valor nominal para el par del generador aumenta más fuertemente con el incremento de la velocidad de giro del generador. En el ejemplo de realización representado, la sección de curva característica 16 se muestra como una sección ascendente linealmente. Asimismo, son posibles otras formas no lineales del ascenso entre el punto de inflexión 14 y un punto de transición 18. En el punto de transición 18, la planta de energía eólica cambia a su funcionamiento a carga nominal. En este intervalo, la potencia de la planta de energía eólica se ha de mantener constante, siendo la potencia P proporcional a la velocidad de giro y al par de giro del generador:

$$P = M * \omega$$

donde  $\omega = 2 \pi n_{Gen}$  es la frecuencia angular del generador.

La figura 2 describe en un diagrama de flujo cómo la velocidad de giro y el valor nominal del par de giro varían en el punto de transición 18 en dependencia de la densidad del aire. A tal efecto, en una etapa de procedimiento 24 se calcula una densidad del aire  $\rho_0$  al nivel del mar a partir de la temperatura ambiente  $T_0$  que indica la temperatura del aire del entorno al nivel del mar, una presión del aire  $p_0$  que indica la presión del aire al nivel del mar y un valor para la humedad del aire  $\Psi_0$  que indica la humedad del aire al nivel del mar.

El cálculo de la densidad del aire con la integración de la humedad del aire se realiza de una manera conocida en sí.

En la planta de energía eólica, la temperatura del aire se calcula mediante sensores en el punto de trabajo  $T_1$ , así como la presión del aire se calcula en el punto de trabajo  $p_1$  en la etapa 26. Un valor para la humedad del aire  $\Psi_1$  en el punto de trabajo se proporciona mediante la definición previa de parámetros a partir de una fuente de datos 30 o por medio de una función de tiempo predeterminada 32. Un parámetro para la humedad del aire en el punto de trabajo  $\Psi_1$  se puede predefinir, por ejemplo, sobre la base de la estación del año o en dependencia de la hora del día.

Los valores de la temperatura del aire, la presión del aire y la humedad del aire están presentes en la etapa de procedimiento 34 para el punto de trabajo de la planta de energía eólica y se convierten a una densidad del aire para el punto de trabajo actual  $\rho_1$  en la etapa 36. El cálculo de la densidad del aire en la etapa 36 se realiza asimismo de una manera conocida en sí como en la etapa 24.

En la etapa de procedimiento 38 se determina una variación de la densidad del aire  $\Delta\rho$ . La diferencia de la densidad del aire  $\Delta\rho$  se obtiene a partir de la densidad del aire, calculada en la etapa 24, al nivel del mar  $\rho_0$  y la densidad del aire para el punto de trabajo actual  $\rho_1$  que se calculó en la etapa 36. En una etapa de procedimiento siguiente 40 se comprueba si la variación de la densidad del aire  $\Delta\rho$  supera un valor máximo para la variación de la densidad del aire  $\Delta\rho_2$ . Si la variación de la densidad del aire  $\Delta\rho$  detectada en la etapa de procedimiento 40 supera la variación máxima permisible de la densidad del aire  $\Delta\rho_2$ , en una etapa siguiente 42 se calcula una variación de la velocidad de giro del generador  $\Delta n$  y una variación del par del generador  $\Delta M$ . El cálculo en la etapa 42 se realiza de la manera siguiente:

$$\begin{aligned} \Delta n &= x \Delta n(n_2) + \Delta n_0 \\ \Delta M &= y \Delta M(n_2) + \Delta M_0 \end{aligned}$$

donde x, y son constantes parametrizables,  $\Delta M(n_2)$  es la variación del valor nominal para el par del generador a la velocidad de giro  $n_2$  y  $\Delta n_0$ , así como  $\Delta M_0$  son constantes específicas de la instalación. Para calcular  $\Delta M(n_2)$  se selecciona para  $n_2$  la velocidad de giro en el punto de inflexión, en el que la curva característica cambia de la segunda sección 12 a la tercera sección 16 de la curva característica que asciende de manera empinada. La ventaja de esta definición para  $\Delta M(n_2)$  radica en que el valor se puede calcular analíticamente como punto final de la segunda sección.

Además de determinarse los valores  $\Delta n$  y  $\Delta M$  en la etapa 42, en la etapa 44 se calcula también un valor  $\Delta\Phi$  para el ángulo de paso de pala que depende de la densidad del aire  $\rho_1$  en el punto de trabajo, que se determinó en la etapa 36.

Si en la consulta en la etapa 40 se determina que la variación de la densidad del aire  $\Delta\rho$ , calculada en la etapa de procedimiento 38, es menor que la variación máxima permisible de la densidad del aire  $\Delta\rho_2$  o igual que la variación máxima permisible de la densidad del aire  $\Delta\rho_2$ , el procedimiento retorna a la etapa de procedimiento 34 por medio de la ramificación 46 para volver a calcular un valor de la densidad del aire en el punto de trabajo  $\rho_1$ .

5 La figura 3 muestra una variación de la curva característica con el descenso de la densidad del aire. Se puede observar claramente que el punto de transición 18 se desplaza hacia un nuevo punto de transición 48. Si se considera el procedimiento para corregir la curva característica, esto se puede entender también como función de control autocorregida. El desplazamiento del punto de transición significa:

$$10 \quad (n_3, M_3) \rightarrow (n_3 + \Delta n, M_3 - \Delta M)$$

donde  $n_3$  y  $M_3$  identifican el punto de transición 18 de la curva característica no desplazada y  $n_3 + \Delta n$ , la velocidad de giro del punto de transición desplazado y  $M_3 - \Delta M$ , el valor nominal del par del generador del punto de transición desplazado.

15 Un aspecto importante en el desplazamiento anterior del punto de transición radica en que aquí no sólo se realiza una disminución del valor nominal para el par del generador, sino que está previsto simultáneamente también un aumento de la velocidad de giro, a partir de la que la planta de energía eólica cambia al funcionamiento a carga nominal. La sección de la curva característica, que identifica el funcionamiento a carga nominal con la densidad de aire reducida, está representada de manera conectada al punto de transición 48 como sección de curva característica 50. Como se observa en la figura 3, el cambio del punto de transición 18 hacia el nuevo punto de transición 48 depende de la temperatura, la presión del aire y la humedad del aire.

20 Como se muestra también en la figura 3, una velocidad de giro máxima del generador  $n_4$  puede estar definida para el generador en dependencia de la construcción. Si la nueva velocidad de giro  $n_3 + \Delta n$ , resultante a partir del punto de transición 18, debiera ser mayor que el valor máximo permisible para la velocidad de giro del generador  $n_4$ , la velocidad de giro no se sigue aumentando, sino que se produce un aumento de la velocidad de giro sólo hasta la velocidad de giro del generador máxima permisible. En este ejemplo se puede adaptar también la disminución del valor nominal del par del generador en  $\Delta M$  a partir del punto de transición 18. Una posibilidad para la adaptación está dada por la condición de que:

$$25 \quad (\Delta n)^2 + (\Delta M)^2 = \text{constante}$$

30 Esto significa que a partir del punto de transición 18 se produce un aumento de la velocidad de giro del generador para el nuevo punto de transición 48 sólo hasta la velocidad de giro del generador máxima permisible  $n_4$ . Por la otra parte, se reduce el valor nominal para el par de generador, manteniéndose constante la distancia entre los puntos de transición 18 y 48 que se origina en caso de un aumento no limitado de la velocidad de giro. La reducción del valor nominal para el par del generador se produce a lo largo de un círculo imaginario, cuyo punto central forma el punto

40 de transición 18 y cuyo radio se determina como  $\sqrt{(\Delta n)^2 + (\Delta M)^2}$ .

45 En el desplazamiento descrito del punto de transición para el funcionamiento nominal con el descenso de la densidad del aire varían también las demás secciones de la curva característica. La sección de curva característica 12, obtenida directamente de la fórmula mencionada más arriba, es proporcional a la densidad del aire, de modo que la segunda sección de curva característica 12 se desplaza en general hacia valores nominales menores para el par del generador. La sección de curva característica modificada 52 significa también que el punto de inflexión 14 para la salida de la segunda sección de curva característica se desplaza en general hacia valores nominales menores para el par del generador. El punto de inflexión desplazado 54 está caracterizado por que sólo el valor nominal para el par del generador se reduce debido a la sección de curva característica 52, pero no el valor de la velocidad de giro. El punto de inflexión desplazado 54 y el punto de transición desplazado 48 conducen hacia una tercera sección de curva característica 56 que discurre más plana que la tercera sección de curva característica 16.

50 Asimismo, a partir de la reducción de la segunda sección de curva característica 12 para la primera sección de curva característica 10 en el procedimiento según la invención se obtiene un desarrollo más plano que está representado mediante la sección de curva característica 58.

55 La figura 4 muestra el desarrollo del ángulo de paso de pala mínimo en dependencia de la velocidad de giro. En la figura 4a está representado el funcionamiento convencional de una planta de energía eólica según el estado de la técnica. Para la planta de energía eólica se ha limitado en un funcionamiento normal el ángulo de paso de pala mínimo hasta una velocidad de giro de  $n_1$  mediante la línea 60. Sólo después de la transición al funcionamiento a carga nominal a la velocidad de giro  $n_3$ , el ángulo de paso de pala mínimo se limita mediante la curva 62 que asciende linealmente.

El diagrama se ha de leer aquí de manera que indique que el ángulo de paso de pala máximo permitido se predefine en dependencia de la velocidad de giro del generador.

5 En el procedimiento según la invención, representado en la figura 4b, se predefine un ángulo de paso de pala máximo permitido a partir de una velocidad de giro  $n_2$ . Por consiguiente, antes de una transición al funcionamiento a carga nominal a la velocidad de giro  $n_3$  se predefine un ángulo de paso de pala mínimo según la sección de curva 68. En el funcionamiento a carga nominal se predefine a continuación el ángulo de paso de pala mínimo según la sección de curva 70, siendo el ángulo de paso de pala mínimo según la sección de curva 70 mayor que en la sección de curva 62.

10 En el ejemplo de realización representado según la figura 4b, el ángulo de paso de pala mínimo no se adapta en dependencia de la densidad del aire para el funcionamiento con ruido reducido, de modo que la curva 62 se mantiene esencialmente sin cambios.

**REIVINDICACIONES**

- 5 1. Procedimiento para el funcionamiento de una planta de energía eólica con ángulo de paso regulado con un rotor y un generador, en la que un valor nominal para el par del generador ( $M$ ) se predefine en dependencia de una velocidad de giro ( $n$ ) del generador o del rotor, estando previsto un punto de transición ( $n_3, M_3$ ), en el que se produce una transición de un funcionamiento a carga parcial a un funcionamiento a carga nominal, regulándose la velocidad de giro para un valor nominal ( $M_3$ ) a partir del punto de transición mediante el ajuste del ángulo de paso de pala, **caracterizado por que**
- 10 - se calcula un valor actual para la densidad del aire ( $\rho$ ) y  
- los valores ( $n_3, M_3$ ) del punto de transición se determinan en dependencia del valor actual para la densidad del aire ( $\rho$ ), aumentando la velocidad de giro ( $n_3$ ) y/o reduciéndose el valor nominal para el par del generador ( $M_3$ ) con el descenso de la densidad del aire ( $\rho$ ), determinándose la densidad del aire actual ( $\rho$ ) en dependencia de una temperatura del aire medida ( $T$ ) y una presión del aire medida ( $p$ ) teniendo en cuenta un valor para la
- 15 humedad del aire ( $\Psi$ ) que se predefine en dependencia de una hora del día y/o de una estación del año.
2. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado por que** el ángulo de paso de pala se ajusta a un ángulo de paso de pala mínimo en el funcionamiento a carga parcial.
- 20 3. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 2, **caracterizado por que** el valor del ángulo de paso de pala mínimo se selecciona en dependencia de la densidad del aire ( $\rho$ ).
4. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 3, **caracterizado por que** la curva característica presenta un punto predeterminado ( $n_2, M_2$ ), a partir del que se produce un aumento lineal del valor nominal para el
- 25 par del generador hasta el funcionamiento a carga nominal.
5. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 4, **caracterizado por que** el valor nominal para el par del generador ( $M_2$ ) disminuye a una velocidad de giro constante ( $n_2$ ) con el descenso de la densidad del aire ( $\rho$ ).

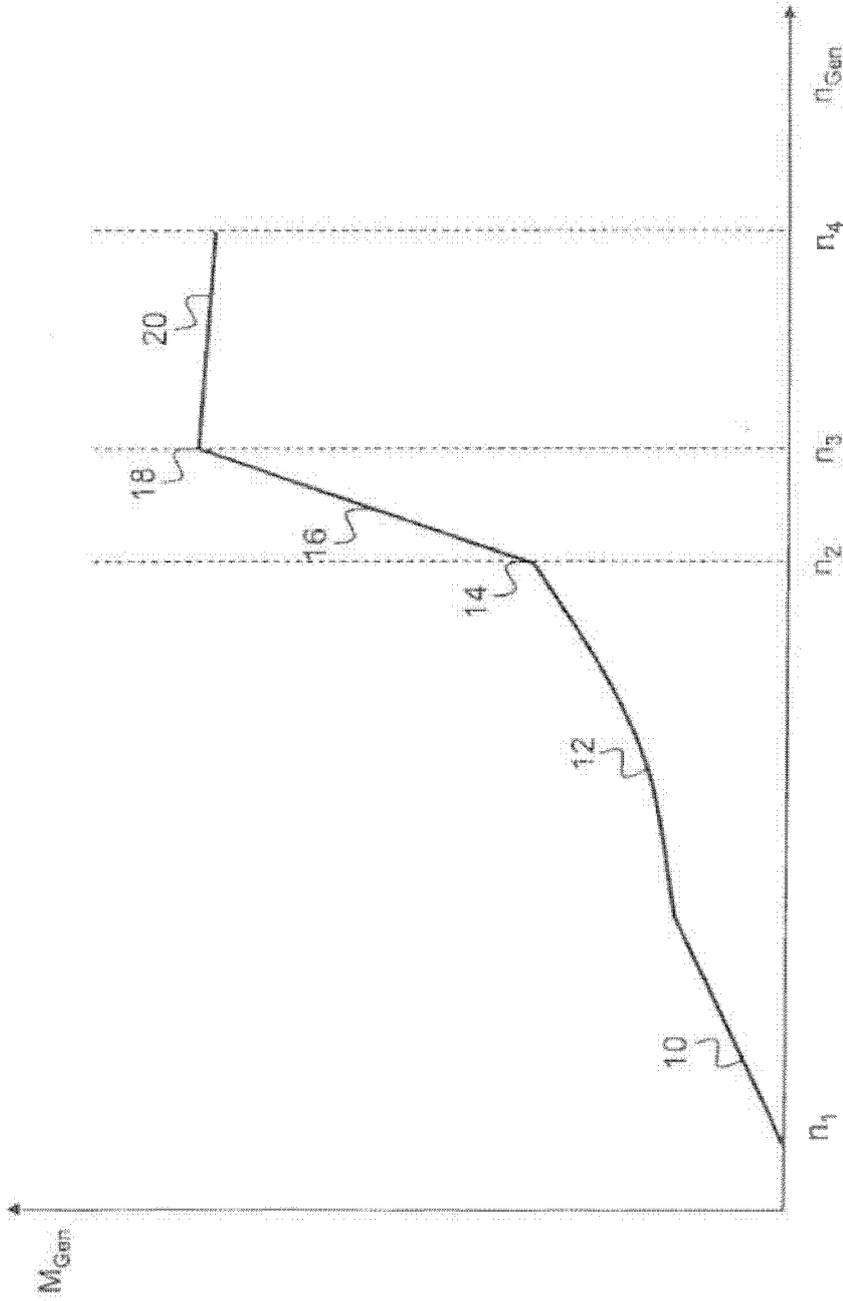


FIG. 1

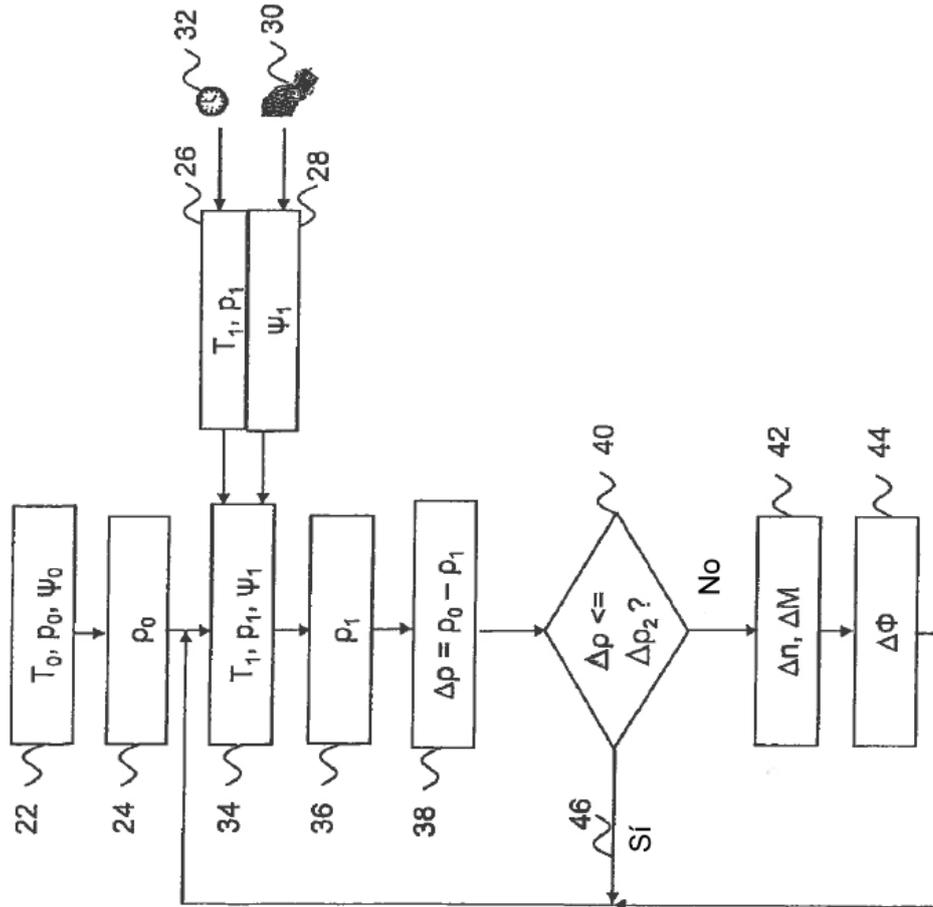


Fig. 2

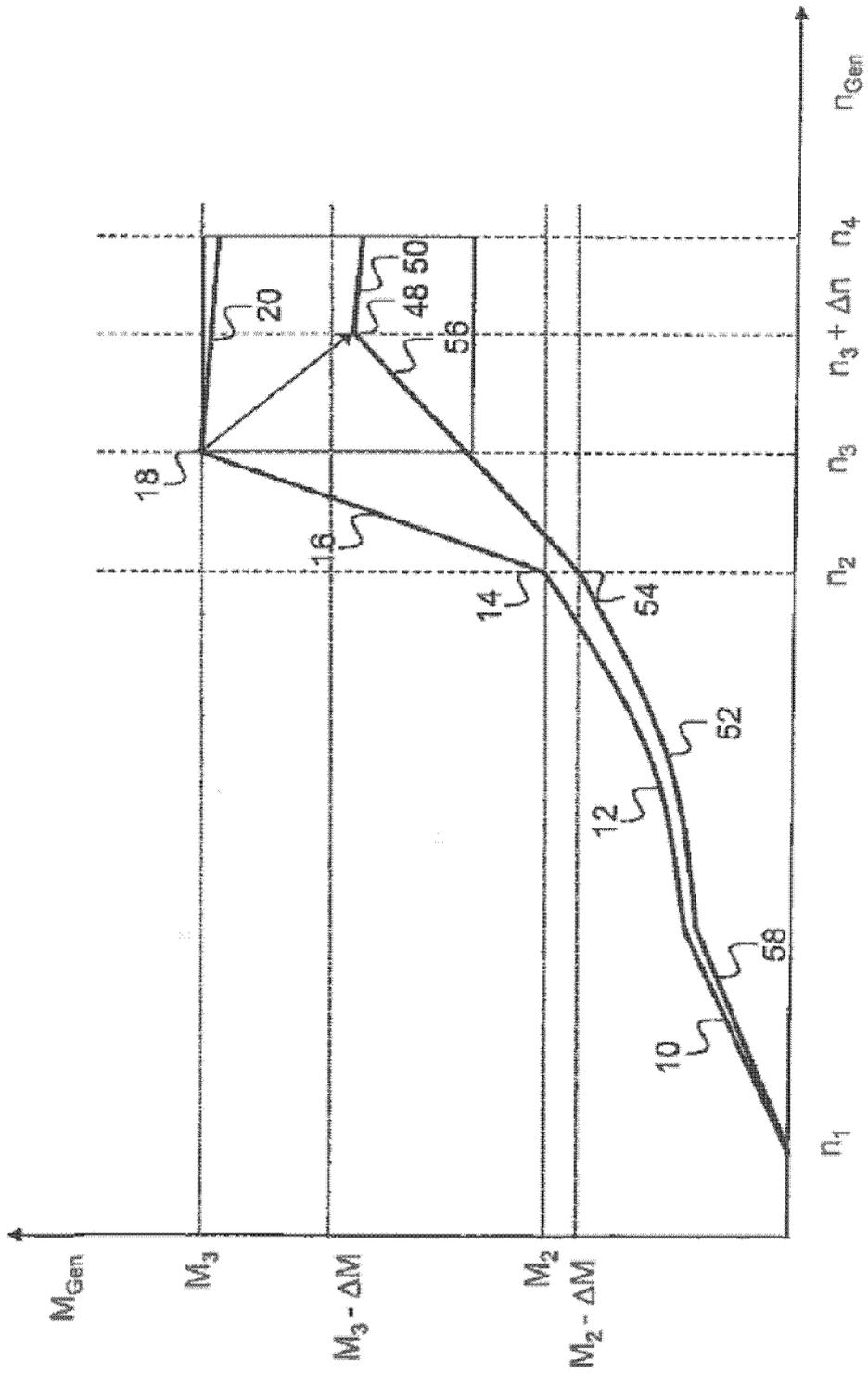


Fig. 3

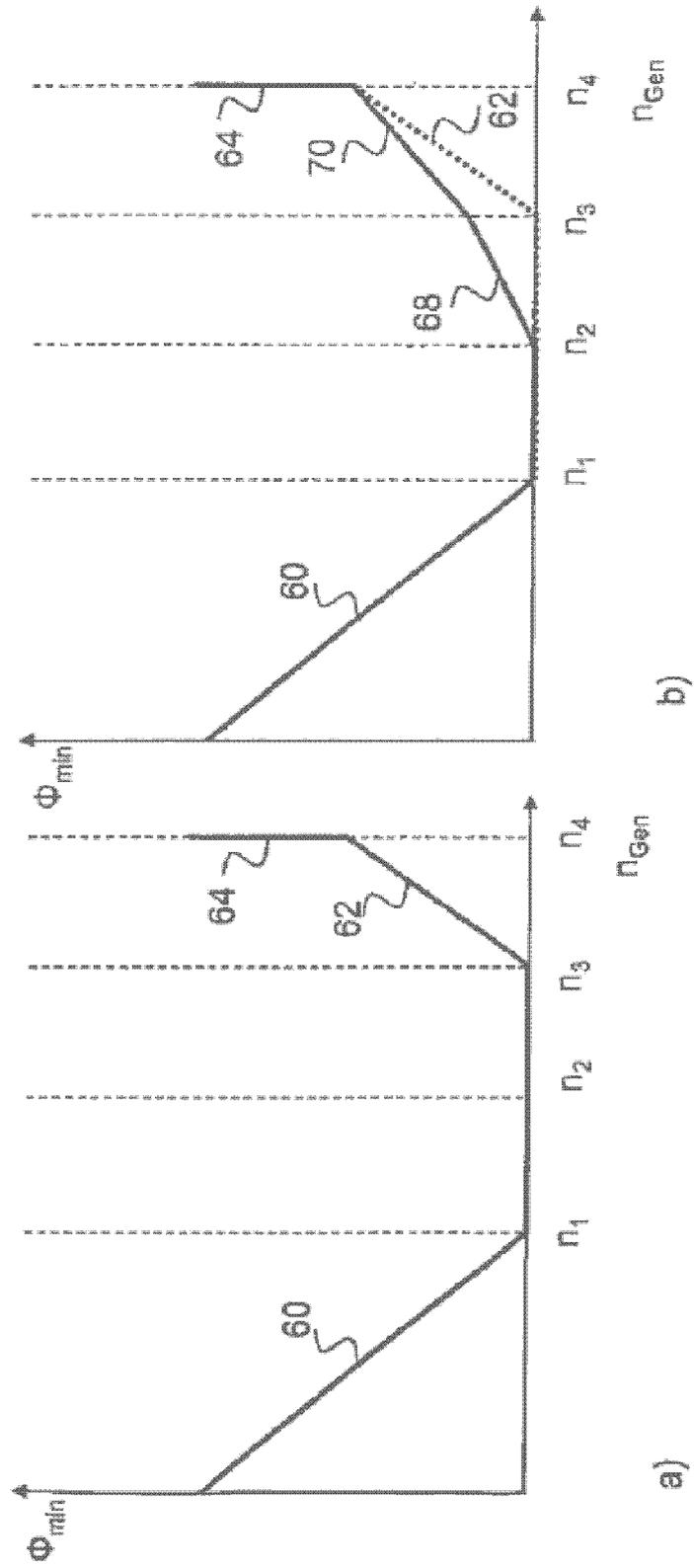


Fig. 4