

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 731 211**

51 Int. Cl.:

G01R 21/133 (2006.01)

G01M 15/00 (2006.01)

F03D 17/00 (2006.01)

F03D 7/04 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **13.08.2012 PCT/EP2012/003447**

87 Fecha y número de publicación internacional: **28.02.2013 WO13026538**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **13.08.2012 E 12758399 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **13.03.2019 EP 2745007**

54 Título: **Determinación de la pérdida de rendimiento energético de una turbina eólica**

30 Prioridad:

19.08.2011 DE 102011081241

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

14.11.2019

73 Titular/es:

**SENVION GMBH (100.0%)
Überseering 10
22297 Hamburg, DE**

72 Inventor/es:

**MITTELMEIER, NIKO;
BERGMANN, MATTHIAS;
BLODAU, TOMAS y
SCHUBERT, ALEXANDER**

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 731 211 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

Determinación de la pérdida de rendimiento energético de una turbina eólica

La invención se refiere a un procedimiento para determinar una pérdida de rendimiento energético de una primera turbina eólica de un parque eólico con varias turbinas eólicas.

5 En especial en caso de grandes parques eólicos es deseable ofrecer a un cliente una garantía de rendimiento energético en lugar de una garantía de disponibilidad de las turbinas eólicas. Sin embargo, en caso de fallo de una turbina eólica o de una potencia de salida reducida de una turbina eólica, es decir, una turbina eólica que funciona con un rendimiento energético reducido es difícil cuantificar el rendimiento energético perdido. En este contexto, el rendimiento energético perdido es la diferencia entre el rendimiento energético realmente posible en caso de un funcionamiento normal con optimización de energía y el rendimiento energético real de una turbina eólica que funciona con un rendimiento energético reducido o que incluso falla o funciona sin rendimiento energético. Sin embargo, resulta difícil determinar el rendimiento energético real que sería posible en un funcionamiento normal con optimización de energía. Para ello habría que establecer un perfil exacto de la fuerza del viento con resolución local y temporal en la turbina eólica que funciona con un rendimiento energético reducido, lo que no es posible con exactitud y solo se puede llevar a cabo aproximadamente y de forma muy imprecisa con métodos conocidos, como por ejemplo un anemómetro de góndola o varios anemómetros de góndola en el área de la turbina eólica.

10 En caso de presencia de un mástil anemométrico cerca de la turbina eólica o del parque eólico, por medio de una curva de rendimiento de turbina eólica existente se podría calcular el rendimiento energético en el supuesto de que el viento en el plano del rotor correspondiera al viento en el mástil de medición. Sin embargo, este procedimiento también es demasiado impreciso debido a dicha suposición, que no corresponde a la realidad, en particular en caso de parques eólicos. Además, el planteamiento de utilizar el anemómetro de góndola de las turbinas eólicas que funcionan con un rendimiento energético reducido también es demasiado impreciso, ya que las góndolas y en caso dado también las palas de rotor de turbinas eólicas situadas en las inmediaciones falsean en gran medida la medición anemométrica.

15 El documento US 2010 0115951 A1 describe un parque eólico en el que están previstas varias turbinas eólicas, que están optimizadas con respecto a diferentes áreas de velocidad del viento.

El documento EP 2 028 368 A2 describe un parque eólico con numerosas turbinas eólicas y un procedimiento para operar el parque eólico, en donde un control superior calcula o recibe un valor actual máximo admisible para la magnitud eléctrica que ha de proporcionar el parque eólico, y el control superior transmite a cada turbina eólica un valor de consigna para la magnitud eléctrica.

30 El documento EP 1 944 509 A1 describe un sistema de alerta rápida para turbinas eólicas con SODAR.

El objetivo de la presente invención consiste en especificar un procedimiento para determinar una pérdida de rendimiento energético de una primera turbina eólica de un parque eólico con varias turbinas eólicas, funcionando la primera turbina eólica con un rendimiento energético reducido, que posibilite una determinación más exacta de la pérdida de rendimiento energético.

35 Este objetivo se resuelve mediante un procedimiento para determinar una pérdida de rendimiento energético de una primera turbina eólica de un parque eólico con varias turbinas eólicas, funcionando la primera turbina eólica con un rendimiento energético reducido que está fuera de un funcionamiento normal con optimización de energía, determinándose un rendimiento energético reducido de la primera turbina eólica, seleccionándose o estando seleccionada al menos una segunda turbina eólica de acuerdo con un criterio previamente definible, determinándose el rendimiento energético de la al menos una segunda turbina eólica, determinándose un potencial de rendimiento energético de la primera turbina eólica en función del rendimiento energético de la al menos una segunda turbina eólica, y calculándose la diferencia entre el potencial de rendimiento energético de la primera turbina eólica y el rendimiento energético reducido determinado.

45 La pérdida de rendimiento energético de la primera turbina eólica consiste entonces en la diferencia entre el potencial de rendimiento energético de la primera turbina eólica y el rendimiento energético reducido determinado, es decir, en particular el rendimiento energético medido de la primera turbina eólica. Por un funcionamiento normal con optimización de energía se ha de entender un funcionamiento de una turbina eólica que tiene el objetivo de generar una cantidad de energía óptima o una potencia óptima de la turbina eólica. Éste consiste, a partir de una velocidad nominal del viento, en el funcionamiento de la turbina eólica con potencia nominal y, antes de la velocidad nominal del viento, consiste normalmente en un funcionamiento en el que el rendimiento energético o la potencia generada aumentan con una fuerza creciente del viento. Al alcanzar la potencia nominal se llega a un funcionamiento a plena carga y antes de alcanzar la potencia nominal o la velocidad nominal del viento se llega a un funcionamiento a carga parcial, representando el funcionamiento a carga parcial también un funcionamiento normal con optimización de energía. Por ejemplo, en la imagen 14.5 de la página 546 del manual de Erich Hau, 4ª edición, con el título "Windkraftanlagen", Editorial Springer, Berlín, Heidelberg, están representadas curvas características usuales.

55 En la imagen 14.5 de la página 546 del manual de Erich Hau están representadas varias curvas características de funcionamiento para el intervalo de funcionamiento a carga parcial y el intervalo de funcionamiento a plena carga en

el campo característico de la potencia de rotor de una turbina eólica. Está representado el coeficiente de potencia de rotor en función de la velocidad específica. El coeficiente de potencia de rotor incluye la potencia suministrada por la turbina eólica y la velocidad específica incluye la velocidad del viento. En este ejemplo de realización se parte de una curva característica de funcionamiento en la que el ángulo de paso de las palas de rotor de la turbina eólica se ajusta primero a 5° con una alta velocidad específica, es decir, baja velocidad del viento (véase la línea gruesa discontinua). A partir de una velocidad específica determinada de aproximadamente 12,5 se conecta el generador, es decir, la turbina eólica se encuentra entonces en el funcionamiento a carga parcial. En este contexto, con una velocidad creciente se produce una mayor potencia, permaneciendo el ángulo de paso en 5°. A partir del punto de funcionamiento nominal, la turbina eólica pasa a un funcionamiento a plena carga, en el que, con una fuerza creciente del viento, el ángulo de paso se ajusta a ángulos más grandes. A partir de una velocidad del viento de desconexión con un ángulo de paso de aproximadamente 27°, la turbina eólica se desconecta. También existen variantes en las que, en caso de una velocidad del viento de desconexión, la turbina eólica todavía no se desconecta, sino que primero sigue funcionando con una potencia reducida con un mayor ángulo de las palas de rotor o de paso, para seguir produciendo potencia. Esto también puede representar un funcionamiento normal con optimización de energía. Por lo tanto, en el marco de la invención, un funcionamiento normal con optimización de energía es el desarrollo ejemplar representado en la imagen 14.5 de la página 546 en el manual de Erich Hau. Un funcionamiento con rendimiento energético reducido es un desarrollo situado por debajo de esta curva característica, es decir, que produce menos energía o potencia, en concreto normalmente ajustando un mayor ángulo de pala o ángulo de paso.

Preferiblemente se seleccionan, o están seleccionadas correspondientemente, al menos dos segundas turbinas eólicas, determinándose el rendimiento energético de las al menos dos segundas turbinas eólicas, y determinándose un potencial de rendimiento energético de la primera turbina eólica en función de los rendimientos energéticos de las al menos dos segundas turbinas eólicas.

La al menos una segunda turbina eólica o las al menos dos segundas turbinas eólicas funcionan según la invención en un funcionamiento normal con optimización de energía.

Correspondientemente se remite además al documento EP 0 847 496 B1, en cuya Figura 1 están representadas curvas características que sirven para indicar a la gestión de producción por ejemplo cómo se ha de conducir la curva de potencia en función de la velocidad del viento. En el caso de la operación o el funcionamiento correspondiente de la turbina eólica sobre la curva característica de la potencia en función de la velocidad del viento, que está representada en la Figura 1, también se trata del funcionamiento normal con optimización de energía. En caso de un funcionamiento de la primera turbina eólica, que presenta un funcionamiento con rendimiento energético reducido, estaría previsto un funcionamiento que estaría situado por debajo de la curva característica de la potencia en función de la velocidad del viento. En este contexto, preferiblemente también se puede tratar en particular de una parada o de un funcionamiento sin potencia de la primera turbina eólica.

El procedimiento es especialmente eficiente cuando los rendimientos energéticos de las al menos dos segundas turbinas eólicas se interpolan, extrapolan o promedian para determinar el potencial de rendimiento energético de la primera turbina eólica. En particular en el caso del promediado resulta un valor realista para el potencial de rendimiento energético de la primera turbina eólica. En este contexto también se puede utilizar en particular un valor medio ponderado, por ejemplo cuando sobre todo a partir de valores empíricos almacenados, en caso de determinados parámetros ambientales, como por ejemplo la dirección del viento y/o la fuerza del viento, se conoce una densificación de los rendimientos energéticos de la segunda turbina eólica respectiva que conduce a una indicación exacta del potencial de rendimiento de energía de la primera turbina eólica. Una densificación se puede llevar a cabo preferiblemente cuando se sabe que, con un parámetro ambiental predeterminado, una segunda turbina eólica es más parecida en el rendimiento energético que otra segunda turbina eólica. Una determinación del potencial de rendimiento energético se puede llevar a cabo de forma especialmente sencilla mediante interpolación. También puede tener sentido extrapolar los rendimientos energéticos correspondientes de las al menos dos segundas turbinas eólicas, sobre todo cuando para determinados parámetros ambientales o en caso de al menos un parámetro ambiental se conoce y/o está determinada y/o almacenada una relación de los rendimientos energéticos de las al menos dos segundas turbinas eólicas con respecto a la primera turbina eólica.

El procedimiento es especialmente preferible cuando se lleva a cabo de forma automática, en particular de forma totalmente automática. En el marco de la invención, por "totalmente automática" se entiende que el procedimiento se inicia de forma totalmente automática en cuanto una primera turbina eólica funciona fuera de un funcionamiento normal con optimización de energía, es decir, funciona con un rendimiento de energía reducido. El término "automático" implica que el procedimiento se lleva a cabo automáticamente después de haber sido iniciado por un operador.

Preferiblemente, el funcionamiento de la primera turbina eólica con un rendimiento de energía reducido consiste en una parada o en un funcionamiento sin potencia, por ejemplo un funcionamiento al ralentí, de la primera turbina eólica.

Preferiblemente, el parque eólico se divide o está dividido en al menos un primer y un segundo grupo de turbinas eólicas, procediendo la primera turbina eólica y la al menos una segunda turbina eólica del mismo grupo, o procediendo la primera turbina eólica y las al menos dos segundas turbinas eólicas del mismo grupo. En este caso, el criterio para la selección de las al menos dos segundas turbinas eólicas consiste en que las segundas turbinas eólicas pertenezcan al mismo grupo en el que se encuentra la primera turbina eólica.

5 Preferiblemente, el primer grupo de turbinas eólicas incluye turbinas eólicas sobre las que el viento incide libremente y el segundo grupo de turbinas eólicas incluye turbinas eólicas sobre las que el viento incide con interferencias. Las turbinas eólicas sobre las que el viento incide con interferencias consisten en turbinas eólicas en las que interfieren otras turbinas eólicas en lo que respecta a la incidencia del viento. Una interferencia se produce por ejemplo por una estela o una turbulencia de otras turbinas eólicas. Las turbinas sobre las que el viento incide libremente son por ejemplo aquellas que, a partir de una dirección del viento predeterminada, son las primeras turbinas eólicas sobre las que incide el viento. Las turbinas eólicas dispuestas detrás de éstas son normalmente turbinas eólicas sobre las que el viento incide con interferencias, ya que se encuentran en la zona de turbulencia de las turbinas eólicas sobre las que el viento incide libremente.

10 Si la primera turbina eólica pertenece al grupo de las turbinas eólicas sobre las que el viento incide libremente, la al menos una segunda turbina eólica o las al menos dos segundas turbinas eólicas también pertenecen a este grupo. Al contrario, las segundas turbinas eólicas pertenecen al grupo de las turbinas eólicas sobre las que el viento incide con interferencias cuando la primera turbina eólica también pertenece al grupo de las turbinas eólicas sobre las que el viento incide con interferencias. En este caso es especialmente preferible calcular un valor medio de los rendimientos energéticos del grupo respectivo de turbinas eólicas y aplicar este valor medio de las segundas turbinas eólicas de este grupo de turbinas eólicas como potencial de rendimiento energético de la primera turbina eólica. Mediante una fórmula, que se indica más abajo en el marco de las descripciones de las figuras, se puede calcular qué turbina eólica en función de la dirección del viento pertenece a las turbinas eólicas sobre las que el viento incide con interferencias y qué turbina eólica pertenece a las turbinas eólicas sobre las que el viento incide sin interferencias o el viento incide libremente. Preferiblemente, todas las segundas turbinas eólicas del grupo correspondiente se utilizan para determinar un valor medio de los rendimientos energéticos, con el fin de determinar de este modo el potencial de rendimiento energético de la primera turbina eólica.

15 Alternativa o adicionalmente, de forma preferible se puede crear o puede estar creada una lista de clasificación de los rendimientos energéticos de las turbinas eólicas del parque eólico. La lista de clasificación de los rendimientos energéticos se refiere al rendimiento energético o de potencia de la turbina eólica respectiva en el funcionamiento normal con optimización de energía, para poder prever una comparación correspondiente. La lista de clasificación de los rendimientos energéticos se puede crear o medir como una matriz pluridimensional en particular en función de diferentes direcciones del viento y/o diferentes fuerzas del viento.

20 Mediante el establecimiento de una lista de clasificación de los rendimientos energéticos es especialmente sencillo determinar un potencial de rendimiento energético de la primera turbina eólica, por ejemplo teniendo en cuenta el rendimiento energético de una o de al menos dos segundas turbinas eólicas para indicar el potencial de rendimiento energético de la primera turbina eólica. Para ello se tienen en cuenta preferiblemente la al menos una segunda turbina eólica o las al menos dos segundas turbinas eólicas que están situadas en la lista de clasificación de los rendimientos energéticos en posición vecina al rendimiento energético de la primera turbina eólica. En este contexto se pueden tener en cuenta los vecinos directos y también otros vecinos situados más lejos. El potencial de rendimiento energético de la primera turbina eólica también puede consistir por ejemplo simplemente en un valor medio de los rendimientos energéticos de las segundas turbinas eólicas vecinas. En este caso, el criterio para la selección de las al menos dos segundas turbinas eólicas consiste en que éstas sean vecinas de rendimiento energético de la primera turbina eólica. Se ha de tener en cuenta que, para la creación de la lista de clasificación de los rendimientos energéticos, preferiblemente todas las turbinas eólicas del parque eólico no funcionan con un rendimiento energético reducido, sino con un funcionamiento normal con optimización de energía. Preferiblemente, la lista de clasificación está almacenada en el sistema de gestión de producción correspondiente de las turbinas eólicas o en un sistema de control superior para el parque eólico.

25 Como ya se ha mencionado, el potencial de rendimiento energético de la primera turbina eólica depende preferiblemente de al menos un parámetro ambiental. El parámetro ambiental puede consistir en la dirección del viento, la fuerza del viento, la densidad del aire, una turbulencia predominante y/o un gradiente del viento.

Preferiblemente, para determinar el potencial de rendimiento energético de la primera turbina eólica se utilizan exclusivamente segundas turbinas eólicas con un funcionamiento normal con optimización de energía.

30 Preferiblemente, como criterio, en particular adicional, para la selección de una segunda turbina eólica está prevista una desviación estándar relativamente pequeña de la potencia activa determinada de la segunda turbina eólica en comparación con al menos otra segunda turbina eólica. Las segundas turbinas eólicas correspondientes que presentan una desviación estándar demasiado grande en el rendimiento energético o en el rendimiento de potencia se excluyen de la determinación del potencial de rendimiento energético de la primera turbina eólica, con el fin de aumentar correspondientemente la exactitud de la determinación del potencial de rendimiento energético de la primera turbina eólica.

35 Preferiblemente está establecida o se establece una matriz que indica la lista de clasificación de los rendimientos energéticos en función de la dirección del viento. Preferiblemente está establecida o se establece una matriz que indica la lista de clasificación de los rendimientos energéticos en función de otro parámetro ambiental. La matriz puede presentar por ejemplo una lista de clasificación de los rendimientos energéticos para diferentes direcciones del viento a intervalos de 5° o a intervalos de grados mayores o menores. La matriz también puede presentar adicionalmente la

lista de clasificación de los rendimientos energéticos en función de las fuerzas del viento a intervalos de 1 m/s o a intervalos mayores o menores. Además, la matriz puede incluir la densidad del aire como parámetro adicional. Los valores medidos obtenidos de este modo se almacenan entonces correspondientemente y se pueden ajustar y optimizar de forma adaptativa y continua en función de los parámetros ambientales reinantes. Preferiblemente resulta un sistema que aprende y va mejorando continuamente, con el que se puede determinar o calcular con mucha exactitud una pérdida de rendimiento energético de una primera turbina eólica por medio del rendimiento energético de turbinas eólicas vecinas en lo que respecta al rendimiento energético.

Correspondientemente, al dividir el parque eólico en al menos dos grupos de turbinas eólicas, la división en grupos también se puede llevar a cabo en función de parámetros ambientales, como la dirección del viento, la fuerza del viento, la temperatura del aire, el gradiente del viento y/o las turbulencias del viento y en caso dado también la presión atmosférica, y almacenar el resultado, para de este modo determinar o calcular de forma adaptativa y más afinada un resultado lo más exacto posible para el potencial de rendimiento energético de la primera turbina eólica.

Otras características de la invención se evidencian a partir de la descripción de formas de realización según la invención con las reivindicaciones y los dibujos adjuntos. Las formas de realización según la invención pueden corresponder a características individuales o a una combinación de varias características.

La invención se describe a continuación, sin limitar la idea general de la invención, por medio de ejemplos de realización con referencia a los dibujos. En relación con todos los detalles según la invención no explicados más detalladamente en el texto, se remite expresamente a los dibujos. Se muestran:

Figura 1 una vista superior de un parque eólico con 48 turbinas eólicas en caso de una dirección del viento determinada,

Figura 2 el parque eólico de la Figura 1 en una vista superior esquemática en caso de otra dirección del viento,

Figura 3 otro parque eólico en una vista superior con 16 turbinas eólicas,

Figura 4 una lista esquemática de los rendimientos energéticos del parque eólico de la Figura 3 en caso de una dirección del viento de 123°,

Figura 5 una lista esquemática de los rendimientos energéticos del parque eólico de la Figura 3 en caso de una dirección del viento de 340° y

Figura 6 un proceso simplificado para la creación de una lista de clasificación de los rendimientos energéticos de turbinas eólicas de un parque eólico.

En las siguientes figuras, los elementos iguales o similares o las partes correspondientes están provistos de las mismas referencias numéricas, por lo que se prescinde de una nueva presentación correspondiente.

Las Figuras 1 y 2 muestran esquemáticamente una vista superior de un parque eólico 51 con 48 turbinas eólicas. En las Figuras 1 y 2 se muestra además un viento 50 con una dirección del viento correspondiente representada esquemáticamente. Se puede distinguir que las turbinas eólicas provistas de un punto negro dibujado son turbinas eólicas sobre las que el viento 50 incide libremente, y las que están provistas de un triángulo gris son turbinas eólicas sobre las que el viento incide con interferencias. En el caso de la Figura 1, con una dirección del viento desde la izquierda en la Figura 1 según el viento 50, el viento incide libremente sobre las turbinas eólicas 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 11 y 13, y las otras turbinas eólicas están expuestas a las turbulencias de las turbinas eólicas sobre las que el viento incide libremente y también de las otras turbinas eólicas, y por lo tanto el viento incide sobre ellas con interferencias. Correspondientemente, en el caso de la dirección del viento 50 de la Figura 2, el viento incide libremente sobre las turbinas eólicas 1, 6, 7, 20, 21, 29, 36, 41, 42, 46, 47 y 48 de la Figura 2, e incide con interferencias sobre las otras turbinas eólicas, es decir, éstas están expuestas a interferencias de otras turbinas eólicas.

De este modo, el parque eólico 51 según las Figuras 1 y 2 se divide en dos grupos diferentes de turbinas eólicas en función de la dirección del viento. Se trata de turbinas eólicas que no están influidas por otras turbinas eólicas, y de turbinas eólicas que están influidas por otras turbinas eólicas. De acuerdo con la invención, para cada dirección del viento, por ejemplo en incrementos de 1° o incrementos menores o mayores, se calcula qué turbinas eólicas pertenecen a qué grupo. Esto se puede llevar a cabo en una primera etapa de acuerdo con la fórmula indicada en IEC 6140012-1

$$\alpha = 1,3 * \arctan\left(2,5 * \frac{D_n}{L_n} + 0,15\right) + 10$$

en la que α es un ángulo de un sector con interferencias, D_n es el diámetro del rotor de turbinas eólicas vecinas que están en funcionamiento, y L_n es la distancia entre la turbina eólica que se ha de determinar y la turbina eólica vecina

que está en funcionamiento. Como segunda etapa se indica una orientación del sector con interferencias de la siguiente manera:

$$\beta = \begin{cases} 90 - \arctan\left(\frac{dy}{dx}\right) & \text{para } x_0 > x \text{ e } y_0 > y \\ 90 + \arctan\left(\frac{dy}{dx}\right) & \text{para } x_0 > x \text{ e } y_0 < y \\ 270 - \arctan\left(\frac{dy}{dx}\right) & \text{para } x_0 < x \text{ e } y_0 < y \\ 270 + \arctan\left(\frac{dy}{dx}\right) & \text{para } x_0 < x \text{ e } y_0 > y \end{cases}$$

5 x_0 es la coordenada "x" de la turbina eólica vecina que está en funcionamiento, y_0 es la coordenada "y" de la turbina eólica vecina que está en funcionamiento, mostrándose las coordenadas "x" e "y" también en las Figuras 1 y 2. En este contexto, la coordenada "x" es la abscisa y la coordenada "y" es la ordenada. Correspondientemente, "x" e "y" son la coordenada "x" y la coordenada "y", respectivamente, de la turbina eólica en la que se ha de determinar si está interferida por otras turbinas eólicas. dx es la distancia en la abscisa entre la turbina eólica que ha de ser determinada y la turbina eólica vecina que está en funcionamiento, y dy es correspondientemente la distancia en la ordenada a este respecto. β es el ángulo entre la turbina eólica que ha de ser determinada y la turbina eólica vecina en comparación con la orientación norte.

Por último, mediante la siguiente fórmula

$$\gamma = |\beta - v_{dir}| - \frac{\alpha}{2}$$

15 se determina si la turbina eólica correspondiente pertenece a las turbinas eólicas expuestas a interferencias. Este es el caso cuando γ es negativo. A este respecto, γ es el ángulo de indicación de interferencia y v_{dir} es la dirección del viento. Estas etapas de cálculo se llevan a cabo para todas las turbinas eólicas que están en funcionamiento. Únicamente las turbinas eólicas que siempre presentan un γ positivo pertenecen al primer grupo de turbinas eólicas, en concreto las turbinas eólicas sobre las que el viento incide libremente. Todas las demás pertenecen al segundo grupo de turbinas eólicas, sobre las que el viento no incide libremente.

20 Para determinar ahora la pérdida de rendimiento energético de una turbina eólica parada o que funciona con rendimiento energético reducido, por ejemplo en un valor medio de 10 minutos de una dirección del viento se lleva a cabo la división correspondiente en grupos, y la pérdida de rendimiento de la turbina eólica que no está operativa o de la turbina eólica que funciona con un rendimiento energético reducido se aplica como valor medio del rendimiento energético de las segundas turbinas del grupo correspondiente. En este contexto también se puede tener en cuenta un intervalo de tiempo de 10 minutos. Por lo tanto, en caso de que por ejemplo la turbina eólica 2 esté parada con una dirección del viento conforme a la Figura 1, se calcula un valor medio de los rendimientos energéticos de las turbinas eólicas 1, 3, 4, 5, 7, 9, 11 y 13, y entonces el valor medio de los rendimientos energéticos o de la potencia activa de estas turbinas eólicas a lo largo de por ejemplo 10 minutos es correspondientemente el potencial de rendimiento energético de la turbina eólica 2. En caso de que la turbina eólica 2 solo funcione con una potencia o un rendimiento energético de un 50%, se calcula la diferencia entre la potencia posible y la potencia realmente generada. Correspondientemente, la turbina eólica que funciona con un rendimiento energético reducido puede ser una turbina eólica del grupo de las turbinas eólicas sobre las que el viento incide con interferencias, de modo que el potencial de rendimiento energético de esta primera turbina eólica consiste por ejemplo en un valor medio de los rendimientos energéticos determinados de las otras turbinas eólicas de este grupo.

35 El cálculo de los grupos se realiza por ejemplo con una precisión de un grado para cada intervalo de tiempo de 10 minutos. El procedimiento según la invención también conduce a resultados extraordinariamente buenos en caso de parques eólicos complejos, y también se puede refinar mediante una mayor cantidad de grupos. Por ejemplo puede estar previsto un grupo 3 que prevea interferencias múltiples. Por ejemplo, en la forma de realización conforme a la Figura 1 podría estar previsto un grupo 1 que incluyera las turbinas eólicas representadas como un círculo, un grupo 2 de las turbinas eólicas 6, 8, 10, 12, 14, 15, 16, 18 y 19, y el grupo 3 las demás turbinas eólicas. En determinadas circunstancias, esto puede conducir a resultados mejores y más exactos. No obstante, esto no ha de ser

necesariamente así, ya las condiciones de flujo complejas en la estela de turbinas eólicas o rotores eólicos también pueden conducir a efectos opuestos, lo que sin embargo depende de la dirección del viento y del diseño del parque eólico 51.

5 La Figura 3 muestra esquemáticamente otro parque eólico en una vista superior esquemática en la que están representadas una abscisa "x" y una ordenada "y". En este caso se muestran dos flechas de viento 50, que están dispuestas en ángulos diferentes, en concreto en un ángulo de 123° y en un ángulo de 340°, en cada caso en relación con la dirección del viento procedente del norte. Por medio del parque eólico 51 según la Figura 3 se ha de mostrar la creación de una lista de clasificación de todas las turbinas eólicas del parque eólico en función de su potencia o del rendimiento energético, y esto a su vez en función de la dirección del viento. En caso de un fallo o de una reducción del rendimiento energético de una turbina eólica, esta lista de clasificación sirve para determinar posibles compañeros energéticos a partir de cuyo valor medio o valor medio ponderado, o por interpolación o extrapolación de la productividad, se puede derivar la cantidad de energía perdida.

15 La cantidad de energía perdida consiste en el potencial de rendimiento energético de una turbina eólica parada, o en la diferencia entre el potencial de rendimiento energético y el rendimiento energético reducido de dicha turbina eólica siempre que ésta funcione con un rendimiento energético reducido. Por lo tanto, como referencia no se utilizan turbinas eólicas localmente fijas, es decir, turbinas eólicas vecinas en cuanto a su emplazamiento, sino turbinas eólicas que están más cercanas a la turbina eólica que no produce o la turbina eólica que funciona con un rendimiento energético reducido en lo que respecta a la producción de energía con unas condiciones marginales dadas, es decir, unos parámetros ambientales dados, como por ejemplo la dirección del viento o la fuerza del viento. Esta configuración de la invención tiene la ventaja de ser muy exacta.

20 La lista de clasificación también se puede utilizar correspondientemente para priorizar trabajos de mantenimiento, ya que por ejemplo solo se pueden someter a mantenimiento turbinas con poco rendimiento en caso de presencia de una dirección del viento correspondiente.

25 Para el parque eólico 51 de la Figura 3 con las 16 turbinas eólicas se establece una lista de clasificación de los rendimientos energéticos en función de la dirección del viento. Esto se puede llevar a cabo una vez y adaptar de forma continua para direcciones del viento y/o fuerzas del viento y/u otros parámetros ambientales correspondientes, de modo que la lista de clasificación 52 de los rendimientos energéticos se adapta correspondientemente a cambios en las turbinas eólicas, como por ejemplo actualizaciones de *software*, ensuciamientos de palas de rotor, y cambios en el emplazamiento, como por ejemplo la caída de árboles grandes. En este contexto se pueden medir o proporcionar los siguientes datos, como la posición de veletas, que preferiblemente también se proporciona promediada, o se archiva promediada, a partir de todas las veletas de cada turbina eólica del parque eólico 51, la posición de las góndolas de la turbina eólica correspondiente, una potencia activa o un rendimiento energético de la turbina eólica correspondiente, y un estado de la turbina eólica, por ejemplo si ésta está en orden o no está en orden. Aquí también se pueden utilizar valores medios, por ejemplo un valor medio de 10 minutos.

35 En la Figura 6 está representado esquemáticamente a modo de ejemplo un procedimiento para determinar una lista de clasificación 52 de los rendimientos energéticos. En 100 se comprueba si todas las turbinas eólicas 1 a 16 producen potencia o suministran un rendimiento energético. En 110 se calcula el valor medio de todas las posiciones de veletas. En 120 se mide la potencia activa de cada turbina eólica en un valor medio de 10 minutos, en 130 se normaliza la potencia activa de cada turbina eólica con la potencia activa más grande en el parque eólico. Con "la potencia activa más grande en el parque eólico" se hace referencia a una potencia activa que no está promediada a lo largo de 10 minutos, sino que es una potencia activa medida actual. También se puede prever una potencia activa a través de un valor medio temporal, y también a través de un valor medio de 10 minutos. La normalización tiene lugar para cada turbina eólica del parque eólico. En 140, los valores se almacenan en una n-tupla, como por ejemplo una 4-tupla, es decir, de cuatro dimensiones, en una matriz correspondiente, en particular dinámica, incluyendo por ejemplo una tupla la dirección del viento, el número de la turbina eólica, la potencia activa normalizada y el número de la medición, por ejemplo la medición n, siendo n un número entero.

45 En 150 en la Figura 6 se consulta si el procedimiento de medición se ha realizado n veces. El número n se puede predeterminar y puede ser por ejemplo 5. No obstante, n también puede ser 10 o 20. Si la respuesta a la pregunta es negativa (n), el procedimiento comienza de nuevo en 100, y si la respuesta a la pregunta es positiva (s), en 160 se calcula el valor medio de cada potencia activa normalizada de cada turbina eólica y una desviación estándar correspondiente.

55 En 170 se crea después la lista de clasificación, que está representada a modo de ejemplo en la Figura 4 y la Figura 5. En este contexto, la ordenada muestra la potencia activa normalizada y la abscisa muestra el número de la turbina eólica correspondiente, resultando el orden de las turbinas eólicas del rendimiento energético o de potencia. Si una turbina eólica presenta una desviación estándar demasiado grande de las potencias activas normalizadas para las n mediciones, ésta se puede excluir de la lista de clasificación.

La lista de clasificación 52 se ordena según el tamaño de la potencia activa normalizada y promediada. La desviación estándar refleja la fiabilidad del orden. Si los valores de desviación estándar están por encima de un valor límite, la dispersión es demasiado grande y se debería seleccionar alternativamente la siguiente mejor turbina de referencia o

turbina eólica vecina, si en ella la desviación estándar es claramente más pequeña.

La Figura 4 muestra esquemáticamente una lista de clasificación 52 de los rendimientos energéticos en caso de una dirección del viento de 123° y la Figura 5 muestra esquemáticamente una lista de clasificación 52 de los rendimientos energéticos en caso de una dirección del viento de 340°. Estas dos direcciones del viento están indicadas en la Figura 3. En el parque eólico de la Figura 3, una evaluación de un año de los datos medidos correspondientes ha dado como resultado las listas de clasificación de los rendimientos energéticos correspondientes para las diferentes direcciones del viento. Como ejemplos se muestran la Figura 4 y la Figura 5.

Si falla por ejemplo la turbina 7, para la determinación de la pérdida de rendimiento energético o el potencial de rendimiento energético en caso de una dirección del viento de 123° (véase la Figura 4) se pueden utilizar los vecinos energéticos 4 y 8 y en caso dado también 2 y 11. En este caso, los rendimientos energéticos o las potencias activas de estas turbinas eólicas que sí producen pueden ser utilizados para determinar el potencial de rendimiento energético de la turbina eólica 7. Esto puede tener lugar por ejemplo mediante cálculo del valor medio o interpolación o cálculo del valor medio ponderado. En el caso del cálculo del valor medio ponderado, por ejemplo el rendimiento energético de las turbinas eólicas 4 y 8 se valoraría con el doble de importancia que el rendimiento energético de las turbinas eólicas 2 y 11.

En caso de una dirección del viento de 340° (véase la Figura 5), los vecinos energéticos directos de la turbina eólica 7 son las turbinas eólicas 6 y 13 y los vecinos energéticos correspondientemente algo más alejados son las turbinas eólicas 11 y 5. Correspondientemente, mediante el rendimiento energético de estas turbinas eólicas (11 y 5 así como 6 y 13) se puede determinar el potencial de rendimiento energético de la turbina eólica 7. De este modo, a partir del valor medio de las potencias activas en el momento de parada actual de una primera turbina eólica, los vecinos energéticos se pueden utilizar para determinar la cantidad de energía que habría producido por ejemplo la turbina eólica 7. Como vecinos energéticos se entienden preferiblemente hasta un máximo de 5 turbinas eólicas vecinas en una dirección.

En un procedimiento especialmente ventajoso está previsto además que, para determinar el vecino energético, adicionalmente se comprueba si el vecino energético está situado en la turbulencia o en la estela de la primera turbina eólica (en este caso la turbina 7). Esta comprobación puede tener lugar de forma análoga a las fórmulas arriba indicadas para la determinación de la turbina eólica del grupo 2. Si el vecino energético está situado directamente en la estela, se excluye del cálculo, ya que es de esperar que el rendimiento energético cambie significativamente por el fallo de la primera turbina eólica. Entonces, para el procedimiento se recurre al siguiente vecino energético, en caso dado teniendo en cuenta un factor de ponderación. Esta forma de realización aumenta considerablemente la exactitud del procedimiento para parques eólicos en un terreno llano. No obstante, en caso de parques eólicos en un terreno montañoso, el resultado también puede ser más exacto sin esta comprobación adicional.

También se puede deducir una estrategia para priorizar trabajos de mantenimiento. Los tiempos de parada planificados, como por ejemplo un mantenimiento anual o un cambio de aceite, se podrían realizar, por ejemplo en caso de una dirección del viento de 340°, preferiblemente en la turbina 4 u 8 y no en la turbina 12 o 14.

Todas las características mencionadas, también las que se desprenden solo de los dibujos así como también características individuales descritas en combinación con otras características, se consideran individualmente o en combinación como esenciales de la invención. Las formas de realización según la invención pueden corresponder a características individuales o a una combinación de varias características.

Lista de símbolos de referencia

1-48 Turbina eólica

50 Viento

51 Parque eólico

52 Lista de clasificación de los rendimientos energéticos

100 Comprobar si todas las turbinas eólicas están produciendo

110 Cálculo del valor medio de todas las posiciones de veleta

120 Medición de la potencia activa de cada turbina eólica en ciclos de 10 minutos

130 Normalización de la potencia activa de la turbina eólica con la potencia más grande en el parque

140 Almacenamiento de los valores en una matriz dinámica por ejemplo de cuatro dimensiones (dirección del viento / turbina eólica / potencia activa normalizada / medición n)

150 Consultar si se ha realizado n veces

- 160 Cálculo del valor medio y de la desviación estándar
- 170 Creación de la lista de clasificación

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para determinar una pérdida de rendimiento energético de una primera turbina eólica (1-49) de un parque eólico (51) con varias turbinas eólicas (1-49), funcionando la primera turbina eólica (1-49) con un rendimiento energético reducido que está fuera de un funcionamiento normal con optimización de energía, determinándose un rendimiento energético reducido de la primera turbina eólica (1-49), seleccionándose o estando seleccionada al menos una segunda turbina eólica (1-49) con un funcionamiento normal con optimización de energía de acuerdo con un criterio previamente definible, determinándose el rendimiento energético de la al menos una segunda turbina eólica (1-49), determinándose un potencial de rendimiento energético de la primera turbina eólica (1-49) en función del rendimiento energético de la al menos una segunda turbina eólica (1-49), y calculándose la diferencia entre el potencial de rendimiento energético de la primera turbina eólica (1-49) y el rendimiento energético reducido determinado.
2. Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado por que se seleccionan o están seleccionadas al menos dos segundas turbinas eólicas (1-49), determinándose el rendimiento energético de las al menos dos segundas turbinas eólicas (1-49), y determinándose un potencial de rendimiento energético de la primera turbina eólica (1-49) en función de los rendimientos energéticos de las al menos dos segundas turbinas eólicas (1-49).
3. Procedimiento según la reivindicación 2, caracterizado por que para determinar el potencial de rendimiento energético de la primera turbina eólica (1-49) se interpolan, extrapolan o promedian los rendimientos energéticos de las al menos dos segundas turbinas eólicas (1-49).
4. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado por que el procedimiento se lleva a cabo de forma automática, en particular de forma totalmente automática.
5. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 4, caracterizado por que el funcionamiento de la primera turbina eólica (1-49) con un rendimiento de energía reducido consiste en una parada o en un funcionamiento sin potencia de la primera turbina eólica (1-49).
6. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 5, caracterizado por que el parque eólico (51) se divide o está dividido en al menos un primer y un segundo grupo de turbinas eólicas (1-49), y la primera turbina eólica (1-49) y la al menos una segunda turbina eólica (1-49) proceden del mismo grupo.
7. Procedimiento según la reivindicación 6, caracterizado por que el primer grupo de turbinas eólicas (1-49) incluye turbinas eólicas (1-49) sobre las que el viento (50) incide libremente y el segundo grupo de turbinas eólicas (1-49) incluye turbinas eólicas (1-49) sobre las que el viento (50) incide con interferencias.
8. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 7, caracterizado por que se crea una lista de clasificación (52) de los rendimientos energéticos de las turbinas eólicas (1-49) del parque eólico (51).
9. Procedimiento según la reivindicación 8, caracterizado por que la al menos una segunda turbina eólica (1-49) o las al menos dos segundas turbinas eólicas (1-49) están situadas en la lista de clasificación (52) de los rendimientos energéticos en posición vecina a la primera turbina eólica (1-49).
10. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 9, caracterizado por que el potencial de rendimiento energético de la primera turbina eólica (1-49) depende de al menos un parámetro ambiental.
11. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 10, caracterizado por que para determinar el potencial de rendimiento energético de la primera turbina eólica (1-49) se utilizan exclusivamente segundas turbinas eólicas (1-49) con un funcionamiento normal con optimización de energía.
12. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 11, caracterizado por que un criterio, en particular adicional, para la selección de una segunda turbina eólica (1-49) consiste en una desviación estándar relativamente pequeña de una potencia activa determinada de la segunda turbina eólica (1-49) en comparación con al menos otra segunda turbina eólica (1-49).
13. Procedimiento según una de las reivindicaciones 8 a 12, caracterizado por que se establece una matriz que presenta listas de clasificación (52) de los rendimientos energéticos en función de la dirección del viento.

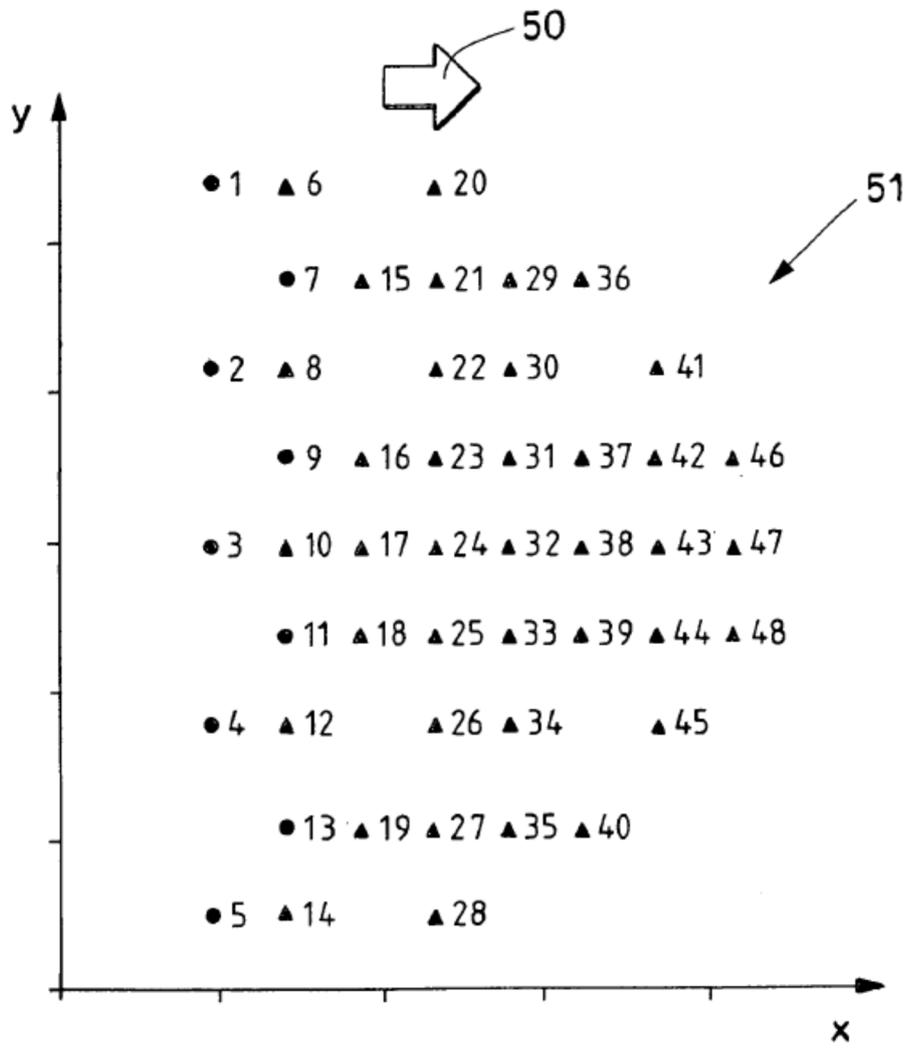


Fig. 1

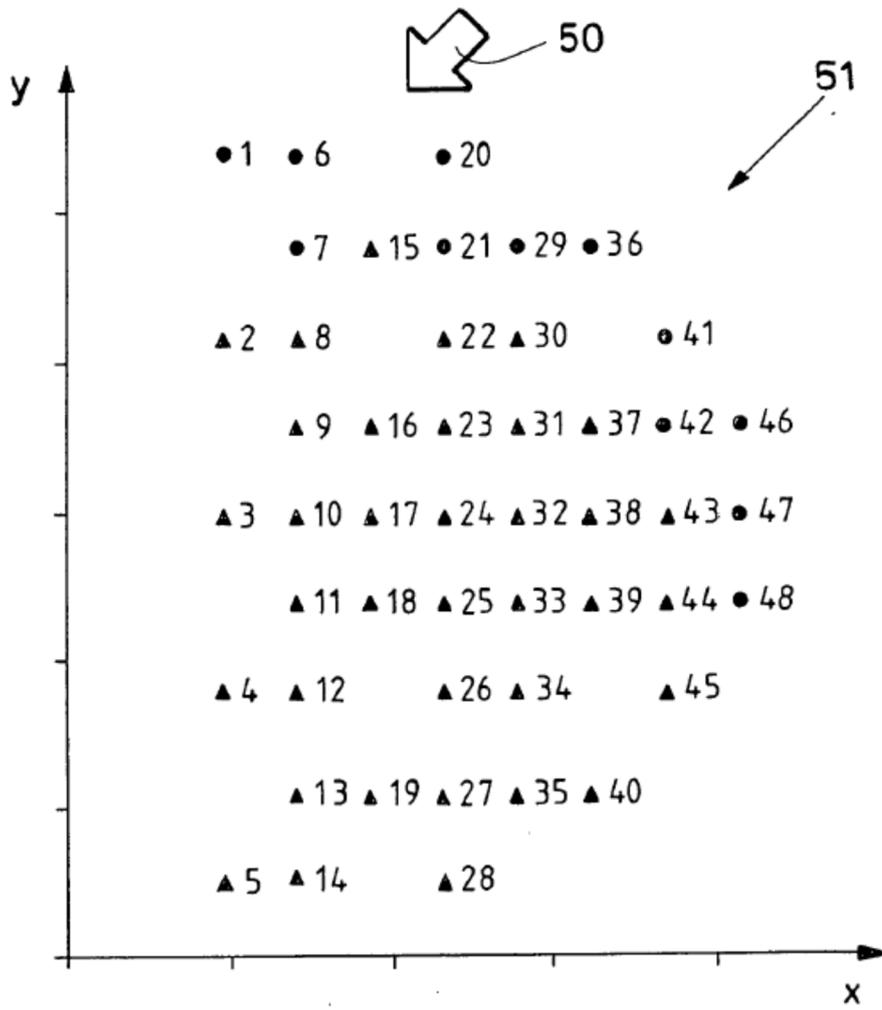


Fig. 2

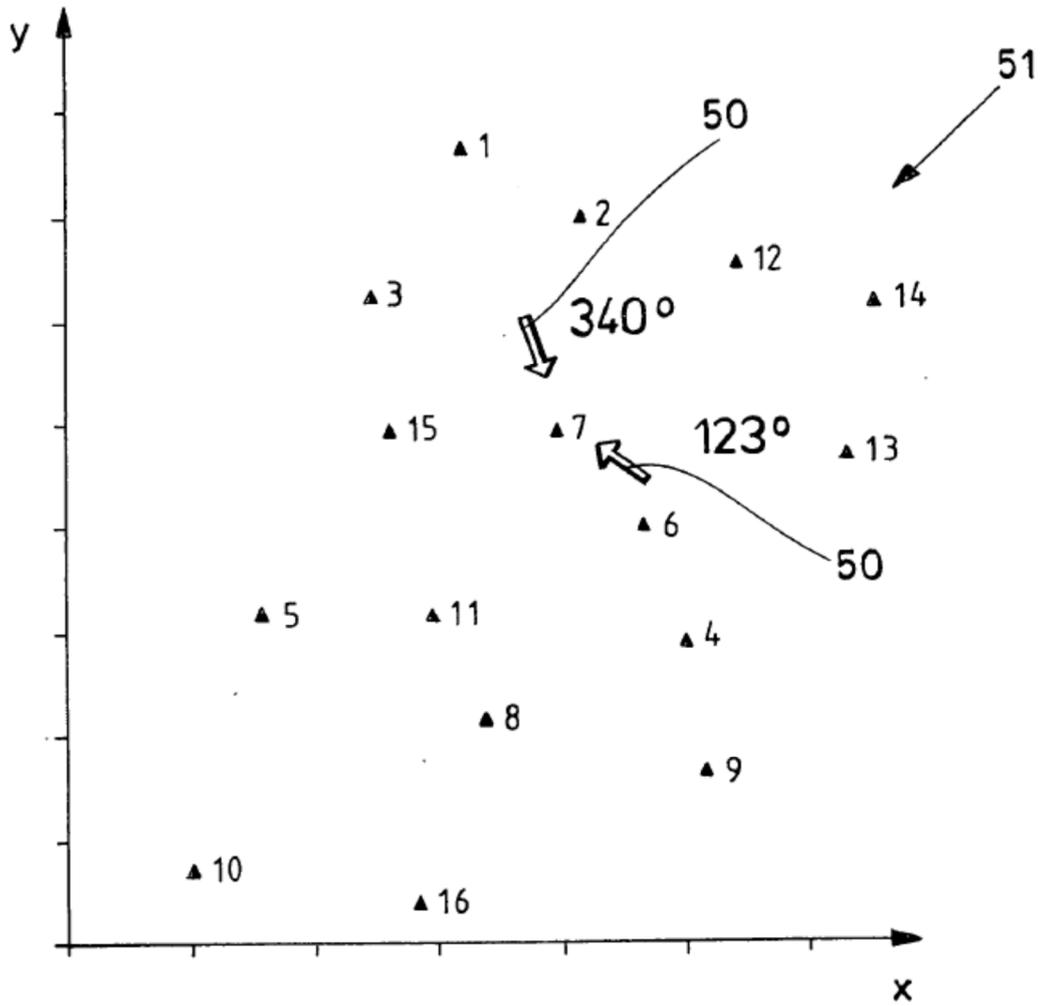


Fig. 3

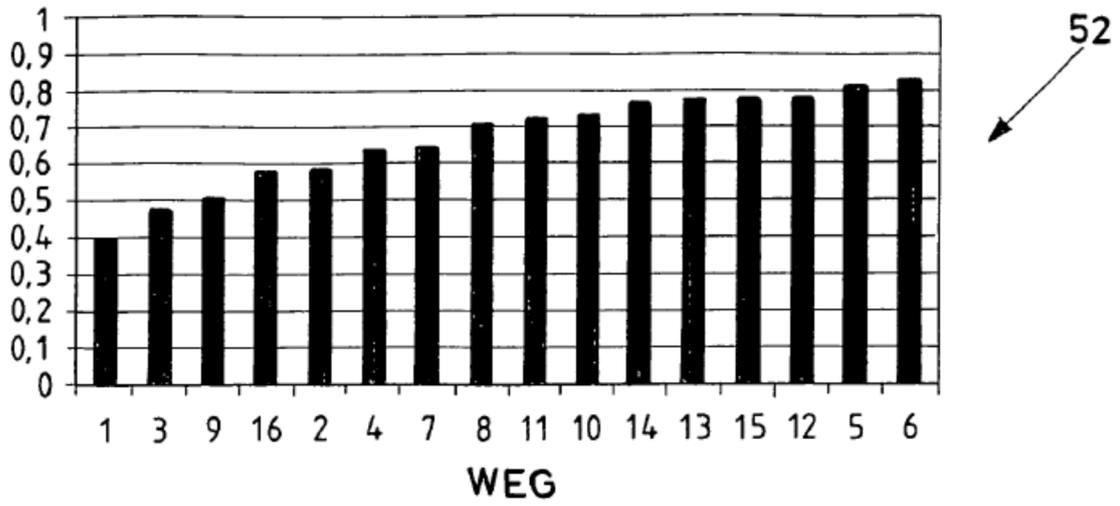


Fig. 4

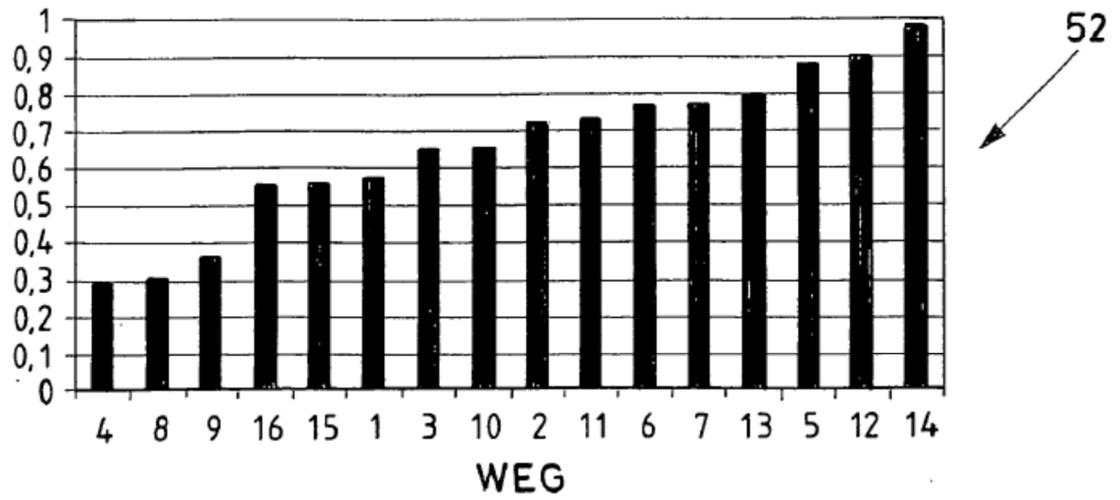


Fig. 5

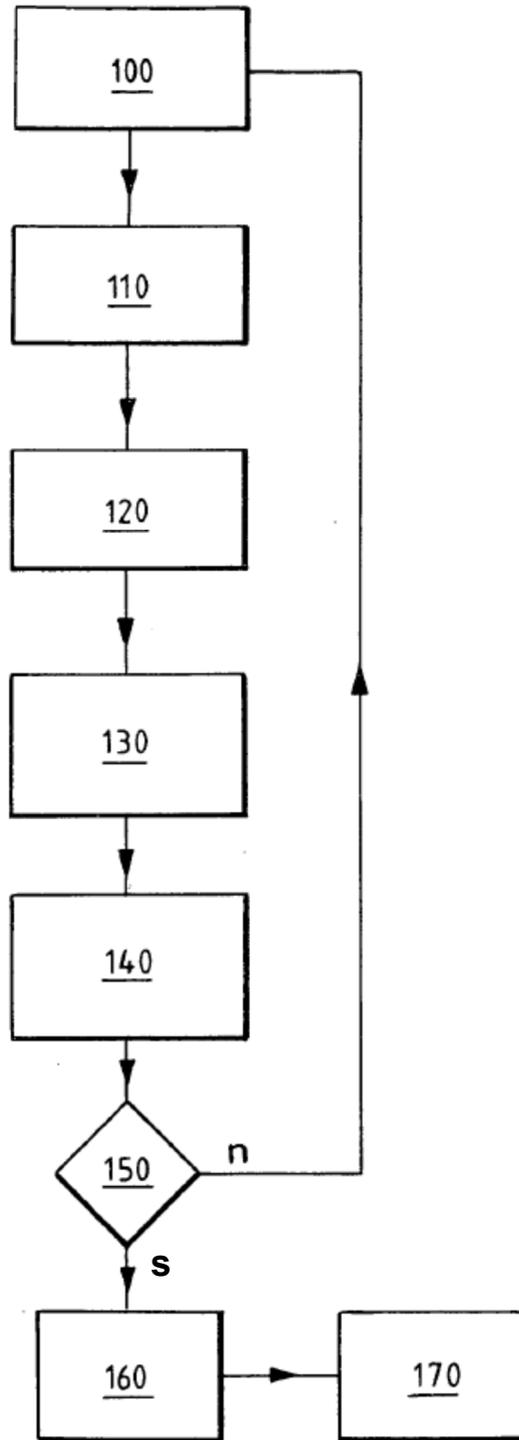


Fig. 6